



**Rafael Basso Scalabrin**

**VIABILIDADE DO USO DO HIDROGÊNIO EM GRUPO-  
GERADORES A ETANOL**

**Horizontina**

**2015**

**Rafael Basso Scalabrin**

**VIABILIDADE DO USO DO HIDROGÊNIO EM GRUPO-GERADORES  
A ETANOL**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Adriano Carotenuto, Dr.

**Horizontina**

**2015**

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:**

**“Viabilidade do uso do hidrogênio em grupo-geradores a etanol”**

**Elaborada por:**

**Rafael Basso Scalabrin**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Mecânica

**Aprovado em: 09/11/2015  
Pela Comissão Examinadora**

---

**Prof. Dr. Adriano Carotenuto  
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

---

**Prof. Me. Anderson Dal Molin  
FAHOR – Faculdade Horizontina**

---

**Prof. Dr. Richard Thomas Lermen  
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Horizontina  
2015**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico à minha família que sempre me apoiou nesta caminhada estando como uma base forte e servindo como exemplos em minha vida. Dedico também à minha namorada Thais Kolling, que sempre esteve ao meu lado nos momentos de dificuldade, me apoiando e ajudando no meu crescimento.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos professores que contribuíram para o meu crescimento intelectual durante esta etapa tão importante em minha vida.

Em especial ao meu orientador Dr. Adriano Carotenuto que mesmo em tempo estreito se dispôs com empenho e pró atividade em me auxiliar em todas as dificuldades.

Ao meu amigo Josely Rosa, proprietário do grupo Baram que disponibilizou os principais recursos para que se pudesse concretizar tal estudo.

Uma mente que abre a uma nova ideia jamais  
voltará ao seu tamanho original.

*“Albert Einstein”*

## RESUMO

Atualmente os problemas ambientais e o consumo desenfreado de combustíveis fósseis têm requerido mais atenção. Uma busca para a atualidade é encontrar meios de reduzir este consumo utilizando combustíveis ecologicamente corretos. Um combustível que tem grande abertura para estudo no Brasil, onde possui características ambientais atrativas para sua produção. Este já está sendo aos poucos empregado em grupo-geradores de eletricidade, mesmo sendo menos poluidores ao se comparar os grupo-geradores à diesel. Existe o inconveniente do valor do etanol hoje, o que torna mais restrita a busca por estes modelos de grupo-geradores. Uma solução seria o acréscimo de hidrogênio, elemento abundante no planeta e contém maior quantidade de energia por unidade de massa e de volume, sendo este provido da eletrólise da água, assim o próprio grupo-gerador produz a energia necessária para gerar a eletrólise e produzir o hidrogênio para sua combustão e funcionamento. Visto que o intuito é reduzir o consumo de etanol para fazer com que os grupo-geradores a etanol tornem-se mais atrativos ao mercado, o estudo proposto acrescentou uma determinada quantidade de hidrogênio ao funcionamento de um modelo de grupo-gerador a etanol, assim foi analisado o efeito que o hidrogênio proporciona aos motores ciclo otto e principalmente apresentando o consumo energético para que se possa realizar a eletrólise.

Palavras-chaves:

Hidrogênio -Eletrólise -Etanol

## **ABSTRACT**

Currently environmental problems and the rampant consumption of fossil fuels have required more attention. A search for today is to find ways to reduce this consumption using environmentally friendly fuels. A fuel that has great openness to study in Brazil, where it has attractive environmental characteristics for its production. This is already being gradually employee group generators of electricity, even if less polluting when comparing the group-diesel generators. There is the disadvantage of the amount of ethanol today, which makes the search for more restricted group of these generators models. One solution would be to hydrogen addition, abundant element in the earth and contain more energy per unit weight and volume, which is provided with the electrolysis of water, so that the own group-generator generates the power needed to generate the electrolysis and producing hydrogen for combustion and operation. Since the purpose is to reduce consumption of ethanol to make the ethanol generators Group become more attractive to the market, the proposed study added a certain amount of hydrogen for the operation of an engine-generator model of the ethanol, thereby It analyzed the effect that hydrogen provides the Otto cycle engines and mainly presenting energy consumption so you can perform electrolysis.

Keywords:

Hydrogen -Eletrólise ethanol

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Célula eletrolítica unipolar.....	19
Figura 2: Curva de tensão versus temperatura para eletrólise. ....	20
Figura 3: HHO Hydrogen Gerator Cell Configurator. ....	22
Figura 4: Grupo-gerador a etanol.....	23
Figura 5: PWM de 0 a 45 Amperes. ....	24
Figura 6: Software Geraflex. ....	25
Figura 7: Célula eletrolítica unipolar.....	26
Figura 8: Reservatório de água e Borbulhador.....	27
Figura 9: Entrada de Hidrogênio/oxigênio. ....	28
Figura 10: Fluxometro elétrico. ....	28
Figura 11: Arduino Mega 2560.....	28
Figura 12: Esquema de funcionamento do sistema. ....	29
Figura 13: Grupo gerador apenas com etanol.....	34
Figura 14: Grupo gerador com etanol e hidrogênio.....	35
Figura 15: Consumo de energia Segunda-Feira. ....	38
Figura 16: Consumo de energia Terça-Feira.....	38
Figura 17: Consumo de energia Quarta-Feira.....	39
Figura 18: Consumo de energia Quinta-Feira. ....	39
Figura 19: Consumo de energia Sexta-Feira.....	40

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Rendimentos dos Combustíveis.....	16
Quadro 2: Características de Inflamabilidade e Ignição.....	17
Quadro 3: Temperaturas de auto ignição.....	17
Quadro 4: Características de explosão.....	18
Quadro 5: Parâmetros de funcionamento da 1ª etapa.....	32
Quadro 6: Parâmetros de funcionamento da 2ª etapa.....	33

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1. JUSTIFICATIVA.....	12
1.2. OBJETIVOS GERAIS.....	12
<b>1.2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	<b>12</b>
<b>2. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO</b> .....	<b>13</b>
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>15</b>
3.1. HIDROGÊNIO.....	15
3.2. ELETRÓLISE DA ÁGUA.....	18
3.3. CÉLULA ELETROLÍTICA.....	19
<b>3.3.1. DIMENSIONAMENTO</b> .....	<b>21</b>
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	<b>23</b>
4.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	23
4.2. METODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS.....	30
<b>4.2.1. DIMENSIONAMENTO</b> .....	<b>30</b>
<b>4.2.2. OBTENÇÃO DE DADOS</b> .....	<b>30</b>
<b>5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>32</b>
5.1. 1ª ETAPA.....	32
5.2. 2ª ETAPA.....	33
5.3. 3ª ETAPA.....	34
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	<b>36</b>
<b>7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>36</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>37</b>
<b>APÊNDICE A – CONSUMO DA REDE ELÉTRICA</b> .....	<b>38</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A grade descoberta do motor de combustão interna, no século XVII, por Nikolaus August Otto, foi um marco na história, proporcionando um grande crescimento tecnológico, tal invenção revolucionou a forma do homem trabalhar, facilitando desde sua locomoção, manuseio pesado ou até mesmo na geração de energia elétrica através dos grupo geradores.

Por mais antigo que possa ser, o motor ciclo Otto é uma máquina de rendimento aceitável. Muitas melhorias foram desenvolvidas desde seu nascimento, porém o conceito básico de funcionamento permanece o mesmo.

Dentro da família dos motores ciclo Otto, que tem por característica fundamental o uso de uma faísca para a ignição, diversos tipos de combustíveis são utilizados para seu funcionamento, dentre eles podemos citar a gasolina, o GLP e o etanol.

O etanol tem sido utilizado com pouco interesse em muitos países, porém sua exploração tem sido estudada com grande intensidade no Brasil, já que a produção de cana de açúcar (principal forma de extração do etanol no Brasil) é favorecida pelo terreno e clima aqui encontrados.

Devido aos problemas ambientais vistos hoje tornam cada vez maior a busca por combustíveis “ecologicamente corretos”. O etanol por sua vez possui características ecológicas favoráveis se comparados aos combustíveis fósseis hoje utilizados, o que torna ainda mais relevante sua utilização, porém devido suas características desfavoráveis em partidas frias (ignição inicial do motor em temperatura ambiente) faz com que o mesmo perca espaço no mercado.

Uma das mais recentes utilidades foi a implantação de motores a etanol em grupo-geradores elétricos, contudo ainda são uma minoria se comparados aos geradores que utilizam motores diesel. A aposta vem pelo apelo de equipamento ecologicamente corretos, infelizmente este apelo ainda não tem forças suficiente para ir a frente, já que o etanol possui um rendimento menor e custo maior se comparado ao diesel por exemplo.

Para poder derrubar o uso de combustíveis que agridem o meio ambiente o foco deve ser meios de economizar o uso dos combustíveis “corretos”, já que a eficiência dos motores ciclo Otto é menor se comparada a motores ciclo Diesel. Assim ao produzir o mesmo trabalho com um consumo menor poderá ter características economicamente atrativas para ser viável a substituição de geradores a diesel por geradores a etanol.

Quem hoje buscar por meios de economizar combustível, encontrará meios que prometem reduzir o consumo de combustível. A utilização destas células têm sido difundida pela mais diversas fontes levando a muitos investirem simplesmente pelo entusiasmo e pela esperança de conseguir economizar o máximo de combustível possível.

Em resumo, esta célula funciona com o princípio da eletrólise, ou seja, aplicasse uma determinada corrente elétrica em eletrodos inertes submersos em H<sub>2</sub>O líquido (água), contendo também um eletrólito que possibilite a condução de eletricidade através do fluido, podendo ser ácido ou básico. Assim, a reação quebrará a molécula de H<sub>2</sub>O, resultando em hidrogênio e oxigênio na forma de gás. O hidrogênio é inflamável e sua detonação resulta na liberação de grande quantidade de energia. Entretanto, a água possui uma ligação muito forte e difícil de ser quebrada.

Busca-se de forma prática e eficiente utilizar a energia do hidrogênio através de sua detonação, assim ao misturar o hidrogênio ao etanol, quando houver a detonação no interior dos motores a mesma será mais eficiente já que o hidrogênio necessita de uma quantidade de energia menor se comparada ao etanol para sua detonação, completando toda a queima do etanol que não conseguiu ser queimada no momento da ignição (característica comum em motores ciclo Otto).

### 1.1. JUSTIFICATIVA

Este estudo possui um caráter explicativo, buscando assim desmistificar o assunto que muitas vezes é apresentado sem nenhum respaldo técnico ou sem testes comprobatórios, busca apresentar também os efeitos que implantação de uma célula eletrolítica traz à um grupo-gerador a etanol, bem como os resultados obtidos ao adicionar hidrogênio na combustão de motores a etanol.

### 1.2. OBJETIVOS GERAIS

Obter parâmetro das alterações que ocorrem em um grupo-gerador a etanos ao se implantar um sistema de célula eletrolítica

#### 1.2.1. Objetivos Específicos

- Analisar o consumo de corrente elétrica necessária para o funcionamento da célula eletrolítica.
- Verificar a influência da adição de hidrogênio na combustão de um motor ciclo otto a etanol.

## 2. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

O emprego do hidrogênio em motores ciclo otto vem desde o século XIX. Em 1820 o reverendo W. Cecil fez os primeiros testes do hidrogênio como combustível em um motor a vácuo, neste sistema o vácuo era criado pela queima da mistura de hidrogênio e oxigênio que era expandida e logo após arrefecida. Sessenta anos depois, Nikolaus August Otto experimentou um gás sintético que possuía 50% de hidrogênio em seus motores a combustão, porém achou muito perigoso, então desenvolveu o carburador para que pudesse trabalhar com a gasolina, que em sua concepção era mais segura (ALEXANDRE, 2012).

No livro Energia Solar e Hidrogênio, Perrier (1980) já nos mostra o emprego do hidrogênio em motores ciclo Otto e em automóveis. Ele mesmo desenvolveu em 1979, na França, um dos primeiros veículos a funcionar com hidrogênio puro. Outro veículo apresentado foi o Datsun (veículo japonês) que funcionava com hidrogênio líquido, tendo autonomia de 650 km e velocidade máxima situada entre 80 a 88 km/h. Já em 1979 foi apresentado um veículo que também utilizava hidrogênio como combustível e tinha a capacidade de atingir a velocidade de 120 km/h.

Não é de hoje que o hidrogênio tem sido estudado como combustível. Com a escassez cada vez maior dos combustíveis fósseis não será uma questão de escolha o uso do hidrogênio, mas sim de necessidade. É visto que as propriedades do hidrogênio como combustível são inúmeras. Perrier (1980) nos mostra que comparado à gasolina, os motores a hidrogênio possuem 30% mais potência, não são poluentes e não geram monóxido de carbono, sendo que o principal resíduo da combustão do hidrogênio é água.

Não apenas o hidrogênio puro é benéfico. Hoje a maioria da frota de veículos usa combustíveis fósseis como a gasolina, e são nesses veículos que há uma necessidade do emprego do hidrogênio, não como combustível único, mas como um complemento, um aditivo, pois as características do hidrogênio trariam e trazem melhoras no consumo e no desempenho destes motores. Ao se aplicar o hidrogênio como auxílio a combustão da gasolina em regimes magros, baixas cargas e baixas rotações do motor, pode-se perceber uma melhor queima do combustível tornando a combustão mais uniforme e eficaz e os poluentes são reduzidos como o CO que diminui com o aumento do nível de hidrogênio injetado (JI e WANG, 2010).

Não obstante, motores a gasolina não são os únicos que possuem relatos de melhoras com o uso do hidrogênio. Com o apelo crescente por energias renováveis

e cuidado ao meio ambiente, outro combustível que têm ganhado atenção é o etanol, que pode ser obtido através da cana de açúcar como ocorre no Brasil. O etanol por outro lado possui algumas desvantagens se comparado a gasolina que podem ser facilmente resolvidas com o uso do hidrogênio conforme Ji *et. al.* (2014) nos traz: Devido às decrescentes reservas de combustíveis fósseis foi necessário a busca por combustíveis alternativos. O etanol tem sido uma opção vantajosa, porém devido ao seu elevado calor latente e baixo desempenho no arranque e em condições de baixa temperatura são características que barram o desenvolvimento deste combustível. No entanto o hidrogênio possui um baixo consumo de energia para ignição e uma elevada velocidade de propagação de chama, assim a adição de hidrogênio ao etanol tende a melhorar o desempenho do motor a etanol.

Voltando a um recente combustível que está ganhando mercado, o gás metano, seus benefícios abrangem também aos motores que utilizam este combustível. Morch *et. al.* (2010) relata que por mais que o metano possua reservas abundantes ainda tem características que tornam sua detonação lenta, necessitando mais energia para que a mesma ocorra. Novamente o hidrogênio vem para resolver este problema com suas características de fácil detonação e chama laminar com velocidade superior ao se comparar com a chama do metano.

Silva (1991, p.135) já afirmava que os grupo geradores são uma possível forma de se obter energia elétrica através do hidrogênio: “Quanto a conversão do hidrogênio em eletricidade, a tecnologia hoje disponível (comercialmente) é a dos motores-geradores que apresentam baixa eficiência global.”

Em 1923, John Burden Sanderson Haldane, em uma palestra na Universidade de Cambridge, afirmou que a energia do hidrogênio tornar-se-ia o combustível do futuro. Chegou a relatar como o hidrogênio seria produzido, armazenado e empregado (RIFKIN, 2003).

Na história já houve muitos relatos do emprego do hidrogênio, como por exemplo, nos anos 20 e 30 foi utilizado como combustível em aviões ou até mesmo como combustível auxiliar nos Zeppelins. Nos anos 30 e 40 a Alemanha e Inglaterra estudavam seu uso em automóveis, caminhões, locomotivas e submarinos (RIFKIN, 2003).

Rifkin (2003) ainda nos traz em 1988 a União soviética conseguiu adaptar um avião que transportava passageiros a usar parcialmente o hidrogênio como combustível. Neste mesmo ano William Conrad foi o primeiro a pilotar um aeroplano

somente a hidrogênio líquido. Em 1994 foi visto nas ruas de Geel, na Bélgica os primeiros ônibus abastecidos com hidrogênio e um ano depois Chicago começou a fazer os mesmos experimentos em seus ônibus urbanos.

Estêvão (2008) ainda nos afirma que hoje existem fabricantes de automóveis que desenvolvem veículos movidos a hidrogênio, onde que a queima do hidrogênio é 50% mais eficiente ao se comparar com a queima da gasolina, tendo alguns traços de óxido de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), mas são quantidades insignificantes ao comparar com os benefícios que o hidrogênio traz perante aos combustíveis fósseis.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este item consiste em apresentar o embasamento teórico referente aos principais assuntos abordados, explanando os tópicos mais relevantes e condizentes sobre o estudo proposto.

Teve como fonte de pesquisa livros, artigos e periódicos referentes ao tema.

#### 3.1. HIDROGÊNIO

A primeira descoberta do hidrogênio foi relatada por Theophrastus Bombast von Hoheheim, conhecido também por Paracelso, no século XVI por meio de reações entre metais e ácidos (ANDREWS, 1968). Até então Paracelso não sabia que o gás resultante desta reação se dava a um novo elemento químico. Robert Boyle, em 1671, redescobriu a reação utilizando limalhas de ferro e ácidos diluídos. A Henry Cavendish são dados os créditos pela descoberta de um novo elemento químico, pois em 1766 tratou suas propriedades com distinção dos demais elementos, dando o nome de “ar inflamável”. O Nome hidrogênio originário do grego *hydro*(água) e *genes*(gerar) foi dado por Antoine Lavoisier em 1783. Cavendish e Lavoisier descobriram que o produto da combustão do hidrogênio era a água (STWERTKA, 1996).

Nas condições normais de temperatura e pressão, o hidrogênio é um gás incolor, inodoro, insípido e de baixa densidade, sendo mais leve que o ar. (KOTZ e TREICHEL JR, 2002).

O hidrogênio está presente em toda a Terra, compreende 70% de toda superfície terrestre e pode ser encontrado principalmente na água, Combustíveis fósseis e todos seres vivos (RIFKIN, 2003).

Perrier (1980) traz algumas características importantes referente ao hidrogênio, sendo que o mesmo possui uma densidade 15 vezes menor e uma condutividade térmica 7 vezes maior se comparado ao ar. Outra informação é que o hidrogênio inflama espontaneamente a partir de 585°C, o metano a 540°C e a gasolina entre 228 a 471°C.

Para apresentar comparativos de rendimento mecânico num motor e rendimento de armazenamento de diferentes combustíveis, Perrier (1980) nos traz dados representados no quadro 1 onde referem-se ao uso direto de algumas das principais fontes de energia de motores, sendo estas providas de reservatórios incorporados aos mesmos.

Rendimento Mecânico		Rendimento de Armazenamento	
Hidrogênio	33%	Hidrogênio	95%
Metanol	28%	Hidreto	90%
Gasolina	25%	Metanol	95%
Eletricidade	80%	Gasolina	95%
		Eletricidade	49%

Quadro 1: Rendimentos dos Combustíveis. Fonte: Adaptado de Perrier, 1980.

Para a análise do que compõem a água e suas proporções, bem como comparações energéticas, Perrier (1980) nos mostra:

O hidrogênio constitui um vetor energético inesgotável, visto ser rapidamente reciclável; Um metro cúbico de água contém 888 litros de oxigênio, 111 de hidrogênio, e 1 de elementos diversos, ou seja, o equivalente energético de 470 litros de gasolina, sendo contudo necessário dispendir uma energia superior no momento da eletrólise ou do *cracking* termoquímico. Para separar o hidrogênio do oxigênio.

Estêvão (2008) traz as propriedades únicas do hidrogênio, tais como sua energia por unidade de massa é superior a qualquer outro combustível, sendo 120700 kJ/kg, bem como a maior quantidade de energia por unidade de peso: 141,9 MJ/kg representando que 1kg de H representa a mesma quantidade de energia que 2,8kg de gasolina e sua massa específica é de 0,08967 kg/m<sup>3</sup>, sendo o ar 14,4 vezes mais denso que o hidrogênio.

Outras características importantes que deve-se levar em consideração é que a chama do hidrogênio possui uma emissividade de luz muito baixa, sendo 17 a 25%, muito menor se comparada a chama da gasolina, por exemplo, que possui uma emissividade de 34 a 43%, tornando assim dificultosa a percepção da chama

do hidrogênio. Outra característica da chama do hidrogênio é que de ser mais quente ao se comparar aos demais hidrocarbonetos, esta possui 38kWh/kg de densidade energética, contra 14 kWh/kg da gasolina. A energia para a ignição do hidrogênio é muito baixa, cerca de 0,04 MJ, contra os 0,25 MJ dos hidrocarbonetos. A inflamabilidade do hidrogênio no ar é outro ponto importante, pois necessita de 4% a 75% de hidrogênio por volume de ar, não obstante o hidrogênio é mais volátil que os demais hidrocarbonetos, assim tende-se a se dispersar mais rapidamente no ar (ESTÊVÃO, 2008).

O comparativo entre a inflamabilidade e ignição do hidrogênio, gasolina, GLP, metano e etanol bem como suas temperaturas de auto ignição, características de explosão podem ser vistas nos quadro 2, 3, e 4.

Limites de inflamabilidade (% em ar)					
	Hidrogênio	Metano	Propano	Gasolina	Etanol
Limite inferior	5	5.3	2.1	1	4
Limite superior	75	15	9.5	7.8	17

Quadro 2: Características de Inflamabilidade e Ignição. Fonte: Adaptado de Estêvão 2008 *apud* Cracknell, 2002 e Cartagena 2013.

Temperaturas de autoignição (°C)					
	Hidrogênio	Metano	Propano	Gasolina	Etanol
Mínima	585	540	487	228-471	368
Jato de ar aquecido (0.4 cm de diâmetro)	670	1220	885	1040	-
Fio de nicromo	750	1220	1050		

Quadro 3: Temperaturas de auto ignição. Fonte: Adaptado de Estêvão 2008 *apud* Cracknell, 2002 e Petrobras, 2015.

Limites de detonabilidade (% em ar)				
	Hidrogênio	Metano	Propano	Gasolina
Limite inferior	11-18	6.3	3.1	1.1
Limite superior	59	13.5	7	3.3
Velocidade máxima queima de laminar (m/s)	3.46	0.43	0.47	
Concentração no máximo (%)	42.5	10.2	4.3	
Velocidade de queima laminar estequiométrica (m/S)	2.37	0.42	0.46	0.42
Concentração estequiométrica (%)	29.5	9.5	4.1	1.8

Quadro 4: Características de explosão. Fonte: Adaptado de Estêvão 2008 *apud* Cracknell, 2002.

### 3.2. ELETRÓLISE DA ÁGUA

“Denomina-se eletrólise uma reação química conduzida em sua direção não espontânea pela imposição da passagem de uma corrente elétrica” (RUIZ e GUERRERO, 2002).

William Nicholson e Anthony Carlisle foram os primeiros a demonstrar a decomposição da água em 1800, formalizando o início da eletrólise. Em 1832 Faraday provou que a quantidade de eletricidade usada e a identidade do produto estão diretamente relacionadas a quantidade de um produto formado pela eletrólise. Tais conclusões deram origem as *leis de Faraday* (RUIZ e GUERRERO, 2002).

A eletrólise da água consiste na passagem de uma determinada corrente elétrica para decompor a água em oxigênio e hidrogênio, contudo o processo de eletrólise é um processo caro, que demanda de uma quantidade grande de energia para quebrar a ligação da água, já que a mesma é considerada uma ligação forte. Sendo assim o processo da eletrólise da água é considerado por muitos um processo desvantajoso. Este processo só será competitivo a medida que o gás natural se tornar mais escasso e caro, afirma Silva (2005).

Silva (1991) traz a definição de como ocorre a transferência de energia para que ocorra a eletrólise e como esta energia flui através da água: “Em geral, o fornecimento de tensão e corrente é feito através de eletrodos, entre os quais existe

um meio condutor iônico, que pode ser líquido (soluções eletrolítica, sal fundido) ou sólido (membrana de ácidos sólidos, cerâmicas permiônicas)”.

### 3.3. CÉLULA ELETROLÍTICA

Existem diferentes modelos de sistemas de eletrólise da água, uma delas é realizada através de células eletrolíticas, sendo que a mais usual é conhecida como arranjo unipolar, conforme mostrado na Figura 1. Silva (1991) traz que este modelo de célula unipolar possui um custo por unidade de área menor, porém requerem altas correntes e baixas tensões o que acaba obrigando o uso de condutores mais resistentes. Estes sistemas possuem uma eficiência da faixa de 70 a 80% e trabalham entre 70 e 80°C. Estas células são muito usadas devido sua manutenção e construção mais simplificada.

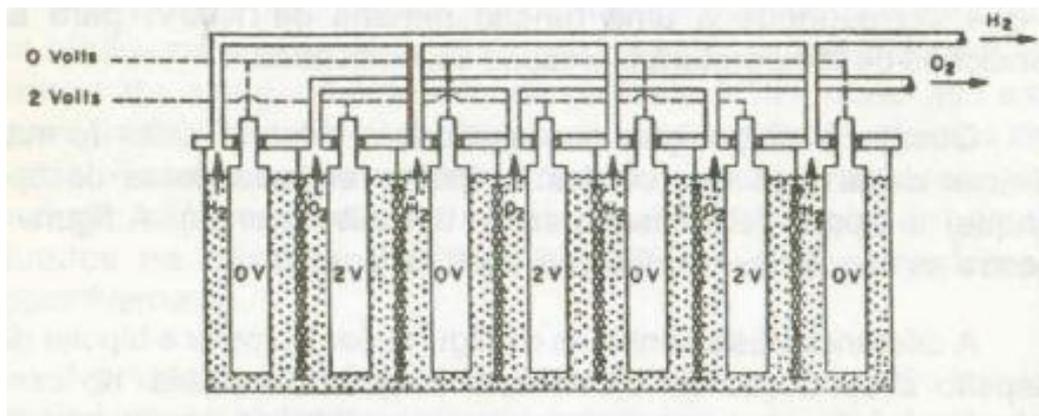


Figura 1: Célula eletrolítica unipolar. Fonte: Silva, 1991

RUIZ e GUERRERO (2002) afirmam que o processo de eletrólise em água pura não ocorrerá, pois a concentração de íons é muito pequena, porém ao acrescentar algum tipo de eletrólito aumentara a concentração de íons e ocorrerá a eletrólise.

Silva (1991) apresenta um exemplo de eletrólito muito empregado para a eletrólise:

Por razões práticas, na grande maioria dos casos o eletrólito das células convencionais e modernas constitui-se de uma solução básica forte, em geral hidróxido de potássio (KOH) dissolvido em água deionizada, sendo respeitadas algumas condições mínimas de pureza. A concentração de eletrólito, a temperatura e pressão de operação são otimizadas para cada modelo de célula, em geral situadas na faixa de 25-30%, 70-100°C e 1-20 atmosferas, respectivamente.

Deve-se observar que ao efetuar o processo de eletrólise qualquer impureza presente na água e/ou no eletrólito, irá se acumular nas placas aumentando a resistividade, conseqüentemente aumentando o consumo de energia para produzir a mesma quantidade de hidrogênio, sendo assim o uso de KOH deve manter a resistividade da água inferior a  $10^6$  ohm/cm (RIFKIN, 2003).

Para realizar o processo de eletrólise os valores de corrente necessários dependem de alguns fatores, tais como a área das placas, condutividade do eletrólito, qualidade dos condutores, dentre outros. Porém os valores de tensão ocupam zonas que diferem a eficiência obtida na eletrólise. A Figura 2 nos mostra a zona que cada tensão ocupa.

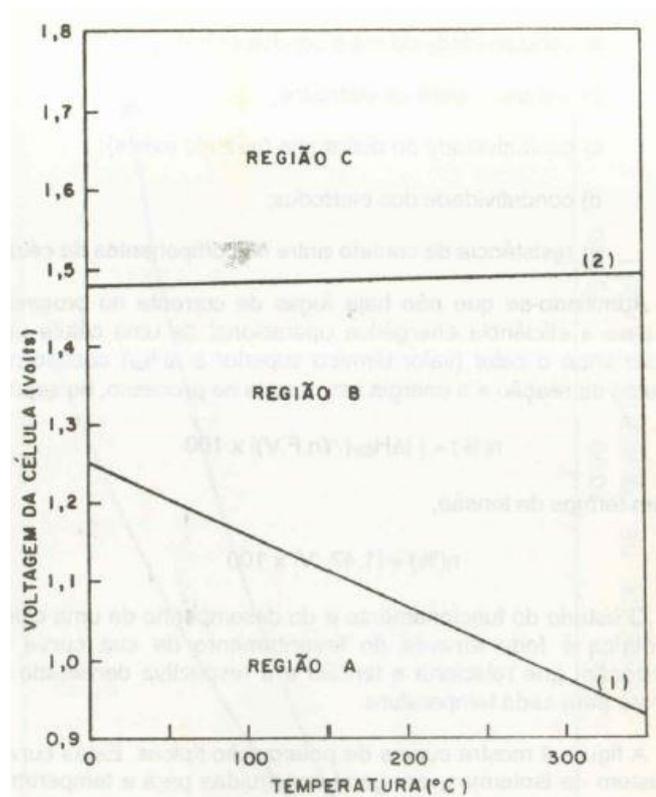


Figura 2: Curva de tensão versus temperatura para eletrólise. Fonte: Silva, 1991

A região A apresentada na Figura 2 refere-se a uma região onde que a geração de hidrogênio é impossível pela tensão que ocupa esta região ou seja, segundo as leis da eletrólise de Faraday para que ocorra a eletrólise deve-se possuir uma tensão mínima, qualquer valor abaixo tensão não ocorrerá eletrólise.

A Região B é onde ocorre a eletrolise no melhor rendimento possível através da corrente fornecida com o mínimo de calor desperdiçado, nesta faixa de tensão é onde ocorrerá o processo de eletrólise com maior eficiência.

Na região C ocorre a eletrólise gerando o hidrogênio, porém devido as altas tensões que estão presentes nesta região ocorre o desperdício desta energia, ou seja, qualquer valor acima da tensão máxima para que ocorra eletrólise será desperdiçada em forma de calor.

### 3.3.1. Dimensionamento

Faraday foi que destinou parte da sua vida ao estudo da eletrólise, tanto que existem hoje as Leis da Eletrólise de Faraday, essas leis foram enunciadas na metade do século XIX e são elas:

- I. *A quantidade de matéria produzida ou decomposta em uma célula eletroquímica é proporcional à quantidade da eletricidade que passa através da célula.*
- II. *A quantidade de substância depositada ou dissolvida em uma célula eletroquímica é diretamente proporcional a sua massa molar.*

Estêvão (2008, p.22 *apud* The new Caxton Encyclopedia Volume VII, 1979) nos traz de uma forma mais clara e direcionada ao assunto proposto, onde diz que “(...) a massa de qualquer substância liberada na eletrólise, é diretamente proporcional à quantidade de corrente elétrica que passa através da solução. Essas mesmas massas libertadas são proporcionais aos seus pesos equivalentes”.

Para que se possa dimensionar uma célula eletrolítica é necessário levar em considerações algumas leis da eletrólise de Faraday, tais como:

- Faraday determinou que uma polegada quadrada de superfície de uma placa pode distribuir eficientemente 0,54 amperes.
- Ele nos diz que um ampere distribuídos em duas placas adjacentes, pode produzir 0,01044 litros por minuto de gás hidrogênio e oxigênio.
- O volume de hidrogênio por mole é 24.45 litros na temperatura de 25°C.
- Podem-se obtidos 0,0114 litros de gás hidrogênio e oxigênio por minuto por ampere por célula.

Um entusiasta e estudioso do tema eletrólise chamado Milos Panic contribuiu para o estudo das células eletrolíticas, aplicando as leis de Faraday mencionadas em um programa para dimensionar tais células eletrolíticas. A Figura 3 nos mostra a aparência deste programa que pode ser encontrado no site [www.hho4free.com](http://www.hho4free.com).

Neste programa pode ser colocado os valores de tensão de operação (*Operating Volts DC*), onde que neste caso seria a tensão provida da bateria do grupo gerador. Coloca-se também quantas placas neutras (*Series Plates*) pretende utilizar somada a uma placa energizada, estas placas neutras tem a finalidade de dividir a tensão da bateria afim de se obter a tensão especifica para a eletrólise, este grupo de placas neutras e placas energizadas formam uma célula (*Stacks*), no programa pode-se incluir quantas células pretende-se trabalhar. Adiciona também as dimensões em centímetro ou polegadas (*Plate Length e Plate Width*) das placas que formarão a célula eletrolítica. A carga que irá alimentar cada célula (*Operating Amps Per Stack*) pode ser estipulada tendo assim um controle separado por célula. O programa então traz como resultado a quantidade total de energia que consumirá e a produção de gás oxigênio e hidrogênio que produzirá em litros por minuto (LPM).

Please select the measuring units

Metric system (1 cm.)  Inches (1inch = 2,54 cm.)

Flat Plate | Unipolar Cell Configurator | Cell Dimension | Instructions - Uputstvo

Settings

**Start by entering Operating Voltage and Number of Plates 2 to 2.5 volts is recommended Per Water Cell Area**

Operating Volts DC:  # Series Plates:  # Stacks:  Volts Per Water Cell:  # Water Cells:

Settings

**Next enter size of Plates and Operating Amps** **Number of Plates and Amperage will determine HHO Liter/Minute**

**Rectangle Gaskets**

**Active surface**

Plate Length (cm/in.):  Plate Width (cm/in.):  Plate SQ (cm/in.):

Operating Amps Per Stack:  Maximum Amps Per Stack:  Total Amps:  Watts:

**Generator Size**

Length:  Width:  Depth:  Separation Cell Depth:

**Circle Gaskets**

**Active surface**

Round Gasket Inside Dia (cm/in.):  Plate SQ (cm/in.):  Total Active SQ (cm/in.):

Operating Amps Per Stack:  Maximum Amps Per Stack:  Total Amps:  Watts:

**Generator Size**

Diameter:  Depth:  Separation Cell Depth:

LPM:  H2:  O2:

Instructions: Change the values in Red - Calculations will start automatically.  
Be careful with inputs numbers and decimal points.  
HHO milliliters (ML) is based on 0.000375 CFM per amp per Water Cell  
Liter Per Minute is a close guess

X Close

Figura 3: HHO Hydrogen Gerator Cell Configurator.

## 4. METODOLOGIA

Será apresentado os métodos e técnicas utilizados para elaborar o estudo proposto, de forma sucinta e clara, afim de possibilitar um bom entendimento para que o estudo possa ser reproduzido a quem tiver interesse.

### 4.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Para que se pudesse realizar o estudo proposto foi utilizado de alguns instrumentos de medição e de controle.

Na Figura 4 está representado o grupo-gerador utilizado para o experimento trata-se de um gerador que possui um motor de combustão interna de modelo FPT E-TroQ 1.8 flex fabricado pela Fiat que utiliza como combustível o etanol. O mesmo está equipado com uma injeção eletrônica GCMD-01 (Grameyer Ccontrol para Motor Digital).



Figura 4: Grupo-gerador a etanol.

Para a medição de corrente provida da bateria para o funcionamento da célula eletrolítica foi utilizado um amperímetro analógico tendo sua escala de 0 a 50 amperes ligado em série entre a bateria do grupo gerador e o controlador PWM.

Para que se pudesse medir a quantidade de etanol consumida foi mensurado seu volume devido à baixa variação de temperatura nos dias de testes a massa de etanol não sofreu alterações consideráveis influentes aos resultados do estud. Desta forma para fazer o abastecimento do reservatório de etanol do grupo gerador foi utilizado um copo Becker com capacidade de um litro, facilitando assim a obtenção dos valores de consumo direto de etanol.

Sabendo que devido à adição do soluto hidróxido de potássio, a água utilizada para a eletrólise passou a ser condutora, para ter um melhor controle da corrente necessária para o estudo foi utilizado um controlador de corrente chamado de PWM (Pulse Width Modulation) ou Modulação de Largura de Pulso. Este equipamento ilustrado na Figura 5 pôde restringir a quantidade de corrente utilizada pela célula eletrolítica, tornando possível variar a corrente utilizada de 0 a 45 amperes.



Figura 5: PWM de 0 a 45 Amperes.

Todo motor que utiliza injeção eletrônica possui dentre vários, um sensor fundamental: o sensor MAP (Manifold Absolute Pressure, ou Pressão Absoluta no Coletor), que tem a função de enviar informações para a centralina o valor da depressão no coletor de admissão. Esta leitura serve para que a mesma calcule o

avanço do ponto de ignição e a quantidade de combustível a ser injetada. Foi utilizado um programa computacional Geraflex disponibilizado pela fabricante do grupo-gerador que pôde fazer as leituras dos sensores do motor e manipular estas informações (Figura 8). Além de ter o acompanhamento do funcionamento do motor, foi possível modificar para que se pudesse obter o melhor rendimento.

As principais leituras realizadas foram:

- Força do motor – A força exercida pelo motor para supria a demanda do gerador, representada por porcentagem da força total;
- Map – A depressão no coletor de admissão, ou seja, o vácuo formado para ser preenchido pelo ar atmosférico no momento da admissão;
- Posição da borboleta – A porcentagem de abertura da borboleta. Quanto mais aberta maior será a entrada de ar, e conseqüentemente, maior será a admissão de combustível.
- Tempo de bico aberto – O tempo que os bicos injetores ficam abertos, representado em milésimos de segundo.

Outros parâmetros como rotação do motor, tensão da bateria, temperatura da água de arrefecimento, temperatura do motor e quantidade de combustível no tanque também podem ser analisadas.



Figura 6: Software Geraflex.

O gerador de hidrogênio utilizado para o experimento é conhecido por célula eletrolítica, a qual tem seu funcionamento baseado em placas carregadas por uma tensão provida da bateria, estas placas possuem furos onde que fluirá a mistura de água e hidróxido de potássio. Existe também uma vedação entre as placas, para que possa ser isolada a polaridade da tensão. A Figura 7 mostra um gerador de hidrogênio do tipo célula eletrolítica unipolar.



Figura 7: Célula eletrolítica unipolar.

Para que se pudesse ter um sistema de fácil operação e para facilitar o funcionamento da célula eletrolítica, foi necessário um reservatório conforme Figura 8, neste reservatório estava disposto a água com uma mistura de hidróxido de potássio com concentração de 25%.

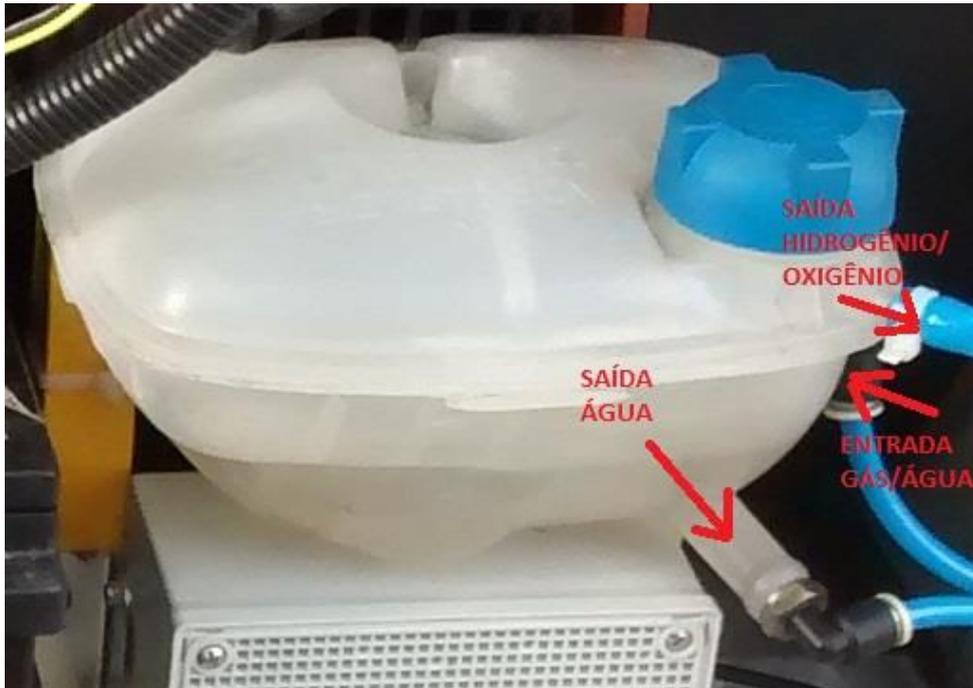


Figura 8: Reservatório de água e Borbulhador.

Assim que a água passa pela célula eletrolítica e recebe a descarga da bateria ocorre a eletrólise, resultando na produção de hidrogênio e oxigênio, porém estes dois gases ocupam mais espaço no interior da célula ao se comparar com a água, gerando uma pressão, esta pressão faz com que uma mistura de gás e água seja expelida pelo orifício de saída, necessitando uma separação posterior. Com esta situação foi necessário um recipiente denominado borbulhador conforme ilustrado na Figura 8. A mistura que entra é separada por diferença de nível, ou seja, o líquido se acomoda na parte de baixo do borbulhador, tendo escape de retorno para a célula eletrolítica, já o gás como é menos denso se acomoda na parte superior do borbulhador, onde que o mesmo possui uma saída que está ligada indiretamente a entrada de ar do veículo conforme mostrado na Figura 9.

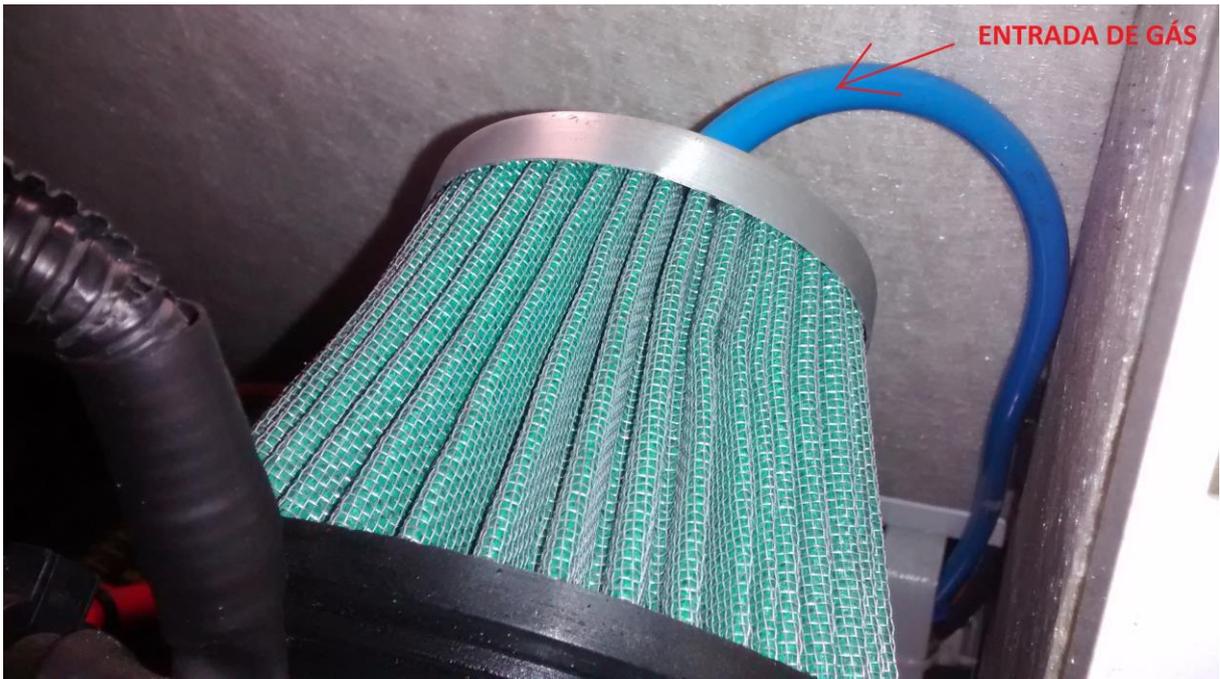


Figura 9: Entrada de Hidrogênio/oxigênio.

Assim que o gás passa pelo borbulhador tem-se então o produto de hidrogênio e oxigênio pronto para uso. Para realizar os testes foi necessário medir a quantidade de gás que estava sendo produzida, para isso foi utilizado um fluxometro elétrico, que pode medir uma vazão de 0,3 a 6 L/min (Figura 10). Para obter os valores de medição deste fluxometro foi necessário também o uso de uma placa Arduino Mega 2560 R3 ilustrada na Figura 11.



Figura 10: Fluxometro elétrico.

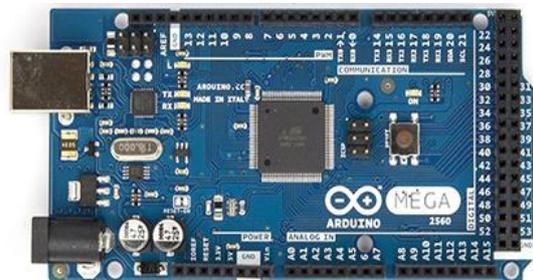


Figura 11: Arduino Mega 2560.

Para melhor entendimento, podemos verificar na Figura 12 o sistema instalado, onde podem ser visualizados os componentes constituintes, bem como as ligações e suas seqüências de fluxo:

- Reservatório de água e borbulhador;
- PWM;
- Amperímetro analógico;
- Fusível de segurança;
- Disjuntor
- Célula Eletrolítica.
- Saída de água com eletrólito (KOH);
- Entrada de gás com água e KOH;
- Saída de oxigênio e hidrogênio para o motor.

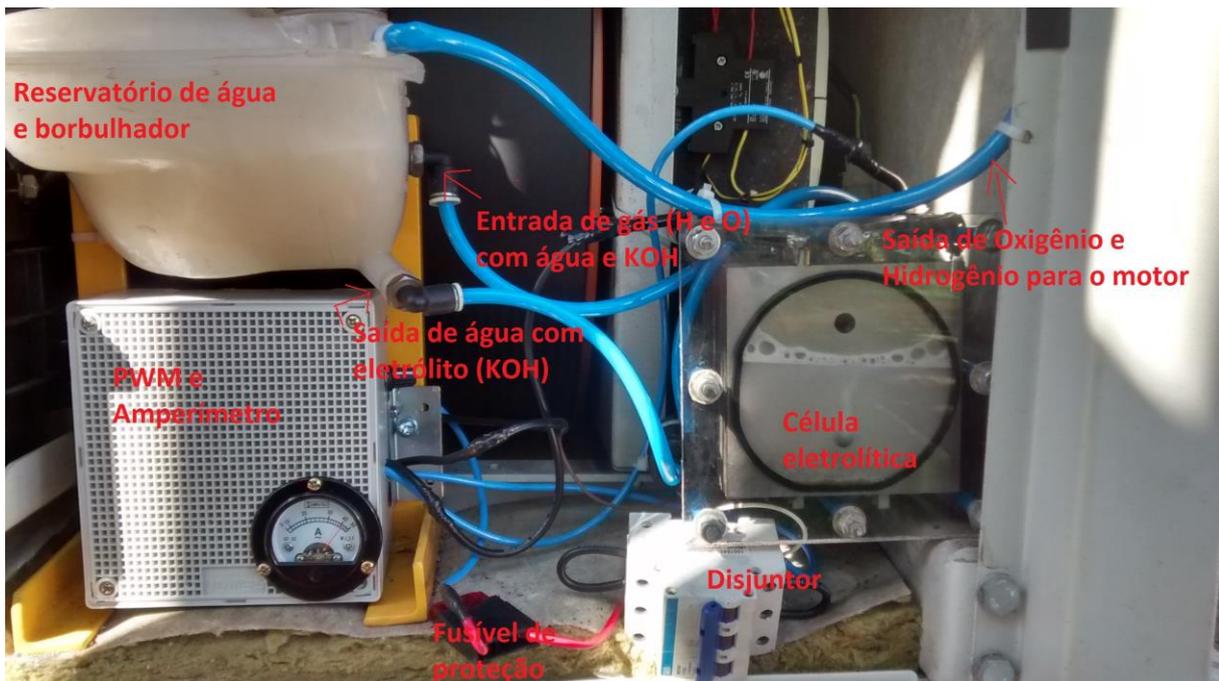


Figura 12: Esquema de funcionamento do sistema.

## 4.2. METODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS

Serão apresentados os principais métodos e técnicas utilizados para a elaboração do estudo de forma que possibilite uma reprodução do mesmo.

### 4.2.1. Dimensionamento

Ao dimensionar a célula geradora de hidrogênio e a corrente que foi utilizada, se fez necessário inicialmente, saber qual a corrente disponível pelo motor, ou seja, qual a quantidade de corrente estaria disponível pelo alternador do grupo-gerador.

Tendo então que o consumo de corrente para o funcionamento do motor do grupo-gerador é de 23 amperes de uma capacidade total do alternador de 110 amperes foi possível analisar qual a melhor proporção de corrente a se utilizar para que se tenha a melhor produção de hidrogênio.

Subtraindo da capacidade máxima do alternador o valor de corrente utilizada para o funcionamento do motor obtém-se um valor de corrente de 87 amperes disponível para o funcionamento da célula eletrolítica, sobretudo os componentes elétricos como o amperímetro analógico e PWM possuem uma capacidade máxima de corrente de 50 e 45 amperes respectivamente. Assim foi possível dimensionar da melhor forma possível a célula eletrolítica não extrapolando as capacidades, tanto do alternado, como do amperímetro e PWM.

Utilizado então o software *HHO Hydrogen Generator Cell Configurator* e se obteve uma célula eletrolítica com capacidade de produção de 3 litros de hidrogênio e oxigênio por minuto (LPM) que necessitaria uma corrente de 45 amperes para tal produção.

### 4.2.2. Obtenção de dados

Inicialmente teve-se de realizar o estudo dos padrões de consumo de combustível normais do gerador a etanol para que assim possamos ter a base de cálculo.

Os estudos partiram de leituras do consumo do grupo-gerador em funcionamento normal. O grupo-gerador analisado possui uma velocidade de rotação fixada pela fabricante em 4700 rpm. Para cada teste, o tempo de funcionamento para obtenção dos dados foi no horário de funcionamento do centro administrativo da empresa Baram Equipamentos, sendo este horário das 8:00hs até

as 18:00hs abrangendo dois turnos de trabalho totalizando um período de 10hs. Afim de que se possam analisar tais consumos, foi utilizado o copo Becker graduado para mensurar o consumo de etanol, já para as leituras de consumo de corrente da bateria foi utilizado o amperímetro analógico.

Tal estudo foi realizado em três etapas:

1ª Etapa: Analisou-se o consumo de etanol e corrente da bateria nos padrões normais de funcionamento, sem o uso da célula eletrolítica.

2ª Etapa: Verificou-se o impacto do consumo de corrente necessária para pôr em funcionamento a célula eletrolítica. Foi feito então as mesmas medições de consumo de etanol na rotação e tempo citados anteriormente, tendo a célula eletrolítica ligada à bateria e injetado o hidrogênio no motor. A corrente consumida foi limitada em 45 amperes através do PWM e este valor foi estipulado através do valor máximo de corrente disponível pelo alternador. Com isso se pôde analisar o consumo de combustível necessário para suprir a demanda de corrente.

3ª Etapa: Analisou-se através do software da fabricante do grupo-gerador os valores dos sensores do motor, tais como:

- Tempo de bico aberto: O tempo em milésimos de segundo que os bicos injetores de combustível ficavam aberto para cada processo de admissão;
- Sensor MAP: O valor da depressão no coletor de admissão em kPa, ou seja, a pressão exercida pelo vácuo que faz com haja a sucção de ar atmosférico para os cilindros do motor;
- Força do motor (*DutyCycle*): A força do motor sendo utilizada no momento em porcentagem do valor total.
- Posição da Borboleta: A posição em que se encontra a borboleta de admissão, onde que esta restringe a entrada de ar atmosférico para os cilindros tendo seu valor representado em porcentagem do valor total de abertura.

Ao final destes testes foi possível obter dados concretos de como é o funcionamento de um motor ao se injetar a mistura de hidrogênio e oxigênio, obtendo valores do consumo normal do grupo-gerador, bem como o quanto representa em consumo de combustível para suprir a carga elétrica utilizada para pôr em funcionamento tal célula e qual economia de combustível o hidrogênio proporcionou ao grupo-gerador.

## 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os dados coletados no transcorrer da pesquisa são apresentados e organizados neste capítulo. Respondendo o objetivo proposto, os resultados estão dispostos em gráficos e quadros. Na primeira parte tem-se os testes práticos realizados, tendo as informações e resultados do mesmo dispostos em tabelas. Na segunda é apresentado as análises também práticas, porem tendo as informações coletadas através de software.

### 5.1. 1ª ETAPA

Esta etapa foi realizada no dia 06/10/2015, terça-feira, onde foi ligado o grupo-gerador às 08:00hs para abastecer o centro administrativo da empresa Baram Equipamentos e desligado às 18:00hs. O consumo máximo registrado ao mesmo dia semanal anterior provido da companhia elétrica foi de 15kWh (o gráfico representando o consumo diário pode ser visto no apêndice A).

Tendo o grupo-gerador trabalhado durante 10hs contínuas, pode-se observar um consumo de 90 litros de etanol, representando um consumo médio de 9 Litros por hora de funcionamento.

Os parâmetros do teste podem ser analisado no quadro 5.

Tensão de saída:	380v / 110v
Frequência de saída:	60Hz
Combustível utilizado:	Etanol
Velocidade do motor:	4700 RPM
Corrente utilizada pelo motor (média):	23 amperes
Tempo de funcionamento:	10 hs contínuas
Quantidade de etanol consumida:	90 litros

Quadro 5: Parâmetros de funcionamento da 1ª etapa.

## 5.2. 2ª ETAPA

Realizado no dia 07/10/2015, quarta-feira, foi iniciado o teste as 08:00hs e finalizado as 18:00hs do mesmo dia. Os valores de consumo registrados no mesmo dia semanal de energia providos da rede elétrica da RGE teve valor máximo de 15 kWh (o gráfico representando o consumo diário pode ser visto no apêndice A. Nesta etapa foi analisado a influência da adição de hidrogênio no funcionamento e consumo do motor do grupo-gerador. Sabendo que a célula eletrolítica tem uma produção fixada em 3 litros por minuto de hidrogênio e oxigênio e um consumo de 40 amperes, pode-se perceber que devido a entrada de hidrogênio estar à frente da borboleta (controle de entrada de ar e etanol) a mesma tomou uma posição mais fechada se comparada a 1ª etapa, fazendo com que o consumo de etanol diminua, ou seja, a injeção eletrônica percebeu que com o acréscimo do hidrogênio a rotação iria alcançar valores maiores do que os valores pré estipulado, a mesma fez com que a injeção de etanol fosse reduzida para manter a mesma velocidade estipulada em seus parâmetros.

A 2ª etapa teve os mesmos parâmetros de velocidade e tempo de funcionamento da 1ª etapa, tendo variações nos parâmetro que sofrem influência devido a adição de hidrogênio e funcionamento da célula eletrolítica. Estes podem ser analisado na quadro 6.

Tensão de saída:	380v / 110v
Frequência de saída:	60Hz
Combustível utilizado:	Etanol + Hidrogênio
Velocidade do motor:	4700 RPM
Corrente utilizada pelo motor (média):	23 amperes
Corrente utilizada pela Célula Eletrolítica:	45 amperes
Quantidade de hidrogênio injetada:	3 litros por minuto
Tempo de funcionamento:	10 hs contínuas
Quantidade de etanol consumida:	97,8 litros

Quadro 6: Parâmetros de funcionamento da 2ª etapa.

### 5.3. 3ª ETAPA

Além dos testes práticos mencionados anteriormente foram feitas leituras das condições do motor através do software específico do grupo gerador.

A Figura 13 nos mostra as condições do motor em funcionamento normal, sendo alimentado apenas com etanol. É exibido ao lado esquerdo o tempo de abertura dos bicos injetores, a porcentagem de abertura da borboleta na entrada de ar, a depressão no coletor pelo sensor Map e a força do motor.

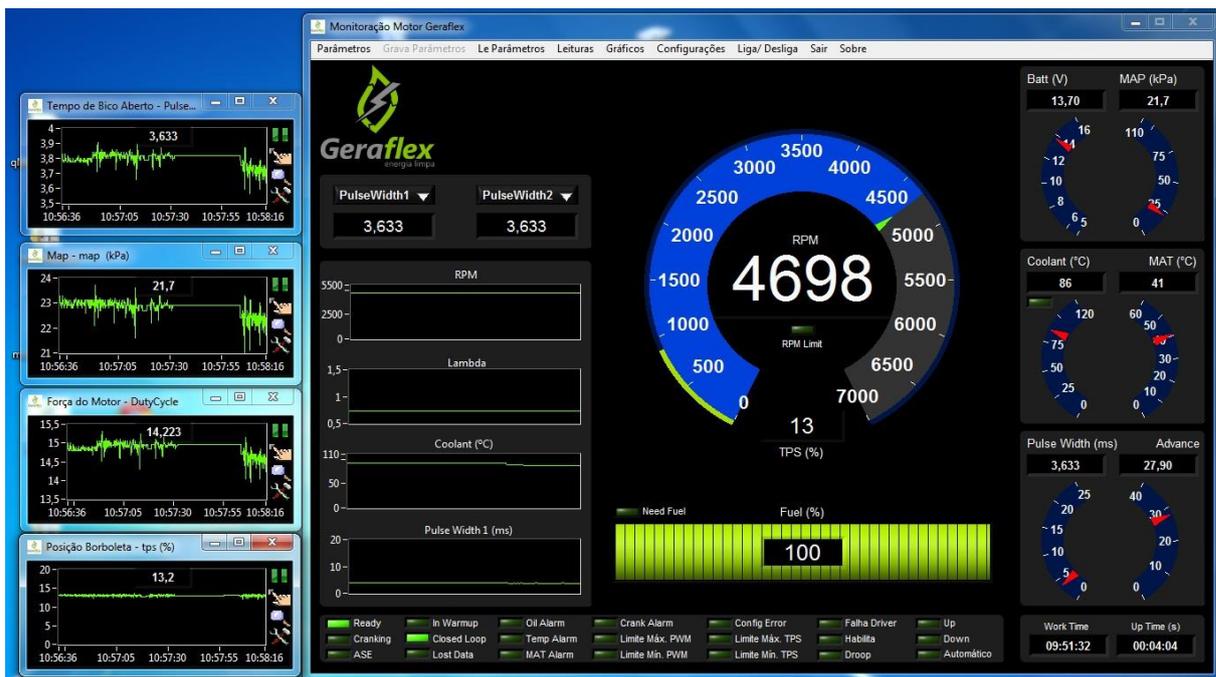


Figura 13: Grupo gerador apenas com etanol.

Os valores apresentados são uma média do período de funcionamento do grupo-gerador, devido a velocidade fixada e pouca carga exigida os valores tiveram pouca variação. Verificado que o tempo de abertura dos bicos injetores ficou em média 0,003633 segundos, já a depressão no coletor captada pelo sensor Map ficou na faixa de 21,7 kPa, a força provida do motor compreende a 14,223% em média do total e a posição da borboleta localizada na admissão de ar esteve em 13,2% de sua abertura total.

Na Figura 14 temos a transição do funcionamento do grupo gerador com etanol ao trabalhar também com o hidrogênio. Para pôr em funcionamento a célula eletrolítica foi necessário dispor de 45 amperes providos da bateria, com esta corrente foi possível obter uma produção de 3 litros por minuto de gás hidrogênio e gás oxigênio.

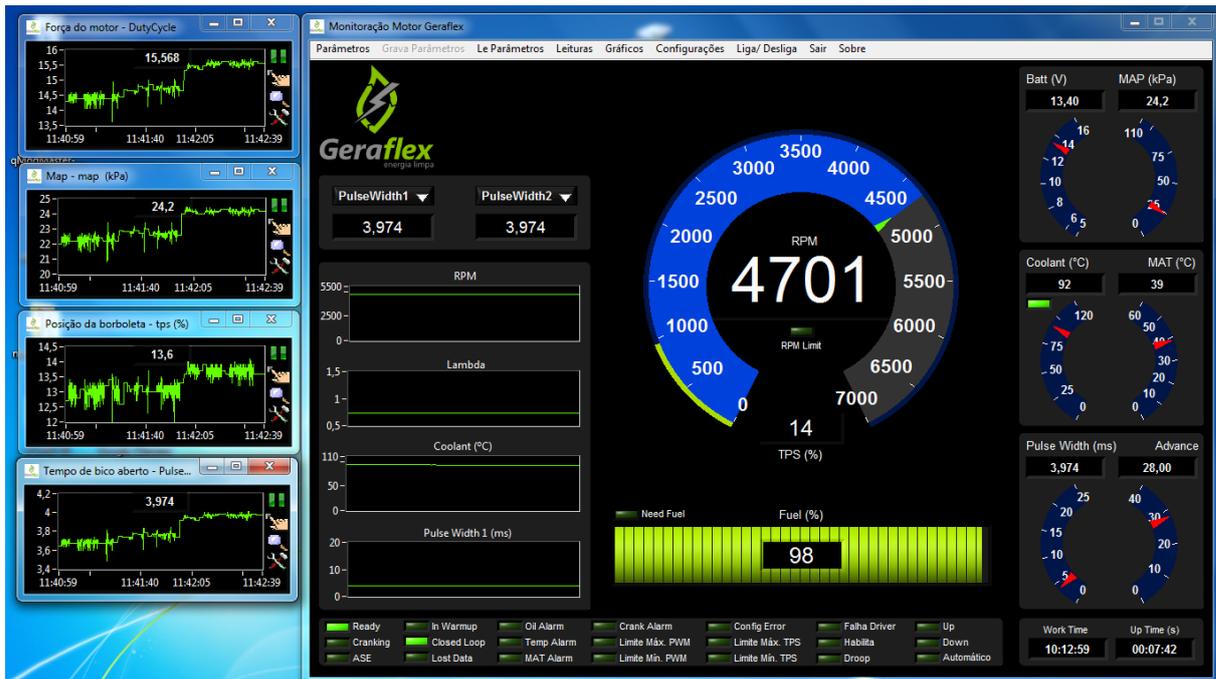


Figura 14: Grupo gerador com etanol e hidrogênio.

Verificado que os quatro parâmetros mencionados anteriormente sofreram alteração, devido a célula eletrolítica necessitar uma alta corrente, foi necessário que a injeção eletrônica fornecesse mais combustível alterando o tempo de bicos abertos de 0,003633 segundos para 0,003974 segundos, assim fornecendo mais força ao motor, alterando este valor de 14,223% para 15,568%, a depressão no coletor de admissão também aumentou de 21,7 kPa para 24,2 kPa, isto significa que o vácuo no coletor de admissão de ar diminuiu fazendo com que diminuísse a quantidade de ar que entra no motor, conseqüentemente permitindo o hidrogênio e o oxigênio providos da célula eletrolítica funcionarem como combustível, A posição da borboleta que antes ficava próximo a 14,2% como pode ser visto no gráfico de funcionamento com etanol apenas reduziu a 13,6% aproximadamente, isto significa que ao injetar a mistura de oxigênio e hidrogênio o motor ganha uma rotação como resultado da combustão dos gases adicionados, assim para manter a rotação estipulada pela programação a injeção eletrônica tende a fechar a posição da borboleta afim de reduzir a mistura estequiométrica de ar e combustível (no caso o etanol).

## **6. CONCLUSÕES**

Com o estudo proposto foi possível alcançar os objetivos iniciais, onde que possibilitou obter as alterações dos parâmetros normais de funcionamento do grupo-gerador referente seu consumo de etanol, vendo assim que a célula eletrolítica necessita de uma grande quantidade de corrente elétrica, fazendo com que aumente o consumo de etanol para suprir esta demanda energética. Por mais vantajoso que possa parecer, o hidrogênio ao ser introduzido como um combustível auxiliar não conseguiu superar a demanda energética que o processo de eletrólise necessita para obtenção do mesmo. Tendo assim um breve balanço energético negativo, necessitando de meios mais eficientes para obtenção de hidrogênio a fim de tornar possível uma melhor proposta de reduzir o consumo de etanol.

## **7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

O estudo pôde nos mostrar diversos parâmetros do motor, o alto consumo de corrente elétrica para o funcionamento da célula eletrolítica é um fator que faz com que o motor consuma mais combustível, ou seja, para suprir a demanda de corrente elétrica o motor utiliza a energia provida do combustível. Uma sugestão para trabalhos futuros é o estudo de meios de reproduzir a eletrólise, porém com consumo de corrente mais reduzido, assim proporcionar um melhor rendimento do sistema.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDRE, B. **Motores de combustão interna a hidrogênio.**[S.l.], 2012
- ANDREWS, A. C. In: Clifford A. Hampel. **The Encyclopedia of the Chemical Elements.** New York: Reinhold Book Corporation, 1968. 272 p. LCCN 68-29938
- CARTAGENA, J. G. Q. **Determinação Experimental e Predição dos Limites de Inflamabilidade do Etanol Anidro e Hidratado para Uso na Indústria Aeronáutica.** Dissertação de Mestrado, Itajubá, Setembro de 2013.
- ESTÊVÃO, T. E. R. **O Hidrogênio como Combustível.** Dissertação, Faculdade de Engenharia do Porto, Portugal, 2008.
- JI, C.; WANG S. **Effect of hydrogen addition on lean burn performance of a spark-ignited gasoline engine at 800 rpm and low loads.** Elsevier, Beijing, China, p. 1301-1304, 11/2010.
- JI, C.; *et al.* **A laminar burning velocity correlation for combustion simulation of hydrogen-enriched ethanol engines.** Elsevier, Beijing, China, p.139-142, 05/2014.
- KOTZ, J. C.; TREICHEL Jr, P. M. **Química e reações químicas:** volume 2. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, vol. 2. 2002c. 345 p. ISBN 85-216-1328-8.
- MORCH, C. S. *et al.* **Ammonia/hydrogen mixtures in an SI-engines: Engine performance and analysis of a proposed fuel system.** Elsevier, Lyngby, Denmark, p. 854-864, 09/2010.
- PERRIER, J. L. **Energia Solar e Hidrogênio.** Coleção Manuais Técnicos, Ed. Presença, 1980.
- PETROBRAS. **Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico – FISPQ.** Acessado em: 01/11/2015. Disponível em:  
<<http://www.br.com.br/wps/wcm/connect/3b33fe8043a79941b531bfec2d0136c/fispq-comb-etanol-etanol-hidratado-combustivel-ehc.pdf?MOD=AJPERES>>
- RIFKIN, J. **A Economia do Hidrogênio.** – São Paulo: M.Books do Brasil Editora Ltda, 2003.
- RUIZ, A. G.; GUERRERO, J. A. C. **Química.** São Paulo: Pearson, 2002. ISBN 85-87918-25-7.
- SILVA, E. P. da. **Introdução à tecnologia e economia do hidrogênio.** Campinas: Editora da Unicamp, 1991.
- STWERTKA, A. **A Guide to the Elements.** [S.l.]: Oxford University Press, 1996. 16–21 p. ISBN 0-19-508083-1.

## APÊNDICE A – Consumo da rede elétrica

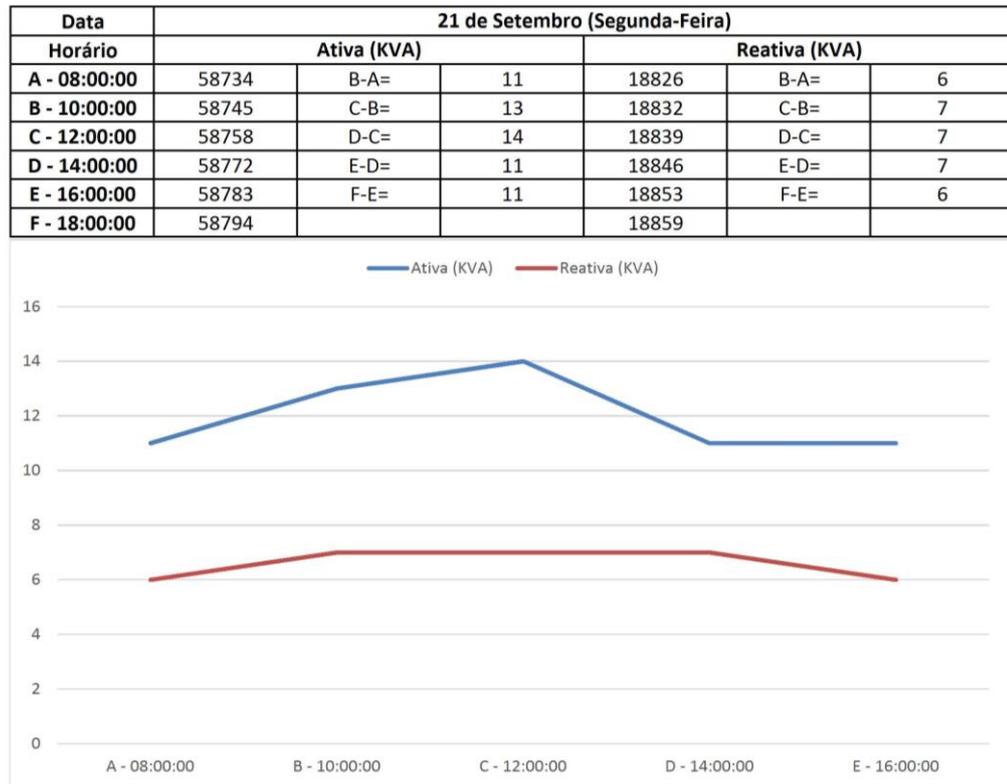


Figura 15: Consumo de energia Segunda-Feira.

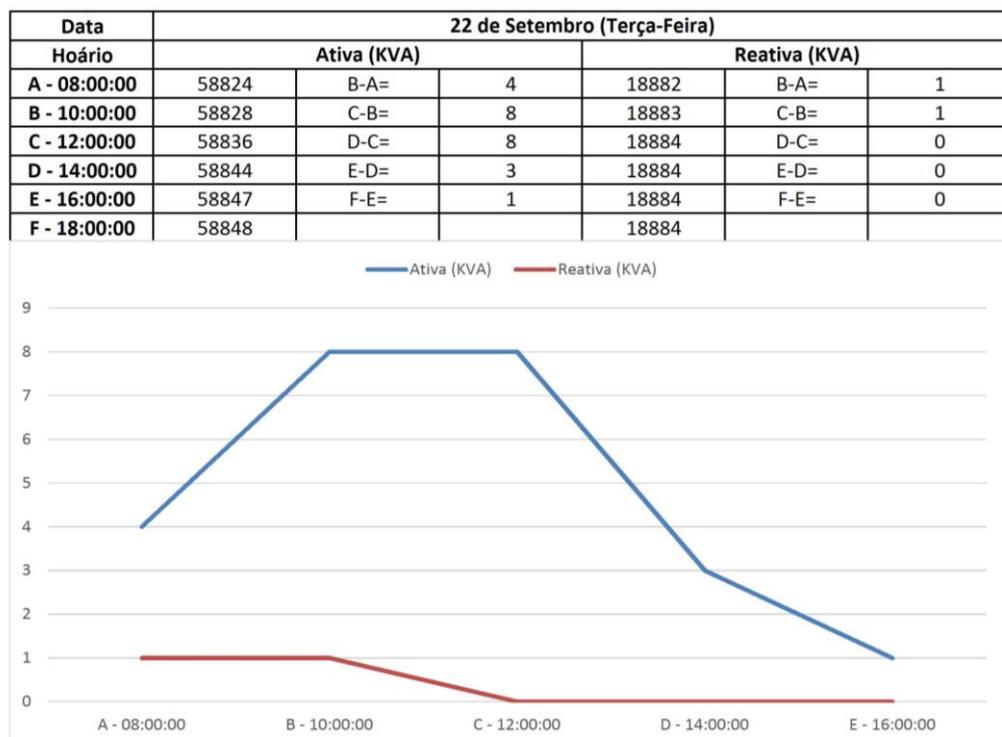


Figura 16: Consumo de energia Terça-Feira.

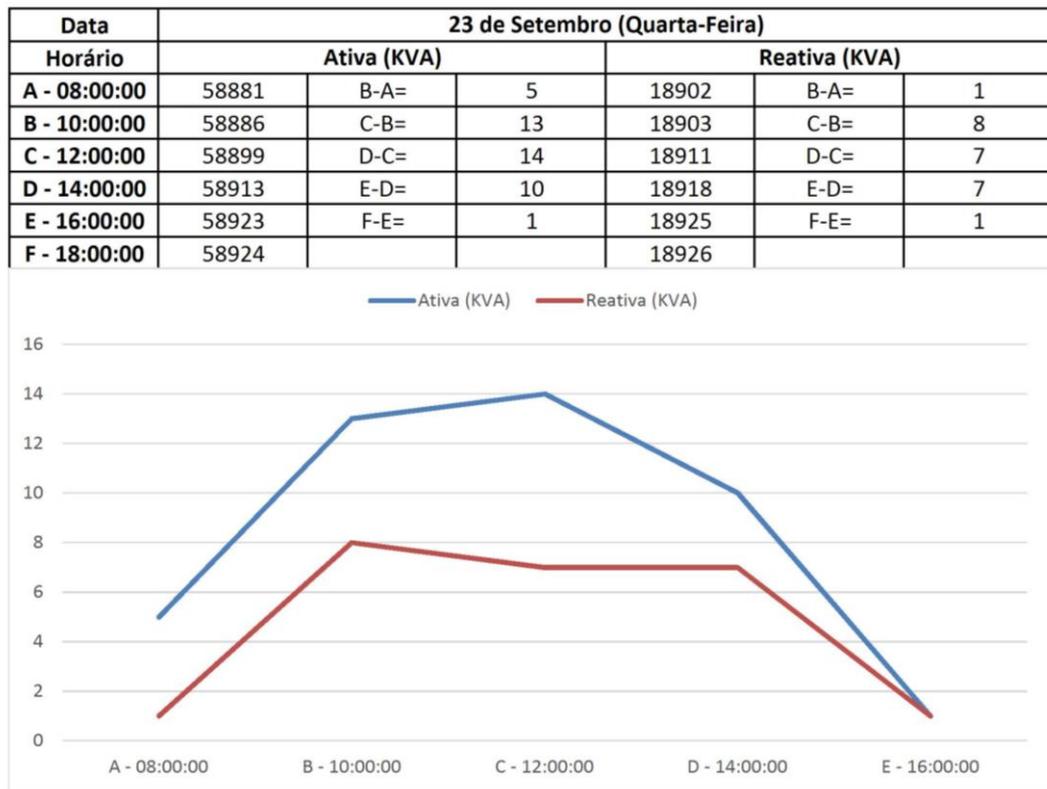


Figura 17: Consumo de energia Quarta-Feira.

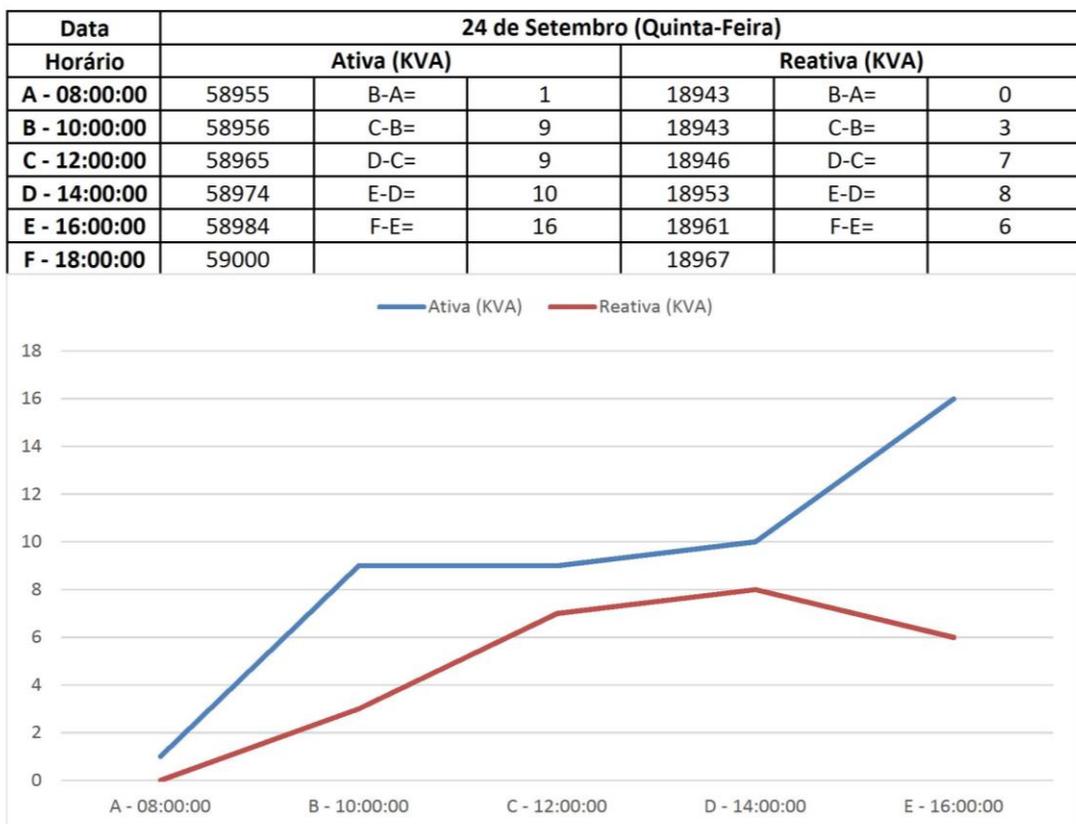


Figura 18: Consumo de energia Quinta-Feira.

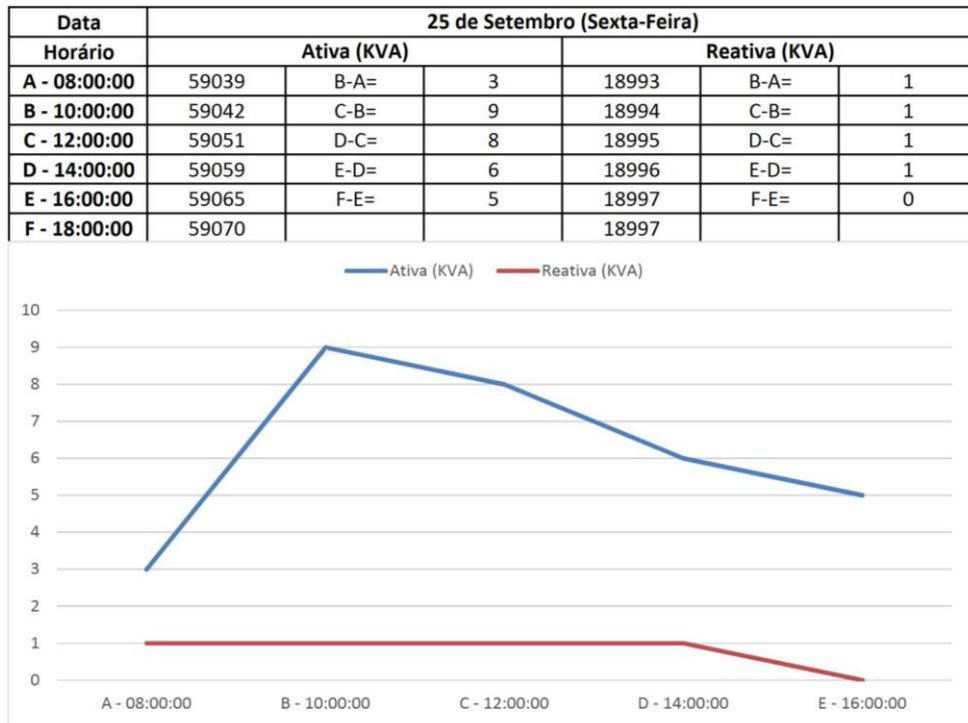


Figura 19: Consumo de energia Sexta-Feira.