



Anna Camila Sousa e Silva

**Simulação numérico-experimental de um sistema
híbrido solar/etanol/hidrogênio de geração de
energia elétrica**

Dissertação de Mestrado

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

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

Rio de Janeiro
Outubro de 2017



Anna Camila Sousa e Silva

**Simulação numérico-experimental de um sistema
híbrido solar/etanol/hidrogênio de geração de
energia elétrica**

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

Prof. Sergio Leal Braga

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Dr. Epifanio Mamani Ticona

Co-orientador

Instituto de Energia - PUC-Rio

Dr. Eduardo Torres Serra

ES+PS Consultoria

Dr. Francisco da Costa Lopes

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

Prof. Reinaldo Castro Souza

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Marcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 04 de Outubro de 2017

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

Anna Camila Sousa e Silva

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Desenvolveu, para a obtenção de seu grau de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica, um sistema híbrido de geração de energia elétrica utilizando fontes renováveis de energia no Laboratório de Engenharia Veicular da PUC-Rio.

Ficha Catalográfica

Silva, Anna Camila Sousa e

Simulação numérico-experimental de um sistema híbrido solar/etanol/hidrogênio de geração de energia elétrica / Anna Camila Sousa e Silva ; orientador: Sergio Leal Braga ; co-orientador: Epifanio Mamani Ticona. – 2017.

145 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2017.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Células a combustível. 3. Hidrogênio. 4. Painéis fotovoltaicos. 5. Sistemas de energia. 6. Energia renovável. 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

Ao meu orientador Prof. Dr. Sergio Leal Braga e ao meu co-orientador Dr. Epifanio Mamani Ticona pela orientação e apoio durante a realização desse trabalho.

A toda equipe que participou do projeto que motivou a realização desse trabalho Dr. Eduardo Torres Serra, Dr. José Geraldo de Melo Furtado, Dr. Francisco da Costa Lopes, Dr. Fabio Bellot Noronha e Eng^o. Adriano da Costa Rodrigues.

A equipe do LEV pelo auxílio na realização dos ensaios e instalação dos equipamentos, Eng^o. MSc. Nestor Correa Cotelo, Eng^o. Severino Antônio de Souza Wanderley, Jorge e Gerson.

Aos meus pais, Marcos e Sandra, por todo amor, carinho, atenção e incentivo.

Aos meus avós, Raul, Dalva, Antonio e Lourdes, pelo apoio, conselhos e carinho.

A meu irmão Marquinhos, pelo companheirismo, amizade e apoio.

Ao meu noivo José Carlos pela motivação e incentivo para que eu não desistisse.

A todos os meus amigos, primos e tios pelos momentos de descontração e apoio.

E a Lola que sempre deixou eu estudar e me animava durante os estudos e a dissertação.

A Guascor por incentivar um projeto desse porte e a bolsa oferecida durante a pesquisa.

Resumo

Silva, Anna Camila Sousa; Braga, Sergio Leal; Ticona, Epifanio Mamani. **Simulação numérico-experimental de um sistema híbrido solar/etano/hidrogênio de geração de energia elétrica.** Rio de Janeiro, 2017. 145p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho trata da implementação de um sistema integrado de fornecimento de energia elétrica a sistemas isolados da rede de distribuição através de célula a combustível, combustível renovável (etanol) e painéis fotovoltaicos. Apresenta como objetivo a construção de um simulador para a otimização do sistema integrado de fornecimento de energia elétrica. O sistema consiste em um reformador de hidrogênio que utiliza etanol para a reforma do hidrogênio, uma célula a combustível do tipo PEM, painéis fotovoltaicos, banco de baterias de chumbo, inversor de corrente, compressor de hidrogênio. O sistema foi dimensionado para atender um consumidor SIGFI 45. A partir da implementação do sistema foram realizados diferentes tipos de ensaios a fim de caracterizar o funcionamento de cada um dos equipamentos separadamente. Conhecendo o funcionamento de cada equipamento foi possível simular o funcionamento deles em diferentes condições de operação. Posteriormente foi implementado um simulador em VBA desse sistema e os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com os simulados para a validação desse simulador. Com o simulador validado foi possível simular diversos casos de operação com o intuito de otimizar o funcionamento desse sistema.

Palavras-chave

Célula a combustível; hidrogênio; painéis fotovoltaicos; sistemas de energia; energia renovável.

Abstract

Silva, Anna Camila Sousa; Braga, Sergio Leal (Advisor); Ticona, Epifanio Mamani (Coadvisor). **Numerical and experimental simulation of a hybrid solar/ethanol/hydrogen of an electrical generation system.** Rio de Janeiro, 2017. 145p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This current work deals with the implementation of an integrated electrical power supply system with isolated fuel cell distribution networks: renewable fuel (ethanol) and photovoltaic panels. This thesis presents the objective of constructing a simulator in order to optimize the integrated electrical power supply system. The system consists of a hydrogen reformer that uses ethanol to produce hydrogen, a PEM fuel cell, photovoltaic panels, lead battery bank, current inverter, hydrogen compressor. The system has been sized to meet SIGFI 45 consumer. During the implementation and application of the system, different types of tests were carried out in order to characterize the behavior of each component separately. Knowing the function of each component within the system, it was possible to simulate their behavior in different operating conditions. Later, a VBA simulator of this system was created and then implemented. The results produced by the simulator were compared with those carried out experimentally to validate the accuracy of this simulation. With the validation of the simulator it was possible to simulate several operational cases in order to optimize the function of this system.

Keywords

Fuel cell; hydrogen; photovoltaic panels; energy systems; renewable energy.

Sumário

1	Introdução	15
1.1.	Objetivos do trabalho	15
1.2.	Motivação	15
1.3.	Organização do trabalho	17
2	Revisão bibliográfica	18
2.1.	Sistemas utilizando Células a Combustível e hidrogênio	18
2.2.	Sistemas híbridos utilizando energia solar, células a combustível e hidrogênio	19
2.3.	Sistemas utilizando energia solar, eólica, células a combustível e hidrogênio	22
2.4.	Reformador	23
3	Projeto Conceitual	25
3.1.	Descrição do projeto	25
3.2.	Metodologia	26
3.3.	O Projeto	28
3.4.	Reformador de Etanol	30
3.5.	Célula a Combustível	33
3.6.	Compressor de hidrogênio	36
3.7.	Inversor	40
3.8.	Banco de baterias	42
3.9.	Sistema fotovoltaico	43
4	Caracterização energética dos equipamentos	44
4.1.	Reformador de etanol	44
4.1.1.	Metodologia dos ensaios	45
4.1.2.	Análise dos resultados	46
4.1.3.	Conclusões parciais da seção	50
4.2.	Compressor de hidrogênio	50
4.2.1.	Metodologia dos ensaios	52
4.2.2.	Análise dos resultados	53
4.2.3.	Conclusões parciais da seção	55
4.3.	Célula a combustível	56
4.3.1.	Ensaio com cargas fixas	56

4.3.2. Ensaio utilizando a carga SIGIFI45	60
4.3.3. Conclusões parciais da seção	61
4.4. Inversor	61
4.4.1. Metodologia dos ensaios	62
4.4.2. Análise dos resultados	62
4.4.3. Conclusões parciais da seção	64
4.5. Baterias	66
4.5.1. Carregamento do banco de baterias	66
4.5.2. Descarga do banco de baterias com carga fixa	68
4.5.3. Descarga do banco de baterias com cargas variadas para um mesmo estado de carga	71
4.5.4. Descarga do banco de baterias com carga de um consumidor com perfil SIGFI 45	72
4.6. Sistema de armazenamento de Hidrogênio	74
5 Simulação numérica	77
5.1. Simulador PARTE 1 (CaC + Bateria + Inversor + cilindros de hidrogênio)	78
5.1.1. Banco de baterias	78
5.1.2. Célula a combustível (CaC)	81
5.1.3. Cilindros de hidrogênio	81
5.1.4. Inversor	82
5.2. Simulador PARTE 2 (Parte 1 + reformador + compressor)	83
5.2.1. Reformador	83
5.2.2. Compressor	84
5.2.3. Inversor	84
5.3. Simulador PARTE 3 (Parte 2 + Painéis FV)	85
5.4. Solução Numérica	87
6 Validação do simulador e apresentação de casos típicos	89
6.1. Validação do simulador	89
6.1.1. Caso 1V	89
6.1.2. Caso 2V	91
6.1.3. Caso 3V	92
6.2. Comportamento do sistema a partir de Casos Simulados	93
6.2.1. Caso 1S	93
6.2.2. Caso 2S	95
6.2.3. Caso 3S1 e Caso 3S2	95

6.2.4. Caso 4S	97
6.2.5. Caso 5S	99
7 Estudo de viabilidade do sistema	103
7.1. Estudo de viabilidade do sistema com painéis	103
7.1.1. Parâmetros do reformador para o sistema com os painéis	106
7.2. Estudo de viabilidade do sistema sem painéis	112
7.2.1. Parâmetros do reformador para o sistema sem os painéis	114
7.3. Conclusões da seção	120
8 Conclusão	121
9 Referências bibliográficas	123
Anexo I Catálogos	126
AI.1. Reformador de Etanol	126
AI.2. Célula a Combustível	128
AI.3. Compressor de hidrogênio	129
AI.4. Inversor Sunny Island 3.0M	130
AI.5. Controlador de Carga	131
Anexo II Tratamento de Dados Relativos às Purgas de Hidrogênio na Célula a Combustível	132
Anexo III Calibrações	136
AIII.1. Calibração da pressão	136
AIII.2. Calibração da corrente fornecida pela CaC	137
AIII.3. Calibração da tensão	139
AIII.4. Calibração da corrente do inversor	140
AIII.5. Calibração da corrente fornecida pela bateria	142
Anexo IV Simulador	145

Lista de Figuras

Figura 1 - Oferta de energia elétrica por fonte. <i>Fonte: BEN 2016, Ministério de Minas e Energia</i>	16
Figura 2 - Poder calorífico inferior de diversas fontes de energia Densidade de energia de diferentes fontes de energia. <i>Fonte McPhy, 2016</i>	16
Figura 3 - Concepção do sistema integrado conforme submetido na proposta de projeto.	29
Figura 4 - Diagrama de blocos com ligações e conexões entre os equipamentos na configuração final do projeto.	30
Figura 5 - Diagrama simplificado do processo de reforma do etanol.	31
Figura 6 - Vista do reformador de etanol instalado na PUC-Rio (tampa frontal retirada).	32
Figura 7 - Detalhes adicionais da instalação do reformador de etanol na PUC-Rio.	33
Figura 8 - Princípio básico de funcionamento de uma CaC de baixa temperatura utilizando hidrogênio.	34
Figura 9 - Célula a combustível modelo E-2200x da Reli-On (24/48 V, 2,2 kW).....	35
Figura 10 - Unidade de célula a combustível Reli-On utilizada no projeto no seu local de instalação.	36
Figura 11 - Cubículos com cilindros de armazenamento de hidrogênio e compressor.....	38
Figura 12 - Montagem do conjunto de controle e medição da vazão de hidrogênio.....	39
Figura 13 - Painel de controle de pressão de hidrogênio na entrada da CaC.....	40
Figura 14 - Vista do inversor (aberto) durante o procedimento de comissionamento.	41
Figura 15 - Medição indireta do estado de carga das baterias por meio do dispositivo <i>Sunny Remote Control</i> do inversor SMA.	42

Figura 16 - Vista do banco de baterias empregado no sistema de geração.	43
Figura 17 - Análise energética do reformador de hidrogênio	45
Figura 18 - Consumo elétrico para as 3 fases.....	47
Figura 19 - Consumo elétrico em função da produção de hidrogênio.....	47
Figura 20 - Consumo elétrico para todos os ensaios realizados	48
Figura 21 - Consumo elétrico na fase de produção de hidrogênio.....	49
Figura 22 - Análise energética do compressor de hidrogênio	51
Figura 23 – Montagem experimental para a caracterização energética do compressor.....	52
Figura 24 - Demanda do compressor de hidrogênio	55
Figura 25 - Análise energética da Célula a Combustível.....	56
Figura 26 - Vazão de hidrogênio, incluindo as purgas periódicas	57
Figura 27 - Vazão de hidrogênio no ensaio de com carga de 800 W	58
Figura 28 - Consumo específico da Célula a combustível	60
Figura 29 - Potência consumida e potência gerada pela CaC	60
Figura 30 - Estado de carga do banco de baterias durante o ensaio	61
Figura 31 - Destaque da região de interesse para a caracterização do inversor	62
Figura 32 - Perfil de eficiência do inversor	64
Figura 33 - Sobreposição dos valores experimentais e teóricos	65
Figura 34 - Eficiência do inversor.....	66
Figura 35 - Ensaio de armazenamento de energia no banco de baterias	67
Figura 36 - Eficiência da bateria em função do estado de carga – Ref: By Jssaten EEEJuly 20, 2016	68
Figura 37 - Região de interesse dos ensaios de descarga da bateria.....	69
Figura 38 - Curvas reais de descarga para diferentes cargas fixas	69
Figura 39 - Descarga do banco de baterias para diferentes estados de carga	72
Figura 40 - Perfil da Carga SIGFI 45 durante o ensaio	73
Figura 41 - Estado de Carga para 100Ah.....	74
Figura 42 - Volume de controle para caracterização dos cilindros de alta pressão	75

Figura 43 - Comparação da pressão medida com a calculada no interior dos cilindros de alta pressão.....	76
Figura 44 - Esquema da Parte 1 do simulador	78
Figura 45 - Modelagem da bateria (adaptado de Jackey, 2007)	79
Figura 46 - Esquema da Parte 2 do simulador	83
Figura 47 - Esquema da Parte 3 do simulador	85
Figura 48 - Modos de operação dos painéis fotovoltaicos	86
Figura 49 - Potência máxima fornecida pelos painéis em diferentes condições de radiação.	87
Figura 50 - Circuito elétrico equivalente do sistema híbrido de geração de energia elétrica.....	88
Figura 51 - Comparação entre o estado de carga (SOC) experimental e simulado para o caso 1V.....	90
Figura 52 - Comparação da carga alimentada experimental com a simulada no caso 1V	90
Figura 53 - Comparação entre o estado de carga simulado e experimental Caso 2V	91
Figura 54 - Comparação da carga alimentada experimental com a simulada no Caso 2V	92
Figura 55 - Comparação entre SOC experimental e simulado (Caso 3V)	93
Figura 56 - Variação da pressão dos cilindros de hidrogênio com a CaC alimentando a carga SIGFI 45 (Caso 1S)	94
Figura 57 - Variação do SOC quando a CaC não pode mais operar por esgotamento do hidrogênio armazenado (Caso 1S).....	94
Figura 58 - Variação do SOC do banco de baterias (Caso 2S).....	95
Figura 59 - Variação do SOC na simulação (Caso 3S1)	96
Figura 60 - Variação do SOC na simulação (Caso 3S2)	96
Figura 61 - SOC do banco de baterias (Caso 4S).....	98
Figura 62 - Variação da pressão de hidrogênio nos cilindros (Caso 4S)..	98
Figura 63 - Carga alimentada (Caso 4S).....	99
Figura 64 - Estado de carga (Caso 5S).....	100
Figura 65 - Variação da pressão nos cilindros (Caso 5S)	101
Figura 66 - Variação da pressão nos cilindros no Caos 5S com o reformador produzindo hidrogênio durante 6 horas	102

Figura 67 - Variação na pressão dos cilindros de hidrogênio para diferentes valores de LVS com $SOC_{inicial} = 100\%$	103
Figura 68 - Variação na pressão dos cilindros de hidrogênio para diferentes valores de LVS com $SOC_{inicial} = 20\%$	104
Figura 69 - Variação dos estado de carga com $SOC_{inicial} = 100\%$	105
Figura 70 - Variação dos estado de carga com $SOC_{inicial} = 20\%$	105
Figura 71 - Variação do estado de carga da bateria com diferentes tempos de produção	107
Figura 72 - Variação de pressão nos cilindros de hidrogênio.....	107
Figura 73 - Pressão de H_2 Simulada durante 9 dias consecutivos com painéis ligados.....	109
Figura 74 - Variação do estado de carga Simulado durante 10 dias consecutivos com painéis ligados.	110
Figura 75 - Variação do estado de carga da bateria com diferentes tempos de produção.	111
Figura 76 - Variação de pressão nos cilindros de hidrogênio.....	111
Figura 77 - Variação na pressão dos cilindros de hidrogênio para diferentes valores de LVS com $SOC_{inicial} = 100\%$	112
Figura 78 - Variação na pressão dos cilindros de hidrogênio para diferentes valores de LVS com $SOC_{inicial} = 20\%$	113
Figura 79 - Variação dos estado de carga com $SOC_{inicial} = 100\%$	113
Figura 80 - Variação dos estado de carga com $SOC_{inicial} = 20\%$	114
Figura 81 - Variação do estado de carga da bateria com diferentes tempos de produção.	115
Figura 82 - Variação de pressão nos cilindros de hidrogênio.....	116
Figura 83 - Pressão de H_2 Simulada durante 4 dias consecutivos com painéis desligados.....	117
Figura 84 - Variação do estado de carga Simulado durante 10 dias consecutivos com painéis ligados.	118
Figura 85 - Variação do estado de carga da bateria com diferentes tempos de produção.	119
Figura 86 - Variação da pressão nos cilindros de hidrogênio.....	119

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Valores experimentais obtido em um dos ensaios de caracterização do reformador de etanol.....	46
Tabela 2 - Consumo elétrico para fase de aquecimento e resfriamento ..	49
Tabela 3 - Resultados dos ensaios do compressor de hidrogênio	53
Tabela 4 - Resultados dos ensaios da Célula a combustível	58
Tabela 5 - Resultados ensaios com o Inversor	63
Tabela 6 - Ensaio de carga do banco de baterias	67
Tabela 7 - Cálculo das eficiências para diferentes cargas	70
Tabela 8 - Consumo elétrico do reformador	84
Tabela 9 - Casos de entrada Caso 1V	90
Tabela 10 - Dados de entrada Caso 2V	91
Tabela 11 - Dados de entrada Caso 3V	92
Tabela 12 - Dados de entrada Caso 4S	97
Tabela 13 - Dados de entrada Caso 5S	100
Tabela 14 - Relação entre volume consumido de etanol e volume produzido de hidrogênio.....	108
Tabela 15 - Relação entre volume consumido de etanol e volume produzido de hidrogênio.....	116

1 Introdução

O presente trabalho trata da implementação de um sistema de geração de energia elétrica para aplicações isoladas da rede de distribuição elétrica. Utilizando fontes renováveis de energia.

Os principais subsistemas desse sistema são: reformador de etanol, célula a combustível (CaC) do tipo PEM, compressor de hidrogênio, banco de baterias e módulos fotovoltaicos.

1.1. Objetivos do trabalho

Um dos objetivos deste trabalho é a integração de um sistema híbrido de geração de energia elétrica a partir de células a combustível alimentadas com hidrogênio proveniente da reforma do etanol produzindo hidrogênio e da utilização de painéis fotovoltaicos para aproveitamento da energia solar.

O sistema tem como objetivo fornecer energia elétrica para um consumidor que segue o perfil de consumo SIGFI 45. O perfil SIGFI 45 é definido pela ANEEL como um consumidor que consome 45 kWh/mês.

O principal objetivo do trabalho foi a construção de um simulador necessário para rodar diversos casos com objetivo de otimizar o funcionamento do sistema. Para a validação desse simulador foram feitos alguns ensaios e esses foram comparados com os casos simulados.

1.2. Motivação

A utilização de fontes renováveis de energia, como a solar e o hidrogênio além de reduzir impactos ambientais, diversificam a matriz energética brasileira que, de acordo com o Balanço energético nacional (BEN) de 2016, ainda apresentam participação desprezível na geração de energia elétrica do país. A Figura 1 mostra a oferta de energia elétrica por fonte no ano de 2015 no Brasil. A energia solar apresenta 0,01% de participação na matriz energética brasileira.

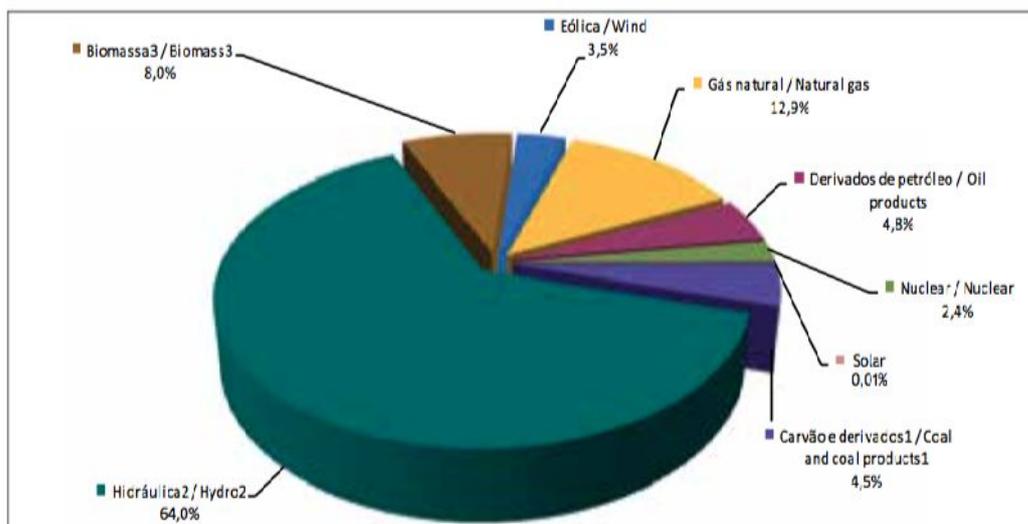


Figura 1 - Oferta de energia elétrica por fonte. *Fonte: BEN 2016, Ministério de Minas e Energia*

O hidrogênio é apresentado como uma fonte alternativa. É possível extraí-lo de diversas fontes. A Figura 2 mostra o poder calorífico inferior PCI de diferentes fontes. É possível observar que o hidrogênio fornece mais energia por quilograma quando comparado a outras fontes de energia já muito utilizadas no cenário nacional.

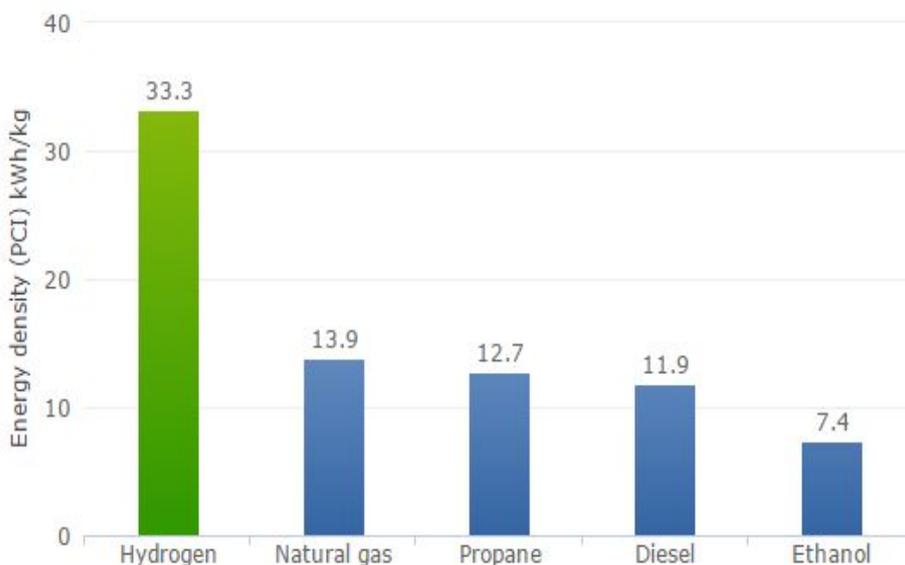


Figura 2 - Poder calorífico inferior de diversas fontes de energia. Densidade de energia de diferentes fontes de energia. *Fonte McPhy, 2016*

De acordo com o documento denominado “Energy for Tomorrow’s World - Acting Now!”, publicado pelo World Energy Council (WEC), New York, 2000, no atual cenário energético, a população dos países industrializados (pouco mais de

1 bilhão de pessoas) corresponde a menos de 20% da população mundial e consome cerca de 60% da oferta de energia enquanto que o restante desta oferta é compartilhado, ainda que de forma bastante desigual, pela população dos países em desenvolvimento. Dessa forma, tem-se considerado que a prioridade mundial para o desenvolvimento sustentável seria de estender, no horizonte até 2020, o acesso aos serviços comerciais de energia às populações que não o possuíam e para todos aqueles que nasceriam naquele período.

O objetivo imediato, em termos de acesso per capita de energia elétrica para as populações pobres, seria da ordem de 300 kWh/ano, com uma meta de crescimento para 500 kWh/ano até 2020. Considerando-se uma residência com cinco pessoas e tendo como consumo per capita mínimo de 500 kWh/ano, teríamos um consumo de 2.500 kWh/ano (6,85 kWh/dia) por residência. No caso específico deste projeto a instalação piloto foi dimensionada para atender um consumidor da classe SIGFI 45 (45 kWh/mês, 1,5 kWh/dia).

1.3. Organização do trabalho

O presente trabalho encontra-se dividido em oito capítulos.

O primeiro capítulo aborda a introdução, motivação e objetivos.

O capítulo dois é uma revisão bibliográfica de trabalhos com célula a combustível e painéis fotovoltaicos.

O terceiro capítulo trata do projeto conceitual, sua descrição, metodologia e a descrição de cada equipamento separadamente.

No capítulo quatro encontra-se a caracterização energética de cada equipamento separadamente.

O capítulo cinco explica como foi feita a simulação numérica feita em linguagem VBA (Visual Basic for Application).

No capítulo seis é feita a validação do simulador comparando casos experimentais com simulados e são apresentados alguns casos típicos.

A otimização do sistema com e sem painéis fotovoltaicos integrados ao sistema é feita no capítulo sete.

A conclusão do trabalho é apresentada no capítulo oito.

2 Revisão bibliográfica

O presente capítulo tem como objetivo descrever as principais características de sistemas híbridos de geração de energia elétrica para aplicações em regiões isoladas. Alguns desses sistemas utilizam energia solar e células a combustível, como o sistema apresentado aqui. A principal diferença entre o sistema estudado e os apresentados nesse capítulo é em relação à produção de hidrogênio, o qual, neste estudo, foi produzido a partir da reforma do etanol e, nos trabalhos apresentados como referência neste capítulo, o hidrogênio foi originado por meio de um hidrolisador ou eletrolisador. Alguns trabalhos também utilizam energia eólica, porém, o sistema ao qual a presente dissertação se refere não faz uso deste tipo de energia.

2.1. Sistemas utilizando Células a Combustível e hidrogênio

Agbossou *et al.*, (2004) desenvolveram uma energia renovável autônoma (RE) baseada em armazenamento de energia sob a forma de hidrogênio. Quando os dispositivos de entrada (turbina eólica e módulo fotovoltaico) produzem mais energia do que a exigida pela carga, o excesso da mesma é convertido por um eletrolisador em hidrogênio, o qual é armazenado, após etapas de compressão, purificação e filtração. Por outro lado, durante um período de déficit de energia na entrada, este processo é revertido e o hidrogênio produzido anteriormente é transformado em energia elétrica, através de uma célula de combustível. O oxigênio, produzido pelo eletrolisador durante a produção de hidrogênio, também é armazenado em alta pressão, após ter passado por um processo de purificação e secagem. Este oxigênio armazenado pode ser reutilizado como oxidante ao vez de ar comprimido na célula a combustível. Vale destacar, que foram feitas modificações no eletrolisador para o armazenamento de oxigênio e a sua reutilização como oxidante para a célula de combustível. Além disso, o grupo projetou e desenvolveu o sistema de controle com dispositivos de condicionamento de energia, os quais têm como objetivo promover um efetivo gerenciamento de energia e uma satisfatória operação

automática do sistema RE. Os resultados experimentais mostraram que um sistema RE autônomo confiável pode ser aplicado para tais fontes de energia intermitentes, usando o hidrogênio armazenado como o buffer de energia a longo prazo. Concluiu-se, ainda, que há um aumento significativo no desempenho do sistema ao utilizar o subproduto de oxigênio como oxidante na célula a combustível..

Bernier *et al.*, (2005) propuseram um sistema para demonstrar que o hidrogênio pode ser usado para armazenamento de energia estacionária a longo prazo. No sistema em questão, um eletrolisador e uma célula a combustível foram integrados em um sistema autônomo de energia renovável de pequena escala.. O desempenho econômico e ambiental desse sistema está relacionado à capacidade do eletrolisador em converter energia elétrica em hidrogênio e, também, à capacidade da célula a combustível em converter o hidrogênio em energia elétrica. Juntos, eles definem a eficiência de ida e volta do sistema de armazenamento de hidrogênio. Uma maneira promissora de melhorar a eficiência e reduzir os custos de capital da célula a combustível é recuperar o oxigênio do eletrolisador e utilizá-lo como oxidante de células a combustível, e não como ar comprimido. Este trabalho apresentou modificações realizadas no sistema a fim de implementar a recuperação de oxigênio. A eficiência do sistema de ida e volta foi de 18%, com recuperação de oxigênio, diante de 13,5% sem esta prática.

2.2.

Sistemas híbridos utilizando energia solar, células a combustível e hidrogênio

Abdin *et al.*, (2011) fizeram um estudo sobre sistemas híbridos utilizando energia do hidrogênio e solar voltados para o fornecimento autônomo de eletricidade.

Para o presente trabalho foi desenvolvida uma pesquisa de estudos de casos de sistemas híbridos de fornecimento de energia enfatizando a integração e otimização.

Os sistemas de energia, compostos de eletrolisadores com capacidades de potência entre 1 e 320 kW; baterias de ácido-chumbo e Íon de Lítio, variando de 42 a 1310 kWh; 30 a 120 bar de armazenamento de hidrogênio e células de combustível PAFC e PEM de capacidades de 0,5 a 80 kW, variam de tamanho de 1 kW a mais de 600 kW. Poucos dos estudos de caso analisados incluíram

tecnologia de energia de hidrogênio, apontando para a necessidade de mais trabalhos nesta área.

Já a otimização foi geralmente abordada através de modelagem/simulação com base em modelos matemáticos. Estes descrevem o sistema físico (elétrico, mecânico, térmico) como características individuais dos componentes. Em outras palavras, o custo geralmente é abordado separadamente. Em termos puramente técnicos, a simulação do desempenho do nível do sistema depende da precisão dos modelos dos componentes. A escassez de modelos adequados para O armazenamento de hidretos metálicos em particular já foi observado.

O estudo feito por Rekioua *et al.*, (2014) apresentou diferentes sistemas híbridos de geração de energia que possuem células a combustível. Após isto, foi proposto o sistema estudado pelo grupo de Rekioua, do qual foram obtidos os resultados das simulações e alguns experimentos.

No estudo de Rekioua *et al.*, os sistemas foram modelados separadamente e, então, através da unidade de gerenciamento de energia (PMU), houve a interação entre os subsistemas. A partir daí,, o estudo do sistema foi proposto e o subsistema de geração fotovoltaica trabalhou como fonte primária, convertendo radiação solar em energia elétrica. Quando a disponibilidade de energia solar era grande, o segundo subsistema (de produção de hidrogênio e oxigênio, através da eletrólise da água) era ligado para a produção e armazenagem de hidrogênio. O hidrogênio produzido alimentava o terceiro subsistema, composto por células a combustível, que convertiam a energia do hidrogênio em energia elétrica.

Desta forma, através deste estudo, foi possível concluir que o sistema de gerenciamento de energia pode variar o número de painéis fotovoltaicos designados a alimentar outras partes do sistema. Porém, para o funcionamento em áreas remotas, é necessário a instalação de um sistema autônomo para comandar a unidade de gerenciamento de energia. Os resultados obtidos também mostraram a viabilidade de produção de energia elétrica usando o sol, como fonte primária, e o hidrogênio, produzido a partir do sol, em um sistema autônomo, principalmente para utilização nas telecomunicações, que, muitas vezes, são desenvolvidas em áreas remotas.

Ozgirgin *et al.*, (2015) modelaram e simularam um sistema de microgeração que utilizava a energia solar, captada a partir de módulos fotovoltaicos, para produzir hidrogênio em um eletrolisador. O hidrogênio produzido gera eletricidade através de uma célula a combustível (CaC) do tipo PEM, a mesma utilizada neste trabalho.

O excesso de calor rejeitado pela CaC é utilizado para aquecimento da água e/ou aquecimento da casa. E a energia elétrica produzida pela CaC é armazenada nas baterias. Essa análise pode ser usada para outras aplicações, a partir da otimização dos módulos fotovoltaicos, do eletrolisador e da CaC.

No estudo de Ozgirgin *et al.*; foram simuladas situações com diferentes áreas de módulos fotovoltaicos. Foi possível observar que, para o menor módulo (17,6 m²) fotovoltaico, no mês com menor índice de irradiação solar do ano na Turquia, a produção elétrica foi de 5000 Wh.

De acordo com a análise, entre outubro e março (meses de inverno), foi preciso um suplemento de energia elétrica da rede de distribuição para alimentar esse consumidor (casa de 150 m², família de 3 a 4 pessoas), devido à baixa performance dos módulos fotovoltaicos. Porém, entre março e outubro, quando a área dos módulos instalados for maior que 33,6 m², esse sistema é capaz de suprir, sozinho, a demanda energética desse consumidor, e, ainda, vender o excesso para a rede elétrica de distribuição.

O trabalho de Das *et al.*, (2017) estudou a possibilidade de se utilizar energia renovável em um pequeno vilarejo indígena, com 50 famílias no leste da Malásia. Nessas pequenas áreas rurais da Malásia é comum a utilização do diesel para a geração de energia, porém, a dificuldade do transporte do combustível e a alta flutuação, tem tornado o preço do mesmo instável. Por estas razões, foi analisada a viabilidade da utilização de uma fonte de energia renovável, no lugar do diesel. Sistemas com módulos fotovoltaicos e baterias com e sem CaC foram analisados e comparados com o sistema convencional a diesel.

O foco principal do estudo foi no custo líquido do projeto e da energia. Alguns outros parâmetros também foram analisados, como: o custo de instalação, manutenção e operação do sistema. O software utilizado para essa análise foi o HOMER, fornecido pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL). O estudo também focou na parte operacional do sistema, com pequenas análises para a otimização da performance do mesmo.

Foi possível concluir que o sistema de energia renovável levou vantagem sobre o sistema convencional a diesel, comparando os custos líquidos e o custo da energia. O custo líquido do sistema fotovoltaico correspondeu praticamente à metade do sistema a diesel (\$ 335.297 contra \$ 670.444). O custo de energia também foi mais em conta: 0,323 \$/kWh contra 0,638 \$/kWh. Em contrapartida, o custo inicial de instalação se torna mais caro quando comparado com o sistema convencional. Algumas outras vantagens tornaram o sistema renovável

ainda mais atraente, como, por exemplo, a eliminação do problema de transporte do combustível, já que o sistema não necessita do mesmo. Em conclusão, este estudo comprovou a rentabilidade do sistema de energia renovável e, ainda, ressaltou a possibilidade real de sua utilização, permitindo a redução da dependência de diesel no setor elétrico na Malásia.

Hajmohammadi *et al.*, (2017) analisaram a eficiência da integração de painéis solares de óxido de zinco e células a combustível para a produção de hidrogênio diretamente. O método proposto tem por objetivo preparar o caminho para fornecer a energia necessária ao aquecimento/arrefecimento, através dos sistemas de aquecimento do piso e resfriamento do teto, bem como gerar eletricidade.

Uma das vantagens deste sistema é a diminuição dos custos. Outro resultado positivo é ter um produto mais renovável, ou mais limpo, em relação ao meio ambiente. No entanto, uma das desvantagens deste sistema é a condição climática ou geográfica de onde este sistema é instalado. A eficiência dele diminui conforme a sua localização de instalação for ficando mais distante da linha do Equador. Portanto, é seguro dizer que este sistema não é adequado para países frios.

Assim, de acordo com os resultados, é certo afirmar que, durante o dia e em condições de aquecimento noturno, é possível gerar 208,95 kW e 59,657 kW, respectivamente. Enquanto o sistema é usado para aquecimento ou refrigeração, a geração de energia é de cerca de 210 kWh durante o dia, devido aos módulos fotovoltaicos, o que é significativamente maior que a geração durante a noite, que compreende cerca de 60 kWh, pois neste período não há a contribuição dos módulos fotovoltaicos.

2.3.

Sistemas utilizando energia solar, eólica, células a combustível e hidrogênio

O estudo de Mezzai *et al.*, (2014) baseou-se em um sistema híbrido de geração de energia elétrica, utilizando módulos fotovoltaicos, célula a combustível, turbinas eólicas e um banco de baterias.

Neste estudo, foi concebido um modelo matemático, utilizando o software MATLAB/Simulink, com parâmetros reais para a identificação dos padrões de cada subsistema, antes da instalação. Posteriormente, foi realizado o projeto e a instalação do sistema. O mesmo pode ser projetado para potências superiores e ser considerado como um protótipo. Levou-se, ainda, em consideração a radiação solar de Bejaia (Argélia), local de instalação do projeto.

O estudo feito por Eriksson e Gray (2017) apresenta uma revisão dos sistemas híbridos de geração de energia elétrica utilizando módulos fotovoltaicos e/ou turbinas eólicas e células a combustível. Esse estudo não leva em conta somente o lado técnico, mas também vertentes econômicas, sociopolíticas e ambientais.

Os sistemas híbridos de geração de energia utilizando módulos fotovoltaicos e/ou turbinas eólicas, eletrolisador, bateria e célula a combustível podem ser em série, quando os módulos fotovoltaicos e/ou as turbinas eólicas alimentam o eletrolisador diretamente, ou em paralelo, quando o eletrolisador é alimentado pela energia armazenada na bateria ou pelos módulos e/ou turbinas.

Destaca-se, nesse estudo de Eriksson e Gray, a questão da escolha adequada de cada equipamento. Por exemplo, o sistema de armazenamento de hidrogênio tem que ser capaz de armazenar hidrogênio a 1 MPa, pressão que o hidrogênio normalmente sai do eletrolisador, e fornecer a 0,1 MPa para a CaC. O dimensionamento desses equipamentos também é muito importante para a otimização do sistema e acaba sendo responsável por tornar o sistema viável ou não.

2.4. Reformador

Sabe-se que a produção de hidrogênio a partir da reforma do etanol é considerada uma maneira promissora para o desenvolvimento sustentável de energia, que vem passando por um crescimento explosivo desde a última década.

Hou et al., (2015) fizeram uma análise para abordar o progresso na reforma do etanol para a produção de hidrogênio, incluindo o desenvolvimento do catalisador e a análise da ação dos mecanismos e das técnicas, que se encaminhavam para a exclusão de sistemas de catalisadores fundamentalmente incompreendidos, a partir da comparação do produto em nível molecular.

Ao longo do tempo, a produção de hidrogênio renovável a partir do etanol chamou a atenção no desenvolvimento de energia sustentável. Após a reação múltipla, o processo da reforma do etanol se mostrou altamente eficiente. A maioria dos estudos desse procedimento são focados na configuração do catalisador. Metais como Ni, Co, Rh, Ir e Ru foram encontrados para atividade extrínseca para reforma do etanol.

Bej et al., (2017) produziram hidrogênio com um rendimento muito alto, por meio de reforma a seco do etanol sobre o catalisador nano-NiO suportado com

alumínio em sílica sintetizada, usando o método sol-gel. A atividade do nano catalisador preparado foi avaliada em termos de conversão de etanol, conversão de dióxido de carbono, rendimento de monóxido de carbono e rendimento de hidrogênio. Verificou-se que a atividade do catalisador, bem como a distribuição de produtos, variaram com a carga de Ni no catalisador e as condições de reação. O catalisador contendo 10% de Ni mostrou boa atividade entre o catalisador selecionado para o reformador a seco de etanol. Os experimentos foram realizados com uma ampla gama de parâmetros operacionais, como a temperatura de reforma de 500 °C - 850 °C, proporção molar de dióxido de carbono em etanol de 0,5 para 2. Verificou-se que o catalisador era ativo dentro da gama de parâmetros estudados à pressão atmosférica. No entanto, as condições de reação mais favoráveis foram estabelecidas a 750 °C com relação molar CO₂/EtOH de 1,4. Sob a melhor condição, foram obtidas conversões quase completas de etanol, 76,0% de conversão de CO₂ e 100% de rendimento de hidrogênio. Os dados de conversão espaço-tempo na faixa de temperatura de 500-600 °C foram encaixados em um modelo de lei de energia, e a energia de ativação da reação de reforma seca de etanol foi determinada como 97,87 kJ / mol.

3. Projeto Conceitual

3.1. Descrição do projeto

O projeto de pesquisa e desenvolvimento teve como objetivos, projetar, instalar, operar e analisar o desempenho de um sistema autônomo de geração de energia elétrica, composto por um subsistema de painéis fotovoltaicos, de um subsistema para produção de hidrogênio a partir da reforma do etanol, de um subsistema de armazenamento de hidrogênio e de um subsistema de conversão do hidrogênio em energia elétrica através de célula a combustível (CaC). Todos os subsistemas anteriormente mencionados estariam associados a um subsistema de monitoramento, gerenciamento e controle (SMGC). O sistema integrado com estas características foi concebido para funcionar como uma alternativa confiável e segura, economicamente viável e ecologicamente correta para alimentação de comunidades isoladas com perfil de carga de baixa e média potência.

Em geral, nas comunidades isoladas o suprimento de energia elétrica está baseado em grupos geradores Diesel que, pelo perfil de carga, operam com baixa eficiência e podem apresentar riscos ambientais e de suprimento. No presente projeto experimental foi utilizado um combustível renovável (etanol) que quando reformado produz hidrogênio para posterior conversão, com elevada eficiência, em energia elétrica numa célula a combustível. Os aspectos inovadores do projeto estão ressaltados no emprego de um reformador de baixa potência com um sistema de purificação do hidrogênio por membranas seletivas e no desenvolvimento e implementação de um subsistema de monitoramento, gerenciamento e controle (SMGC) para otimização da operação dos subsistemas de produção, armazenamento e conversão do hidrogênio. A unidade piloto resultante do projeto foi concebida e construída para atender a um consumidor com perfil de carga SIGFI 45 (uma das classes de atendimento segundo resolução da ANEEL para Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes - SIGFI) para efeito dos estudos técnicos e de

viabilidade econômica e poderá ser ampliada para condições reais de operação em uma comunidade isolada.

No âmbito do projeto o armazenamento energético ocorre através da geração local de hidrogênio com armazenamento em cilindros em baixa/média pressão que, posteriormente, é convertido em energia elétrica útil em uma célula a combustível (CaC). Para tanto, foi necessária a produção local de hidrogênio, realizada em um reformador de etanol.

Os estudos de modelagem e simulação desenvolvidos no âmbito do projeto constituem a base para a proposição de um sistema completo de monitoramento, gerenciamento e controle (SMGC) para sistemas de geração compostos por subsistemas de geração fotovoltaica, produção de hidrogênio por reforma de etanol, armazenamento de hidrogênio e células a combustível. Embora não tenha feito parte do projeto os estudos e resultados do mesmo poderão, futuramente, ser utilizados para avaliação de configurações alternativas utilizando outros subsistemas de produção e armazenamento de hidrogênio. Da mesma forma, pode-se antecipar que um desdobramento deste projeto poderia ser a avaliação do aproveitamento do rejeito térmico do reformador e da célula a combustível, como por exemplo, para aquecimento de água, resultando no aumento da eficiência global do sistema.

3.2. Metodologia

As principais etapas e atividades do projeto encontram-se mencionadas a seguir:

- Revisão bibliográfica acerca de sistemas híbridos de base renovável e com células a combustível;
- Projeto conceitual do sistema completo;
- Estudos de modelagem e simulação acerca do sistema proposto;
- Otimização energético-econômica do sistema considerando as hipóteses de armazenamento de hidrogênio em tanques e de energia em baterias VRLA;
- Especificação e aquisição do subsistema de reforma de etanol e purificação de H₂;
- Aquisição do subsistema de conversão do H₂ e geração de energia elétrica (CaC);

- Montagem e ensaios preliminares do subsistema de produção de H_2 por reforma do etanol;
- Aquisição do subsistema de armazenamento de H_2 (tanques, compressores);
- Aquisição dos componentes para integração dos subsistemas;
- Montagem e ensaios preliminares do subsistema de armazenamento de H_2 (tanques, compressores);
- Integração dos subsistemas e ensaios preliminares;
- Análises operacionais e avaliação do sistema;
- Concepção do subsistema de monitoramento, gerenciamento e controle (SMGC);
- Otimização do modo de operação do sistema completo;

O sistema de geração foi, primeiramente, concebido com o objetivo de se determinar a melhor configuração e as estratégias de operação e controle, bem como a otimização energética e econômica. A partir destas, o sistema de geração foi implementado e foi efetuada uma avaliação energética de cada um dos subsistemas mediante o monitoramento e medições das diversas grandezas (vazões, pressões, cargas, temperaturas, etc.) que os caracterizam. Estas análises tiveram o intuito de se determinar as condições de máxima eficiência energética e de melhor qualidade e confiabilidade da energia elétrica produzida.

Quanto ao sistema de produção de hidrogênio, o projeto contemplou a aquisição de um pequeno e original reformador de etanol oferecido por uma empresa situada na Grécia, originada de um grupo de pesquisa e desenvolvimento (P&D) da Universidade de Patras que possuía projetos em cooperação com o Laboratório de Catálise do INT para o desenvolvimento dos catalisadores em sistemas de reforma de etanol.

Por se tratar de uma unidade protótipo, o sistema integrado e autônomo de geração de energia elétrica utilizando fontes renováveis foi dimensionado para o atendimento da demanda estabelecida pelo padrão de consumo SIGFI 45 e com perfil de carga de um consumidor típico da empresa Dresser-Rand Guascor do Brasil.

3.3. O Projeto

O sistema de geração de energia elétrica foi concebido para ser uma unidade autônoma e capaz de utilizar apenas fontes renováveis para a operação. A Figura 3 apresenta o diagrama de blocos do sistema integrado. Ao longo da execução do projeto foram efetuadas modificações nas interligações dos subsistemas que compõem o sistema integrado resultando no diagrama de blocos apresentado na Figura 4.

Cabe destacar que a concepção proposta originalmente, qual seja, uma unidade autônoma de geração de energia elétrica utilizando apenas fontes renováveis foi mantida e as modificações tiveram o objetivo de aumentar a eficiência global do sistema integrado.

As duas fontes primárias para operação do sistema de geração são o etanol e a energia solar. O hidrogênio é obtido a partir da reforma do etanol sendo, posteriormente, armazenado em cilindros. A conversão do hidrogênio em energia elétrica é realizada na CaC que alimenta as cargas do sistema (compressor e consumidor). Os painéis fotovoltaicos mantêm a carga das baterias e complementam o fornecimento de energia às cargas e os demais equipamentos (inversores, controlador de frequência, transformador) complementam o sistema de geração.

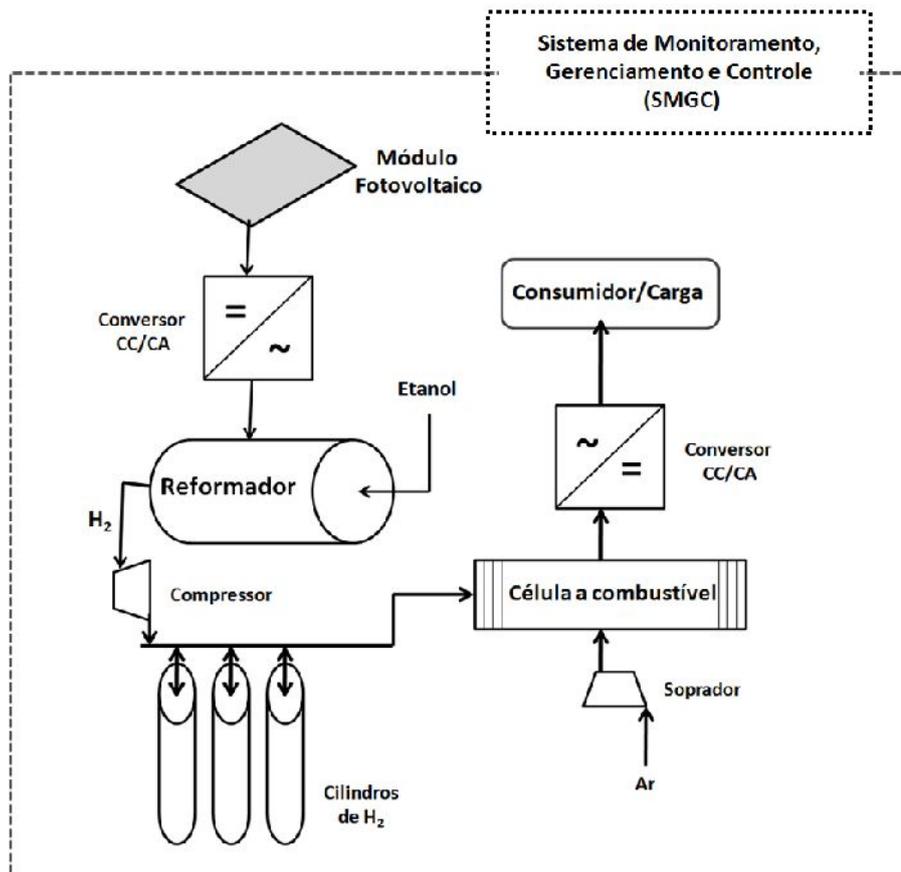


Figura 3 - Concepção do sistema integrado conforme submetido na proposta de projeto.

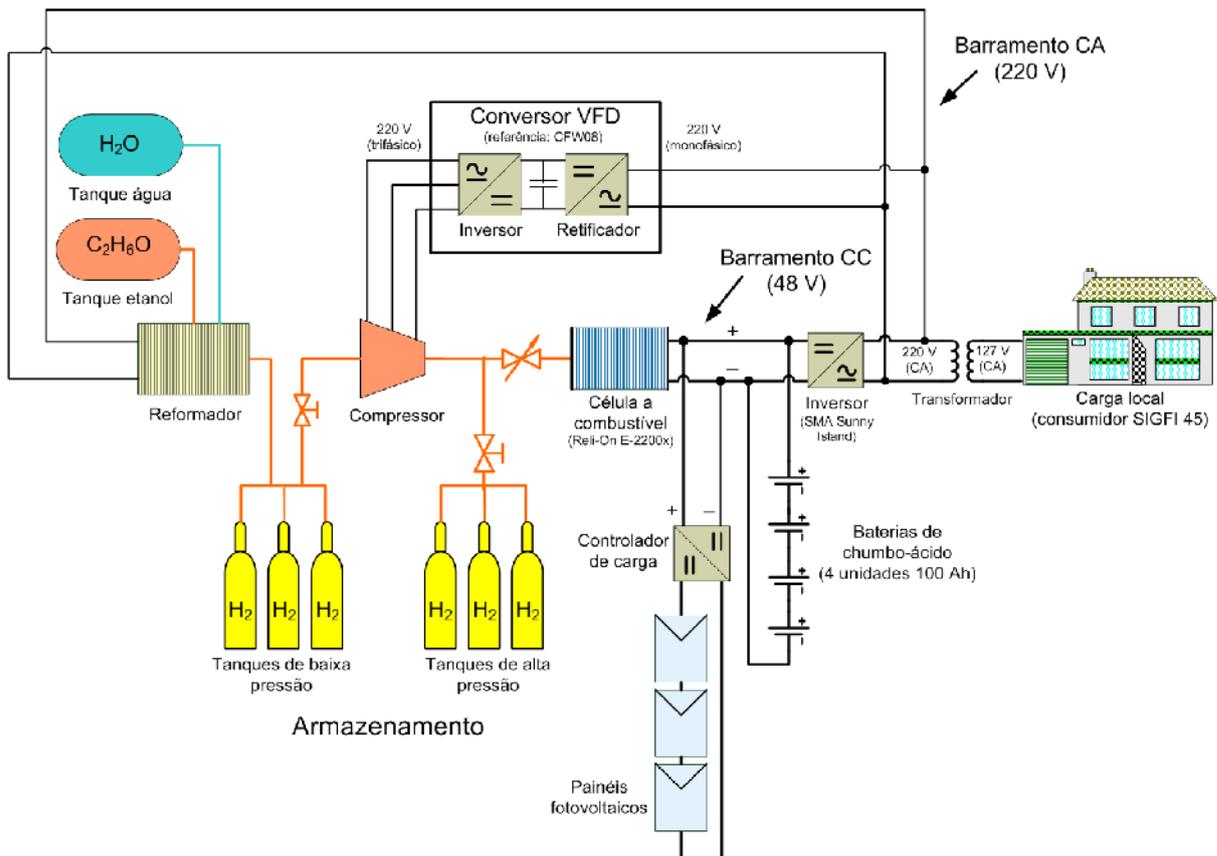


Figura 4 - Diagrama de blocos com ligações e conexões entre os equipamentos na configuração final do projeto.

Com base na definição dos componentes principais do sistema de geração os mesmos tiveram as suas especificações detalhadas para efeito de aquisição nos mercados nacional e internacional. O processo de seleção técnica e econômica dos equipamentos conduziu à aquisição dos equipamentos descritos a seguir.

3.4. Reformador de Etanol

Decidiu-se pela aquisição de um reformador de etanol para produção de hidrogênio de alta pureza (>99,995%, CO < 10 ppm) obtido a partir de permeação em membrana de paládio (Pd), com capacidade de produção de 1 Nm³/h. As exigências de pureza do hidrogênio e teor máximo de monóxido de carbono (CO) visaram eficiência e a preservação dos eletrocatalisadores da unidade de conversão (CaC) do sistema de geração.

O processo de produção do hidrogênio a partir do etanol é realizado por reforma a vapor em um reator catalítico. A reforma a vapor do etanol ocorre na presença de um catalisador em uma temperatura entre 700 a 900 °C. Os produtos resultantes da reforma são H_2 , CO e CO_2 , sendo que a concentração de CO no fluxo gasoso é da ordem de 12 a 15vol%. A concentração de CO no fluxo gasoso é reduzida para cerca de 2,5vol% através da denominada reação de deslocamento de água (*water shift reaction – WSR*) em um reator adiabático na presença de catalisador. O gás rico em hidrogênio resultante desta reação é resfriado para a remoção de água e purificado por permeação em membrana de Pd.

A Figura 5 apresenta o diagrama simplificado do processo de reforma de etanol para obtenção hidrogênio de elevada pureza e baixíssima concentração de monóxido de carbono.

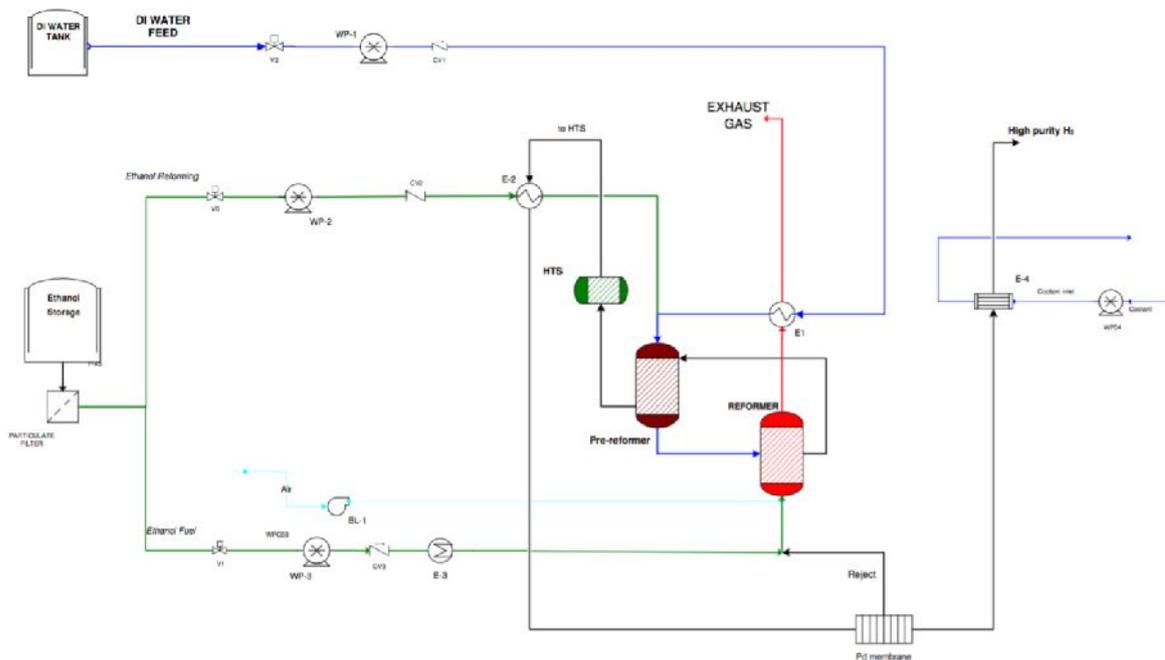


Figura 5 - Diagrama simplificado do processo de reforma do etanol.

A Figura 6 apresenta uma vista do reformador de etanol já instalado na PUC-Rio em local especificamente preparado para a montagem do sistema de geração.



Figura 6 - Vista do reformador de etanol instalado na PUC-Rio (tampa frontal retirada).

A Figura 7 apresenta o reformador de etanol com os respectivos tanques de alimentação de etanol e água deionizada sobre a bancada ao fundo e, em primeiro plano, encontra-se a estação de trabalho e imediatamente a seguir os cilindros de nitrogênio empregados na purga do reformador de etanol.



Figura 7 - Detalhes adicionais da instalação do reformador de etanol na PUC-Rio.

O catálogo completo do reformador de etanol adquirido da empresa Helbio, localizada na cidade de Patras, Grécia, encontra-se no Anexo I do presente trabalho.

3.5. Célula a Combustível

A célula a combustível (CaC) é o equipamento responsável pela conversão do hidrogênio produzido no reformador de etanol em energia elétrica. As CaC são sistemas capazes de transformar a energia química do hidrogênio diretamente em energia elétrica, sem que exista combustão. Esta conversão ocorre por meio de reações eletroquímicas na presença de eletrocatalisadores e têm como subprodutos apenas calor e água. As CaC apresentam eficiência elevada, da ordem de 40 a 65% dependendo do tipo utilizado (baixa ou alta temperatura).

A Figura 8 apresenta o princípio básico de funcionamento de uma CaC utilizando o hidrogênio para produção de energia elétrica.

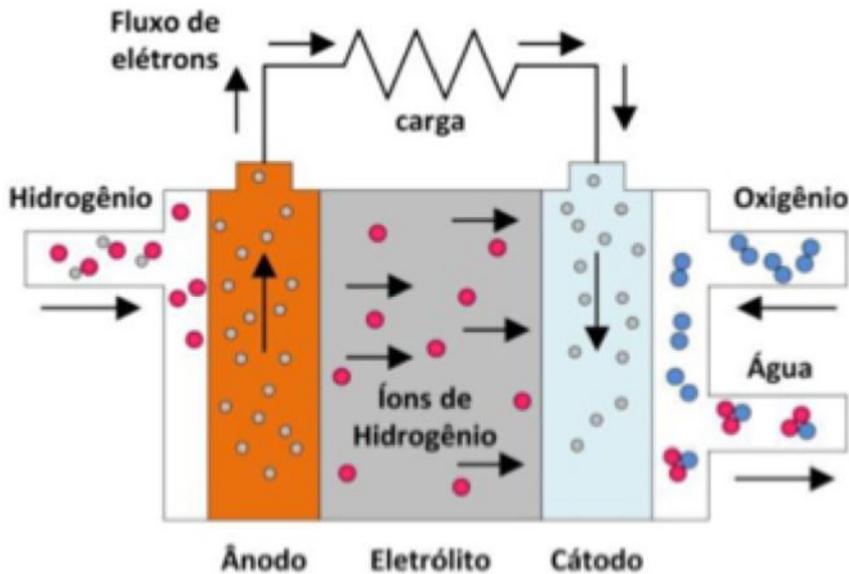


Figura 8 - Princípio básico de funcionamento de uma CaC de baixa temperatura utilizando hidrogênio.

O processo de seleção da unidade de células a combustível para utilização no projeto levou em consideração, além do custo compatível com o orçado no projeto, algumas características técnicas dentre as quais destacam-se:

- Tempo de resposta compatível com as variações previstas no perfil de carga de um consumidor SIGFI 45 em paralelo com as demais cargas do sistema integrado;
- Potência compatível com o estabelecido para o consumidor SIGFI 45;
- Funcionamento comercial comprovado em aplicações similares.

Existem diferenças entre uma célula a combustível unitária que é um dispositivo eletroquímico, um empilhamento de células a combustível unitárias e uma unidade comercial de células a combustível que pode incluir ou não mais empilhamentos, sistema de controle de vazões e temperatura, válvulas de admissão e purga. Daqui em diante, será utilizado o termo "CaC" ou "célula a combustível" para se referir à unidade comercial de células a combustível da Reli-On utilizada no projeto.

Com base nestas premissas foi adquirida uma unidade de CaCs com tecnologia de membrana polimérica (PEM) composta de dois empilhamentos e com potencia elétrica nominal de 2,2 kW, fornecida pela Reli-On (Plug Power), localizada na cidade de Spokane, Washington USA.

A Figura 9 apresenta uma vista da unidade de CaCs, modelo E-2200x adquirida para o projeto.

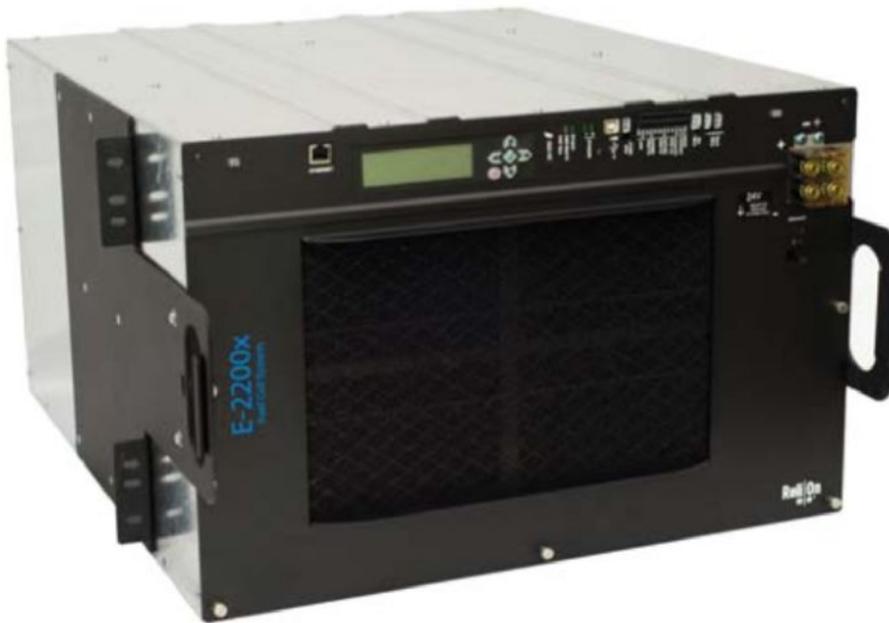


Figura 9 - Célula a combustível modelo E-2200x da Reli-On (24/48 V, 2,2 kW).

A Figura 10 apresenta a CaC instalada na PUC-Rio. Nesta figura pode-se notar que a CaC encontra-se com a sua parte posterior voltada para o ambiente externo do laboratório e acima da mesma observa-se o exaustor de gases com vazão suficiente para eliminar do ambiente o hidrogênio que poderia estar presente em decorrência de vazamentos fortuitos.

Na mesma figura aparecem outros equipamentos e dispositivos utilizados no sistema de geração de energia elétrica tais como: tubulações de admissão na CaC do hidrogênio proveniente dos tanques de armazenamento (localizados juntamente com o compressor em outro ambiente por questões de segurança), inversor (amarelo), medidor e integrador de vazão de hidrogênio, banco de baterias. Em uma posição ligeiramente acima do exaustor de gases encontra-se o detector de presença de hidrogênio no ambiente.



Figura 10 - Unidade de célula a combustível Reli-On utilizada no projeto no seu local de instalação.

O catálogo da CaC adquirida para o projeto encontra-se no Anexo I deste trabalho.

3.6. Compressor de hidrogênio

O compressor de hidrogênio juntamente com os tanques de baixa e alta pressão e com o conversor de frequência compõe o subsistema de armazenamento de hidrogênio do sistema integrado.

Existem poucos fabricantes de compressores de hidrogênio com as características requeridas pelo projeto do sistema proposto à Dresser-Rand Guascor do Brasil. Os compressores de hidrogênio precisam atender a requisitos rígidos de segurança e, em geral, são projetados para aplicações de alta pressão de armazenamento e vazões elevadas. Essas restrições fazem com que estes equipamentos tenham custos e prazos de fornecimento elevados. Outro ponto relevante na seleção do compressor foi o consumo energético, sabidamente elevado para este tipo de equipamento, principalmente se considerarmos que o mesmo constituiria uma carga do sistema de geração.

O processo de seleção do compressor resultou na compra do equipamento modelo 2TX2 fornecido pela RIX Industries, localizada na cidade de Benicia,

California, USA. Este equipamento atende à pressão de saída do reformador de etanol (0,2 barg) e vazão de até 26,3 Nm³/h a 1200 rpm. Considerando que a vazão nominal máxima do reformador é de 1 Nm³/h foi adquirido um inversor/controlador de frequência para controlar a rotação do compressor e, conseqüentemente, a vazão. O controle de vazão é realizado com um controlador PID no qual a variável de processo é a pressão do hidrogênio na saída do reformador de etanol. Pelas especificações do fabricante do reformador esta pressão deve ser mantida em 0,2 bar (g). Para este propósito foi especificado, também, um transmissor de baixa pressão.

O armazenamento do hidrogênio proveniente do reformador de etanol segue para os tanques (cilindros) de baixa pressão e, posteriormente, é comprimido em tanques (cilindros) de alta pressão. A alimentação da CaC é realizada a partir dos cilindros de alta pressão e a pressão de admissão do hidrogênio é regulada pelo painel de controle da CaC.

Para a instalação do subsistema de armazenamento de energia com hidrogênio foram construídos dois cubículos externos ao laboratório (laje do prédio) para abrigar respectivamente o compressor e os cilindros de hidrogênio. Nas tubulações de saída do reformador e de entrada da CaC foram instalados medidores de vazão de hidrogênio. O Inversor de frequência encontra-se no interior do laboratório.

A Figura 11 apresenta o compressor e os cilindros de armazenamento de hidrogênio instalados da laje do prédio do laboratório da PUC-Rio.

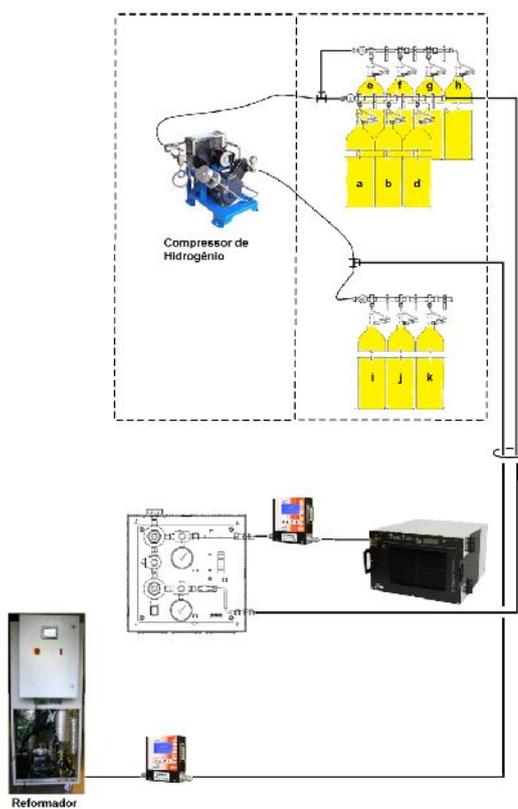


Figura 11 - Cubículos com cilindros de armazenamento de hidrogênio e compressor.

A Figura 12 apresenta o dispositivo de controle de vazão, sensor de pressão e o inversor/controlador de frequência instalado no interior do laboratório.



Figura 12 - Montagem do conjunto de controle e medição da vazão de hidrogênio.

A Figura 13 corresponde ao painel de ajuste da pressão de entrada de hidrogênio na CaC. O painel está conectado ao sistema de armazenamento de hidrogênio apresentado na Figura 11.



Figura 13 - Painel de controle de pressão de hidrogênio na entrada da CaC

O catálogo dos equipamentos que compõem o subsistema de armazenamento constam do Anexo I do presente trabalho.

3.7. Inversor

O inversor (ou conversor CC/CA) exerce um papel importante na integração dos equipamentos, haja vista que existem fluxos de corrente contínua (CC) e de corrente alternada (CA) no sistema de geração, conforme destacado no diagrama de blocos apresentado na Figura 4. A CaC e os painéis fotovoltaicos estão conectados ao banco de baterias que, por sua vez, alimentam o inversor CC/CA. As cargas do sistema (reformador, compressor e consumidor) encontram-se no barramento CA na saída do inversor. Vale ressaltar que esse inversor permite apenas fluxo de energia do lado CC para o lado CA.

O inversor comercial selecionado para o projeto foi o modelo Sunny Island 3.0M (Potência 2300 W, tensão CA 220 V), com os acessórios *Sunny Remote Control* e *BatFuse*, foi fornecido pela SMA Solar Technologies AG, localizada na cidade de Niestetal, Alemanha.

A Figura 14 mostra o inversor (sem a cobertura mostrada na Figura 10) conectado a outros dispositivos e equipamentos (*BatFuse*, banco de baterias, CaC) durante o procedimento de comissionamento e caracterização do seu funcionamento. A Figura 15 apresenta em detalhe o dispositivo *Sunny Remote Control* utilizado para aquisição de dados e operação remota do inversor.



Figura 14 - Vista do inversor (aberto) durante o procedimento de comissionamento.

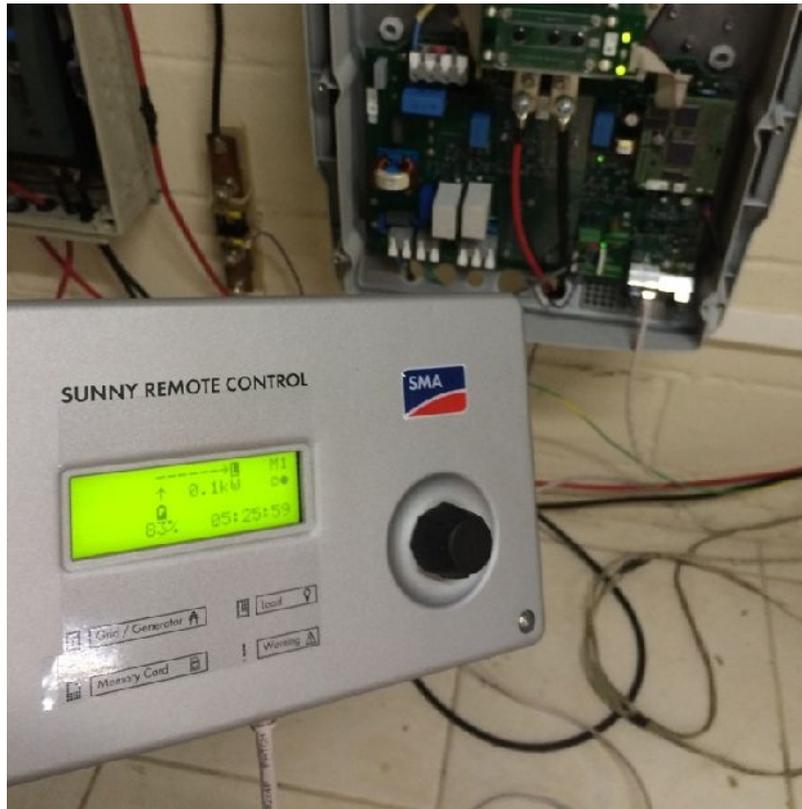


Figura 15 - Medição indireta do estado de carga das baterias por meio do dispositivo *Sunny Remote Control* do inversor SMA.

O catálogo do inversor de corrente encontra-se no Anexo I do presente trabalho.

3.8. Banco de baterias

O banco de baterias inserido no sistema de geração é composto por quatro baterias de 48 V/100 Ah tipo VRLA (*valve regulated lead acid*) conectadas em série, especificação 12MVA-100 de 100 Ah (C20), fabricadas pela Moura e adquiridas no mercado nacional.

O funcionamento da CaC requer a utilização de uma tensão de referência em uma determinada faixa, papel este que é exercido pelo banco de baterias. A CaC por sua vez fornece energia tanto para as cargas do sistema como para manter o estado de carga do banco de baterias. Adicionalmente, o banco de baterias encontra-se conectado aos painéis fotovoltaicos que permitem o aproveitamento da radiação solar como uma fonte adicional de energia do sistema de geração. A saída do banco de baterias está conectada ao inversor que distribui a corrente para o barramento CA.

A Figura 16 apresenta uma vista do banco de baterias utilizado no projeto.

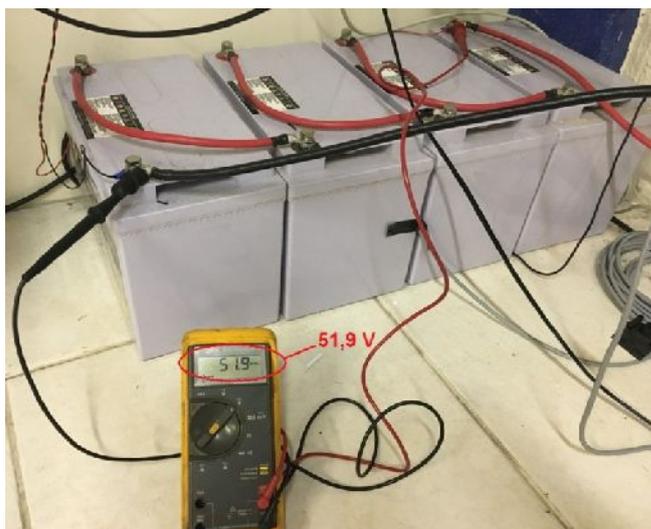


Figura 16 - Vista do banco de baterias empregado no sistema de geração.

3.9. Sistema fotovoltaico

No projeto foram utilizados três painéis fotovoltaicos de silício policristalino com as seguintes características nominais:

- 1 módulo policristalino, fabricante Yingli Energia (Modelo YL245P-29b, potência máxima de 245 W)
- 2 módulos monocristalinos do fabricante Tecnometal DYA Energia Solar (Modelo SV250D20M, potência máxima de 250 W).

Adicionalmente foi utilizado um controlador de carga MPPT, do fabricante eSMART que apresenta a função de detecção automática de tensão 12 V/24 V/48 V de 20 A e elevada eficiência. Este sistema apresenta três estágios de carregamento: corrente constante (MPPT), tensão constante e tensão de flutuação configuráveis no software Solar Eagle fornecido pelo fabricante.

O catálogo do controlador de carga encontra-se no anexo I desse trabalho.

4

Caracterização energética dos equipamentos

Para efeito de construção do simulador de operação do sistema integrado de geração é necessário que cada um dos componentes do mesmo esteja perfeitamente caracterizado em termos energéticos. Descreve-se a seguir os procedimentos de ensaios e métodos experimentais efetuados com esta finalidade para cada um dos equipamentos.

4.1.

Reformador de etanol

Para que fosse possível caracterizar o reformador de etanol em relação ao seu consumo foram feitos diversos ensaios com o reformador. Na Figura 17 é possível observar a região de interesse do sistema, destacada em vermelho, para esses ensaios que engloba o reformador, os reservatórios de água desmineralizada e de etanol e os cilindros de armazenamento de hidrogênio.

Para esses ensaios foram ligados o reformador para a produção de hidrogênio e o compressor de hidrogênio para o armazenamento desse gás. Um wattímetro foi ligado entre a saída do reformador e a rede elétrica para que fosse possível medir o consumo elétrico do reformador durante os ensaios. O volume de hidrogênio produzido pelo reformador foi lido através do medidor de vazão Aalborg instalado na saída do reformador. O consumo de nitrogênio também foi medido durante os ensaios. O consumo de água desmineralizada e de etanol foram fornecidos pelo fabricante do reformador que foi validado durante os ensaios, para essa validação foi medido durante um minuto a quantidade de etanol e água que saíam dos tanques e comparados com os valores fornecidos pelo reformador, visto na tela do equipamento.

O objetivo desses ensaios foi fazer um balanço de energia em torno do reformador, que para produzir hidrogênio consome água desmineralizada, etanol, nitrogênio e eletricidade e a partir dessas informações obteve-se a curva que representa as características de operação do reformador.

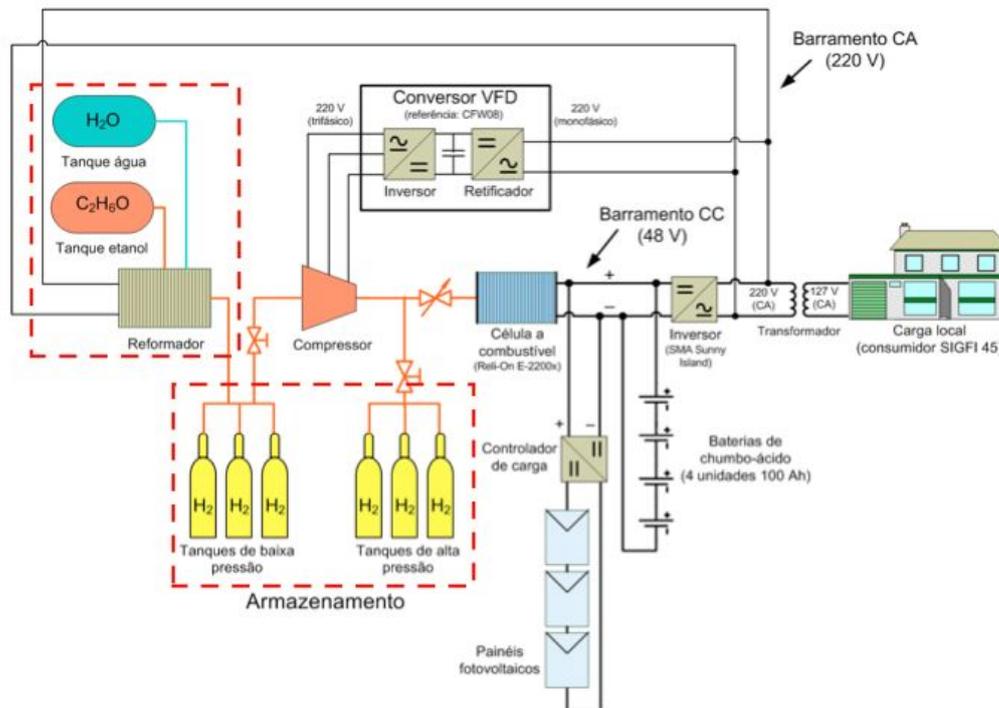


Figura 17 - Análise energética do reformador de hidrogênio

4.1.1.

Metodologia dos ensaios

Durante os ensaios observou-se que o reformador de etanol leva cerca de três horas para aquecer e começar a produzir hidrogênio. Durante essa primeira etapa do processo o etanol é utilizado para combustão e aquecimento dos reatores. O nitrogênio é utilizado para purga como gás de proteção dos componentes internos.

Durante a etapa de produção de hidrogênio, o etanol é consumido tanto para a manutenção da temperatura dos reatores como para a reação de reforma e produção do hidrogênio, em conjunto com a água desmineralizada.

Na etapa final do processo, correspondente ao resfriamento (desligamento) do reformador, o nitrogênio é utilizado como gás de purga. A etapa de resfriamento dura cerca de uma hora e meia.

Ao longo das três etapas que caracterizam um ciclo completo de operação do reformador há consumo de energia elétrica, o qual foi relacionado com a quantidade de hidrogênio produzido.

4.1.2. Análise dos resultados

Na Tabela 1 encontram-se os valores obtidos para um dos ensaios e a Figura 18 mostra o consumo elétrico em função do tempo para as diferentes fases de operação. A Figura 19 mostra o consumo elétrico em função da quantidade de hidrogênio produzido.

Tabela 1 - Valores experimentais obtido em um dos ensaios de caracterização do reformador de etanol

	Hora	Duração	Consumo elétrico (kWh)	Produção hidrogênio (L)
Aquecimento	07:41	00:00	0	0
	08:53	01:12	1,50	0
	09:30	01:49	2,04	0
	10:00	02:19	2,47	0
	10:15	02:34	2,68	0
	10:30	02:49	2,79	0
	10:45	03:04	2,91	0
	11:00	03:19	3,10	94
Produção	11:10	03:29	3,24	247
	11:15	03:34	3,31	323
	11:30	03:49	3,54	547
	11:45	04:04	3,76	787
	12:00	04:19	3,99	1020
	12:40	04:59	4,59	1654
Resfriamento	12:57	05:16	4,83	1917
	12:58	05:17	4,84	1917
	14:19	06:38	5,14	1917

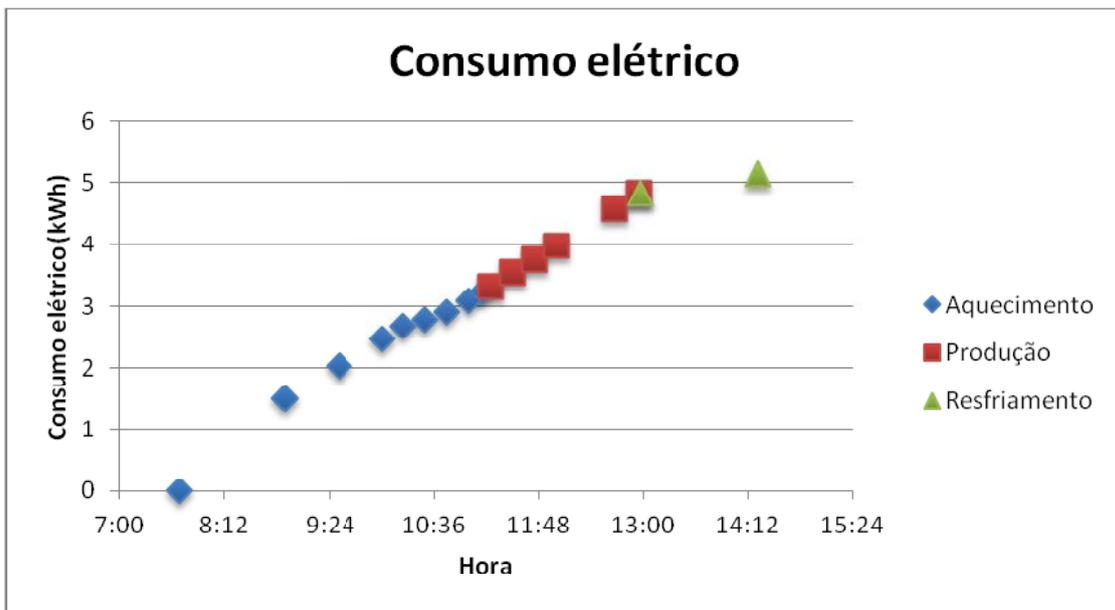


Figura 18 - Consumo elétrico para as 3 fases

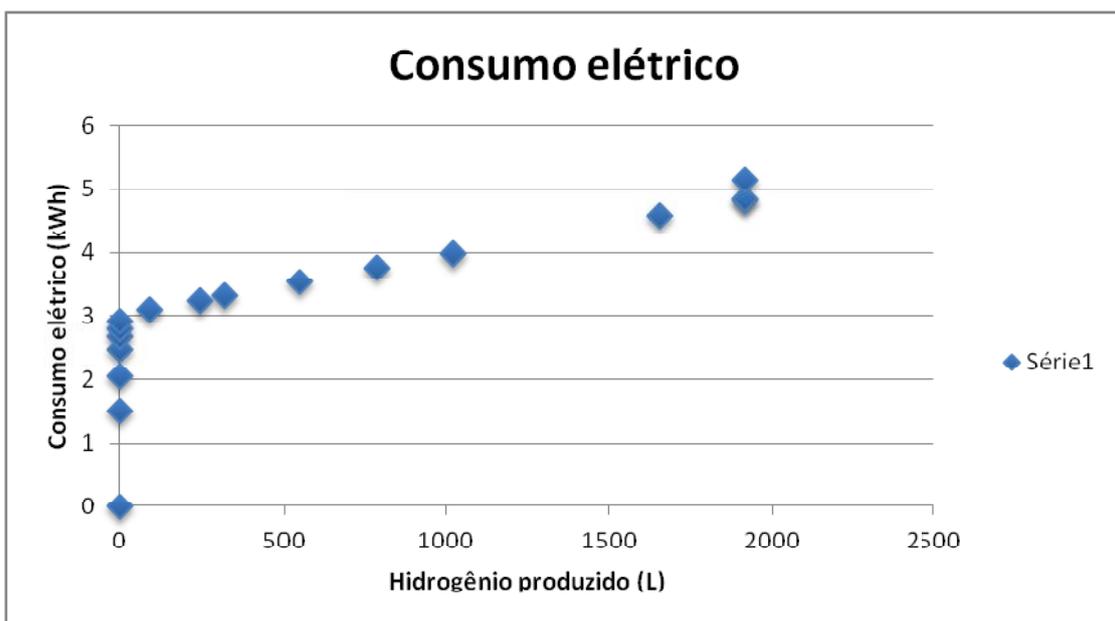


Figura 19 - Consumo elétrico em função da produção de hidrogênio

O comportamento energético do reformador de etanol (consumo de energia elétrica versus a quantidade de hidrogênio produzido), em diversos ensaios, pode ser observado na Figura 20.

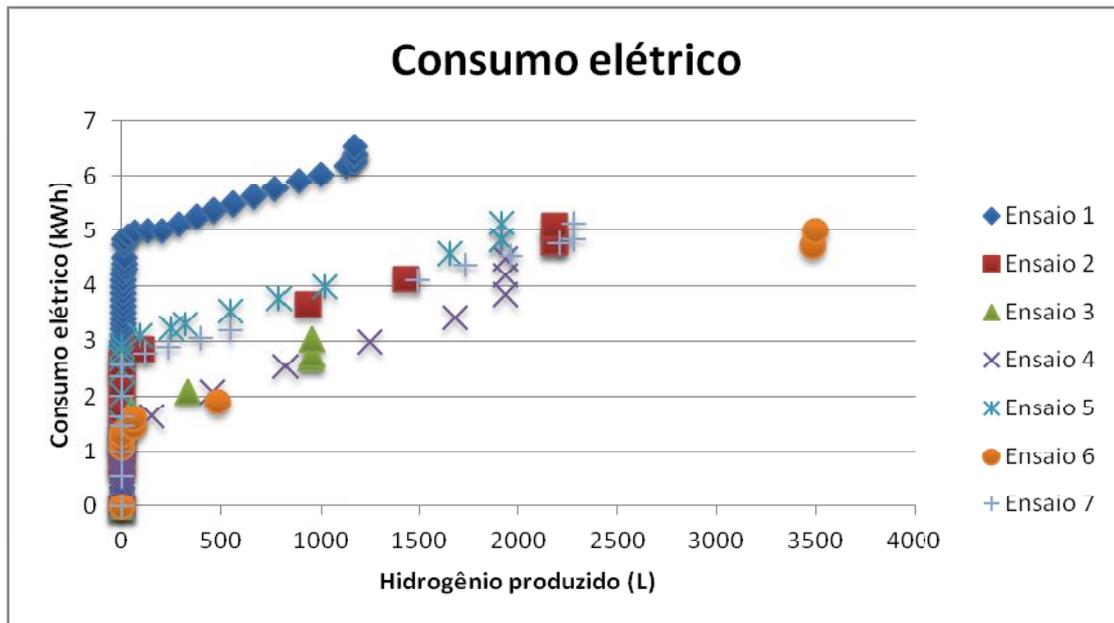


Figura 20 - Consumo elétrico para todos os ensaios realizados

No ensaio 1 nota-se que o consumo elétrico foi maior na fase de aquecimento comparado com os outros ensaios, o que foi atribuído ao fato da etapa de aquecimento ter demorado mais tempo para começar a produção do hidrogênio (cerca de seis horas). Nos ensaios 3, 4 e 6, o reformador apresentou problemas operacionais (erros) na etapa de aquecimento e foi religado após a superação do erro. Nestas situações o reformador se encontrava pré-aquecido, o que fez parecer que a fase de aquecimento foi mais curta do que o normal e, conseqüentemente, o consumo energético foi menor. Por isso, para ajustar a curva que caracteriza o consumo do reformador esses ensaios foram desconsiderados na avaliação energética do equipamento.

Conforme pode ser observado na Tabela 1, o consumo de energia elétrica nas etapas de aquecimento e de resfriamento se reproduzem em diferentes ensaios, e dependem exclusivamente da duração de cada uma destas etapas.

O consumo de energia elétrica é significativo na etapa de aquecimento para a obtenção da temperatura de processo dos reatores e da membrana de paládio (Pd) enquanto que na etapa de resfriamento a energia elétrica é utilizada apenas nos sistemas auxiliares. Como o consumo de energia elétrica pelo reformador nas fases de aquecimento e resfriamento se reproduzem nos ensaios foi utilizada a média do consumo para a caracterização do reformador. Esses valores encontram-se na Tabela 2 e correspondem à média dos ensaios 2, 5 e 7.

Tabela 2 - Consumo elétrico para fase de aquecimento e resfriamento

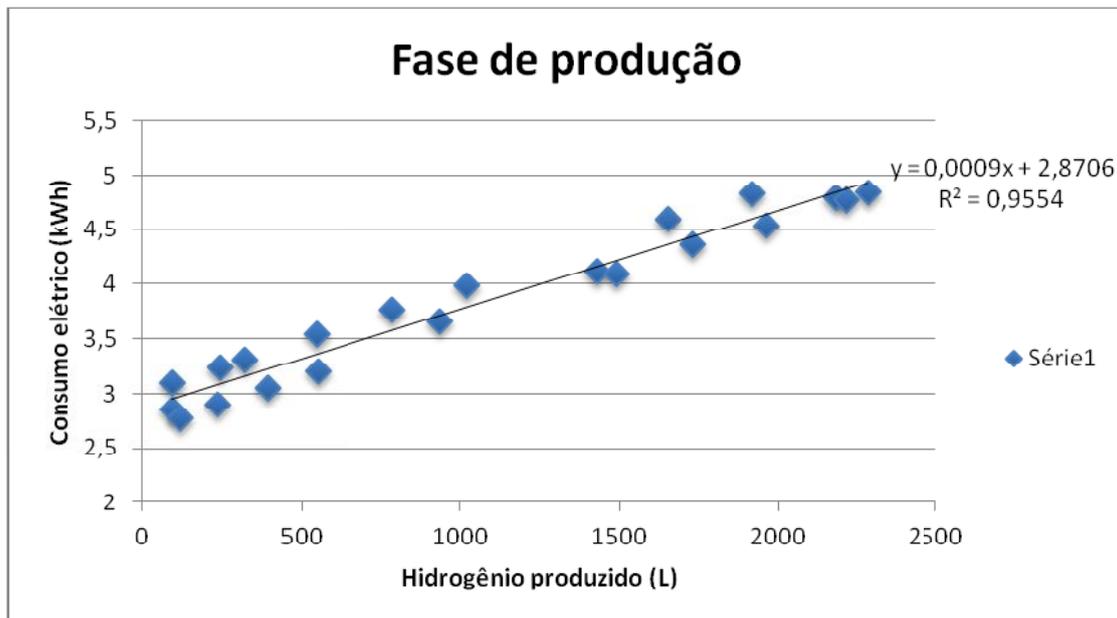
	Ensaio	Consumo elétrico (kWh)
Aquecimento	2	2,59
	5	2,91
	7	2,57
	Média	2,69
Resfriamento	2	0,3
	5	0,3
	7	0,3
	Média	0,3

Para modelar a fase de produção de hidrogênio foi ajustada uma reta baseada nos valores experimentais dos três ensaios válidos (ensaios 2, 5 e 7). Essa fase é a mais importante para o simulador, uma vez que o reformador apresenta o mesmo consumo elétrico para a fase de aquecimento e de resfriamento. Esta reta é dada por:

$$\text{Consumo elétrico} = 0,0009 V_{H_2} + 2,8706 \quad (1)$$

Onde V_{H_2} é o volume de hidrogênio produzido pelo reformador em litros.

Essa reta é apresentada na Figura 21.

**Figura 21** - Consumo elétrico na fase de produção de hidrogênio

4.1.3. Conclusões parciais da seção

Com base nos ensaios descritos acima e em seus resultados é possível observar o comportamento do reformador de etanol para as três fases de operação.

Para o simulador o consumo de energia na fase de aquecimento será fixo de 2,69 kWh e na fase de resfriamento também será fixo de 0,3 kWh. O consumo irá variar na fase de produção de hidrogênio de acordo com a equação 1, visualizada na Figura 21. A fim de otimizar o simulador será produzido o máximo de hidrogênio quando o reformador for ligado a fim de diluir o consumo energético nas fases de aquecimento e resfriamento durante o tempo de operação .

A fim de otimizar o consumo energético do reformador, o simulador será programado para produzir hidrogênio na condição nominal de operação (1 Nm³/h) pelo máximo tempo possível sempre que o reformador for ligado, a fim de diluir o consumo energético nas fases de aquecimento e resfriamento durante o tempo de operação.

O consumo de água desmineralizada fornecido pelo fabricante é de 1,4 L/h e a água só é consumida na fase de produção.

O consumo de etanol fornecido pelo fabricante é de 0,77 L/h na condição de produção nominal (1 Nm³/h) e o etanol é consumido na fase de aquecimento e produção.

O consumo de nitrogênio nas etapas de aquecimento e de resfriamento do reformador foi medido durante os ensaios e manteve-se constante em 1,8 Nm³ para um ciclo completo de operação (aquecimento, produção e resfriamento).

4.2. Compressor de hidrogênio

Para que fosse possível caracterizar o compressor em relação ao seu consumo foram necessários ensaios simulando situações possíveis de operação do compressor. Na Figura 22 é possível visualizar a parte de interesse do sistema, composta pelo compressor, tanques de baixa pressão, tanques de alta pressão, inversor de frequência do compressor, o inversor de tensão e o banco de baterias. Para esses ensaios, o reformador de hidrogênio e a célula a combustível ficaram desligados, e o ensaio foi conduzido com o compressor de hidrogênio conectado à rede do sistema sendo alimentado exclusivamente pelo

banco de baterias. O objetivo desses ensaios foi fazer um balanço de energia nessa parte de interesse do sistema, onde o compressor comprime o hidrogênio proveniente dos tanques de baixa pressão e o armazena nos tanques de alta pressão. Nesta situação a energia é fornecida pelo banco de baterias.

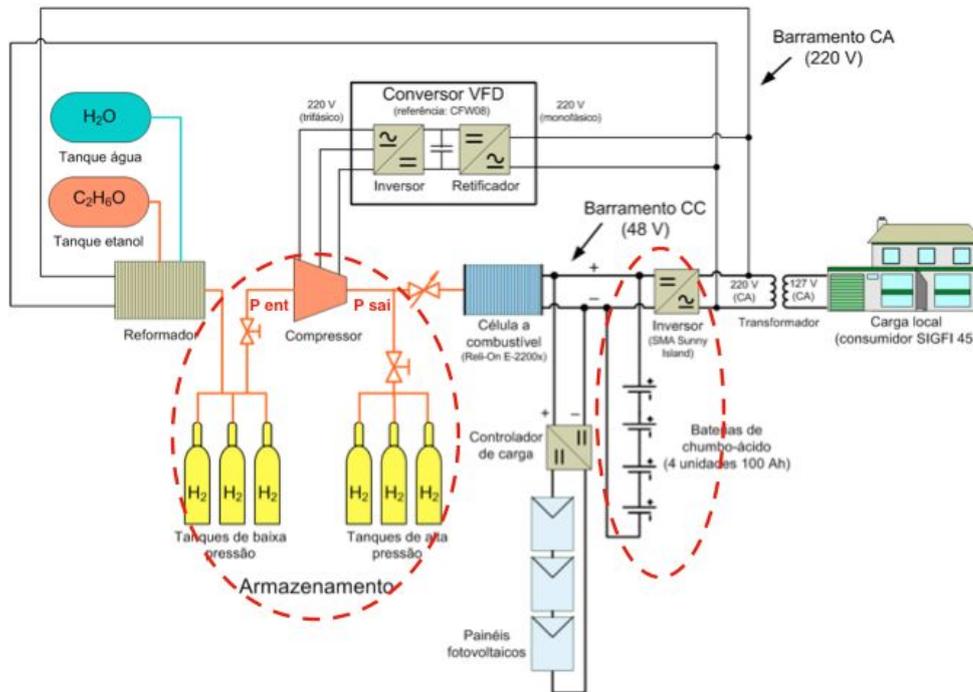


Figura 22 - Análise energética do compressor de hidrogênio

A Figura 23 facilita a compreensão dos testes realizados. Basicamente, foi realizada uma derivação na linha de entrada de hidrogênio na CaC e na saída do reformador para completar o circuito de gás. A pressão na sucção foi regulada no módulo de controle da CaC e a pressão de alta de hidrogênio correspondente aos cilindros de alta pressão. A medição de potência refere-se ao conjunto compressor e variador de frequência.

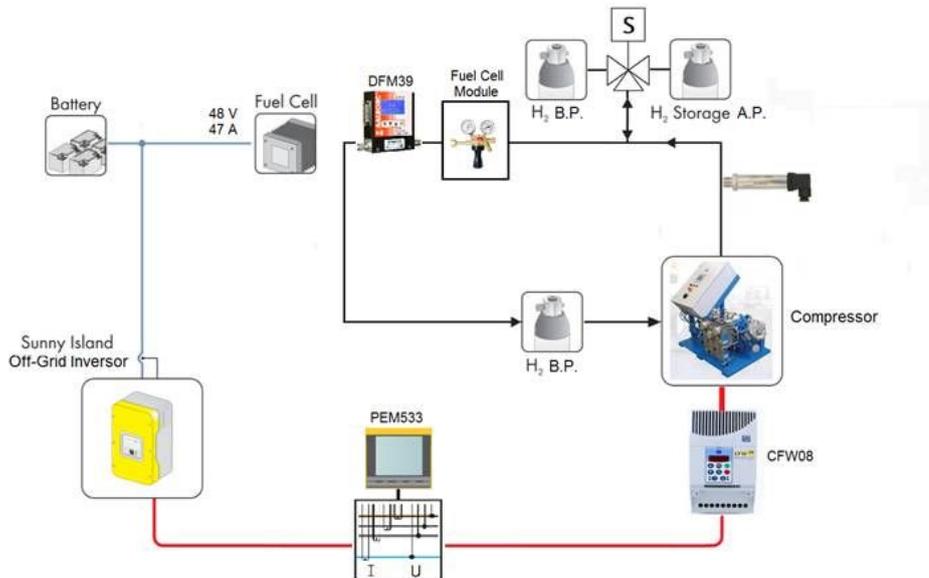


Figura 23 – Montagem experimental para a caracterização energética do compressor

Dessa forma, os dados utilizados são a potência demandada pelo compressor medido pelo analisador de energia PEM53 (Bender), a pressão absoluta de entrada (P_{ent}) no compressor que é medida pelo medidor de pressão (Aalborg) instalado na saída do reformador e foi fixada em 120 kPa para todos os ensaios, a pressão de saída (P_{sai}) do compressor que é a pressão de armazenamento do hidrogênio, medida por um sensor calibrado de pressão, e a frequência do compressor que variou entre 20 a 60 Hz durante os ensaios.

4.2.1. Metodologia dos ensaios

Foram feitos ensaios variando a frequência do compressor de 5 em 5 minutos.

As frequências estabelecidas foram 20, 30, 40, 50 e 60 Hz com o objetivo de visualizar o comportamento do compressor de hidrogênio funcionando em diferentes situações.

As pressões de saída do compressor variavam um pouco durante os ensaios e por isso foi utilizado a média dessas pressões corrigidas. A calibração da pressão encontra-se no anexo III.

4.2.2. Análise dos resultados

Na Tabela 3 encontram-se os resultados dos ensaios realizados. Foi fixada a frequência do inversor de frequência do compressor de hidrogênio antes de iniciar os ensaios, a potência é a média dos valores de potência consumida pelo compressor em cada ensaio.

A vazão de hidrogênio é a média de vazão de hidrogênio medida pelo Aalborg instalado entre o compressor e a célula a combustível.

A pressão de saída do compressor é a média das pressões já calibradas.

A razão de pressão é calculada pela equação 2

$$\frac{P_{sai}}{P_{ent}} \quad (2)$$

E a demanda específica é dado pela equação 3

$$\frac{Pot}{v} \quad (3)$$

Onde *Pot* é a potência elétrica consumida pelo compressor e *v* é a vazão de hidrogênio.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios do compressor de hidrogênio

Frequência	Potência	Vazão de H2	Pressão de saída do compressor	Razão de pressão	Demanda específica
Hz	W	L/h	kPa	-	Wh/L
20	348	1082	220	1,83	0,32
20	366	957	472	3,93	0,38
20	363	898	671	5,59	0,40
20	398	892	847	7,06	0,45
20	408	852	1063	8,86	0,48
20	425	831	1318	10,98	0,51
20	413	793	1511	12,59	0,52
20	427	770	1711	14,26	0,55
20	437	777	1902	15,85	0,56
30	485	1593	225	1,88	0,30
30	500	1388	472	3,93	0,36
30	487	1310	671	5,59	0,37

30	534	1319	846	7,05	0,40
30	551	1250	1063	8,86	0,44
30	573	1256	1318	10,98	0,46
30	552	1211	1506	12,55	0,46
30	556	1154	1717	14,31	0,48
30	568	1180	1904	15,87	0,48
40	622	2029	225	1,88	0,31
40	665	1779	475	3,96	0,37
40	661	1709	671	5,59	0,39
40	728	1744	841	7,01	0,42
40	738	1683	1063	8,86	0,44
40	765	1640	1318	10,98	0,47
40	755	1591	1502	12,52	0,47
40	738	1532	1716	14,30	0,48
40	755	1545	1904	15,87	0,49
50	797	2444	225	1,88	0,33
50	870	2210	476	3,97	0,39
50	882	2076	675	5,63	0,42
50	936	2104	850	7,08	0,44
50	957	2054	1067	8,89	0,47
50	994	1998	1318	10,98	0,50
50	986	1932	1509	12,58	0,51
50	971	1670	1716	14,30	0,58
50	984	1885	1908	15,90	0,52
60	1000	2777	231	1,93	0,36
60	1124	2620	483	4,03	0,43
60	1158	2503	678	5,65	0,46
60	1182	2483	851	7,09	0,48
60	1238	2432	1068	8,90	0,51
60	1239	2214	1510	12,58	0,56
60	1246	2222	1721	14,34	0,56
60	1261	2232	1906	15,88	0,56

Com essa análise é possível traçar a curva de demanda específica versus razão de pressão para os diferentes níveis de frequência, que pode ser visto na Figura 24:

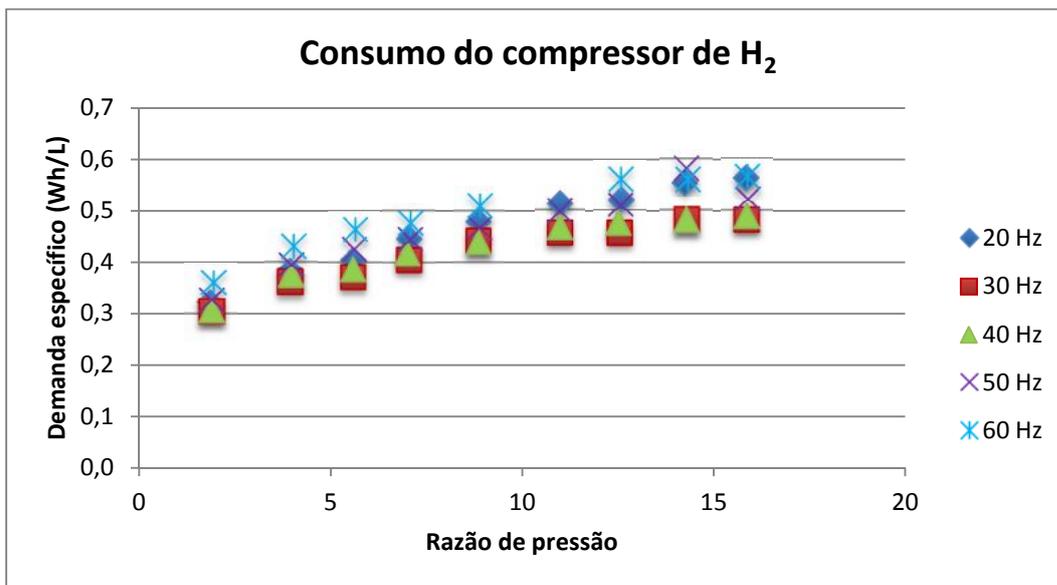


Figura 24 - Demanda do compressor de hidrogênio

4.2.3. Conclusões parciais da seção

Com base nos ensaios descritos acima e em seus resultados é possível observar o comportamento do compressor de hidrogênio para diferentes modos de operação, com frequências variando de 20 a 60 Hz e para razões de pressões baixas e altas.

Teoricamente, a demanda específica varia unicamente com a relação $\frac{P_{sai}}{P_{ent}}$, isto é, independe da velocidade rotacional do motor do compressor. Vale ressaltar que a eficiência volumétrica do compressor é reduzida para rotações elevadas enquanto que a do VFD é reduzida nas menores frequências. Conclui-se que a demanda varia de acordo com a razão de pressão, ou seja, quanto menor a razão de pressão, menor a demanda específica do compressor. Adicionalmente conclui-se que a demanda varia pouco com a variação da frequência para uma mesma razão de pressão e que quando o compressor opera com frequências de 30 e 40 Hz sua demanda específica é menor que para os outros níveis de frequência. Portanto, deve-se, sempre que possível, operar na faixa de frequência entre 30 e 40 Hz.

4.3. Célula a combustível

4.3.1. Ensaio com cargas fixas

A caracterização da célula a combustível (CaC) foi feita a partir de ensaios onde a CaC em conjunto com a bateria alimentava um consumo elétrico fixo durante 5 minutos. As cargas de consumo foram variadas de 100 a 2000 W. Na Figura 25 é destacado o subsistema de interesse para essa caracterização.

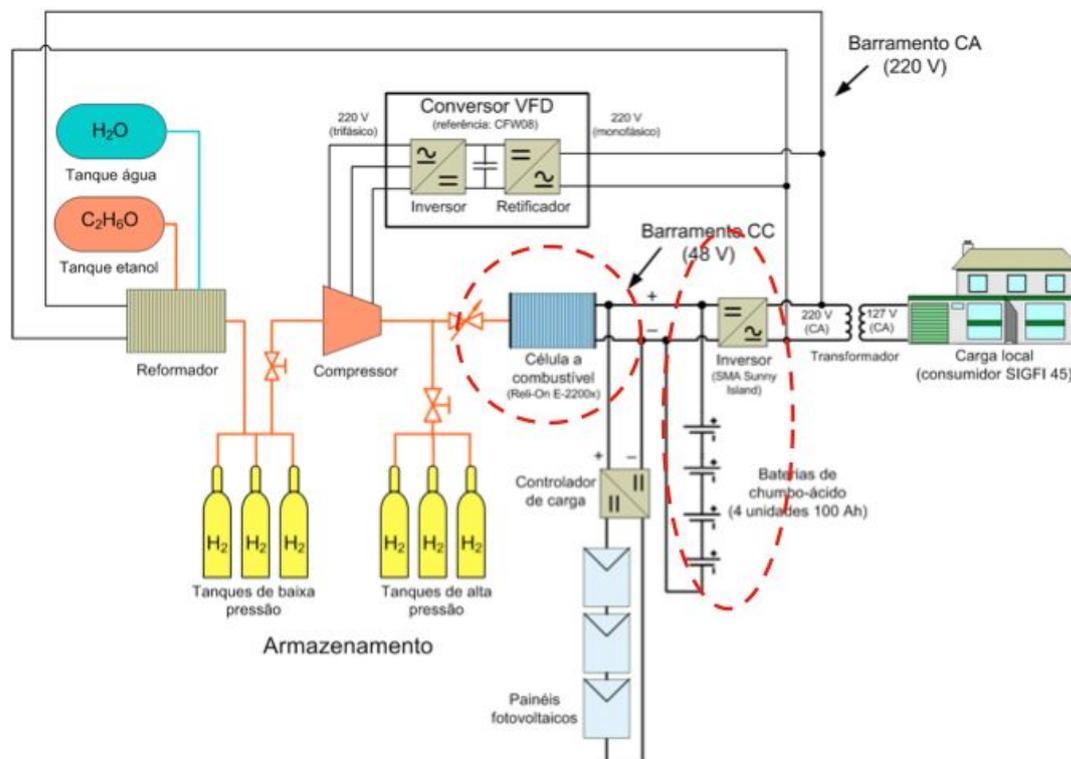


Figura 25 - Análise energética da Célula a Combustível

4.3.1.1. Metodologia dos ensaios

Operou-se a CaC no modo Contact Start, conforme indicado pelo fabricante do equipamento, alimentando uma carga fixa pré-estabelecida que variava em cada ensaio e com o banco de baterias plenamente carregado (SOC1=100%). A potência das cargas foram intercaladas (baixas e altas) com o objetivo de otimizar a carga do banco de baterias. Foram realizados ensaios

¹ SOC = State of Charge (Estado de Carga)

para cargas nominais com potências de 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800 e 2000 W. Observou-se que quando a potência da carga era baixa e o banco de baterias estava suficientemente carregado, a CaC fornecia potência elétrica zero (ou muito próxima de zero), sendo a carga totalmente alimentada pelo banco de baterias nesta situação.

Durante a caracterização energética da CaC observou-se que ocorriam, periodicamente, purgas, cuja vazão é superior ao fundo de escala do medidor de vazão, conforme pode ser observado na Figura 26. Para resolver esse problema foram feitas algumas correções na determinação da vazão de hidrogênio consumido, conforme descrito no Anexo II.

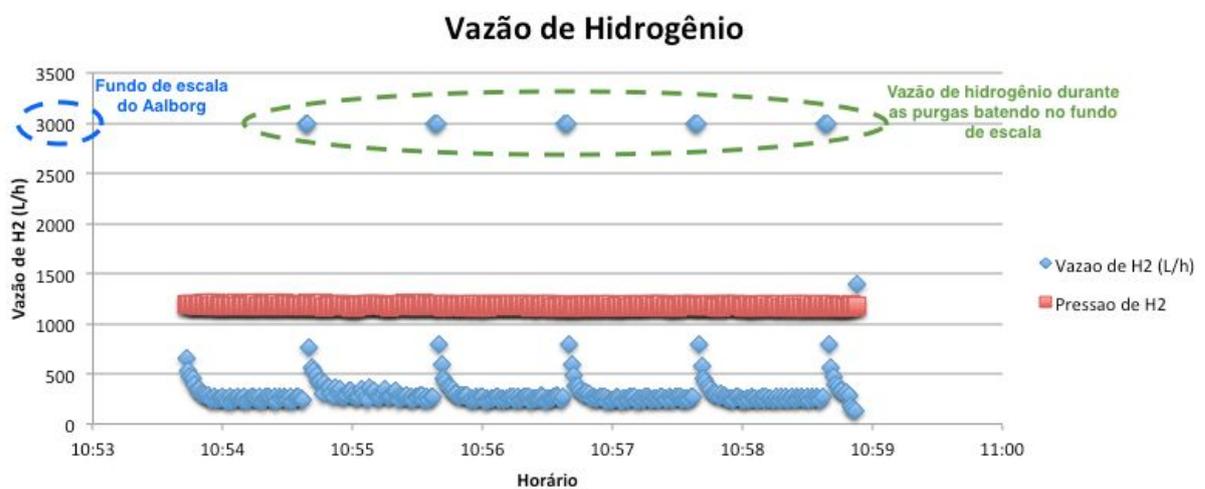


Figura 26 - Vazão de hidrogênio, incluindo as purgas periódicas

Para efeito da caracterização energética da CaC as purgas foram eliminadas e as vazões dos outros pontos foram integrados no tempo. Posteriormente adicionou-se a parcela referente a vazão durante as purgas, distribuídas uniformemente no tempo, como pode ser visto na Figura 27, para o ensaio com carga de 800 W.

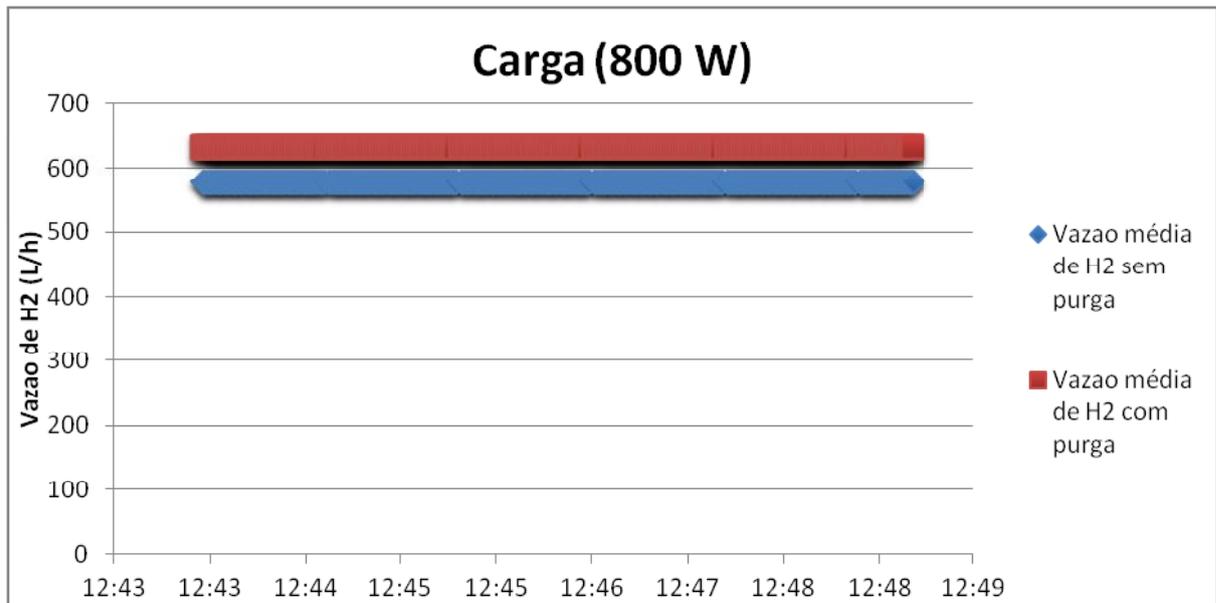


Figura 27 - Vazão de hidrogênio no ensaio de com carga de 800 W

Para calcular a potência (P_{CaC}) fornecida pela CaC foram feitas aferições na corrente da CaC (I_{CaC}) e na tensão do barramento (V). A potência é dada pela equação 4

$$P_{CaC} = V \cdot I_{CaC} \quad (4)$$

A aferição da corrente fornecida pela CaC e da tensão encontram-se no anexo III.

4.3.1.2. Análises dos resultados

Na Tabela 4 encontram-se as médias dos valores de potência disponibilizados pela CaC e a média do consumo específico de hidrogênio calculados para cada ensaio como descrito anteriormente. Adicionalmente, encontram-se os valores do consumo específico teórico fornecidos pelo manual do fabricante da CaC para a faixa de potência de 1000 a 2200 W.

Tabela 4 - Resultados dos ensaios da Célula a combustível

	Carga Total Nominal (W)	Potência fornecida pela CaC (W)	Consumo específico (Wh/L)
Valores	-	1000	0,79

teóricos		1500	0,79
		2000	0,79
		2200	0,76
Valores médios experimentais	200	144,1	2,70
	300	295,2	1,69
	400	388,4	1,45
	600	456,8	1,39
	500	525,9	1,25
	700	506,3	1,32
	800	506,6	1,23
	1000	641,5	1,25
	1200	512,5	1,25
	1400	495,0	1,32
	1600	483,8	1,37
	1800	482,4	1,37
	2000	543,1	1,28
SIGFI 45	850,3	0,83	
SIGFI 45	920,8	0,80	

Para obter a curva característica da CaC foi construído o gráfico consumo específico versus potência fornecida pela CaC e ajustada a curva que melhor representa o comportamento com base nos resultados experimentais e nos teóricos. A curva e sua equação estão representadas na Figura 28.

Adicionalmente, pela Tabela 4 pode-se verificar que a carga é atendida simultaneamente pela CaC e pelo banco de baterias que são as duas fontes de energia no arranjo experimental.

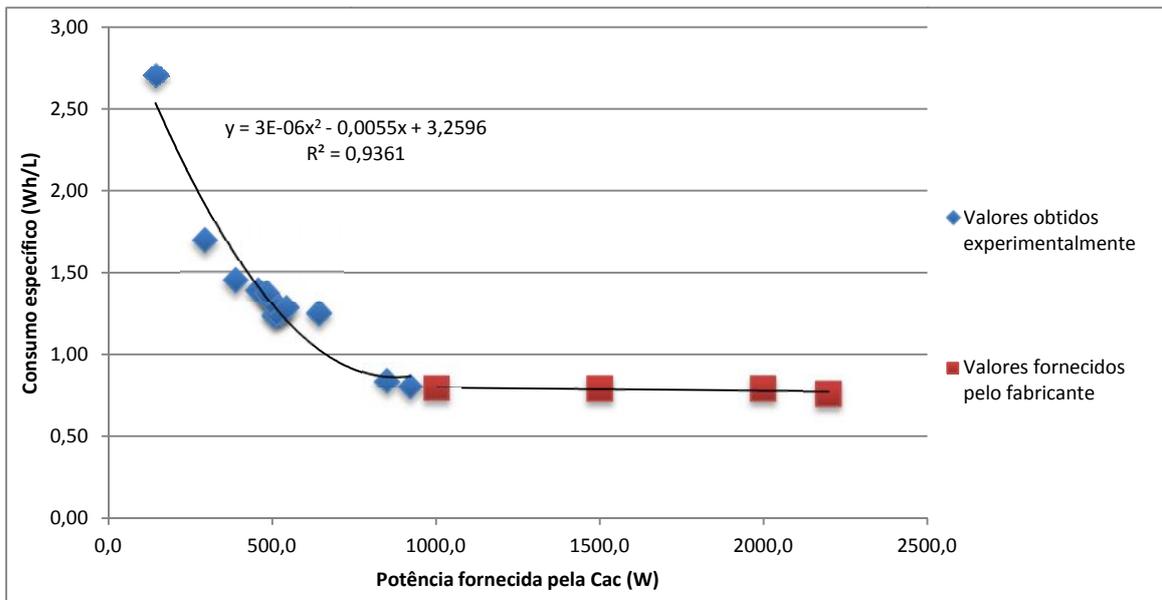


Figura 28 - Consumo específico da Célula a combustível

4.3.2. Ensaio utilizando a carga SIGIFI45

Foi feito outro tipo de ensaio para analisar o comportamento da CaC, esse ensaio utilizava o perfil de carga SIGIFI45 ao longo de 48 horas ao invés de cargas fixas. O teste começou com o banco de baterias 100% carregado e os parâmetros da CaC foram ajustados para a CaC entrar em operação quando a tensão no barramento chegasse a 50 V e parar de operar quando essa tensão atingisse 55 V. Na Figura 29 é possível observar a potência consumida seguindo o perfil SIGFI 45 e a potência elétrica gerada pela CaC durante o ensaio.

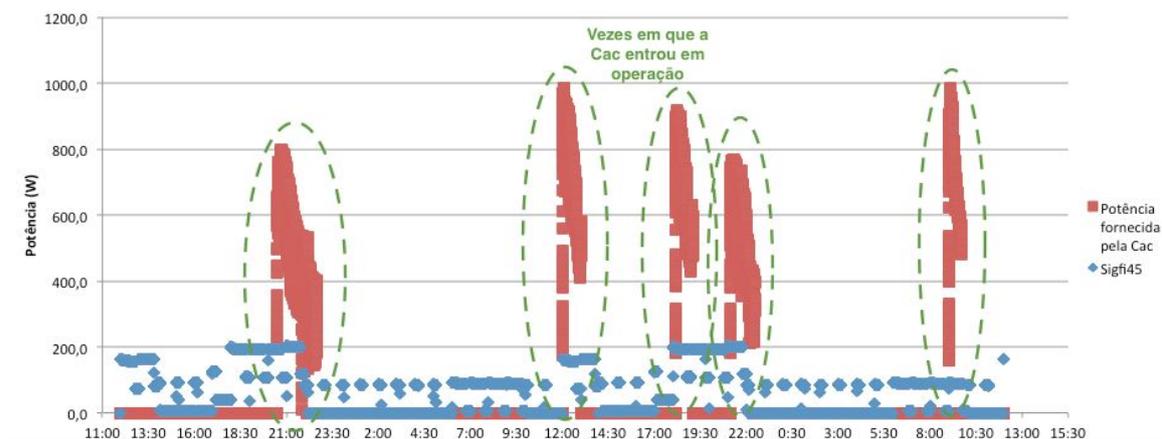


Figura 29 - Potência consumida e potência gerada pela CaC

Na Figura 30 é possível observar o nível do estado de carga do banco de baterias durante o ensaio e verificar que, quando a CaC entra em operação, o banco de baterias é carregado.

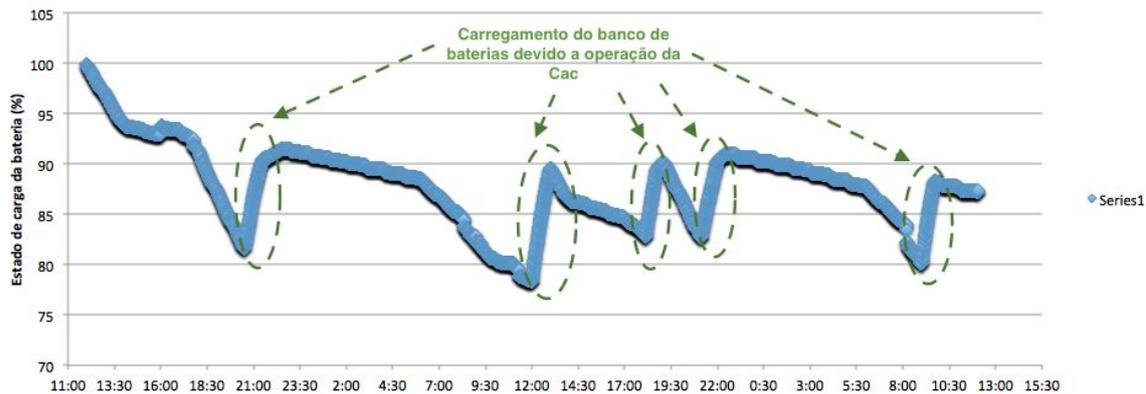


Figura 30 - Estado de carga do banco de baterias durante o ensaio

Como nesse ensaio a CaC forneceu valores mais elevados de potência, esses valores foram usados na caracterização da CaC. Eles encontram-se na Tabela 4 e na Figura 28.

4.3.3. Conclusões parciais da seção

Nos ensaios descritos não foi possível operar a CaC com potência acima de 600 W, e para observar o comportamento da CaC operando em altas potências utilizou-se dois valores experimentais do teste com a carga SIGFI 45 descrito no item 4.3.1.2, onde a CaC operou com potências mais elevadas. Adicionalmente foram acrescentados os valores teóricos de consumo fornecidos pelo fabricante.

Como observado na Figura 28, a CaC apresenta um comportamento para potências baixas e outro para potências mais altas. Para potências altas, maior ou igual a 1000 W, será usado o valor de consumo fornecido pelo fabricante, 0,79 Wh/L, para potências menores que 1000 W foi obtida a equação que melhor caracteriza o comportamento da CaC. Essa equação é válida para potências até 1000 W.

A partir do gráfico pode-se observar que a CaC é mais eficiente para potências mais elevadas, porém a partir de 1000 W o consumo específico é praticamente constante.

4.4. Inversor

Para a caracterização do inversor em relação a sua eficiência foi medida a potência de entrada no inversor e a potência fornecida pelo inversor durante os

ensaios. A Figura 31 mostra o esquema com a região de interesse destacada em vermelho.

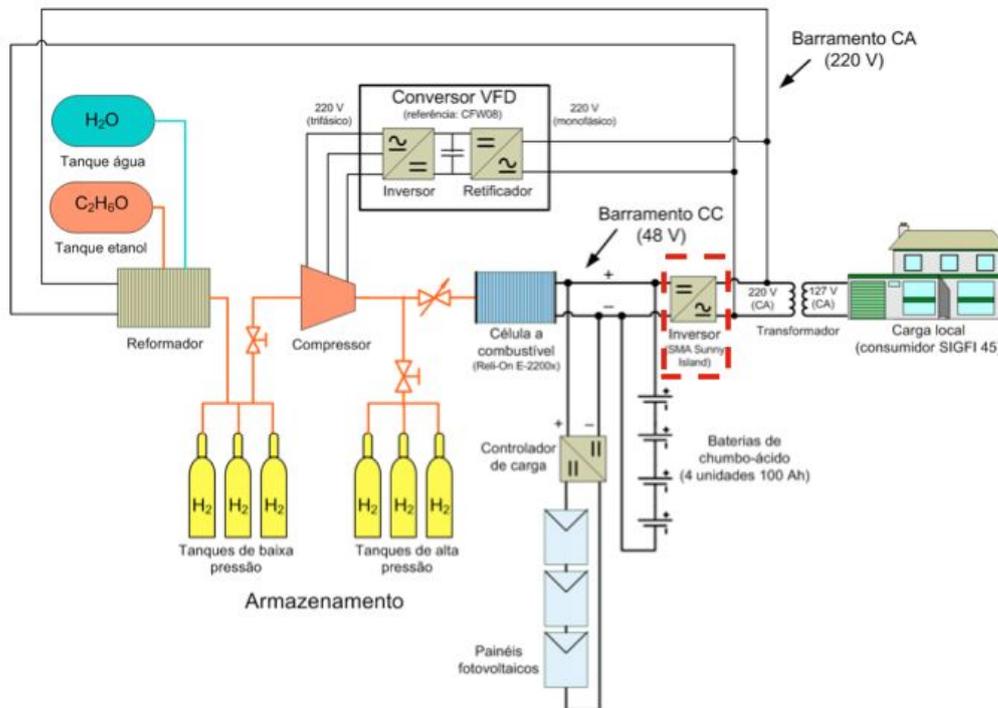


Figura 31 - Destaque da região de interesse para a caracterização do inversor

4.4.1. Metodologia dos ensaios

Para essa caracterização foram feitos ensaios utilizando a célula a combustível e o banco de baterias para alimentar um consumo elétrico fixo durante 5 minutos. As cargas variaram entre 100 a 1800 W.

A potência que entra no inversor, é calculada por:

$$P_{inv} = I_{inv}V \quad (5)$$

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

4.4.2. Análise dos resultados

Na Tabela 5 encontram-se as médias dos valores de potência na entrada do inversor ($P_{ot_{ent}}$) que foi calculada como descrito acima e a média da potência na saída do inversor ($P_{ot_{sai}}$) medida pelo analisador de energia PEM53

(Bender). Adicionalmente, encontram-se os valores de eficiência calculados da seguinte forma:

$$\eta = \frac{Pot_{sai}}{Pot_{ent}} \quad (6)$$

A potência normalizada é utilizada para comparar os valores calculados pelos ensaios com os valores indicados no manual do fabricante, calculada da seguinte forma:

$$\frac{Pot_{sai}}{2300}, \text{ onde o valor de 2300 corresponde à potência nominal do inversor.}$$

Tabela 5 - Resultados ensaios com o Inversor

Potência nominal (W)	Potência fornecida pelo inversor (W)	Potência de entrada do inversor (W)	Eficiência (%)	Potência normalizada	Tensão (V)
200	185,8	202,6	91,7%	0,08	51
300	276,9	293,8	94,3%	0,12	
400	368,2	386,1	95,4%	0,16	
500	460,3	483,3	95,3%	0,20	
600	551,4	579,9	95,1%	0,24	
700	641,8	673,9	95,2%	0,28	
800	733,6	773,4	94,9%	0,32	
1000	917,9	971,6	94,5%	0,40	
1200	1170,5	1243,8	94,1%	0,51	
1400	1356,0	1370,3	99,0%	0,59	
1600	1540,8	1597,7	96,4%	0,67	
1800	1448,7	1652,0	87,7%	0,63	

A Figura 32 mostra o gráfico da eficiência do inversor versus a potência normalizada.

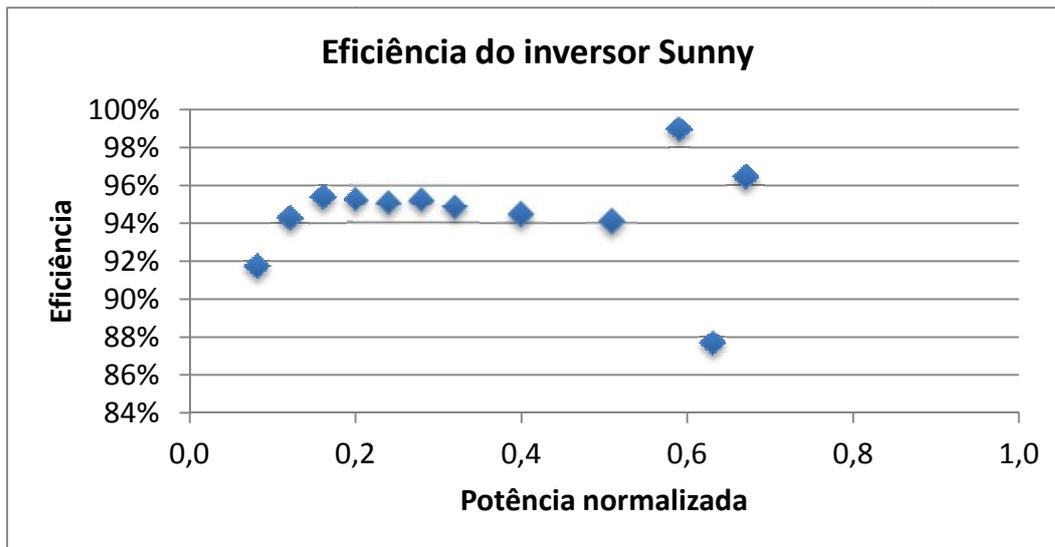


Figura 32 - Perfil de eficiência do inversor

A partir do gráfico acima pode-se comparar os valores de eficiências calculados nos ensaios com os valores indicados pelo fabricante do inversor, vistos na Figura 33.

4.4.3. Conclusões parciais da seção

Com a sobreposição dos valores obtidos pelos ensaios e os valores indicados pelo fabricante, Figura 33, é possível observar que para baixas potências, os resultados obtidos estão de acordo com os valores indicados, para as altas potências, os valores obtidos nos ensaios apresentaram dispersão. Essa dispersão se deve ao erro de leitura no amperímetro analógico e também devido ao ruído. Para efeito do projeto não há impacto na análise do comportamento com o perfil de carga do consumidor SIGFI 45, pois a potência máxima deste perfil está dentro da faixa de baixas potências, onde há concordância entre os valores experimentais e os valores informados pelo fabricante.

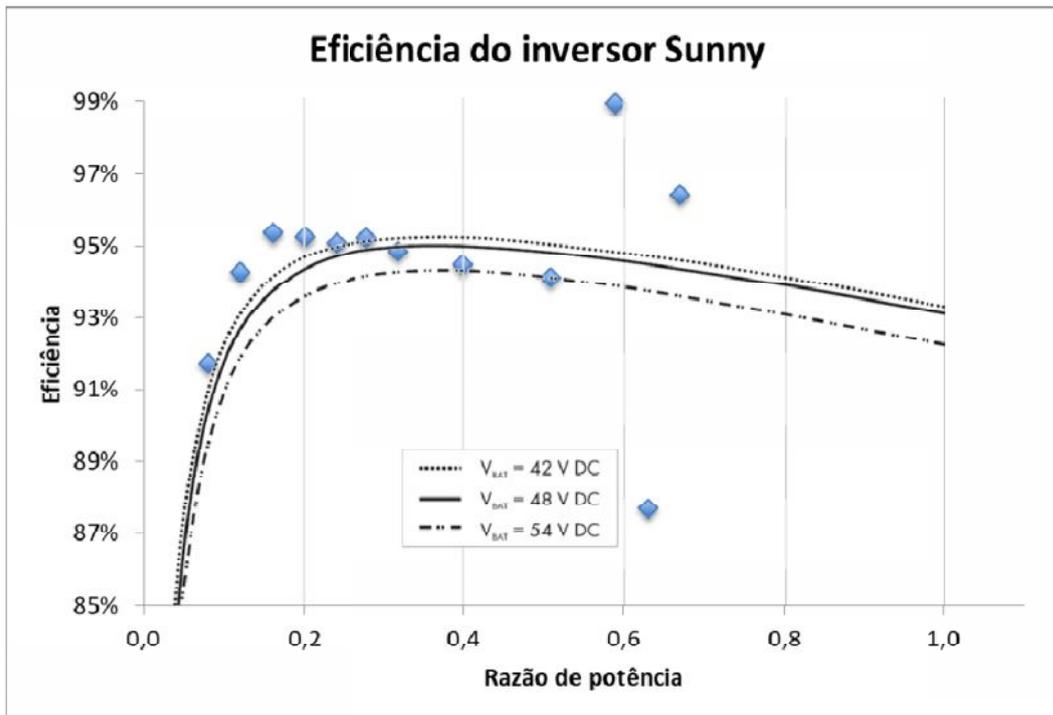


Figura 33 - Sobreposição dos valores experimentais e teóricos

A Figura 34 apresenta as duas equações para o cálculo da eficiência do inversor. A equação 7 é válida para cargas baixas, até 460 W (razão de potência 0, 2) e a equação 8 é válida para cargas altas, a partir de 461 W. Onde P é a carga em watts.

$$\eta = -534,18(P/2300)^2 + 199,28(P/2300) + 76,098 \quad (7)$$

$$\eta = -2,4918(P/2300)^2 + 0,7536(P/2300) + 94,795 \quad (8)$$

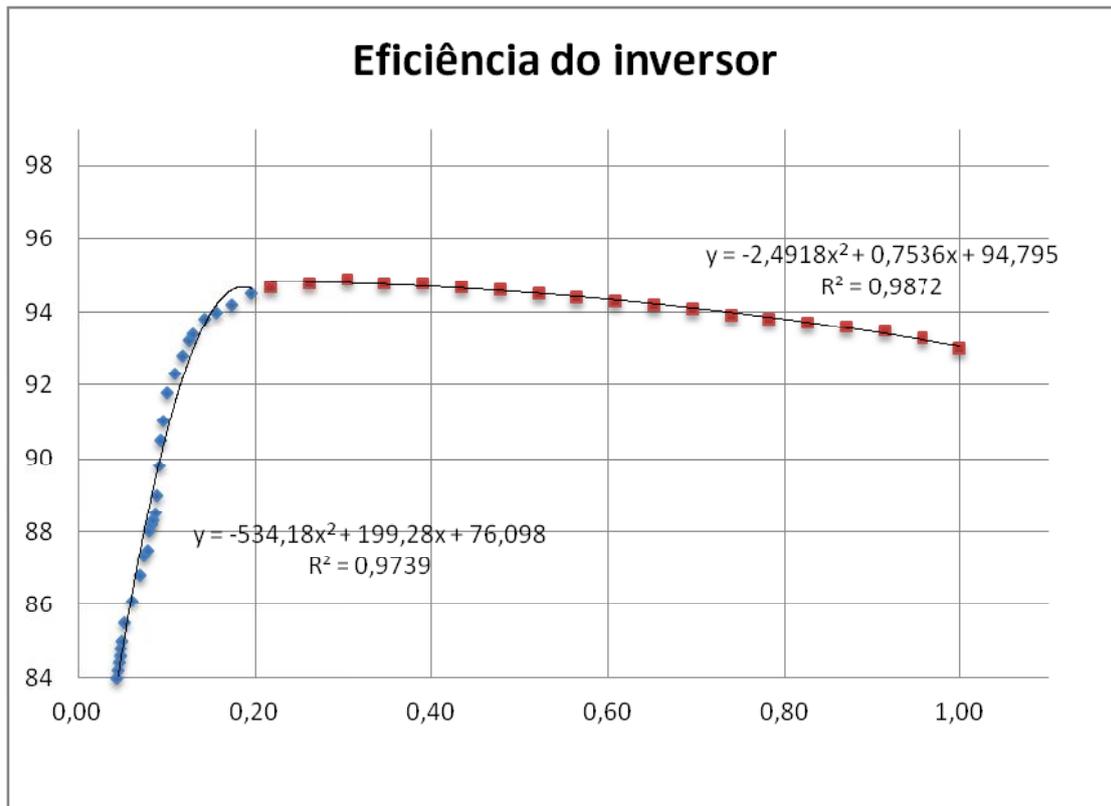


Figura 34 - Eficiência do inversor

4.5. Baterias

Para a caracterização do banco de baterias foram realizados quatro tipos de ensaios: de carregamento do banco de baterias (4.5.1); de descarga do banco de baterias com carga fixa (4.5.2); de descarga do banco de baterias com cargas variadas para um mesmo estado de carga (4.5.3) e de descarga do banco de baterias com utilização do perfil de carga de um consumidor SIGFI 45 (4.5.4).

4.5.1. Carregamento do banco de baterias

Foram feitos dois ensaios de carregamento do banco de baterias com o objetivo de calcular a eficiência do banco de baterias. Foi utilizada a célula a combustível para fornecer energia e carregar as baterias. Na Figura 35 é possível observar a região de interesse do sistema para esses ensaios.

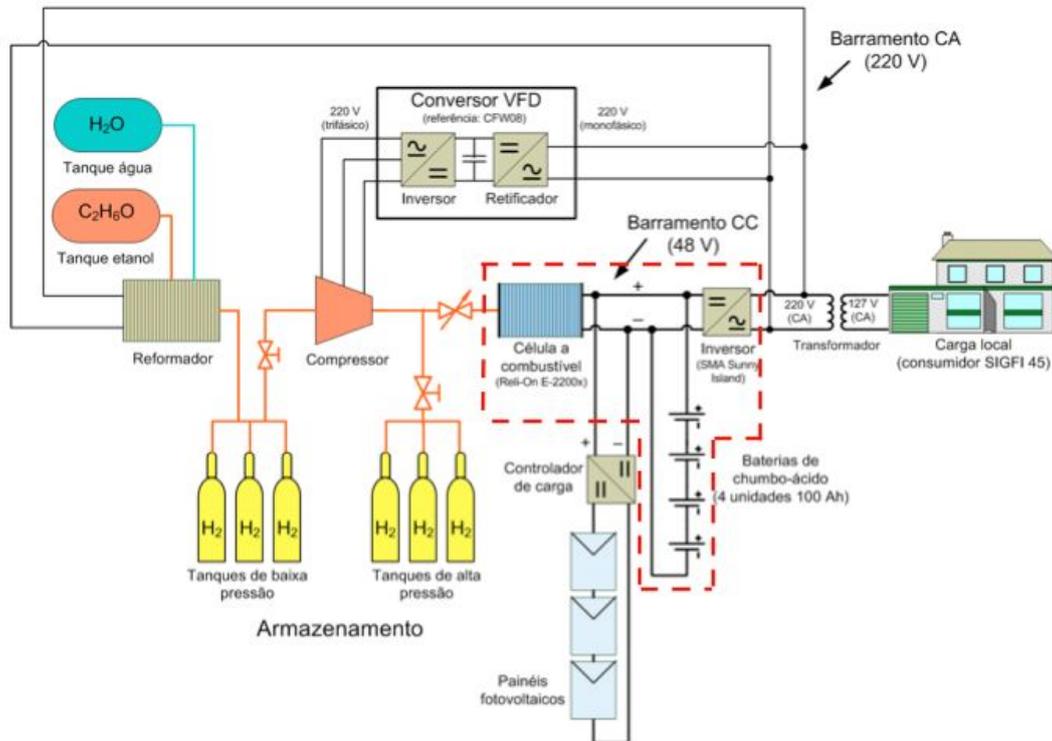


Figura 35 - Ensaio de armazenamento de energia no banco de baterias

No primeiro ensaio o banco de baterias começou com 38% de carga e foi carregado até 79%. No segundo ensaio o banco de baterias começou com 54% e foi carregado até 91%. Na Tabela 6 encontram-se os valores obtidos em cada um dos ensaios. A energia fornecida pela CaC é medida pelo software da própria CaC e o estado de carga (SOC) é calculado pelo inversor Sunny através de sistema de medição de corrente composto de um shunt inserido em série com as baterias e de um algoritmo interno que integra a corrente drenada/fornecida pelas mesmas.

Tabela 6 - Ensaio de carga do banco de baterias

	Ensaio 1	Ensaio 2
SOC inicial (%)	38	54
SOC final (%)	79	91
Duração (h)	04:15	04:10
Energia fornecida pela CaC (kWh)	2,5	1,6

SOC = Estado de carga do banco de baterias

Com base nos resultados obtidos nos ensaios descritos acima é possível observar que os dois ensaios têm duração muito próximas e que a energia fornecida pela CaC no ensaio 1 é maior do que aquela fornecida durante o ensaio 2. No ensaio 1 o carregamento foi de um estado de carga baixo (38%) até um estado de carga de 79% e para esses estados de carga a eficiência de carregamento de uma bateria VLRA é menor do que para o intervalo do ensaio 2 que foi de 54% até 91%. Isso explica o motivo da energia fornecida no ensaio 1 ser maior que a energia fornecida no ensaio 2. A curva de eficiência de carregamento da bateria VRLA pode ser observada na Figura 36.

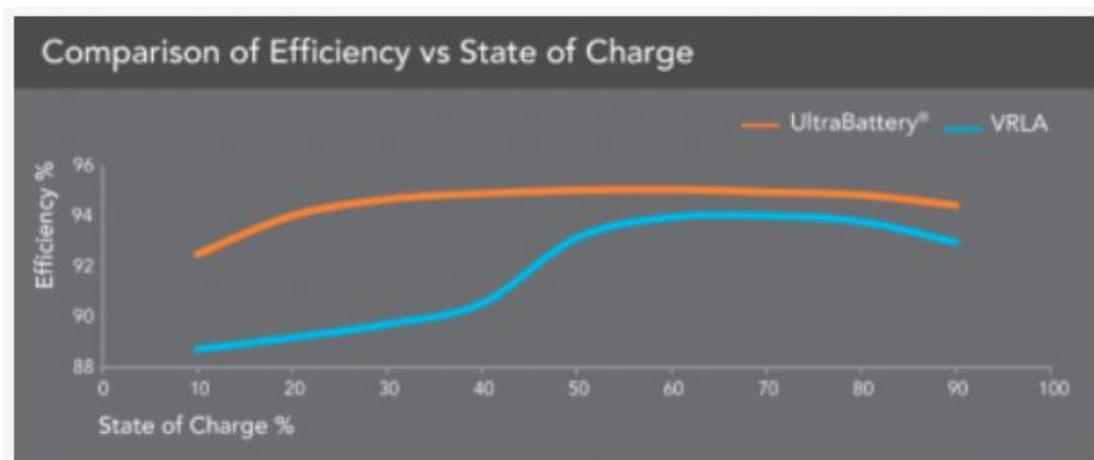


Figura 36 - Eficiência da bateria em função do estado de carga – Ref:
By Jssaten EEEJuly 20, 2016

4.5.2. Descarga do banco de baterias com carga fixa

Foram feitos seis ensaios de descarga com cargas fixas. Nesses ensaios foi utilizado o banco de baterias, o inversor e as cargas para consumo de energia. As cargas nominais utilizadas foram 100 W, 200 W, 300 W, 500 W, 700 W e 1500 W. A região de interesse desses ensaios pode ser vista na Figura 37.

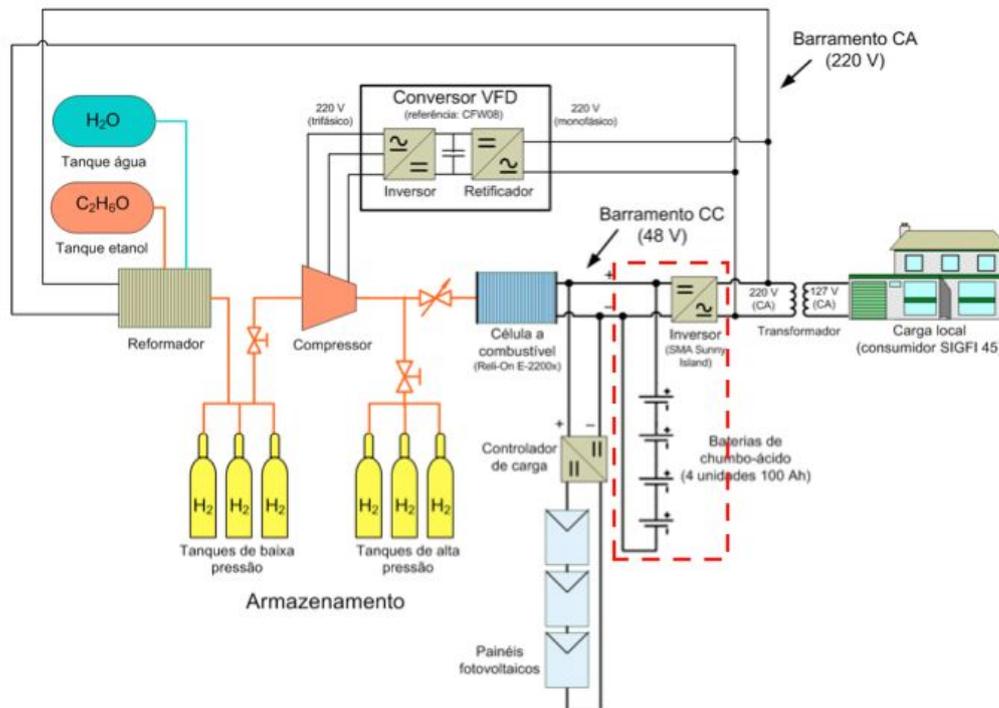


Figura 37 - Região de interesse dos ensaios de descarga da bateria

Na Figura 38 é possível observar as curvas reais de descarga para cargas fixas. Como esperado, verifica-se que quanto maior a carga alimentada pela bateria, maior a inclinação da curva de descarga e menor o tempo necessário para descarregar a bateria.

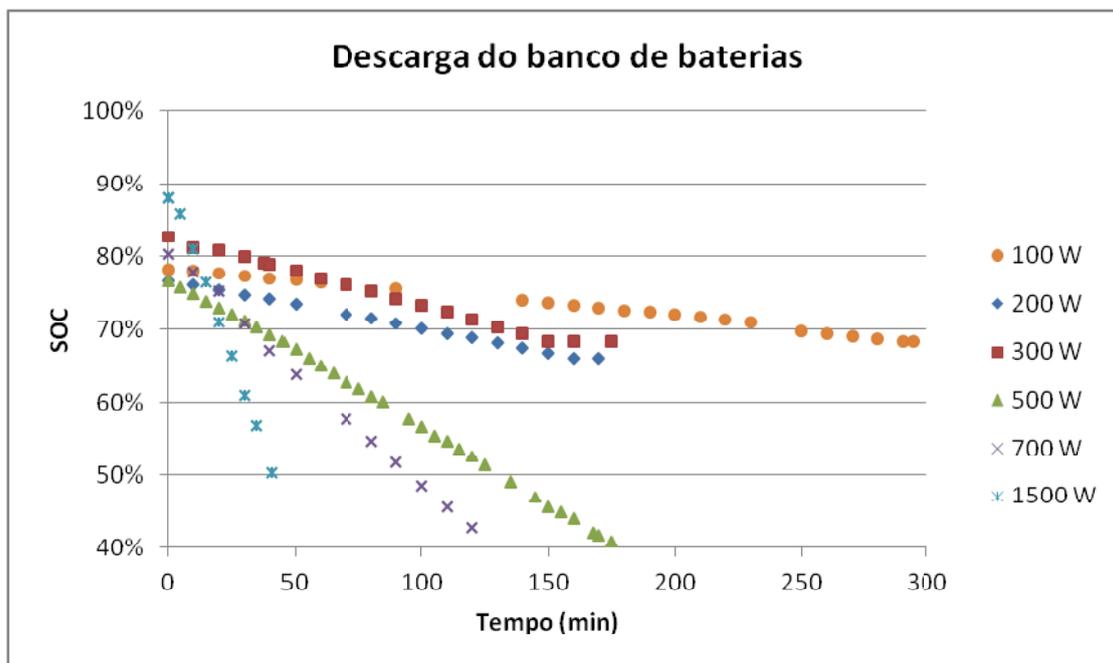


Figura 38 - Curvas reais de descarga para diferentes cargas fixas

A partir desses ensaios foram calculadas as eficiências do armazenamento do banco de baterias para cada carga. Para a carga de 1500 W o banco de baterias foi descarregado de 88% até 56% e foi comparado com o carregamento do ensaio 2 no intervalo de 56% até 88%. Para a carga de 500 W o banco de baterias foi descarregado de 76% até 40% e foi comparado com o carregamento do ensaio 1 no intervalo de 40% até 76%. Para a carga de 700 W o banco de baterias foi descarregado de 76% até 40% e comparado com o carregamento do ensaio 1 no intervalo de 40% a 76% e também foi descarregado de 77% até 54% para comparar com o carregamento do ensaio 2 no intervalo de 54% até 77%. Para a carga de 300 W o banco de baterias foi descarregado de 79% até 68% e foi comparado com o carregamento do ensaio 1 no intervalo de 68% até 79%. Para a carga de 200 W o banco de baterias foi descarregado de 78% até 67% e foi comparado com o carregamento do ensaio 1 no intervalo de 67% até 78%. Para a carga de 100 W o banco de baterias foi descarregado de 78% até 68% e foi comparado com o carregamento do ensaio 1 no intervalo de 68% até 78%.

A eficiência é calculada pela Equação 9

$$\eta = \frac{E_{liberada}}{E_{armazenada}} \quad (9)$$

Onde $E_{armazenada}$ é a energia fornecida pela CaC e armazenada no banco de baterias durante o intervalo especificado para cada ensaio e $E_{liberada}$ é a energia liberada pelo banco de baterias e consumida pelas cargas durante o intervalo especificado para cada ensaio, ou seja, representa a eficiência para a potência de cada carga, considerando a eficiência do inversor para as mesmas cargas.

Na Tabela 7 encontram-se as eficiências calculadas para as diferentes cargas.

Tabela 7 - Cálculo das eficiências para diferentes cargas

	100W	200W	300W	500W	700W (Ensaio 1)	700W (Ensaio 2)	1500W
SOC inicial (%)	68	66	68	40	40	54	56
SOC final (%)	78	76	79	76	76	77	88

Tempo de carregamento	01:00	00:55	01:10	03:25	03:25	03:30	03:10
Energia fornecida pela CaC (kWh)	0,52	0,66	0,69	2,22	2,22	1,44	1,36
Tempo de descarregamento	04:50	02:40	02:02	02:55	01:50	01:10	00:35
Energia consumida pela carga (kWh)	0,424	0,471	0,506	1,430	1,170	0,760	0,710
Energia fornecida a bateria (kWh)	0,505	0,532	0,542	1,510	1,233	0,801	0,754
Eficiência (*)	97,1%	75,1%	77,2%	67,8%	55,5%	55,6%	55,0%

SOC = Estado de carga do banco de baterias

(*) considerada a eficiência do inversor

Com base na Tabela 7 é possível observar que a eficiência da bateria diminui conforme a carga a ser alimentada aumenta, ou seja, a bateria é mais eficiente quando ela alimenta cargas menores, com base nos ensaios para uma carga de 100 W a eficiência foi de 97,1% e para a carga de 1500 W foi de 55%. Adicionalmente, nota-se que a eficiência da bateria não varia quando a bateria alimenta uma mesma carga fixa em diferentes estados de carga iniciais e finais, na Tabela 7 as eficiências de 55,5% e 55,6%, praticamente iguais, são para uma mesma carga alimentada (700 W) e diferentes estados de carga inicial e final.

4.5.3.

Descarga do banco de baterias com cargas variadas para um mesmo estado de carga

Para esses ensaios foram utilizados o banco de baterias, as cargas fixas para consumir a energia elétrica armazenada nas baterias e o inversor. A diferença desses ensaios para os descritos no item 3.5.2 é que agora as cargas variam durante um mesmo ensaio e o estado de carga do banco de baterias é constante durante todo o ensaio. Para que isso fosse possível, as cargas tinham que ser variadas de 5 em 5 segundos pois se passasse mais tempo o estado de carga não seria o mesmo durante todo o ensaio. A região de interesse para

esses ensaios é a mesma para os ensaios do item 4.5.2 e pode ser vista na Figura 37.

As cargas nominais para esses ensaios foram 200, 400, 600, 800, 1000, 2000 W. Dessa forma realizou-se a descarga do banco de baterias para diferentes níveis de estado de carga, 70%, 75%, 80%, 85%, 90%, 95% e 99%.

No anexo III encontra-se a aferição da corrente fornecida pela bateria.

Com os valores de tensão e corrente no banco de baterias em cada nível de carga é possível observar a relação tensão versus corrente da bateria para cada estado de carga do banco de baterias na Figura 39.

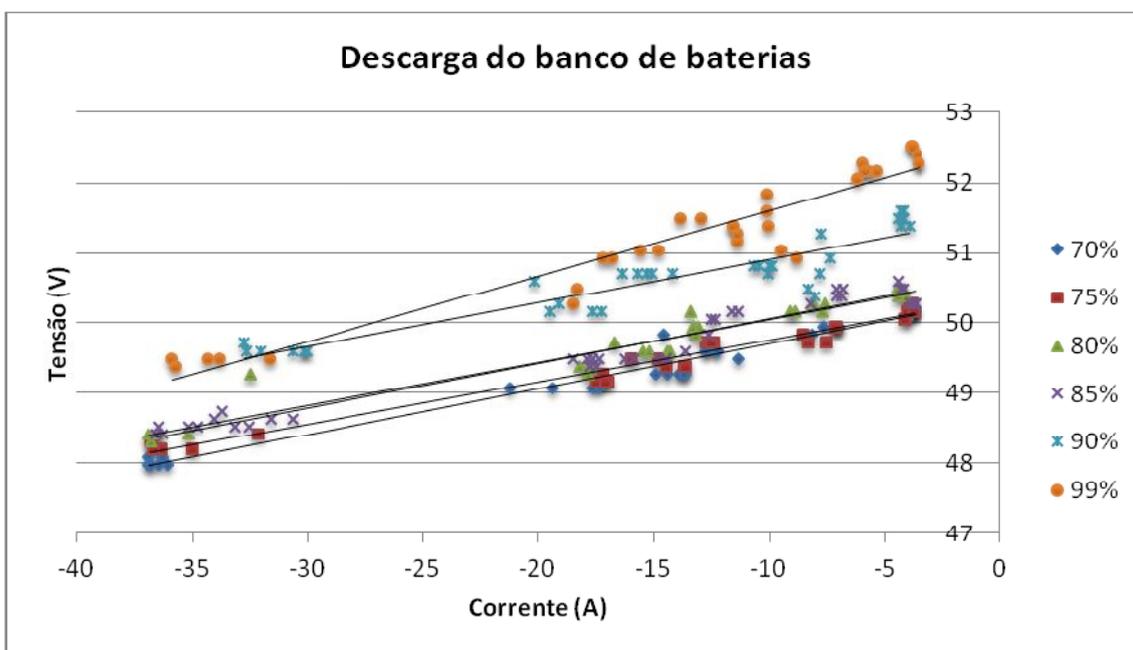


Figura 39 - Descarga do banco de baterias para diferentes estados de carga

As curvas reais de descarga do banco de baterias seguem o comportamento esperado onde as curvas para os diferentes estados de cargas são paralelas e ordenadas de acordo com o estado de carga.

4.5.4. Descarga do banco de baterias com carga de um consumidor com perfil SIGFI 45

Para calcular o estado de carga do banco de baterias foi utilizado a carga SIGFI 45 para descarregar o banco de baterias. O perfil de cargas SIGFI45 durante esse ensaio pode ser visto na Figura 40.

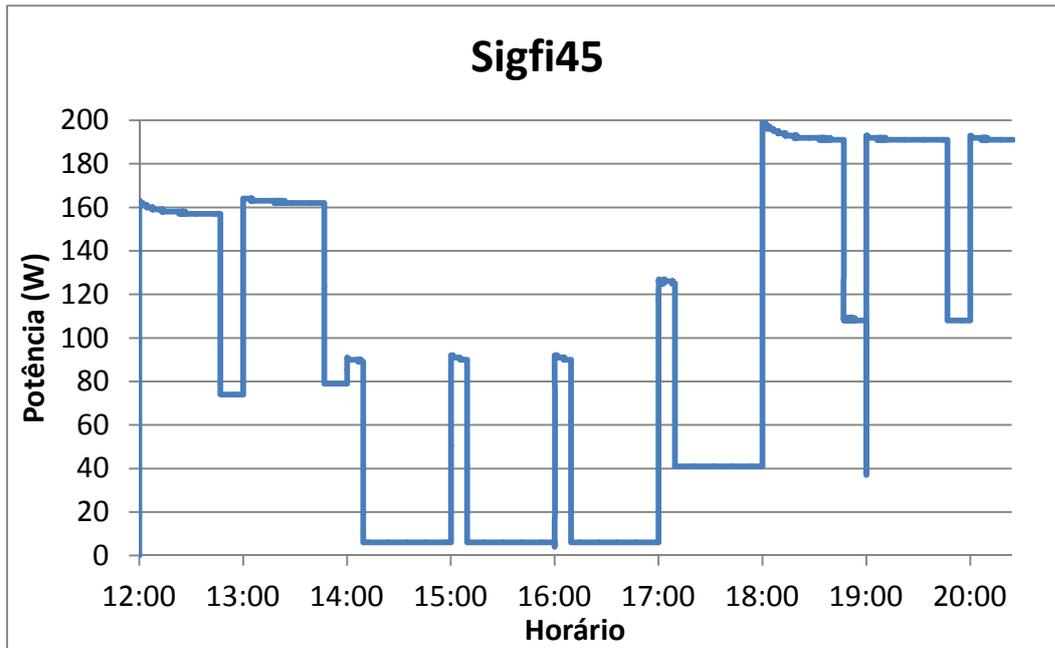


Figura 40 - Perfil da Carga SIGFI 45 durante o ensaio

A carga extraída da bateria é a integração da corrente ao longo do tempo, dada pela Equação 10.

$$Q_e(t) = Q_{e0} + \int_0^t -I_m(\tau) d\tau \quad (10)$$

Onde, Q_e é a carga extraída em Ampere-segundo, Q_{e0} é a carga inicial extraída em ampere-segundo, I_m é a corrente em ampere, τ é a variável tempo de integração e t é o tempo de simulação em segundos.

E o estado de carga (SOC) da bateria é calculado pela Equação 11.

$$SOC = 1 - \frac{Q_e}{C} \quad (11)$$

Onde SOC é o estado de carga da bateria, Q_e é a carga da bateria em Ampere-segundo e C é a capacidade da bateria em ampere-segundo.

Foi calculado o estado de carga para capacidade de 100 Ah (Figura 41) e esses valores foram comparados com o valor de estado de carga medido pelo inversor.

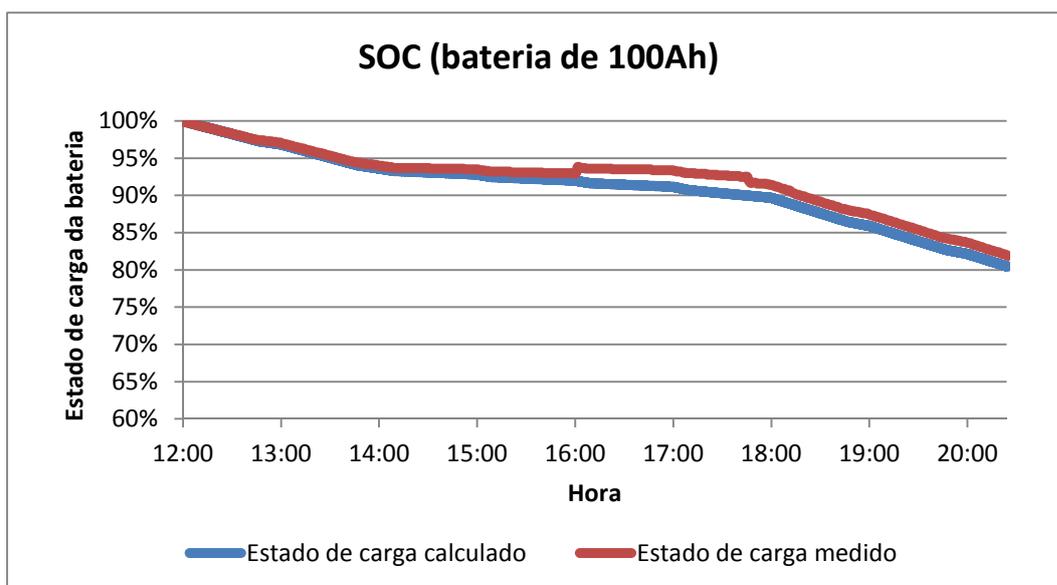


Figura 41 - Estado de Carga para 100Ah

O estado de carga calculado segue o mesmo perfil do estado de carga medido. A pequena diferença que pode ser observada na Figura 41 se deve a períodos onde não havia consumo elétrico. Quando a carga da bateria para de ser consumida, seu estado de carga leva um tempo para se estabilizar, isso explica o degrau observado.

4.6. Sistema de armazenamento de Hidrogênio

Para a caracterização do sistema de armazenamento de hidrogênio foi considerado um volume de controle nos cilindros de alta pressão para que a equação da continuidade fosse aplicada. Na saída do reformador há um medidor de vazão (Aalborg) que fornece a vazão mássica de hidrogênio que é comprimida e armazenada nos cilindros de alta pressão (\dot{m}_{ent}). Na saída desses cilindros há outro medidor de vazão que fornece a vazão mássica de hidrogênio que entra na CaC (\dot{m}_{sai}). Com essas informações é possível calcular a taxa de variação da massa no volume de controle. Na Figura 42 é destacado o volume de controle (pontilhado em preto) do sistema de armazenamento de hidrogênio. Para os efeitos de caracterização e validação da modelagem deste sistema, foi estudado apenas um cilindro, neste caso o cilindro a. Para este propósito foi realizado o fechamento da válvula do ramal dos cilindros (a), (b) e (c) e dos cilindros (b) e (c). Foi introduzido também uma linha de by-pass ressaltada em azul. No ensaio foi realizado a transferência trasvase do hidrogênio do cilindro (a) para os cilindros do ramal (e), (f), (g) e (h) utilizando o compressor. A pressão inicial do hidrogênio no cilindro (a) foi de 15,5 atm.

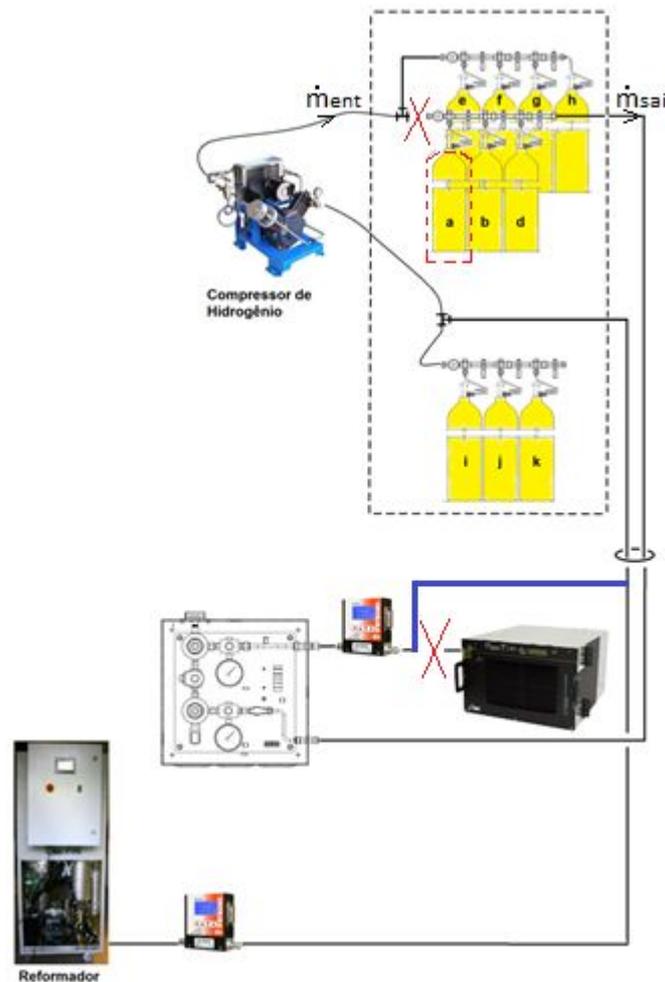


Figura 42 - Volume de controle para caracterização dos cilindros de alta pressão

De forma geral se utiliza a equação da continuidade de massa mostrada na equação 12:

$$\frac{dm_{v.c.}}{dt} = \sum \dot{m}_{ent} - \sum \dot{m}_{sai} \quad (12)$$

A integração da Equação 12 fornece a massa de hidrogênio contida nos cilindros. Sendo um problema de valor inicial, a massa ou número de moles de hidrogênio no cilindro é calculada a partir da pressão e temperatura inicial do hidrogênio como mostrado na Equação 13:

$$P_{sto} = \frac{RT_{sto}}{V_{sto}} n \quad (13)$$

Onde, P_{sto} é a pressão de armazenamento de hidrogênio no interior dos cilindros de alta pressão que foi medido durante os ensaios, R é a constante universal dos gases ideais, T_{sto} é a temperatura de hidrogênio no armazenamento que foi medido durante os ensaios, V_{sto} é o volume dos cilindros

que é fixo e n é o número de mols. A massa molar do hidrogênio é 2,02 g/mol e assim é possível calcular a massa de hidrogênio no instante inicial do ensaio.

$$m_0 = M \cdot n \quad (14)$$

Resultado do processo de integração pelo método de Euler, para o instante de tempo seguinte a massa de hidrogênio no interior dos cilindros de alta pressão é calculada utilizando a Equação 14 .

Para o instante de tempo seguinte é utilizada a Equação 15 para calcular a massa de hidrogênio no interior dos cilindros de alta pressão.

$$m_{t+1} = m_t + (\dot{m}_{ent} - \dot{m}_{sai})\Delta t \quad (15)$$

As massas que entram e saem do volume de controle são fornecidos em volume standard ou padrão a partir da qual se calcula as respectivas massas. A partir da massa de hidrogênio contida nos cilindros em cada instante do ensaio, a pressão pode ser calculada pela equação de estado e esses valores podem ser comparados com os medidos pelo sensor de pressão. A Figura 43 mostra o gráfico dos valores de pressão calculados e medidos.

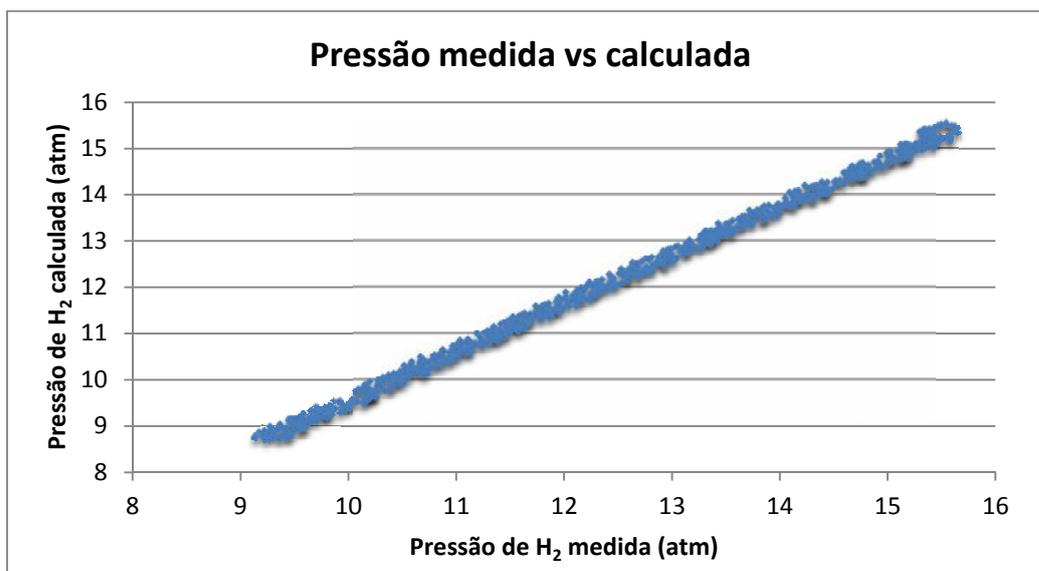


Figura 43 - Comparação da pressão medida com a calculada no interior dos cilindros de alta pressão

5 Simulação numérica

Com base na caracterização energética de todos os componentes que fazem parte do sistema integrado de geração foi possível elaborar o programa computacional em VBA (Visual Basic for Application) para simular e otimizar a operação. O simulador descrito neste projeto foi construído para processamento em uma planilha Excel™, cujo executável encontra-se gravado no CD constante do Anexo IV.

Para efeito da construção do simulador foram consideradas as fontes de energia a saber: painéis fotovoltaicos, banco de baterias e célula a combustível. São cargas do sistema o consumidor de energia representado pelo perfil SIGFI 45, o reformador de etanol, o compressor de hidrogênio e os equipamentos periféricos.

O simulador foi construído em três partes com o intuito de simular, separadamente, cada uma das fontes de energia. Na parte 1 foram consideradas o banco de baterias e a célula a combustível como fontes de energia para alimentar a carga do consumidor representada através do perfil SIGFI 45. Na parte 2 foi adicionado o reformador, responsável pela produção do hidrogênio a ser consumido na célula a combustível. Nesse caso, as cargas a serem alimentadas passam a ser o reformador de etanol, o compressor de hidrogênio e o consumidor SIGFI 45. Na parte 3 foram adicionados os painéis fotovoltaicos ao sistema como mais uma fonte de energia capaz de alimentar as cargas descritas anteriormente. Em todas as partes construtivas do simulador há que se considerar a presença do inversor de frequência, o qual converte a corrente contínua (CC) proveniente das fontes de energia em corrente alternada (CA) para alimentação das cargas.

5.1. Simulador PARTE 1 (CaC + Bateria + Inversor + cilindros de hidrogênio)

Na Parte 1 considerou-se que toda a carga demandada pelo consumidor SIGFI 45 é fornecida pelo banco de baterias e pela célula a combustível, conforme é possível observar no esquema da Figura 44.

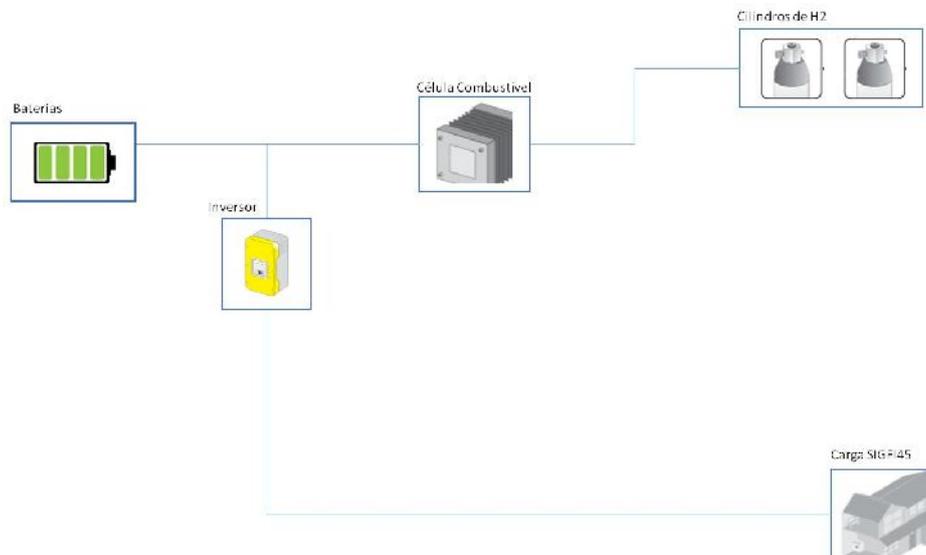


Figura 44 - Esquema da Parte 1 do simulador

5.1.1. Banco de baterias

A modelagem do banco de baterias foi baseada no estudo de Jackey, (2007). Doravante, o banco de baterias será denominado simplesmente como bateria.

Na primeira parte do simulador os dados de entrada para o usuário são o estado de carga inicial da bateria (SOC) e o horário de início do ciclo a ser simulado, pois a carga depende do horário do dia. A duração da simulação é de 24 horas para abranger um ciclo completo do perfil SIGIFI 45. A célula a combustível (CaC) entra em operação quando a tensão do barramento atinge o "Low Voltage Start - (LVS)" e desliga automaticamente quando atinge o tempo determinado pelo usuário. A tensão LVS e o tempo de operação da CaC (*Timer*) podem ser alterados pelo usuário para otimização da operação do sistema. O simulador fornece os gráficos de tensão no barramento, estado de carga (SOC) da bateria, variação da pressão nos cilindros de hidrogênio e consumo específico da CaC.

A bateria segue o modelo da Figura 45 e a partir dele foram calculadas as

resistências internas da bateria (R_0 , R_1 , R_2).

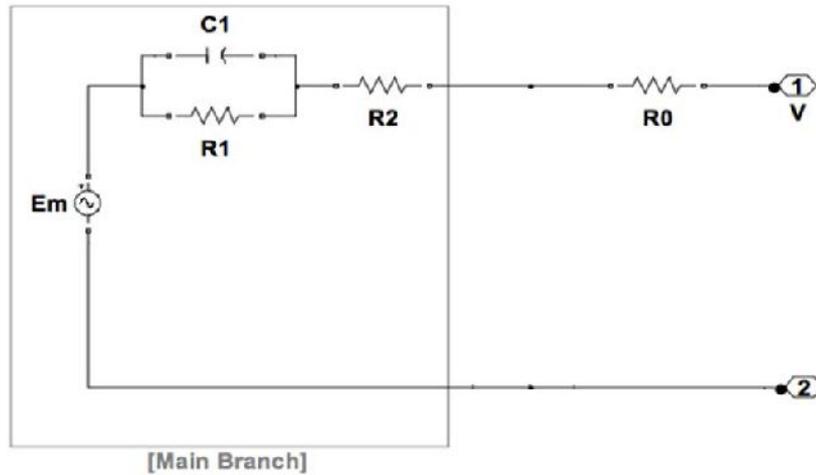


Figura 45 - Modelagem da bateria (adaptado de Jackey, 2007)

O estado de carga (SOC) da bateria é dado pela Equação 16:

$$SOC = 1 - \frac{Q_e}{C} \quad (16)$$

Onde Q_e é a carga extraída da bateria em Amperes segundos que foi calculada conforme as Equações 17 e 18, C é a capacidade da bateria que é 100 Ah e onde $Q_{e\ ini}$ é a carga extraída da bateria, SOC_{ini} é o estado de carga da bateria são as condições iniciais antes do teste começar.

$$Q_{e\ ini} = (1 - SOC_{ini}) \cdot (K_t \cdot K_c \cdot C) \quad (17)$$

$$Q_{e\ t+1} = Q_{e\ ini} - I_t \cdot \Delta t \quad (18)$$

A resistência R_0 , em Ohms, é dada pela Equação 19.

$$R_0 = R_{00} (1 + A_0 \cdot (1 - SOC)) \quad (19)$$

Onde R_{00} é o valor de R_0 para um estado de carga de 100% e A_0 é uma constante.

Para o cálculo de R_1 (Equação 22) é necessário, preliminarmente, calcular a profundidade de carga (DOC), a qual é dada pelas Equações 20 e 21, onde 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 amperes, θ é a temperatura que foi considerada constante em 25°C, I é a corrente da bateria.

$$DOC = 1 - \frac{Q_e}{C(I_{avg}, \theta)} \quad (20)$$

$$C(I_{avg}, \theta) = \frac{K_c \cdot C_{0*} \cdot K_t}{1 + (K_c - 1) \cdot (I/I^*)^\delta} \quad (21)$$

$$R_1 = -R_{10} \cdot (\log(DOC)) \quad (22)$$

A equação 23 estima a corrente média I_{avg}

$$I_{avg} = \frac{I_m}{(\tau_1 s + 1)} \quad (23)$$

Onde I_m é a corrente média do circuito principal, τ_1 é a constante de tempo do circuito RC em segundos.

A capacitância do circuito principal é dada por:

$$C_1 \approx \tau_1 / R_1 \quad (24)$$

A resistência R_2 é calculada pela Equação 25,

$$R_2 = R_{20} \frac{\exp(A_{21} \cdot (1 - SOC))}{1 + \exp(A_{22} \cdot I/I^*)} \quad (25)$$

Onde R_2 é a resistência do circuito principal em ohms, R_{20} é uma constante em Ohms, A_{21} e A_{22} são constantes, I e I^* são respectivamente a corrente da bateria e a corrente nominal da bateria, ambas em Amperes.

A equação 26 calcula a quantidade de carga extraída da bateria. A carga extraída da bateria é a integração do fluxo de corrente saindo ou entrando no circuito principal.

$$Q_e(t) = Q_{e_init} + \int_0^t -I_m(\tau) d\tau \quad (26)$$

Onde Q_e é a carga extraída em ampere segundo, Q_{e_init} é a carga inicial extraída em ampere segundo, I_m é a corrente do circuito principal em ampere, τ é a constante de tempo de integração e t é o tempo em segundos.

A tensão foi calculada pelas Equações 27 e 28, onde N_B é o número de baterias no banco de baterias, no sistema que são 4 baterias, N_c é o número de células em cada bateria, para a bateria utilizada no sistemas são 6 células. E_m é a tensão do circuito aberto da bateria em volts, E_{m0} é a tensão do circuito aberto

da bateria com carga completa em volts, K_e é uma constante em $V/^\circ C$, θ é a temperatura em $^\circ C$ que foi mantida em $25^\circ C$, e SOC é o estado de carga da bateria.

$$V = N_B \cdot N_c \cdot (Em + (R_0 + R_1 + R_2) \cdot I) \quad (27)$$

$$Em = Em_0 - K_e \cdot (273 + \theta) \cdot (1 - SOC) \quad (28)$$

5.1.2. Célula a combustível (CaC)

A CaC entra em operação quando o SOC for menor que 100% e a tensão no barramento atingir um valor inferior ao LVS e permanece ligada por um período determinado pelo usuário. A potência da CaC (Pot_{CaC}) é calculada pelas Equações 29 e 30.

$$Pot_{CaC} = V \cdot I_{CaC} \quad (29)$$

$$I_{CaC} = I + \frac{Pot}{V} \quad (30)$$

Onde, I_{CaC} é a corrente da CaC, e Pot é a carga a ser alimentada.

O consumo específico da CaC é dado pela Equação 31, a qual foi determinada na caracterização energética da mesma (capítulo 4)

$$c_{CaC} = 3 \cdot 10^{-6} \cdot Pot_{CaC}^2 - 0,0055 \cdot Pot_{CaC} + 3,2596 \quad (31)$$

O volume de hidrogênio consumido pela CaC é dado pela Equação 32:

$$V_{CaC} = \frac{Pot_{CaC}}{c_{CaC}} \quad (32)$$

5.1.3. Cilindros de hidrogênio

A pressão nos cilindros de hidrogênio é calculada pela Equação 33, onde \dot{m}_e é a vazão mássica que entra nos cilindros de hidrogênio, que neste caso é igual a zero pois o reformador está desligado. \dot{m}_s é a vazão mássica que sai dos cilindros de hidrogênio para alimentar a CaC.

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s \quad (33)$$

A vazão mássica \dot{m}_s que sai dos cilindros está representada pela Equação 34 onde \dot{V}_{CaC} é a vazão volumétrica de hidrogênio consumida pela CaC em L/s e ρ é a densidade do hidrogênio em g/L.

$$\dot{m}_s = \dot{V}_{CaC} \cdot \rho \quad (34)$$

As Equações 35 a 37, representam a variação da massa de hidrogênio onde m_{t+1} é a massa de hidrogênio contida nos cilindros no instante t+1, m_t é a massa de hidrogênio no instante anterior, n_{t+1} é o número de mols, M é a massa molar, R é a constante universal dos gases perfeitos e T é a temperatura, V é o volume de hidrogênio em litros.

$$m_{t+1} = m_t + (\dot{m}_e - \dot{m}_s) \cdot \Delta t \quad (35)$$

$$n_{t+1} = \frac{m_{t+1}}{M} \quad (36)$$

$$P_{t+1} = \frac{n_{t+1} \cdot R \cdot T}{V} \quad (37)$$

5.1.4. Inversor

Conforme pode ser observado na Figura 44 o inversor corresponde a um ponto nodal do sistema, no qual chega a energia armazenada na bateria e a fornecida pela CaC e de onde sai a energia para alimentar as cargas do sistema. O inversor de frequência apresenta eficiência variável em função da carga total alimentada e calculada pela Equação 38 para cargas inferiores a 460 W e pela Equação 39 para cargas superiores a esta.

$$\eta_{inv} = -534,18 \cdot (Pot/2300)^2 + 199,28 \cdot (Pot/2300) + 76,098 \quad (38)$$

$$\eta_{inv} = -2,4918 \cdot (Pot/2300)^2 + 0,7536 \cdot (Pot/2300) + 94,795 \quad (39)$$

A carga total a ser alimentada pelo sistema é expressa pela Equação 40:

$$Pot = \frac{Pot_{SIGFI45}}{\eta_{inv}} \quad (40)$$

Onde, Pot é a carga a ser alimentada (SIGFI 45) e η_{inv} é a eficiência do inversor.

5.2. Simulador PARTE 2 (Parte 1 + reformador + compressor)

Na Parte 2 foi adicionado o reformador de etanol e o compressor na simulação, conforme visto na Figura 46. Devido à inclusão do reformador e do compressor na Parte 2 do simulador, os quais constituem cargas do sistema, a carga total a ser alimentada foi alterada gerando modificações no cálculo da eficiência do inversor.

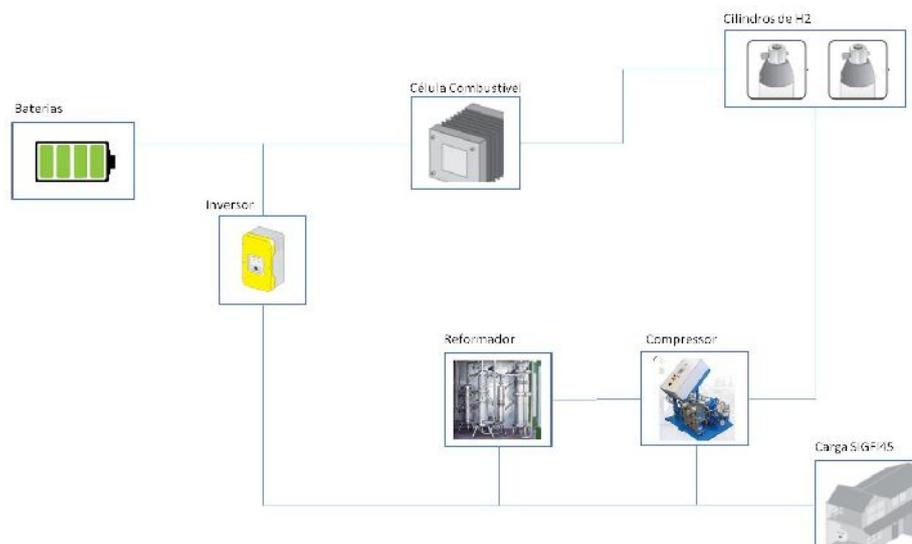


Figura 46 - Esquema da Parte 2 do simulador

5.2.1. Reformador

Enquanto o reformador estiver produzindo hidrogênio, a massa adicionada aos cilindros faz com que a pressão dos mesmos aumente e o volume de hidrogênio produzido é calculado pela Equação 41:

$$V_{Ref} = \frac{Cons_{Ref} - 3}{0,000929} \cdot 60 \quad (41)$$

onde, $Cons_{Ref}$ é o consumo elétrico do reformador em kWh.

Conforme evidenciado no capítulo 4.1, o consumo elétrico do reformador varia de acordo com a fase de operação e encontra-se reproduzido na Tabela 8, onde Δt representa o tempo de produção de hidrogênio a ser especificado pelo usuário,

Tabela 8 - Consumo elétrico do reformador

Fase	Tempo (h)	Consumo elétrico (kWh)	Pot _{Ref} (W)	Consumo de etanol (L/h)	Consumo de água (L/h)
Aquecimento	3	3	1000	0,77	0
Produção	Δt	$0,929 \cdot \Delta t$	929	0,77	1,4
Resfriamento	1,5	0,3	200	0	0

A variação de pressão devido a produção de hidrogênio pelo reformador de etanol está descrita no item 5.1.3.

5.2.2. Compressor

Quando o reformador atinge a fase de produção o compressor é acionado e seu consumo elétrico é calculado em função do seu consumo específico em Wh/L e da produção de hidrogênio do reformador em litros, representado na Equação 42:

$$Pot_{comp} = c_{comp} \cdot V_{prod} \quad (42)$$

onde o consumo específico do compressor é dado pela Equação 43

$$c_{comp} = -0,0009 \cdot \left(\frac{P}{P_{ent}}\right)^2 + 0,0278 \cdot \left(\frac{P}{P_{ent}}\right) + 0,2639 \quad (43)$$

e onde P_{ent} foi fixada em 120 kPa.

5.2.3. Inversor

Conforme mencionado anteriormente no item 4.1.4 o inversor corresponde a um ponto nodal do sistema, no qual chega a energia armazenada na bateria e da CaC e de onde sai a energia para alimentar as cargas do sistema. O inversor de frequência apresenta eficiência variável em função da carga total alimentada e calculada pela Equação 38 para cargas inferiores a 460 W e pela Equação 39 para cargas superiores a esta.

Neste caso, com a adição do reformador e do compressor ao simulador, a carga total a ser alimentada pelo sistema é expressa pela Equação 44

$$Pot = \frac{Pot_{SIGFI45} + Pot_{Ref} + Pot_{Comp}}{\eta_{inv}} \quad (44)$$

onde, Pot é a carga total a ser alimentada e η_{inv} é a eficiência do inversor.

5.3. Simulador PARTE 3 (Parte 2 + Painéis FV)

Para completar a simulação foram acrescentados ao simulador os painéis fotovoltaicos, conforme visto na Figura 47.

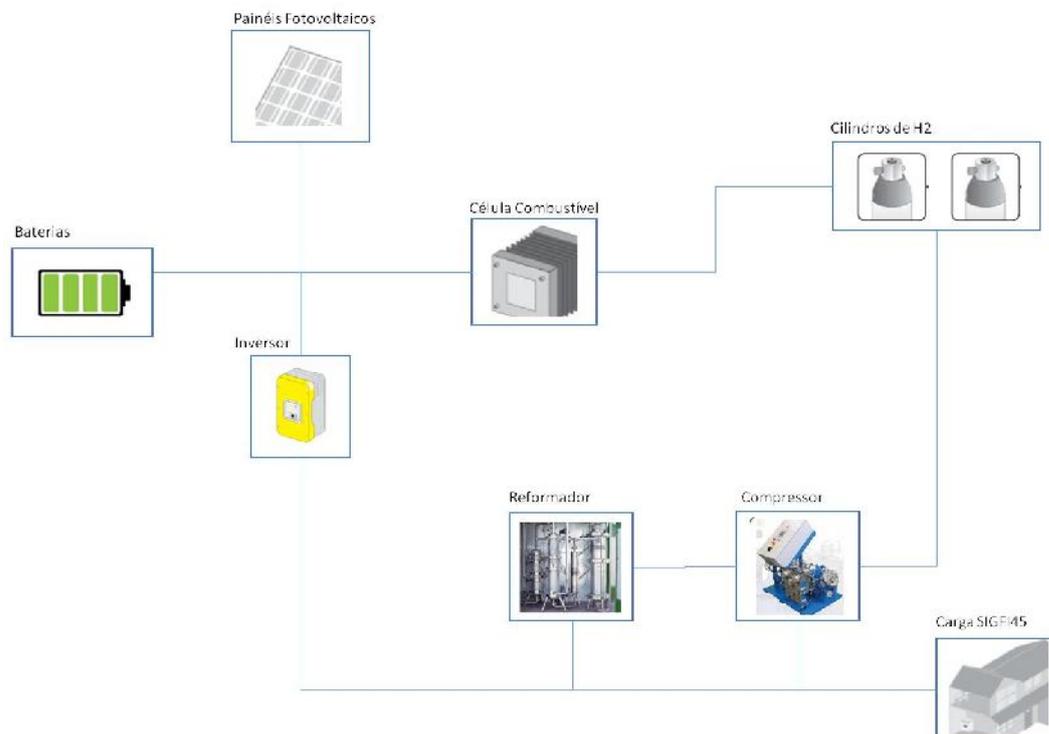


Figura 47 - Esquema da Parte 3 do simulador

O painel fotovoltaico (FV) apresenta três modos de funcionamento conforme pode ser visto na Figura 48 e dependem das características das baterias. No caso de 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. O ajuste destas tensões é feito no controlador de carga que para o caso específico do banco de baterias utilizado no projeto resulta nos seguintes modos, considerando-se um banco com quatro baterias:

- Máxima potência - Quando a tensão no barramento for menor que a tensão de ciclagem (60 V) e a corrente no módulo fotovoltaico for maior

do que 5 A, a potência máxima fornecida pelos painéis é subtraída da carga consumida pelo sistema, já considerando a eficiência do inversor.

- Tensão constante de ciclagem - Quando a tensão do barramento atinge a tensão de ciclagem (60 V) o painel para de fornecer a potência máxima e se comporta de forma similar a CaC, ou seja, apresenta uma resistência interna pequena e a tensão de ciclagem passa a ser a de ciclagem.
- Tensão constante (55,2 V) - Quando o SOC está próximo a 100% e a corrente do painel FV for menor que 5 A, o painel entra no terceiro modo de operação que é similar ao anterior porém a tensão passa a ser a de flutuação (55,2 V).

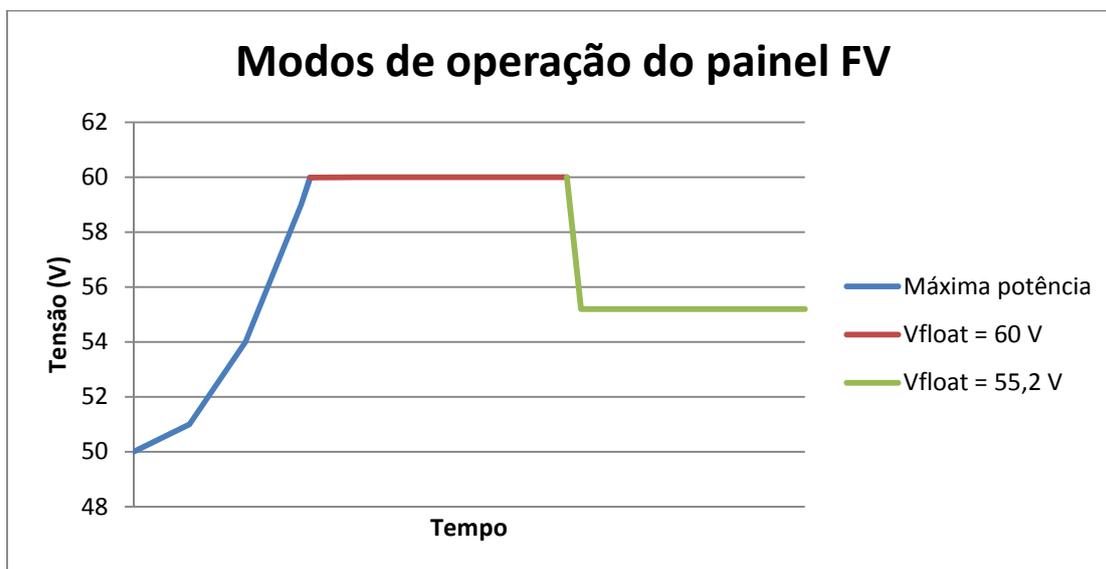


Figura 48 - Modos de operação dos painéis fotovoltaicos

Para calcular a potência máxima fornecida pelos módulos fotovoltaicos foram utilizados dados reais de módulos fotovoltaicos similares aos utilizados no sistema, representativos de três dias com diferentes níveis de radiação (dia sem nuvens, dia parcialmente nublado e dia nublado), conforme visto na Figura 49.

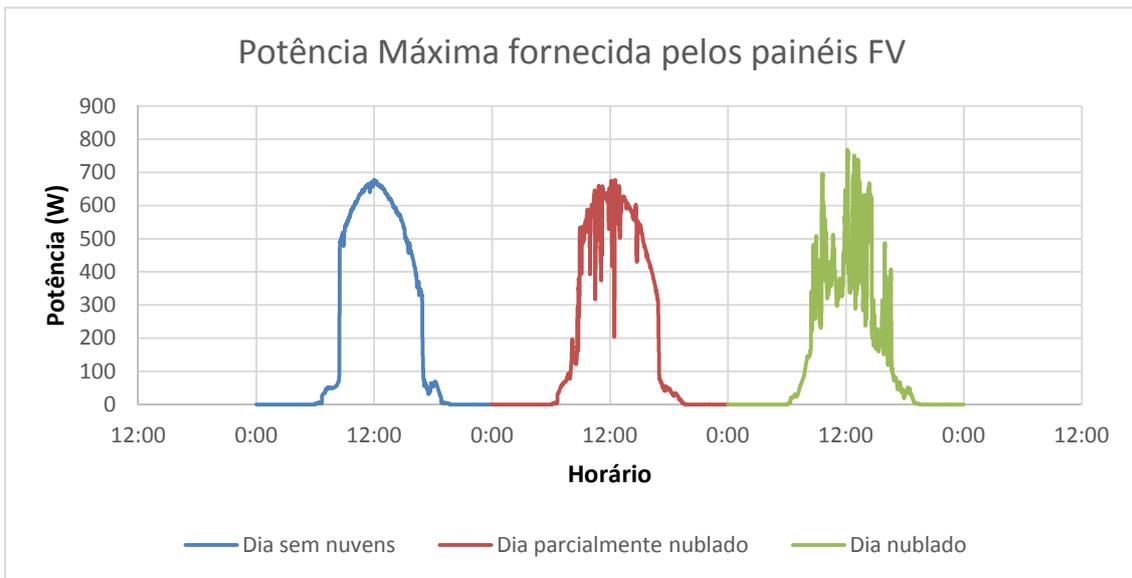


Figura 49 - Potência máxima fornecida pelos painéis em diferentes condições de radiação.

5.4. Solução Numérica

Nas seções anteriores foram apresentados os modelos matemáticos e caracterização de todos os componentes do sistema híbrido. Este sistema é representado por um conjunto de equações diferenciais ordinárias (EDO) de primeira ordem, que precisam ser resolvidos por um método numérico. Na solução numérica verificou-se que os princípios de conservação de energia, massa e carga elétrica fossem atendidas. A Figura 50 mostra o circuito elétrico equivalente simplificado do sistema híbrido utilizado para calcular as grandezas elétricas em cada componente do sistema. Para resolver esta rede elétrica foram utilizadas a primeira e segunda leis de Kirchhoff. Na 1ª lei de Kirchhoff verifica-se a conservação de carga elétrica total existente na rede elétrica e na 2ª lei, o princípio da conservação de energia. Para a solução das equações diferenciais ordinária (EDO) de primeira ordem foi utilizado o método de Euler (Runge-Kutta de primeira ordem).

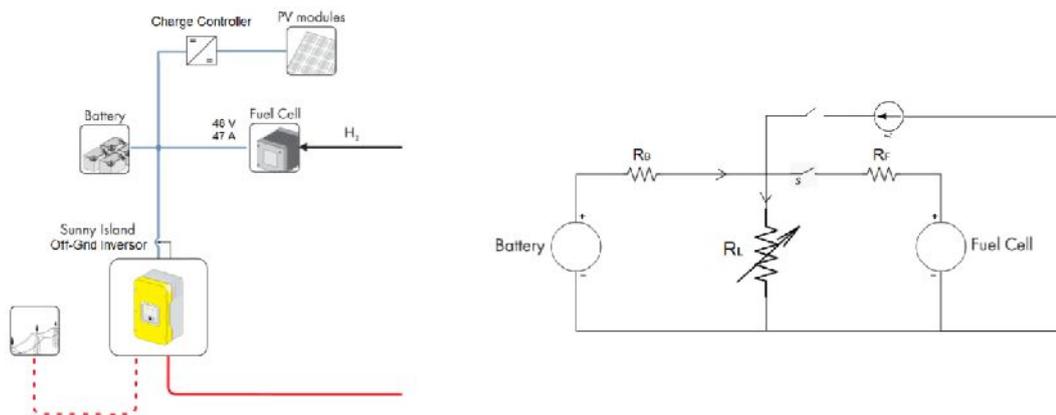


Figura 50 - Circuito elétrico equivalente do sistema híbrido de geração de energia elétrica.

Para a solução numérica da corrente da bateria I , foi utilizado o método de Newton Raphson conforme dito anteriormente. Esse é um método iterativo que apresenta como objetivo estimar as raízes de uma função. Inicialmente é escolhido um valor inicial para a raiz, 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. Esse processo é repetido até que seja possível chegar a raiz ideal. A equação 45 representa esse método.

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}, n \in \mathbb{N} \quad (45)$$

6

Validação do simulador e apresentação de casos típicos

6.1.

Validação do simulador

Com o objetivo de validar o simulador, foram feitas simulações com os mesmos parâmetros utilizados nos experimentos realizados com o sistema integrado. Os dados de entrada do simulador são o estado de carga inicial no banco de baterias (SOC), o horário de início do ensaio, a pressão inicial nos cilindros de hidrogênio, a condição dos painéis FV (ligados ou desligados do sistema), a condição do reformador (ligado ou desligado do sistema e se o reformador estiver ligado a hora que liga e o período pré-estabelecido de produção de hidrogênio) a tensão no barramento que aciona a CaC (LVS) e quanto tempo permanecerá em operação depois de ligada. Os dados de saída que serão comparados com os experimentais serão o SOC das baterias e a carga alimentada pelo sistema durante o ensaio.

6.1.1.

Caso 1V

No Caso 1V simula-se que somente a bateria e a CaC fornecem energia para alimentar a carga SIGFI 45. A simulação segue um caso experimental onde o ensaio começou às 12:00 e durou 24 horas. O estado de carga inicial foi de 100% e o reformador, o compressor e os painéis FV estavam desconectados do sistema. Na Tabela 9 é possível observar os dados de entrada para essa simulação e na Figura 51 e na Figura 52 é possível observar a comparação entre os resultados experimentais e da simulação.

Tabela 9 - Casos de entrada Caso 1V

Dados de Entrada					
SOC inicial	100,0%	Reformador	desligado	Célula a combustivel	
Horário (Horas e minutos)	12:00	Horário que liga o Reformador	15:00	Timer (minutos)	120
Pressão inicial nos cilindros (kPa)	1000	Tempo de produção	03:00	LVS (V)	50
Número de cilindros	4	Fotovoltaico	Painel Desligado	Potência elétrica durante a produção (W)	929
Volume de cada cilindro (L)	50				

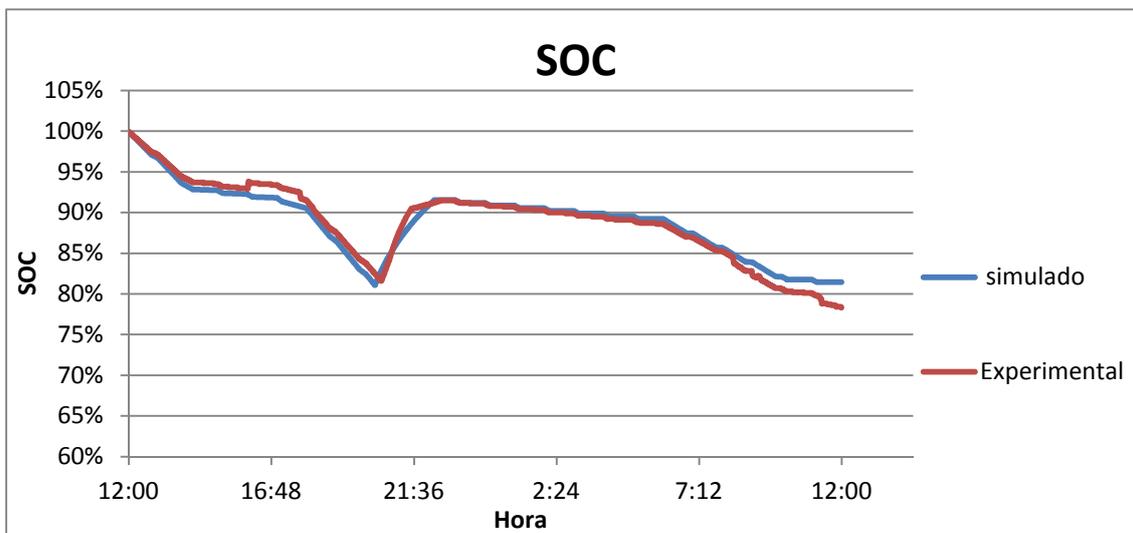


Figura 51 - Comparação entre o estado de carga (SOC) experimental e simulado para o caso 1V

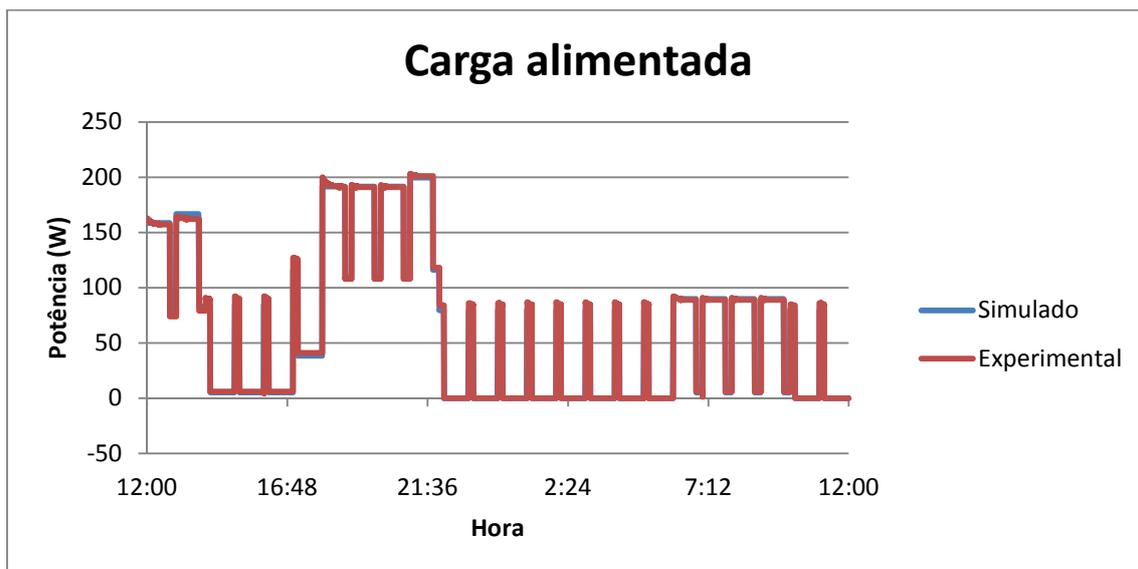


Figura 52 - Comparação da carga alimentada experimental com a simulada no caso 1V

6.1.2. Caso 2V

No Caso 2V simula-se que somente a bateria e a célula a combustível fornecem energia para alimentar a carga SIGFI 45. A simulação segue um caso experimental onde o ensaio começou às 12:00 e durou 24 horas, o SOC inicial foi de 78,3 % e o reformador, o compressor e os painéis FV encontravam-se desconectados do sistema. Na Tabela 10 encontram-se os dados de entrada para essa simulação e na Figura 53 e na Figura 54 é possível observar a comparação entre os resultados experimentais e da simulação.

Tabela 10 - Dados de entrada Caso 2V

Dados de Entrada					
SOC inicial	78,3%	Reformador	desligado	Célula a combustível	
Horário (Horas e minutos)	12:00	Horário que liga o Reformador	15:00	Timer (minutos)	70
Pressão inicial nos cilindros (kPa)	1000	Tempo de produção	03:00	LVS (V)	50
Número de cilindros	4	Fotovoltaico	Painel Desligado	Potência elétrica durante a produção (W)	929
Volume de cada cilindro (L)	50				

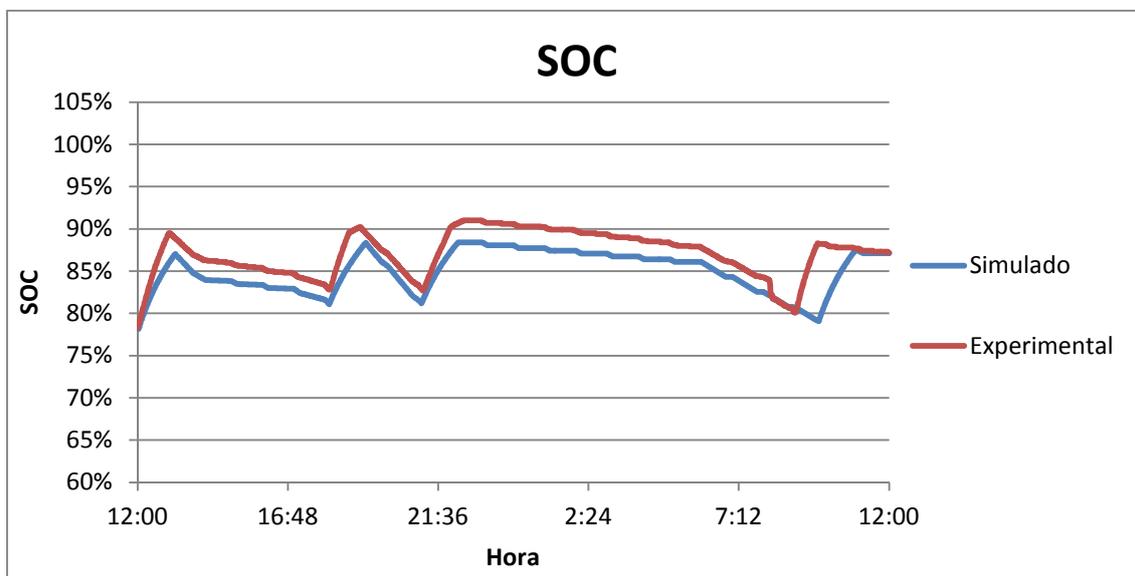


Figura 53 - Comparação entre o estado de carga simulado e experimental Caso 2V

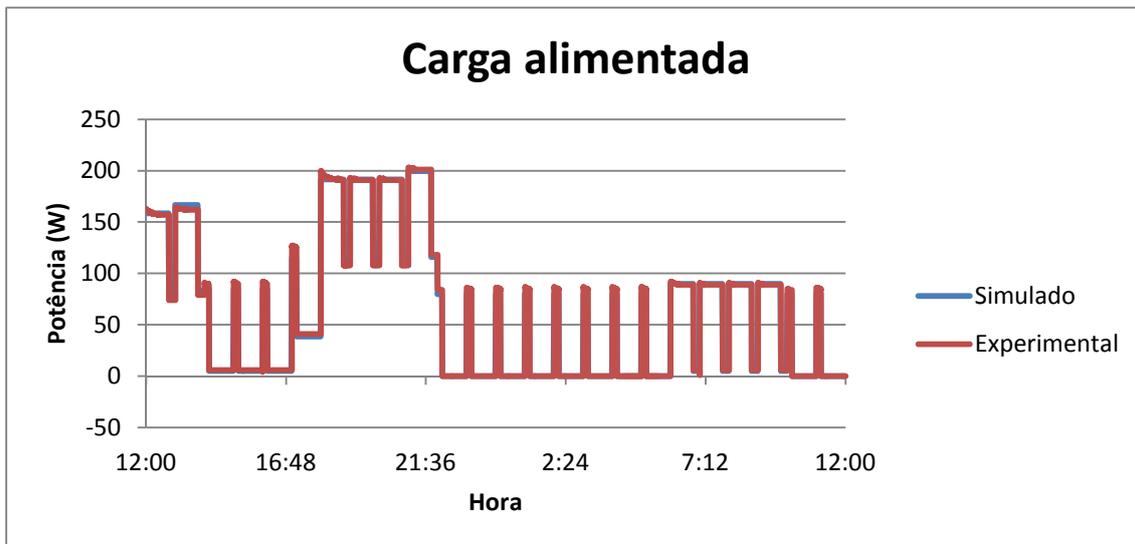


Figura 54 - Comparação da carga alimentada experimental com a simulada no Caso 2V

6.1.3. Caso 3V

No Caso 3V simula-se a bateria, a célula a combustível e os painéis FV fornecendo energia para alimentar a carga SIGFI 45. A simulação segue um caso experimental onde o ensaio começou às 11:00 h e durou 24 horas. O SOC inicial foi de 91,9 % e o reformador e o compressor encontravam-se desligados. Na Tabela 11 é possível observar os dados de entrada para essa simulação e na Figura 55 é possível observar a comparação entre os resultados experimentais e da simulação, com base no gráfico de variação do SOC.

Tabela 11 - Dados de entrada Caso 3V

Dados de Entrada					
SOC inicial	91,9%	Reformador	desligado	Célula a combustível	
Horário (Horas e minutos)	11:00	Horário que liga o Reformador	12:15	Timer (minutos)	60
Pressão inicial nos cilindros (kPa)	1849,7	Tempo de produção	03:00	LVS (V)	48
Número de cilindros	4	Fotovoltaico	Sem nuvens	Potência elétrica durante a produção (W)	929
Volume de cada cilindro (L)	50				

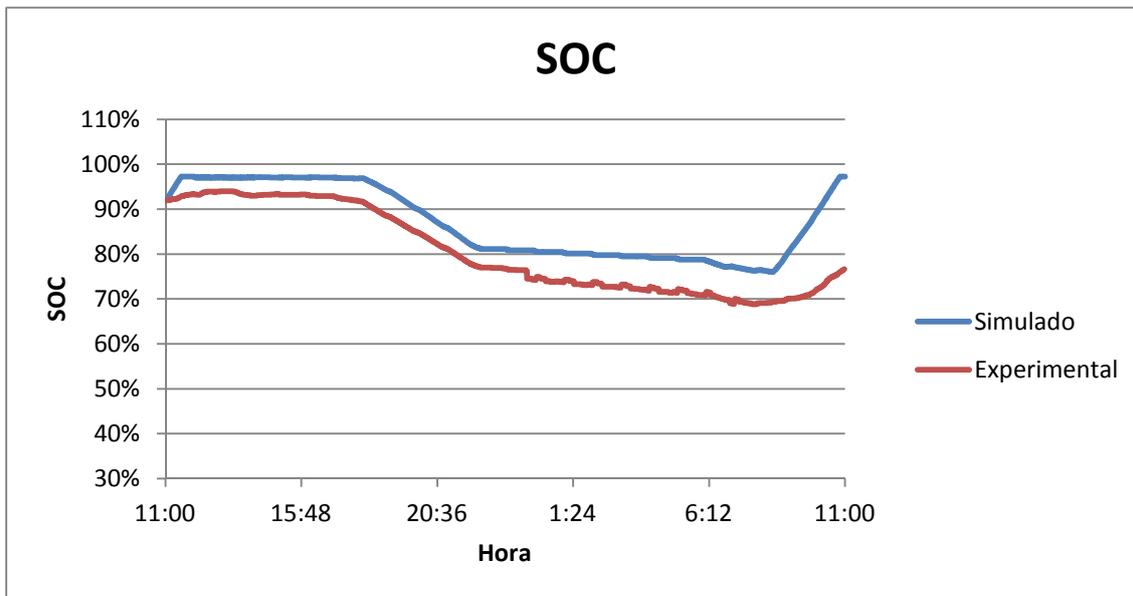


Figura 55 - Comparação entre SOC experimental e simulado (Caso 3V)

Para todos os Casos estudados, com variações do SOC e modificações das condições experimentais o simulador foi capaz de reproduzir, com bastante concordância, os resultados experimentais. A maior diferença foi observada no Caso 3V (Figura 55) quando foram introduzidos no sistema os painéis FV. Esta diferença pode ser explicada pelo fato de estarem sendo utilizados dados típicos dos painéis e não dados reais de potência versus radiação.

6.2.

Comportamento do sistema a partir de Casos Simulados

A partir da validação do simulador foram feitas algumas simulações com diferentes parâmetros com o objetivo de analisar o comportamento do sistema.

6.2.1.

Caso 1S

No Caso 1S simula-se que somente a bateria e a célula a combustível fornecem energia para alimentar a carga SIGFI 45. As simulações são iniciadas as 0:00 h e duram 24 horas. O objetivo desta simulação foi verificar quantos dias o sistema de geração é capaz de manter o atendimento ao consumidor com perfil SIGFI 45, dependendo somente da CaC e do banco de baterias. O início da operação foi com o armazenamento pleno de hidrogênio (2070 kPa). Conforme a CaC entrava em operação a pressão de armazenamento diminuía em função do consumo de hidrogênio e quando atingiu a pressão mínima (345 kPa) a única fonte de energia para atendimento do consumidor passaria a ser o banco de baterias. Com essas simulações observou-se que os cilindros cheios

são suficientes para que a CaC funcione até o final do 11º dia, conforme visto na Figura 56.

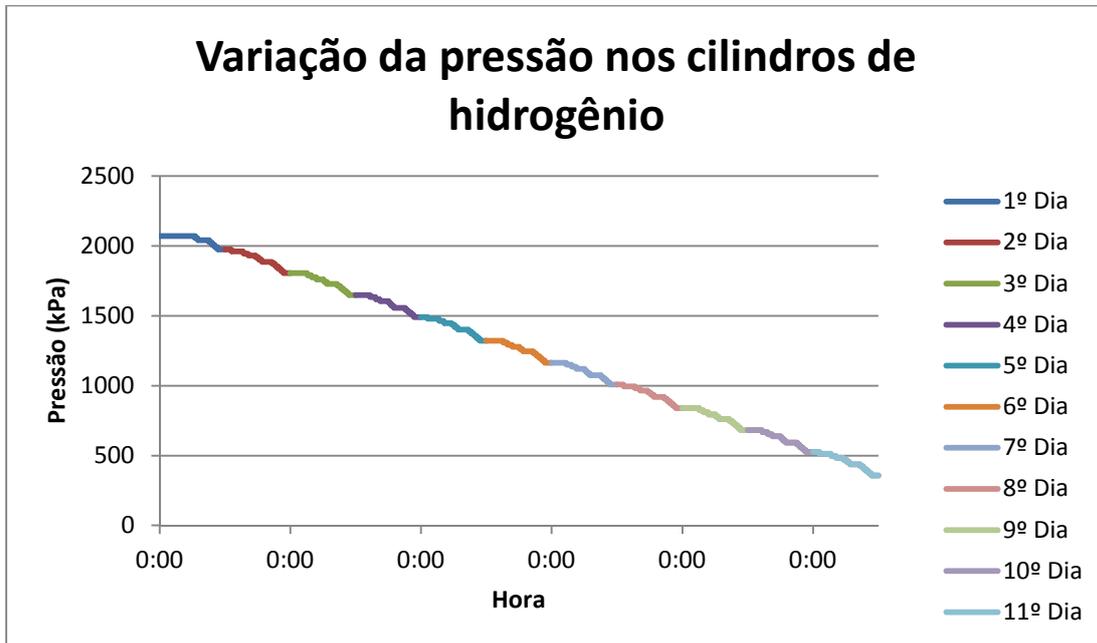


Figura 56 - Variação da pressão dos cilindros de hidrogênio com a CaC alimentando a carga SIGFI 45 (Caso 1S)

A partir desse ponto a única fonte de energia seriam as baterias que ainda permitiria o suprimento de energia ao consumidor SIGFI 45 até o 13º dia às 20:26 h. Neste momento, quando o SOC atinge 17%, conforme visto na Figura 57, e o sistema de proteção do inversor desligaria o sistema por segurança.

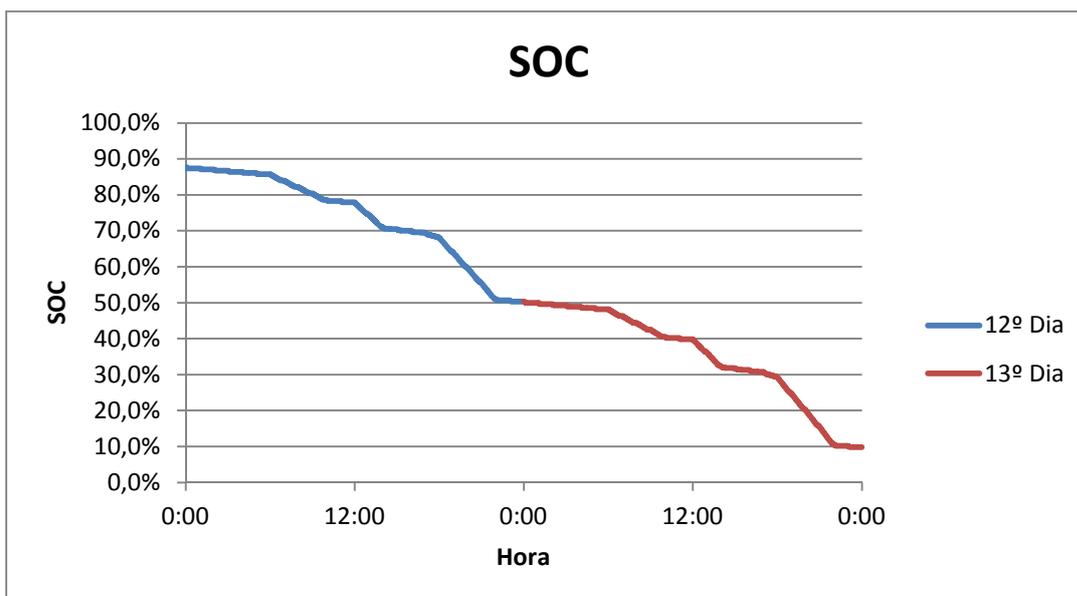


Figura 57 - Variação do SOC quando a CaC não pode mais operar por esgotamento do hidrogênio armazenado (Caso 1S)

6.2.2. Caso 2S

Esta simulação teve como objetivo determinar quantos dias o sistema funcionaria dependendo somente do banco de baterias (4 baterias 48 V/100 Ah), isto é sem a CaC entrar em operação e com os painéis desligados, foram simulados os casos com o estado de carga começando em 100% as 00:00 h, a variação no estado de carga é apresentada na Figura 58. Pode-se observar que nessas condições o banco de baterias atenderia ao consumidor com perfil SIGFI 45 até às 8:15 h do 3º dia.

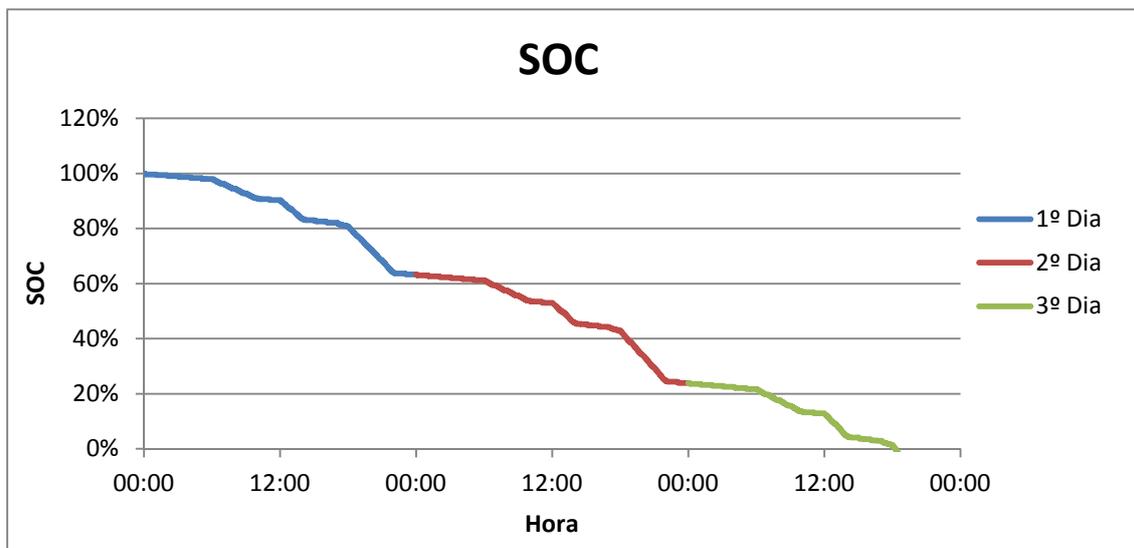


Figura 58 - Variação do SOC do banco de baterias (Caso 2S)

6.2.3. Caso 3S1 e Caso 3S2

Foram simulados casos onde a carga do consumidor SIGFI 45 foi alimentada exclusivamente pela CaC e pela bateria iniciando em dois estados de carga, 25% e 100%. Nesta primeira simulação (Caso 3S1) o sistema foi inicializado a partir das 12:00 h do perfil SIGFI 45. Na Figura 59 é possível observar o comportamento do sistema através do gráfico de variação do SOC. Em ambas as situações de SOC inicial (25% e 100%) ocorre uma estabilização do SOC em cerca de 80% em função da presença da CaC.

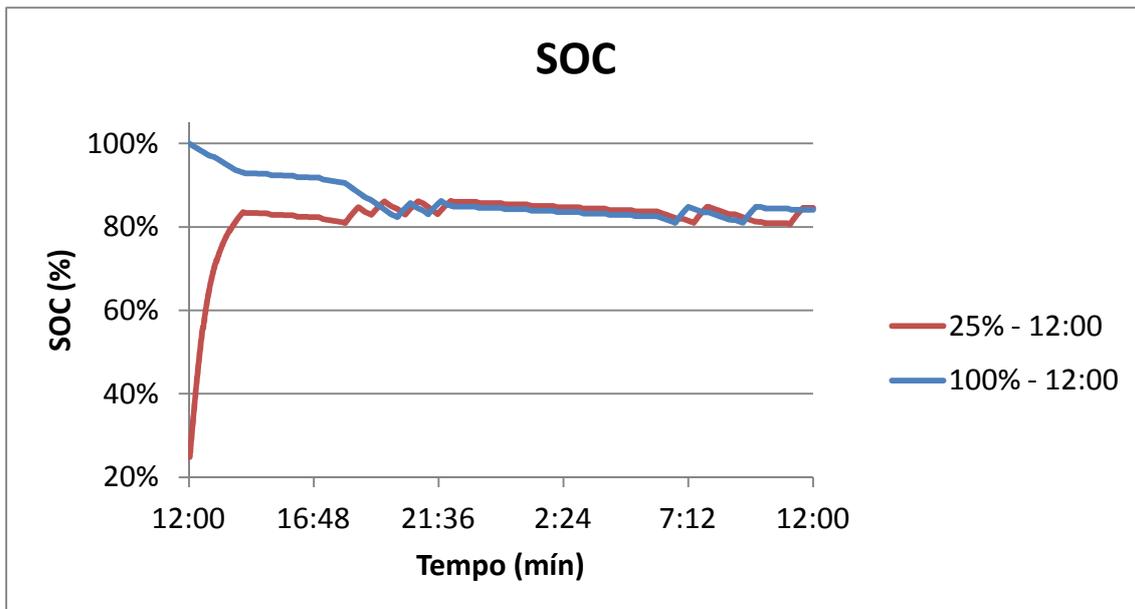


Figura 59 - Variação do SOC na simulação (Caso 3S1)

Para avaliar a influência do ponto de inicialização da simulação, no Caso 3S2 estabeleceu-se como ponto de partida o horário de 0:00 h, mantendo-se idênticas os dois SOC do caso anterior. Na Figura 60 apresenta-se a variação SOC ao longo do ciclo.

Nesta simulação o SOC estabilizou-se próximo a 85% em função do fato do ciclo ter-se iniciado em uma condição de baixa demanda de energia pelo consumidor.

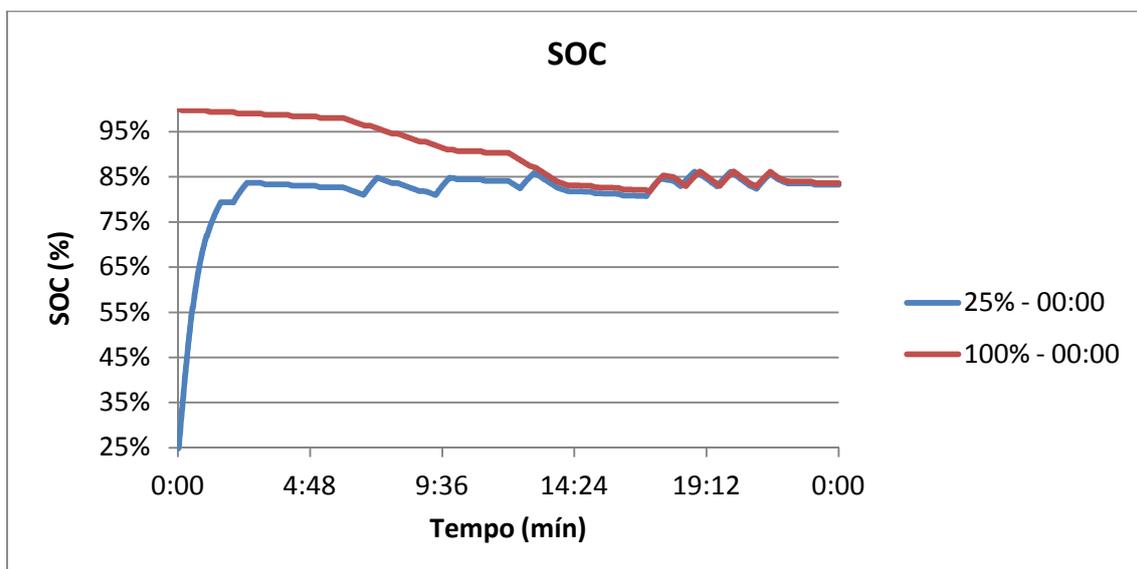


Figura 60 - Variação do SOC na simulação (Caso 3S2)

6.2.4. Caso 4S

No Caso 4 simulou-se o sistema completo em operação, o estado de carga inicial foi de 100% iniciando as 11:00 h, a pressão inicial nos cilindros de hidrogênio era de 1200 kPa, o reformador foi ligado as 12:00 h e foi mantido em produção de hidrogênio durante três horas, considerou-se um dia sem nuvens e que a CaC entraria em operação quando a tensão do barramento atingisse 50,5 V e operaria durante 60 minutos conforme os dados de entrada do simulador apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Dados de entrada Caso 4S

Dados de Entrada					
SOC inicial	100,0%	Reformador	ligado	Célula a combustivel	
Horário (Horas e minutos)	11:00	Horário que liga o Reformador	12:00	Timer	60
Pressao inicial nos cilindros (kPa)	1200	Tempo de produção	03:00	LVS	50,5
Número de cilindros	4	Fotovoltaico	Sem nuvens	Consumo elétrico durante a produção	929
Volume de cada cilindro (L)	50				

Na Figura 61 é possível observar a variação do SOC ao longo do tempo ao longo do tempo. A primeira grande queda observada no SOC se deve ao momento em que o painel FV deixa de fornecer energia elétrica ao sistema e o reformador e o compressor ainda se encontram em operação, implicando em um consumo elétrico elevado. Quando o painel FV volta a fornecer energia elétrica, no início da manhã, o estado de carga se eleva rapidamente.

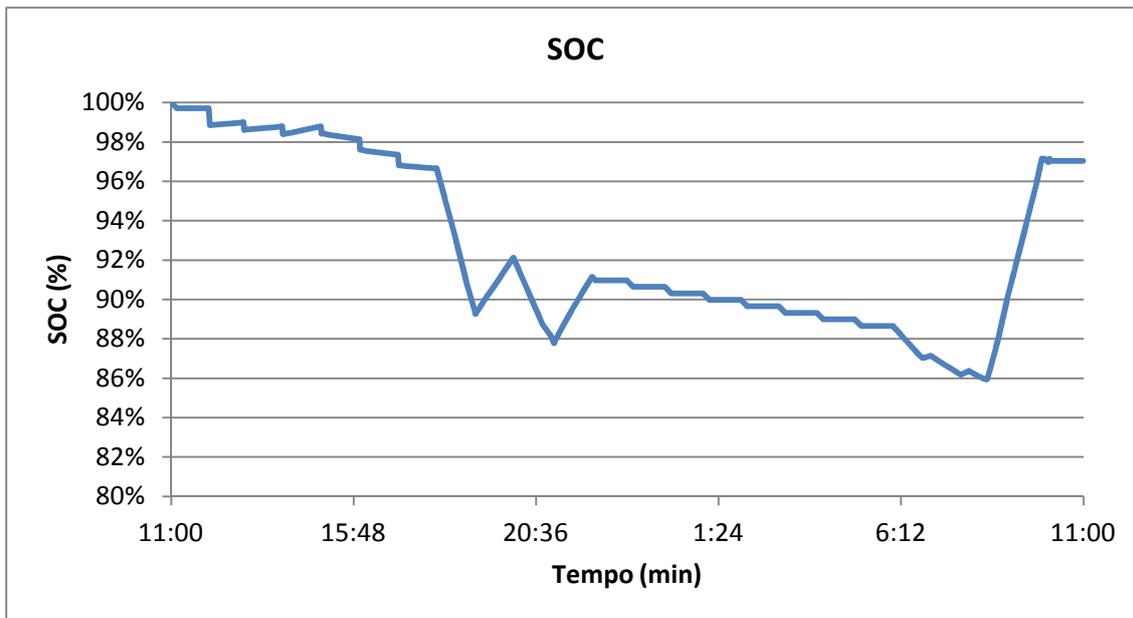


Figura 61 - SOC do banco de baterias (Caso 4S)

A Figura 62 apresenta a variação de pressão nos cilindros de hidrogênio. Pode-se observar uma pequena queda na pressão quando o reformador é acionado. Esta queda é menos acentuada quando o reformador começa a produzir hidrogênio, porém este é insuficiente para suprir o consumo total de energia. As duas quedas de pressão observadas quando o reformador já se encontra desligado, isto é, após às 19:30, deve-se ao consumo da CaC que apresenta o mesmo comportamento toda vez que esta entra em operação.

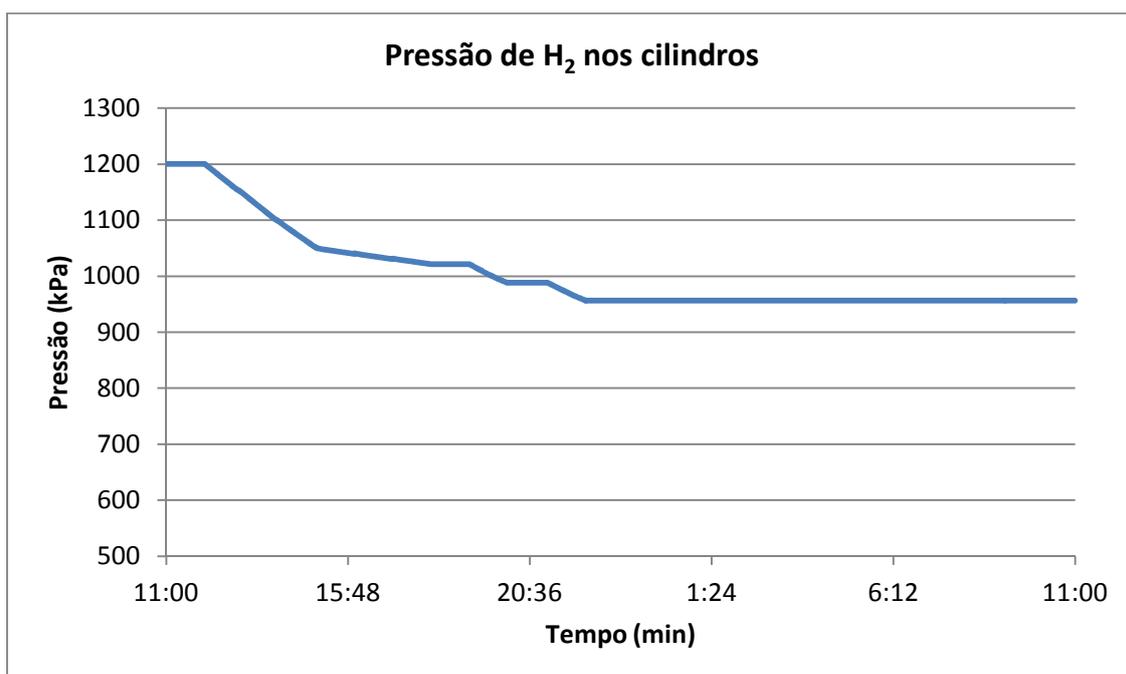


Figura 62 - Variação da pressão de hidrogênio nos cilindros (Caso 4S)

A Figura 63 mostra o perfil de carga total do sistema durante a simulação. Entende-se como carga total do sistema o consumidor com perfil SIGFI 45, o reformador de etanol, o compressor de hidrogênio e os equipamentos de controle e monitoramento. No momento em que o reformador é ligado é adicionada à carga do consumidor SIGFI 45 uma carga adicional de 1000 W devido ao seu consumo elétrico do reformador na fase de aquecimento. Quando o reformador entra na fase de produção esta parcela da carga total se reduz para 929 W e adiciona-se a carga do compressor. Na fase de resfriamento do reformador a contribuição do mesmo para a carga total é de 200 W. Quando o reformador é desligado a única carga a ser alimentada é a do consumidor com o perfil SIGFI 45.

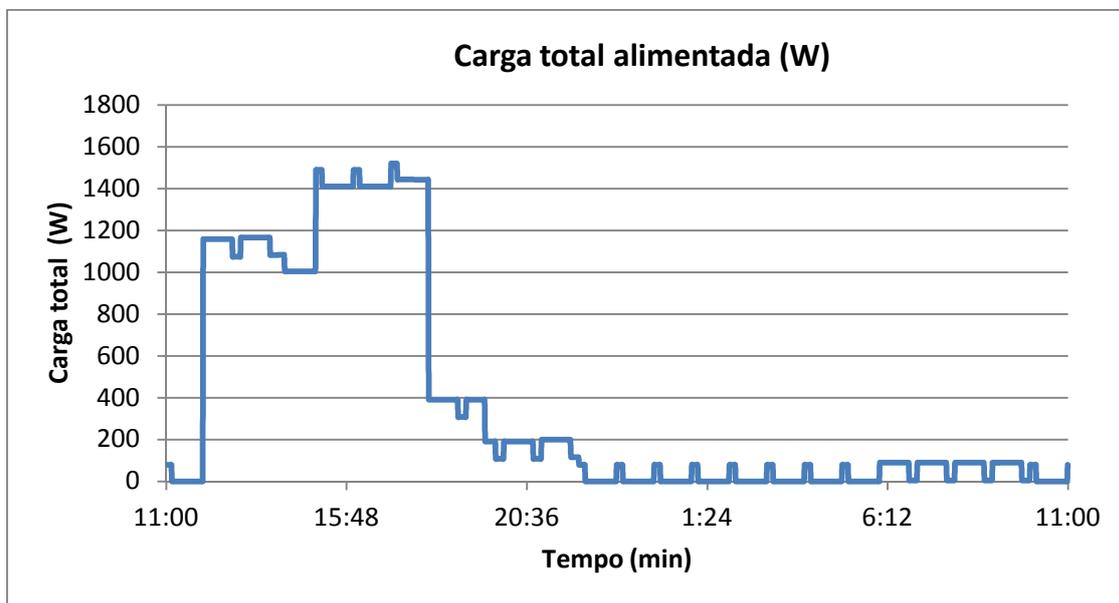


Figura 63 - Carga alimentada (Caso 4S)

6.2.5. Caso 5S

No caso 5S simulou-se o sistema completo em operação, com os mesmos parâmetros de entrada que no Caso 4S. A diferença entre as duas simulações é que no presente caso foi introduzido no sistema um reformador cujo consumo na fase de produção é 200 W. Este consumo foi aquele informado na especificação do equipamento pelo fornecedor do equipamento. Entretanto, durante os ensaios realizados com o reformador verificou-se que o consumo real foi o apresentado no Caso 4S. Julgou-se importante realizar a simulação com o valor de consumo especificado, pois aquele observado na condição real inviabilizaria o sistema de geração, conforme concebido no projeto. O fabricante do reformador está ciente

desta divergência, porém ao longo do projeto não houve tempo hábil para que fossem introduzidas modificações no reformador. Os dados de entrada na simulação do Caso 5S encontram-se na Tabela 13.

Tabela 13 - Dados de entrada Caso 5S

Dados de Entrada					
SOC inicial	100,0%	Reformador	ligado	Célula a combustível	
Horário (Horas e minutos)	11:00	Horário que liga o Reformador	12:00	Timer (minutos)	60
Pressão inicial nos cilindros (kPa)	1200	Tempo de produção	03:00	LVS (V)	50,5
Número de cilindros	4	Fotovoltaico	Sem nuvens	Potência elétrica durante a produção (W)	200
Volume de cada cilindro (L)	50				

A Figura 64 apresenta a variação do estado de carga ao longo da simulação. É possível observar que em ambos os casos o SOC final é igual e apresenta algumas variações ao longo do dia.

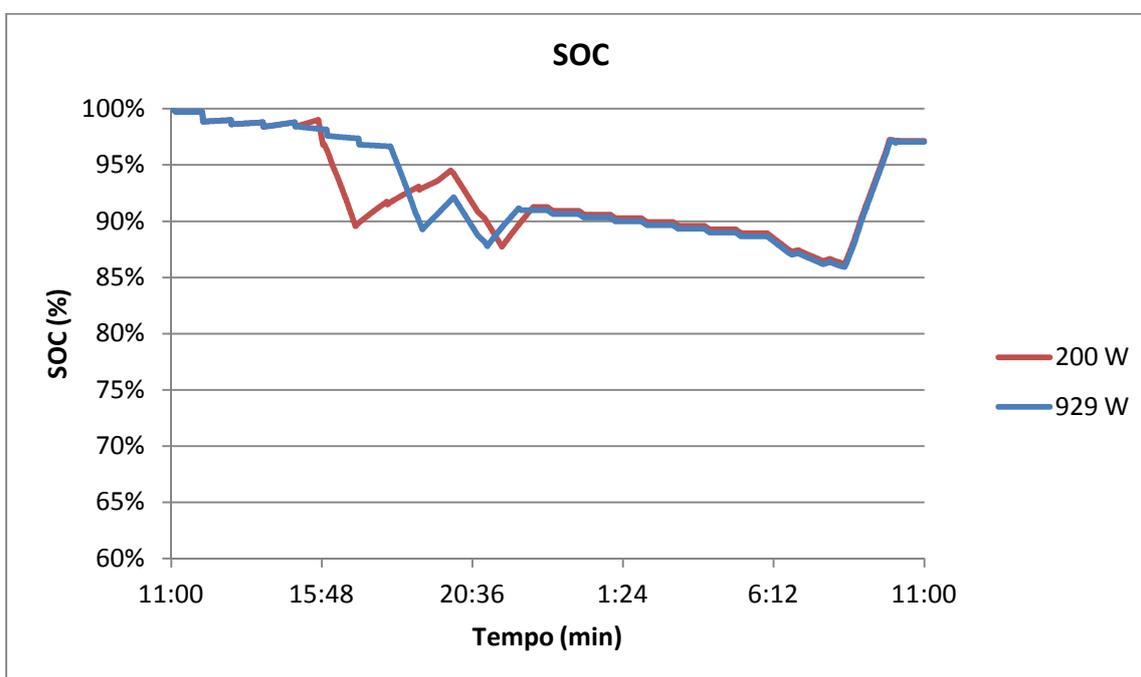


Figura 64 - Estado de carga (Caso 5S)

A Figura 65 apresenta a variação de pressão nos cilindros de hidrogênio ao longo da simulação nas duas condições de consumo energético do reformador na fase de produção de energia. Quando a potência do reformador é elevada (929 W), a produção de hidrogênio não é suficiente para aumentar a

pressão de hidrogênio nos cilindros ao longo do período estabelecido na simulação (3 horas de operação do reformador). Quando o consumo do reformador na fase de produção é menor (200 W), observa-se, para o mesmo tempo de produção de hidrogênio, o aumento da pressão nos cilindros de armazenamento.

Entretanto, este aumento em um ciclo de 24 horas não seria suficiente para suprir o seu consumo próprio e o consumidor SIGFI 45, pois a pressão não retorna ao nível inicial.

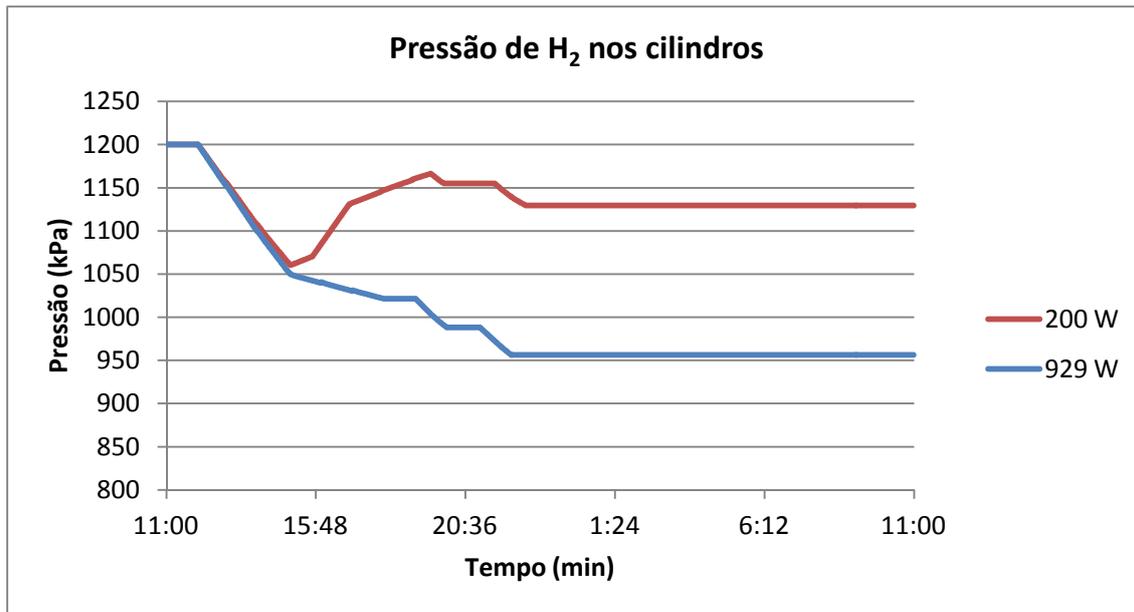


Figura 65 - Variação da pressão nos cilindros (Caso 5S)

Torna-se, portanto, necessária a ampliação do tempo de operação do reformador na fase de produção, para que se restabeleça a pressão inicial. Na Figura 66 apresenta-se a variação de pressão nos cilindros, mantidas as condições iniciais do caso 5S constantes da Tabela 18, exceto o tempo de produção de hidrogênio que passou para 6 horas.

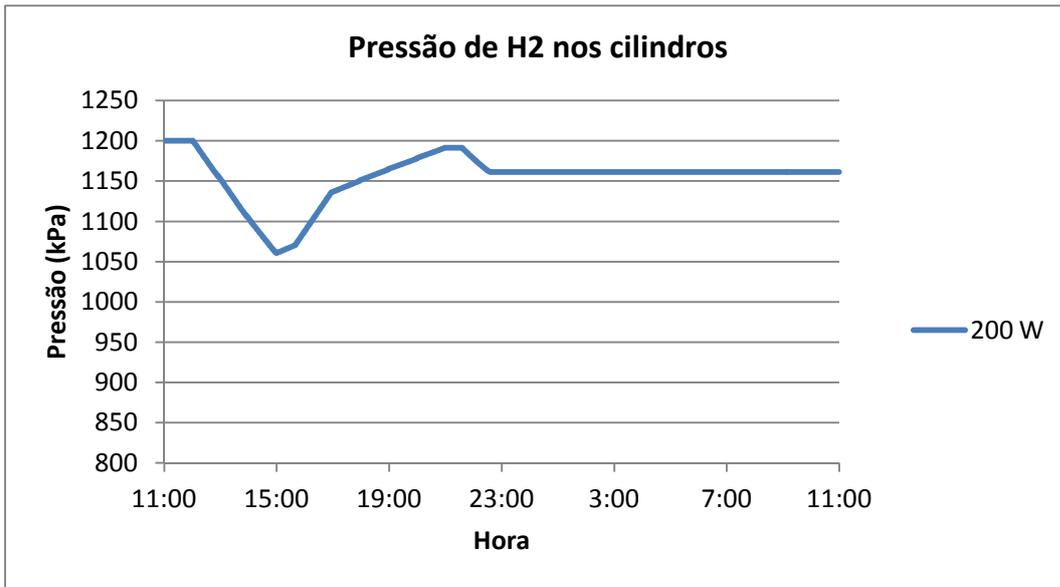


Figura 66 - Variação da pressão nos cilindros no Caos 5S com o reformador produzindo hidrogênio durante 6 horas

7 Estudo de viabilidade do sistema

7.1. Estudo de viabilidade do sistema com painéis

Foram simulados casos com alguns parâmetros fixos: horário de início do teste, 0:00, e o timer da CaC, 60 minutos.

Para saber qual o melhor ponto de LVS foram simulados casos com 50 V, 50,5 V e 51 V, e a pressão inicial nos cilindros de hidrogênio de 800 kPa, com dois estados de carga iniciais de 20% e 100% e com o reformador desligado, para saber quando a CaC é acionada, conforme visto na Figura 67 e na Figura 68.

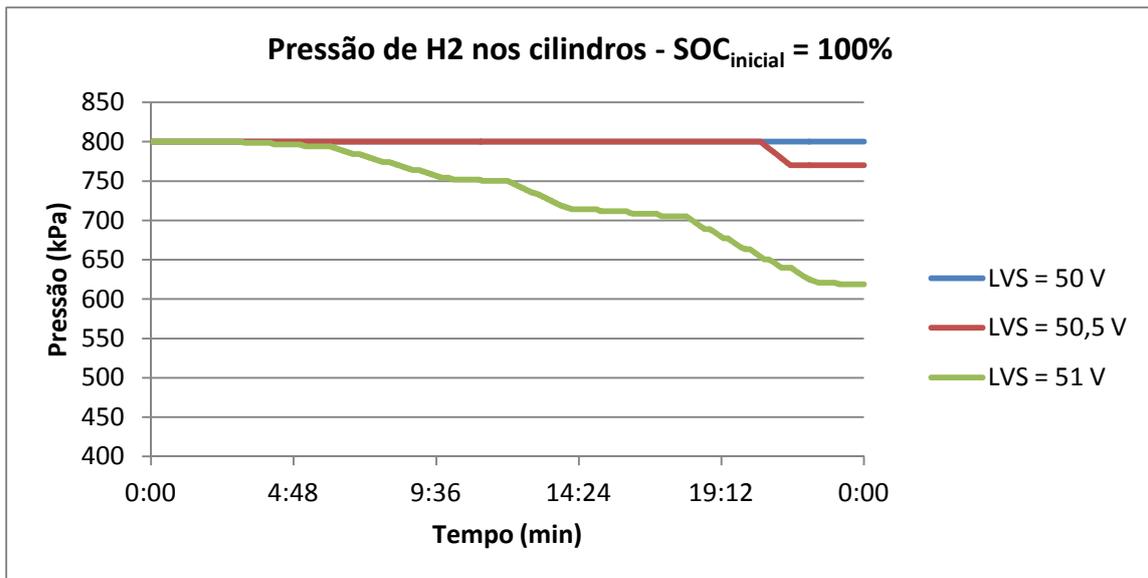


Figura 67 - Variação na pressão dos cilindros de hidrogênio para diferentes valores de LVS com SOC_{inicial} = 100%

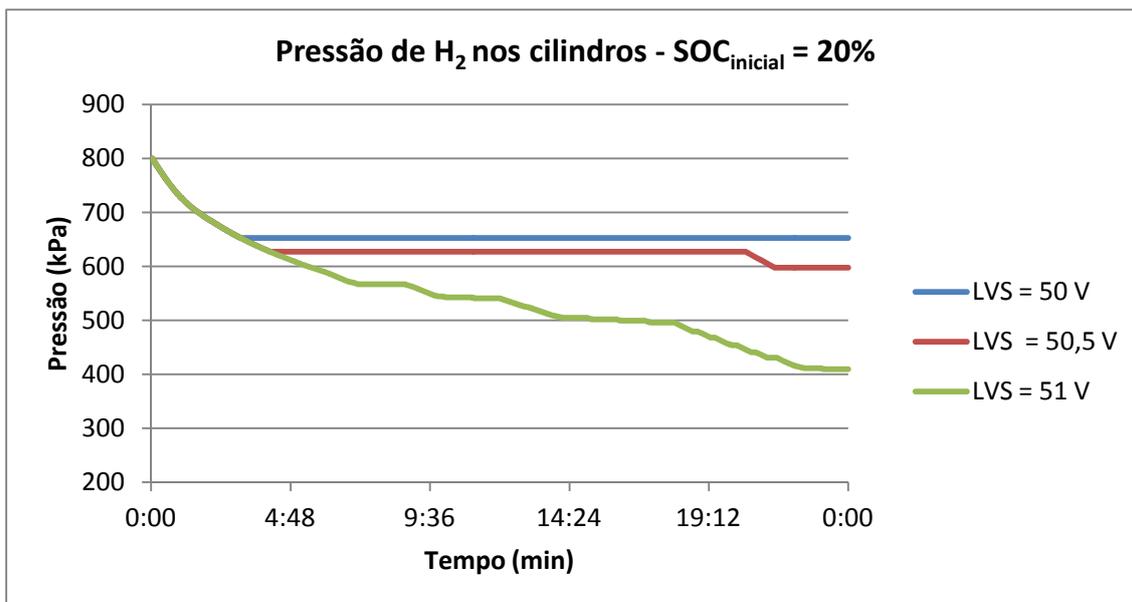


Figura 68 - Variação na pressão dos cilindros de hidrogênio para diferentes valores de LVS com SOC_{inicial} = 20%

Verificou-se que quando o LVS é 50 V e o estado de carga inicial é 100%, a CaC não entra em operação para esses parâmetros. Para o estado de carga inicial de 20% ela entra somente no início para aumentar o estado de carga acima de 80% enquanto não há sol. Quando o LVS é 51 V a CaC entra muitas vezes em operação e a pressão nos cilindros de hidrogênio cai rapidamente tanto para 20% quanto para 100%. Quando o LVS é 50,5 V e o estado de carga inicial é de 100% a CaC entra em operação quando não há sol para manter o estado de carga da bateria mas sem fazer com que a pressão nos cilindros de hidrogênio caia rapidamente. Para 20% a CaC entra em operação logo no início para aumentar o estado de carga acima de 80% enquanto não há sol e depois ela desliga e só volta a operar à noite.

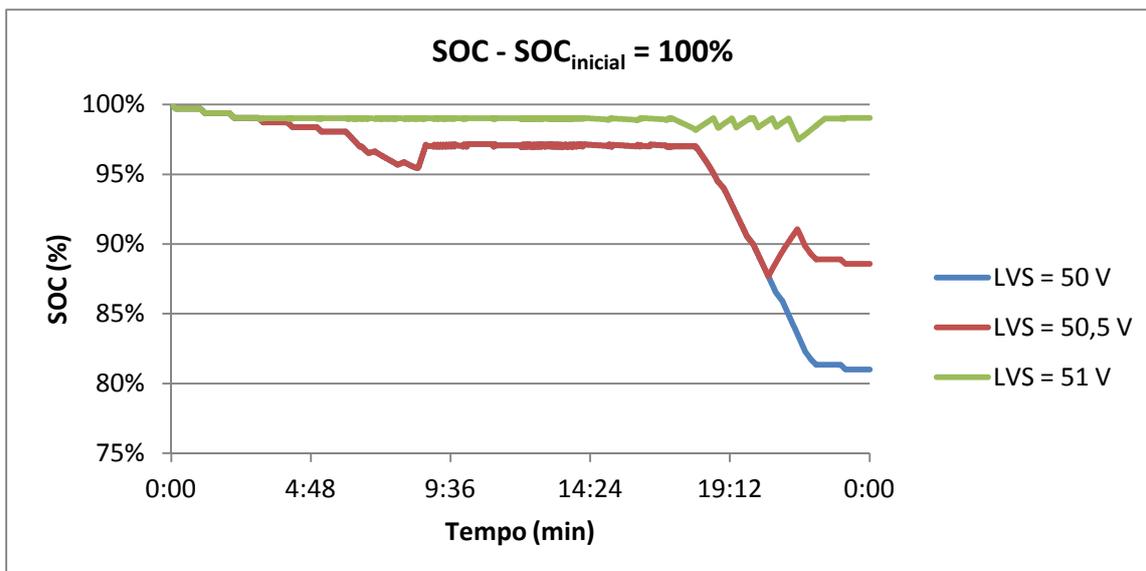


Figura 69 - Variação dos estado de carga com SOC_{inicial} = 100%

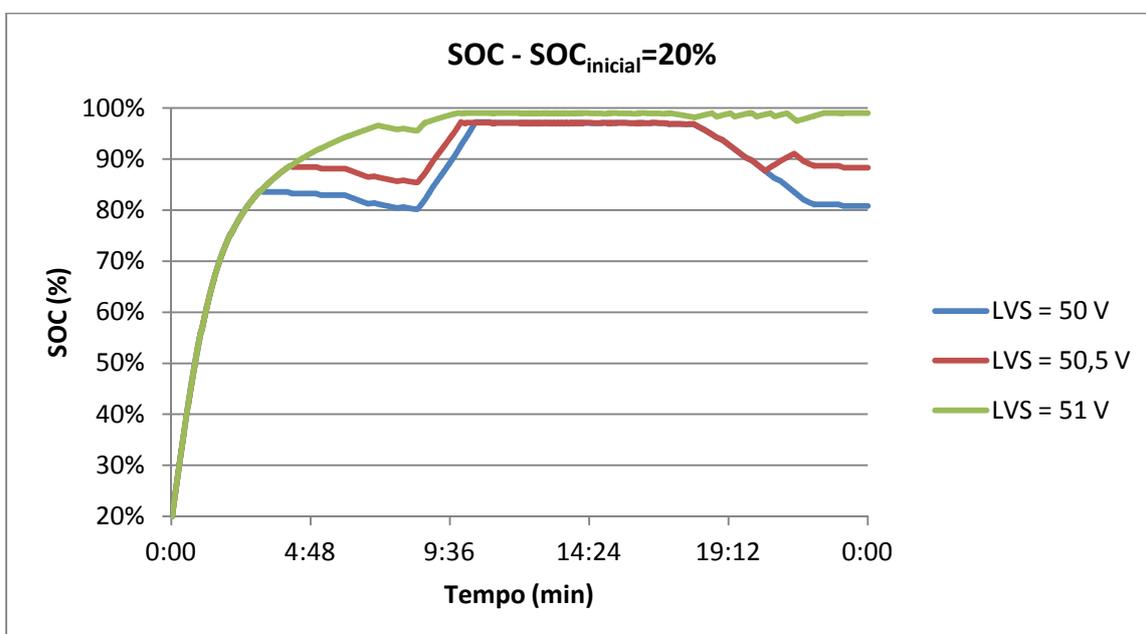


Figura 70 - Variação dos estado de carga com SOC_{inicial} = 20%

A Figura 69 e a Figura 70 mostram a variação do estado de carga para as mesmas condições. Observou-se que quando LVS é 51 V a CaC mantém o estado de carga muito alto durante toda a simulação pois ela entra em operação muitas vezes tanto para estado de carga inicial de 100% quanto para de 20%. Quando LVS é 50 V e o estado de carga inicial é 100% o estado de carga cai a partir do momento que não há mais radiação solar, pois a CaC nunca entra em operação. O estado de carga se mantém alto somente quando há radiação e os painéis são capazes de suprir a demanda de energia do sistema. Quando o estado de carga inicial é 20% a CaC entra em operação logo no início para

umentar o estado de carga acima de 80%, quando há sol ela desliga e se mantém assim. Quando o LVS é 50,5 V e o estado de carga inicial é de 100% a CaC entra em operação quando não há radiação solar e faz com que o estado de carga não caia tanto nos períodos onde não há sol. Quando o estado de carga inicial é de 20% a CaC entra em operação logo no início para elevar o estado de carga acima de 80%, quando há sol ela desliga e depois à noite ela volta a entrar em operação.

Com base nessas informações o LVS foi fixado em 50,5 V para as próximas simulações. Com isso a bateria trabalha na faixa de 80% a 90% onde apresenta alta eficiência.

7.1.1.

Parâmetros do reformador para o sistema com os painéis

Um parâmetro fixo para o reformador é o horário que ele é acionado. Com o objetivo de aproveitar ao máximo a energia fornecida pelos painéis fotovoltaicos, esse horário foi fixado em 06:00 pois é o horário que os painéis começam a fornecer energia ao sistema. Foram simulados diferentes casos variando o tempo de produção com o objetivo de minimizar o consumo de energia elétrica do reformador, pois sabe-se que esse consumo é fixo na fase de aquecimento e de resfriamento, ou seja, quanto maior o tempo de produção menor o custo por litro de hidrogênio produzido. Outro parâmetro fixo é o estado de carga inicial que é 80% pois é o estado de carga que a bateria fica estabilizada.

Como o reformador apresentou um comportamento significativamente diferente ao esperado, isto é, seu consumo elétrico durante a fase de produção foi muito superior ao apresentado pelo fabricante do reformador no momento da compra do equipamento, julgou-se necessário simular o reformador real, que consome 929 kWh durante a fase de produção, e o teórico que consome 200 kWh durante essa mesma fase.

7.1.1.1.

Reformador Real

O resultados dessa seção são para o simulador real, ou seja, consumindo 929 kWh durante a fase de produção de hidrogênio.

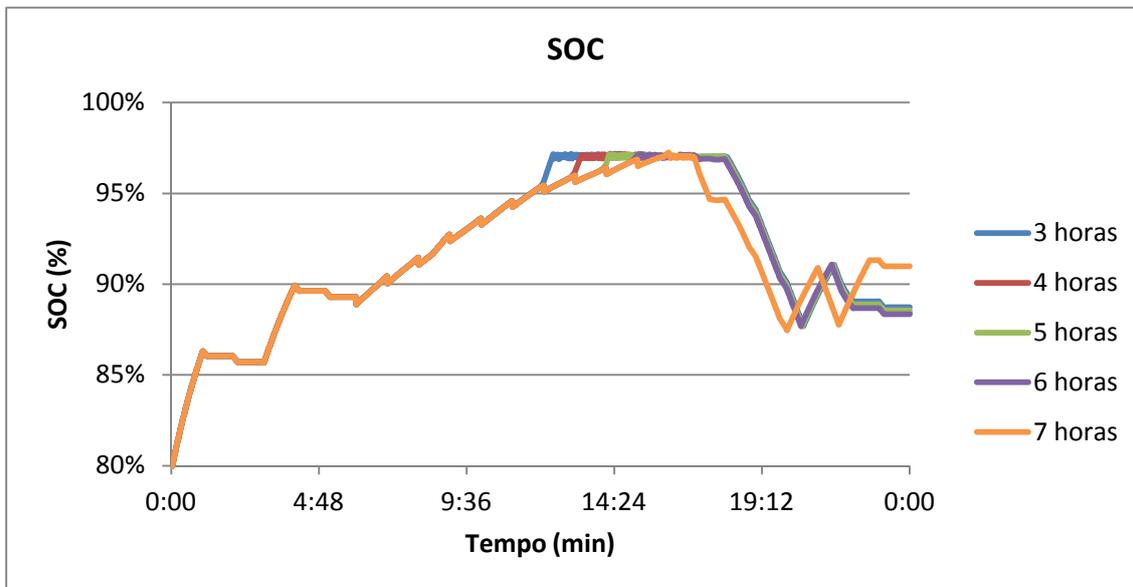


Figura 71 - Variação do estado de carga da bateria com diferentes tempos de produção

A Figura 71 apresenta a variação dos estados de carga para os diferentes tempos de produção de hidrogênio. É possível observar o momento em que o reformador desliga em cada caso. Quando isso ocorre, o estado de carga aumenta pois a carga alimenta pelo sistema é aliviada.

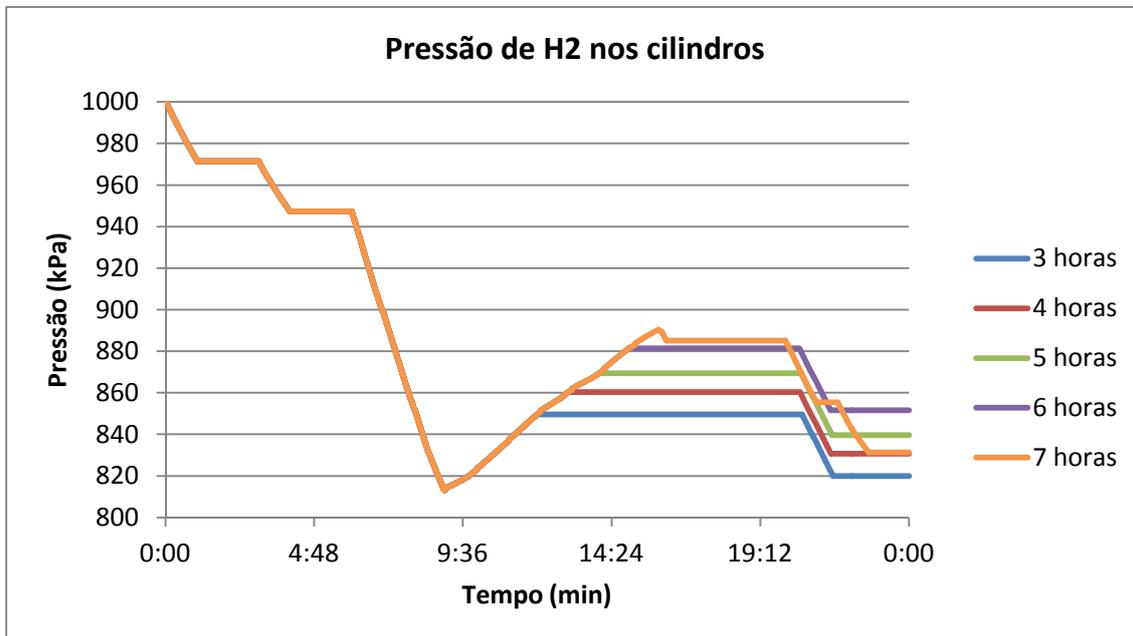


Figura 72 - Variação de pressão nos cilindros de hidrogênio

A Figura 72 apresenta a variação de pressão nos cilindros de hidrogênio para cada caso. A partir de 3 horas de produção é possível observar que quanto maior o tempo de produção, maior a pressão final nos cilindros até um limite que é de 7 horas. Quando o reformador produz durante 7 horas, no momento em que

não há energia solar e ele ainda está ligado, consumindo muita energia elétrica para alimentar essa carga. Dessa forma a CaC opera de forma contínua, consumindo uma grande quantidade de hidrogênio e fazendo com que a pressão nos cilindros termine com um valor inferior que quando ela produz durante 6 horas.

Para analisar qual o tempo ótimo de produção de hidrogênio foram comparados os cinco casos acima com relação ao consumo de etanol e produção de hidrogênio. A Tabela 14 apresenta os dados obtidos em cada simulação.

Tabela 14 - Relação entre volume consumido de etanol e volume produzido de hidrogênio

Tempo de produção (h)	Consumo de etanol (L)	Produção de hidrogênio (L)	Hidrogênio produzido/ etanol consumido
3	4,6	3000	652,2
4	5,4	4000	740,7
5	6,1	5000	819,7
6	6,9	6000	869,6
7	7,7	7000	909,1

Com base nessas informações, é possível verificar que o tempo ótimo de produção de hidrogênio é de 6 horas, pois é o maior tempo de produção de hidrogênio enquanto há energia solar disponível para o sistema. A Figura 72 mostra que a maior pressão ao final da simulação é o reformador produzindo hidrogênio por 6 horas.

Para determinar a pressão mínima de hidrogênio contido nos cilindros antes do reformador ligar, foram simulados dias consecutivos com o reformador desligado.

Sabendo que a CaC precisa de no mínimo 345 kPa para operar, é necessário garantir uma pressão um pouco maior pois quando o reformador está na fase de aquecimento, a CaC está ligada consumindo hidrogênio e ainda não há produção de hidrogênio no reformador. Com base nas simulações, concluiu-se que quando a pressão for menor ou igual a 550 kPa o reformador deve ser acionado.

A Figura 73 mostra a simulação de 9 dias consecutivos, com a pressão inicial de 1000 kPa. Nesse caso o reformador só é acionado no nono dia de

operação, que é quando a pressão atinge um valor menor que 550 kPa no início do dia.

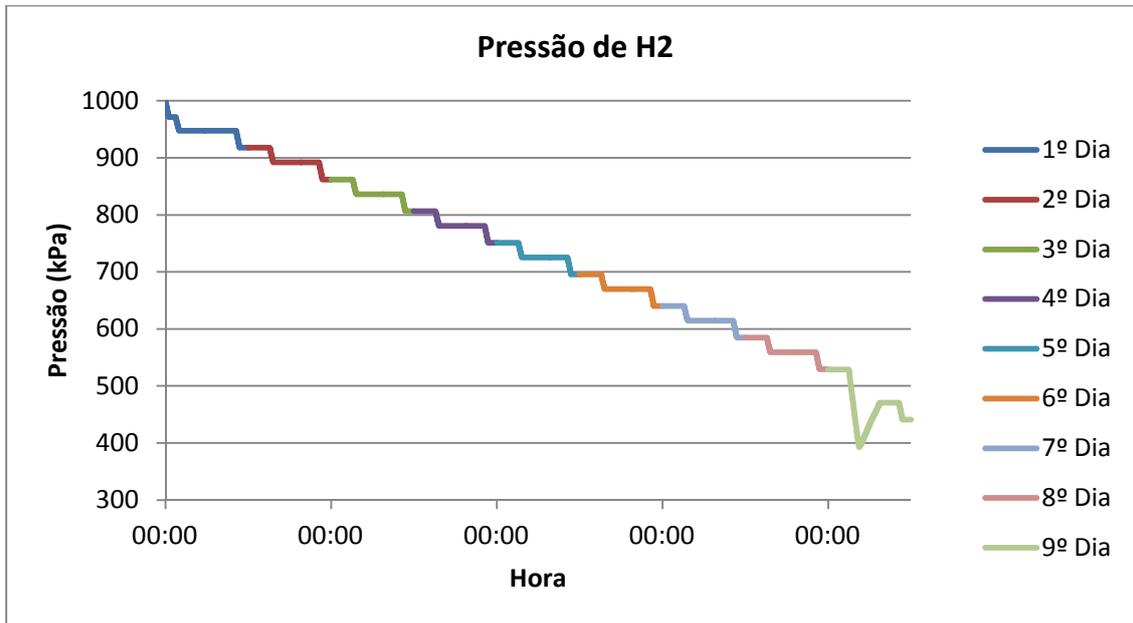


Figura 73 - Pressão de H₂ Simulada durante 9 dias consecutivos com painéis ligados.

A Figura 73 mostra a variação do estado de carga ao longo dos nove dias consecutivos simulados. É possível observar que o estado de carga se mantém muito alto e com perfil muito parecido todos os dias. No nono dia o perfil é um pouco diferente, ou seja, o SOC não sobe logo quando começa a ter energia solar da mesma forma que nos outros dias pois o reformador foi ligado e a carga a ser alimentada passa a ser a carga do reformador, a do compressor e a do SIGFI 45.

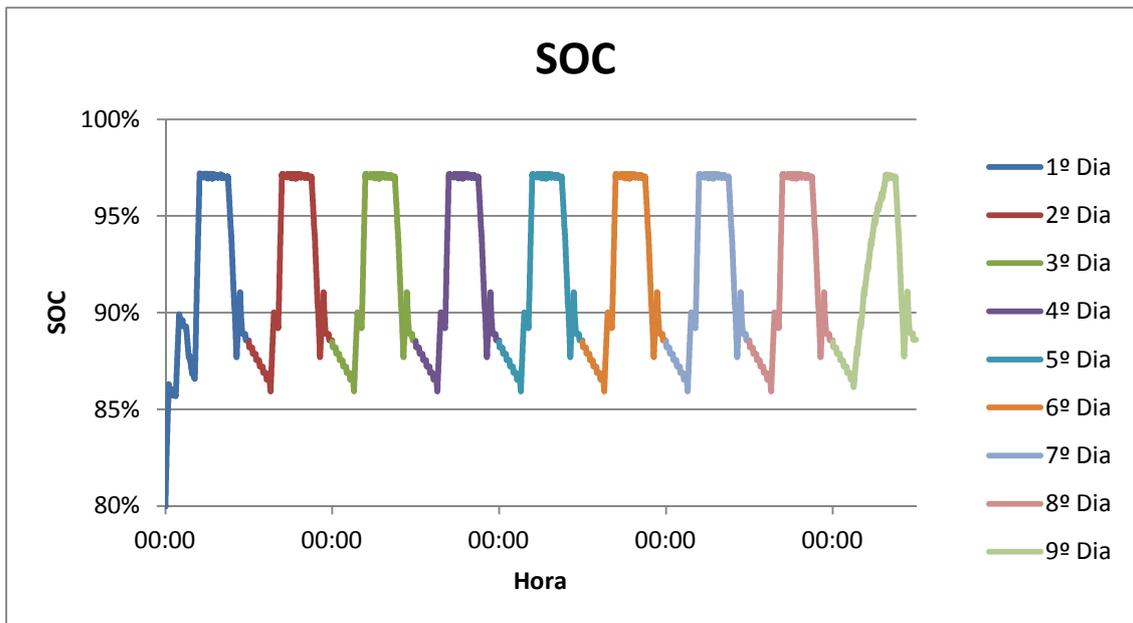


Figura 74 - Variação do estado de carga Simulado durante 10 dias consecutivos com painéis ligados.

Portanto os parâmetros do reformador que otimizam o sistema com o reformador real e os painéis ligados são:

- Pressão mínima nos cilindros para que o reformador seja acionado: 550 kPa
- Horário de início de operação do reformador: 6:00 da manhã
- Tempo de produção de hidrogênio: 6 horas

7.1.1.2. Reformador teórico

Foi feita a otimização do reformador teórico, ou seja, o reformador consumindo 200 kWh durante a fase de produção de hidrogênio. Esse consumo foi o especificado pelo fabricante do reformador no momento da compra do equipamento.

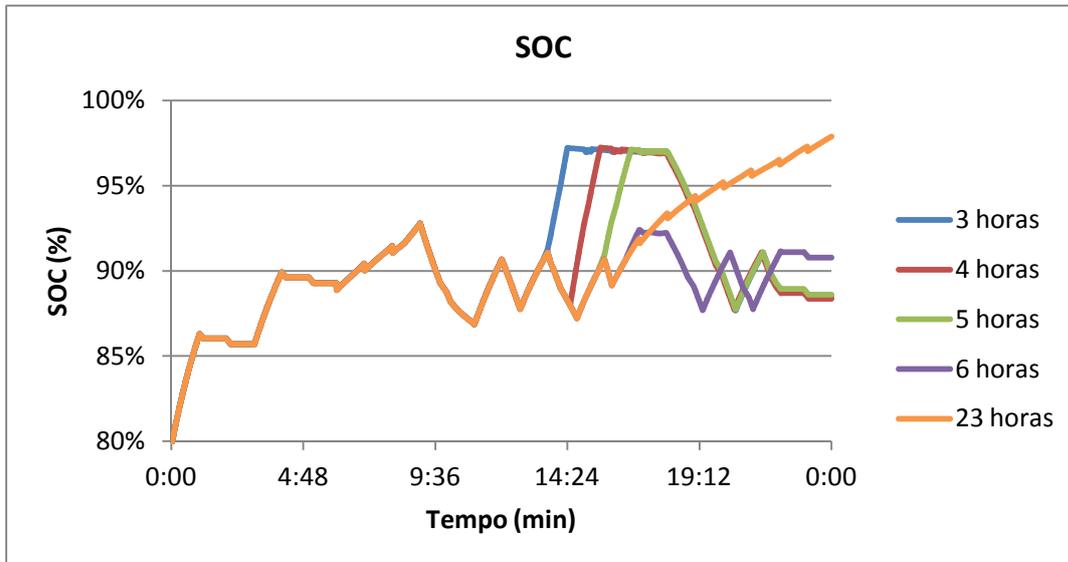


Figura 75 - Variação do estado de carga da bateria com diferentes tempos de produção.

A Figura 75 apresenta a variação dos estados de carga para os diferentes tempos de produção de hidrogênio. É possível observar o momento em que o reformador desliga em cada caso, exceto para 23 horas. Quando o reformador desliga, o estado de carga aumenta pois a carga alimenta pelo sistema é aliviada.

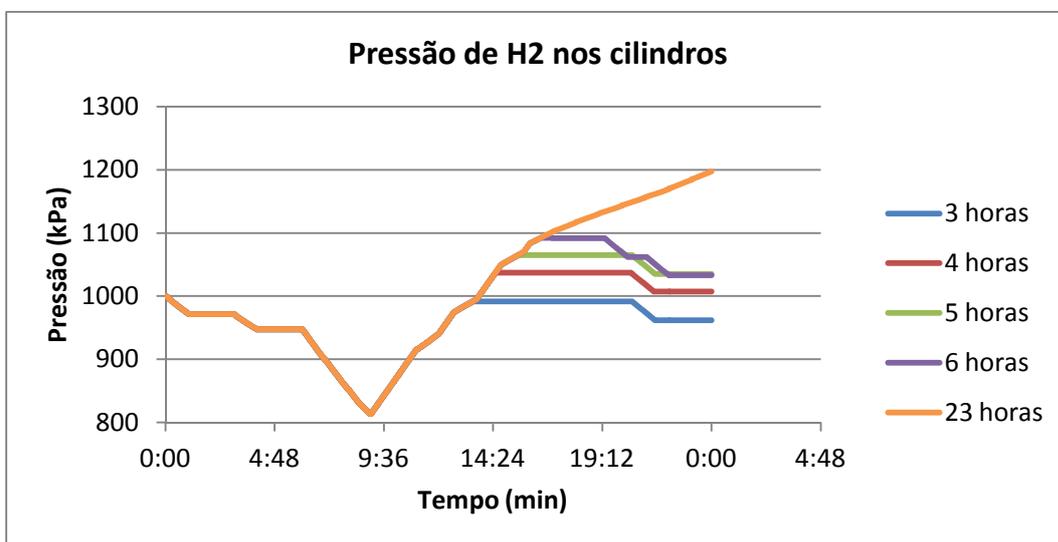


Figura 76 - Variação de pressão nos cilindros de hidrogênio.

A Figura 76 apresenta a variação de pressão nos cilindros de hidrogênio para cada caso. A partir de 3 horas de produção é possível observar que quanto maior o tempo de produção, maior a pressão final nos cilindros. Dessa forma a CaC deve operar de forma contínua pelo maior tempo possível, desde que não

atinga a pressão máxima nos cilindros de hidrogênio, que é 2070 kPa, para que a pressão nos cilindros termine com um valor superior ao final da operação.

Independente do consumo elétrico durante a fase de produção, a pressão mínima é determinada da mesma forma. Ou seja o reformador ainda deve ser ligado quando a pressão atingir 550 kPa.

Portanto os parâmetros do reformador que otimizam o sistema com o reformador teórico e os painéis ligados são:

- Pressão mínima nos cilindros para que o reformador seja acionado: 550 kPa
- Horário de início de operação do reformador: 6:00 da manhã
- Tempo de produção de hidrogênio: máximo até que a pressão nos cilindros de hidrogênio atinja 2070 kPa.

7.2. Estudo de viabilidade do sistema sem painéis

Foram simulados casos com alguns parâmetros fixos: horário de início do teste, 0:00, e o timer da CaC, 60 minutos.

Para saber qual o melhor ponto de LVS foram simulados casos com 50 V, 50,5 V e 51 V, e a pressão inicial nos cilindros de hidrogênio de 800 kPa, com dois estados de carga iniciais de 20% e 100% e com o reformador desligado, para saber quando a CaC é acionada, conforme visto na Figura 77 e na Figura 78.

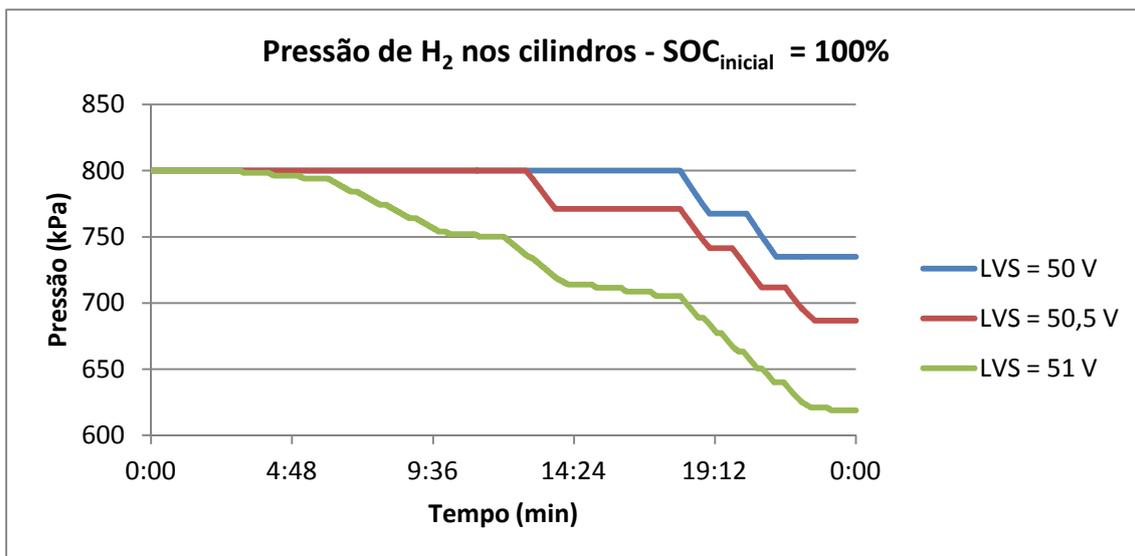


Figura 77 - Variação na pressão dos cilindros de hidrogênio para diferentes valores de LVS com SOC_{inicial} = 100%.

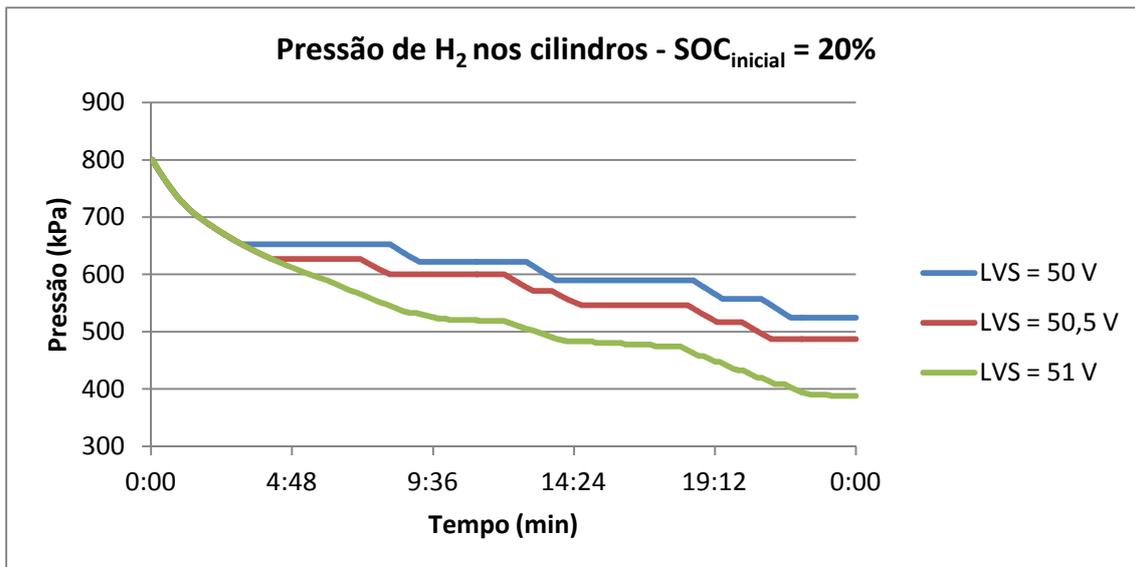


Figura 78 - Variação na pressão dos cilindros de hidrogênio para diferentes valores de LVS com SOC_{inicial} = 20%.

Verificou-se que quando o LVS é 51 V a CaC entra em operação logo no início da simulação e isso se repete muitas vezes o que faz com que a pressão nos cilindros caia bastante. Quando o LVS é 50 V e 50,5 V a CaC apresenta um comportamento bem parecido para 20% e 100%, porém para 100% há um espaçamento maior entre elas, mas como em ambos os casos a pressão nos cilindros de hidrogênio não fica menor que 345 kPa, tanto 50 V quanto 50,5 V seriam bons parâmetros analisando a variação de pressão nos cilindros de hidrogênio.

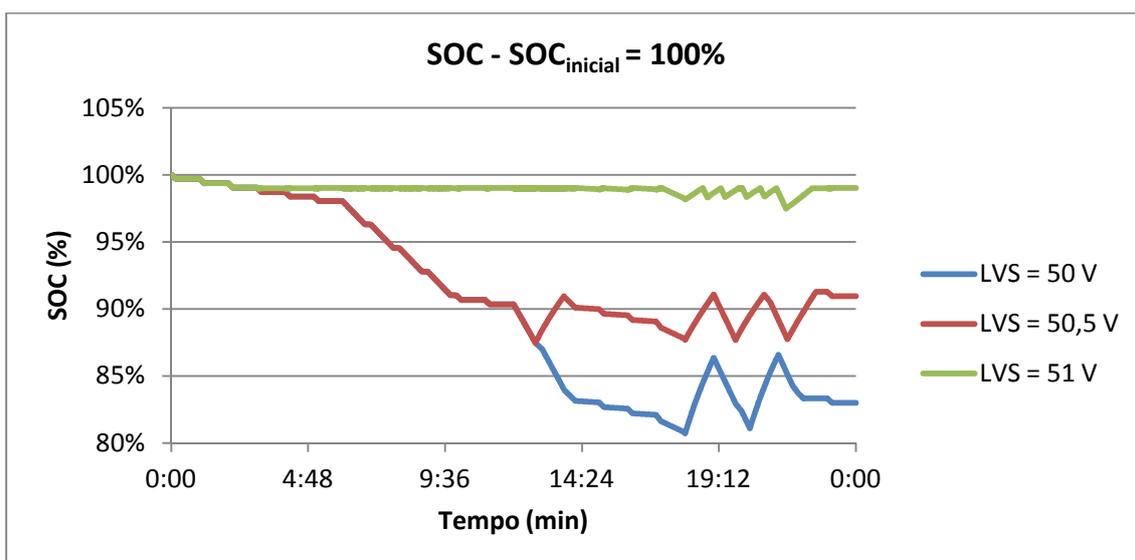


Figura 79 - Variação dos estado de carga com SOC_{inicial} = 100%.

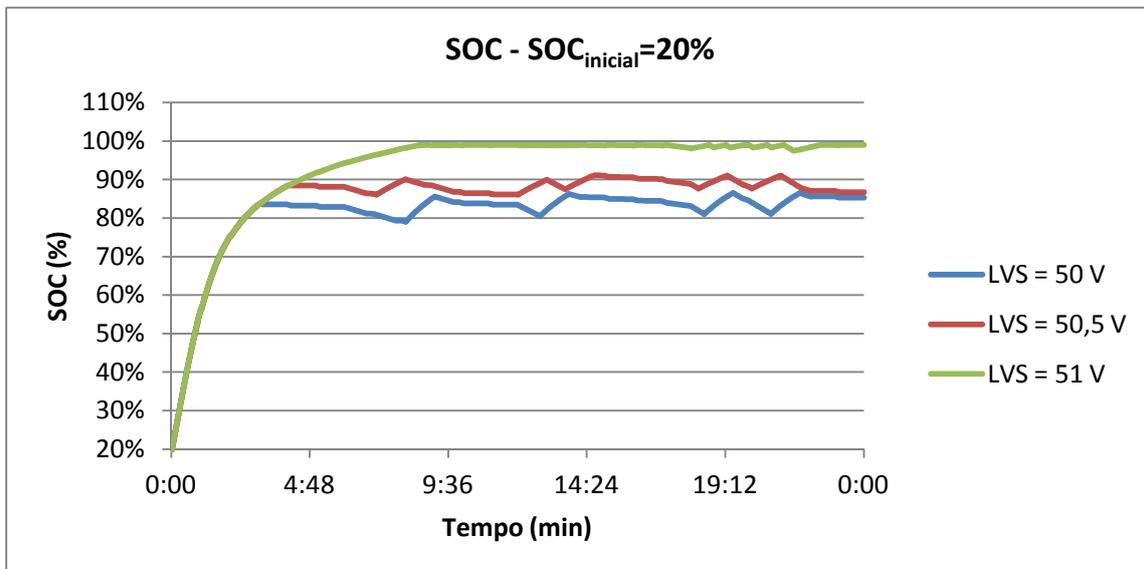


Figura 80 - Variação dos estado de carga com $SOC_{inicial} = 20\%$.

A Figura 79 e a Figura 80 mostram a variação do estado de carga para as mesmas condições. Observou-se que quando LVS é 51 V a CaC mantém o estado de carga muito alto durante toda a simulação pois ela entra em operação muitas vezes tanto para estado de carga inicial de 100% quanto para de 20%. O estado de carga cai da mesma forma quando LVS é 50 V ou 50,5 V para $SOC_{inicial} 100\%$, a diferença é que para 50,5 V a CaC entra em operação um pouco antes e não deixa o estado de carga cair tanto quanto para 50 V. Quando o estado de carga inicial é 20% a CaC entra em operação logo no início para aumentar o estado de carga acima de 80% e depois ela volta a operar de maneira parecida, a diferença continua sendo que para 50,5 V a CaC entra em operação um pouco antes e não deixa o estado de carga cair tanto quanto para 50 V.

Com base nessas informações o LVS foi fixado em 50,5 V para as próximas simulações. Com isso a bateria trabalha na faixa de 80% a 90% onde apresenta alta eficiência.

7.2.1.

Parâmetros do reformador para o sistema sem os painéis

Um parâmetro fixo para o reformador é o horário que ele é acionado. Com o objetivo de aproveitar ao máximo o horário que o consumidor SIGFI 45 consome menos energia, para que quando o reformador seja acionado a energia a ser fornecida pelo sistema não seja muito elevada, esse horário foi fixado em 23:00 pois é o horário que a demanda energética cai e fica no seu patamar mais

baixo. Como as simulações estavam sendo feitas começando às 00:00 e o reformador só será ligado às 23:00 o horário de início da simulação foi alterado para às 22:00 a partir de agora. Foram simulados diferentes casos variando o tempo de produção com o objetivo de minimizar o consumo de energia elétrica do reformador, pois sabe-se que esse consumo é fixo na fase de aquecimento e de resfriamento, ou seja, quanto maior o tempo de produção menor o custo por litro de hidrogênio produzido. Outro parâmetro fixo é o estado de carga inicial que é 80% pois é o estado de carga que a bateria fica estabilizada.

Como o reformador apresentou um comportamento significativamente diferente ao esperado, isto é, seu consumo elétrico durante a fase de produção foi muito superior ao apresentado pelo fabricante do reformador no momento da compra do equipamento, julgou-se necessário simular o reformador real, que consome 929 kWh durante a fase de produção, e o teórico que consome 200 kWh durante essa mesma fase.

7.2.1.1. Reformador real

O resultados dessa seção são para o simulador real, ou seja, consumindo 929 kWh durante a fase de produção de hidrogênio.

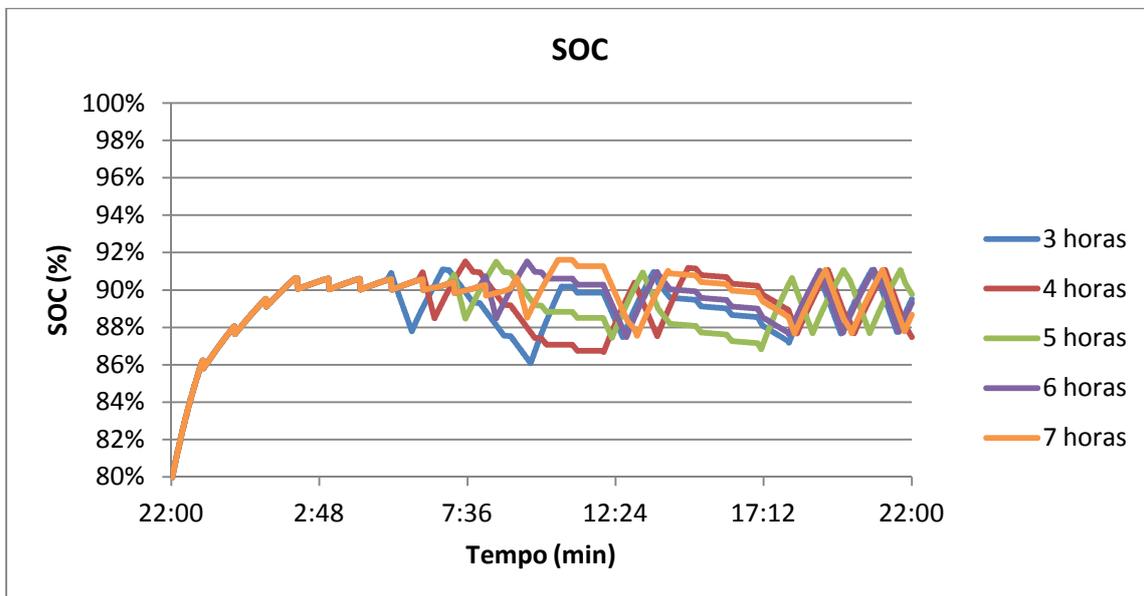


Figura 81 - Variação do estado de carga da bateria com diferentes tempos de produção.

A Figura 81 apresenta a variação dos estados de carga para os diferentes tempos de produção de hidrogênio. É possível observar o momento em que o

reformador desliga em cada caso. Quando isso ocorre, o estado de carga aumenta pois a carga alimentada pelo sistema é aliviada.

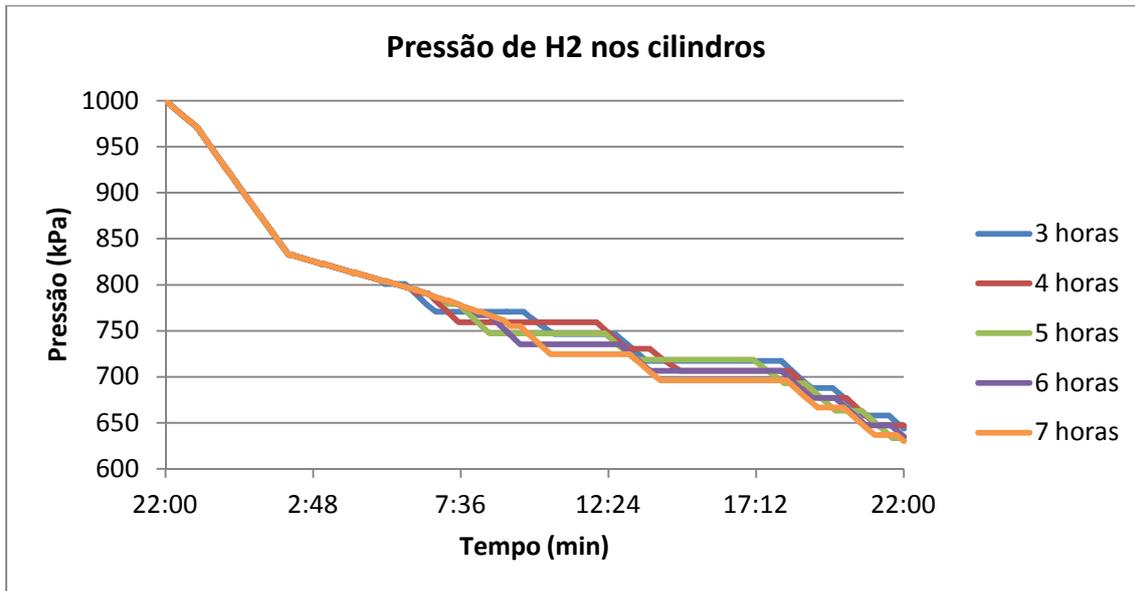


Figura 82 - Variação de pressão nos cilindros de hidrogênio.

A Figura 82 apresenta a variação de pressão nos cilindros de hidrogênio para cada caso. É possível observar que a pressão no final da simulação varia muito pouco com os diferentes tempos de produção. Mas ao analisar essa pressão no final de cada simulação é possível observar que a maior pressão no final da simulação é para 4 horas de produção de hidrogênio no reformador.

Para analisar a relação de produção de hidrogênio por etanol consumido foram comparados os cinco casos acima com relação ao consumo de etanol e produção de hidrogênio. A Tabela 15 apresenta os dados obtidos em cada simulação.

Tabela 15 - Relação entre volume consumido de etanol e volume produzido de hidrogênio

Tempo de produção (h)	Consumo de etanol (L)	Produção de hidrogênio (L)	Hidrogênio produzido/ etanol consumido
3	4,6	3000	652,2
4	5,4	4000	740,7
5	6,1	5000	819,7
6	6,9	6000	869,6
7	7,7	7000	909,1

Com base nessas informações, é possível verificar que o tempo ótimo de produção de hidrogênio é de 4 horas, pois é o maior tempo de produção de hidrogênio enquanto a demanda de energia elétrica do consumidor não é muito alta. A Figura 82 mostra que a maior pressão ao final da simulação é o reformador produzindo hidrogênio por 4 horas.

Para determinar a pressão mínima de hidrogênio contido nos cilindros antes do reformador ligar, foram simulados dias consecutivos com o reformador desligado.

Sabendo que a CaC precisa de no mínimo 345 kPa para operar, é necessário garantir uma pressão um pouco maior pois quando o reformador está na fase de aquecimento, a CaC está ligada consumindo hidrogênio e ainda não há produção de hidrogênio no reformador.

A Figura 83 mostra a simulação de 7 dias consecutivos, com a pressão inicial de 1600 kPa. Nesse caso o reformador só é acionado no sétimo dia de operação, porém conforme pode ser observado nesse caso a pressão nos cilindros de hidrogênio ficaria menor do que a mínima (345 kPa) então o reformador teria que ter sido ligado no sexto dia de operação. Portanto a pressão mínima no início da simulação antes que o reformador seja ligado é de 800 kPa.

O sistema funcionando sem os painéis fotovoltaicos a pressão no cilindro não volta ao nível inicial. Isso porque o reformador consome mais durante a fase de produção na prática do que o valor apresentado no momento da compra do equipamento.

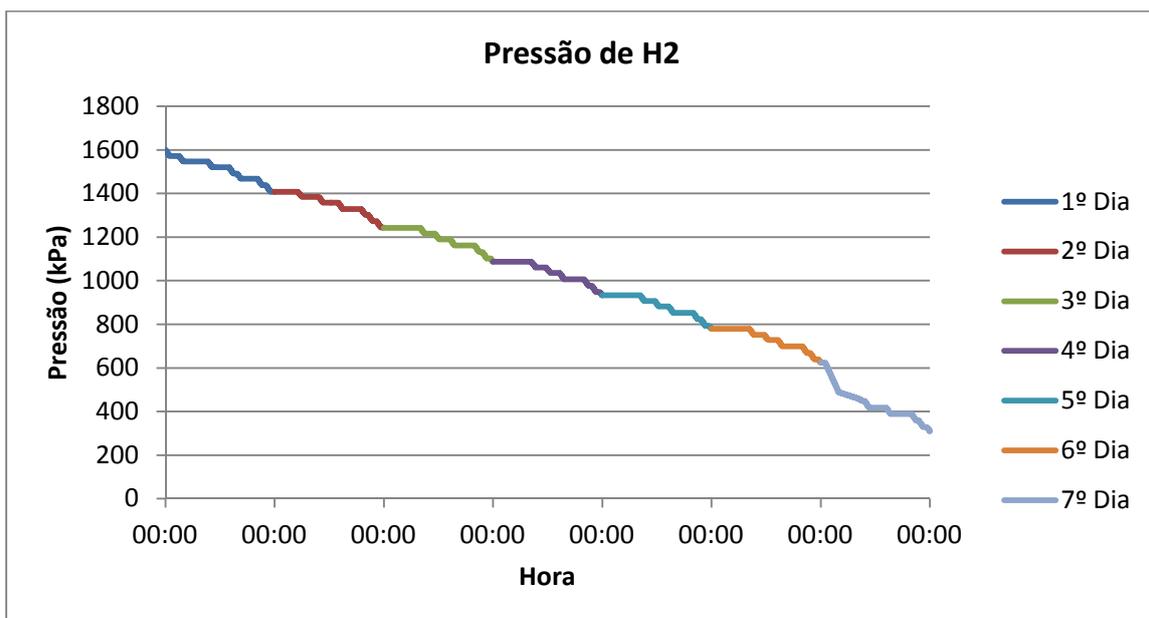


Figura 83 - Pressão de H₂ Simulada durante 4 dias consecutivos com painéis desligados.

A Figura 84 mostra a variação do estado de carga ao longo dos sete dias consecutivos simulados. É possível observar que o estado de carga se mantém muito alto pois como o reformador está desligado nesses dias a carga alimentada é só a do perfil SIGFI 45, que é baixa. No sétimo dia o reformador está ligado e a carga a ser alimentada passa a ser a carga do reformador, a do compressor além do SIGFI 45.

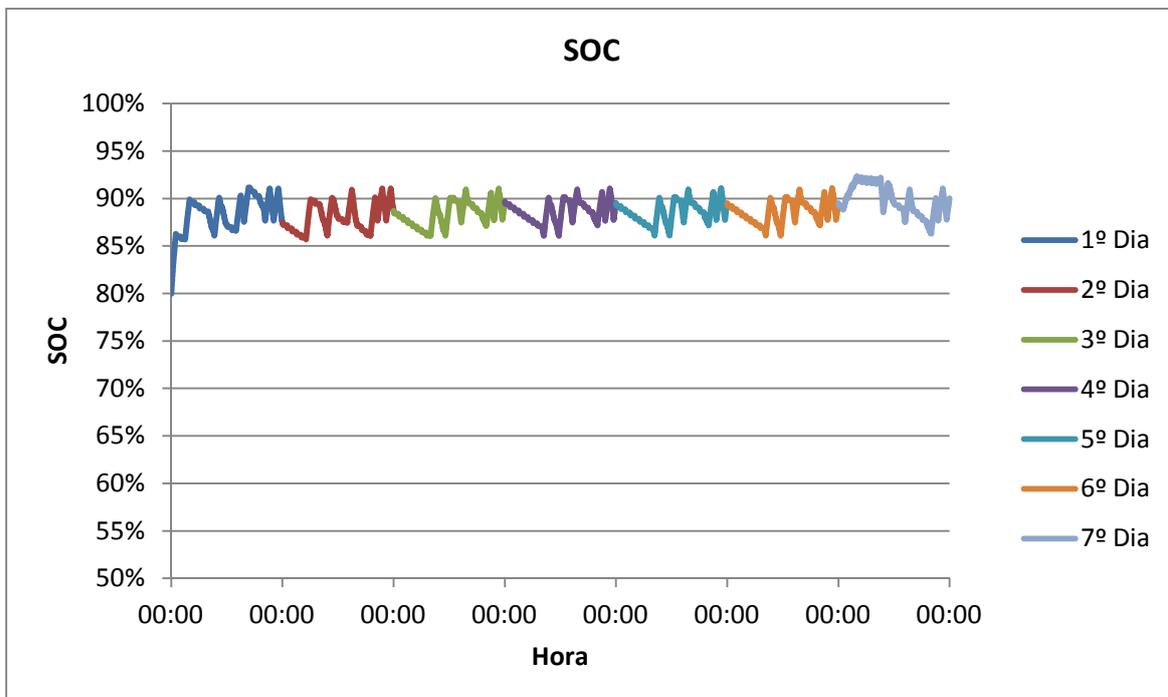


Figura 84 - Variação do estado de carga Simulado durante 10 dias consecutivos com painéis ligados.

Portanto os parâmetros do reformador que otimizam o sistema com os painéis desligados são:

- Pressão mínima nos cilindros para que o reformador seja acionado: 800 kPa
- Horário de início de operação do reformador: 23:00 (simulação começando às 22:00)
- Tempo de produção de hidrogênio: 4 horas

7.2.1.2. Reformador teórico

Foi feita a otimização do reformador teórico, ou seja, o reformador consumindo 200 kWh durante a fase de produção de hidrogênio. Esse consumo foi o especificado pelo fabricante do reformador no momento da compra do equipamento.

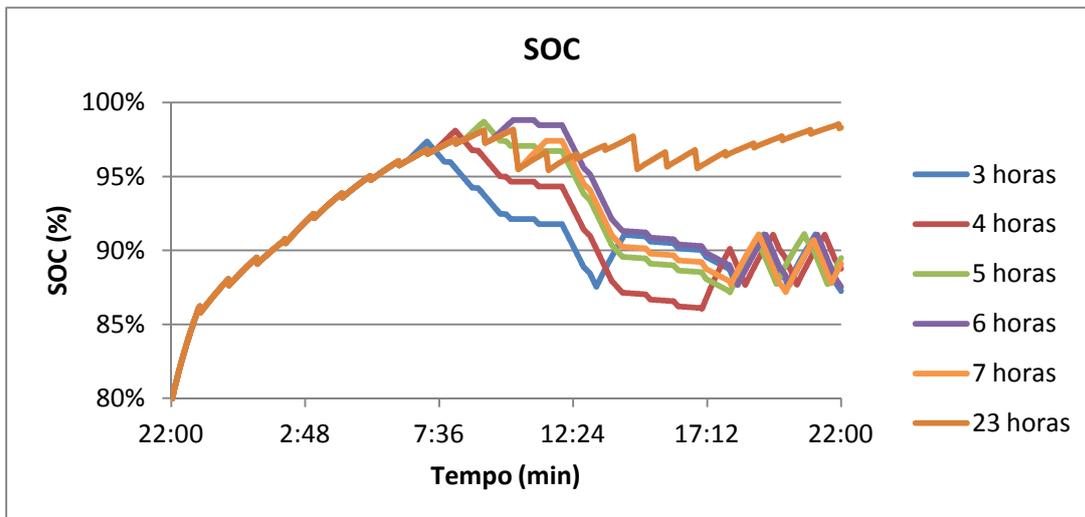


Figura 85 - Variação do estado de carga da bateria com diferentes tempos de produção.

A Figura 85 apresenta a variação dos estados de carga para os diferentes tempos de produção de hidrogênio. É possível observar o momento em que o reformador desliga em cada caso, exceto na simulação de 23 horas. Quando o reformador desliga, o estado de carga aumenta pois a carga alimenta pelo sistema é aliviada.

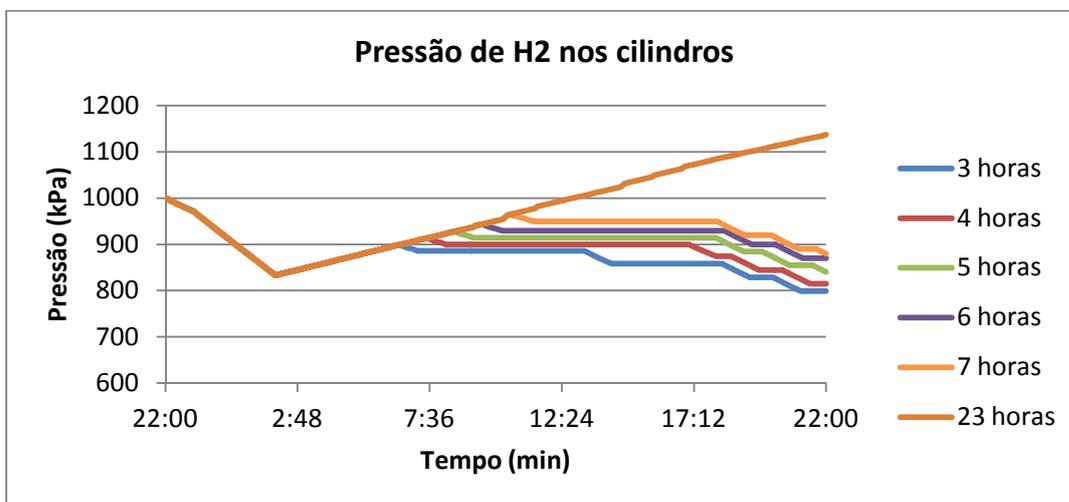


Figura 86 - Variação da pressão nos cilindros de hidrogênio.

A Figura 86 apresenta a variação de pressão nos cilindros de hidrogênio para cada caso. A partir de 3 horas de produção é possível observar que quanto maior o tempo de produção, maior a pressão final nos cilindros. Dessa forma a CaC deve operar de forma contínua pelo maior tempo possível, desde que não atinja a pressão máxima nos cilindros de hidrogênio, para que a pressão nos cilindros termine com um valor superior ao final da operação.

Independente do consumo elétrico durante a fase de produção, a pressão mínima é determinada da mesma forma. Ou seja o reformador ainda deve ser ligado quando a pressão atingir 800 kPa.

Portanto os parâmetros do reformador que otimizam o sistema com o reformador teórico e os painéis desligados são:

- Pressão mínima nos cilindros para que o reformador seja acionado: 800 kPa
- Horário de início de operação do reformador: 23:00 (simulação começando às 22:00)
- Tempo de produção de hidrogênio: máximo desde que não atinja a pressão máxima nos cilindros de hidrogênio de 2070 kPa.

7.3.

Conclusões da seção

As simulações feitas nesse capítulo mostram que o sistema funcionando sem os painéis fotovoltaicos com o reformador consumindo 929 W na fase de produção que é seu consumo real observado ao longo dos ensaios não é uma opção viável. Isso porque o reformador consome muito e ele não é capaz de elevar a pressão dos cilindros ao nível anterior, somente não deixa que a pressão caia para o mínimo.

Porém quando é simulado o reformador teórico o sistema se torna uma opção viável energeticamente, ou seja, ele consegue gerar energia suficiente para manter o sistema em operação e adicionalmente alimentar o consumidor que segue o perfil de consumo SIGFI 45.

Vale ressaltar que no momento da compra do reformador a informação foi que ele consumiria 200 W durante a fase de produção de hidrogênio.

8 Conclusão

A partir do projeto inicial de um sistema de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis como o sol e o hidrogênio produzido a partir da reforma do etanol, foi possível analisar casos experimentais, construir um simulador para analisar outros casos, validar o simulador comparando dados reais obtidos no laboratório com casos simulados e otimizar o sistema integrado.

A partir da comparação de casos reais analisados no laboratório com casos simulados, foi possível validar o simulador construído com o objetivo de otimizar o sistema integrado de geração de energia. Para essa validação foram comparados casos onde somente a bateria e a CaC forneciam energia para alimentar a carga do perfil SIGFI 45 com diferentes estados de carga iniciais. Adicionalmente foi comparado o caso onde os painéis fotovoltaicos, além da bateria e da CaC, fornecia energia para alimentar a carga do perfil em questão.

Com o intuito de saber quantos dias o sistema é capaz de manter o atendimento ao consumidor SIGFI 45, supondo que os cilindros de hidrogênio comecem com a pressão máxima e o reformador e o compressor estejam desligados, foi feita a simulação com esses dados de entrada e observou-se que com a pressão inicial de 2070 kPa, a CaC fornece energia para a carga SIGFI em questão durante 11 dias. Posteriormente se considerarmos ainda o estado de carga da bateria, ela ainda consegue alimentar o sistema até as 20:26 do 13º dia, que é quando o estado de carga atende 17%, fazendo com que o sistema de proteção do inversor desligue o sistema por segurança.

O banco de baterias totalmente carregado seria capaz de garantir sozinho, ou seja, supondo que a CaC, o reformador, o compressor e os painéis FV estivessem desligados, o atendimento ao consumidor durante 2 dias e 8 horas.

Foi simulado o sistema completo em operação e verificou-se que, devido ao alto consumo elétrico do reformador durante a fase de produção de hidrogênio, a pressão nos cilindros de hidrogênio e o estado de carga do banco de baterias não voltam ao estado inicial, evidenciando que o sistema consome mais energia elétrica do que produz.

Julgou-se importante realizar a simulação com o valor de consumo especificado, pois aquele observado na condição real inviabilizaria o sistema de

geração, conforme concebido no projeto. O fabricante do reformador está ciente desta divergência, porém ao longo do projeto não houve tempo hábil para que fossem introduzidas modificações no reformador.

Com o consumo elétrico do reformador na fase de produção de 200 W, conforme tinha sido especificado pelo fabricante, o sistema consegue manter as pressões de hidrogênio e o sistema se tornaria viável.

Para melhorar o funcionamento do sistema de geração de energia elétrica pode ser proposto a substituição do reformador utilizado por um reformador mais eficiente que consuma 200 W na fase de produção ou ainda a substituição do reformador por um eletrolisador e dessa forma o hidrogênio seria obtido através da eletrólise da água e não seria mais necessário o etanol.

9

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, n. Supplement C, p. 1791-1808, 2015/12/01/ 2015. ISSN 1364-0321. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115008539> >.

AGBOSSOU, K. et al. Electrolytic hydrogen based renewable energy system with oxygen recovery and re-utilization. **Renewable Energy**, v. 29, n. 8, p. 1305-1318, 2004/07/01/ 2004. ISSN 0960-1481. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148103004014> >.

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

BEJ, B. et al. Production of hydrogen by dry reforming of ethanol over alumina supported nano-NiO/SiO₂ catalyst. **Catalysis Today**, v. 291, n. Supplement C, p. 58-66, 2017/08/01/ 2017. ISSN 0920-5861. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092058611630829X> >.

BERNIER, E. et al. Electric round-trip efficiency of hydrogen and oxygen-based energy storage. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 30, n. 2, p. 105-111, 2005/02/01/ 2005. ISSN 0360-3199. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319904001788> >.

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, n. Supplement C, p. 1332-1347, 2017/09/01/ 2017. ISSN 1364-0321. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117301727> >.

“Energy for Tomorrow’s World - Acting Now!” publicado pelo World Energy Council (WEC), New York, 2000.

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, n. Supplement C, p. 348-364, 2017/09/15/ 2017. ISSN 0306-2619. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917306256> >.

GRAY, E. M. et al. Hydrogen storage for off-grid power supply. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 1, p. 654-663, 2011/01/01/ 2011. ISSN 0360-3199. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319910019270> >.

HAJMOHAMMADI, M. R. et al. An integrated system of zinc oxide solar panels, fuel cells, and hydrogen storage for heating and cooling applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 31, p. 19683-19694, 2017/08/03/ 2017. ISSN 0360-3199. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319917325144> >.

HOU, T. et al. Hydrogen production from ethanol reforming: Catalysts and reaction mechanism. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, n. Supplement C, p. 132-148, 2015/04/01/ 2015. ISSN 1364-0321. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114010752> >.

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

MEZZAI, N. et al. Modeling of hybrid photovoltaic/wind/fuel cells power system. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 27, p. 15158-15168, 2014/09/12/ 2014. ISSN 0360-3199. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031991401653X> >.

ÖZGIRGIN, E.; DEVRIM, Y.; ALBOSTAN, A. Modeling and simulation of a hybrid photovoltaic (PV) module-electrolyzer-PEM fuel cell system for micro-cogeneration applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 44, p. 15336-15342, 2015/11/26/ 2015. ISSN 0360-3199. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319915016079> >.

Parâmetros de simulação de baterias disponível em:
<<https://www.mathworks.com/videos/automating-the-parameter-estimation-of-a-battery-model-95187.html>> acessado em 10 de julho de 2017.

REKIOUA, D.; BENSMAIL, S.; BETTAR, N. Development of hybrid photovoltaic-fuel cell system for stand-alone application. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 3, p. 1604-1611, 2014/01/16/ 2014. ISSN 0360-3199. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319913006496> >.

Simulação de baterias disponível em:
<<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/36019-lithium-battery-model--simscape-language-and-simulink-design-optimization?requestedDomain=www.mathworks.com>> acessado em 10 de julho de 2017.

Anexo I

Catálogos

AI.1. 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:



- 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

6.2 Containers & control cabinet

- Container dimensions

length	[mm]	700
width	[mm]	800
height	[mm]	1400
approx weight	[kg]:	150
- Ambient operating temperature [°C] -20² .. 40
- Corrosion protection outdoor paint
- Protection grade IP 54

6.3 Container media specification

- Utilities consumption maximum capacity:

- electricity ³ (by customer)	[kW]	<1
- nitrogen (by customer)	[Nl/purging]:	300

Utilities specification⁴:

- Power in/out container services

a) Voltage	[VAC]	201-229
b) Phases		1 +N+PE
c) Frequency	[Hz]	60 +/- 1%
d) Customer side protection:		
Thermal	[A]	16
Magnetic	[rating]	C
f) Cable: 3x 2.5 mmq		

¹ Ethanol consumption based on nominal hydrogen production capacity.

² External heat equipment is necessary to avoid water freezing

³ This value refers to start-up procedure and includes all container services.

⁴ Values to be warranted at connection point at container wall.

AI.2. 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 35.8 cm x 61 cm

8 to 12 psig

55.1 to 82.8 kPag

0.551 to 0.83 bar

Weight

113 lbs (51.4 kg)

Consumption

1,000W: 13.2 slpm

1,500W: 19.8 slpm

2,000W: 26.4 slpm

2,200W: 28 slpm

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

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)

Fuel

Composition

Standard industrial grade hydrogen (99.95%)

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

Supply Pressure to Unit @ 20 slpm

AI.3. Compressor de hidrogênio



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

AI.4. Inversor Sunny Island 3.0M

SMA Solar Technology AG

10 Technical Data

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 $\cos \varphi$	- 1 to +1	- 1 to +1	- 1 to +1	- 1 to +1
Recommended conductor cross-section	10 mm ²	10 mm ²	10 mm ²	10 mm ²
Maximum connectable conductor cross-section	16 mm ²	16 mm ²	16 mm ²	16 mm ²
Cable diameter	9 mm to 18 mm	9 mm to 18 mm	9 mm to 18 mm	9 mm to 18 mm
Connection	Lever terminal	Lever terminal	Lever terminal	Lever terminal
Circuit breakers than can be tripped	Trip characteristic B6	Trip characteristic B6	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

AI.5. Controlador de Carga

Technical Parameters

12. Technical Parameters

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

Anexo II

Tratamento de Dados Relativos às Purgas de Hidrogênio na Célula a Combustível

Conforme mencionado no item 4.3.1.1, quando ocorre uma purga na linha de suprimento de hidrogênio na célula a combustível (CaC) a vazão instantânea é maior que o fundo de escala do medidor de vazão (Aalborg) e, para caracterizar o consumo específico da CaC foram realizadas as análises descritas neste anexo.

A ideia inicial foi trocar o equipamento de medida de vazão por um que apresentasse fundo de escala maior, porém como a maior parte das vazões durante os ensaios são muito mais baixas que a vazão instantânea no momento da purga a utilização de um equipamento que apresentasse fundo de escala muito elevado haveria perda de precisão no registro das demais vazões.

Como a duração da purga é inferior um segundo e foram feitos dois ensaios a fim de verificar como isso influencia no cálculo da integral da vazão de hidrogênio consumido pela célula durante as purgas.

No primeiro, utilizou-se um cilindro para armazenar o hidrogênio, o medidor de vazão e o compressor. Neste ensaio o hidrogênio foi comprimido durante 15 minutos para o cilindro, nesse caso não há purgas e a vazão de hidrogênio é medida sem a influência do problema de fundo de escala e com isso foi possível calcular o volume exato desse cilindro, o qual será utilizado posteriormente para validação dos cálculos.

Para calcular o volume do cilindro foi utilizada a equação AII.1:

$$\frac{P_{St}V}{T_{St}} = \frac{P V_{cil}}{T} \quad (\text{AII.1})$$

Onde P_{St} e T_{St} são, respectivamente a pressão e a temperatura nas condições padrão e V o volume acumulado e registrado pelo medidor de vazão. P corresponde a variação de pressão no cilindro durante o ensaio, T a temperatura do H_2 durante o ensaio e V_{cil} o volume do cilindro que se deseja calcular.

Para:

$$T_{St} = 294,25 \text{ K (21,1 } ^\circ\text{C)}$$

$$P_{St} = 101,2 \text{ kPa (1 atm)}$$

$$V = 300 \text{ L (volume registrado no medidor de vazão)}$$

$$P = 640,9 \text{ kPa (6,33 atm) (variação de pressão por compressão)}$$

$$T = 304,65 \text{ K (31,5 } ^\circ\text{C)}$$

Obtem-se:

$$V_{cil} = 49,13 \text{ L (calculado)}$$

No segundo ensaio foi utilizado somente a CaC, o mesmo cilindro de hidrogênio utilizado no ensaio descrito anteriormente com volume conhecido e o medidor de vazão. A CaC foi operada durante 20 minutos a fim de observar o comportamento da purga durante esse ensaio, as medidas foram feitas de um em um segundo que é o intervalo mínimo que o supervisorio salva as medidas. A Figura All.1 apresenta esse comportamento.

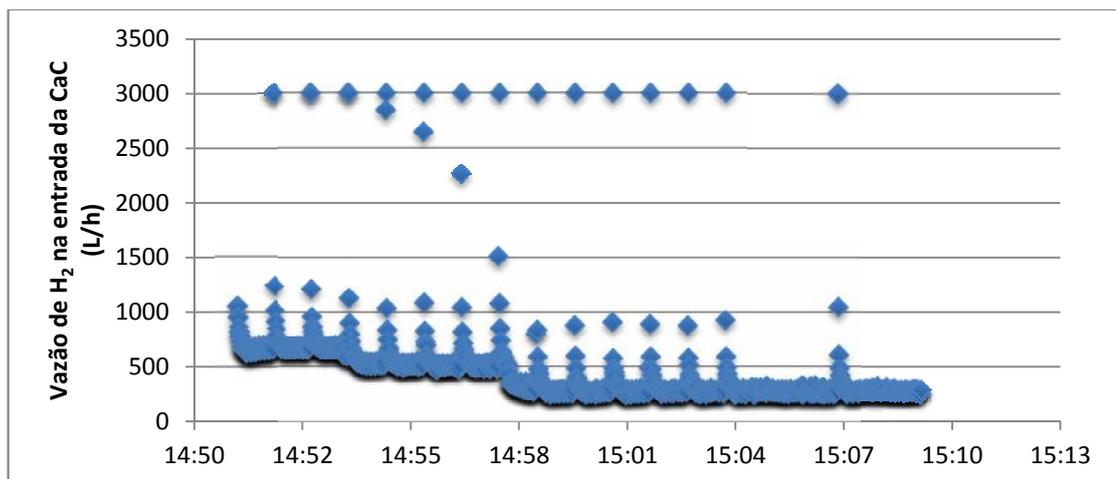


Figura All.1 - Vazão de hidrogênio durante o ensaio, incluindo as purgas

Foram medidos os valores de pressão e temperatura durante esse ensaio para que a equação de estado fosse aplicada e a massa de hidrogênio durante o ensaio fosse calculada. A equação de estado é dada pela equação All.2

$$PV = nRT \quad (\text{All.2})$$

Onde P é a variação de pressão durante o ensaio, V o volume do cilindro que é conhecido, n é o numero de mols, R é a constante universal dos gases, e T a temperatura durante o ensaio. E sabe-se que a massa molar do hidrogênio é 2,02 g/mol. Na tabela All.1 encontram-se os valores medidos durante o ensaio.

Tabela AII.1 – Massa de H₂ consumida durante o ensaios

Temperatura de H₂ na entrada da CaC	30	°C
	303,15	K
Volume do cilindro	49,13	L
R (constante dos gases)	0,082	L.atm/K.mol
Varição de pressão durante o ensaio	320,6	kPa
	3,16	atm
n	6,25	mol
Massa H₂	12,62	g

A massa de hidrogênio calculada dessa forma foi comparada com a massa calculada pela equação de estado a partir das medidas registradas no medidor de vazão. Segundo o manual do equipamento, o mesmo é calibrado para apresentar as medidas nas condições padrão (pressão $P = 1$ atm, temperatura $T = 21,1$ °C). Como as medidas foram feitas a cada segundo para calcular o volume de H₂ dividiu-se a vazão por 3600 e esse volume foi integrado no tempo a fim de calcular o volume total de H₂ utilizado durante o ensaio. Na tabela AII.2 encontram-se os valores utilizados para a aplicação da equação de estado e a massa de H₂ consumida durante o ensaio.

Tabela AII.2 – Massa de hidrogênio consumida

Temperatura padrão	21,1	°C
	294,25	K
Volume	151,92	L
R (const. dos gases)	0,082	L.atm/K.mol
Pressão padrão	1	atm
n	6,30	mol
massa H₂	12,72	g

Comparando-se a massa calculada pela duas formas descrita anteriormente verificou-se que o erro da medição realizada pelo medidor de vazão é baixo (0,81%), indicando que o volume de hidrogênio não lido durante as purgas estaria sendo compensado pelo excesso de tempo em que cada purga é contabilizada. Embora a vazão durante a purga embora seja superior a 3000 L/h (fundo de escala) ela ocorre por períodos inferiores um segundo (não é possível precisar o tempo exato pois esse é o intervalo mínimo entre medições

pelo supervisor). Ao considerarmos a vazão na purga como 3000 L/h durante um segundo o procedimento adotado aproxima-se do valor real do hidrogênio consumido com erro menor que 1%.

Anexo III Calibrações

AIII.1. Calibração da pressão

A aferição da pressão foi feita observando os valores de pressão apresentados no supervisório e comparado com os valores medidos com um calibrador de pressão Fluke modelo 718 300G. Tabela AIII.1 encontram-se esses valores.

Tabela AIII.1 - Calibração das pressões

Pressão (kPa)	Supervisório (kPa)	Diferença (kPa)	Erro	Pressão corrigida (kPa)
0	0	0	-0,001	0
200	199	-1	-0,490	199
400	399	-1	-1,046	400
600	599	-1	-1,665	601
800	798	-2	-2,345	800
1000	997	-3	-3,089	1000
1200	1196	-4	-3,896	1200
1400	1395	-5	-4,766	1400
1600	1594	-6	-5,699	1600
1800	1793	-7	-6,696	1800
2000	1993	-7	-7,762	2001

Foi feito o gráfico Diferença x Pressão no supervisório para encontrar a função erro representada pela equação AIII.1. A partir do gráfico da Figura AIII.1 foi possível chegar a essa função e a pressão corrigida é dada pela equação AIII.2

$$E = -8.10^{-7} P_{\text{supervisório}}^2 - 0,0023 P_{\text{supervisório}} - 0,0005 \quad (\text{AIII.1})$$

$$P_{\text{corrigida}} = P_{\text{supervisório}} - E \quad (\text{AIII.2})$$

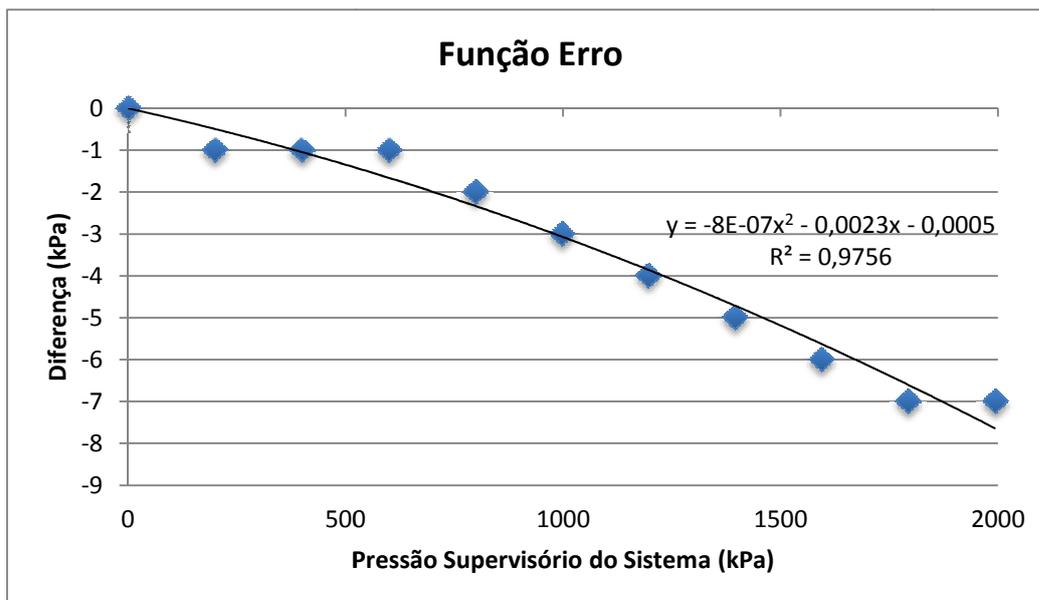


Figura AIII.1 – Gráfico para cálculo da função erro utilizada na aferição de pressões

AIII.2. Calibração da corrente fornecida pela CaC

A aferição da corrente fornecida pela CaC foi feita comparando-se os valores de corrente medidos em transdutores de corrente (TCs) e a leitura em um amperímetro de ferro móvel analógico. O sinal dos TCs são lidos no supervisor do sistema.

Para determinação da função erro foi construído o gráfico (Diferença de leitura versus corrente registrada no supervisor) apresentado na Figura AIII.2. Obteve-se a função erro, equação AIII.3, para a corrente e a os valores para a corrente corrigida, calculada pela equação AIII.4, encontram-se na Tabela AIII.2.

$$E = -0,0015 I_{CaC}^2 + 0,0649 I_{CaC} + 0,1003 \quad (\text{AIII.3})$$

$$I_{\text{corrigida}} = I_{CaC} - E \quad (\text{AIII.4})$$

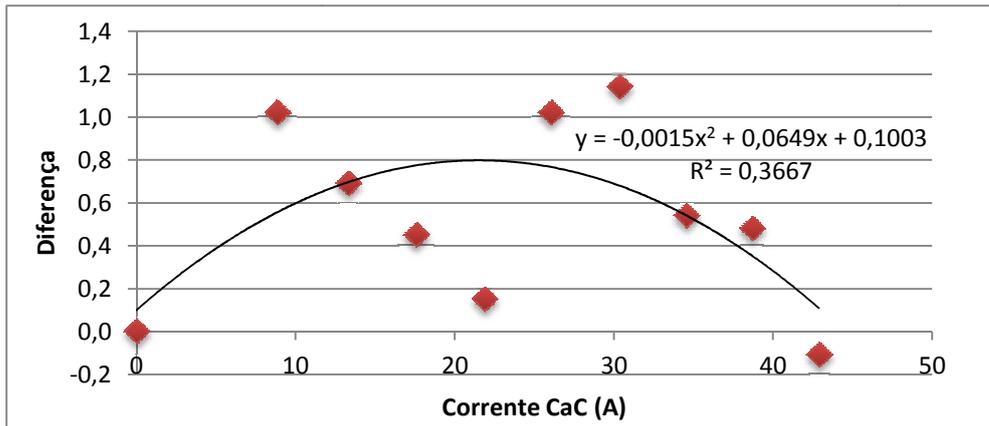


Figura AIII.2 - Determinação da função de erro para a corrente fornecida pela CaC.

Observa-se que a equação descrita acima apresenta uma grande dispersão, isso se deve a imprecisão que há na leitura da corrente no amperímetro analógico. A Figura AIII.3 mostra a comparação feita entre a corrente corrigida e a medida pelo TC (sistema supervisorio).

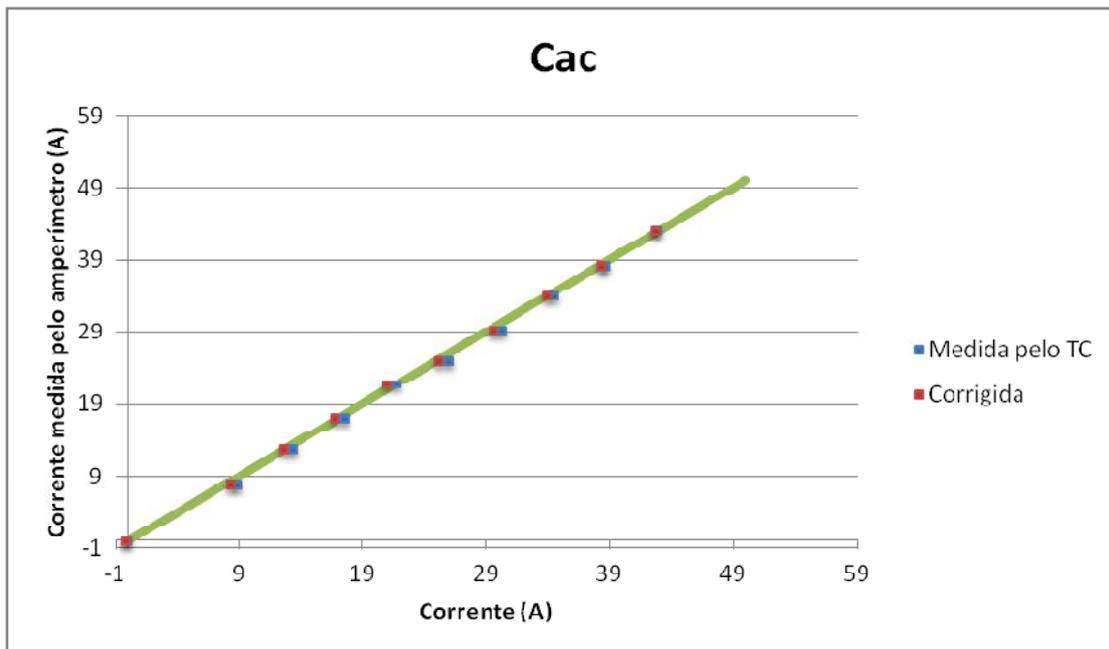


Figura AIII.3 - Comparação da corrente medida pelo TC e pela corrigida

Tabela AIII.2 - Aferição das correntes (em Amperes), da Célula a Combustível

Corrente (amperímetro)	Corrente (TC)	Diferença	Função erro	Corrente corrigida
0	0	0	0,100	-0,100

7,8	8,82	1,02	0,556	8,264
12,6	13,29	0,69	0,698	12,592
17,1	17,55	0,45	0,777	16,773
21,7	21,85	0,15	0,802	21,048
25,0	26,02	1,02	0,773	25,247
29,2	30,34	1,14	0,689	29,651
34,0	34,54	0,54	0,552	33,988
38,2	38,68	0,48	0,366	38,314
43,0	42,89	-0,11	0,125	42,765

AIII.3. Calibração da tensão

A aferição da tensão foi feita comparando-se os valores de tensão registrados no com os valores lidos em um voltímetro Fluke modelo 77.

Para determinação da função erro foi construído o gráfico (Diferença de leitura versus x tensão registrada no supervisorio) apresentado na Figura AIII.4. Obteve-se a função erro, equação AIII.5, para a tensão e os valores para a tensão corrigida, calculada pela equação AIII.6, encontram-se na Tabela AIII.3.

$$E = -0,0079 V_{\text{supervisorio}}^2 + 0,6859 V_{\text{supervisorio}} - 14,592 \quad (\text{AIII.5})$$

$$V_{\text{corrigida}} = V_{\text{supervisorio}} - E \quad (\text{AIII.6})$$

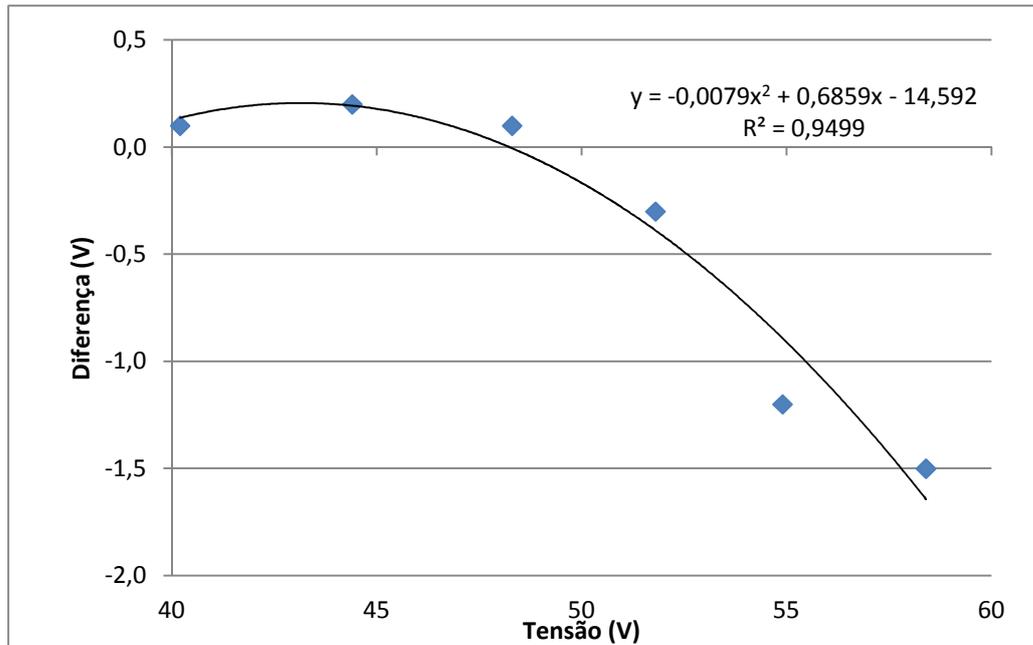


Figura AIII.4 - Determinação da função de erro para a tensão fornecida pela CaC.

Tabela AIII.3 - Aferição das tensões (em Volts) da Célula a Combustível

Tensão (voltímetro)	Supervisório	Diferença	Função erro	Tensão corrigida
40,10	40,20	0,10	0,21	39,99
44,20	44,40	0,20	0,29	44,11
48,20	48,30	0,10	0,11	48,19
52,10	51,80	-0,30	-0,26	52,06
56,10	54,90	-1,20	-0,75	55,65
59,90	58,40	-1,50	-1,48	59,88

O consumo específico da CaC foi calculado pela equação AIII.7:

$$\text{Consumo esq} = \frac{P}{v} \quad (\text{AIII.7})$$

Onde P é a potência elétrica fornecida pela CaC e v é a vazão de hidrogênio

AIII.4. **Calibração da corrente do inversor**

Para determinação da função erro da corrente do inversor, equação AIII.8, foi construído o gráfico apresentado na Figura AIII.5 (Diferença de leitura no amperímetro analógico versus corrente registrada no TC supervisório). Os dados para construção da Figura AIII.5 encontram-se na Tabela AIII.4.

$$E = -0,0015 I_{inv}^2 + 0,0746 I_{inv} + 0,1051 \quad (\text{AIII.8})$$

$$I_{corrigida} = I_{inv} - E \quad (\text{AIII.9})$$

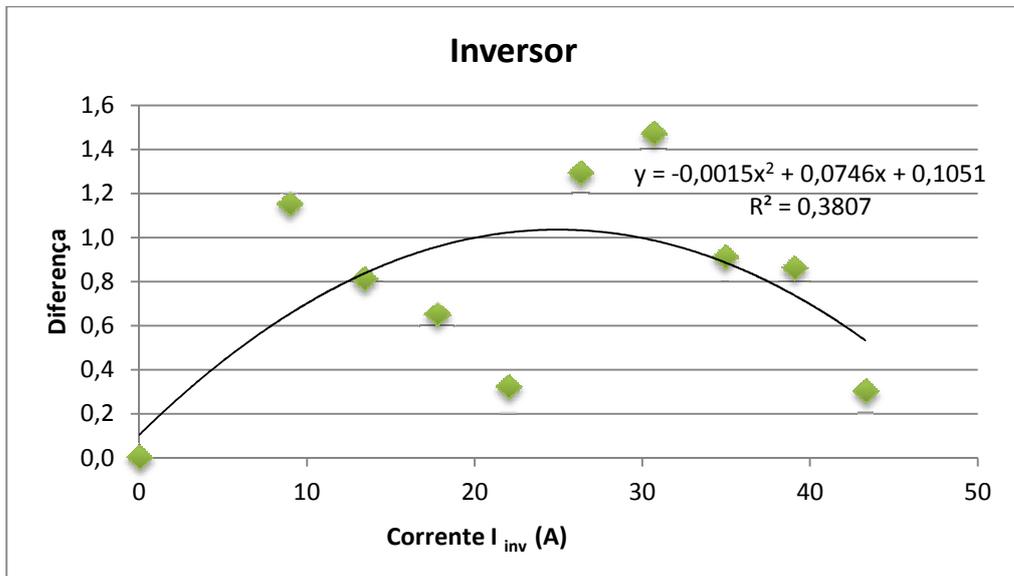


Figura A.III.5 - Determinação da função de erro para a corrente fornecida pelo inversor.

Observa-se que a equação descrita acima apresenta uma grande dispersão, isso se deve à imprecisão que há na leitura da corrente no amperímetro analógico. A Figura A.III.6 mostra a comparação feita entre a corrente corrigida e a medida pelo TC (supervisório).

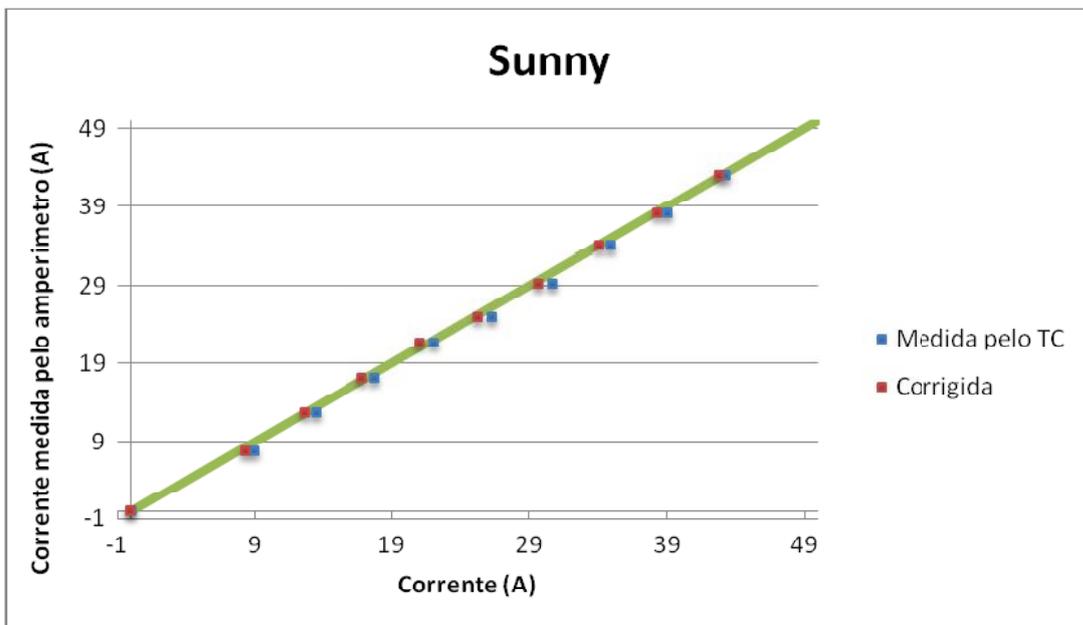


Figura AIII.6 - Comparação da corrente medida pelo TC e pela corrigida

Tabela AIII.4 - Aferição das correntes (em Amperes), do inversor

Corrente Amperímetro)	Corrente (TC)	Diferença	Função erro	Corrente corrigida
0	0	0	0,105	-0,105
7,8	8,95	1,15	0,653	8,297
12,6	13,41	0,81	0,836	12,574
17,1	17,75	0,65	0,957	16,793
21,7	22,02	0,32	1,020	21,000
25,0	26,29	1,29	1,030	25,260
29,2	30,67	1,47	0,982	29,687
34,0	34,91	0,91	0,881	34,029
38,2	39,06	0,86	0,730	38,330
43,0	43,30	0,30	0,523	42,777

AIII.5.**Calibração da corrente fornecida pela bateria**

A aferição da corrente fornecida pela bateria foi feita comparando-se os valores de corrente medidos em transdutores de corrente (TCs) e a leitura em um amperímetro de ferro móvel analógico. O sinal dos TCs são lidos no supervisório do sistema.

Para determinação da função erro foi construído o gráfico (Diferença de leitura versus corrente registrada no supervisório) apresentado na Figura AIII.7. Obteve-se as Equação AIII.10 e Equação AIII.11 correspondentes respectivamente a função erro e corrente corrigida.

$$E = 0,0018 I_{\text{Bateria}}^2 + 0,0659 I_{\text{Bateria}} - 0,1188 \quad (\text{AIII.10})$$

$$I_{\text{corrigida}} = I_{\text{Bateria}} - E \quad (\text{AIII.11})$$

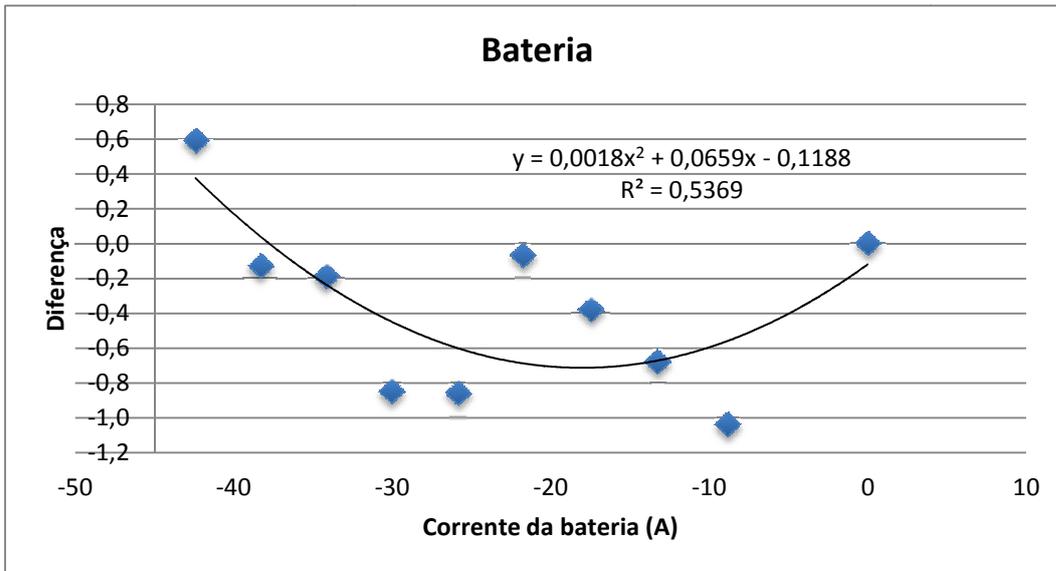


Figura AIII.7 - Determinação da função de erro para a corrente fornecida pela bateria.

Observa-se que a equação descrita acima apresenta uma grande dispersão, isso se deve a imprecisão que há na leitura da corrente no amperímetro analógico. A Figura AIII.8 mostra a comparação feita entre a corrente corrigida e a medida pelo TC (sistema supervisorio).

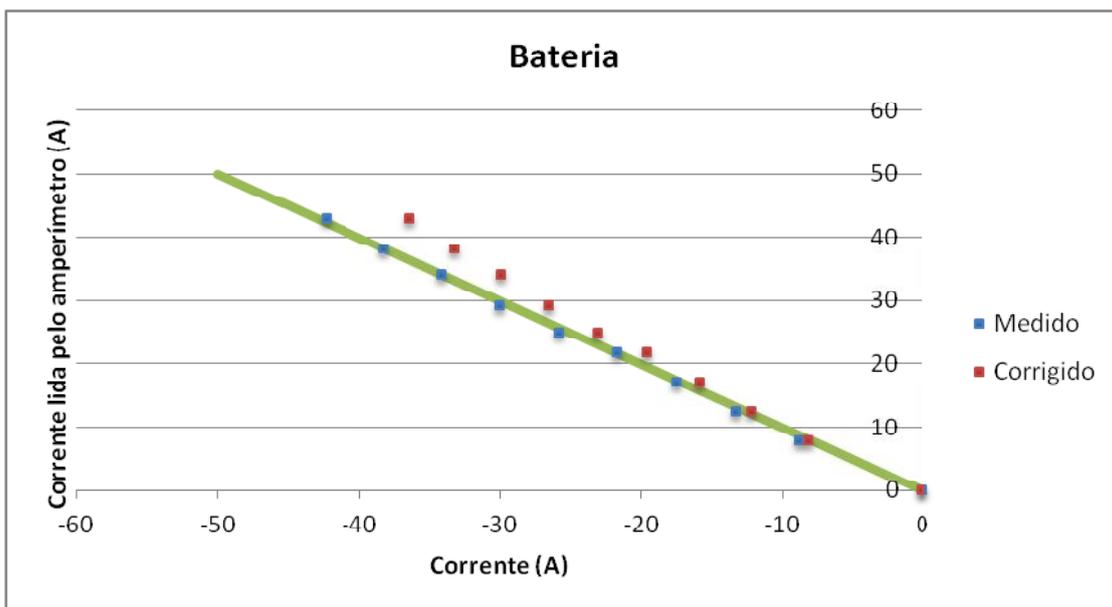


Figura AIII.8 - Comparação da corrente medida pelo TC e pela corrigida

A aferição da tensão foi feita comparando-se os valores de tensão registrados no supervisorio com os valores lidos em um voltímetro Fluke modelo 77.

Para determinação da função erro foi construído o gráfico (Diferença de leitura versus x tensão registrada no supervisor) apresentado na Figura AIII.9. Obteve-se a Equação AIII.12 correspondente a função erro e a Equação AIII.13 correspondente a tensão corrigida.

$$E = -0,0079 V_{\text{supervisor}}^2 + 0,6859 V_{\text{supervisor}} - 14,592 \quad (\text{AIII.12})$$

$$V_{\text{corrigida}} = V_{\text{supervisor}} - E \quad (\text{AIII.13})$$

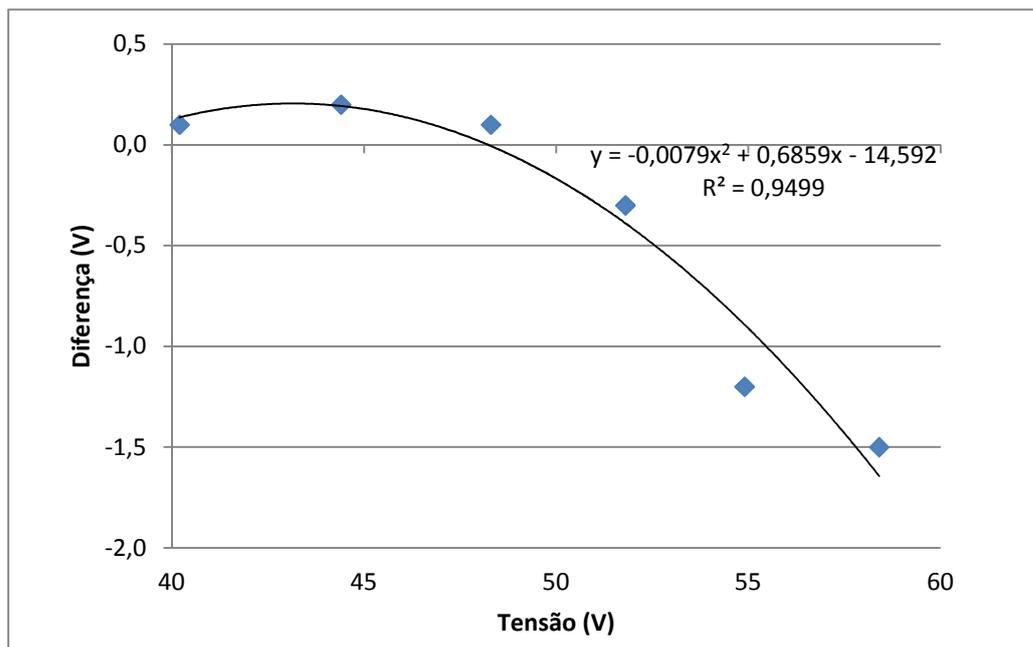


Figura AIII.9 - Determinação da função de erro para a tensão

Anexo IV Simulador

Existe um CD anexado com o arquivo do simulador feito nessa dissertação.