

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Thomás Francisco Branco Sued**

**Avaliação do uso de eletrolisador em  
sistemas de armazenamento de energia**

**Projeto de graduação**

Projeto de graduação apresentado ao Departamento de  
Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Sergio Leal Braga.

Rio de Janeiro,  
Dezembro de 2017

## **AGRADECIMENTOS**

A realização deste projeto aconteceu devido a presença e suporte de pessoas muito queridas. Agradeço a minha família, pelo apoio incondicional ao longo de toda minha vida. Ao meu orientador, Sergio Leal Braga, por ter me concedido a oportunidade de conhecer e aprender mais sobre um assunto de interesse, além de todo suporte oferecido. Agradeço aos meus amigos, por todos os momentos que passamos juntos.

## **RESUMO**

### **Avaliação do uso de eletrolisadores em sistemas de armazenamento de energia.**

Através de um projeto de pesquisa patrocinado, a PUC-Rio desenvolveu o “Sistema Integrado de Fornecimento de Energia Elétrica” que tem por objetivo fornecer energia elétrica a um consumidor de perfil definido por meio do armazenamento de hidrogênio comprimido, obtido pela reforma do etanol, que depois se transformará em energia elétrica a partir de células a combustível. O sistema conta ainda com armazenamento em baterias e a geração de energia através de painéis fotovoltaicos. O armazenamento de hidrogênio surge hoje como uma possibilidade para as energias renováveis, que possuem dificuldade de armazenamento em larga escala, devido a problemas associados ao uso das baterias, como preço, descarte etc. Com isso, a oportunidade de poder armazenar a energia em forma de hidrogênio é vista como uma alternativa possível, no futuro, para resolver problemas pontuais para a energia mundial. O objetivo deste projeto foi analisar se o eletrolisador é uma alternativa viável para substituir o reformador de etanol, verificando suas vantagens e desvantagens. Com o intuito de diminuir o consumo e aumentar a produção, o eletrolisador foi visto como uma solução por não possuir tempo de aquecimento e resfriamento relevante, ou seja, produzindo hidrogênio durante o tempo em que estivesse ligado e, por ter uma alta pressão de saída, eliminando a necessidade do compressor utilizado no caso base. Do ponto de vista financeiro, o eletrolisador possui um custo de mercado mais baixo que o reformador e não necessita de etanol para seu funcionamento. A simulação dos dois sistemas e seus gráficos foram feitas utilizando o Microsoft Excel com auxílio da ferramenta VBA.

Palavras chaves: Reformador. Eletrolisador. Hidrogênio. Energia elétrica. Sistema Integrado. Baterias. Célula a Combustível

## **ABSTRACT**

### **Evaluation of the use of electrolyzers in energy storage systems.**

Through a sponsored research project, PUC-Rio developed the "Integrated System for the Supply of Electric Energy", which aims to supply electricity to a consumer with defined profile, by the storage of compressed hydrogen obtained by the ethanol reform that will turn into electricity from fuel cells. The system also has storage in batteries and the generation of energy through photovoltaic panels. Hydrogen storage today appears as a possibility for renewables, which have large storage difficulties, much due to the price of batteries commercially. With this, the opportunity to be able to store energy in the form of hydrogen is seen as a possible future for world energy. The project should examine whether the electrolyser is a viable alternative for the ethanol reformer, checking their advantages and disadvantages. In order to reduce consumption and increase production, the electrolyser was seen as a solution because it did not have the relevant heating and cooling time, that is, it produces hydrogen during the time it was connected and, because it had a high output pressure, eliminating the need for the compressor. The simulation of the systems and their graphs were done using Microsoft Excel with the aid of the VBA tool.

**Keywords:** Reformer. Electrolyzer. Hydrogen. Electricity. Integrated system. Batteries. Fuel Cell

## Sumário

<b>1.</b>		
	<b>Introdução.....</b>	<b>12</b>
<b>2.</b>	<b>Motivação e objetivos.....</b>	<b>14</b>
<b>3.</b>	<b>Sistema Integrado de Fornecimento de Energia Elétrica a Sistemas Isolados da Rede.....</b>	<b>15</b>
<b>4.</b>	<b>Componentes do sistema.....</b>	<b>18</b>
4.1	Painéis fotovoltaicos.....	19
4.2	Célula a combustível.....	21
4.3	Banco de baterias.....	23
4.4	Inversor.....	24
4.5	Eletrolisador.....	25
4.6	Reformador de etanol.....	28
4.7	Compressor e armazenamento de hidrogênio.....	30
4.8	SIGFI 45.....	32
<b>5.</b>	<b>Resultados e comentários.....</b>	<b>33</b>
<b>5.1</b>	<b>Eletrolisador.....</b>	<b>33</b>
5.1.1	Horário de otimização.....	33
5.1.2	Eficiência Eletrolisador.....	38
5.1.3	Eficiência CaC.....	39
5.1.4	Eficiência Baterias.....	40

5.1.5 Eficiência Global.....	41
<b>5.2 Reformador de etanol.....</b>	<b>42</b>
5.2.1 Horário de otimização.....	42
5.2.2 Eficiência Reformador.....	46
5.2.3 Eficiência CaC.....	47
5.2.4 Eficiência Baterias.....	48
5.2.5 Eficiência Global.....	49
<b>6. Eletrolisador x Reformador de etanol.....</b>	<b>51</b>
6.1 Balanço energético.....	51
6.2 Balanço financeiro.....	55
<b>7. Conclusão.....</b>	<b>57</b>
Referências bibliográficas.....	59

## Lista de Figuras

Figura 3.1 Diagrama de blocos com ligações e conexões entre os equipamentos na configuração final do projeto. [2].....	14
Figura 3.2 Diagrama de blocos com ligações e conexões entre os equipamentos com a adição do eletrolisador. Elaboração própria.....	15
Figura 4.1 Concepção do Sistema Integrado conforme submetido na proposta de projeto.[2].....	16
Figura 4.2 Crescimento da atividade de renováveis no Brasil nos últimos anos.....	18
Figura 4.3 Variação da potência gerada pelos painéis fotovoltaicos em dias sem nuvens, parcialmente nublados e nublados. Baseado em testes experimentais.....	19
Figura 4.4 Princípio básico de funcionamento de uma CaC do tipo PEM utilizando o hidrogênio para produção de energia elétrica. [5].....	20
Figura 4.5 Célula a combustível modelo E-2200x da Reli-On (24/48 V, 2,2 kW). [2].....	21
Figura 4.6 Sistema empregado para eletrólise da água. Retirado de Longo et al 2008. pág 8 [9].....	24
Figura 4.7 Reformador Helbio .....	27
Figura 4.8 Reformador Helbio com seus tanque de alimentação de etanol e água. ....	28
Figura 4.9 Compressor e cilindros de armazenamento de hidrogênio...30	
Figura 4.10 Perfil de consumo do SIGFI.....	30
Figura 5.1 Variação da pressão final dos cilindros nos três estados de clima possível. ....	33
Figura 5.2 Estado de carga nas baterias em função do horário nos três estados de clima possível.....	34
Figura 5.3 Variação da potência do eletrolisador em função do tempo por sete dias.....	36

Figura 5.4 Variação da potência da CaC em função do tempo por sete dias.....	36
Figura 5.5 Variação da potência das baterias em função do tempo por sete dias.....	37
Figura 5.6 Variação da carga fotovoltaica em função do tempo durante os sete dias.....	37
Figura 5.7 Variação da carga consumida pelo SIGFI em função do tempo durante os sete dias.....	38
Figura 5.8 Variação da pressão final dos cilindros nos três estados de clima.....	39
Figura 5.9 Estado de carga nas baterias em função do horário nos três estados de clima possível.....	39
Figura 5.10 Variação da potência do reformador em função do tempo por sete dias.....	41
Figura 5.11 Variação da potência da CaC em função do tempo por sete dias.....	42
Figura 5.12 Variação da potência das baterias em função do tempo por sete dias.....	44
Figura 5.13 Variação da carga fotovoltaica em função do tempo durante os sete dias.....	45
Figura 5.14 Variação da carga consumida pelo SIGFI em função do tempo durante os sete dias.....	46
Figura 5.15 Variação da potência de etanol consumida pelo SIGFI em função do tempo durante os sete dias.....	47
Figura 5.16 Variação da carga fotovoltaica em função do tempo durante os sete dias.....	47
Figura 5.17 Variação da carga consumida pelo SIGFI em função do tempo durante os sete dias.....	48
Figura 5.18 Variação da potência de etanol consumida pelo SIGFI em função do tempo durante os sete dias.....	50

Figura 6.1 Pressão de H<sub>2</sub> nos cilindros em função do horário com o eletrolisador e reformador em um dia sem nuvens.....50

Figura 6.2 Estado de carga das baterias em função do horário com o eletrolisador e reformador em um dia sem nuvens.....51

## Lista de Tabelas

Tabela 4.1	Dados dos eletrolisadores considerados para o projeto.....	25
Tabela 4.2	Data Sheet Acta EL250.....	26
Tabela 5.1	Dados de otimização do eletrolisador.....	32
Tabela 5.2	Dados dos componentes do sistema em função do estado de clima no eletrolisador. Elaboração própria.....	35
Tabela 5.3	Dados otimizados durante a semana. Elaboração própria.....	36
Tabela 5.4	Dados de entrada de otimização do reformador de etanol....	40
Tabela 5.5	Dados de consumo durante a reforma do etanol.....	41
Tabela 5.6	Dados dos componentes do sistema em função do estado de clima no reformador. Elaboração própria.....	43
Tabela 5.7	Dados otimizados durante a semana. Elaboração própria.....	44
Tabela 6.1	Comparação dados do eletrolisador Acta EL250 e do reformador de etanol Helbio.....	49
Tabela 6.2	Horários de otimização do eletrolisador e reformador de etanol.....	49
Tabela 6.3	Consumo e produção de energia nos componentes do sistema.....	52
Tabela 6.4	Eficiência sistema com eletrolisador e com reformador .....	52
Tabela 6.5	Dados gerais painéis fotovoltaicos.....	53
Tabela 6.6	Tabela de preços com relação aos componentes do sistema.....	53

## Lista de Símbolos

$P_{SIGFI}$	Potência consumida pelo SIGFI	W
$P_{PV}$	Potência fornecida pelos painéis fotovoltaicos	W
$P_{Bat\_}$	Potência consumida pelas baterias	W
$P_{Bat\_+}$	Potência fornecida pelas baterias	W
$P_{CaC\_+}$	Potência fornecida pela CaC	W
$P_{CaC\_}$	Potência consumida pela CaC	W
$P_{elet\_}$	Potência consumida pelo eletrolisador	W
$P_{elet\_+}$	Potência fornecida pelo eletrolisador	W
$P_{ref\_+}$	Potência fornecida pelo reformador	W
$P_{ref\_}$	Potência consumida pelo reformador	W
$P_{etanol}$	Potência fornecida pelo etanol	W

## 1. Introdução

A revolução industrial e a utilização intensiva dos combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) estão associadas ao elevado nível de vida das sociedades ocidentais. Contudo, as reservas de combustível fóssil não são ilimitadas e a sua utilização tem impactos ambientais consideráveis, entre estes o aumento do efeito estufa e as consequentes alterações do clima.

O aumento do consumo de energia incrementou o esgotamento das reservas mundiais de recursos naturais energéticos. Com o crescimento da população e da industrialização, o sistema de energia mundial passou a depender em grande parte dos recursos naturais.

Atualmente, enfrentamos um novo desafio em termos energéticos, que se traduz por uma transição para fontes de energia renováveis e menos poluentes. Neste contexto, o hidrogênio ( $H_2$ ) surge como uma alternativa válida, dado que é o elemento mais abundante no universo e a sua combustão direta produz uma quantidade significativa de energia, liberando apenas água. Nos últimos anos, as várias técnicas de produção de hidrogênio têm gerado grande interesse da comunidade científica e das indústrias de combustíveis e de transportes.

A sua obtenção é bastante flexível, sendo esta uma de suas características mais interessantes. Pode ser obtido a partir de energia elétrica, pelas fontes: hidroelétricas, geotérmicas, eólica e solar fotovoltaica, todas geológicas, e também da eletricidade de usinas nucleares. As fontes de hidrogênio mais viáveis economicamente são, entretanto, os combustíveis fósseis (via reforma catalítica ou gaseificação, seguido de purificação), como: petróleo, carvão e principalmente o gás natural.

Embora seja o elemento mais abundante do universo e com grande potencial energético, o hidrogênio não é encontrado na natureza de forma

pura e isolada, como o petróleo. Para extraí-lo faz-se necessário o uso de energia, e esse é o primeiro grande desafio: descobrir qual é o processo de extração mais eficiente do hidrogênio e como fazê-lo sem a emissão de gases prejudiciais ao planeta.

Neste projeto será avaliado se, no Sistema Integrado de Fornecimento de Energia Elétrica, descrito mais adiante, a eletrólise da água seria uma forma mais viável para obtenção de hidrogênio do que a reforma do etanol. Utilizando os mesmos componentes do Sistema Integrado de Fornecimento de Energia Elétrica através do uso de Células a Combustível, um dos seus componentes, o reformador de etanol, será substituído por um eletrolisador e serão realizadas todas as adaptações necessárias para essa operação. Com os resultados, a partir do programa Microsoft Excel, será verificado qual a melhor alternativa comercial para este Sistema.

## 2. Objetivos e motivações

Os avanços tecnológicos que ocorrem diariamente crescem numa proporção considerada exponencial. Da mesma forma que criam facilidades e mudam a vida de muitos indivíduos, estes avanços causam efeitos indesejáveis, não apenas na vida das pessoas, ao substituir o trabalho humano por aquele automatizado, mas também na degradação do meio ambiente.

Um dos principais fenômenos que ocorrem atualmente é o aquecimento global. As principais evidências deste processo são o aumento da temperatura do ar e oceanos, o degelo, e catástrofes diversas, que são potencializadas pelo aumento de temperatura, como tufões, ciclones e furacões.

O gás metano, por exemplo, é um dos maiores causadores do aquecimento global. Uma molécula de metano ( $\text{CH}_4$ ) é 23 vezes mais eficaz para absorver o calor e, portanto, 23 vezes mais preocupante do que uma molécula de  $\text{CO}_2$  [1]. Estudos sobre o assunto crescem e, hoje, o Japão, entre outros, desenvolve uma célula a combustível que transforma o gás metano em energia elétrica, com largo uso residencial.

O passo político mais significativo para controlar as emissões desses gases foi dado no protocolo de Kyoto, que estabeleceu políticas e/ou práticas que podem contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Embora este pacto estabeleça o padrão em caráter internacional, o mesmo não foi oficialmente adotado nos EUA. Apesar disso, ele é usado como guia para controle das emissões de  $\text{CO}_2$ .

Diante dos problemas enfrentados, o hidrogênio surge como uma possibilidade real de armazenamento para futura conversão em energia. O objetivo do trabalho trata de verificar se, para um consumidor de perfil específico, o eletrolisador é uma opção mais viável que o reformador de etanol no Sistema Integrado de Fornecimento de Energia Elétrica através do uso de Células a Combustível, descrito a seguir.

### **3. Sistema Integrado de Fornecimento de Energia Elétrica a Sistemas Isolados da Rede**

O Sistema Integrado de Fornecimento de Energia Elétrica a Sistemas Isolados da Rede é um projeto de pesquisa realizado na PUC-Rio, com patrocínio da empresa Guascor.

Fizeram parte da equipe do projeto pesquisadores, técnicos e bolsistas da PUC (entidade executora do projeto) e pesquisadores consultores na forma de prestação de serviços. A PUC contratou o Coordenador Técnico do projeto que respondeu ao Coordenador Geral do projeto. Os integrantes da equipe de projeto encontram-se nominados a seguir.

- Prof. Dr. Sergio Leal Braga – PUC, Coordenador Geral
- Dr. Eduardo Torres Serra – ES+PS Consultoria, Coordenador Técnico
- Dr. Epifanio Mamani Ticona – PUC, Pesquisador
- Dr. José Geraldo de Melo Furtado, Pesquisador Consultor
- Dr. Francisco da Costa Lopes, Pesquisador Consultor
- Dr. Fabio Bellot Noronha, Pesquisador Consultor
- Eng<sup>o</sup>. MSc. Nestor Correa Cotelô - PUC, Pesquisador
- Eng<sup>o</sup>. Severino Antônio de Souza Wanderley - PUC, Pesquisador
- Eng<sup>a</sup>. Anna Camila Sousa e Silva -PUC, bolsista de mestrado
- Eng<sup>o</sup>. Adriano da Costa Rodrigues - PUC, bolsista de mestrado

O projeto se enquadra no segmento de geração de energia elétrica como pesquisa aplicada e desenvolvimento experimental com aplicação na geração distribuída através de fontes alternativas de geração visando ao atendimento de sistemas isolados.

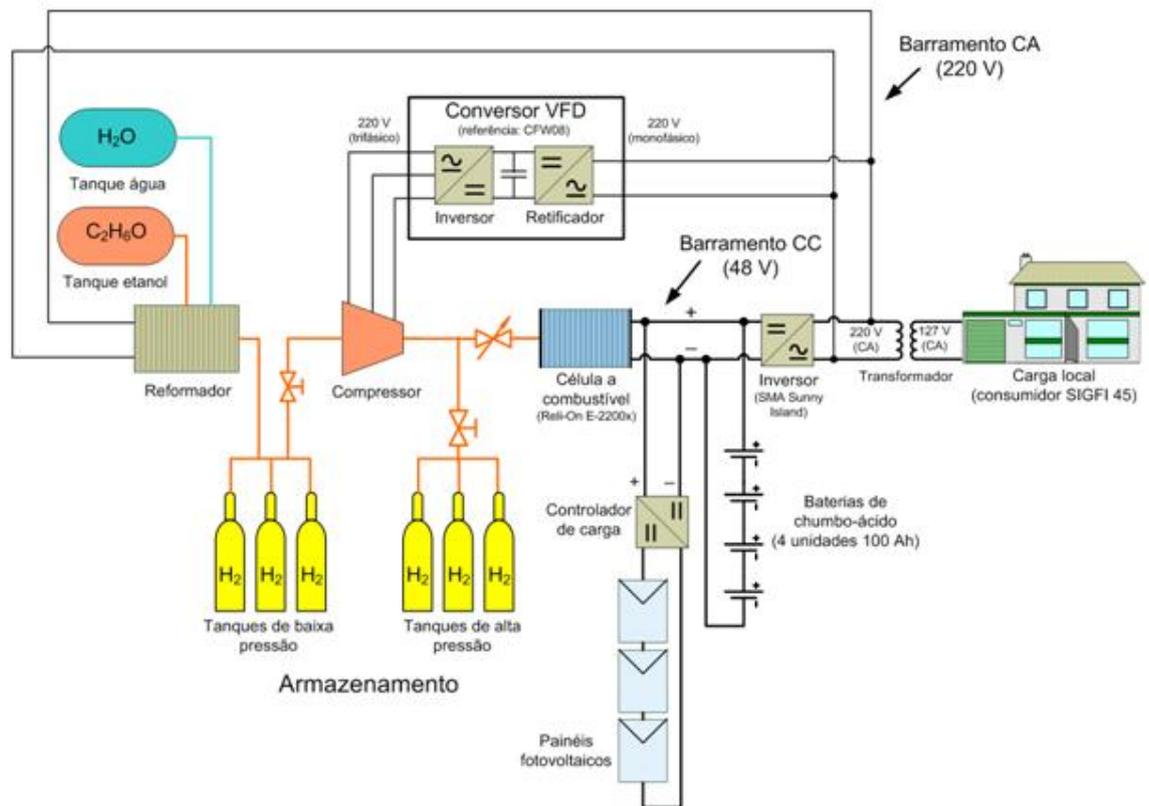


Figura 3.1 Diagrama de blocos com ligações e conexões entre os equipamentos na configuração final do projeto. [2]

A figura 3.1 explica o funcionamento do Sistema Integrado de Fornecimento de Energia Elétrica a Sistemas Isolados da Rede. Os painéis fotovoltaicos recebem a energia solar e enviam a energia, depois de passar pelo controlador de carga, ao consumidor. Caso o consumidor não demande por energia no momento, esta é enviada às baterias. O reformador é ligado e recebe energia dos painéis fotovoltaicos. Se a energia não for suficiente, a CaC produz energia elétrica a partir do hidrogênio dos tanques de alta pressão para, desta maneira, suprir a demanda energética do reformador. O reformador produz hidrogênio a partir da entrada de água e etanol, que segue aos tanques de baixa pressão, sendo pressurizados no compressor para os tanques de alta pressão.

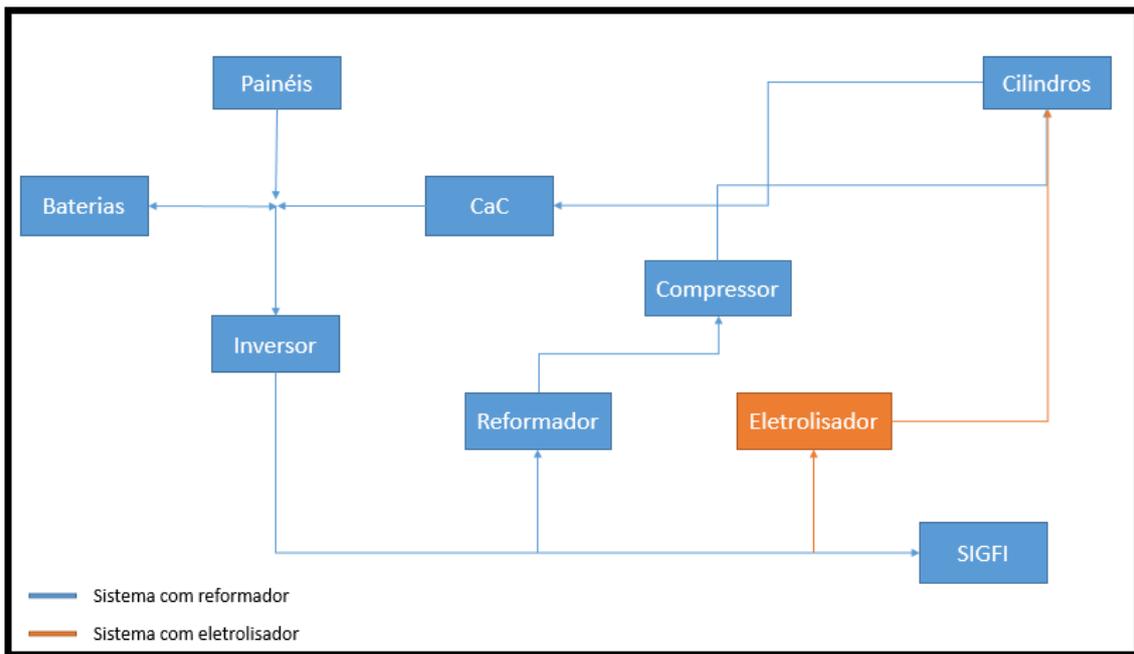


Figura 3.2 Diagrama de blocos com ligações e conexões entre os equipamentos com a adição do eletrolisador. Elaboração própria.

A figura 3.2 apresenta o Sistema Integrado de Fornecimento de Energia Elétrica a Sistemas Isolados da Rede com a presença do eletrolisador no lugar do reformador e compressor. A energia dos painéis fotovoltaicos segue em direção ao inversor e depois diretamente ao consumidor SIGFI. Caso o consumidor não apresente demanda ao momento, a energia é direcionada às baterias. O eletrolisador demanda energia quando começa a produzir hidrogênio e, quando os painéis fotovoltaicos não são suficientes para alimentar o eletrolisador, a CaC é ligada para produção de energia elétrica a partir do hidrogênio proveniente dos cilindros.

#### 4. Componentes do sistema

Neste capítulo, será discutido como funciona cada elemento do Sistema Integrado de Fornecimento de Energia Elétrica através do Uso de Células a Combustível. O objetivo é discorrer sobre cada um dos componentes que são imprescindíveis para o funcionamento do sistema.

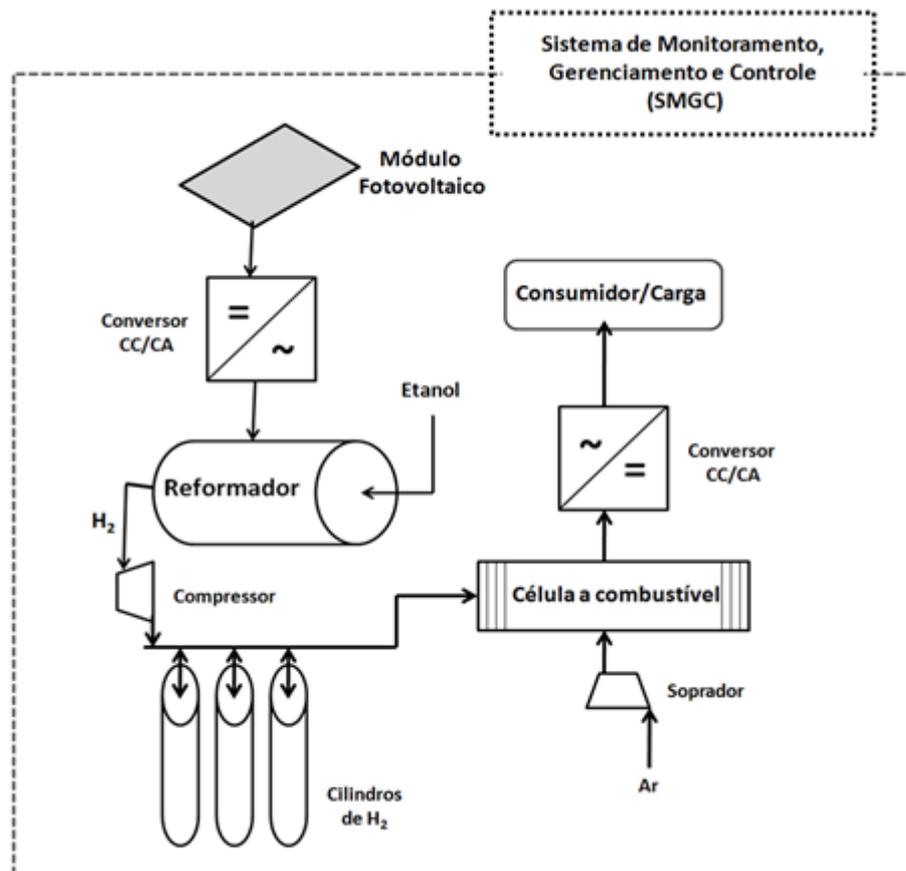


Figura 4.1 Concepção do Sistema Integrado conforme submetido na proposta de projeto. [2]

A figura mostra a energia vindo diretamente dos painéis fotovoltaicos, passando pelo inversor de frequência em direção ao consumidor. Sem a demanda do consumidor, os painéis fotovoltaicos alimentam o banco de baterias, armazenando a energia. O eletrolisador, no momento em que é ligado, começa a demandar energia para separar o hidrogênio do oxigênio. A CaC funciona apenas quando é requisitada a energia elétrica que os painéis fotovoltaicos não conseguem abastecer

transformando a energia química do hidrogênio, presente nos cilindros, em energia elétrica.

#### **4.1 Painéis Fotovoltaicos**

A energia do sol pode ser convertida de diferentes maneiras para formatos conhecidos, como por exemplo, a biomassa (fotossíntese), energia hidráulica (evaporação) e a fotovoltaica, que contém imensa quantidade de energia e que são capazes de se regenerar por meios naturais.

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 por Edmond Becquerel que verificou que placas metálicas, de platina ou prata, mergulhadas num eletrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz. Mais tarde, em 1877, dois inventores norte americanos, W. G. Adams e R. E. Day, utilizaram as propriedades fotocondutoras do selênio para desenvolver o primeiro dispositivo sólido de produção de eletricidade por exposição à luz. A primeira publicação ocorreu apenas em 1954.

No final do século passado, o problema que os governos enfrentavam quanto ao uso e financiamento de pesquisas de renováveis era o preço alto. A Alemanha foi uma das pioneiras no processo de incentivos aos painéis fotovoltaicos e fez com que a indústria crescesse exponencialmente no fim dos anos 90 e início do século. [3]

Os sistemas fotovoltaicos, sozinhos ou em associação com outras renováveis, são já competitivos para alimentação de certos locais remotos onde as soluções alternativas convencionais – gerador diesel ou rede elétrica – são claramente inferiores do ponto de vista econômico e apresentam inconvenientes ambientais não negligenciáveis.

O uso de energia solar no Brasil ainda está numa fase pouco avançada em relação aos outros países. Nos últimos anos, os custos de instalação de painéis fotovoltaicos caíram no mundo, o que provocou um

aumento considerável na quantidade de sistemas instalados. No Brasil, o impacto é menor devido a elevada carga tributária e a escassez do crédito, onde os bancos privados, em geral, limitam-se a financiar iniciativa de pessoas físicas, mas a juros altos. [4]

#### Capacidade Instalada Acumulada de Micro e Minigeração Distribuída no Brasil

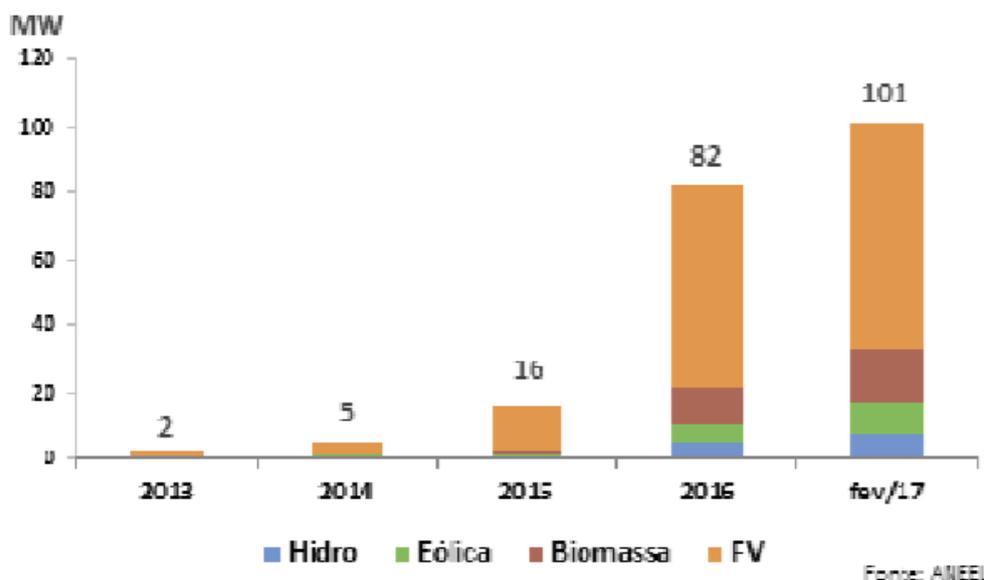


Figura 4.2 Crescimento da atividade de renováveis no Brasil nos últimos anos.

Na figura 4.2 verifica-se que, apesar das dificuldades apresentadas em território nacional, as fontes de energia renováveis crescem continuamente no Brasil.

O rendimento dos painéis fotovoltaicos depende de diversos fatores como: radiação solar, temperatura do ambiente, direção e velocidade do vento, composição e montagem do painel. O painel solar do projeto em questão utilizou dados reais de um painel instalado pela PUC-Rio no Museu de Energia da Light.

A função dos painéis fotovoltaicos no sistema será de contribuir com energia elétrica para o funcionamento do sistema, abastecendo o banco de baterias.

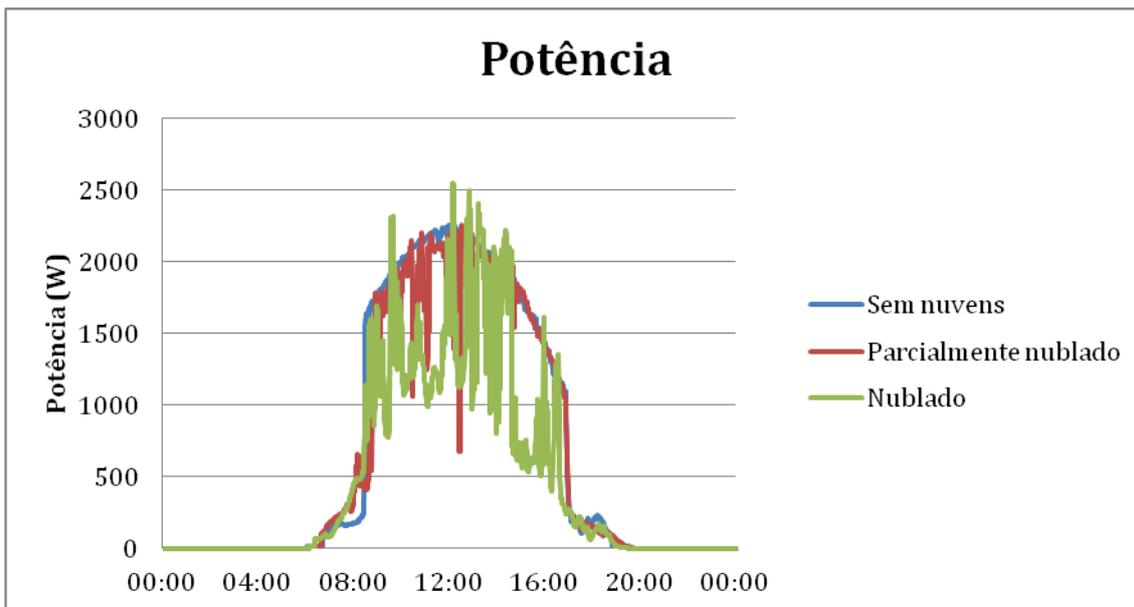


Figura 4.3 Variação da potência gerada por 10 painéis fotovoltaicos em dias sem nuvens, parcialmente nublados e nublados. Baseado em testes experimentais.

No projeto foram utilizados dois painéis fotovoltaicos de silício policristalino, modelo YL245P-29b, com potência nominal máxima de 245 W, fabricado pela Yingli Energia e um painel fotovoltaico monocristalino SV250D20M, com potência máxima nominal de 250 W, fabricado pela Tecnometal DYA Energia Solar.

## 4.2 Célula a combustível

Uma célula a combustível pode ser definida como uma célula eletroquímica que transforma continuamente a energia química em energia elétrica, desde que lhe seja fornecido o combustível e o oxidante. O combustível é o hidrogênio ou um composto que o tenha na sua constituição, e o oxidante é o oxigênio. [7]

Fatores econômicos influenciam o retardamento dessa tecnologia. Entre eles, o custo relativamente baixo da gasolina. Na primeira década do século XX, 35% de todos os veículos registrados nos Estados Unidos eram movidos à eletricidade. Em Londres existiam dez mil carros elétricos. Este modelo foi abandonado quando o industrial norte-

americano Henry Ford (1863-1947) implementou a primeira linha de montagem para os motores a combustão interna, em 1913. [6]

Uma célula a combustível é constituída por dois elétrodos e entre os dois um eletrólito. A função do eletrólito é de atuar como um meio que permite aos íons ( $H^+$ ,  $OH^-$ ,  $O^{2-}$ ,  $CO_2$ , ...) passarem no sentido de um elétrodo para o outro elétrodo ao atravessarem o eletrólito. [5]

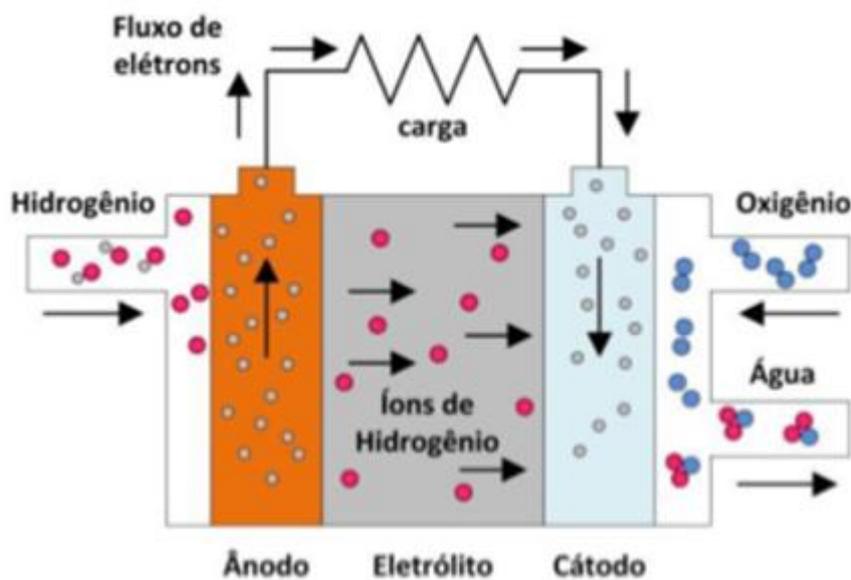


Figura 4.4 Princípio básico de funcionamento de uma CaC do tipo PEM utilizando o hidrogênio para produção de energia elétrica. [5]

O uso de células a combustível tem crescido de forma considerável, principalmente quando se trata da geração distribuída em pequena escala. Isso se deve muito devido às iniciativas públicas e privadas no mundo em busca de modelos renováveis para obtenção de energia.

Dentre as vantagens estão a sua facilidade no transporte e montagem. Caso deixem de ser necessárias no local, poderão num curto espaço de tempo ser facilmente deslocadas para outro. As células a combustível possuem alta confiabilidade e eficiência, visto que, em seu funcionamento normal gera-se uma quantidade significativa de calor que pode ser aproveitado para produzir vapor ou água quente. Como será

utilizado o hidrogênio como combustível, os subprodutos da reação serão água pura e calor, portanto não há emissões prejudiciais ao aquecimento global e camada de ozônio. Porém, mesmo quando são utilizados combustíveis fósseis, são baixas as emissões devido a seu alto rendimento.

As desvantagens estão relacionadas ao alto custo de instalação e dos materiais utilizados. Embora seja de fácil transporte e montagem, o fato da tecnologia não ser popularizada implica em uma falta de infraestrutura presente para a produção, transporte e armazenamento do hidrogênio.



Figura 4.5 Célula a combustível utilizada no projeto. Modelo E-2200x da Reli-On (24/48 V, 2,2 kW). [2]

No projeto em questão, a CaC é, na verdade, um empilhamento de células a combustível com o objetivo de transformar a energia química do hidrogênio em energia elétrica com grau de eficiência adequado.

### 4.3 Banco de baterias

Os bancos de baterias são uma das principais questões envolvendo energia renovável no mundo. A energia proveniente do sol, vento, mares, entre outros, é capaz de garantir energia para o mundo todo. Todavia, há uma grande dificuldade no armazenamento. Os bancos de baterias com alta eficiência tem um preço elevado para um armazenamento pequeno de energia. Além disso, a vida útil das baterias de lítio, consideradas mais adequadas para projetos de larga escala, gira em torno de 10 anos e seu descarte é prejudicial ao meio ambiente. Visto que os painéis fotovoltaicos têm uma durabilidade de 30 anos, torna-se um problema.

Os capacitores são uma alternativa para armazenamento de energia, porém o seu armazenamento é pequeno comparado às baterias. Todavia os capacitores podem ser carregados mais rapidamente, enquanto as baterias demoram muito tempo para carregar. Os estudos que envolvem supercapacitores vêm aumentando para tentar encontrar uma solução viável para armazenamento de energia.

O banco de baterias inseridas no presente projeto é formado por 4 baterias de chumbo ácido de 48V/100 conectada em série. As CaC fornecem energia para o banco de baterias a fim de manter o estado de carga. [2]

Além disso, o banco de baterias encontra-se conectado aos painéis fotovoltaicos que realizam o aproveitamento da radiação solar como uma fonte de energia do sistema de geração. A saída do banco de baterias está conectada ao inversor que distribui a corrente para o barramento de CA. A carga máxima do banco de baterias é de 4,8 kWh.

#### **4.4 Inversor**

Considerando que a vazão nominal máxima do reformador é de  $1 \frac{Nm^3}{h}$  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 1,2 bar. Para este propósito foi especificado, também, um transmissor de baixa pressão. [2]

O inversor exerce um papel importante na integração dos equipamentos, haja vista que existem fluxos de corrente contínua e de corrente alternada no sistema de geração conforme destacado no diagrama de blocos apresentado na Figura 4.1. Por um barramento CC, 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.

O inversor selecionado para o projeto foi o modelo Sunny Island 3.0M, com os acessórios *Sunny Remote Control* e *BatFuse*, foi fornecido pela SMA Solar Technologies AG, localizada na cidade de Niestetal, Alemanha. [2]

#### **4.5 Eletrolisador**

A eletrólise da água foi o método utilizado no corrente projeto para obtenção do hidrogênio. O processo baseia-se na entrada de água e fornecimento de energia elétrica e saída de hidrogênio e oxigênio por 2 meios distintos. Dentre todos os processos de obtenção, a eletrólise da água representa 4% da produção mundial de hidrogênio, todavia é considerado o processo de obtenção de hidrogênio de maior pureza. [7]

A corrente flui entre dois eletrodos separados e imersos em um eletrólito para aumentar a condutividade iônica. Os eletrodos devem ser

resistentes a corrosão e possuir alta condutividade elétrica. O eletrólito deve ser impedido de ter qualquer alteração durante o processo, portanto, é importante, para não reagir com os eletrodos. [7]

O processo de eletrólise requer a implementação de um separador para evitar a recombinação do hidrogênio e oxigênio gerados nos eletrodos. A resistência elétrica do diafragma evita o curto circuito dos eletrodos. No entanto, o diafragma deve ter uma alta condutividade iônica e uma alta estabilidade física e química. Os eletrodos, o diafragma e o eletrólito são os elementos que configuram a célula eletrolítica. [8]

A equação global pode ser escrita por:

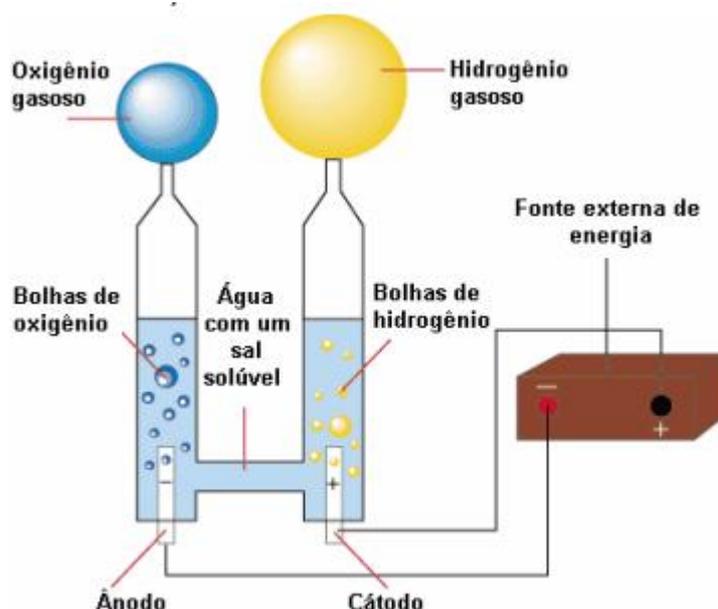
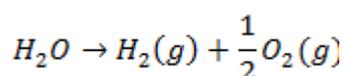


Figura 4.6 Sistema empregado para eletrólise da água. Retirado de Longo et al 2008. Pág. 8 [9]

Por possuir um tempo de resfriamento e aquecimento irrelevante, o eletrolisador possui vantagens em relação ao reformador de etanol, que no caso do projeto corrente, precisa de 3 horas para aquecimento e, 1

hora e 30 minutos para resfriamento. Enquanto isso, o eletrolisador consome energia apenas para o tempo de produção.

A escolha do eletrolisador foi feita baseada em diversos dados julgados importantes para o funcionamento do sistema referente ao perfil de consumidor a ser abastecido.

Após a pesquisa dos tipos de eletrolisador, todos os dados considerados mais importantes para o funcionamento do sistema foram colocados em uma tabela a fim de verificar qual seria o eletrolisador mais adequado para o projeto.

	Potência (W)	Consumo (KWh/min)	Produção H2(L/min)	Produção H2(kwh/min)	Pressão de saída(bar)	Produção /Consumo
Baby Piel	1800	0,03	6,67	0,018535183	1	0,617839432
Pure Energy Centre	15000	0,25	44,43	0,123465994	12	0,493863975
ITM HBOX3000	1523	0,025	3	0,008336664	15	0,33346656
Actaspa	1300	0,0217	4,167	0,011579626	30	0,533623332
Nel Hydrogen C-150	85880	1,4313	375	1,042083	30	0,728067491

Tabela 4.1 Dados dos eletrolisadores considerados para o projeto.

O Nel Hydrogen C-150 seria teoricamente o mais indicado considerando a maior produção com relação ao consumo, porém sua alta potência inviabiliza o projeto. Utilizando a mesma analogia, retira-se o Pure Energy Centre.

Um eletrolisador com alta pressão de saída seria um ativo ao projeto, pois anularia a necessidade de um compressor. A partir disso, decidiu-se continuar as análises com os eletrolisadores ITM Hbox3000 e Acta EL250. Devido a maior pressão de saída, relação produção/consumo e menor potência, que já é consideravelmente alta para o projeto, optou-se pelo eletrolisador Acta EL250.

O eletrolisador escolhido possui uma pressão de saída de 30bar, muito maior que o reformador Helbio do projeto inicial que possui pressão de 1,2bar. Devido a isso, foi considerada desnecessária a presença do compressor, pois a razão de pressão para definir o consumo do mesmo é

desprezível e, assim, não haveria necessidade de gastar energia com o aparelho. As exigências de pureza do hidrogênio visaram maximizar a eficiência e a preservação dos eletrocatalisadores da unidade de conversão (CaC) do sistema de geração, com a conversão sendo de alta pureza (>99,995%).

TECHNICAL DATA			EL250	EL500	EL1000
H2 production rate		NI/h	250	500	1000
Working pressure		bar	30	30	30
Water consumption		l/h	0,25	0,4	0,8
Water specification		µS/cm	<10 (at 25°C)	<10 (at 25°C)	<10 (at 25°C)
Power supply options			AC 220V-50Hz DC 40V-80V	AC 220V-50Hz DC 40V-80V	AC 220V-50Hz DC 40V-80V
Operative power consumption		W	1300	2390	4780
Dimensions (WxDxH)	Electronic module	mm	483x490x178 (4U)	483x490x178 (4U)	483x490x178 (4U)
	Stack module	mm	483x490x311 (7U)	483x490x311 (7U)	483x490x622 (14U)
Weight (without water)	Electronic module	Kg	20	20	20
	Stack module	Kg	42	50	50 + 50
Ambient temperature		°C	5-40	5-40	5-40
Ambient humidity		%	20-95	20-95	20-95

Tabela 4.2 Data Sheet Acta EL250

Dentre os três aparelhos que a Acta oferece, decidiu-se trabalhar com o equipamento EL250 pois este atendia as necessidades do projeto. Os outros geram um consumo que os painéis fotovoltaicos e a CaC não seriam capazes de repor.

Os eletrolisadores, de forma geral, como o escolhido para o projeto, não possuem tempo de aquecimento relevante (por volta de 30 segundos) para começar a produzir hidrogênio, o que é extremamente vantajoso, pois se utiliza muita energia para aquecer o sistema e não se produz hidrogênio neste tempo. O tempo de aquecimento do reformador é 3 horas com alta potência e consumo de etanol. Além disso, o reformador possui um tempo de resfriamento de 1 hora e 30 minutos antes de desligar, o que também faz com que a produção de hidrogênio seja zero.

## 4.6 Reformador de etanol

O etanol pode ser convertido em hidrogênio a partir das reações de oxidação parcial, reforma a vapor ou da reforma autotérmica. Assim como o uso da água para obtenção do hidrogênio, o etanol produz uma fonte de energia ambientalmente correta que pode reduzir significativamente a emissão de gases que provocam o efeito estufa. Sabe-se também que o hidrogênio produzido pelo etanol pode ser considerado um vetor energético “neutro” em termos de emissão de CO<sub>2</sub>. [2]

Foi adquirido um processador de combustível para a conversão do etanol em hidrogênio de alta pureza (>99,995%, CO < 10 ppm), com capacidade de produção de  $1 \frac{Nm^3}{h}$  e pressão de saída de 1,2bar.

O processo de produção do hidrogênio a partir do etanol é realizado em várias etapas. Inicialmente, é realizada a pré-reforma do etanol em torno de 350°C, através da decomposição do etanol e a formação de metano, hidrogênio e óxidos de carbono (CO e CO<sub>2</sub>). Em seguida, a corrente é alimentada no reator de reforma em torno de 750°C, onde ocorre a reforma a vapor do metano formado, com produção de hidrogênio e CO. Com o objetivo de aumentar a concentração de hidrogênio, o reformado passa por outro reator onde tem lugar a reação de deslocamento de água. O gás rico em hidrogênio resultante desta reação é resfriado para a remoção de água e passa por um reator de membrana para a produção do hidrogênio. [2]



Figura 4.7 Reformador Helbio [8].

A Figura 4.7 apresenta uma vista do reformador de etanol já instalado na PUC-Rio em local especificamente preparado para a montagem do sistema de geração.



Figura 4.8- Reformador Helbio com seus tanque de alimentação de etanol e água. [2]

A Figura 4.8 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.

#### 4.7 Compressor e armazenamento de hidrogênio

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

O processo de seleção do compressor resultou na compra do equipamento modelo 2TX2 fornecido pela RIX Industries, localizada na cidade de Benicia, Califórnia, USA. Este equipamento atende à pressão de saída do reformador de etanol (1,2 bar) e vazão de até  $26,3 \frac{Nm^3}{h}$  a 1200 rpm. Considerando que a vazão nominal máxima do reformador é de  $1 \frac{Nm^3}{h}$  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 1,2 bar. Para este propósito foi especificado, também, um transmissor de baixa pressão. [2]

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/controlador de frequência encontra-se no interior do laboratório. [2]



Figura 4.9 Compressor e cilindros de armazenamento de hidrogênio [8]

A Figura 4.9 apresenta o compressor e os cilindros de armazenamento de hidrogênio instalados da laje do prédio do laboratório da PUC-Rio.

#### **4.8 SIGFI**

O perfil de consumidor escolhido para ser alimentado pelo projeto é o SIGFI 45 (45 Kwh/mês), definido pela ANEEL.

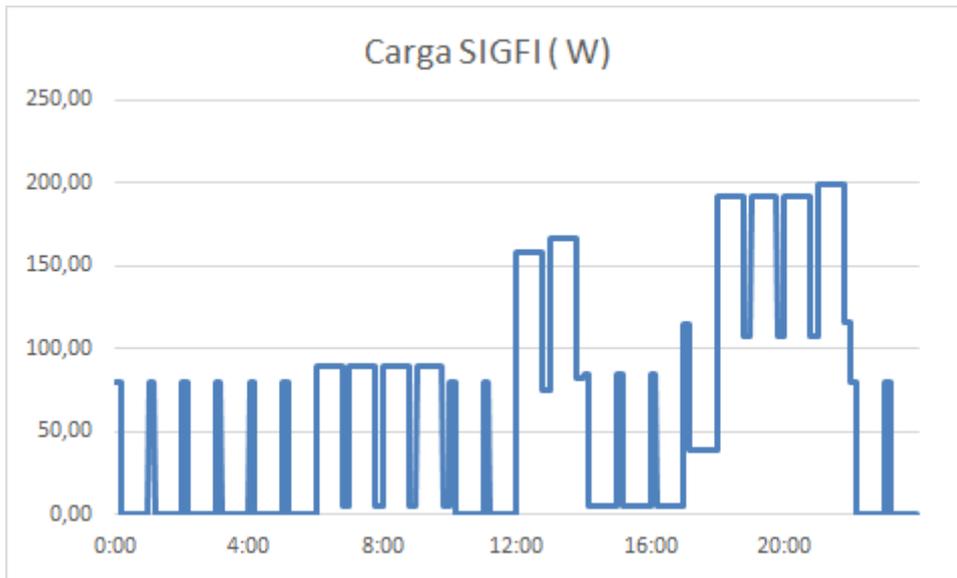


Figura 4.10 Perfil de consumo do SIGFI.

Na figura 4.10 pode-se observar que o consumo do SIGFI varia conforme o horário, com seus máximos ocorrendo entre 12h00min às 14h00min e 18h00min às 22h00min.

## **5. Análise e resultados**

### **5.1 Sistema com Eletrolisador**

#### **5.1.1 Horário de otimização**

Horário de otimização é o horário em que é possível haver um menor desperdício de energia para que se obtenha maior eficiência no sistema e alimente o consumidor, havendo a possibilidade de obter um crescimento contínuo quanto à pressão final de hidrogênio nos cilindros ao final do dia. Com isso, foi necessário o desenvolvimento de um estudo utilizando a ferramenta “Solver” do Excel buscando encontrar qual seria o melhor horário para ligar o eletrolisador, por quanto tempo ele deveria produzir, a partir de qual tensão mínima a CaC começaria a atuar e, quantos painéis fotovoltaicos otimizam o processo.

A Embratur, agência nacional de turismo do Brasil, lançou em 2013 um aplicativo que exhibe quantos dias do ano fizeram sol em uma cidade. Com o objetivo de atrair mais turistas para a Copa do Mundo de 2014 no Brasil, o aplicativo mostra estatísticas de cidades brasileiras onde se pode comparar com outras cidades do mundo.

No Rio de Janeiro, a população teve 212 dias de sol (58%), enquanto em Fortaleza foram 239 (65%). Em cidades turísticas do mundo, Roma teve 195 dias de sol (53%), enquanto Nova York fechou o ano com 184 dias (50%). [10]

Com base nesses dados, realizou-se um comparativo para avaliar como o Sistema funcionaria durante uma semana no Rio de Janeiro, com quatro dias sem nuvens e três dias nublados. Além disso, utilizou-se o número de painéis, horário de início de trabalho do eletrolisador, LVS (Low Voltage Start) e tempo de produção otimizados, para que houvesse um maior rendimento possível.

O horário de otimização buscou satisfazer o consumidor em uma semana baseada no ano de 2013 em ambiente nacional, mais

especificamente no Rio de Janeiro. Desta forma, a geração de energia deveria se manter constante durante o período.

Dados de entrada			
Horário que liga	08:30	SOC inicial	95%
Tempo de produção	07:02	Pressão inicial dos cilindros (kPa)	1000
LVS	49	Número de painéis	7

Tabela 5.1 Dados de otimização do eletrolisador.

A tabela 5.1 apresenta os dados de entrada utilizados para otimizar o sistema. Diferente do reformador de etanol, o tempo de aquecimento e resfriamento do eletrolisador é desprezível, ou seja, no momento em que é ligado, começa a produzir. O LVS é a tensão mínima para que a CaC comece a operar.

Os três modos possíveis para variações nos painéis fotovoltaicos foram testados com o horário de otimização, ou seja: dia sem nuvens, parcialmente nublado e nublado. Além disso, analisou-se a variação do sistema com até 10 painéis fotovoltaicos.

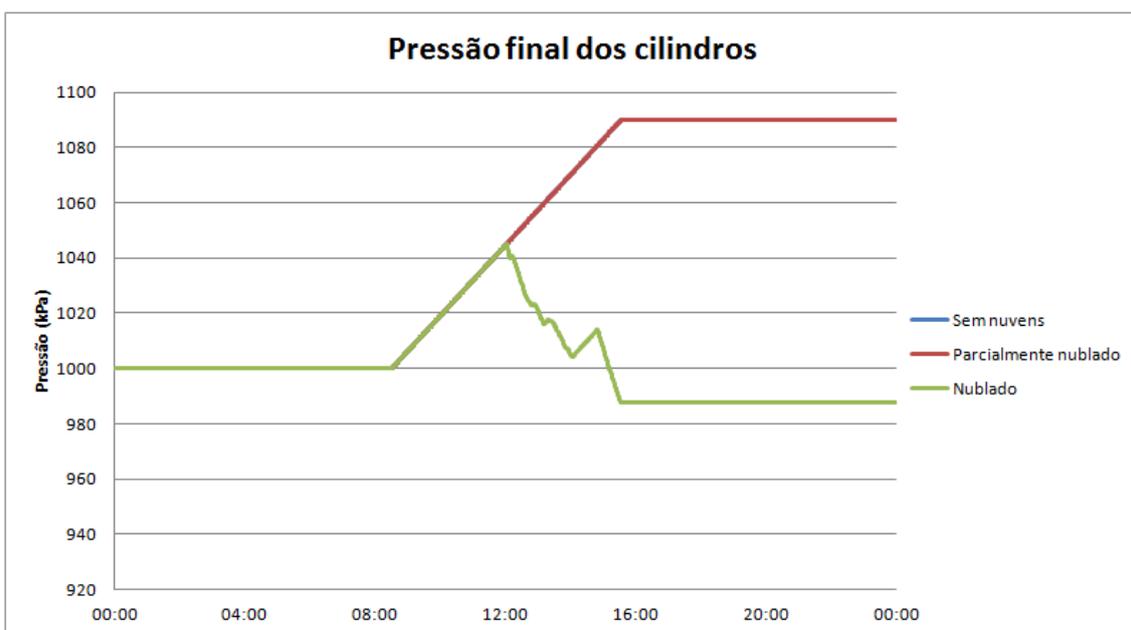


Figura 5.1 Variação da pressão final dos cilindros nos três estados de clima possíveis.

A figura 5.1 apresenta o comportamento da pressão de hidrogênio nos cilindros ao longo do dia. O SIGFI do projeto possui uma demanda por energia maior na parte da tarde e, principalmente, noite.

Sem nuvens, às 08h30min o eletrolisador é ligado e a produção de hidrogênio aumenta numa proporção linear, pois os painéis fotovoltaicos e baterias conseguem alimentar o sistema. Desta forma, a CaC não é acionada para conversão do hidrogênio presente nos cilindros em energia elétrica. A produção segue até 15h32min onde o eletrolisador é desligado e a pressão nos cilindros se estabiliza. O mesmo raciocínio serve para quando o dia está parcialmente nublado.

A relação de demanda do consumidor segue a mesma para o dia nublado. A partir disso o eletrolisador é ligado e começa a produzir hidrogênio, porém possui menos energia disponível dos painéis fotovoltaicos, obrigando a CaC a atuar, começando a produzir energia elétrica, ao mesmo tempo que o eletrolisador produz hidrogênio. Em dias nublados há necessidade de 2 Cac's, pois sua potência máxima fornecida é 2,2 Kwh e a demanda de energia necessária é alta devido ao menor abastecimento dos painéis fotovoltaicos. Após o desligamento do eletrolisador, as baterias sustentam o consumidor.

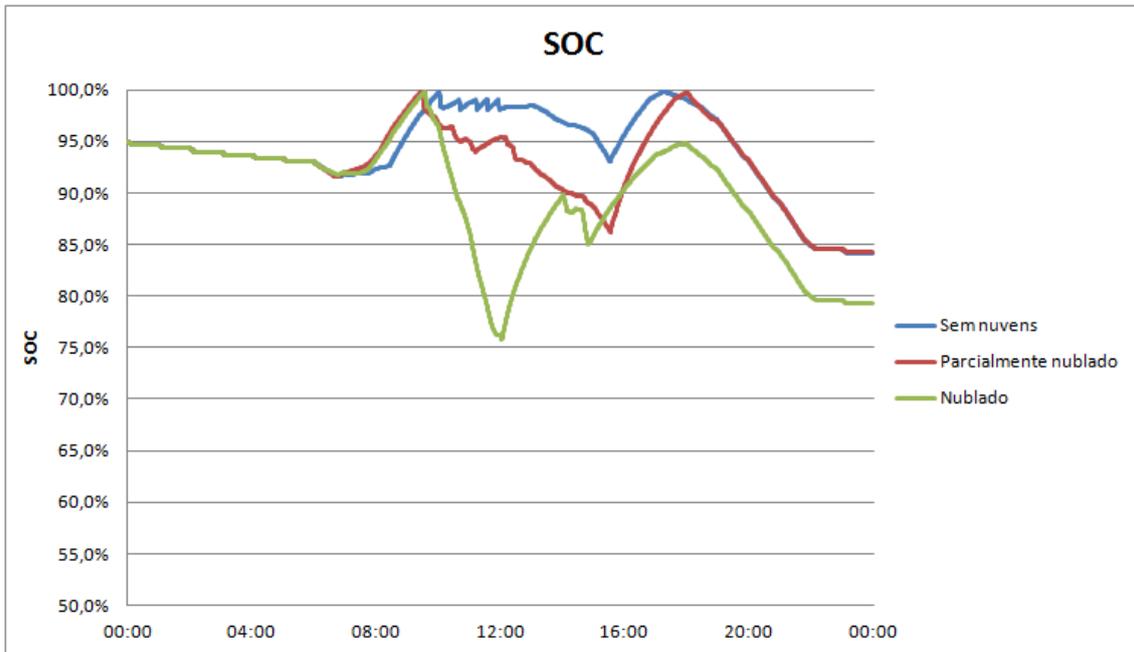


Figura 5.2 Estado de carga nas baterias em função do horário nos três estados de clima possíveis.

A figura 5.2 mostra a variação do estado de carga das baterias no horário de otimização. Devido ao baixo LVS ( Low Voltage Start), em dias sem nuvens, a CaC não é acionada, o que explica o comportamento alto da SOC durante o dia, caindo apenas a noite quando não há mais presença da energia dos painéis.

Nos dias parcialmente nublados o raciocínio utilizado é o mesmo, pois as CaC's não são ativadas. Ao final da produção do eletrolisador o estado de carga da bateria está mais baixo que se comparado ao dia sem nuvens devido a menor energia fornecida pelos painéis durante o dia. Ambas terminam com o mesmo valor de estado de carga.

Em dias nublados a energia solar fornecida pelos painéis fotovoltaicos é menor, portanto é necessário que duas CaC's trabalhem para garantir o funcionamento do eletrolisador e para alimentar o consumidor. Com a CaC ligada, a bateria precisa fornecer mais energia para o sistema, justificando a queda no estado de carga final das baterias.

	Sem nuvens	Parcialmente nublado	Nublado
<b>Eletrolisador</b>			
Produção de H2 (L)	1758,474	1758,474	1758,474
Produção de H2 (kWh)	4,886096918	4,886096918	4,886096918
Consumo elétrico (kWh)	9,143333333	9,143333333	9,143333333
<b>CaC</b>			
Consumo de H2 na CaC (L)	0	0	2001,101574
Consumo de H2 na CaC (kWh)	0	0	5,56026204
Geração na CaC (kWh)	0	0	2,256690877
Potência Máxima das CaC's (W)	0	0	2709,386175
<b>BATERIA</b>			
Variação da Energia Armazenada (kWh)	-0,49811522	-0,495949106	-0,725006896
<b>PAINÉIS</b>			
Energia fornecida (kWh)	10,97145671	10,89143281	7,210454134
Energia disponível (kWh)	11,66008249	10,94922017	8,026350719
Energia desperdiçada (kWh)	0,688625777	0,057787359	0,815896585
<b>CILINDROS DE H2</b>			
Variação da Energia Armazenada (kWh)	4,886096918	4,886096918	-0,674165122
<b>SIGFI</b>			
Consumo (kWh)	1,714107222	1,714107222	1,714107222
<b>INVERSOR</b>			
Carga Alimentada (kWh)	11,40352491	11,40352491	11,40352491

Tabela 5.2 Dados dos componentes do sistema em função do estado de clima no eletrolisador. Elaboração própria.

A tabela 5.2 indica dados importantes do funcionamento do sistema. A produção e consumo do eletrolisador será a mesma para todos os dias, pois o tempo de produção é constante. Naturalmente, a variação da energia armazenada nos cilindros será maior em dias sem nuvens e menor em dias nublados devido ao fornecimento de energia dos painéis fotovoltaicos, resultando na menor geração de energia das CaC's. O mesmo raciocínio serve para a variação da energia armazenada nas baterias.

A partir disso, foram realizados testes no simulador para entender como o sistema varia em uma semana com dia sem nuvens na segunda-feira, terça-feira, sexta-feira e domingo. Enquanto os dias nublados seriam quarta-feira, quinta-feira e sábado.

Resultados	Sol	Sol	Nublado	Nublado	Sol	Nublado	Sol
	Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado	Domingo
Pressão inicial (kPa)	1000	1089,858714	1179,717428	1105,588549	1018,972589	1108,831303	1119,042116
Pressão final cilindros (kPa)	1089,858714	1179,717428	1105,588549	1018,972589	1108,831303	1119,042116	1208,90083
SOC final (%)	84,18895882	84,19155935	78,21290439	78,65982106	86,31936005	78,48470663	86,28587155
Produção de H2 (L)	1758,474	1758,474	1758,474	1758,474	1758,474	1758,474	1758,474
Produção de H2 (Kwh)	4,886096918	4,886096918	4,886096918	4,886096918	4,886096918	4,886096918	4,886096918
<b>Painéis fotovoltaicos</b>							
Energia fornecida	10,97242372	11,56787129	8,026350719	8,026350719	11,32881157	6,256214478	11,99847482
Energia disponível	11,66008249	11,66008249	8,026350719	8,026350719	11,66008249	8,026350719	11,66008249
Energia desperdiçada	0,687658761	0,0922112	0	0	0,331270919	1,770136241	0,338392335
<b>Entradas</b>							
Eletrolisador	4,886096918	4,886096918	4,886096918	4,886096918	4,886096918	4,886096918	4,886096918
PV	10,97242372	11,56787129	8,026350719	8,026350719	11,9913534	9,79648696	11,99847482
Total	15,85852064	16,4539682	12,91244764	12,91244764	16,87745032	14,68258388	16,88457174
<b>Saídas</b>							
Eletrolisador	9,143333333	9,143333333	9,143333333	9,143333333	9,143333333	9,143333333	9,143333333
CaC	0	0	5,374592074	5,724768199	0	2,629430804	0
Armaz Bateria	-0,498172778	0,000119832	-0,27549642	0,02059392	0,352951557	-0,361020829	0,359477679
Armaz cilindros	4,886096918	4,886096918	-4,030782015	-4,709771078	4,886096918	0,555216263	4,886096918
SIGFI	1,714301686	1,714301686	1,714301686	1,714301686	1,714301686	1,714301686	1,714301686
Total	15,24555916	15,74385177	11,92594866	11,89322606	16,09668349	13,68126126	16,10320962

Tabela 5.3 Dados otimizados durante a semana. Elaboração própria.

A tabela 5.3 apresenta dados do sistema variando conforme a semana. O horário e número de painéis fotovoltaicos escolhidos apresentam resultados relativos à eficiência do sistema e, consequentemente, ao desperdício de energia.

### 5.1.2 Eficiência do eletrolisador

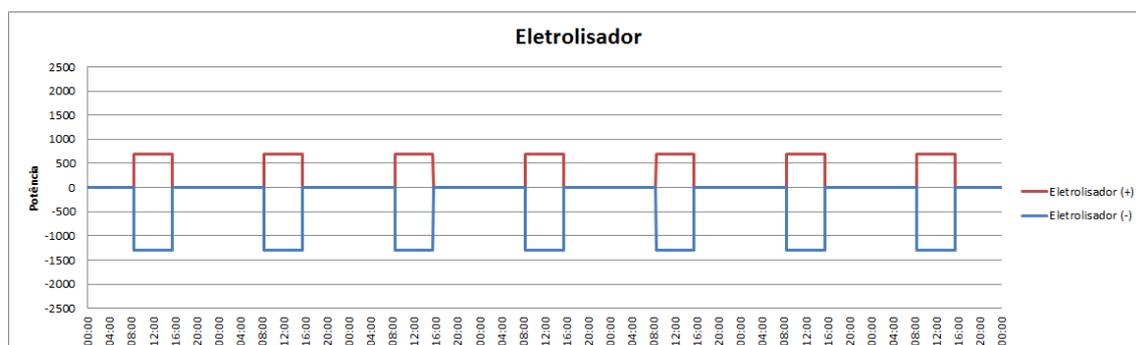


Figura 5.3 Variação da potência do eletrolisador em função do tempo por sete dias.

$$n = \frac{\int P_{\text{elet}_+} dt}{\int P_{\text{elet}_-} dt}$$

A integral da potência consumida pelo eletrolisador para separação do hidrogênio da água e a integral da potência fornecida pelo hidrogênio gerada pelo eletrolisador tornam possível o cálculo da eficiência. Enquanto o eletrolisador consome energia a uma potência de 1300W, o mesmo separa o hidrogênio da água a potência de 650W.

$$n = 53,4118\%$$

### 5.1.3 Eficiência da CaC

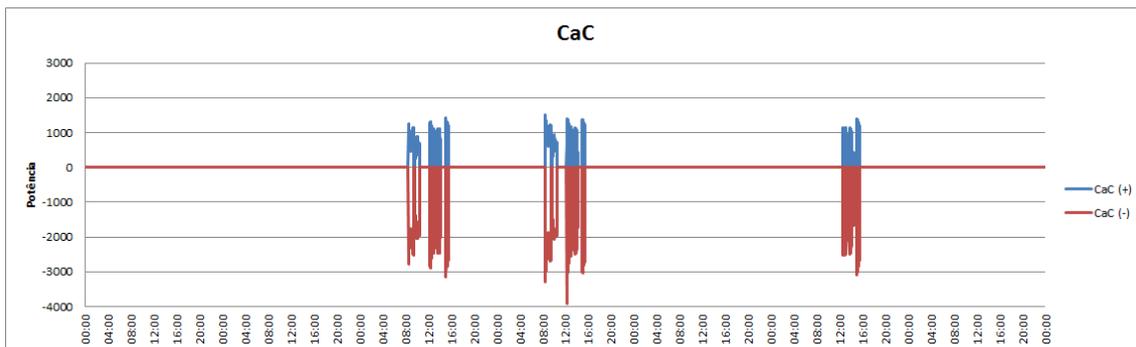


Figura 5.4 Variação da potência da CaC em função do tempo por sete dias.

$$n = \frac{\int P_{\text{CaC}_+} dt}{\int P_{\text{CaC}_-} dt}$$

A integral da potência consumida pela CaC para conversão do hidrogênio em energia elétrica e a integral da potência fornecida pela CaC gerada pelo hidrogênio tornam possível o cálculo da eficiência. Como esperado, a CaC tem sua operação necessária apenas nos dias nublados, visto que nos dias sem nuvens o LVS não atinge o valor de 49V.

$$n = 39,49466\%$$

#### 5.1.4 Eficiência baterias

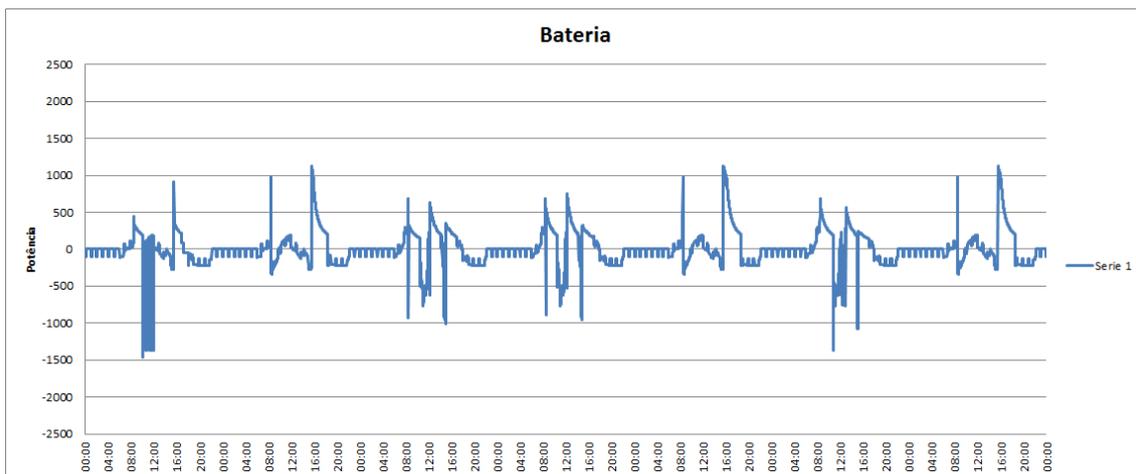


Figura 5.5- Variação da potência das baterias em função do tempo por sete dias.

$$n = \frac{\int P_{Bat\_} dt}{\int P_{Bat\_+} dt}$$

A partir da integral da potência fornecida pela bateria e a integral da potência consumida pela bateria no período de sete dias, é possível avaliar a eficiência do sistema. No sistema com o eletrolisador, em certos

momentos durante o dia sem nuvens, há uma energia desperdiçada pelos painéis fotovoltaicos, o que ocorre devido ao SIGFI não demandar energia e as baterias já estarem cheias. Além disso, as baterias possuem resistência interna que implica na perda de eficiência.

$n = 91,9817\%$

### 5.1.5 Eficiência global do sistema

A eficiência global do sistema entende-se pela eficiência da energia gerada pelos painéis fotovoltaicos que foi utilizada pelo consumidor SIGFI 45.

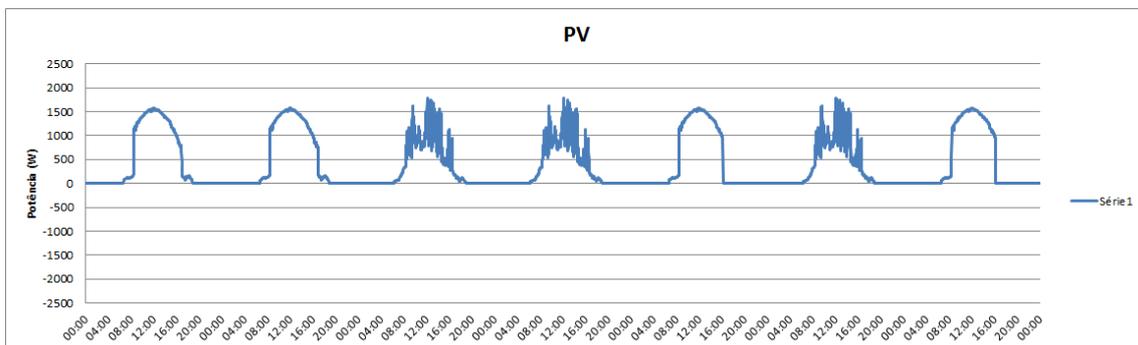


Figura 6.6- Variação da carga fotovoltaica em função do tempo durante os sete dias

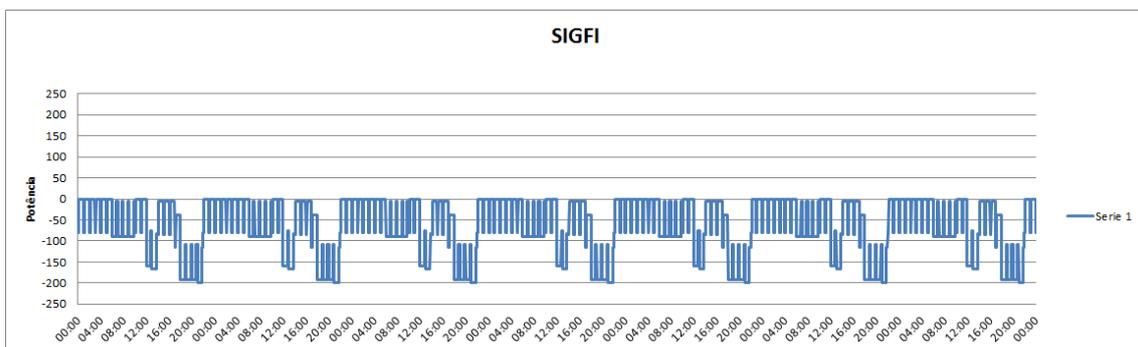


Figura 5.7- Variação da carga consumida pelo SIGFI em função do tempo durante os sete dias

As figuras 6.6 e 6.7 mostram a variação de toda a energia que entra no sistema e a energia que sai. Ou seja, a quantidade de energia vinda dos painéis fotovoltaicos em comparação com a energia consumida pelo consumidor.

$$\eta = \frac{\int P_{SIGFI} dt}{\int P_{PV} dt}$$

A partir da integral da potência consumida pelo SIGFI no período e a integral da potência fornecida pelos painéis fotovoltaicos, é possível calcular a eficiência do sistema.

$$\eta = 15,3596\%$$

## **5.2 Sistema com Reformador**

Neste capítulo serão realizadas modificações no projeto, como a presença de etanol e seu poder calorífico, o uso do compressor, tempo de aquecimento e resfriamento, com seus respectivos consumos. Todas as simulações serão feitas utilizando as mesmas referências que no eletrolisador, como um SIGFI, um banco de baterias, um inversor e um reformador.

### **5.2.1 Horário de otimização**

O horário de otimização do reformador de etanol teve por objetivo minimizar o número de painéis fotovoltaicos necessários, devido a seu consumo energético ser menor e, garantir com que o reformador alcance um resultado próximo ao eletrolisador. Com isso, é possível realizar um balanço financeiro dos sistemas.

Dados de entrada			
Horário que liga	08:32	Tempo de aquecimento	03:00
Tempo de produção	06:30	Tempo de resfriamento	01:30
Número de painéis	2	LVS	49
Soc inicial	95%	Pressão inicial dos cilindros (kPa)	1000

Tabela 5.4 Dados de entrada de otimização do reformador de etanol.

Após testes realizados, a tabela 5.4 apresenta os dados de otimização do reformador. Diferentemente do eletrolisador, o reformador possui tempo de aquecimento, onde não é produzido  $H_2$  e é consumido etanol a taxa constante, e o tempo de resfriamento, onde é necessário um consumo elétrico para desligamento do reformador, porém sem maior consumo de etanol.

Tempo de aquecimento	03:00	Consumo aquecimento (W)	1000
Tempo de produção	06:30	Consumo produção (W)	200
Tempo de resfriamento	01:30	Consumo resfriamento (W)	200

Tabela 5.5 Dados de consumo durante a reforma do etanol.

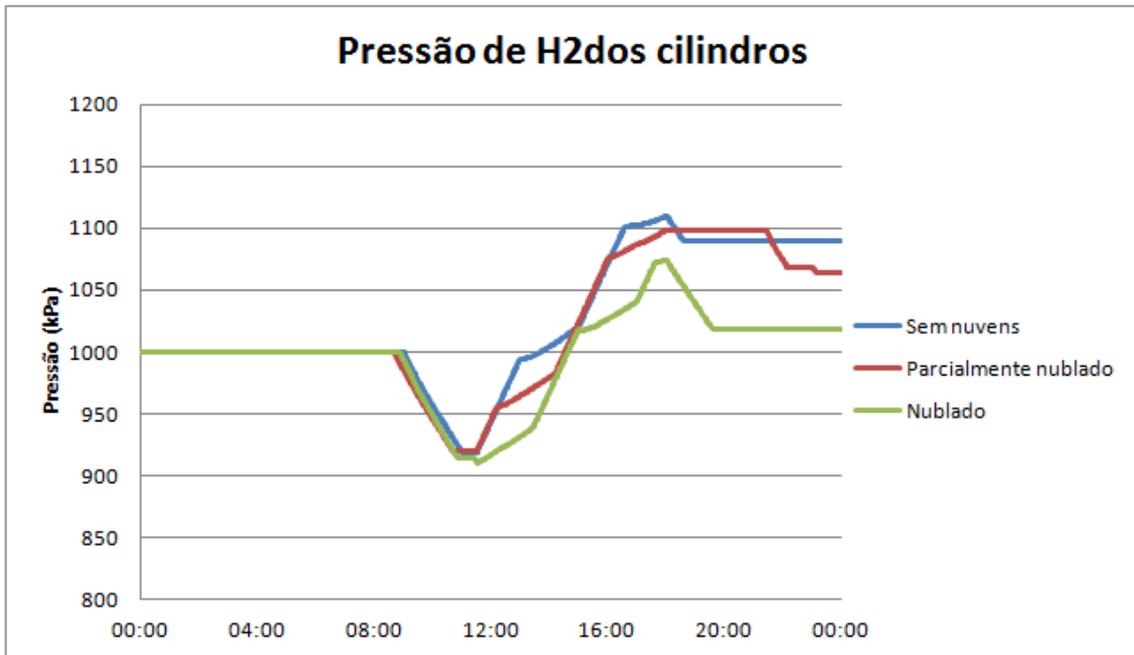


Figura 5.8 Variação da pressão final dos cilindros nos três estados de clima.

Na figura 5.8 apresenta a variação da pressão nos cilindros, para os três estados possíveis: sem nuvens, parcialmente nublado e nublado, para uma mesma condição inicial. Do 1.000 kPa. A queda da pressão às 08h32min da manhã é natural, pois coincide com o horário em que o reformador é ligado para aquecimento. Depois, em todos os cenários a pressão sobe às 11h32min, pois o reformador começa a produzir H<sub>2</sub>. O horário de início do seu resfriamento coincide com uma queda com algumas variações dentre eles, explicadas pelo estado de carga das baterias e a energia fornecida pelos painéis. Devido à maior presença de energia vinda dos painéis em dias sem nuvens, a pressão final dos cilindros é maior que a dos demais.

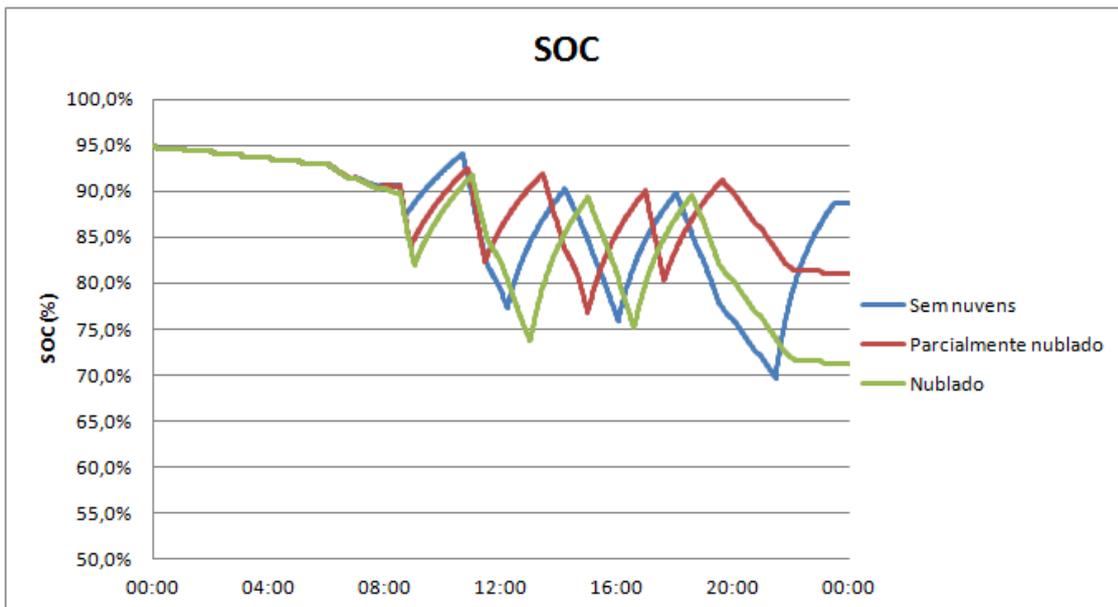


Figura 5.9- Estado de carga nas baterias em função do horário nos três estados de clima possível.

A figura 5.9 apresenta a variação dos estados de carga das baterias dos três estados climas possíveis. Como todos possuem uma CaC funcionando, a SOC varia de forma similar, porém com menor intensidade e em tempos diferentes.

	Sem nuvens	Parcialmente nublado	Nublado
<b>Reformador</b>			
Produção de H2 (L)	6500	6500	6500
Produção de H2 (kWh)	18,06090392	18,06090392	18,06090392
Consumo elétrico (kWh)	4,6000015	4,6000015	4,6000015
Consumo de etanol (L)	7,315	7,315	7,315
Consumo de etanol (kWh)	44,38310415	44,38310415	44,38310415
<b>Compressor</b>			
Consumo (kWh)	3,026580607	3,019501955	3,001642482
<b>CaC</b>			
Consumo de H2 na CaC (L)	4733,824596	5251,651431	6145,188954
Consumo de H2 na CaC (kWh)	13,15340788	14,59224184	17,07502574
Geração na CaC (kWh)	5,456977749	6,142591966	6,946066398
Potência Máxima das CaC's (W)	1333,122856	1428,111699	1347,347139
<b>BATERIA</b>			
Variação da Energia Armazenada (kWh)	-0,05343319	-0,467025065	-0,944183941
<b>PAINÉIS</b>			
Energia fornecida (kWh)	3,331452139	3,12834862	2,293243063
Energia disponível (kWh)	3,331452139	3,12834862	2,293243063
Energia desperdiçada (kWh)	0	0	0
<b>CILINDROS DE H2</b>			
Variação da Energia Armazenada (kWh)	4,907496043	3,468662087	0,985878186
<b>SIGFI</b>			
Consumo (kWh)	1,516612639	1,516612639	1,516612639
<b>INVERSOR</b>			
Carga Alimentada (kWh)	9,733298403	9,725806192	9,706909583

Tabela 5.6 Dados dos componentes do sistema em função do estado de clima no reformador. Elaboração própria.

A tabela 5.6 indica dados importantes do funcionamento do sistema. A produção e consumo do reformador será a mesma para todos os dias, pois o tempo de produção é constante. Naturalmente, a variação da energia armazenada nos cilindros será maior em dias sem nuvens e menor em dias nublados devido ao fornecimento de energia dos painéis fotovoltaicos, fazendo com que as CaC trabalhem menos. O desperdício de energia dos painéis é zero, o que é muito produtivo para o sistema, visto que toda a energia renovável fotovoltaica disponível está sendo utilizada.

A partir disto, foram realizados testes no simulador para entender como o sistema varia em uma semana com dia sem nuvens na segunda-

feira, terça-feira, sexta-feira e domingo. Enquanto os dias nublados seriam quarta-feira, quinta-feira e sábado.

Resultados	Sol	Sol	Nublado	Nublado	Sol	Nublado	Sol
	Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado	Domingo
Pressão inicial (kPa)	1000	1090,252259	1105,217008	1105,707001	1098,145942	1113,07368	1113,271585
Pressão final cilindros (kPa)	1090,252259	1105,217008	1105,707001	1098,145942	1113,07368	1113,271585	1128,086983
SOC final (%)	71,27895131	82,67115193	78,55274612	78,49048659	82,58193899	78,54528674	82,57065569
Produção de H2 (L)	6500	6500	6500	6500	6500	6500	6500
Produção de H2 (Kwh)	18,06090392	18,06090392	18,06090392	18,06090392	18,06090392	18,06090392	18,06090392
<b>Painéis fotovoltaicos</b>							
Energia fornecida (kWh)	3,331452139	3,331452139	2,293243063	2,293243063	3,331452139	2,293243063	3,331452139
Energia disponível (kWh)	3,331452139	3,331452139	2,293243063	2,293243063	3,331452139	2,293243063	3,331452139
Energia desperdiçada (kWh)	0	0	0	0	0	0	0
<b>Entradas</b>							
Reformador (kWh)	18,06090392	18,06090392	18,06090392	18,06090392	18,06090392	18,06090392	18,06090392
PV (kWh)	3,331452139	3,331452139	2,293243063	2,293243063	3,331452139	2,293243063	3,331452139
Total	21,39235606	21,39235606	20,35414699	20,35414699	21,39235606	20,35414699	21,39235606
<b>Saídas</b>							
Reformador (kWh)	4,859952092	4,859975001	4,859972442	4,859968818	4,85997872	4,859976181	4,859986039
CaC (kWh)	7,696430132	10,35454034	10,54416103	10,77275337	10,3517795	10,55053482	10,35133344
Armaz Bateria (kWh)	-0,944183941	0,460033056	-0,237046298	-0,023098867	0,45995761	-0,23795838	0,456978424
Armaz cilindros (kWh)	4,907496043	0,81371314	0,026643509	-0,411135068	0,811700643	0,010761168	0,805592093
SIGFI (kWh)	1,680154451	1,680161019	1,680160911	1,680159559	1,68016242	1,680162305	1,680165151
Compressor (kWh)	3,19319186	3,224547746	3,220717757	3,215972199	3,229392031	3,225605746	3,238915754
Total	21,39304064	21,3929703	20,35475451	20,35476518	21,39297092	20,35475495	21,3929709

Tabela 5.7 Dados otimizados durante a semana. Elaboração própria.

A tabela 6.7 apresenta dados do sistema variando conforme a semana. O horário e número de painéis fotovoltaicos escolhidos apresentam resultados relativos à eficiência do sistema e, conseqüentemente, ao desperdício de energia. A energia desperdiçada dos painéis fotovoltaicos é zero, respondendo aos objetivos do projeto.

### 5.2.2 Eficiência do Reformador

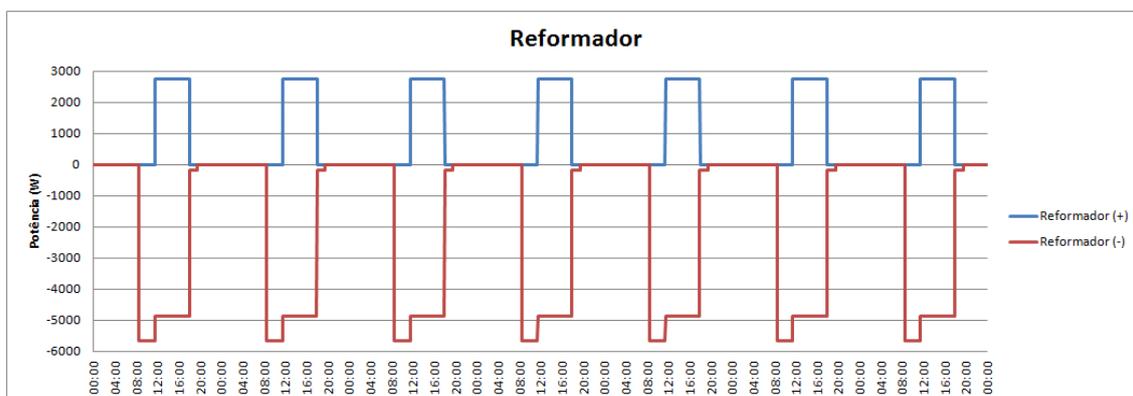


Figura 5.10 Variação da potência do reformador em função do tempo por sete dias.

Na figura 5.10 é possível observar a potência de produção e consumo do reformador. O etanol tem uma potência de 4671 W. Observa-se uma variação no início do trabalho do reformador, relativo ao tempo de aquecimento, onde não há produção de hidrogênio, mas com contínuo consumo de etanol. No final do consumo, relativo ao tempo de resfriamento, não há produção de hidrogênio ou consumo de etanol.

$$n = \frac{\int P_{\text{pref}_+} dt}{\int P_{\text{pref}_-} dt + \int P_{\text{etanol}} dt}$$

A integral da potência consumida pelo reformador para separação do hidrogênio, a integral da potência fornecida pelo hidrogênio gerada pelo reformador e a integral da potência do etanol fornecido para o sistema tornam possível o cálculo da eficiência.

$$n = 36,677\%$$

### 5.2.3 Eficiência da CaC

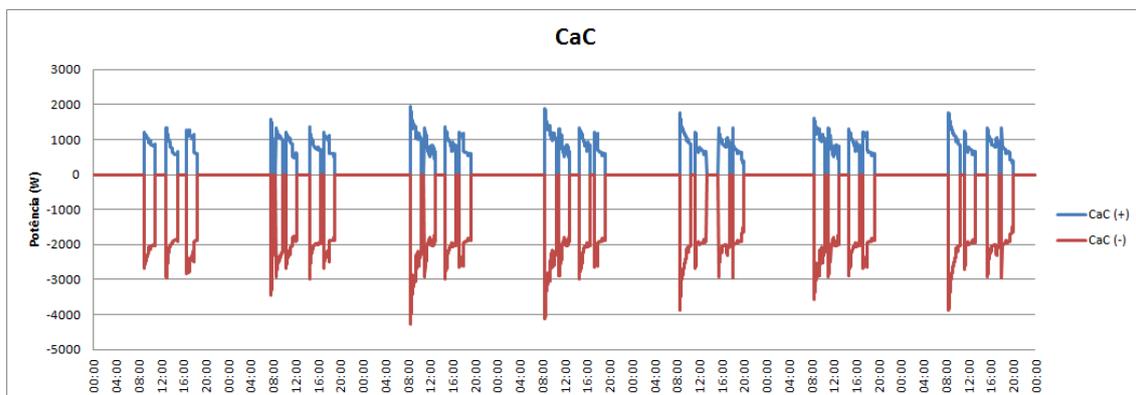


Figura 5.11 Variação da potência da CaC em função do tempo por sete dias.

$$n = \frac{\int PCaC_+ dt}{\int PCaC_- dt}$$

A integral da potência consumida pela CaC para conversão do hidrogênio em energia elétrica e a integral da potência fornecida pela CaC gerada pelo hidrogênio tornam possível o cálculo da eficiência.

$$n = 41,0223\%$$

#### 5.2.4 Eficiência baterias

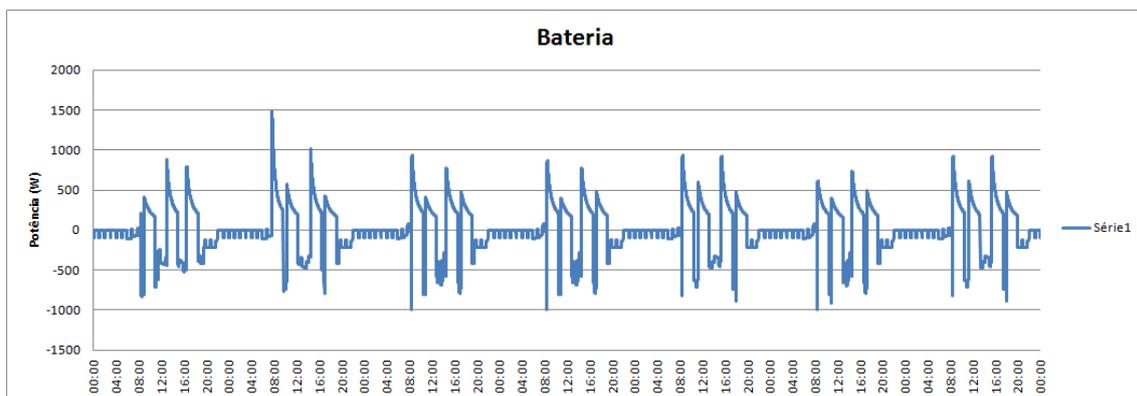


Figura 5.12- Variação da potência das baterias em função do tempo por sete dias.

$$n = \frac{\int PBat_- dt}{\int PBat_+ dt}$$

A partir da integral da potência fornecida pela bateria e a integral da potência consumida pela bateria no período de sete dias, é possível avaliar a eficiência do sistema. As baterias possuem resistência interna que afetam na pequena perda de eficiência.

$$n = 94,0468\%$$

### 5.2.5 Eficiência global do sistema

A eficiência global do sistema entende-se pela eficiência da energia gerada pelos painéis fotovoltaicos e o consumo de etanol que foi utilizada pelo consumidor SIGFI 45.

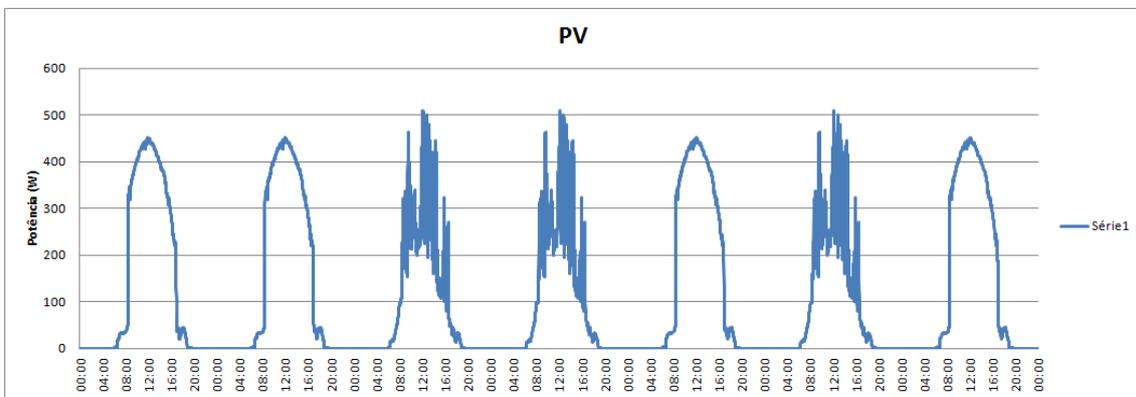


Figura 5.16 Variação da carga fotovoltaica em função do tempo durante os sete dias

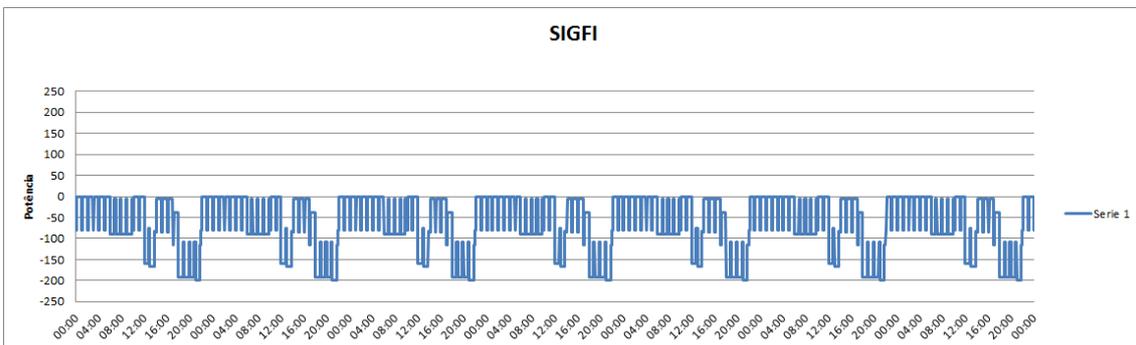


Figura 5.17 Variação da carga consumida pelo SIGFI em função do tempo durante os sete dias

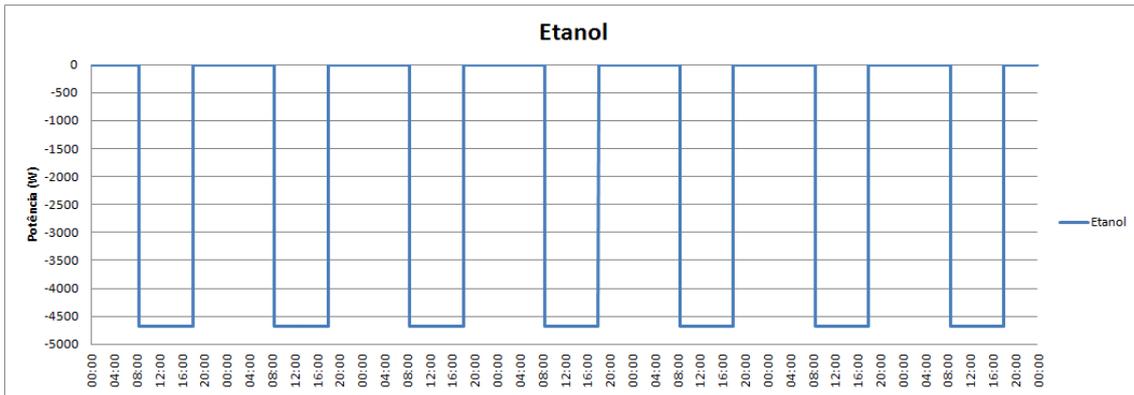


Figura 5.18 Variação da potência de etanol consumida pelo SIGFI em função do tempo durante os sete dias.

As figuras 5.16, 5.17 e 5.18 mostram a variação de toda a energia que entra no sistema sobre a energia que sai. Ou seja, a quantidade de energia vinda do etanol e dos painéis fotovoltaicos em comparação com a energia consumida pelo consumidor.

$$n = \frac{\int P_{\text{SIGFI}} dt}{\int P_{\text{PV}} dt + \int P_{\text{etanol}} dt}$$

A partir da integral da potência consumida pelo SIGFI no período, a integral da potência fornecida pelos painéis fotovoltaicos e a integral da potência fornecida pelo etanol, é possível calcular a eficiência do sistema.

$$n = 3,2012\%$$

## 6. Eletrolisador x Reformador de etanol

Neste capítulo será abordada a questão proposta pelo projeto: Se o eletrolisador é uma alternativa ao reformador de etanol no Sistema Integrado de Fornecimento de Energia Elétrica.

	Potência (W)	Consumo (KWh/min)	Produção H2 (L/min)	Produção H2 (Kwh/min)	Pressão de saída (bar)	Produção /Consumo	Consumo de água (L/min)	Consumo de etanol (L/min)
Acta EL 250	1300	0,0217	4,167	0,01157962	30	0,533623332	0,25	0
Helbio	200	0,0813	16,67	0,04632406	1,2	0,569791636	0,0233	0,012833

Tabela 6.1- Comparação dados do eletrolisador Acta EL250 e do reformador de etanol Helbio.

A tabela 6.1 apresenta alguns dados considerados importantes para o funcionamento do projeto entre o eletrolisador e reformador escolhidos. Os dados desta tabela são referentes apenas aos tempos de produção das máquinas, desconsiderando os tempos de aquecimento e resfriamento do reformador de etanol.

Neste capítulo, serão abordados os horários de otimização de ambos eletrolisador e reformador.

### 6.1 Balanço energético

Neste tópico será avaliado se o eletrolisador possui vantagens em relação ao reformador operando em seus horários de otimização.

Dados de entrada							
Eletrolisador				Reformador			
Horário que liga	08:32	Tempo de aquecimento	00:00	Horário que liga	08:32	Tempo de aquecimento	03:00
Tempo de produção	07:02	Tempo de resfriamento	00:00	Tempo de produção	06:30	Tempo de resfriamento	01:30
Número de painéis	7	LVS	49	Número de painéis	2	LVS	49
Soc inicial: 95%							
Pressão inicial dos cilindros: 1000 kPa							

Tabela 6.2 Horários de otimização do eletrolisador e reformador de etanol.

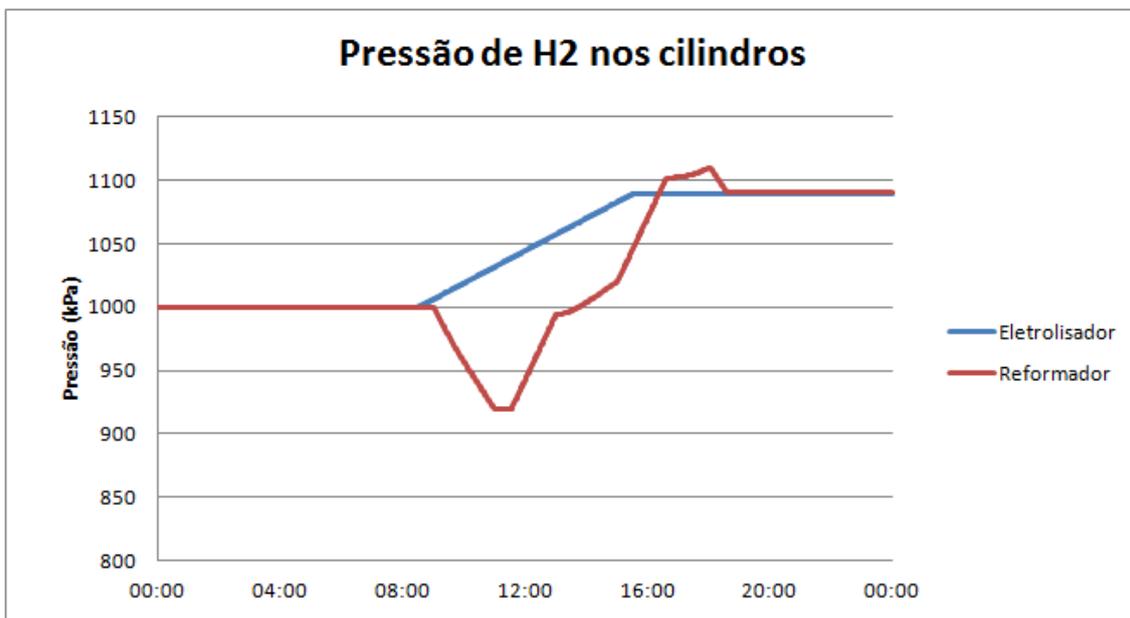


Figura 6.1 Pressão de H<sub>2</sub> nos cilindros em função do horário com o eletrolisador e reformador em um dia sem nuvens.

Na figura 6.1, verifica-se o comportamento da pressão dos cilindros durante o dia. Com a energia máxima dos painéis fotovoltaicos, como o eletrolisador e o reformador são ligados ao mesmo tempo, é visível uma queda da pressão dos cilindros no reformador, que tem seu processo de aquecimento por 3 horas, enquanto o eletrolisador segue numa crescente que, por mais que tenha um consumo a uma potência de 1300W, 300W a mais que o reformador em seu estado de aquecimento, possui 5 painéis fotovoltaicos a mais que o alimentam. Todavia, ao final do processo de produção do eletrolisador, a pressão de H<sub>2</sub> se estabiliza, enquanto o reformador segue em uma crescente mais acentuada, ultrapassando às 16h23min a pressão do eletrolisador. Após isso, o tempo de resfriamento do reformador começa a atuar, fazendo com que ele gaste energia e não produza, ocasionando uma queda e estabilização.

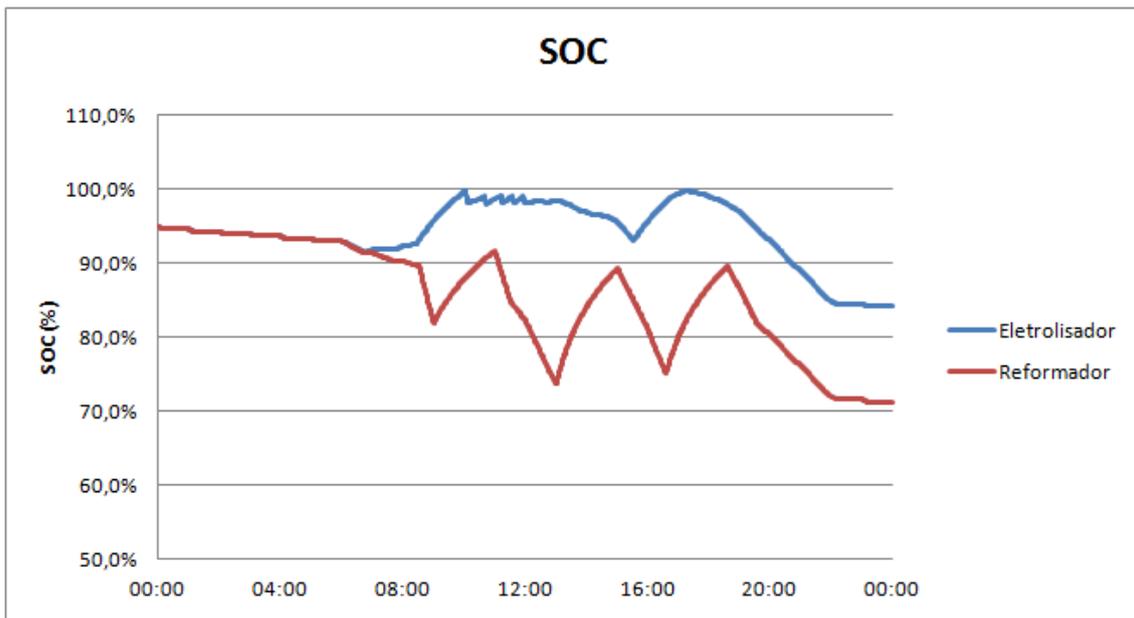


Figura 6.2 Estado de carga das baterias em função do horário com o eletrolisador e reformador em um dia sem nuvens.

A figura 6.2 apresenta a variação do estado de carga das baterias no eletrolisador e no reformador. O reformador termina o dia com uma porcentagem menor devido a menor energia fornecida pelos painéis fotovoltaicos para alimentar as baterias. As baterias no sistema com o eletrolisador apresentam picos elevados de 100%, o que mostra uma energia desperdiçada em determinados momentos do dia. Essa energia desperdiçada está apresentada na tabela 6.3.

Eletrolisador		Reformador	
Produção de H2 (L)	1758,474	Produção de H2 (L)	6500
Produção de H2 (kWh)	4,886096918	Produção de H2 (kWh)	18,06090392
Consumo elétrico (kWh)	9,143333333	Consumo elétrico (kWh)	4,6000015
Consumo etanol (L)	0	Consumo etanol (L)	7,315
Consumo etanol (kWh)	0	Consumo etanol (kWh)	44,38310415
<b>Compressor</b>		<b>Compressor</b>	
Consumo (kWh)	0	Consumo (kWh)	3,026580607
<b>CaC</b>		<b>CaC</b>	
Consumo de H2 na CaC (L)	0	Consumo de H2 na CaC (L)	4733,824596
Consumo de H2 na CaC (kWh)	0	Consumo de H2 na CaC (kWh)	13,15340788
Geração na CaC (kWh)	0	Geração na CaC (kWh)	5,456977749
Potência Máxima das CaC's (W)	0	Potência Máxima das CaC's (W)	1333,122856
<b>BATERIA</b>		<b>BATERIA</b>	
Varição da Energia Armazenada (kWh)	-0,498172778	Varição da Energia Armazenada (kWh)	-0,944183941
<b>PAINÉIS</b>		<b>PAINÉIS</b>	
Energia fornecida (kWh)	10,97242372	Energia fornecida (kWh)	3,331452139
Energia disponível (kWh)	11,66008249	Energia disponível (kWh)	3,331452139
Energia desperdiçada (kWh)	0,687658761	Energia desperdiçada (kWh)	0
<b>CILINDROS DE H2</b>		<b>CILINDROS DE H2</b>	
Varição da Energia Armazenada (kWh)	4,886096918	Varição da Energia Armazenada (kWh)	4,907496043
<b>SIGFI</b>		<b>SIGFI</b>	
Consumo (kWh)	1,516612639	Consumo (kWh)	1,516612639
<b>INVERSOR</b>		<b>INVERSOR</b>	
Carga Alimentada (kWh)	11,40369996	Carga Alimentada (kWh)	9,733298403

Tabela 6.3- Consumo e produção de energia nos componentes do sistema.

A partir da tabela 6.3 podemos comparar como cada componente do sistema varia com o uso do Eletrolisador e do Reformador. A produção de H<sub>2</sub> no reformador é maior que três vezes a do eletrolisador, pois possui uma produção de  $16,67 \frac{L}{min}$  de H<sub>2</sub>, enquanto o eletrolisador produz  $4,17 \frac{L}{min}$  de H<sub>2</sub>. O eletrolisador possui a vantagem de não necessitar de compressor, enquanto o reformador consome pouco mais de 3,0 kWh para pressurizar o hidrogênio. Além disso, não tem necessidade de utilizar o etanol para separação do hidrogênio.

As CaC's consomem apenas no reformador pois não possuem muitos painéis fotovoltaicos para fornecer energia elétrica. A energia fornecida pelos painéis será maior no eletrolisador devido à necessidade de mais energia, visto que ele produz menos do que consome.

	Eletrolisador/ Reformador	CaC	Baterias	Global
Acta EL250	53,42%	39,50%	91,98%	15,36%
Helbio	36,68%	41,02%	94,05%	3,20%

Tabela 6.4 Eficiências do sistema com eletrolisador e do sistema com reformador.

A diferença nas eficiências das CaC's do sistema com reformador e do sistema com o eletrolisador podem ser explicadas pela diferença demandada durante os 7 dias pelo sistema. As baterias possuem diferença nas eficiências também pela demanda de energia em horários e potências desiguais dos equipamentos. Além disso, em dias sem nuvens as baterias atingem estado de carga completo, gerando desperdício de energia vinda dos painéis fotovoltaicos.

Considerando o alto custo de etanol e o consumo do compressor, ambos em kWh, a eficiência global do sistema com o reformador é significativamente menor que a do eletrolisador, mesmo este último utilizando maior número de painéis fotovoltaicos.

## 6.2 Balanço financeiro

O objetivo deste capítulo é analisar o balanço do projeto avaliando as variáveis do sistema com o eletrolisador e com o reformador. As variáveis em questão são o preço dos painéis fotovoltaicos e do etanol. O custo dos equipamentos reformador e eletrolisador são custos fixos.

Os cálculos para projeção financeira do preço dos painéis fotovoltaicos foram feitos utilizando a plataforma oferecida pelo Portal Solar.

		Reformador	Eletrolisador
Número de painéis	1	2	7
Potência (Wp)	250	500	1750
Energia (kWh/dia)	1,5	3	10,5
Energia (kWh/mes)	45	90	315
Preço painel	R\$ 2.800,00	R\$ 5.600,00	R\$ 19.600,00

Tabela 6.5 Dados gerais painéis fotovoltaicos.

A partir dos dados apresentados na tabela 6.5, foi possível requisitar um orçamento ao Portal Solar sobre o custo dos painéis.

O preço do Eletrolisador Acta foi obtido mediante contato com o fornecedor direto da Alemanha via email.

	Eletrolisador Acta EI 250	Reformador Helbio
Máquina	R\$ 42.005,00	R\$ 147.000,00
Painéis	R\$ 19.600,00	R\$ 5.600,00
Etanol	-	R\$ 7.184,90
Total	R\$ 61.605,00	R\$ 159.784,90

Tabela 6.6 Tabela de preços com relação aos componentes do sistema.

A tabela 7.6 foi feita em um período estimado de 365 dias, com o preço do etanol de  $2,691 \frac{R\$}{L}$ . O número de painéis, como já conhecido, é de dois para o projeto utilizando reformador e sete para o projeto com o eletrolisador. O preço médio de compra e instalação dos painéis está avaliado em R\$2.800,00.

Como o objetivo deste capítulo é apresentar de forma comparativa as finanças, descartaram-se os preços dos bancos de baterias, inversor e os outros componentes do sistema, os quais seriam equivalentes para ambas às situações.

## 7. Conclusões

Neste projeto o eletrolisador Acta EL250 foi analisado como uma alternativa ao reformador Helbio no Sistema Integrado de Fornecimento de Energia Elétrica a Sistemas Isolados da Rede, projeto patrocinado pela empresa Guascor. Os dados experimentais do projeto realizados no simulador, a partir das ferramentas Excel e VBA, foram utilizados como base.

Em um primeiro momento, os dados do reformador foram substituídos pelo eletrolisador a fim de analisar seu comportamento. Testes no simulador para encontrar variáveis que minimizem o uso de energia com o objetivo de alimentar o consumidor de perfil SIGFI 45, definido pela Aneel, foram realizados.

Foi verificado, no capítulo 5, que o eletrolisador necessita de mais painéis fotovoltaicos para garantir um funcionamento em longo prazo em uma cidade como o Rio de Janeiro. Isto ocorre devido a sua alta potência de consumo de energia elétrica, requisitando energia dos painéis fotovoltaicos e das baterias em diversos momentos do dia. O reformador, pelo contrário, não necessita de uma alta quantidade de energia vinda dos painéis fotovoltaicos para funcionar, visto que apenas seu consumo em fase de aquecimento requer alta potência para funcionamento. Todavia, o reformador utiliza o etanol e seu alto poder calorífico para produção de hidrogênio e, com isso, possui mais gastos com a operação.

A eficiência global do sistema com reformador, durante uma semana, é de 3,2%, devido a seu alto consumo de etanol. Enquanto isso, durante o mesmo período, o sistema com eletrolisador possui uma eficiência de 15,5%.

O balanço financeiro, verificado no capítulo 6, apresenta vantagens do eletrolisador com relação ao reformador. Para o sistema com eletrolisador foi considerado o custo de capital do aparelho e dos sete painéis fotovoltaicos. Para o sistema com reformador, que necessita menor número de painéis, apresenta custo do aparelho significativamente

maior que o eletrolisador e, além disso, possui o custo operacional devido ao consumo do etanol que implica em um gasto de  $7,315 \frac{L}{dia}$  de etanol para garantir seu funcionamento.

Neste projeto concluiu-se que o eletrolisador pode ser uma alternativa para o reformador de etanol no Sistema Integrado de Fornecimento de Energia Elétrica a Sistemas Isolados da Rede. Do ponto de vista energético, o eletrolisador é uma alternativa viável ao reformador. A análise do balanço financeiro mostra que com o consumidor de perfil SIGFI 45, o eletrolisador é uma alternativa melhor a reforma do etanol em curto e longo prazo.

## **Bibliografia:**

- [1] Disponível em: <<http://www.oeco.org.br/dicionario-ambiental/28261-gases-do-efeito-estufa-dioxido-de-carbono-co2-e-metano-ch4/>> Acesso em: 1 de Dezembro de 2017
- [2] Souza, Anna Camilla. Simulação numérico-experimental de um sistema híbrido solar/etanol/hidrogênio de geração de energia elétrica. Tese ( Mestrado em Engenharia Mecânica). Pontifícia Universidade Católica. 2017
- [3] Rabaça, Samuel. Disponível em: <<https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/10319/1/Samuel%20Alberto%20Correia%20Raba%C3%A7a.pdf>> Acesso em: 13 de Setembro de 2017
- [4] Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/17>> Acesso em: 17 de Outubro de 2017
- [5] Dos Santos, Fernando. Disponível em <<http://repositorio.ipv.pt/bitstream/10400.19/589/1/C%C3%A9lulas%20de%20combust%C3%ADvel.pdf>> Acesso em: 15 de Outubro de 2017
- [6] Marzitelli, Edna. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/321137>> Acesso em: 11 de Setembro de 2017
- [7] Viola, Luigi. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/123056/000819448.pdf?sequence=1>> Acesso em: 1 de Outubro de 2017
- [8] Bergamin, Ramiro. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/192093882/Artigo-lee-Ramiro>> Acesso em: 7 de Setembro de 2017

[9] Medeiros, William. Padilha, Janine. Disponível em:  
<<https://unila.edu.br/sites/default/files/files/William%20Bartolomeu%20de%20Medeiros.pdf>> Acesso em: 24 de Outubro de 2017

[10] Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/turismo/2013/12/pagina-da-embratur-calcula-quantos-dias-o-usuario-teve-de-sol>> Acesso em: 30 de Outubro de 2017

[11] Farcas, A.C. Disponível em: <  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016341787>>  
Acesso em: 10 de Outubro de 2017