

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU  
Engenharia Ambiental

THIAGO MARTINS BOLINA COSTA

Balanço de Massa e Energia em uma célula eletrolítica veicular  
comercial.



UBERLÂNDIA-MG

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

THIAGO MARTINS BOLINA COSTA

Balanço de Massa e Energia em uma célula eletrolítica veicular  
comercial

**Trabalho de conclusão de curso**  
apresentado ao curso de graduação em  
Engenharia Ambiental do Instituto de  
Ciências Agrárias da Universidade Federal  
de Uberlândia, como parte dos requisitos  
para a obtenção do título de **Bacharel em**  
**Engenharia Ambiental.**

Orientador: Prof. Dr. Valério Luiz  
Borges

UBERLÂNDIA-MG

2021

*Dedico esse trabalho para todos que confiaram em mim durante essa jornada, aos meus pais, amigos, professores que de algum modo contribuíram para esse momento.*

*Agradeço,*

*Primeiramente agradeço a יהוה Criador dos céus e da terra, por ter me dado à permissão de cursar o ensino superior, e nele ainda ter achado o Seu caminho.*

*Agradeço a toda minha família, sempre esteve do meu lado independentemente das minhas escolhas, a minha namorada Amanda Lopes que sempre me deu apoio e conforto.*

*Agradeço ao Professor Dr. Valério Luiz Borges por me confiar essa oportunidade, me orientando com dedicação e amizade.*

*A todos que de alguma maneira contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.*

THIAGO MARTINS BOLINA COSTA

Balanço de Massa e Energia em uma célula eletrolítica veicular  
comercial

Dissertação defendida e aprovada em 18/11/2021, pela banca examinadora  
constituída pelos membros:

---

Prof. Dr. Valério Luiz Borges  
Universidade Federal de Uberlândia

---

Prof. Dr. Edson Alves Figueira Júnior  
Universidade Federal de Uberlândia

---

Prof. Dr. Roberto Terumi Atarassi  
Universidade Federal de Uberlândia

Uberlândia, 18 de novembro de 2021.

## Resumo

No presente trabalho, foi analisado a eficiência energética da célula de hidrogênio, analisando se ela atende os requisitos mínimos para seu consumidor possa a ter um ganho energético e conseqüentemente economia monetária, como prometida em seu manual técnico. Para isso foi realizado o experimento em laboratório, seguindo as instruções dado pelo fabricante para um bom funcionamento do equipamento, foi calculado o quanto de energia necessário para gerar o combustível hidrogênio, e o quanto a queima deste combustível entrega de desempenho para o motor, deste modo verificou-se que o aparelho consome mais energia para fabricar hidrogênio do que ele de fato entrega como energia para o motor.

---

**Palavras chave:** *Célula de Hidrogênio; Eficiência energética; Economia Veicular*

## **Abstract**

In the present work, the energy efficiency of the Hydrocell HydroClub-USA hydrogen cell was analyzed, analyzing whether it meets the requirements specified for its consumer can have an energy gain and consequently monetary savings. For that, the experiment was carried out in the laboratory, following standards given by the manufacturer for a good functioning of the equipment. The device is said to consume more energy to manufacture hydrogen than it actually delivers as energy to the engine.

---

**Keywords:** *Hydrogen Cell; Energy efficiency; Vehicle Economy*

## Lista de figuras

<i>Figura 1 - Modelo simplificado de um reator eletrolítico.</i> .....	7
<i>Figura 2 - Site oficial da célula em estudo.</i> .....	9
Figura 3 – Propaganda para usuários da Internet. ....	10
Figura 4 - Especificações dadas pelo vendedor de rendimento de até 70%. ....	11
<i>Figura 5 - Demonstração do Kit Hydrocell completo.</i> .....	13
Figura 6 - Esquema de montagem experimental.....	14
<i>Figura 7 - Montagem experimental.</i> .....	15
Figura 8 - Balança Analítica de precisão. ....	16
Figura 9 - Célula eletrolítica e o reservatório utilizado.....	17
Figura 10 - Ilustração do ciclo de um veículo com uma célula eletrolítica acoplada. ....	26
Figura 11 - Ciclo energético do carro. ....	27
Figura 12 – Questionamento do gasto energético.....	27
Figura 13 – Questionamento sobre a viabilidade energética. ....	28
Figura 14 - Razão do sistema. ....	29

## Lista de tabelas

Tabela 1- Poder calorífico dos combustíveis.....	5
<i>Tabela 2 - Resultados do primeiro dia de coleta.</i> .....	19
Tabela 3 - Resultados do segundo dia de coleta. ....	21
<i>Tabela 4 - Dados do terceiro dia de coleta</i> .....	23
Tabela 5 - Dados de Referência.....	29
Tabela 6 - Tabela do peso atômico dos elementos na hidrólise.....	30
Tabela 7 - Densidade da água. ....	30
Tabela 8 - Demonstra a massa de água perdida em cada dia do experimento. ....	31
Tabela 9 - Demonstra a quantidade possível de energia que o sistema pode gerar.	31
Tabela 10 - Tabela a seguir representa as médias diárias de energia gasta. ....	32
Tabela 11 - Rendimento da hidrólise.....	32
Tabela 12 - Dados de entrada.....	33
Tabela 13 - Valores das variáveis para determinação da Massa de água. ....	34
Tabela 14 - Demonstra informações sobre a molécula da água. ....	34
Tabela 15 - Dados de Referência.....	34
Tabela 16 - Massa Molar dos principais elementos da combustão. ....	35
Tabela 17 - Densidade do hidrogênio, razão entre a massa e o volume. ....	36
Tabela 18 - Composição volumétrica do combustível. ....	36
Tabela 19 - Massa do combustível.....	36
Tabela 20 - Princípio da conservação de massa.....	36
Tabela 21 - Dados para determinação do PCI. ....	37
Tabela 22 - Entalpia do combustível para determinação da massa de ar.....	37
Tabela 23 - Razão de ar atmosférico/combustível. ....	38
Tabela 24 - Massa de água perdido pelo sistema nos três dias de experimento. ....	38
Tabela 25 - Determinação da massa de hidrogênio.....	38
Tabela 26 - Rendimento médio do veículo a combustão média de 22%.....	39
Tabela 27 - Gasto de potência gerado nos três dias de experimento em kW. ....	39
Tabela 28 - Rendimento da combustão. ....	39



## Lista de gráficos

Gráfico 1 - Representa a massa de água x tempo em azul. E a potência gasta x tempo em vermelho.....	20
Gráfico 2 - Representa a massa de água x tempo em azul. E a potência gasta x tempo em vermelho.....	22
<i>Gráfico 3 - Massa de água x tempo em azul. E a potência gasta x tempo em vermelho.</i> .....	23
<i>Gráfico 4 - Massa x tempo nos três dias de experimento.</i> .....	24
Gráfico 5 - Potência x tempo nos três dias de experimento. ....	25
Gráfico 6 - Potência consumida x potência gerada. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Gráfico 9 - Projeção do sistema eletrolítico.....	41
Gráfico 10 - Ganho de HP .....	45

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>A</b>	Amperes
<b>A</b>	Área do eletrodo (m <sup>2</sup> )
<b>c</b>	Concentração em mol/m <sup>3</sup>
<b>C</b>	Coulomb
<b>CEletr</b>	Custo da eletricidade (US\$/kWh)
<b>CH<sub>2</sub></b>	Custo de produção de hidrogênio (US\$/ m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> )
<b>CH<sub>2</sub>O</b>	Custo da água consumida (US\$/m <sup>3</sup> )
<b>CMan</b>	Custo de manutenção (US\$/ m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> )
<b>CMatéria-prima</b>	Custo da matéria-prima (US\$)
<b>COp</b>	Custo de operação (US\$/ m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> )
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Carbono
<b>Cu<sub>2</sub>O</b>	Óxido de cobre
<b>CH<sub>4</sub></b>	Metano
<b>Cal/cm<sup>2</sup></b>	Calorias por centímetro quadrado
<b>D</b>	Coeficiente de difusão em m <sup>2</sup> /s
<b>E</b>	Potencial mínimo para a eletrólise (V)
<b>Ec</b>	Energia elétrica consumida (kWh/N.m <sup>3</sup> )
<b>ECS</b>	Eletrodo de calomelano saturado
<b>Epa</b>	Potencial de pico anódico
<b>Epc</b>	Potencial de pico catódico
<b>f</b>	Fator de anuidade (1/ano)
<b>F</b>	Constante de Faraday (9,65x10 <sup>4</sup> C/mol)
<b>Ge</b>	Germânio
<b>GW</b>	Gigawatts
<b>H<sub>2</sub></b>	Hidrogênio
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Água
<b>H<sub>3</sub>O<sup>+</sup></b>	Íon hidrônio
<b>i</b>	Corrente de operação (A)
<b>i<sub>p</sub></b>	Corrente de pico
<b>ipa</b>	Corrente de pico anódica
<b>ipc</b>	Corrente de pico catódica
<b>Inv</b>	Investimento no sistema de produção de hidrogênio (US\$)
<b>J</b>	Densidade de corrente (A/m <sup>2</sup> )
<b>k</b>	Período de amortização (anos)

<b>K</b>	Temperatura na escala Kelvin
<b>kg</b>	Quilograma
<b>kg/h</b>	Quilograma por hora
<b>kg/m<sup>3</sup></b>	Quilograma por metro cúbico
<b>KOH</b>	Hidróxido de potássio
<b>[KOH]</b>	Concentração de hidróxido de potássio
<b>kW</b>	Quilowatts
<b>kWh</b>	Quilowatts hora
<b>kJ/kg</b>	Quilojoule por quilograma
<b>kJ/mol</b>	Quilojoule por mol
<b>kJ/h</b>	Quilojoule por hora
<b>m</b>	Metro
<b>mm</b>	Milímetros
<b>mV.s-1</b>	Milivolt por segundo
<b>m<sup>2</sup></b>	Metro quadrado
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico
<b>m<sup>3</sup>/h</b>	Metro cúbico por hora
<b>m<sup>3</sup> H<sub>2</sub></b>	Fluxo mássico de hidrogênio (kg/s)
<b>MJ/kg</b>	Megajoule por quilograma
<b>MW</b>	Megawatts
<b><i>n</i></b>	Número de elétrons transferido na reação
<b>Ni</b>	Níquel
<b>OH<sup>-</sup></b>	Ânion hidroxila
<b>O<sub>2</sub></b>	Oxigênio
<b>p</b>	Pressão (atm)
<b>pH</b>	Potencial Hidrogeniônico
<b>PCI</b>	Poder calorífico inferior (kJ/kg)
<b>PElet</b>	Energia elétrica consumida (kW)
<b>Q</b>	Carga elétrica transferida à reação
<b>QH<sub>2</sub></b>	Quantidade de hidrogênio produzido pelo eletrolisador (Nm <sup>3</sup> /h)
<b>QH<sub>2</sub>O</b>	Quantidade de água requerida pelo eletrolisador (m <sup>3</sup> /h)
<b><i>r</i></b>	Taxa da reação de eletrólise (mol/m <sup>2</sup> .s)
<b>R</b>	Resistência elétrica
<b>REH<sub>2</sub></b>	Retorno energético do hidrogênio (kW)
<b>REq</b>	Resistência Elétrica Equivalente
<b>t</b>	Período equivalente de utilização (t/ano)

<b><math>T_x</math></b>	Taxa de juros anual (%)
<b>U</b>	Potencial (V)
<b>US\$</b>	Dólar americano
<b>US\$/(m<sup>3</sup>/h)</b>	Dólar americano por metro cúbico por hora
<b>US\$/(m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>)</b>	Dólar americano por metro cúbico de hidrogênio produzido
<b>US\$/kWh</b>	Dólar americano por quilowatts hora
<b>v</b>	Velocidade de varredura em V/s.
<b>V</b>	Volts
<b>°C</b>	Escala de temperatura Célsius
<b>μmol/mol</b>	Micro mol por mol
<b>ηfarádica</b>	Eficiência Farádica (%)
<b>ηtérmica</b>	Eficiência Térmica (%)
<b>ηT</b>	Eficiência Termodinâmica do eletrolisador
<b>ΔEp</b>	Diferença entre os potenciais de pico
<b>ΔG</b>	Variação da energia livre de Gibbs da reação
<b>Δt</b>	Variação de tempo
<b>ΔH</b>	Variação da entalpia da reação
<b>α</b>	Distância entre o ponto de estrela e o ponto central
<b>Ω</b>	Ohms
<b>PCS</b>	Poder Calorífico Superior (kJ/kg)
<b>RPM</b>	Rotação por minuto
<b>ERP</b>	Estado de Referencia Padrão

## Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 Diretrizes da Dissertação.....	1
1.2 Objetivos .....	1
1.2.1 Objetivos Específicos .....	2
1.3 Hipóteses .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
1.4 Metodologia .....	2
1.4 Atividades e configuração do experimento .....	2
<b>2 CONTEXTUALIZAÇÃO</b> .....	3
2.1 Introdução a Célula de Hidrogênio .....	3
2.2 Revisão Bibliográfica da célula de hidrogênio .....	5
2.3 Alternativas para o problema .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>3.0 COMO A CÉLULA ELETROLÍTICA É APRESENTADA AO MERCADO?</b> .....	8
3.1 Anúncios e propagandas encontrados na Internet sobre a célula eletrolítica.....	8
<b>4.0 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	12
4.1 Materiais .....	12
4.2 Métodos .....	13
4.2.1. Montagem experimental .....	14
4.3 Planejamento e desenvolvimento do sistema .....	16
4.3 Fluxograma geral do trabalho .....	17
<b>Conclusão</b> .....	17
4.4 Análises experimentais.....	18
4.5 Fluxograma do funcionamento da célula eletrolítica no carro (hidrolise da água). .....	25
4.6 Fluxograma do funcionamento da célula eletrolítica no carro (Rendimento Global do Sistema).....	28

<b>5 Resultados .....</b>	<b>29</b>
<b>5.1 Cálculo da Hidrolise da água. ....</b>	<b>29</b>
<b>5.2 Cálculo da quantidade de água no ar .....</b>	<b>33</b>
<b>5.3 Cálculo do rendimento global .....</b>	<b>34</b>
<b>6 DISCUSSÃO. ....</b>	<b>40</b>
<b>6.1 Eficiência energética.....</b>	<b>40</b>
<b>6.2 Rendimento global.....</b>	<b>41</b>
<b>6.3 Comparação de resultados entre trabalhos que usaram a Hydrocell USA .....</b>	<b>42</b>
<b>6.4 Discussão da Avaliação do desempenho HP.....</b>	<b>44</b>
<b>Trabalhos que corroboram com minhas conclusões .....</b>	<b>47</b>
<b>Testar as hipóteses .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>6.5 Mitos e verdades sobre a célula de hidrogênio.....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>48</b>
<b>LIMITAÇÕES DO TRABALHO .....</b>	<b>49</b>
<b>RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>49</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>50</b>
<b>Anexo 1 – Código desenvolvido no EES para o cálculo da eficiência energética da célula eletrolítica. ....</b>	<b>54</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Diretrizes da Dissertação

A eletrólise da água para geração de hidrogênio é um processo muito simples, geralmente é apresentado pela internet como um método revolucionário capaz de converter água em combustível Hidrogênio e ter resultados positivos.

Para criar um cenário ainda mais promissor, o hidrogênio tem propriedade energética bastante vantajosa, pois tem um Potencial Calorífico Superior (PCS) de 122000 kJ/kg; 2,75 vezes maior que a energia obtida a partir de hidrocarbonetos (LAY et al.,1999).

Foi identificado pela primeira vez pelo cientista britânico Henry Cavendish em 1776, sendo denominado de “ar inflamável”. Já o gás hidrogênio (H<sub>2</sub>) não está presente na natureza em quantidades significativas sendo, portanto, para sua utilização, energética ou não, ele deve ser extraído de uma fonte primária que o contenha.

Diante disso, a separação de hidrogênio pela célula eletrolítica ganhou força, pois o veículo já teria toda a base de apoio para seu funcionamento, e o hidrogênio gerado ainda auxiliaria no desempenho e eficiência do veículo.

Segundo o repórter Leonardo Contesini (2016), o caso mais famoso e disseminado na internet foi exibido no Espírito Santo em 2015, produzido pela TV Tribuna, afiliada local do SBT, a reportagem entrevistou um técnico de informática que afirmava ter descoberto um método para separar o hidrogênio da água e usá-lo como combustível no lugar da gasolina. Como toda teoria conspiratória, os motores movidos à água exercem certo fascínio sobre o público geral.

Diante disso, foi realizado um experimento em laboratório para ver se a célula de hidrogênio realmente promove economia de energia no motor.

Portanto, a célula eletrolítica realmente promove redução do consumo de combustível? Quais os mitos e verdades por trás disso?

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral do presente experimento é avaliar a eficiência da célula eletrolítica e apresentar se é viável seu uso.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

- Entender o funcionamento do sistema da célula eletrolítica;
- Realizar o procedimento experimental de bancada em condições ideais;
- Analisar e descrever os resultados obtidos tanto graficamente como o memorial de cálculo gerado para a conclusão do trabalho.

### 1.3 Metodologia

Realiza-se um experimento, onde foi adquirido um exemplar da célula eletrolítica, onde o equipamento foi montado conforme as instruções do fabricante, logo após foi preparado a solução eletrolítica com Hidróxido de Potássio (KOH) para realizar a quantificação da eficiência energética, obtendo a massa e potência durante 10 horas e avaliando por fim qual foi a potência consumida e a potência gerada para conclusão do trabalho.

### 1.4 Atividades e configuração do experimento

- Capítulo 1: Introdução do assunto estudado pela dissertação de TCC, explicar o funcionamento da célula de hidrogênio.
- Capítulo 2: Faz se uma revisão bibliográfica sobre o funcionamento da célula de hidrogênio (Propriedades; Técnicas de obtenção; Reação na eletrólise e alternativas para o problema).
- Capítulo 3: Mostrar como a produção de hidrogênio por meio da célula e vendida. (Visão Nacional e Internacional da tecnologia).
- Capítulo 4: Apresentação dos materiais utilizados durante o experimento e os métodos adotados para obtenção dos resultados.
- Capítulo 5: Resultados e discussões alcançados durante os estudos.
- Capítulo 6: Conclusões do experimento.



- Capítulo 7: Referências Bibliográficas.

Previa da conclusão:

Ao final, conclui-se que os objetivos são atingidos e a pergunta está respondida com a confirmação da hipótese 2, indicando que a célula ao invés de contribuir para seu ganho energético, ela gasta mais energia do que produz, pois, a conversão de energia nunca é de 100%.

## **2 CONTEXTUALIZAÇÃO**

### **2.1 Introdução a Célula de Hidrogênio**

O hidrogênio está presente em todos os lugares, mas é difícil encontrar o elemento de forma isolada. Na terra o encontramos sempre de forma associada a outros elementos, ele é encontrado nas camadas superiores da atmosfera devido à diferença de densidade, embora também seja encontrado em gases vulcânicos. A densidade do hidrogênio, medida como a quantidade de massa de H<sub>2</sub> contida por unidade de volume, é quatorze vezes menor que a do ar (SOUSA, 2013).

De acordo com Santos (2013), a baixa densidade constitui em alguns problemas de aplicações, sendo que os sistemas de armazenamento são considerados mais volumosos, ou mais pesados do que os utilizados para combustíveis líquidos como a gasolina.

Outra característica em destaque é que o hidrogênio tem a mais alta densidade energética por unidade de peso, ele possui um poder calorífico superior aos combustíveis mais empregados na matriz energética mundial. Se comparado com estes, observa-se que necessitaria de uma quantidade em massa consideravelmente menor do que a consumida nos atuais processos de geração de energia (PEREIRA, 2015).

O poder calorífico é a energia por unidade de massa liberada na oxidação de um combustível. Quando usamos hidrogênio como combustível, libera vapor de água durante a combustão, então, foi estabelecida a diferença entre o Poder Calorífico Superior (PCS) e o Poder Calorífico Inferior (PCI). Segundo (Coelho, P. 2002) a diferença entre o poder calorífico superior e inferior é o produto de massa da água

(fase líquida ou gasosa) nos produtos de combustão, por unidade de massa do combustível, pelo calor latente da vaporização.

O Poder Calorífico Superior (PCS) é o máximo de energia liberada na forma de calor, ou seja, a energia gasta na vaporização de água que se forma na reação de oxidação. Então concluímos que essa energia de PSC é igual a energia gasta para produção de hidrogênio. Ainda definido como o calor liberado pela combustão tendo toda a água como resultado na fase líquida e o Poder Calorífico Inferior (PCI) é o calor liberado pela combustão estando toda a água como resultado no estado gasoso.

Segundo Nogueira e Lara (2003), o poder calorífico de um gás pode ser calculado a partir da sua composição volumétrica. Um dos parâmetros importantes para analisar a qualidade dos combustíveis é a quantidade de energia ou calor que liberam durante sua combustão. Esta propriedade é conhecida como calor de combustão ou poder calorífico do combustível (RUSSEL, 1994; HILSDORF et al., 2004; AL-GHOUTI, AL-DEGS & MUSTAFA, 2010).

De acordo com Macedo; Carvalho (1999, p. 40) “entalpia é o conteúdo global de energia de um sistema, sendo a forma mais usada para expressar o conteúdo calorífico de uma substância em uma reação química”. Dentro do conteúdo entalpia define-se: reações exotérmicas que liberam calor e reações endotérmicas que absorvem calor.

Então, a diferença entre eles é a entalpia de vaporização da água formada na reação e da água previamente existente no combustível. Uma maneira de representação matemática aproximada é:

$$PCI = PCS - 2440 * (9 * H + u)$$

Onde:

PCI = Poder Calorífico Inferior [kJ/kg];

PCS = Poder Calorífico Superior [kJ/kg];

H = Teor de hidrogênio no combustível [kJ/kg em base seca];

U = Teor de umidade do combustível [kg de água/ kg de combustível seco];

A tabela 1 indica o poder calorífico de diversos combustíveis.

*Tabela 1- Poder calorífico dos combustíveis.*

Fontes de Energia	Poder Calorífico (kJ/kg)
Petróleo	42 684
Óleo diesel	42 793
Gasolina	43 446
Álcool	26 950
Querosene	43 090
Gás Natural	47 139
Carvão vegetal	30 835
Bagaço de cana	19 677
Lenha	10 467

Fonte: GERAÇÃO TÉRMICA, 2014. Editada pelo autor.

Há uma popularização das células de hidrogênio nos últimos anos devido a inúmeras razões. Nomeadamente é considerado um combustível limpo por emitir apenas água na sua utilização, podendo ser produzido utilizando inúmeras fontes de energia, com particular interesse nas energias “ditas” renováveis (PEREDO, 2012). Dentre algumas das razões está sua eficiência energética produzida na sua queima para gerar trabalho.

Embora esse tema seja muito disseminado pela mídia e muito popular na internet, como uma fórmula revolucionária para economia de combustível, e ainda a teoria e a purificação sejam processos relativamente simples, o tema ganha bastantes repercussão na internet e televisores.

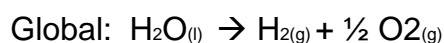
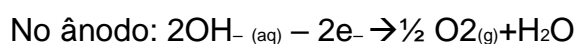
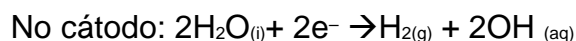
## 2.2 Revisão Bibliográfica da célula de hidrogênio

A célula é composta por duas placas negativas (Cátodo) e uma positiva (Ânodo) funcionando como eletrodos e 6 placas neutras, montadas paralelas uma com a outra e isoladas entre si.

A célula realiza a produção de hidrogênio através da eletrólise da água. No processo, o cátion  $H^+$  sofrerá redução no eletrodo negativo produzindo o gás hidrogênio e o ânion  $OH^-$  sofrerá oxidação no eletrodo positivo formando o oxigênio.

Segundo (PEREIRA, 2015), a eletrólise é uma reação de decomposição de substâncias por efeito de corrente elétrica. Assim, ao utilizar eletrodos em meio condutor sendo ácido ou básico, cujos balanços das reações químicas desenvolvidas resultam apenas na decomposição da água, gerando apenas hidrogênio e oxigênio, esse processo se denomina eletrolise.

Em outra definição, eletrólise é um processo eletroquímico de dissociação, e os produtos finais das reações desencadeadas são hidrogênio e oxigênio moleculares, o balanço mássico destas reações acusa somente a decomposição da água. Quando é aplicada uma força eletromotriz acima de determinado potencial mínimo, há passagem de corrente entre os eletrodos, desencadeando as reações eletrolíticas (SOUZA, 1998).



A corrente elétrica diretamente aplicada à água resulta na seguinte reação:



Na verdade, a produção de hidrogênio pela eletrolise da água é muito simples. Onde uma célula eletrolítica constituída por um par de eletrodos imerso em solução aquosa constituída por Hidróxido de Potássio que permite o transporte da corrente elétrica através da célula de um eletrodo para o outro, assim o hidrogênio é produzido em um eletrodo (cátodo), e o oxigênio é produzido no outro (ânodo).

A célula de hidrogênio tem um recipiente de forma cilíndrica onde ocorre as reações da dissociação da água aplicando corrente elétrica, tendo como produto o oxigênio e hidrogênio, além de transferir massa e calor. Essa reação é denominada de eletrólise, A Figura 1 apresenta um modelo simples de um reator eletrolítico, constituída por um cátodo e um ânodo submersos em solução de um eletrólito com a aplicação de um potencial proveniente de uma fonte de alimentação.

Figura 1 - Modelo simplificado de um reator eletrolítico.



Fonte: SANTOS, 2013.

A eletrólise da água é um processo eletroquímico onde há a dissociação da água em hidrogênio e oxigênio moleculares (SANTOS 2013). Assim a obtenção de oxigênio e hidrogênio é possível através de uma corrente elétrica na água.

A eletrólise que ocorre na célula é a que denominamos de eletrólise alcalina da água, ela se baseia em um método pelo o qual a água flui por uma câmara composta por placas energizadas de aço inoxidável. Essa DDP (diferença de potencial) exercida entre as placas mais a solução condutora iônica líquida ( $H_2O + KOH$ ), faz com que a ligação de hidrogênio se rompa, assim, no mesmo instante os íons positivos se movem em direção ao polo negativo e os íons negativos em direção ao polo positivo com a ação do campo elétrico formado. Após essa primeira fase, a força gerada pela negatividade do elétron faz com que o íon H tenha uma redução transformando-se em gás hidrogênio. (FURLAN, 2012).

Para a produção de hidrogênio puro, e em pequenas quantidades, a eletrólise é considerada um processo econômico, mas como a demanda de hidrogênio é muito alta para abastecimento do motor.

Na célula de hidrogênio usada para o experimento, para eletrolise da água o alternador é usado como fonte de energia gerando corrente elétrica. A viabilidade energética e econômica para produção de hidrogênio depende de uma tecnologia onde a conversão de energia em eletricidade, tenha um rendimento energético global superior ao da transformação direta numa máquina térmica convencional.

### **3.0 COMO A CÉLULA ELETROLÍTICA É APRESENTADA AO MERCADO?**

#### **3.1 Anúncios e propagandas encontrados na Internet sobre a célula eletrolítica.**

A produção de hidrogênio pela eletrolise é muito simples e de fácil entendimento, além de uma vasta quantidade de materiais na internet sobre o assunto, então, muitas vezes alguém é “pescado” pelo tema, e pela grande quantidade de conteúdo sobre, acaba se convencendo que para ter uma economia rápida e “obvia”.

Como se não bastasse toda essa especulação, cria-se um cenário ideal para vender células de hidrogênio garantindo altas taxas de desempenho. Na célula eletrolítica, eles garantem uma economia de combustível de 30-60% ou seu dinheiro de volta. A Figura 2 foi retirada do site oficial da célula eletrolítica, nela é apresentado o desempenho esperado.

Figura 2 - Site oficial da célula em estudo.



**Hydro Club USA**  
Quer que você economize dinheiro com gás

Aplicação de Distribuidor

Casa Loja online Avaliações de Clientes Contato Blog Satisfação do cliente

**HydroClubUSA produz uma variedade de produtos de hidrogênio sob demanda**

Os kits de assistência de combustível são nossos mais vendidos que:

- Aumente a economia de combustível em 30-60%
- Aumentar HP em 10%
- Reduza as emissões substancialmente
- Limpe o motor internamente

Um aumento de 30% na economia de combustível é garantido  
Contate-nos hoje se você tiver alguma dúvida

Estamos ansiosos para trabalhar com você

Curta-nos no Facebook para ver todas as atualizações e conversões mais recentes

Fonte: <https://www.hydroclubusa.com/> acesso em 01/05/2021.

Além do mais, muitas propagandas já começam a aparecer entregando está ou outros modelos de células eletrolíticas navegando na rede. Figura 3 mostra uma propaganda promovida para usuários da internet.

Figura 3 – Propaganda para usuários da Internet.

**Kit Gerador de Hidrogênio para Motos até 400cc com Reator Gdb20 I**

**GANHE 50% OFF NA PRIMEIRA COMPRA\***

Shopee

Filtro  
Saída de Gases Poluentes  
Carburador ou Corpo Borboleta  
Filtro

Novo Sistema de Cabos  
Vem tudo pronto, é só conectar

INFINITO  
Diagrama de Montagem  
SLIM GdB20

Polo Superior POSITIVO  
Polo Inferior NEGATIVO

Bateria 12V

**CUPOM FRETE GRÁTIS**  
\*Desconto limitado a R\$10,00

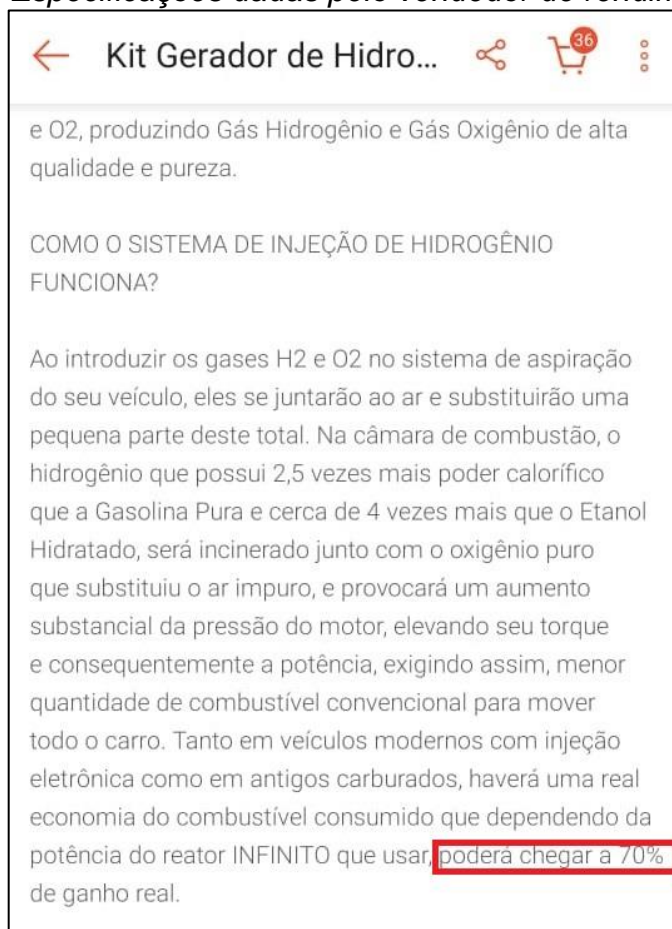
**R\$599,90**

Fonte: Autor.

Ao adentrar no site para ver as informações do produto, e o quanto de economia é prometida. A Figura 4 apresenta a descrição do produto acima, apresentando a funcionalidade do gerador, e o desempenho esperado.



Figura 4 - Especificações dadas pelo vendedor de rendimento de até 70%.



Fonte: <https://shopee.com.br/Kit-Gerador-de-Hidroq%C3%AAnio-para-Motos-at%C3%A9-400cc-com-Reator-Gdb20-INFINITO-F%C3%A1cil-instala%C3%A7%C3%A3o-com-suporte-pelo-Whats-i.335217945.5662202813>  
 acesso em 26/05/2021

Segundo Leonardo Contesini (2016), o caso que deu o ponta pé inicial e o mais famoso foi exibido no Espírito Santo em 2015, produzido pela TV Tribuna, afiliada local do SBT, a reportagem entrevistou um técnico de informática que afirmava ter descoberto um método para separar o hidrogênio da água e usá-lo como combustível no lugar da gasolina, com um desempenho de 2000 km/l, assim esse sistema ficou conhecido pelo seu público, sendo nada poluente e com resultados incríveis.

Link da reportagem disponível em:  
[https://www.youtube.com/watch?v=X\\_Is50YLcak](https://www.youtube.com/watch?v=X_Is50YLcak). Acesso em: 01/05/2021.

Juntando todo esse material e pouco conhecimento científico, então facilmente os interessados são convencidos que a célula eletrolítica e a solução de seus problemas.

## 4.0 MATERIAIS E MÉTODOS

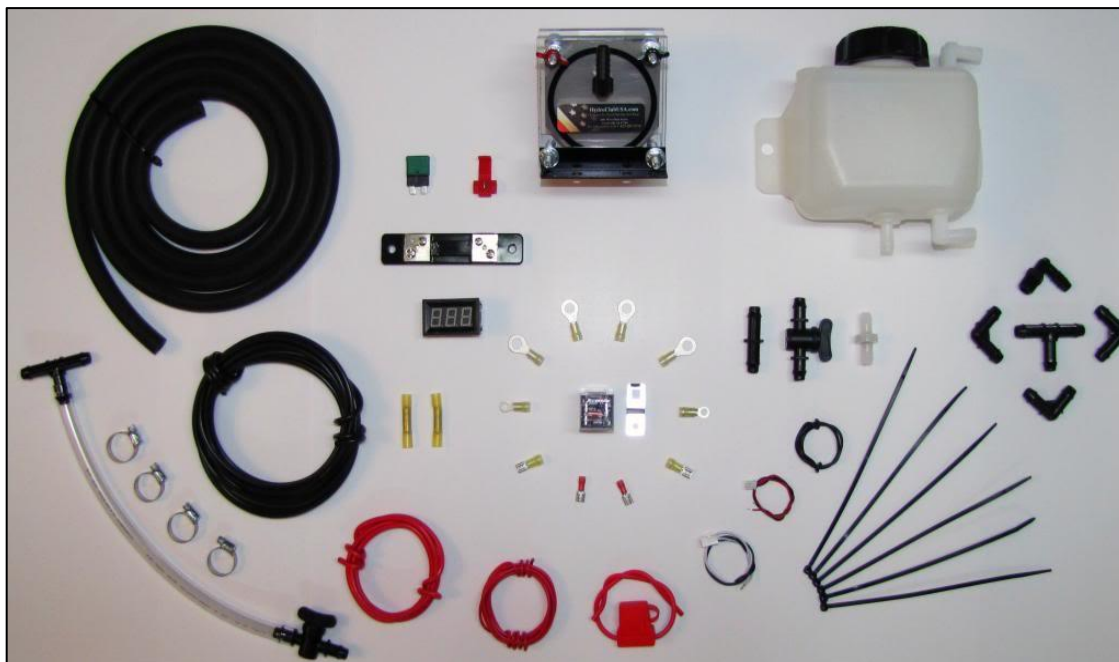
### 4.1 Materiais

No estudo realizado neste Trabalho de Conclusão de Curso foram utilizados os seguintes equipamentos, instrumentos e reagentes:

Equipamentos e Instrumentos:

- Célula de Hidrogênio
- Reservatório
- Água destilada
- Hidróxido de Potássio
- Mangueiras
- Bancada/Suporte
- Balança digital
- Filtro para retirar o condensado
- Fonte para ligar o amperímetro
- Fonte para ligar a célula
- Termopar
- Multímetro para medir a temperatura
- Multímetro de bancada para medir a tensão
- Amperímetro
- Abraçadeiras
- Conexões
- Fusíveis
- Hidróxido de Potássio – (KOH)

Figura 5 - Demonstração do Kit Hydrocell completo.



Fonte: Hydroclub USA.

## 4.2 Métodos

O experimento em questão foi desenvolvido no laboratório LTCM-Laboratório de Transferência de Calor e Massa pertencente à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC).

A metodologia aplicada consiste em investigar e estudar o desempenho de um sistema eletrolítico, e ver o quanto de fato é convertido para o motor de energia.

Para a realização da metodologia do experimento, executamos as seguintes etapas:

**1ª Etapa:** Realizar montagem experimental.

**2ª Etapa:** Planejar e desenvolver o sistema eletrolítico para produção de hidrogênio; Planejamento Experimental – identificar variáveis que influenciam os resultados do estudo; definir resultados qualitativos e que possam ser expressos matematicamente.

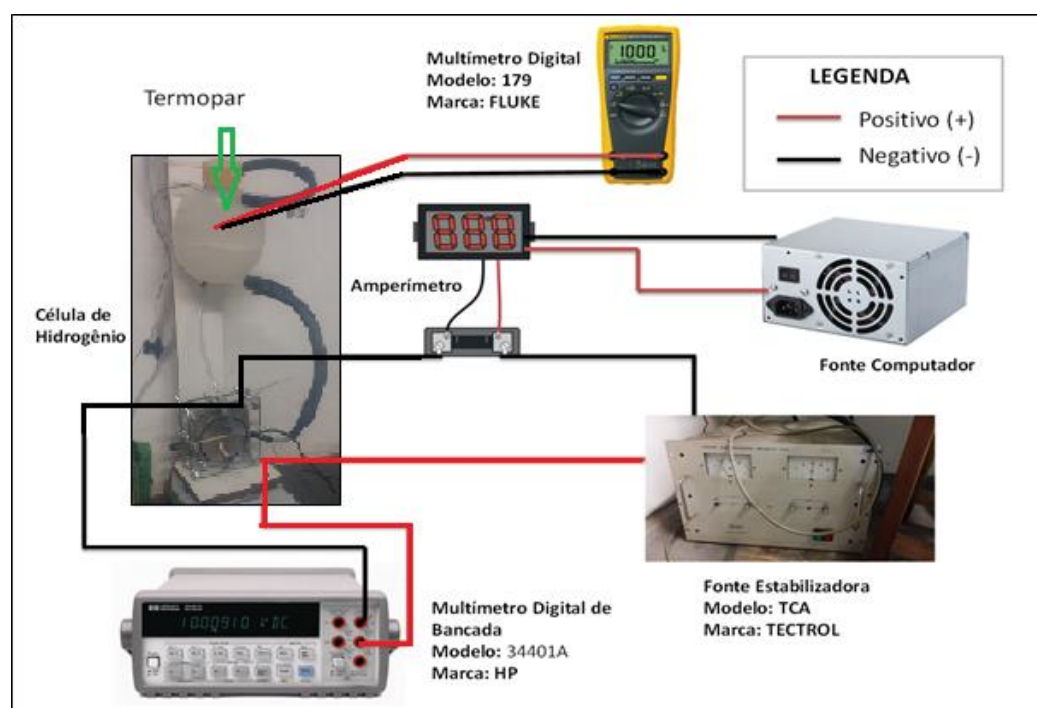
**3ª Etapa:** Realizar análise técnica do sistema; avaliar o seu comportamento na produção de hidrogênio.

**4ª Etapa:** Realizar análise econômica do sistema eletrolítico.

#### 4.2.1. Montagem experimental

A Figura 6 demonstra como foi feita a montagem do experimento e os principais equipamentos usados para realização das análises.

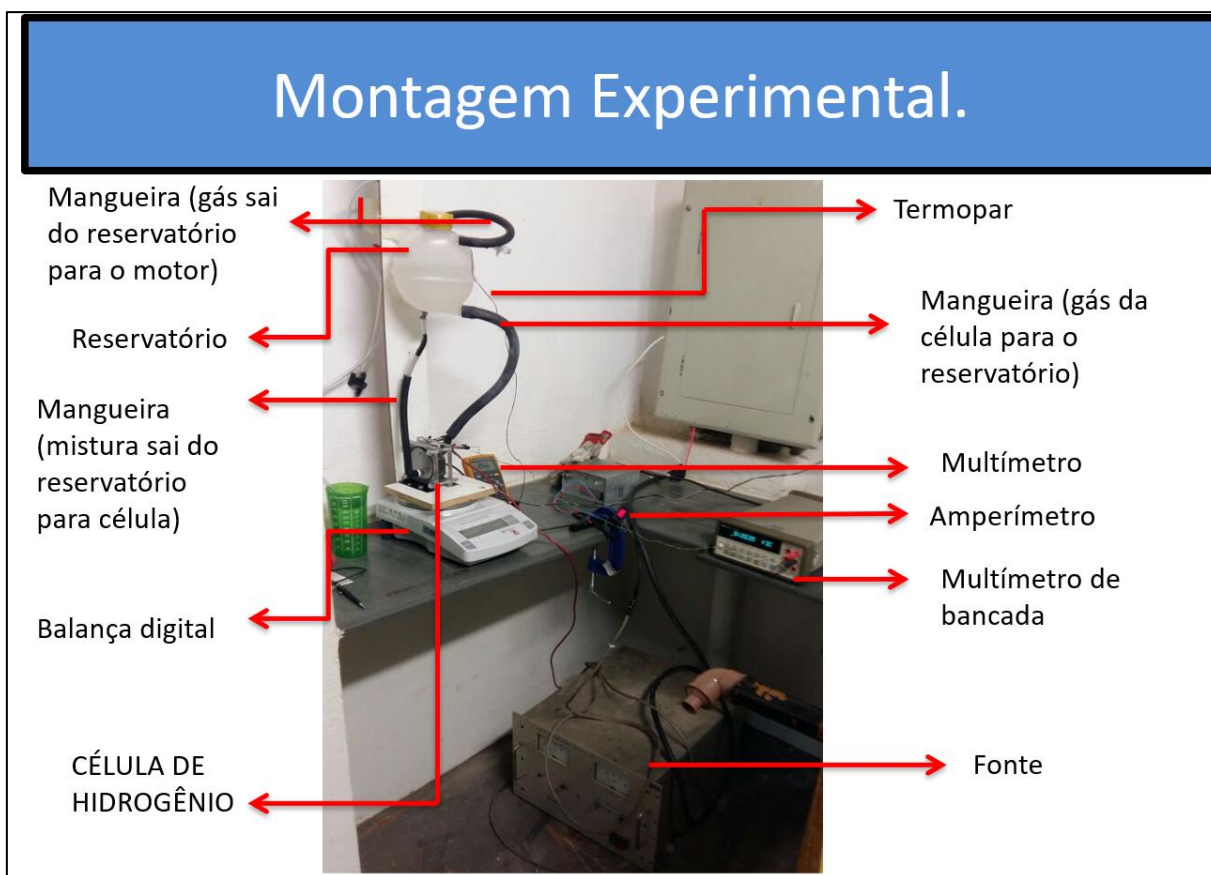
Figura 6 - Esquema de montagem experimental.



*Fonte: Autor.*

A célula eletrolítica foi ligada através de mangueiras fornecidas pelo fabricante a um recipiente cheio de água destilada, a fonte geradora de energia do experimento foi a fonte Estabilizadora modelo TCA da marca TECTROL, foi utilizado a fonte do computador, para alimentar o medidor de corrente, para medir toda corrente elétrica do experimento, foi utilizado dois multímetros como indicado na figura 6.

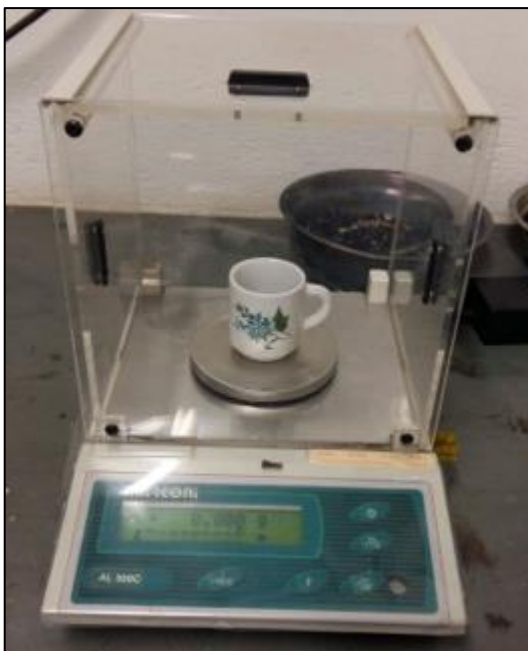
Figura 7 - Montagem experimental.



Fonte: Autor.

- 1° Foi acoplado à célula eletrolítica em cima de uma balança analítica de precisão, responsável para medir o precipitado.
- 2° O reservatório de solução de Hidróxido de Potássio é ligado através de mangueiras para a célula eletrolítica, para medição de temperatura da solução aquosa, foi instalado um termopar no reservatório.
- 3° Liga a mangueira responsável pelo transporte de gás da célula para o reservatório.
- 4° O sistema foi ligado em uma fonte de computador, responsável por gerar energia ao sistema.
- 5° Foram instalados multímetro e amperímetro para o acompanhamento e controle do experimento.

Figura 8 - Balança Analítica de precisão.



*Fonte: Autor.*

Foi utilizado 30g de eletrólito (Hidróxido de Potássio – KOH) em 1000 ml de água destilada, proporções dadas pelo fabricante da célula.

É adicionado Hidróxido de Potássio para aumentar a condutividade elétrica do meio aquoso, assim potencializando a geração de hidrogênio na célula eletrolítica.

#### **4.3 Planejamento e desenvolvimento do sistema**

Para realizar a montagem do sistema eletrolítico, foi feito uma revisão bibliográfica acerca de projetos de células eletrolíticas.

A célula possui eletrodos paralelos, distanciados por separadores, o projeto do sistema eletrolítico foi construído para que os gases hidrogênio e oxigênio fossem produzidos em lados opostos da célula, conforme apresentados na Figura 1.

Para o armazenamento e a circulação do eletrólito pelo sistema, foi utilizado um reservatório automotivo, usado no sistema de refrigeração a radiador do carro, ilustrado na parte superior da figura 9. Unidades ligadas por mangueiras e conectores obtidas junto ao kit, e a variação de temperatura do eletrolizador foi acompanhada com um termopar instalado junto ao reservatório.

Figura 9 - Célula eletrolítica e o reservatório utilizado.

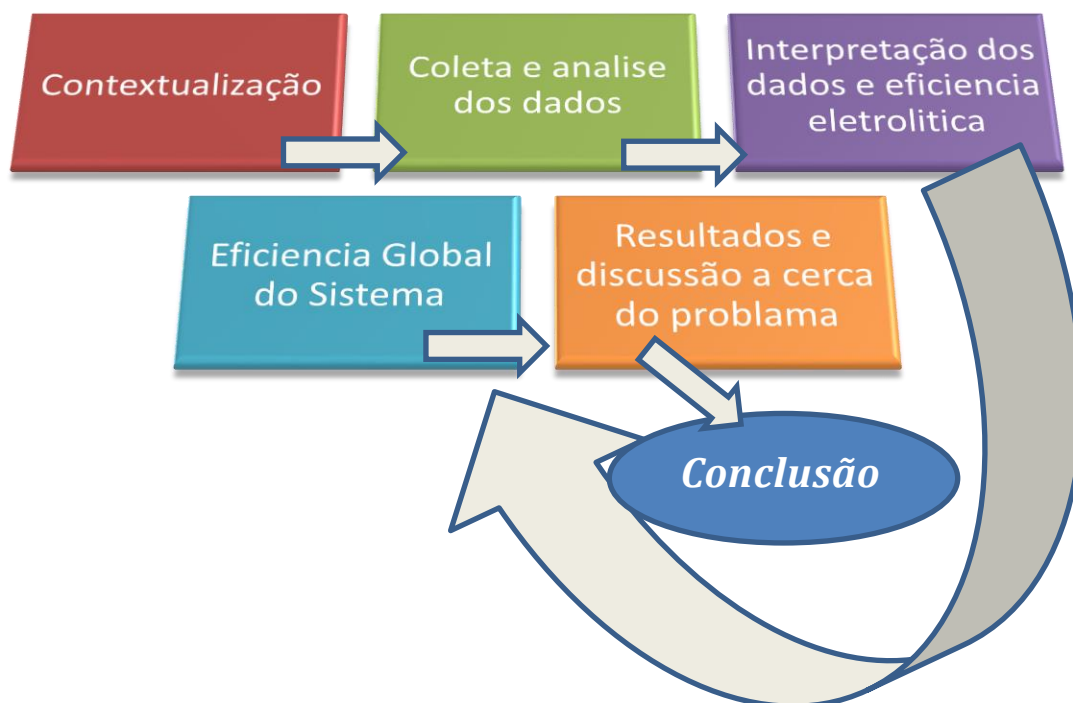


*Fonte: Autor.*

#### 4.3 Fluxograma geral do trabalho

Para um entendimento mais dinâmico do sistema foi feito um fluxograma, onde servira de apoio para melhor exemplificar e situar a cronologia do trabalho. Então, foi dividido em tópicos onde será descrito resumidamente abaixo cada etapa do trabalho.

Fluxograma 1 Visão geral do trabalho.



Na contextualização do trabalho está concentrado toda introdução do trabalho, além de uma visão conceitual da célula eletrolítica, como ela é apresentada ao mercado e os materiais e métodos utilizados no experimento.

Em coleta e análise dos dados foi realizado o procedimento experimental, onde basicamente foi coletado em laboratório dados sobre a quantidade de hidrogênio produzido e o quanto de energia foi gasto durante esse processo.

Na parte de interpretação dos dados e eficiência eletrolítica, foi determinado a eficiência da célula eletrolítica, ou seja, foi determinado o que a célula eletrolítica te entrega de eficiência energética, isso se resume em tirar a diferença da energia gasta menos a energia que a célula é capaz de produzir.

Para eficiência global do sistema, é a parte mais complexa do trabalho, onde analisamos várias variáveis a fim de obter o que de fato a célula eletrolítica é capaz de oferecer em economia energética, nesse caso usamos o total de energia gasta para a obtenção de hidrogênio, mais o possível ganho energético da menos as variáveis da combustão do motor ciclo Otto.

Em seguida descrito os resultados obtidos através dos cálculos gerados, e confrontados esses resultados com outros autores para enfim chegar na conclusão do trabalho.

#### **4.4 Análises experimentais**

Após a montagem experimental da célula eletrolítica HydroClub USA ser concluída, iniciou-se os testes da célula quinta-feira 16/06/2016 as 08:22AM no Laboratório de Transferência de Calor e Massa (LTCM) pertencente à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC), a análise foi realizada durante três dias, 16, 17 e 18, foi realizada a repetição do experimento por três dias para diminuir erros experimentais, foi monitorado seu rendimento durante um período de 10hr de funcionamento contínuos por dia.

Realizou-se 21 medidas por dia, feitas a cada 30 minutos, cuja variáveis consideradas foram: Massa, Corrente, Tensão, e a quantidade de condensado. Algumas observações foram colocadas durante o experimento descrito a seguir.



No primeiro dia o experimento foi iniciado as 08h22min, sempre na primeira hora de análise o equipamento terá um maior rendimento, pois o sistema ainda está frio, uma hora após o início dos testes, foi ligado um ventilador para resfriamento do sistema, até às 10h22min ainda não tínhamos quantidade suficiente de condensado para sua medição, a partir daí ele começou a ser medido e retirado. Das 10h52min até às 14h52min, o condensado foi retirado a cada medida de 30 minutos.

Retirar o condensado é importante para não ter uma aferição falsa da quantidade de hidrogênio gerado, o condensado é formado pois a célula de hidrogênio esquenta a ponto de a água mudar de fase.

As 13h22min como a temperatura estava aumentando muito, utilizou-se um ventilador mais potente para resfriamento do sistema. As 15h22min interrompeu o processo de retirada a água condensada no dreno. As 18h22min abriu-se a válvula de purga, liberando 15,18 g de água acumulados desde a última drenagem, somando um total de 52,47 gramas de condensado no dia. A Tabela 2 apresenta os resultados do primeiro dia de coleta.

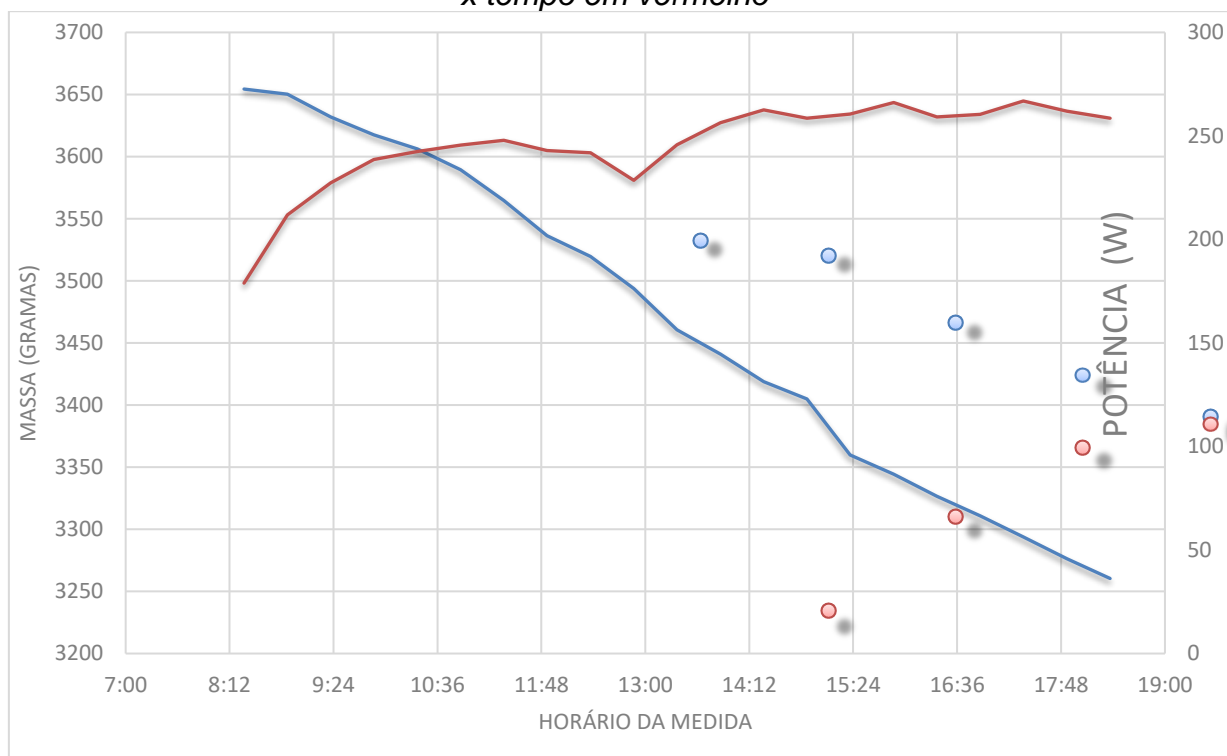
*Tabela 2 - Resultados do primeiro dia de coleta.*

Horário	Tempo(min)	massa (g)	Potência (W)	corrente (A)	tensão (V)	Condensado (g)
08:22:00	30	3654,40	178,90	14,90	12,01	
08:52:00	60	3650,22	211,90	17,70	11,97	
09:22:00	90	3631,90	227,26	19,00	11,96	
09:52:00	120	3617,50	238,68	19,90	11,99	
10:22:00	150	3606,16	242,48	20,20	12,00	
10:52:00	180	3589,36	245,63	20,50	11,98	4,30
11:22:00	210	3564,58	247,86	20,60	12,03	2,30
11:52:00	240	3536,38	242,86	20,20	12,02	3,14
12:22:00	270	3519,67	241,80	20,10	12,03	5,21
12:52:00	300	3493,87	228,61	19,00	12,03	6,74
13:22:00	330	3460,58	245,66	20,40	12,04	5,81
13:52:00	360	3441,09	256,35	21,30	12,04	3,84
14:22:00	390	3418,76	262,62	21,80	12,05	3,39
14:52:00	420	3404,88	258,49	21,50	12,02	2,51
15:22:00	450	3359,89	260,60	21,60	12,07	
15:52:00	480	3344,34	266,19	22,10	12,05	
16:22:00	510	3326,54	259,12	21,50	12,05	
16:52:00	540	3310,95	260,33	21,70	12,00	
17:22:00	570	3293,85	266,87	22,20	12,02	
17:52:00	600	3276,27	261,97	21,80	12,02	
18:22:00	630	3260,42	258,52	21,50	12,02	15,18
					Total	52,42

*Fonte: Autor.*

A seguir foi plotado um gráfico 1 referente ao primeiro dia para melhor representação de dados, sendo de massa de água em gramas pelo tempo em horas.

*Gráfico 1 - Representa a massa de água x tempo em azul. E a potência gasta x tempo em vermelho*



*Fonte: Autor.*

No segundo dia o experimento foi iniciado às 08h27min, após 30 minutos o ventilador para refrigeração do sistema foi ligado, em todas as análises teve presença de condensado, o condensado foi recolhido quando a coluna do purgador estava cheia, às 12h57min, às 16h57min e 18h27min no final do expediente. Onde obtivemos a massa total de condensado em gramas de 107,87 gramas.

A Tabela 3 apresenta os resultados do segundo dia de coleta, tais como os resultados obtidos em 30 em 30 minutos da coleta.

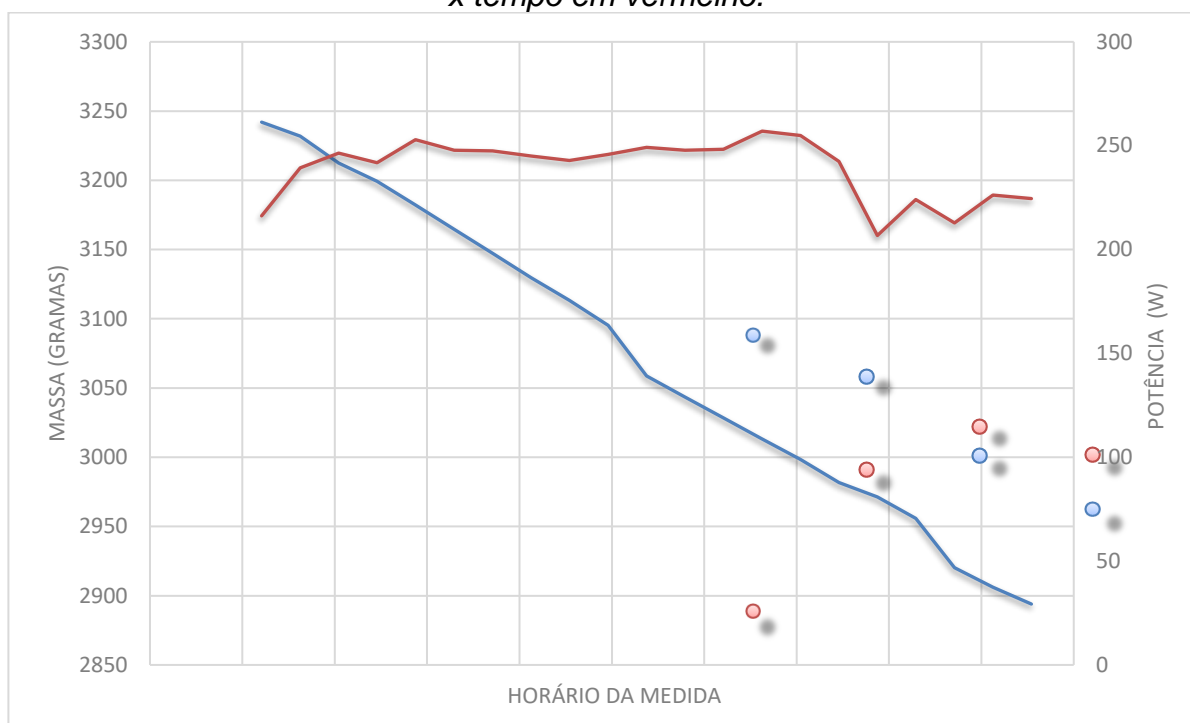
Tabela 3 - Resultados do segundo dia de coleta.

Horário	Tempo min	massa (gramas)	Potência (W)	corrente (A)	tensão (V)	Condensado (g)
08:27:00	30	3242,00	216,25	17,90	12,08	
08:57:00	60	3231,86	239,34	19,90	12,03	
09:27:00	90	3212,52	246,45	20,50	12,02	
09:57:00	120	3199,34	241,80	20,10	12,03	
10:27:00	150	3182,07	252,95	21,00	12,05	
10:57:00	180	3164,61	247,89	20,50	12,09	
11:27:00	210	3147,20	247,45	20,40	12,13	
11:57:00	240	3129,72	245,04	20,40	12,01	
12:27:00	270	3113,25	242,80	20,20	12,02	
12:57:00	300	3095,16	245,73	20,30	12,11	21,27
13:27:00	330	3058,65	249,26	20,60	12,10	
13:57:00	360	3043,57	247,82	20,50	12,09	
14:27:00	390	3028,48	248,25	20,60	12,05	
14:57:00	420	3013,20	257,01	21,40	12,01	
15:27:00	450	2998,40	254,95	21,20	12,03	
15:57:00	480	2981,73	242,45	20,10	12,06	
16:27:00	510	2971,30	206,75	17,00	12,16	
16:57:00	540	2955,87	224,06	18,60	12,05	40,73
17:27:00	570	2920,16	212,77	17,70	12,02	
17:57:00	600	2906,10	226,28	18,80	12,04	
18:27:00	630	2893,97	224,61	18,70	12,01	45,87
					Total	107,87

Fonte: Autor.

A seguir foi plotado um gráfico 2 referente ao segundo dia para melhor representação de dados, sendo de massa de água em gramas pelo tempo em horas.

Gráfico 2 - Representa a massa de água x tempo em azul. E a potência gasta x tempo em vermelho.



Fonte: Autor.

No terceiro dia o experimento foi iniciado as 09h15min, no intervalo de 30 minutos foram realizadas as medições das variáveis, em 12h25min foram realizadas uma medição com intervalo de 40 minutos devido ao horário de almoço, as 14h55min foi retirado o condensado com 14,84 gramas do purgador, e as 19h25min foi recolhido a última amostra de condensado com 34,46 gramas, totalizando no final do dia 49,30 gramas de condensado, finalizando o experimento.

A Tabela 4 apresenta os resultados do terceiro dia de coleta, tais como os resultados obtidos em 30 em 30 minutos da coleta.

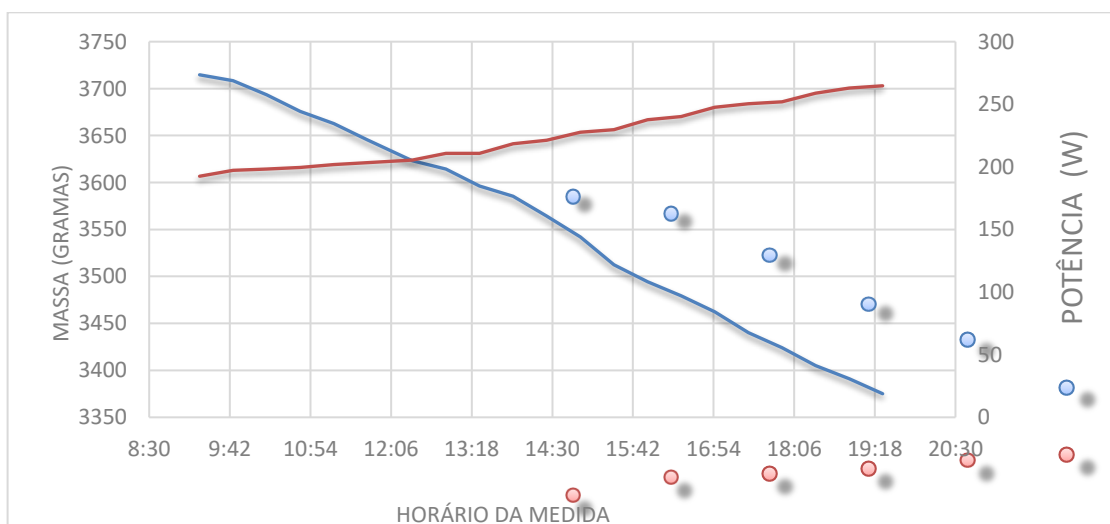
Tabela 4 - Dados do terceiro dia de coleta.

Horário	Tempo min	massa (gramas)	Potência (W)	corrente (A)	tensão (V)	Condensado (g)
09:15:00	30	3714,73	192,51	15,50	12,42	
09:45:00	60	3708,53	197,29	16,40	12,03	
10:15:00	90	3693,29	198,33	16,50	12,02	
10:45:00	120	3675,81	199,53	16,60	12,02	
11:15:00	150	3662,76	201,94	16,80	12,02	
11:45:00	180	3645,37	203,31	16,90	12,03	
12:25:00	210	3623,24	205,54	17,10	12,02	
12:55:00	240	3614,21	210,88	17,50	12,05	
13:25:00	270	3596,32	210,85	17,60	11,98	
13:55:00	300	3585,31	218,47	18,10	12,07	
14:25:00	330	3564,29	221,35	18,40	12,03	
14:55:00	360	3542,21	227,56	18,90	12,04	14,84
15:25:00	390	3512,33	229,77	19,10	12,03	
15:55:00	420	3494,31	237,58	19,70	12,06	
16:25:00	450	3479,42	240,19	19,90	12,07	
16:55:00	480	3462,31	247,64	20,50	12,08	
17:25:00	510	3440,11	250,43	20,80	12,04	
17:55:00	540	3424,31	251,85	20,90	12,05	
18:25:00	570	3405,22	258,86	21,50	12,04	
18:55:00	600	3391,10	263,02	21,90	12,01	
19:25:00	630	3375,13	264,76	22,10	11,98	34,46
					Total	49,30

Fonte: Autor.

A seguir foi plotado um gráfico 3 referentes ao terceiro dia para melhor representação de dados, sendo de massa de água em gramas pelo tempo em horas.

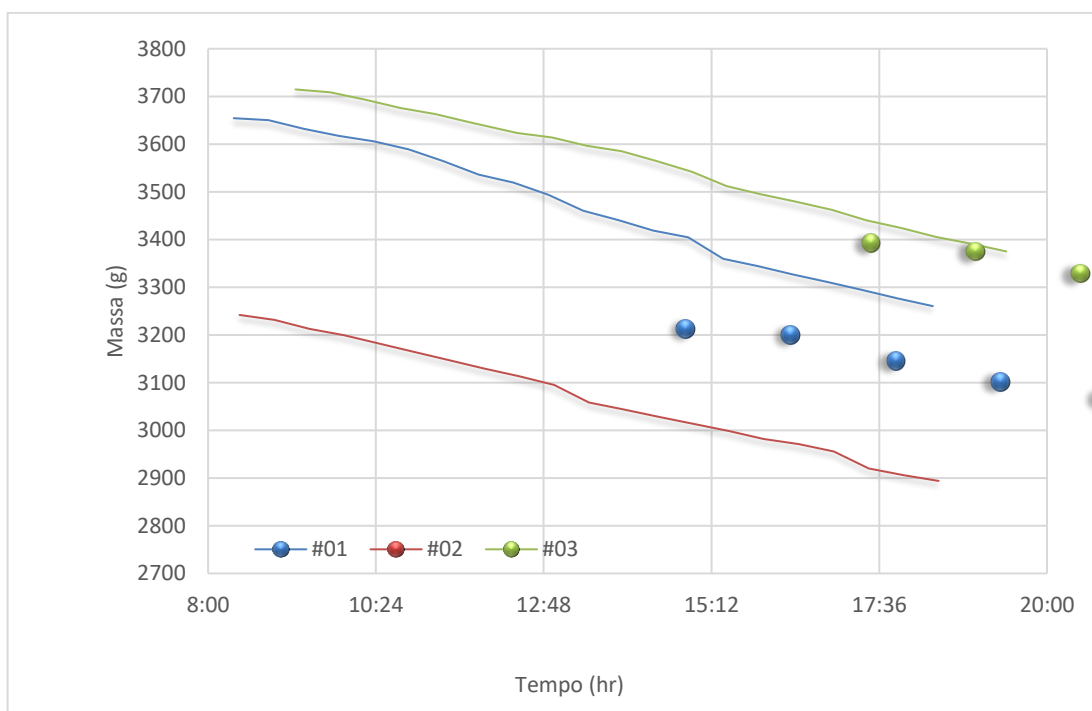
Gráfico 3 - Massa de água pela potência.



*Fonte: Autor.*

Para uma análise sistêmica das medidas, foi plotado o gráfico 4 com os dados separados da massa de água nos três dias de experimento, com o de potência nos três dias de experimento.

*Gráfico 4 - Massa x tempo nos três dias de experimento.*

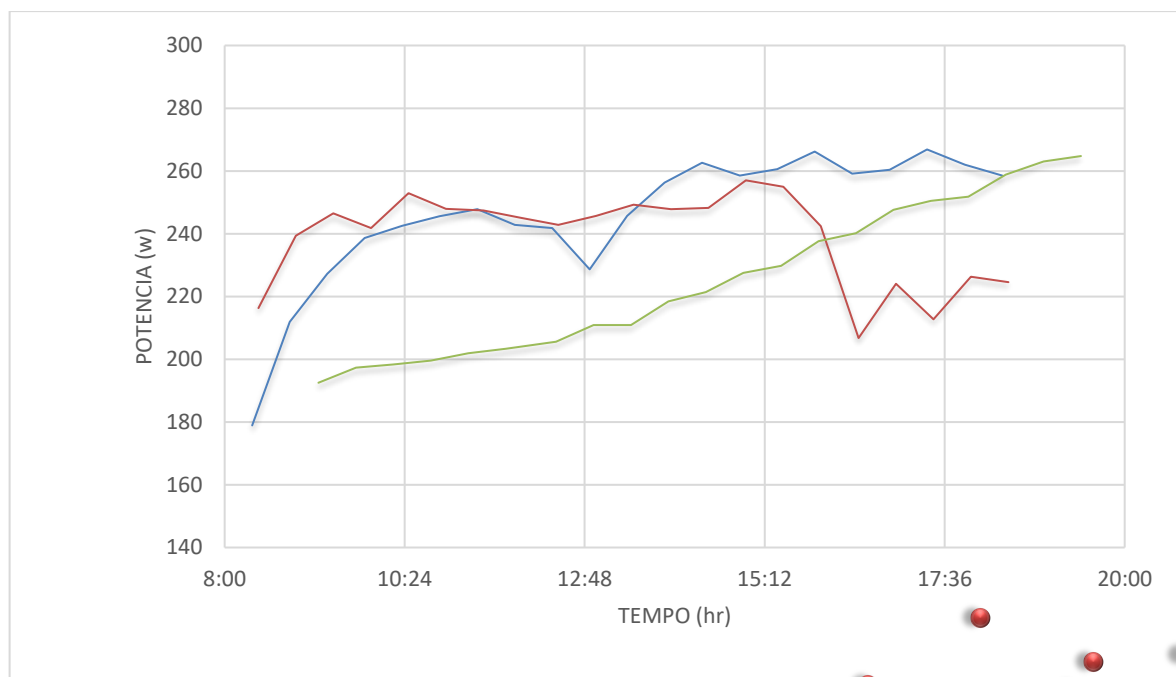


*Fonte: Autor.*

No gráfico 4, notamos a massa de água decrescendo, isso ocorre, pois, a célula eletrolítica está convertendo a água em hidrogênio e oxigênio, mas nem todo decréscimo de água resulta em hidrogênio, pois com o aquecimento da célula eletrolítica forma o condensado de água, esse condensado foi tirado durante o experimento para que não se confundisse com a formação de hidrogênio.

Para uma análise sistêmica das medidas, foi plotado o gráfico 5 com os dados separados da potência pelo tempo nos três dias de experimento.

Gráfico 5 - Potência x tempo nos três dias de experimento.



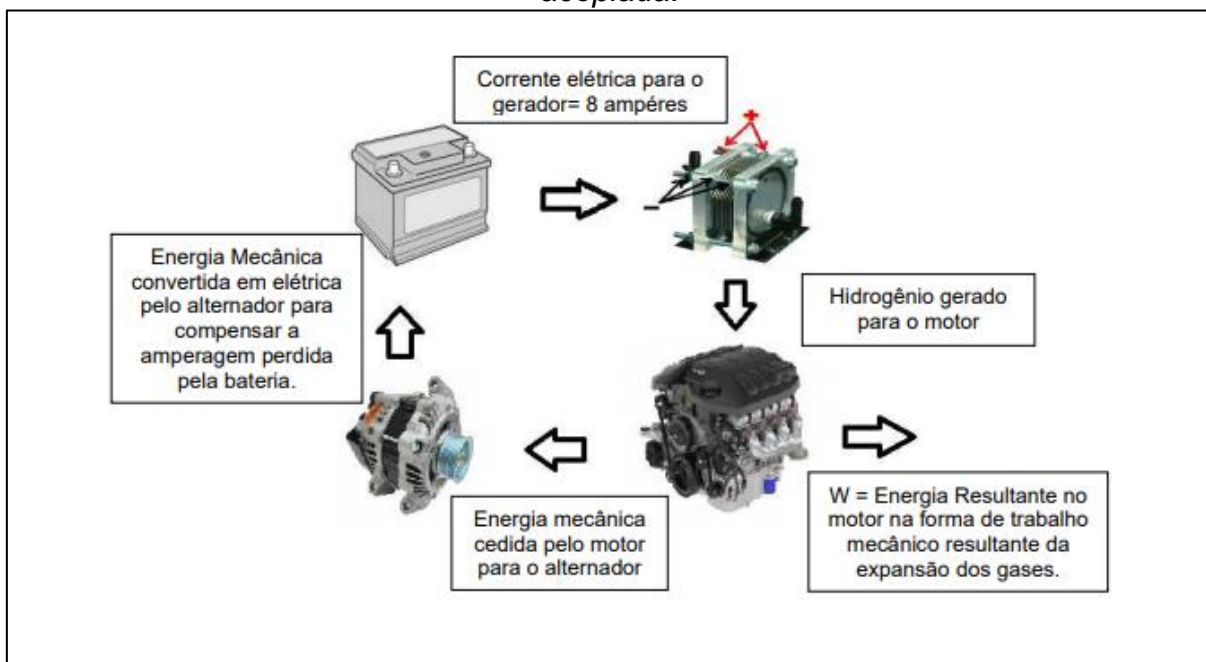
*Fonte: Autor.*

No gráfico 5 observamos a variação de potência do sistema eletrolítico, um dos fatores mais importantes dessa variação é a temperatura do sistema, sendo que quanto mais quente menor a conversão de água em hidrogênio, tendo um menor desempenho.

#### **4.5 Fluxograma do funcionamento da célula eletrolítica no carro (hidrolise da água).**

A seguir, será descrito as etapas cronológicas do funcionamento da célula eletrolítica no veículo.

Figura 10 - Ilustração do ciclo de um veículo com uma célula eletrolítica acoplada.

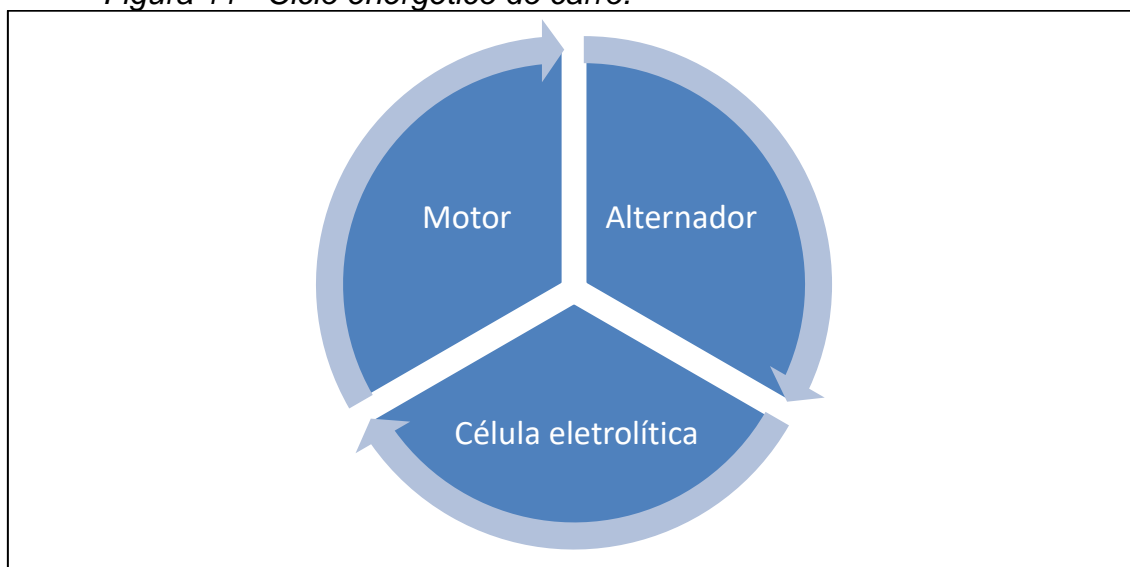


Fonte: ROSA, D. A. (2015). Editada pelo autor.

Após instalada a fonte de hidrogénio, precisa de uma fonte de alimentação para gerar corrente para eletrolise (alternador), para que o alternador funcione, o alternador é vinculado ao motor por correias, sendo o abastecimento do motor com a gasolina ou combustível proveniente do seu carro, em seguida esse combustível é queimado em combustão, rotacionando o motor. E novamente se inicia o ciclo girando o alternador, conseqüentemente ele gera a tensão necessária para a eletrolise na célula eletrolítica e demais componentes de veículos elétrico. Figura 11 representa o ciclo eletrolítico no veículo a combustão.



Figura 11 - Ciclo energético do carro.

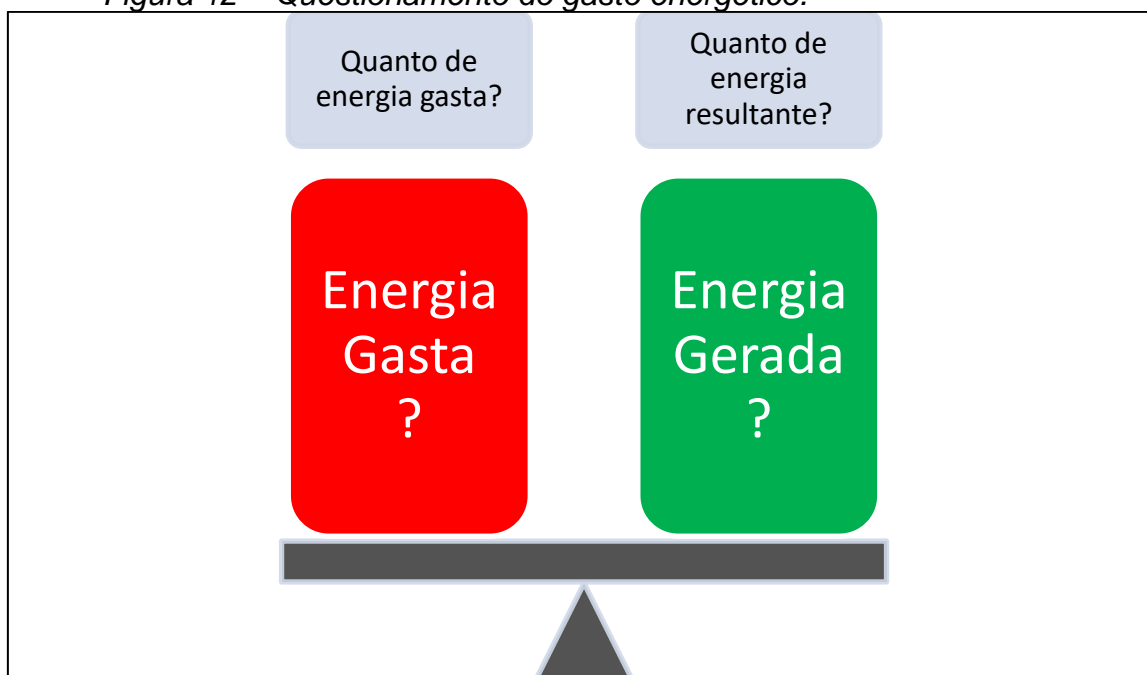


Fonte: Autor.

A grande questão desse processo é a razão do quanto de energia é gasto para a produção de hidrogênio, pelo quanto de energia o oxigênio é capaz de oferecer de volta ao ciclo.

A figura a seguir mostra uma balança enfatizando o questionamento da razão de energia nessa etapa.

Figura 12 – Questionamento do gasto energético.



Fonte: Autor.

#### 4.6 Fluxograma do funcionamento da célula eletrolítica no carro (Rendimento Global do Sistema).

Além do rendimento do sistema, outras variáveis influenciam na eficiência final do sistema, só depois de compreender e analisar essas influencias, chegaremos ao rendimento global do sistema.

Essa é a parte mais complexa do trabalho, aqui analisaremos resumidamente o que acontece dentro do motor. Por fim, concluiremos se a instalação da célula eletrolítica é viável ou não para o sistema.

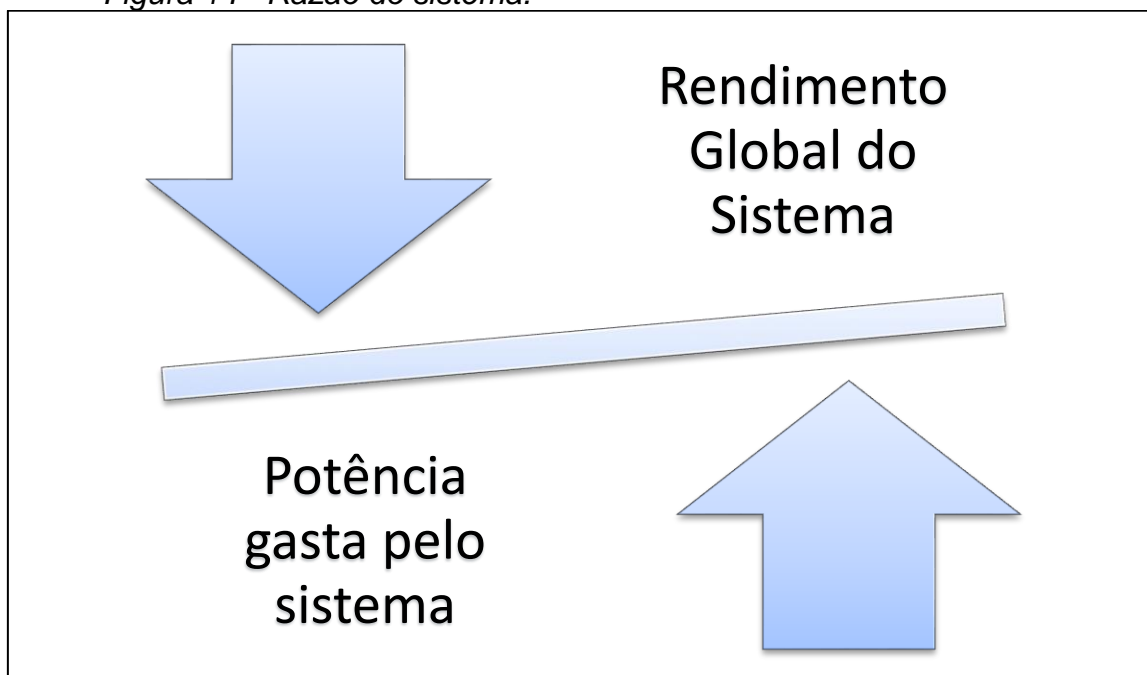
Figura 13 – Questionamento sobre a viabilidade energética.



Fonte: Autor.

Basicamente para o cálculo do rendimento global do sistema pela diferença entre a potência gasta para gerar o hidrogênio da potência obtida do hidrogênio gerado.

Figura 14 - Razão do sistema.



Fonte: Autor.

A seguir, foi feita toda modelagem do sistema em detalhes, explicando e analisando cada cálculo e os principais conceitos envolvidos.

## 5 Resultados

Para resolução do conjunto de equações algébricas foi utilizado o software EES cujo o código está no anexo 1 ao final da monografia, os valores são descritos abaixo.

### 5.1 Cálculo da Hidrolise da água.

Para determinação da quantidade de hidrogênio produzido pela célula de hidrogênio, adotamos as seguintes variáveis como referência.

Tabela 5 - Dados de Referência.

Dados com base no Estado de Referência Padrão	
Temperatura	25°C
Pressão	101,325

Fonte: Autor.

Com auxílio de uma tabela periódica obtemos os valores tabelados do peso atômico de cada elemento, isso é importante pois quantificamos a produção de hidrogênio medindo o delta de água na produção menos a quantidade de condensado.

*Tabela 6 - Tabela do peso atômico dos elementos na hidrólise.*

Massa Molar(H <sub>2</sub> )	2,016 [kg/kmol]
Massa Molar (O <sub>2</sub> )	32 [kg/kmol]
Massa Molar (H <sub>2</sub> O)	18,02 [kg/kmol]

Fonte: Autor.

Determinado a pressão e temperatura no ERP, calculamos a densidade da água, usando o ERP:

*Tabela 7 - Densidade da água.*

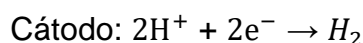
Massa H <sub>2</sub> O	18,02
Volume de H <sub>2</sub> O	24,47
Densidade de H <sub>2</sub> O	0,7364 g/mL

Fonte: Autor.

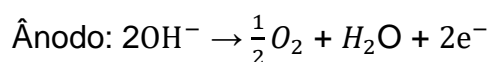
O cálculo do balanço estequiométrico determinará a relação ocorrida na eletrolise, sendo a composição da água sendo de cada dois hidrogênio temos um oxigênio.

Segundo (CHEN, LASIA, 1992), durante a eletrolise da água, o hidrogênio e o oxigênio se separam por dois mecanismos, no cátodo e no ânodo.

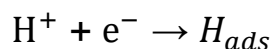
No cátodo temos elétrons livres por consequência da corrente gerada que “fundem” moléculas de hidrogênio, assim gerando o gás hidrogênio, essa equação e descrita como:



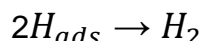
Já no ânodo, temos hidroxila livre, formando assim uma molécula de oxigênio, água e deixando elétrons disponíveis na solução, a reação no cátodo e o inverso da reação no ânodo. A equação no ânodo e descrita como:



Acontece uma reação de adsorção para formação de hidrogênio:



Em seguida, uma dissociação química como demonstrado a seguir:



A lei da conservação de massa de Lavoiser parte do princípio de “Na natureza, nada se perde, nada se cria, tudo se transforma.”, sendo melhor expressada por “Numa reação química de recipiente fechado, a soma das massas dos reagentes é igual a soma das massas do produto.” Ou seja, nesta reação de eletrolise o máximo de energia que podemos obter e a quantidade de poder calorífico do produto.

No experimento laboratorial, obtemos valores diários de massa de água perdido pelo sistema, segue a equação correspondente:

*Tabela 8 - Demonstra a massa de água perdida em cada dia do experimento.*

	Massa de água perdida(kg)
Dia 1	0,341564
Dia 2	0,302164
Dia 3	0,305139
Média da Massa em [kg/s]	$8,88 * 10^{-6}$

Fonte: Autor.

Com o PCS e a quantidade de massa de Hidrogênio obtida no experimento, calculamos a quantidade possível de energia que o sistema pode gerar:

*Tabela 9 - Demonstra a quantidade possível de energia que o sistema pode gerar.*

Massa da água	$8,88 * 10^{-6}$ [kg/s]
Poder calorífico superior	13422
Quantidade possível de energia	0,1179 [kW]

Fonte: Autor.

Para que tenhamos o rendimento da célula eletrolítica, temos que fazer uma relação do quanto de energia o hidrogênio proveniente da célula pode gerar, com o

quanto de energia gasta pelo sistema eletrolítico, então calculamos seu gasto pegando a média energia gasta durante os três dias de experimento e convertimos para kW na tabela a seguir:

*Tabela 10 - Tabela a seguir representa as médias diárias de energia gasta.*

	Média de energia gasta
Dia 1	245,84
Dia 2	239,04
Dia 3	225,32
Média de Energia gasta	0,2367 [kW]

Fonte: Autor.

Agora podemos obter o rendimento global da célula eletrolítica da relação de quantidade de potencial que poderá ser gerado pela potência gastas, multiplicamos por 100 para obter a porcentagem de seu rendimento.

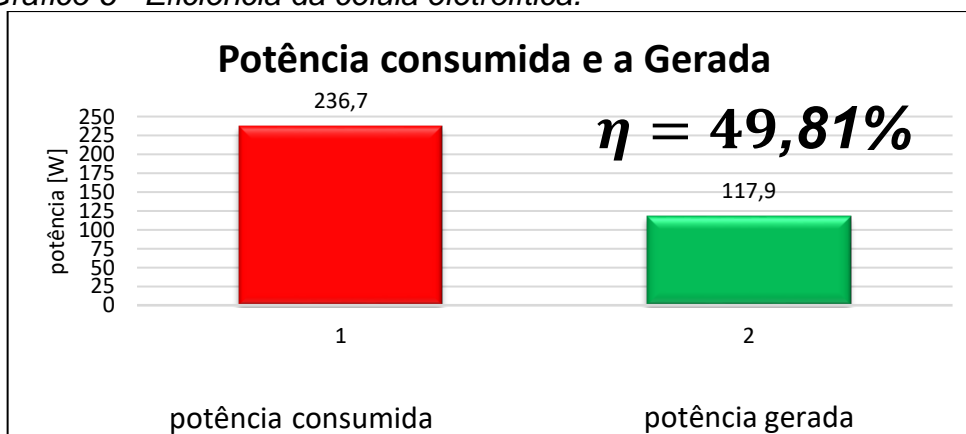
*Tabela 11 - Rendimento da hidrólise.*

Quantidade possível de energia	0,1179
Energia gasta na produção de $H_2$	0,2367
Rendimento da hidrólise	49,81%

Fonte: Autor.

No gráfico 6 é apresentado a potência consumida para gerar o hidrogênio, pela potência gerada proveniente do mesmo.

*Gráfico 6 - Eficiência da célula eletrolítica.*



Fonte: Autor.

## 5.2 Nessa etapa foi calculado a quantidade de água no ar

A umidade do ar é o fator externo com maior influência na combustão do combustível, pois incrementos na presença de água alteram a quantidade e tipos de íons, modificando a corrente de ionização.

Sabendo que no sistema temos excesso de ar e umidade, partiremos com seguintes dados de entrada:

*Tabela 12 - Dados de entrada.*

Temperatura de entrada do combustível	30°C
Pressão atm na entrada do combustível	101,325 [kPa]
Excesso de ar	1,1 %
Umidade do ar	60%
Pressão de saturação	3,17
Pressão de vapor	1,902

Fonte: Autor.

Pressão de saturação é o quanto de líquido passa a ser vapor e exerce uma pressão sobre o mesmo, sendo que, em equilíbrio termodinâmico, a quantidade de líquido que vira vapor é igual a quantidade de vapor que volta a ser líquido, aumentando a volatilidade do combustível.

Pressão de vapor é a pressão exercida pelo vapor de água no líquido, com aumento dessa pressão, pode se chegar a um novo estado de equilíbrio termodinâmico chamado de pressão de saturação.

Então obtemos a pressão de saturação do combustível utilizando os dados de entrada. A pressão de vapor está em função da pressão de saturação, para calcularmos a pressão que o vapor exerce sobre o líquido temos:

A volatilidade de um líquido é o quanto esse líquido evapora em um sistema, sendo que quanto mais volátil ele for menos energia ele precisará para ter um rompimento intramolecular e evaporar. Quanto mais volátil ele for mais energia ele precisará para romper as moléculas e ficar em forma de vapor.

Adiciona-se uma quantidade de etanol na gasolina para aumentar a volatilidade do combustível, para que se alinhe o tempo de combustão do motor, com o tempo de giro do cilindro, com esse controle podemos obter um melhor rendimento energético.

Agora sabemos a influência do combustível para a eficiência energética, calculamos a massa de água na umidade do ar, que no dia do experimento foi de 60%. Segue a tabela da massa de água no ar:

*Tabela 13 - Valores das variáveis para determinação da Massa de água.*

Massa atômica do gás Hidrogênio	0,02248 [kg/kmol]
Massa atômica do gás Nitrogênio	28,01 [kg/kmol]
Massa atômica do gás Oxigênio	32 [kg/kmol]
Pressão de vapor	1,902
Umidade do ar	0,622
Massa do N após o balanceamento	0,08453 [kg/kmol]
Pressão no estado de referência padrão	101,3
Massa de água	0,03673 [kg]

Fonte: Autor.

Para determinarmos a massa de água no ar, fazemos a razão da massa de água pela massa molar de H<sub>2</sub>O.

*Tabela 14 - Demonstra informações sobre a molécula da água.*

Massa H <sub>2</sub> O	0,03673
Massa Molar H <sub>2</sub> O	18,02
Massa de H <sub>2</sub> O no ar	0,002039 [kmol/kg]

Fonte: Autor.

Segundo MARTINS, 2005, a variação da umidade de ar interfere diretamente na combustão, o aumento da umidade da mistura reduz a velocidade de chama e a temperatura máxima da combustão. Testes feitos por [ERIKSSON, 1988] constatou que o aumento da umidade na mistura reduziu a velocidade da combustão, e conseqüentemente ocorre queda na potência e na eficiência do motor.

### 5.3 Cálculo do rendimento global

*Tabela 15 - Dados de Referência.*

Dados com base no Estado de Referência Padrão	
Temperatura	25°C
Pressão	101,325

Fonte: Autor.



Com auxílio de uma tabela periódica, obtemos a massa molar das moléculas da combustão do sistema:

*Tabela 16 - Massa Molar dos principais elementos da combustão.*

Massa Molar(H <sub>2</sub> )	2,016 [kg/kmol]
Massa Molar (O <sub>2</sub> )	32 [kg/kmol]
Massa Molar (N <sub>2</sub> )	28,01 [kg/kmol]
Massa Molar (H <sub>2</sub> O)	18,02 [kg/kmol]

Fonte: Autor.

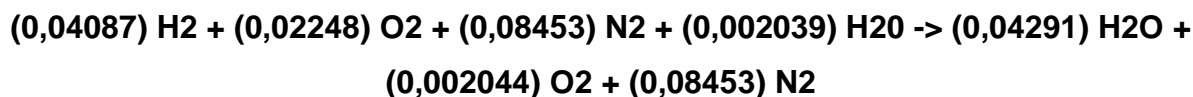
A seguir e mostrado o balanceamento químico da combustão do motor.

São utilizadas as seguintes considerações: a combustão é completa (não forma CO) e o nitrogênio não participe da reação. 1 - Cálculo da necessidade teórica de ar durante a combustão, a massa de cada elemento permanece a mesma.

Equação química da combustão:



Realizando o balanço estequiométrico da equação temos:



Realizando o balanço estequiométrico por elemento em [kmol/kg]:

Para o hidrogênio:

$$\mathbf{2 * 0,04087 + 2 * 0,002039 = 2 * 0,04291}$$

Para o oxigênio:

$$\mathbf{2 * 0,02248 + 0,002039 = 0,04291 + 2 * 0,002044}$$

Para o Nitrogênio:

$$\mathbf{0,08453 = 3,76 * 0,02248}$$

O ar é fundamental para que ocorra a combustão do motor, sendo que sua densidade também é um fator que influenciará sua eficiência, pois no caso da gasolina por exemplo é 14,6: 1, ou seja, são necessários para queima de 1 grama de combustível 14,6 gramas de ar.

A densidade do ar varia de acordo com a temperatura, sendo assim quanto mais frio o ar fica, maior sua densidade, conseqüentemente terá um gasto maior de combustível para que ocorra uma combustão completa.

*Tabela 17 - Densidade do hidrogênio, razão entre a massa e o volume.*

Massa do Hidrogênio	2,016
Volume do Hidrogênio	24,46
Densidade do Hidrogênio	0,0824 [kg/kmol]

Fonte: Autor.

*Tabela 18 - Composição volumétrica do combustível.*

Volume total	100
Densidade do hidrogênio	0,0824
Massa molar de hidrogênio	2,016
Composição volumétrica do hidrogênio	0,04087 [kmol]

Fonte: Autor.

A relação entre a massa de ar e a massa de combustível que formam a mistura que será admitida pelo motor. A razão do ar pelo combustível teórica é obtida levando em conta a quantidade de ar necessária para combustão completa do combustível.

*Tabela 19 - Massa do combustível.*

Composição volumétrica do combustível	0,04087
Massa molar de hidrogênio	2,016
Massa do combustível	0,0824

Fonte: Autor.

*Tabela 20 - Princípio da conservação de massa.*

Energia inicial	3,206 [kg/kmol]
Energia Final	3,206 [kg/kmol]
Erro	$2,04 \cdot 10^{-5}$

Fonte: Autor.

O erro representa o delta de energia, ou seja, para conservação de energia, quanto menor for o erro, mais confiável será o cálculo.

A entalpia representa a energia interna que as moléculas de determinada substância possuem.

Cálculo das entalpias em [kJ/kg]:

Dados:

$T_{ERP} = 25^{\circ}\text{C}$

$\text{Entalpia}_{\text{H}_2\text{O}} = -13422 \text{ [kJ/kg]}$

Para determinarmos a quantidade de energia interna dos combustíveis, calcula o poder calorífico.

*Tabela 21 - Dados para determinação do PCI.*

Poder Calorífico Superior	-119946
Ns1	0,04291
Massa Molar da água	18,02
Massa do combustível	0,0824
Entalpia de vaporização	2442
Poder Calorífico Inferior	-97037 [kg/kmol]

Fonte: Autor.

A temperatura de chama adiabática ( $T_{ad}$ ) é a mais alta temperatura atingida pela chama antes que qualquer calor apreciável tenha sido transferido para a carga. O calor é transferido do gás de combustão para a carga principalmente por radiação, a qual é proporcional à quarta potência da temperatura.

Para a resolução do cálculo acima, calculamos com auxílio do software EES as entalpias dos seguintes compostos:

*Tabela 22 - Entalpia do combustível para determinação da massa de ar.*

Entalpia real do Hidrogênio	71,75
Entalpia real do Nitrogênio	5,189
Entalpia real do Oxigênio	4,572
Entalpia real da Água	-13413
Entalpia do combustível	5,912 [kg/kmol]
Entalpia do Ar	15,92 [kg/kmol]
Entalpia da combustão	7907 [kg/kmol]
Entalpia da chama	7929 [kg/kmol]
Entalpia da Água	-9407

Entalpia do Oxigênio	1835
Entalpia do Nitrogênio	1987
Massa de Ar	3,124 [kg/kmol]

Fonte: Autor.

Agora verificamos a massa de ar pela massa de combustível, assim obtemos a razão das massas entre eles.

*Tabela 23 - Razão de ar atmosférico/combustível.*

Massa do ar	3,124
Massa do combustível	0,0824
Razão das massas	37,91 [kg/kmol]

Fonte: Autor.

*Tabela 24 - Massa de água perdido pelo sistema nos três dias de experimento.*

Dia 1	0,3416
Dia 2	0,3022
Dia 3	0,3051
Massa de Água	$8,88 * 10^{-6}$ [kg/s]

Fonte: Autor.

*Tabela 25 - Determinação da massa de hidrogênio.*

Massa de Água	$8,88 * 10^{-6}$ [kg/s]
Massa Molar do Hidrogênio	2,016
Massa Molar da Água	18,02
Massa de Hidrogênio	$9,831 * 10^{-7}$ [kg/s]

Fonte: Autor.

Segundo (WOLLMANN, 2013), o rendimento real do motor, ou seja, o que de fato faz os pistões se movimentarem é em média de 21-25%. E o restante de energia é perdida de forma mecânica, sendo que em média 35% perde na energia interna dos gases, 32% na troca de calor do motor com o ambiente por meio do sistema de refrigeração, e cerca de 10% por outros percas. Totalizando um total de 75-80% de perca no sistema.

*Tabela 26 - Rendimento médio do veículo a combustão média de 22%.*

Massa do gás Hidrogênio	9,831 * 10 <sup>-7</sup>
Poder calorífico inferior absoluto	-97037
Quantidade de energia possível	0,02099 [kg/kmol]

Fonte: Autor.

Cálculo da quantidade de energia possível, esse valor representa o quanto de energia o combustível pode proporcionar.

*Tabela 27 - Gasto de potência gerado nos três dias de experimento em kW.*

Dia 1	245,84
Dia 2	239,04
Dia 3	225,32
Gasto	0,2367 [kW]

Fonte: Autor.

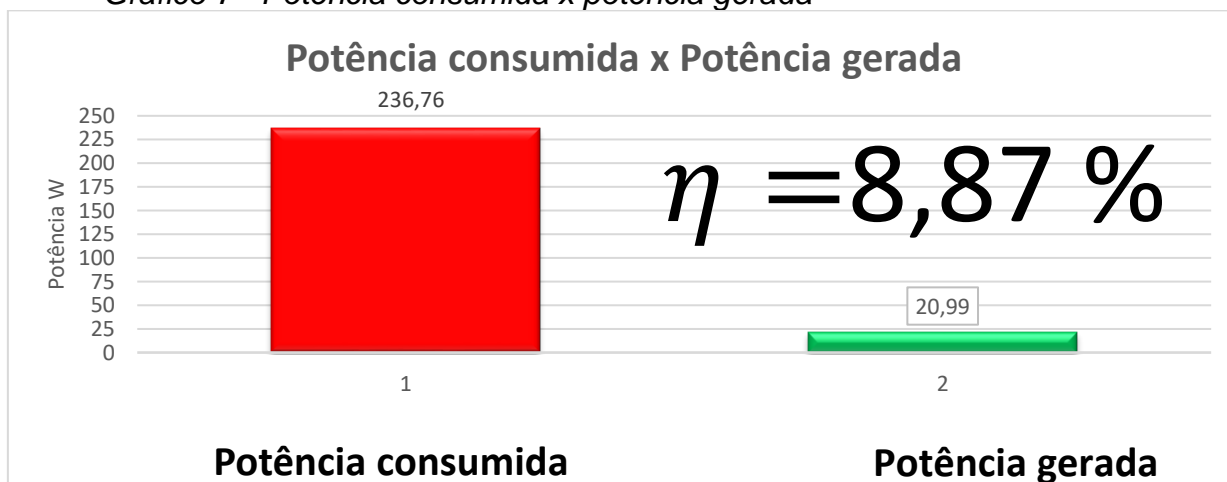
Finalmente calculamos o rendimento global do sistema, onde dividimos a quantidade de energia possível “Q” pela energia gasta durante a produção do combustível hidrogênio.

*Tabela 28 - Rendimento da combustão.*

Quantidade possível de energia	0,02099
Energia gasta na produção de H <sub>2</sub>	0,2367
Rendimento da Combustão	<b>8,87%</b>

Fonte: Autor.

*Gráfico 7 - Potência consumida x potência gerada*



Fonte: Autor.

Portanto, foi analisado que o rendimento global do sistema é de 8,87%, isso significa que a cada 236,74W gastos para produção de hidrogênio, o hidrogênio entrega apenas 20,99W para o trabalho do motor.

## 6 DISCUSSÃO.

Neste capítulo é apresentado e discutido a viabilidade econômica da célula eletrolítica. Para melhor compreensão das equações apresentadas é recomendado a leitura e interpretação do Anexo 1 onde é realizado a dedução das mesmas.

### 6.1 Eficiência energética.

Apesar do hidrogênio ter o poder calorífico de quase três vezes maior do que o da gasolina como indica a Tabela 1, a sua produção demanda muita energia, pois quanto maior a energia requerida pelo veículo, um maior gasto energético o motor vai usar para o alternador gerar essa energia, assim aumentando seu consumo de combustível.

Através dos cálculos realizados no capítulo 5.1 quantificamos a potência gasta para produção do hidrogênio gasta = 0,2367kW e o quanto de potência o combustível proveniente me gera  $Q = 0,1179$  kW. Ao dividir a potência gerada pela gasta, e multiplicar por 100 obtemos  $\eta = 49,81\%$ , assim obtendo a eficiência energética de produção de hidrogênio.

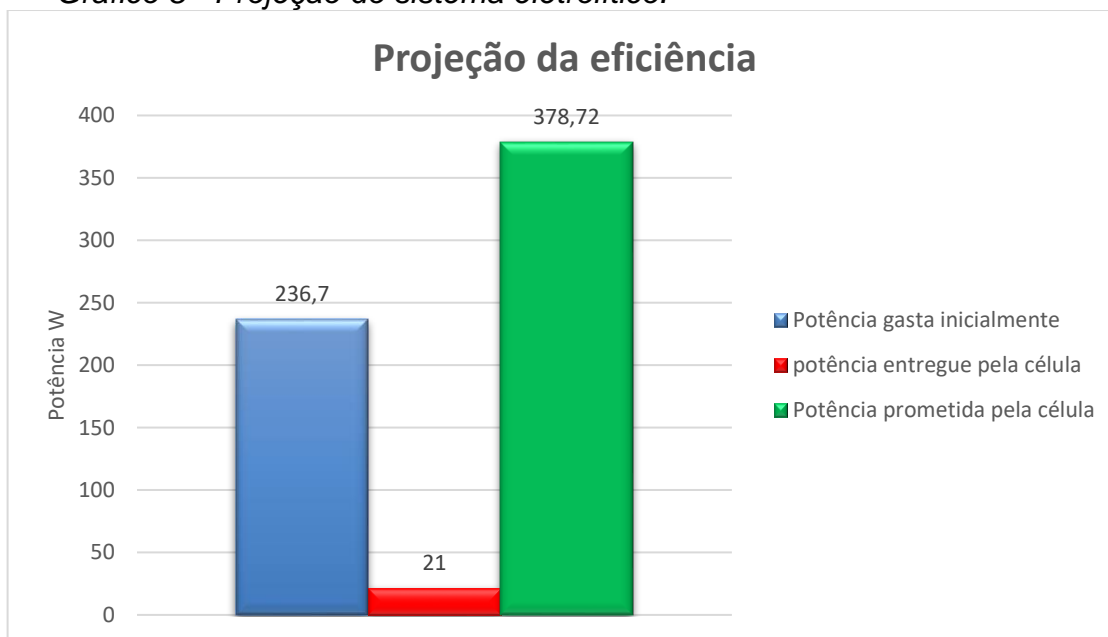
Sucintamente falando isso significa que a cada 100 W de energia usados para realizar o processo da hidrólise, o resultado obtido na sua produção entrega apenas 49,81W de energia para o motor. Então essa “terceirização” do combustível não é vantajosa.

Com outras palavras para exemplificar o resultado. Se você tivesse R\$100,00 reais para ir até o mercado da esquina fazer compras, e você chamasse seu amigo para ir com você, e ele cobrasse R\$49,81, reais para fazer companhia. Se você tivesse ido sozinho você teria um poder de compra de R\$100,00 reais, mas como você pediu seu amigo para ir com você, e ele te cobrou R\$49,81 reais, seu poder de compra é de apenas R\$50,19 reais, pois o restante foi “perdido pelo sistema”. O veículo sem a

célula é como você ir sozinho, com a célula de hidrogênio representa a companhia do seu amigo. Então é extremamente ineficiente chamar “seu amigo” para ir com você.

De acordo com as informações contidas no anúncio da célula eletrolítica, o desempenho seria de até 60%, ou seja, se consumirmos 236,7W teríamos que obter 378,72W disponível para ser usado pelo motor. Gráfico 7 exibe a projeção da eficiência eletrolítica.

Gráfico 8 - Projeção do sistema eletrolítico.



Fonte: Autor.

Nenhuma máquina térmica tem um rendimento total de energia, nos motores a combustão ciclo Otto por exemplo é em média 22% é que existem várias outras “percas” de carga, calcula-se o rendimento global do sistema no capítulo abaixo.

## 6.2 Rendimento global

Levando em conta os resultados discutidos no capítulo 6.1 Eficiência da célula, abordaremos os fatores que influenciam de fato o desempenho do veículo a combustão interna, desempenho do motor, assim verificando o rendimento global do sistema.

Segundo o resultado gerado no capítulo 6, o rendimento global da célula eletrolítica é de 8,87%, apresentando um péssimo rendimento global ao sistema,

isso ocorreu por diversos fatores, os principais são o baixo rendimento da célula eletrolítica, e o baixo rendimento do motor.

Já compreendemos os valores obtidos pelo baixo rendimento da célula eletrolítica, então salientaremos os motivos do baixo rendimento global.

O cálculo do rendimento global consiste basicamente em pegar a quantidade real de hidrogênio gerado, multiplicar pelo poder calorífico inferior absoluto e multiplicar pelo rendimento do motor do carro, que foi usado 22% (rendimento médio de veículos a combustão). O resultado dessa equação nos gera o calor possível do sistema.

Então calculamos o gasto energético médio dos três dias de experimento em kW.

### **6.3 Comparação de resultados entre trabalhos que usaram a Hydrocell USA**

Este capítulo trata da comparação dos resultados do meu trabalho (célula eletrolítica veicular, mitos e verdades) e os resultados de WOLLMANN, (2013) (estudo da utilização de gás hidrogênio em veículos automotores), pois ambos os trabalhos objetivam-se avaliar o desempenho mesma célula eletrolítica.

A metodologia dos trabalhos foi feita de maneiras distintas, sendo que a avaliação de Wollmann foi instalar a célula eletrolítica diretamente no veículo, onde, segundo ele “podemos verificar um aumento significativo nos quilômetros percorridos com um litro de combustível. O valor mínimo de ganho apresentado neste experimento varia de 6% até uma média de 43%”.

Partindo do pressuposto que o experimento dele foi feito in situ, e seus resultados foram positivos, ou seja, que a célula eletrolítica gera bons resultados, iniciaremos a discussão.

Os dados de consumo de combustível foram coletados com veículo andando normalmente pelas ruas, onde não teve qualquer metodologia sobre o tempo percorrido pela rotação por minuto (RPM) do carro, nem um controle de declives e aclives, as únicas metodologias utilizadas foram:

- Abastecimento com gasolina aditivada em postos com bandeira Petrobras.
- Abastecimento completo até o primeiro desligamento automático da bomba.
- Médias de quilometragem em rodovias e cidade.



O experimento sem a instalação da célula de hidrogênio foi feito sem nenhuma metodologia específica, onde simplesmente abasteceu o carro, e ficou a andar com o veículo durante 1350 Km.

Essa metodologia é pouco eficiente para o consumo de combustível de um carro em motores de combustão interna, pois geram várias variáveis difíceis de calcular como: aclives, temperatura ambiente do dia, rota utilizada, RPM do motor variável, entre várias outras.

Para o teste com a célula eletrolítica ainda não houve nenhuma metodologia, simplesmente saiu com o carro a andar, mas o erro mais gritante foi a sua coleta de dados com apenas 400 Km percorridos ao invés dos mesmos 1350 do teste sem a célula. WOLLMANN, (2013). p 59.

Com uma distância muito menor percorrida as chances do erro se propagar aumenta muito, pois após a instalação da célula eletrolítica, a bateria está com carga máxima, então ela auxilia para a geração de H<sub>2</sub>, dependendo muito menos do alternador. O resultado seria muito mais confiável caso após a ignição do veículo teste, trocasse a bateria por outra bateria totalmente descarregada.

A principal função da bateria é dar partida no veículo, onde ele demanda determinada energia que supre a necessidade de girar o motor de partida e a bomba de combustível, a bateria é um acumulador de energia. Já o alternador fornece energia a bateria após o veículo dar partida.

Segundo (OLIVEIRA, G.C S; SIMEÃO, J. D. 2018) os alternadores dos veículos são dimensionados para suprir a necessidade do veículo em estado original, ou seja, com a adição de componentes eletrônicos a demanda por energia aumenta, assim tendo um maior gasto de combustível.

O uso da célula eletrolítica pode comprometer o tempo de vida da sua bateria, ou até com seu uso durante várias horas consecutivas, pode até esgotar toda energia da bateria, pois os alternadores não são fabricados para trabalharem com sobrecarga, assim eventualmente quando desligar o veículo, a bateria pode “ter acabado”.

Ainda segundo WOLLMANN, (2013), as melhorias nos testes realizados aconteceram por causa de alguns fatores, foi analisado o primeiro fator disposto.

O primeiro ponto colocado foi: “O alternador do veículo produz carga em excesso, enquanto o gerador de hidrogênio apenas utiliza parte da capacidade extra, enquanto o veículo estiver em funcionamento.” WOLLMANN, (2013). p 63.

O alternador não produz carga em excesso, esse princípio vai contra a primeira lei da termodinâmica cuja é a consequência direta do princípio de conservação de energia, onde, a energia total de um sistema sempre se mantém constante, pois ela é transformada, e nada se ganha ou é perdido.

Segundo (OLIVEIRA, G.C S; SIMEÃO, J. D. 2018) o regulador tem como função proteger os equipamentos que fazem uso da energia gerada pelo alternador, controlando a tensão produzida em qualquer regime de rotação do motor e limitando esta tensão para que não haja picos de corrente elétrica, o que pode causar danos nos consumidores elétricos. Ele também impede que a bateria automotiva sofra sobrecarga. Existem reguladores mecânicos, multifunção, eletrônicos e híbridos dependendo de cada alternador.

O trabalho de (ROSA. D. A 2015) provavelmente foi usado a mesma célula eletrolítica, essa incerteza ocorre pois não foi especificado no trabalho, mas nos métodos do trabalho em questão tem fotos da célula eletrolítica, e o link do site oficial.

Segundo (ROSA. D. A 2015) os 12 volts de tensão que a bateria do veículo possui, a produção do hidrogênio era mínima e insuficiente para obter qualquer resultado no motor. Na tentativa de solucionar este problema adicionou-se mais (KOH) na solução para aumentar a corrente dentro da célula e gerar mais H<sub>2</sub>, outra alternativa foi ligar duas baterias em serie, sendo elas independentes e de 55amp/hr conectadas ao gerador. O problema em ambas as questões foi o aquecimento da placa geradora, na qual foi medido com um termômetro digital e verificou-se aproximadamente 80°, que se somando com a pequena dimensão da placa gerou muito vapor de água junto com o hidrogênio, podendo comprometer o poder de explosão do hidrogênio no motor.

Os resultados obtidos no trabalho de (ROSA. D. A 2015) sobre a ineficácia da célula eletrolítica foi parecido com o meu trabalho, apesar de ele usar ainda mais equipamento com uma tentativa de melhorar a produção de H<sub>2</sub>, o equipamento dele ainda trabalha com baixa produtividade, nossos trabalhos divergem dos resultados encontrados por WOLLMANN (2013), provavelmente por que ele não fez uma metodologia mais eficiente.

#### **6.4 Discussão da Avaliação do desempenho HP**

A seguir será calculado o quanto a instalação da célula eletrolítica corrobora em ganho de cavalos (HP) no veículo.

Calculo de ganho de HP:

Temos:

Potência final = 20,99 W

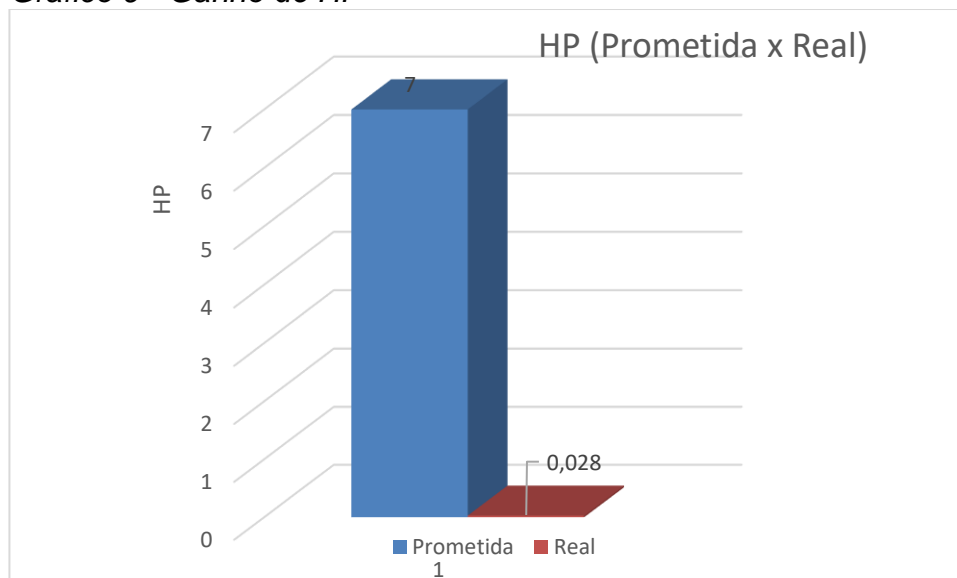
1 HP = 745,7 W

$$\text{Ganho HP} = \frac{20,99}{745,7}$$

$$\text{Ganho HP} = 0,028 \text{ HP}$$

O fabricante da célula eletrolítica prometeu um aumento de HP de 10%, sendo que após o experimento obtemos um ganho real de HP de apenas 0,028. A seguir está plotado um gráfico 11 para melhor visualizar a diferença prometida pela diferença real de HP, com uma simulação de um veículo de 70 cavalos (HP).

Gráfico 9 - Ganho de HP



Fonte: Autor.

Para alcançar um ganho de HP de 10% teríamos que instalar 250 células eletrolíticas no veículo, seria totalmente inviável já que o seu gasto de combustível também se propagaria por no mínimo 250 vezes.

Segundo (ROSA, 2015), o resultado de ganho de potência quando o veículo estava operando com o reator ligado foi de: 0,5375 HP (400 watts) de média. Portanto, mesmo tendo um reator não eficiente, o projeto se mostrou sustentável no ponto de vista energético, fornecendo uma potência de 0,2831 HP (211 watts) ao motor.

O resultado do ganho de HP foi “bem próximo” do meu trabalho, e apesar de ele dizer que seu reator não é tão, ele exalta o ganho energético de 0,28 HP. Provavelmente a quantidade de HP dele foi maior pois ele usa o H<sub>2</sub> como combustível auxiliar, ou seja, além do GNV foi instalado a célula eletrolítica a fim de converter melhores resultados. Apesar do ganho de HP ser real, essa quantidade é insignificante perto da potência oferecida originalmente pelo motor de seu veículo que em média é cerca de 68-104 HP. Conclui-se que gastar muito mais energia para alimentar o motor do seu veículo, é o único ponto positivo são míseros 0,28 HP.

Ainda segundo (Rosa, 2015) este saldo positivo de energia pode ser obtido pelo aumento do rendimento térmico do motor de combustão interna obtido, quando se tem um aumento de temperatura na câmara de combustão. Concordo com ele, com outras palavras, provavelmente o ganho de HP é proveniente do hidrogênio, pois seu poder calorífico é maior que o da gasolina, então assim aumenta a temperatura de combustão, assim os pistões expandem mais rápido, gerando o ganho de HP.

Outro fator que pode influenciar no baixo ganho de HP é a ineficiência da célula eletrolítica, pois o motor tem que trabalhar mais pesado (pois o alternador está em sobrecarregado) gastando mais gasolina, resultando numa mistura com muito mais gasolina que hidrogênio. O ganho de HP seria muito mais efetivo caso tivesse uma fonte externa de hidrogênio como um reservatório, conseguiria injetar quantidades suficientes para um real ganho de HP perceptível no pedal do veículo.

Segundo WOLLMANN, (2013). P 61. Seu veículo obteve um ganho de 1,8-4,8HP dependendo do RPM, esse valor pode ser explicado pelo seguinte, quando ele inicia o teste de potência do veículo, a carga já existente na bateria ajuda no fornecimento de energia para a conversão em H<sub>2</sub>, desse modo obtemos um ganho significativo de HP. Para um teste mais confiável, deve se tirar a bateria do veículo após a partida, e substituir a bateria por outra sem nenhuma carga.

Caso queira ganhar um pouco de potência sem alterar as condições do veículo, o simples fato de abastecer com etanol gera um ganho de potência em média

dependendo do veículo de 2%, mas isso também gera um consumo maior de km/l, pois o poder calorífico do etanol é menor que o da gasolina.

O trabalho de CONELHEIRO. L. T. P; LUCIANO A (2012). Conclui que é viável o uso de hidrogênio em veículos automotores pelo simples fato de que a célula gera hidrogênio.

No caso de CONELHEIRO. L. T. P; LUCIANO A (2012) eles apresentam a célula eletrolítica, mas não especifica a metodologia utilizadas e tampouco os cálculos, provavelmente utilizou uma revisão bibliográfica.

### **Trabalhos que corroboram com minhas conclusões**

CRIZOL (2021) analisa as vantagens e desvantagens da célula eletrolítica que está alinhado com o meu trabalho. A seguir segue as conclusões semelhantes do meu trabalho que aferem com o trabalho de CRIZOL (2020).

#### Vantagens:

- Pode-se gerar alta densidade energética. CRIZOL (2020). Caso seja uma fonte de energia externa.
- Caso o hidrogênio seja produzido de uma fonte externa. Redução de consumo de combustível em percentual de 10% a 58%, dependendo da produção. CRIZOL, A. A Z. (2020).

#### Desvantagens:

- As vantagens só são obtidas no veículo caso o hidrogênio seja implantado de uma fonte externa.
- Segundo PICHELI, G. D; GUEDES, L. C V; SILVA, T. L. N; GUEDES, E. E. V (2019), este tipo de sistema indevidamente manuseado e periculosidade pelo gerador são desvantagens para de geração aplicado aos motores de combustão interna.
- O projeto se delimita a quantidade de energia elétrica disponível no veículo, ou seja, provinda somente da bateria. CRIZOL (2020).

- O armazenamento de gás é um risco devido ao seu grau de perigo, podendo gerar possíveis explosões, logo todo o tipo de produção do gerador deverá ser instantâneo. CRIZOL (2020).
- Possíveis danos materiais e/ou pessoais. CRIZOL (2020).
- O baixo rendimento energético.
- Conclusão da célula de combustível segundo CRIZOL (2020):  
A eletrólise da água provinda do gerador de hidrogênio, se inviabiliza para um automóvel de combustão interna. De modo geral a inviabilidade nestas condições propostas. E além de que o percentual de hidrogênio produzido pelo gerador, torna-se insatisfeito para as circunstâncias de uma possível economia de combustível, assim evidenciando o ponto principal desta pesquisa. CRIZOL (2020).

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O trabalho realizado por meio de dados empíricos de laboratório, análise feita em referencial teórico, ajuda muitas pessoas a se nortear para não ser enganado pelas propagandas encantadoras da célula eletrolítica.

Diante disso a pesquisa teve como objetivo geral avaliar a eficiência da célula eletrolítica e apresentar sua viabilidade. Onde constatou-se que a mesma tem um rendimento ineficiente causando prejuízos ao usuário.

Constata-se que o objetivo final foi atendido pois com a análise dos resultados obtidos no experimento em laboratório e desenvolvidos no EES provamos que a célula eletrolítica tem um rendimento energético negativo.

Posto isso, temos os objetivos específicos do trabalho:

Onde o primeiro objetivo era entender o funcionamento do sistema da célula eletrolítica, e foi atendido durante o trabalho, pois foi explicado sucintamente o funcionamento da célula eletrolítica.

O segundo objetivo era realizar o procedimento experimental de bancada em condições ideais; isso foi atingido realizando o experimento de bancada buscando reduzir o máximo de incógnitas, providenciando condições mais próximas do ideal,

O terceiro objetivo específico era analisar e descrever os resultados obtidos tanto graficamente como o memorial de cálculo gerado para a conclusão do trabalho.

Onde utilizamos ferramentas disponíveis como Excel e o software ESS gerando resultados tanto graficamente como no memorial de cálculo, assim obtemos os resultados da pesquisa.

A pesquisa partiu da hipótese de que houvesse muitas vantagens monetária em instalar a célula eletrolítica devido ao seu alto potência calorífico.

E realiza teste da hipótese rejeitando H0 e aceitando H1 como verdadeiro, pois constatou-se que o desempenho econômico da célula foi negativo.

Então tenho a resposta do problema devido ao experimento e cálculos realizados pudemos compreender como um todo o funcionamento e rendimento da célula eletrolítica.

Os dados foram coletados os dados no Laboratório (FEMEC), onde realizou teste de consumo de potência e eficiência da célula eletrolítica, que basicamente consiste em pôr em funcionamento a célula eletrolítica em condições indicadas pelo fabricante e registrar os resultados.

### **LIMITAÇÕES DO TRABALHO**

O trabalho foi desenvolvido em laboratório e apesar de ter a célula eletrolítica para fazer os testes, ela não foi acoplada a um motor de um carro para resultados práticos.

### **RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Testar outras células eletrolíticas mais tecnológicas.
- Usar outros eletrólitos e outras concentrações.
- Analisar em um cromatógrafo gasoso os gases provenientes da eletrólise.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-GHOUTI, M.; AL-DEGS, Y.; MUSTAFA, F. **Determination of hydrogen content, gross heat of combustion, and net heat of combustion of diesel fuel using FTIR spectroscopy and multivariate calibration.** Fuel, n. 89, p.193-201, 2010.

*Bardi, U., El Asmar, T., Lavacchi, A., 2013. Turning electricity into food: the role of renewable energy in the future of agriculture, Journal of Cleaner Production, vol. 53, pp. 224-231.*

CARCASSI, M. N., FINESCHI, F. **Deflagrations of H<sub>2</sub> – air and CH<sub>4</sub> – air lean mixtures in a vented multi-compartment environment.** Energy, v. 30, n<sup>o</sup> 8, p. 1439 – 1451, 2005.

CHEN, L.; LASIA, A. **Study of the kinetics of hydrogen evolution reaction on nickel-zinc powder electrodes.** Journal of Electrochemical Society, 11, 3214 – 3219.1992.

Coelho, P., Costa, M., “**Combustão**”, 1<sup>a</sup> Edição, 2007.

COLLEGE OF THE DESERT. **Hydrogen Properties – Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies.** College of the Desert, Palm Desert, CA 92260, USA. Energy Technology Training Center. 43-500 Monterey Avenue. 2001. Disponível em: <<https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f9/fcm00r0.pdf>>. Acesso em: 29/04/2021.

CONELHEIRO. L. T. P; LUCIANO A. **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA GERADOR DE HIDROGÊNIO GASOSO PARA UTILIZAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO EM VEÍCULOS AUTOMOTORES** 2012. Acesso em 11 de junho de 2021.

CRIZOL, A. A. Z. **GERADOR DE HIDROGÊNIO: construção, vantagens e aplicações no motor à combustão.** (2020). Acesso em 12 de julho de 2021.



Eriksson, Lars – **Spark-Advance Control by Ion-sensing and Interpretation** – Linköping University, 1998.

**FILHO**, apud PEREIR. **O ESTUDO DO HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL.**

FURLAN, André Luís. **Análise técnica e econômica do uso do hidrogênio como meio armazenador de energia elétrica proveniente de fontes eólicas.** Campinas, SP: [s.n.], 2012.

**GERAÇÃO TÉRMICA. Tabelas com os valores das capacidades caloríficas de alguns combustíveis.** Disponível em: <<http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/podercalorifico.htm>>. Acesso em: 30 mai. 2021.

HILSDORF, J. W.; BARROS, N. D.; TASSINARI, C. A.; COSTA, I. **Química tecnológica.** Editora Thomson. São Paulo, 2004.

LAY, J. J., LEE, Y. J., NOIKE, T. **Feasibility of biological hydrogen production from organic fraction of municipal solid waste.** *Water Research*, v. 33, 1999.

MACEDO, Magno Urbano; CARVALHO, Antônio. **Química.** 1 ed. IBEP: São Paulo, 1999. v. único. 413 p.

MARTINS, Jorge. **Motores de Combustão Interna.** 1.ed. Portugal: Publindústria Edições Técnicas, 2005. 437p.

NOGUEIRA, M. F. M., RENDEIRO, G. **Caracterização Energética da Biomassa Vegetal.** In: MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA –MME. Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida –Soluções Energéticas para a Amazônia. 1º Edição. Brasília, 2003.

OLIVEIRA, G.C S; SIMEÃO, J. D. (2018). **ALTERNADORES, UMA FONTE EFICIENTE DE ENERGIA AUTOMOTIVA.** P2. Acesso em 09 de julho 2021.

PATRÍCIO, R. A.; SALES, A. D.; SACRAMENTO, E. M.; DE LIMA, L. C.; A, VEZIROGLU, T. N. **Wind hydrogen energy system and the gradual replacement of natural gas in the State of Ceará e Brazil.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 37, p. 7355 – 7364. 2012.

PEREDO, E. M. M. **Produção de Hidrogénio por Fotoeletrolise da Água – Aproveitamento do Subproduto Oxigénio.** *Dissertação de Mestrado em Optimização Energética na Indústria Química, Instituto Superior do Porto – ISEP, 2012.*

PEREIRA, Deydeby Illan dos Santos **Desenvolvimento e Avaliação do Uso de Eletrodos Porosos de Níquel Para Produção de Hidrogênio Eletrolítico,** *Campina Grande – Pb, p. 1-136, set. 2019.*

PEREIRA, Deydeby Illan dos Santos. **AVALIAÇÃO DE UM REATOR CONSTITUÍDO POR ELETRODOS POROSOS DE NÍQUEL PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO,** *Campina Grande – Pb, p. 1-90, março de 2015.*

PICHELI, G. D; GUEDES, L. C V; SILVA, T. L. N; GUEDES, E. E. V. **O USO DE HIDROGÊNIO EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA.** (2019). Acesso em 12 de julho de 2021.

ROSA, D. A. (2015). **ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE UM.** p. 70.

RUSSELL, J. B. **Química geral.** 2. Ed. São Paulo: Makron, 628p, 1994.

SANTOS, J. E. **Controle e automação de um sistema de geração de energia elétrica renovável: Avaliação da célula a combustível H<sub>2</sub>/ar tipo PEMFC.** *Tese de Doutorado em Engenharia Química – Recursos Regionais e Meio Ambiente, Centro de Ciências e Tecnologia, UFCG, 2013.*

SILVA E. P.; CAMARGO, J. C. **Integração e Sistemas com Célula Combustível,** 1º *Workshop Internacional sobre Células a Combustível.* São Paulo, SP – 2002.

SOUSA, A. B. *Estudo de um Eletrolisador Bipolar Alcalino Visando a Produção de H<sub>2</sub>. Tese de Doutorado em Engenharia Química – Recursos Regionais e Meio Ambiente, DEQ/UFCG/Campina Grande – PB, 2013.*

SOUZA, Samuel Nelson Melegari de. **Aproveitamento de energia hidroelétrica secundária para a produção de hidrogênio eletrolítico.** 1998. 211 f. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – **Departamento de Engenharia Térmica e Fluidos**, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

WOLLMANN, f. I. (2013). **Estudo da utilização de gás hidrogênio em veículos automotores.** P 38. Acesso em 09 de julho de 2021.

## Anexo 1 – Código desenvolvido no EES para o cálculo da eficiência energética da célula eletrolítica.

1° Janela: Cálculo da formação de hidrogênio.

{HIDRÓLISE DA ÁGUA}

{Cálculo base no Estado de Referência Padrão [ERP] }

T\_ERP=25

P\_ERP=101,325

{ne[1] H2O -> ns[1] H2 + ns[2] O2}

{Cálculo da massa molar [kg/kmol] }

Me[1]=MolarMass(H2O)

Ms[1]=MolarMass(H2)

Ms[2]=MolarMass(O2)

{ne[1] H2O -> ns[1] H2 + ns[2] O2}

rho[1]=Density(H2O;T=T\_ERP;P=P\_ERP)

{Composição Volumétrica do Combustível [ % ] [ kmol ] }

ne[1]=(100/100)\*rho[1]/Me[1]

{Balanço estequiométrico por elemento [ kmol ] }

{Para o hidrogênio} 2\*ne[1]=2\*ns[1]

{Para o oxigênio} ne[1]=2\*ns[2]

{Verificar o princípio da conservação da massa [ kmol ] }

Somae=SUM(ne[i]\*Me[i]; i=1;1)

Somas=SUM(ns[i]\*Ms[i]; i=1;2)

erro= Somae-Somas

{Cálculo das entalpias [ kJ/kg ] }

he[1]=Enthalpy(H2O;T=T\_ERP)

hs[1]=Enthalpy(H2;T=T\_ERP)

hs[2]=Enthalpy(O2;T=T\_ERP)

{Poder Calorífico Superior [kJ/kg] }

PCS=(SUM(ns[i]\*Ms[i]\*hs[i]; i=1;2)-SUM(ne[i]\*Me[i]\*he[i]; i=1;1))/(ne[1]\*Me[1])

{kg/s} m=(0,341564+0,302164+0,305139)/((10+10+10)\*3600)

{kW} Q= m\*PCS

{kW} gasto= ((245,8438333+239,0435619+225,316619)/3)/1000

eta= 100\*Q/gasto {rendimento da hidrólise}

{ST\$OFF}

## 2º Janela: Cálculo do rendimento Global.

{COM EXCESSO DE AR E HUMIDADE}

{Dados de Entrada:

Temperatura de entrada do combustível [°C]  
Pressão de entrada do combustível [kPa] }

T\_comb= 30  
P\_comb= 101,325

{Dados de Entrada:

Temperatura de entrada do ar [°C]  
Pressão de entrada do ar [kPa]  
Excesso de ar [%]  
Sendo 1 para estequiometrico e acima desse valor para excesso  
Umidade relativa do ar [%] }

T\_air=30  
P\_air=101,325  
EXC\_AIR=1,1  
HUMD\_AIR=0,6

{Cálculo da quantidade de água que o ar atmosférico contém [kmol] }  
P\_sat=P\_sat(Steam\_IAPWS;T=T\_ERP)

P\_v=HUMD\_AIR\*P\_sat

{Massa total de água no ar [kg H2O/ kg ar seco]\*[kg ar seco]=[kg] }  
M\_H2O= ((0,622\*P\_v)/(P\_ERP-P\_v) )\*(ne[2]\*Me[2]+ne[3]\*Me[3])

ne[4]= M\_H2O/Me[4]

{Cálculo base no Estado de Referência Padrão }

T\_ERP=25  
P\_ERP=101,325

{ne[1] H2 +ne[2] O2 +ne[3] N2 +ne[4]H2O -> ns[1] H2O + ns[2] O2 +ns[3] N2}

{Cálculo da massa molar [kg/kmol] }

Me[1]=MolarMass(H2)  
Me[2]=MolarMass(O2)  
Me[3]=MolarMass(N2)  
Me[4]=MolarMass(H2O)

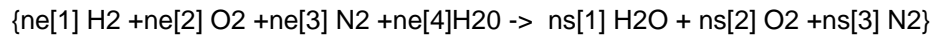
Ms[1]=MolarMass(H2O)  
Ms[2]=MolarMass(O2)  
Ms[3]=MolarMass(N2)

rho\_H2=Density(H2;T=T\_ERP;P=P\_ERP)

{H2} V[1]= 100

{Composição Volumétrica do Combustível [ % ] [ kmol ] }  
ne[1]=(V[1]/100)\*rho\_H2/Me[1]

$$M_{\text{comb}} = n_e[1] \cdot M_e[1]$$



{Balanço estequiométrico por elemento [ kmol ] }  
 {Para o hidrogênio}  $2 \cdot n_e[1] + 2 \cdot n_e[4] = 2 \cdot n_s[1]$   
 {Para o oxigênio}  $2 \cdot n_e[2] + n_e[4] = n_s[1] + 2 \cdot n_s[2]$   
 {Para o Nitrogênio}  $n_e[3] = 3,76 \cdot n_e[2]$   
 $n_s[3] = n_e[3]$

$$n_s[2] = \text{IF}(\text{EXC\_AIR}; 1; 0; 0; (\text{EXC\_AIR} - 1) \cdot n_e[2] / \text{EXC\_AIR})$$

{Verificar o princípio da conservação da massa [ kmol ] }  
 Somae =  $\text{SUM}(n_e[i] \cdot M_e[i]; i=1;4)$   
 Somas =  $\text{SUM}(n_s[i] \cdot M_s[i]; i=1;3)$   
 erro = Somae - Somas

{Cálculo das entalpias [ kJ/kg ] }  
 $h_e[1] = \text{Enthalpy}(\text{H}_2; T=T_{\text{ERP}})$   
 $h_e[2] = \text{Enthalpy}(\text{O}_2; T=T_{\text{ERP}})$   
 $h_e[3] = \text{Enthalpy}(\text{N}_2; T=T_{\text{ERP}})$   
 $h_e[4] = \text{Enthalpy}(\text{H}_2\text{O}; T=T_{\text{ERP}})$

$h_s[1] = \text{Enthalpy}(\text{H}_2\text{O}; T=T_{\text{ERP}})$   
 $h_s[2] = \text{Enthalpy}(\text{O}_2; T=T_{\text{ERP}})$   
 $h_s[3] = \text{Enthalpy}(\text{N}_2; T=T_{\text{ERP}})$

{Poder Calorífico Superior [kJ/kg] }  
 $\text{PCS} = (\text{SUM}(n_s[i] \cdot M_s[i] \cdot h_s[i]; i=1;3) - \text{SUM}(n_e[i] \cdot M_e[i] \cdot h_e[i]; i=1;4)) / M_{\text{comb}}$

{Poder Calorífico Inferior [kJ/kg] }  
 $h_{\text{vap}} = \text{Enthalpy\_vaporization}(\text{Steam\_IAPWS}; T=T_{\text{ERP}})$

$$\text{PCI} = \text{PCS} + (n_s[1] \cdot M_s[1] \cdot h_{\text{vap}}) / M_{\text{comb}}$$

{ Cálculo da Temperatura Adiabática de Chama }

$$H_{\text{comb}} + H_{\text{air}} + H_{\text{combustao}} = H_{\text{chama}}$$

$$h_{\text{real}}[1] = \text{Enthalpy}(\text{H}_2; T=T_{\text{comb}})$$

$$H_{\text{comb}} = \text{SUM}(n_e[i] \cdot M_e[i] \cdot (h_{\text{real}}[i] - h_e[i]); i=1;1)$$

$h_{\text{real}}[2] = \text{Enthalpy}(\text{O}_2; T=T_{\text{air}})$   
 $h_{\text{real}}[3] = \text{Enthalpy}(\text{N}_2; T=T_{\text{air}})$   
 $h_{\text{real}}[4] = \text{Enthalpy}(\text{H}_2\text{O}; T=T_{\text{air}})$

$$H_{\text{air}} = \text{SUM}(n_e[i] \cdot M_e[i] \cdot (h_{\text{real}}[i] - h_e[i]); i=2;4)$$

$$H_{\text{combustao}} = \text{abs}(\text{PCS} \cdot M_{\text{comb}}) \cdot 0,8$$

$$H_{\text{chama}} = \text{SUM}(n_s[i] \cdot M_s[i] \cdot h_{\text{sa}}[i]; i=1;3) - \text{SUM}(n_s[i] \cdot M_s[i] \cdot h_s[i]; i=1;3)$$

$h_{sa}[1]=\text{Enthalpy}(\text{H}_2\text{O}; T=T_{\text{chama}})$   
 $h_{sa}[2]=\text{Enthalpy}(\text{O}_2; T=T_{\text{chama}})$   
 $h_{sa}[3]=\text{Enthalpy}(\text{N}_2; T=T_{\text{chama}})$

{Razão de ar atmosférico/combustível [kg/kg] }

$M_{\text{air}} = \text{SUM}(n_{e[i]} \cdot M_{e[i]}; i=2;4)$

$R = M_{\text{air}}/M_{\text{comb}}$

{kg/s}  $m = (0,341564 + 0,302164 + 0,305139) / ((10 + 10 + 10) \cdot 3600)$

{kg/s}  $m_{\text{H}_2} = m \cdot (M_{e[1]}/M_{e[4]})$

{kW}  $Q = m_{\text{H}_2} \cdot \text{abs}(\text{PCI}) \cdot 0,22$

{kW}  $\text{gasto} = ((245,8438333 + 239,0435619 + 225,316619) / 3) / 1000$

$\eta = 100 \cdot Q / \text{gasto}$  {rendimento global}  
 {\$ST\$OFF}