

# OTIMIZAÇÃO POR ALGORITMO GENÉTICO DE UMA CÉLULA DE PRODUÇÃO DE ENERGIA BASEADA EM GÁS DE HIDROGÊNIO PELA ELETRÓLISE DA ÁGUA

## OPTIMIZATION BY GENETIC ALGORITHM OF A CELL ENERGY PRODUCTION-BASED HYDROGEN GAS BY ELECTROLYSIS OF WATER

Lucas de Souza Cardoso<sup>1</sup>

Marcelino Pedroso<sup>2</sup>

### RESUMO:

Produzir energia e gerenciá-la, e consumi-la com o menor dano possível ao meio ambiente e ao futuro da vida neste planeta tem sido a maior preocupação daqueles que possuem conhecimento científico, e que têm contribuído incessantemente para a evolução tecnológica harmônica e ética das comunidades humanas. Os produtos são mais salubres na medida em que são derivados de matérias-primas razoáveis. A obtenção de energia da combustão de hidrogênio, derivado de células de água é uma solução, no mínimo razoável, é sustentável para a permanência das atividades econômicas humanas da era moderna, assim como também, é comburente para o contínuo avanço tecnológico e científico. Energia é o fenômeno que dá capacidade à matéria de produzir trabalho, seja ele mecânico, cinético, térmico ou, ainda, intelectual. A proposta deste trabalho acadêmico é otimizar a produção de gás hidrogênio de uma Célula a Combustível (CaC), baseada na eletrólise da água, para geração de energia. O emprego do gás hidrogênio como combustível é respaldado às cabíveis medidas de profilaxia às quais este conteúdo foi veementemente estruturado. A proposta de otimização é desenvolvida pelo emprego de um método heurístico, um ALGORITMO GENÉTICO (G.A.). Primeiramente, será apresentada a constituição básica da CaC e ao final desta exposição, suas propriedades energéticas serão submetidas ao método de otimização. O algoritmo não será explicitado neste artigo, como um direito dos autores em proteger seu trabalho científico.

**PALAVRAS-CHAVE:** Hidrogênio; Célula; Combustível; Energia; Otimização.

### ABSTRACT:

Produce energy and manage it, and consume it with the least possible harm to the environment and the future of life on this planet has been a major concern of those who possess scientific knowledge, and who have contributed tirelessly to the harmonic technological evolution and ethics of human communities. The products are more wholesome inasmuch that are derived from raw materials reasonable. Obtaining energy from hydrogen combustion, cell-derived water is a solution in reasonable minimum, is sustainable for the permanence of human economic activities of the modern era, as well, is oxidizing for continued technological and scientific advances. Energy is the phenomenon that gives the ability to produce work matters, be it mechanical, kinetic, thermal, or even intellectual. The purpose of this academic work is to optimize the production of hydrogen gas from a Fuel Cell (FC), based on the electrolysis of water for power generation. The use of hydrogen gas as a fuel is bound to the appropriate prophylactic measures to which this content was strongly structured. The proposed optimization is developed by employing a heuristic method, a genetic algorithm (GA). First, the basic constitution of the FC and at the end of this exhibition will be presented, energetic properties are subject to optimization method. The algorithm will be explained in this article, as a right of authors to protect their scientific work.

**KEYWORDS:** hydrogen; cell; fuel; energy; Optimization.

<sup>1</sup> Mestrando em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia. Bacharel em Administração e em Engenharia de Produção pelo Centro de Ensino Superior de São Gotardo. Currículo: <http://lattes.cnpq.br/5961905455213937>.

<sup>2</sup> Bacharel em Engenharia de Produção pelo Centro de Ensino Superior de São Gotardo. Servidor público no município de São Gotardo/MG.

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 02 Páginas 27-56
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	<a href="mailto:periodicoscesg@gmail.com">periodicoscesg@gmail.com</a>	

## 01 – HIDROGÊNIO: ELEMENTO ÍMPAR DA TABELA PERIÓDICA

Ser único, específico, na tabela periódica, é um atributo comum entre todos os seus elementos compilados. Cada elemento químico por si mesmo é único e absolutamente específico. Entretanto, nenhum deles é tão atípico quanto o Hidrogênio. O Hidrogênio é o elemento químico mais abundante da natureza, uma vez que, constitui 75% (setenta e cinco por cento) da matéria do universo. No Planeta Terra está presente em 70% (setenta por cento) de sua superfície, nas formas de Água ou de Compostos Orgânicos e Inorgânicos – os ácidos, principalmente. “O Hidrogênio tem sido apontado como a maior fonte de energia do futuro” de acordo com Souza (2009). Destarte, para Rifkin (2003) “estima-se que o hidrogênio representa cerca de 90% dos átomos do universo [...]”.

A priori, o Hidrogênio não é essencialmente uma fonte de energia, pois se não provocado, manipulado, permanecerá idôneo em sua condição inicial. Por meio de um desinibidor, pode ser provocado facilmente, e derivado numa forma de energia. Desta forma, pode ser colocado como uma fonte secundária de energia – mas tão eficiente quanto qualquer fonte primária, após ser desinibido. Foi descoberto em 1776, pelo químico franco britânico Henry Cavendish e, posteriormente (1781) nomeado por Antoine Laurent Lavoisier derivando seu nome dos termos gregos *Hydro* e *Genes* que significa, etimologicamente, Gerador de Água. É dito, que todos os demais elementos químicos da natureza foram obtidos a partir do Hidrogênio, fazendo deste o elemento essencial do universo, cuja posição é a primeira da organização da Tabela Periódica.

## 02 – CÉLULA DE HIDROGÊNIO: OBTENDO O GÁS COMBUSTÍVEL HIDROGÊNIO DA ÁGUA

A **Célula de Hidrogênio (CaC)**, também designada como Célula Eletrolítica A Combustível Seca De Hidrogênio, ora tratada, labora na modalidade de eletrólise da água – um procedimento secular – que consiste na eletrização da água por eletrodos (polos), um positivo e um negativo. Ao serem eletrizadas as moléculas da água têm suas ligações de hidrogênio, de compartilhamento com o átomo de

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 02 Páginas 27-56
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

oxigênio, desconectadas; dividindo-as em átomos de hidrogênio e átomos de oxigênio, que por sua vez se agrupam em pares, ou compostos moleculares covalentes. Os compartimentos de hidrogênio ( $H_2$ ) borbulham em direção ao eletrodo negativo – denominado ânodo – e os compartimentos de oxigênio ( $O_2$ ) borbulham rumo ao eletrodo positivo – cátodo. O termo eletrólise deriva-se dos radicais, *elethro* (eletricidade) e *lisis* (decomposição).



Figura 1 – Célula de Hidrogênio.

Os eletrodos – do grego, *elektron* (âmbar) e *hodos* (via) – mais eficazes são aqueles derivados de metais inertes – com rigidez mecânica, certa ductilidade e de difícil fusão. Os metais mais utilizados em eletrodos são a platina, o cobre, o tungstênio, o ródio, o aço inoxidável, além do grafite ametalico, entre outros.

Nas pilhas e baterias convencionais obtém-se uma corrente elétrica por meio de uma reação química; na eletrólise o processo é inverso, obtém-se uma reação química por meio da corrente elétrica. É a reação química que transforma água em combustível. No entanto, a ligação compartilhada entre átomos de hidrogênio e oxigênio, formando a água ( $H_2O$ , óxido de di-hidrogênio) é demasiadamente forte, característica típica deste tipo de ligação química; outro agravante é a má condutibilidade de corrente elétrica da água, demandando a associação de uma substância eletrolítica – com alto poder de condutividade – para a compensação condutiva do circuito.

A substância eletrolítica é um composto iônico que contribui com uma oxirredução da água, dividindo a sua molécula. “Quando dissolvido na água, o eletrólito libera íons. [...], da mesma forma a água é ionizada, liberando íons  $H^+$  e

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 02 Páginas 27-56
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

OH<sup>-</sup>. [...] os íons são cargas elétricas com falta ou excesso de elétrons”; expõe Gomes Neto (2005).

Os eletrólitos podem ser obtidos de: NaCl (cloreto de sódio), NaOH (hidróxido de sódio, ou soda cáustica), ZnSO<sub>4</sub> (sulfato de zinco), KOH (hidróxido de potássio), CuSO<sub>4</sub> (sulfato de cobre II), NaHCO<sub>3</sub> (bicarbonato de sódio) entre outros. Como se pode ver o cloreto de sódio, vulgo sal de cozinha, é um tipo de eletrólito.

Destarte, a água do mar (água salgada) é uma solução de H<sub>2</sub>O contendo o eletrólito NaCl, podendo ser empregada, facilmente, na célula de hidrogênio. Da mesma forma é a água mineral, que é uma solução de H<sub>2</sub>O contendo minerais com íons dissolvidos, condutores de energia elétrica. No presente experimento a soda cáustica (NaOH) foi adotada como eletrólito. Então, a eletrólise da água é viável por, pelo menos, a atenção a três condições – a capacidade de condução elétrica dos eletrodos, a eficiência de ionização da água pelo eletrólito e a mínima capacidade de conduzir corrente elétrica da água.

O desempenho do Eletrólito é uma contrapartida à necessidade de carga elétrica ou amperagem no sistema. O *Ampère* (A) é a quantidade de eletrização em *Coulomb* no circuito, disponibilizada no tempo (t) em segundos, caracterizando o que se denomina corrente elétrica. Enquanto, a quantidade de eletrização ( $\Delta Q$ ) é o produto do número de elétrons ou prótons (n) em excesso num meio eletrônico (átomo, corpo, objetos, sistemas etc.) pela carga elementar (**e**) elétrica, em *Coulomb*, atribuída a todos os elétrons, que como fora dito, é convencionalmente negativa. O valor da Carga Elementar (**e**) é  $1,6 \times 10^{-19}$  C. Adota-se esse valor negativo quando atribuído aos elétrons e positivo quando atribuído aos prótons.

A *quantidade de eletrização* (Q) é desenvolvida pela presença de elétrons contendo uma carga elementar individualmente; enquanto que, a *intensidade da corrente elétrica* (i) é esta mesma quantidade de eletrização disponibilizada no tempo – no caso de correntes alternadas, essa eletrização pode variar, fazendo-se necessária a ponderação da *intensidade de corrente instantânea* no limite de tempo do instante (t).

Logo, enuncia Bonjorno:

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 02 Páginas 27-56
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

Comumente são considerados dois tipos de corrente elétrica: a *contínua* (CC) e a *alternada* (CA). *Corrente contínua* é aquela cujo sentido se mantém constante. Quando, além do sentido, a intensidade também se mantém constante, a corrente é chamada *corrente contínua constante*, como ocorre, por exemplo, nas correntes estabelecidas por uma bateria de automóvel e por uma pilha. *Corrente alternada* é aquela cuja intensidade e sentido, variam periodicamente. Esse é o caso das correntes utilizadas em residências, que são fornecidas pelas usinas hidrelétricas, em que temos uma corrente alternada de frequência 60 *Hertz*. (BONJORNIO 2009, p. 521)

A corrente elétrica apresenta duas naturezas distintas, que a classificam como sendo **Eletrônica** ou **Iônica**. Corrente eletrônica é aquela estabelecida pelo deslocamento dos elétrons livres em condutores metálicos; a corrente iônica é fundada pelo deslocamento dos íons positivos e negativos, em sentido contrário simultaneamente, nas soluções eletrolíticas, como exemplo, soluções de sais, bases ou ácidos. A célula de hidrogênio (CaC), aqui tratada, é alimentada com corrente eletrônica, que sob a influência dos eletrodos, maximiza a corrente iônica na solução eletrolítica ionizando a água (H<sub>2</sub>O).

Os eletrodos da Célula de Hidrogênio, ora tratada, são compostos por barras helicoidais metálicas (de aço), conectadas à fonte de corrente elétrica por  fios metálicos (de cobre) de 2,5 mm (milímetros) de diâmetro, que são capazes de suportar a tensão de uma amperagem de até 21 A. Os fios de cobre são os veículos da carga positiva e da carga negativa, sob *corrente contínua de eletricidade*, para a membrana eletrolítica por onde a água circula e sofre a **eletrólise passiva**.

Os eletrodos, ainda, são estendidos por placas de aço inoxidável, como catalisadores, as quais são inseridas na membrana eletrolítica, de forma paralela, uma sobreposta à outra, separadas por um anel de borracha de 70 mm de diâmetro e 08 mm altura. Estas placas são responsáveis por conduzirem a corrente elétrica pela água, para o sistema da eletrólise, e podem ser classificadas como catalisador na reação. Assim, são estas placas de aço inoxidável, e não as barras helicoidais, que entram em contato direto com a solução aquosa da membrana eletrolítica. Isso evita a oxidação dos eletrodos, e otimiza o processo de condução elétrica, na eletrólise de H<sub>2</sub>O.

Ambos os polos, eletrodos, são conectados diretamente à membrana eletrolítica para conduzirem a corrente elétrica através da água. As placas da membrana estão sobrepostas, separadas por um anel de borracha. O corte das

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 02 Páginas 27-56
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	<a href="mailto:periodicoscesg@gmail.com">periodicoscesg@gmail.com</a>	

placas é um quadrado de 135 mm de lado, determinado facultativamente. Num dos cantos das placas há um recorte oblíquo de 45° em relação ao lado do quadrado, que é discriminado para o acesso da barra helicoidal de cada eletrodo.

Desta maneira, as placas metálicas são dispostas opostamente conforme estes recortes, de forma conciliada, onde o ânodo passa fazendo contato com a primeira placa, mas sem contatar a próxima devido ao corte oblíquo, e assim, sucessivamente. Assim, as placas e as duas barras dos eletrodos ficam coordenadas para o fluxo simultâneo da carga do polo positivo e do polo negativo, independentemente.

## 2.1 – Retificando a Corrente Elétrica

A corrente elétrica empregada neste experimento é monofásica, ou seja, é compreendida por uma tensão elétrica (U) gerada por apenas uma fase elétrica. Uma eletrólise pode ser viável, certamente, tanto por corrente contínua como por corrente alternada, desde que, assuma uma tensão média igual ou maior àquela necessária para desinibir a reação. “A tensão de 1,23 volts é o valor mínimo para que ocorra a quebra das ligações da molécula da água (H<sub>2</sub>O)”;

afirma Gomes Neto (2005).

Para manter, a eficiência do experimento, e ainda, constituí-lo de forma triangulada aos mecanismos automobilísticos que funcionam sob corrente contínua, a Célula de Hidrogênio está sendo alimentada por um retificador de corrente, que tem o papel de retificar a *corrente alternada* (CA) ligada na fonte elétrica, para *corrente contínua* (CC). Há pelo menos dois vieses considerados para a *corrente contínua* neste experimento.

A estabilidade da alimentação da Célula proporcionada pela corrente contínua e a redução da corrente para baixa voltagem, pois a *corrente contínua* ou corrente galvânica com o seu fluxo ordenado de elétrons, é produto do processo de redução da *corrente alternada*, obtendo uma amperagem mais baixa, ou seja, uma quantidade de eletrização (Coulomb) menor por instante de tempo (segundos), diminuindo a intensidade da corrente.

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 02 Páginas 27-56
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

A *corrente contínua* satisfaz muito bem estes circuitos. Geralmente, a tensão elétrica desenvolvida nestes sistemas é baixa, entre 1,2 V e 24 V. Enquanto que nos sistemas elétricos alimentados com *corrente alternada* desdobram-se tensões elétricas de até 240 V ou mais. Como já foi informada, a tensão elétrica, necessária para partir as ligações químicas da água, é aproximadamente 1,23 V (volts).

O circuito elétrico da Célula de Hidrogênio tem seus polos elétricos bem definidos – o **cátodo**<sup>+</sup> e o **ânodo**<sup>-</sup> – cuja intensidade da corrente deve ser mantida. A natureza polarizada do circuito da Célula de Hidrogênio funciona corretamente sob *corrente contínua*, que também detém a dinâmica das cargas bem definida. A priori, ao ser ligada a fonte no circuito, a intensidade da *corrente contínua* cresce até o seu ponto máximo, se mantendo neste nível continuamente sem alterar. Quando a fonte é desligada, a intensidade diminui até anular-se completamente. Bonjorno (2009) esclarece o que é um circuito elétrico: “De maneira geral, denominamos *circuito elétrico* ao conjunto de caminhos que permitem a passagem da corrente elétrica, no qual aparecem outros dispositivos elétricos ligados a um gerador.”

Para o caso da CaC, o circuito elétrico é tido como simples, por expressar apenas uma via ou caminho de transição da corrente. Alguns circuitos podem ser compostos. Por meio do Transformador Acoplado à Fonte Retificadora foi possível transformar a *corrente alternada* de 127 V oriunda da fonte convencional de energia elétrica (civil de 60 Hertz, 127 V, Monofásica) em *CORRENTE CONTÍNUA* com, aproximadamente, 13 V. Durante o processo de retificação da corrente, alguma carga pode ser perdida para a vizinhança do sistema. A Célula de Hidrogênio também pode ser abastecida com energia elétrica procedente de uma **Bateria Automobilística** convencional (por exemplo, 60 A, 6/12/24 V, C.C.), provando que esta é compatível com os sistemas elétricos dos veículos automotores.

O circuito elétrico da Célula de Hidrogênio é formado pelos componentes: Disjuntor de 20 A, Amperímetro de 15 A, Fios de Condução de 2,5 mm de diâmetro, Conectores dos Eletrodos, os Eletrodos, propriamente ditos, na forma das barras helicoidais e as placas metálicas e o acessório da Fonte de Redução da Corrente. O sistema opera com intensidade de corrente de 15 A. O diâmetro das fiações de cobre de 2,5 mm é apropriado para correntes de intensidade de até 21 A; a corrente

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 02 Páginas 27-56
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

ora aplicada é de 15 A. Ao realizar o teste de voltagem da tensão elétrica (U) na fonte de energia, o aparelho (voltímetro) indicou a marca de 12,20 V sob corrente contínua. Pela lei de Ohms é possível determinar a resistência elétrica desenvolvida pelo circuito como um todo.

<b>Tensão Elétrica (U)</b>	12,20 V
<b>Corrente Elétrica (i)</b>	15 A
<b>Resistência (R)</b>	12,20 V ÷ 15 A
<b>≈ 0,81333 Ω (Ohm)</b>	

É importante notar que a intensidade da corrente demandada pela Célula de Hidrogênio também é fortemente influenciada pela impedância elétrica nas placas eletrolíticas. Na medida em que se diminui o número de placas na membrana eletrolítica, e por consequência diminuindo a resistência no circuito, a tensão elétrica também diminui – enquanto a corrente aumenta. Este fenômeno ocorre, pois, a Resistência Elétrica é uma grandeza inversamente proporcional à intensidade da Corrente Elétrica, mas diretamente proporcional à tensão elétrica na fonte, como se percebe na equação da *Primeira Lei de Ohm*. A qualidade das conexões elétricas, evitando a fuga de corrente, também é determinante no desempenho elétrico do circuito, e logo, da CaC.

Pela aplicação da primeira Lei de Ohm a Resistência Elétrica desempenhada pelo circuito da célula de hidrogênio como um todo foi aproximadamente igual a 0,81 Ω (Ohm). Durante a passagem da corrente elétrica pela solução aquosa, percebe-se uma variação de temperatura no interior do sistema. Isto significa que a solução aquosa eletrolítica tem a sua temperatura alterada durante a eletrização, em sentido crescente. É notável que, esta endotermia sofrida pela solução eletrolítica com a passagem da corrente elétrica eleva a sua temperatura, que por sua vez, entra em dinâmica com a vizinhança do sistema – as placas metálicas, o ar atmosférico dentro da célula, as borrachas isolantes das placas, entre outros. Por meio do chamado Efeito Joule é possível determinar a quantidade de energia ou calor presente no sistema.

O efeito *joule*, ou efeito térmico, é “o fenômeno do aquecimento de um condutor, devido à passagem da corrente elétrica [...]”; conforme Bonjorno (2009). O

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 02 Páginas 27-56
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

efeito *joule* é enunciado pelo produto da potência elétrica pelo intervalo de tempo (t) em segundos, da sua passagem no circuito. Neste caso, primeiramente deve-se determinar a potência elétrica. “A potência é a rapidez com que se realiza um trabalho”; completa Bonjorno (2009)

<b>Tensão Elétrica (U)</b>	12,20 V	
<b>Corrente Elétrica (i)</b>	15 A	
<b>Resistência (R)</b>	0,81 $\Omega$	
<b>Potência Elétrica (P)</b>	15 A x 12,2 V	<b>183,0 W (Watt)</b>
<b>Energia (E)</b>	183,0 W x 60 s	<b>10.980 J (joules)</b>

Para se determinar um marco referencial, a Célula de Hidrogênio foi eletrizada ininterruptamente por 01 minuto, ou 60 segundos. Aplicando-se o teorema do Efeito *Joule* foi calculado um valor de 10.980 J, 10,98 KJ ou  $1.098 \times 10^4$  J de energia, ou trabalho realizado neste intervalo de tempo. Aqui Bonjorno (2009) enfatiza que: “A unidade de energia no SI é o *joule* (J). Entretanto, quando se trata de consumo de energia elétrica, é usual o *quilowatt-hora* (kWh). 01 kWh é a quantidade de energia, com potência de 01 kW, transformada no intervalo de tempo de 01 hora.”

<b>Potência Elétrica (P)</b>	183 W	
<b>Tempo (t) = 1 hora</b>	1 hora	
<b>Energia (E) em Wh</b>	183 W x 1 h	183 Wh
<b>Quilowatt-hora (kWh)</b>		<b>0,183 kWh</b>

A taxa de demanda por energia da Célula de Hidrogênio é igual a 0,183 kwh, ou seja, em 01 hora a CaC consome 183 W (*watt*). Utilizando o valor auferido na intensidade da corrente elétrica e colocando em relação à área superficial das placas metálicas, é possível determinar a densidade elétrica superficial das mesmas, produzida por esta demanda de energia elétrica. Para Bonjorno (2009) “a *densidade elétrica superficial média* ( $\sigma_m$ ) que relaciona a concentração de carga  $\Delta Q$  em uma pequena região de área  $\Delta S$  do condutor onde a carga se encontra.” Em condutores elétricos não esféricos (como no caso das placas da membrana), a distribuição de cargas elementares em excesso não é uniforme.

A densidade elétrica, de superfícies não esféricas é expressa pela razão entre a quantidade de carga e a área da superfície do condutor. Como já foi

afirmado, as placas metálicas da membrana, são figuras quadradas de 135 mm de lado, com um recorte oblíquo de 45°. Para se medir a área da superfície das placas metálicas basta encontrar a área do quadrado e subtrair o recorte oblíquo disposto no canto do quadrado, assumindo a forma de um triângulo retângulo – e o comprimento do recorte sendo a sua hipotenusa.

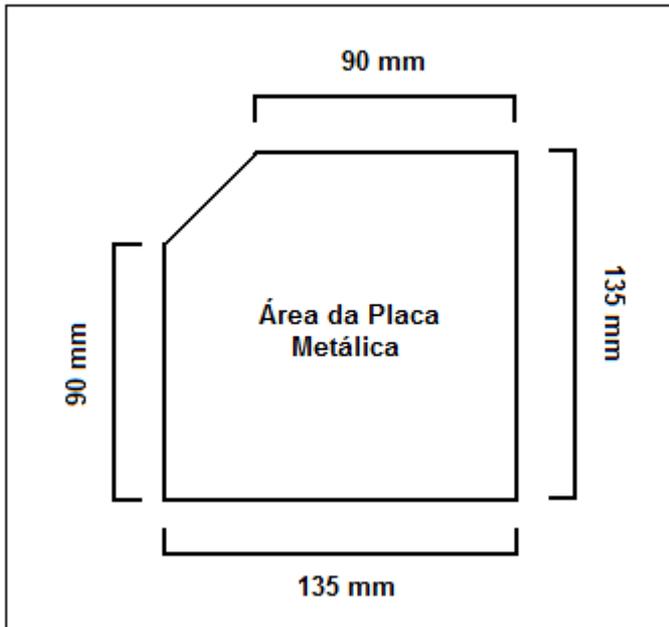


Figura 2 – Esquema Geométrico das Placas Metálicas do Eletrodo.

Pelas medidas dos cantos geométricos das placas metálicas sabe-se que os valores dos catetos no triângulo retângulo de 45° do recorte equivalem à subtração do lado maior pelo lado menor do quadrado. Assim:

<b>Lado maior (M)</b>	135 mm
<b>Lado menor (m)</b>	90 mm
<b>Catetos</b>	<b>45 mm</b>

Utilizando a equação da área do triângulo retângulo, e posteriormente subtraindo-a da área total do quadrado, tem-se a área superficial das placas metálicas.

<b>Base (B)</b>	45 mm
<b>Altura (h)</b>	45 mm
<b>Área do Triângulo</b>	<b>1.012,5 mm<sup>2</sup></b>
<b>Lados projetados do Quadrado das Placas</b>	135 mm
<b>Área do Quadrado</b>	<b>18.225,0 mm<sup>2</sup></b>
<b>Área Real (área do □ – área do Δ)</b>	17.212,5 mm <sup>2</sup>

A área real da superfície das Placas Metálicas é igual a 17.212,5 mm<sup>2</sup>. Com o axioma da densidade elétrica é obtida a distribuição média das cargas elementares na superfície das placas metálicas.

<b>ΔQ</b>	15 A ou 15 C/s
<b>ΔS</b>	17.212,5 mm <sup>2</sup>
<b>σ<sub>m</sub> (densidade elétrica superficial média)</b>	<b>0.00087 C/mm<sup>2</sup></b>

A densidade elétrica superficial média encontrada para as placas metálicas da membrana eletrolítica é igual a 0,00087 C/mm<sup>2</sup>. Significa que a cada mm<sup>2</sup> de espaço na superfície da placa contém, em média, 0,00087 Coulomb de carga elétrica a cada segundo de intervalo de tempo com a corrente contínua ligada. O valor da intensidade da corrente elétrica é 15 A ou 15 C/s; como a unidade da corrente elétrica também é uma média no tempo pode-se flexibilizar a grandeza do tempo (t) em sua razão sem prejudicar os cálculos, assim: 15 A = 15 C/s = 15 C a cada segundo.

O mais relevante quanto ao desempenho da *Célula a Combustível* (CaC) é que a energia que ela pode fornecer não pode ser menor do que a energia necessária no seu funcionamento, e logo, na produção de hidrogênio.

O quadro a seguir, esboça resumidamente as especificações técnicas para uma Célula de Hidrogênio com as características propostas:

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 02 Páginas 27-56
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS	
CORRENTE ELÉTRICA	15 A - C/C (D/C)
TENSÃO ELÉTRICA	12,20 V
RESISTÊNCIA	0,81 $\Omega$
POTÊNCIA ELÉTRICA	183 W
ENERGIA	10.980 J/min
DEMANDA	0,183 kWh
DENSIDADE ELÉTRICA	0,00087 C/mm <sup>2</sup>

Quadro 1 – Especificações técnicas da Célula de Hidrogênio proposta.

Com base nos axiomas, nas dimensões da Célula de Hidrogênio, e em suas características particulares, pode-se determinar os parâmetros técnicos do sistema.

As corporações fabricantes de automóveis e de células<sup>3</sup> definem as células de hidrogênio de seus modelos, com propriedades semelhantes, quanto à potência e capacidade energética, à elaborada neste trabalho como:

- ✓ Economia direta de 40% a 65%;
- ✓ Produção de H<sub>2</sub> da célula entre 0,5 a 1,5 litros/minuto;
- ✓ Autonomia de 500 km ou 6 horas para cada 200 ml de água, abastecidos;
- ✓ Temperatura da célula durante a eletrólise de 35°C a 45°C;
- ✓ E manutenção da célula a cada 50.000 km, na forma de limpeza.

Estes dados, parametrizados por fabricantes de células de hidrogênio similares são importantes para a determinação dos rendimentos e do desempenho da célula. O volume interno disponível no circuito total da Célula de Hidrogênio é igual a 535.558,62 mm<sup>3</sup> ou 535,56 ml, ou ainda, 0,53556 litros. O consumo de

<sup>3</sup> HYDROGENS. *Gerador de Hidrogênio*: produtos. Rio de Janeiro: Hydrogens, 2012. p. 01. Disponível em: <<http://www.hydrogens.com.br/produtos>>. Acesso em: 13 de Junho de 2012.

elétrolito (NaOH) é relativo, notando-se que quanto mais NaOH na solução, mais rápida é a reação da eletrólise. Devido à este relativismo, foi convencionado pela equipe pesquisadora acrescentar entre 0,1g/ml (10%) a 0,2g/ml (20%) de soluto de NaOH, no solvente da água. Para o volume total de água colocado, aproximadamente, 500ml são adicionados de 50 a 100 g de hidróxido de sódio.

De acordo com as especificações dos fabricantes, e comparando com as características desta CaC, pode-se concluir:

- ✓ Com a capacidade de abastecimento de solução eletrolítica de cerca de 500 ml ou ½ litro a autonomia da presente célula, teoricamente, é de 1.250 km (quilômetros) ou 15 horas;
- ✓ Além de consumir ½ litro de solução, ainda demanda **0,183 kWh** de energia para realizar a eletrólise. O que daria **2,745 kW** de energia consumidos ao final do período de autonomia – 15 horas;
- ✓ Sua velocidade de produção de H<sub>2</sub> é de até 0,025 l/s ou 25 ml/s. Durante 15 horas de autonomia, ou 54.000 segundos, produzirá até 1.350.000 ml de H<sub>2</sub>, igual a 1.350 litros;
- ✓ A manutenção da célula é para cada 50.000 km ou 40 recargas (40 x 1.250 = 50.000);
- ✓ Durante a eletrólise regular da célula ao longo desta autonomia a sua temperatura pode alcançar até 45°C.

A água pura é um composto binário, formado por dois átomos de hidrogênio para cada átomo de oxigênio, caracterizando-se como um óxido neutro – Óxido de Di-hidrogênio. Quando contém impurezas, como por exemplo, a água mineral, a água potável tratada com cloro e flúor, pode apresentar características comuns aos ácidos e às bases. Sua estrutura molecular é constituída por uma ligação química covalente ou compartilhada, entre o hidrogênio e oxigênio. Ambos, em covalência, equilibram-se segundo a já mencionada **regra do octeto**.

O oxigênio estabiliza-se conciliando dois elétrons com o hidrogênio que, por sua vez, só necessita de uma conciliação; desta forma dois átomos de hidrogênio dão suporte ao compartilhamento de elétrons com o oxigênio, formando o composto molecular óxido de di-hidrogênio procedendo com a ligação covalente que

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 02 Páginas 27-56
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

faz a alotropia da água. A água é uma das variedades alotrópicas criadas por ligações de hidrogênio.

Na formação da molécula da água o átomo de oxigênio atraiu  $2 e^-$ , sendo  $1 e^-$  de cada átomo de hidrogênio – devido ao número de oxidação (nox) do oxigênio ser igual a  $-2$ , demanda  $2 e^-$ . De outro ponto de vista, cada o átomo de hidrogênio concedeu  $1 e^-$  para o átomo de oxigênio, e ambos se estabilizarem. Por isso, o número de oxidação do hidrogênio é  $+1$ , intenciona se desprender de um elétron.

## 2.2 – Processo Químico da Eletrólise

A reação de eletrólise na Célula de Hidrogênio é uma oxidação/redução (oxirredução), que é o caminho inverso da ligação iônica. No processo de eletrólise estão sempre envolvidos os polos (eletrodos), positivo e negativo e o eletrólito que é um composto que ao ser dissolvido na água libera íons positivos ou negativos, conforme a natureza do composto. Quando se trata de um ácido eletrolítico os íons produzidos são positivos, denominados **Cátions** – sempre que um átomo perde um elétron para se estabilizar, ele assume a configuração de íon de carga positiva, estabilizando como  $cátion^+$  (tem excesso de elétrons).

Quando a eletrólise é produzida com o acessório de uma base eletrolítica dissolvida em água, os íons obtidos possuem carga negativa, denominados **Ânions** – sempre que um átomo recebe um elétron para se estabilizar, assume a forma de íon negativo  $ânion^-$  (tem déficit de elétrons). Em síntese, o eletrólito tem a função de transportar os íons positivos produzidos no ânodo, ou os íons negativos produzidos no cátodo, para o eletrodo consecutivo, de carga antagônica.

Na célula os eletrodos são auxiliados pelas placas metálicas que compõem a membrana eletrolítica. Estas placas podem ser admitidas como o catalisador do sistema eletrolítico. Os catalisadores são adjuntos responsáveis pela otimização da velocidade de reação, acelerando a quebra das moléculas e a produção de íons pela eletrólise. A substância eletrolítica, ora empregada, NaOH (hidróxido de sódio ou soda cáustica) é uma base forte “que é qualquer substância que se dissolve em água para produzir íons  $OH^-$ ”; explicam Brown e Home (2010).

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 02 Páginas 27-56
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

Durante a reação eletrolítica, os íons produzidos e transportados viajam para o polo oposto ao de origem. Durante esta transição iônica, elétrons são cedidos e recebidos simultaneamente, conforme o conceito das oxirreduções. Sempre que um eletrodo perde elétrons para o seu polo oposto, ele sofre uma oxidação; por isso o seu número de oxidação (nox) aumenta, descrevendo a sua necessidade de reposição dos elétrons perdidos.

Enquanto que, o recebimento de elétrons da parte do eletrodo contrário provoca sua redução (nox diminui). **Oxidações** e **Reduções** ocorrem simultaneamente, assim, sempre que uma espécie ganha elétrons, equivale dizer que outra os perdeu. O número de elétrons perdidos por uma espécie é sempre igual ao número de elétrons recebidos pela conseguinte.

É o eletrólito em conjunto com os eletrodos que desenvolvem a dinâmica lógica da eletrólise. O eletrólito na solução eletrolítica cria o mecanismo de transação das cargas positivas e negativas entre os polos elétricos. Essa via de passagem de cátions e ânions favorece a oxidação e a redução das espécies.

Como o eletrólito empregado (NaOH) é uma base forte, produzirá íons negativos ( $\text{OH}^-$ ), que têm déficit de elétrons na eletrosfera. Com a molécula da água partida, os átomos de Hidrogênio ( $\text{H}^+$ ) borbulham em direção ao **Ânodo** (eletrodo negativo), e os átomos de Oxigênio ( $\text{O}^{2-}$ ) são atraídos pelo **Cátodo** (eletrodo positivo).

Os átomos de hidrogênio se movem para o ânodo, onde sofrem oxidação no catalisador (placas inoxidáveis), emitindo dois prótons ( $\text{H}^+$ ) e dois elétrons de hidrogênio – denominada reação ânodo. Os elétrons de hidrogênio produzidos na reação ânodo transitam pelas placas catalisadoras (compõem o circuito elétrico). Enquanto isto, aqueles prótons de hidrogênio produzidos, se deslocam do polo negativo atraídos para o cátodo positivo por meio do eletrólito na solução.

Portanto, o eletrólito é responsável apenas por permitir o movimento dos prótons  $\text{H}^+$  (carga positiva). Os elétrons (*electrões*) não fluem pelo eletrólito, e sim pelo próprio circuito elétrico da célula, composto pelos eletrodos e pelas placas catalisadoras. No cátodo, o oxigênio é alimentado e reage com os prótons (*protões*) de hidrogênio oriundos do eletrólito, e com os elétrons de hidrogênio, decorridos na corrente elétrica do circuito. No polo positivo (cátodo) se formam as moléculas de

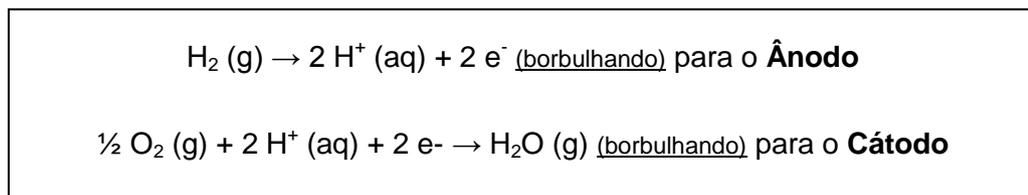
Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 02 Páginas 27-56
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

água na fase gasosa. Por fim, no cátodo o produto da reação é o vapor de água, e no ânodo o produto da reação é o gás hidrogênio.

Os electrões são elétrons que correm pela corrente do circuito; os prótons são os prótons transitando pelo eletrólito. A água formada no cátodo é produzida conforme a reação:



Já o processo da eletrólise como um todo compreende uma reação mais completa, expressada por:



O gás hidrogênio é arrojado pelo fluxo da solução dentro do ciclo hídrico da Célula a Combustível (CaC). Neste arrojado, ele é conduzido para o borbulhador, saindo pela mangueira 3 até o meio externo.

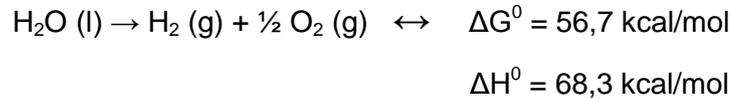
Nas instalações automobilísticas, ao final desta via (bico da mangueira 3) pode ser instalado um cilindro de armazenagem do gás, como também, pode ser comunicado ao carburador do motor para sofrer combustão interna, como o convencional. Ainda, na maioria dos protótipos de veículos movidos à célula de hidrogênio das fábricas automobilísticas, este gás hidrogênio é convertido por meio de baterias empilhadas em energia elétrica. Deste modo, estes veículos tem a eletricidade como forma final de energia.

### 2.3 – Termodinâmica da Eletrólise da Água

Para a reação global de eletrólise da água a quantidade de energia livre de *Gibbs* da reação é a  $\Delta G^0 = 56,7 \text{ kcal/mol}$ , sendo que o conceito de *Gibbs* determina que uma reação espontânea é sujeita à quantidade de energia livre no

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 02 Páginas 27-56
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

sistema. A variação de entalpia da reação é  $\Delta H^0 = 68,3$  kcal/mol. A reação global de eletrólise pode ser representada por:



Entalpia é a grandeza que expressa a máxima quantidade de energia que pode ser retirada de um sistema convertendo-a em calor. Pela racionalização entre a energia livre de *Gibbs* e a entalpia é percebido que a condição da reação de eletrólise é favorecida por uma quantidade relativamente alta de energia livre intrínseca no sistema, colaborando com produção da energia resultante. Durante uma reação química pode-se desenvolver uma liberação de energia (exotermia) quando os reagentes apresentam mais energia do que os produtos, isto é, os reagentes perdem energia para decompor-se no produto. Como também, pode ocorrer uma absorção de energia (endotermia) pelos produtos que absorvem um calor adicional do meio ou sistema que opera a reação. Enfim, quando se tem uma endotermia a variação de entalpia é maior do que zero ( $\Delta H > 0$ ); e quando se tem uma exotermia a variação de entalpia é menor do que zero ( $\Delta H < 0$ ). Conclui-se que a  $\Delta H = H_{\text{produto}} - H_{\text{reagente}}$ .

Durante a reação da eletrólise da água a entalpia é positiva, ou seja, adquire calor durante o processo. Os produtos da reação globalizam mais energia ou calor do que aquela que derivou a reação, ou a energia dos reagentes. Para se determinar uma equivalência entre o trabalho e o calor da reação, basta identificar a variação de energia interna do sistema – conforme enuncia a primeira lei da termodinâmica, ou a lei da conservação de energia.

Caso a voltagem não tivesse sido estabelecida pelo contexto bibliográfico da pesquisa, esta poderia ser calculada empregando-se alguns conceitos de termodinâmica. Por exemplo, calculando-se a voltagem mínima necessária para o desenvolvimento das reações dada pela lei:  $U = -\Delta G/n.F$ , onde a tensão mínima ( $U$ ) é igual à variação negativa da energia livre de *Gibbs* em relação à quantidade de elétrons transferidos na reação e a constante de *Faraday* ( $F = 96.489$  coulombs). A

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 02 Páginas 27-56
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

voltagem termoneutra ( $V_n$ ), onde não há troca de calor entre o sistema e o ambiente (vizinhanças) é representada pela lei:  $V_n = \Delta H/n.F$ , em que a voltagem termoneutra é igual a relação entre a variação de entalpia e o número de elétrons transferidos na reação vezes a constante de *Faraday*. Realizando estes cálculos tem a tensão (U ou E) igual a 1,23 V e  $V_n = 1,48$  V a 25°C e 1 atm. Logo, a eletrólise da água não ocorre para tensões inferiores a 1,23 V.

## 2.4 – A Combustão dos Produtos da Eletrólise

Um procedimento adicional é proposto ao experimento de eletrólise com a Célula de Hidrogênio. O gás hidrogênio emitido na mangueira 3, e dispersado no vasilhame contendo água saponificada em conjunto com as partículas de água em estado gasoso pode ser submetido à uma combustão. Na verdade, realizar a combustão deste produto, eliminado como resíduo, é uma forma de se provar que no conteúdo daquele produto realmente há gás hidrogênio. O hidrogênio, por ter maior poder calorífico que o oxigênio, ao ser submetido à combustão desenvolve uma exotermia singular. A explosão na combustão do gás hidrogênio é mais saliente (expressiva) do que a combustão de diversos outros gases, como o oxigênio.

O processo de combustão é estritamente uma triangulação de condições essenciais, caracterizando o “triângulo de fogo” – representa a combinação de um COMBUSTÍVEL, um COMBURENTE e a adição de CALOR para desinibir a reação de combustão. Assim a combustão (queima) pode ser definida como uma reação (calor) imediata e exotérmica de um combustível sendo alimentado por um comburente. Combustível é o composto que desinibe a liberação de calor ou a exotermia, comburente é o que alimenta a chama (fogo) da combustão. Destarte, a combustão é um processo exotérmico por excelência.

Entre os comburentes, o oxigênio é o mais eficiente, além da madeira, da fibra vegetal, entre outros. O hidrogênio, na relação com o oxigênio se comporta como combustível. Calor é a energia aplicada para ativar a reação.

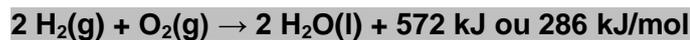
Quanto à natureza da combustão, esta pode ser classificada de algumas formas – combustão lenta, que é a forma de queima procedida à baixas temperaturas (menor do que 500°C) como por exemplo a oxidação dos metais, a

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 02 Páginas 27-56
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

ferrugem e a respiração celular; combustão viva, com a presença de chamas de fogo e labaredas, acontecendo durante a incineração de objetos; e a explosão, sendo o tipo de combustão atribuída ao gás hidrogênio em contato com a energia.

Uma combustão completa é aquela onde os reagentes queimam no oxigênio para formar limitadas quantidades de produtos. A combustão completa não é aplicável na natureza, podendo ser realizada apenas sob condições ambientais controladas, conduzindo a combustão completamente. Na combustão incompleta o suprimento de oxigênio (comburente) não é constante de forma a garantir a queima total dos reagentes. A respiração e a fotossíntese são exemplos de combustões.

A combustão do gás hidrogênio gera como produto partículas de H<sub>2</sub>O (água, ou óxido de di-hidrogênio) e libera energia. A entalpia de combustão do gás hidrogênio é igual à -286 kJ/mol, expressando a equação balanceada, como mostram Masterton e Slowinski (1978):



A energia expressada por um corpo ou sistema, é uma queima calorífica pela produção de trabalho. A priori, um sistema disporia de toda energia que lhe é conferida para a realização de um trabalho. No entanto, a *Segunda Lei da Termodinâmica* diz que nenhuma máquina pode converter completamente o calor em trabalho; neste sentido é inevitável a dispersão de algum calor para a vizinhança.

Todas as formas de energia utilizadas pelo homem, neste planeta, são originárias de fontes secundárias. A biomassa, o carvão, o petróleo, e especialmente, o Hidrogênio não se encontram na natureza em condições primárias, mas antes, estas se formaram a partir da ação de uma fonte primária, que na maioria dos casos terrestres tem sido a luz solar – o sol. Tanto a cadeia energética do hidrogênio quanto a do petróleo, são decompostas de uma cadeia primária maior. Por isso não podem ser identificadas como fontes de energia, como normalmente designadas, mas antes, como vetores energéticos. Vetor energético é um fenômeno, que pode ser representado por uma substância ou não, que pode ser aproveitado para se produzir trabalho ou calor, ou ainda, para desencadear processos físico-químicos.

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 02 Páginas 27-56
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

O aproveitamento da energia contida nas substâncias utilizadas como vetores energéticos, na qual se desencadeiam processos exotérmicos baseia-se no direcionamento de energia intrínseca de uma massa para outra conseguinte, por meio de transformações, sejam isométricas ou isobáricas, de acordo com o enunciado a *Lei da Conservação das Massas* de Lavoisier:

Ao término de uma reação química a massa total inicial dos reagentes é igual a massa total final dos produtos. Ou em outras palavras, a massa é conservada quaisquer que sejam as modificações químicas e/ou físicas que a matéria sofra: na natureza, nada se cria e nada se perde. Tudo se transforma. (DE LAVOISIER apud LIRA 2010, p. 01)

Desta forma, os vetores energéticos têm sido fenômenos que deslocam energia de uma fonte primária e a manifesta num estado secundário. Para o planeta Terra a fonte primária generalizada é a luz solar – o sol – responsável pela formação geológica das jazidas petrolíferas, onde “a energia foi armazenada, através da fotossíntese, em biomoléculas que resultaram, após milênios comprimidas sob pesadas camadas de rochas, em uma mistura de hidrocarbonetos”; conforme menciona De Carvalho (2011). Fazendo uma análise detalhada das fontes de energia ofertadas na Terra, encontrar-se-á o sol como o seu coeficiente de produção.

Entretanto, não é prudente realizar uma análise reducionista, e dizer que não há fontes primárias de energia neste planeta. De um ponto de vista mais relativo e que considera o longo prazo, alguns vetores de energia adquiriram a capacidade de armazenar energia intrinsecamente, com o tempo; como explica o pesquisador Ricardo Pinto:

É de referir que o carvão, o petróleo e o gás natural são fontes de energia retiradas a partir da terra, ou *combustíveis fósseis*. Já possuem assim “pacotes” de energia previamente “carregados”, enquanto que as molas, as baterias, o combustível de hidrogênio e os outros tipos de vectores, contêm energia derivada de centrais termoeléctricas ou aproveitamentos de tipo renovável. (PINTO 2010, p. 01)

Devido às estas características, relativas às formações materiais de longo prazo, o Petróleo e seus derivados são comumente assinalados como fontes de energia. Do mesmo modo, é o caso da madeira – uma “fonte” de energia da biomassa que é formada a médio ou longo prazo, pela ação de fontes anteriores de

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 02 Páginas 27-56
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

energia – fotossíntese, macro e micro nutrientes, entre outros. Portanto, fonte de energia primária, sob um ponto de vista científico, seria basicamente o sol.

De um montante determinado de matéria submetida a uma reação física e/ou química obtêm-se energia relativa à massa dos reagentes proporcional à massa dos produtos, além da energia que pode se destacar na vizinhança do fenômeno, mas que, no entanto, não é perdida, apenas deslocada pela massa que não participa da reação – conforme enuncia a *Lei das Proporções Definidas*, de Proust, destacada por Reis (2004): "A proporção, em massa, dos elementos que participam da composição de uma substância é sempre constante e independente do processo químico pelo qual a substância é obtida." As perdas durante as reações apontadas no fluxograma anterior são facilmente entendidas conforme o enunciado de Joseph Louis Proust.

Portanto, o hidrogênio como fonte de energia deve ser empregado como um vetor energético, e que pode alimentar e abastecer as demandas reais e agregadas das atividades humanas modernas.

### 3 – DEMONSTRAÇÃO DOS RESULTADOS DE PRODUÇÃO DA CÉLULA CaC

Assumindo os valores obtidos nas tabelas de cálculos e em referencial bibliográfico, pode-se concluir – quanto aos resultados de produção da CaC – que:

- Abastecimento da Solução Eletrolítica = 535 ml (Concentração 10% a 20%)
- $i = 15$  Ampères (Corrente Contínua)
- $U = 12,2$  volt
- $R = 0,81 \Omega$  [ohm]
- Densidade Elétrica =  $0,00087 \text{ C/mm}^2$
- $P = 183$  watt
- Energia consumida (Joules) = 10.980 J/minuto
- Taxa de demanda energética (Quilowatts) = 0,183 kWh
- Autonomia = 15 horas
- Demanda Total = 2,745 kW
- Produção de  $\text{H}_2 = 25 \text{ ml/s}$  ou 1350 l/recarga
- Economia Relativa = 65%
- Eficiência energética = 55%
- Manutenção = 40 recargas

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 02 Páginas 27-56
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

Ainda, uma vez parametrizados os poderes caloríficos comparados, fazendo-se uma relação ponderada entre as propostas, é verificada a superioridade combustível do Hidrogênio aos demais – sendo que é até 7 vezes superior ao poder calorífico da gasolina e 11 vezes superior ao do metanol.

### 3.1 – Relação de Custo Benefício da Produção de Hidrogênio Gasoso

Por meio da concentração molar e verificação de suas massas, para reagentes e produtos da reação química de combustão do H<sub>2</sub>, e conseguinte à obtenção de energia na forma de combustível (ou vetor energético), a relação de custo-benefício é dada por:



MOL	MASSA ATÔMICA	Nº AT	MASSA MOLAR	Nº MOLES	MASSA FINAL
H <sub>2</sub>	1 g (u.m.a.)	2	2 g/mol	2	4 g
O <sub>2</sub>	16 g (u.m.a.)	2	32 g/mol	1	16 g

Tabela 1 – Concentração Molar da Reação Química de Combustão do H<sub>2</sub>.

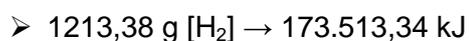
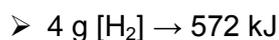
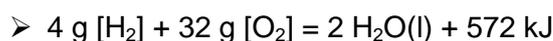
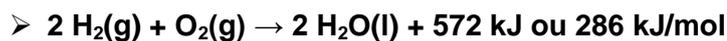
A densidade do H<sub>2</sub> é dada, conforme o Quadro 1 – propriedades atômicas do Hidrogênio – como sendo igual a 0,08988 gramas por litro. A massa total formada de gás hidrogênio ao final de uma recarga, ou seja, 15 horas de produção e 1.350 litros de produto gasoso é obtida do teorema da massa específica ( $\mu$ ) do material. Assim:

$$\rightarrow 0,08988 \text{ g/l} = m \div 1350 \text{ l}$$

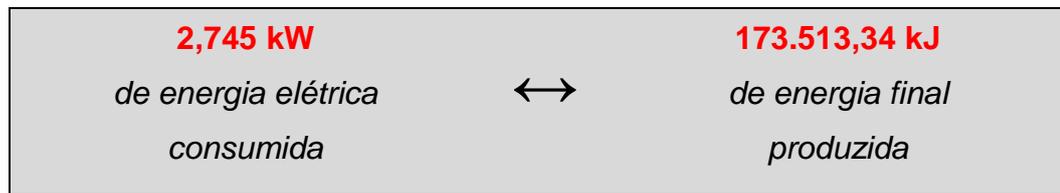
$$\rightarrow m = 0,08988 \text{ g/l} \times 1350 \text{ l}$$

$$\rightarrow m = \mathbf{1213,38} \text{ gramas de H}_2 \text{ ou } 1,21338 \text{ kg}$$

... Retomando a equação da reação química:



... Desta forma:



#### 4 – SISTEMA DE OTIMIZAÇÃO DE PRODUÇÃO DA CÉLULA CaC

A implementação de um algoritmo para a otimização da produção gás hidrogênio combustível se baseia na redução de energia consumida para a produção final de energia. De acordo com as leis expostas até então, pode-se determinar as relações matemáticas entre as grandezas obtidas, sejam produtos ou reagentes no sistema eletrolítico como um todo. Assim tem-se:

$$P = V_f (H_2) \div \alpha \quad (1)$$

$$H = V_f (H_2) \times \beta \quad (2)$$

Onde:

- P = é a potência elétrica [em kW] demanda pelo sistema;
- H = é a energia resultante [em kJ] da combustão de hidrogênio produzido;
- $V_f (H_2)$  = é o volume produzido [em litros] de gás hidrogênio no período total;
- $\alpha$  = é uma constante, número real que vale 491,811342;
- $\beta$  = é uma constante, número real que vale 257,056;
  - *OBSERVAÇÃO – as constantes são dadas das relações matemáticas entre as grandezas, na forma de proporções diretas.*

... Resolvendo as equações de forma a combiná-las, tem-se:

- $P = V_f (H_2) \div \alpha$
- $H = V_f (H_2) \times \beta$ 
  - $V_f (H_2) = H \div \beta$
- $P = (H \div \beta) \div \alpha = H \div (\beta \times \alpha)$ 
  - $(\beta \times \alpha) = \Delta = 257,056 \times 491,811342 = 126423,0563$

$$\mathbf{P = H \div (\Delta)} \quad (3)$$

Desta forma, a equação (3) é a responsável pela solução do projeto, assim, assume o papel de função objetivo do projeto. O objetivo será minimizar a função, onde sua restrição é  $P \leq 2,745$  kW, pois, a ideia de otimização aqui, consistirá de se reduzir ao máximo possível a demanda de energia para a produção de  $H_2$ . Para tanto, deve obedecer à condição de que:

... Se  $P \leq 2,745$  kW, então **2,745 kW  $\geq$  P**... sabe-se que,  **$P = H \div (\Delta)$**  ... calculando:

- $2,745 \text{ kW} \geq [H \div (\Delta)]$
- $2,745 \times (\Delta) \geq H$
- $2,745 \times 126423,0563 \geq H$
- $347031,2895 \text{ kJ} \geq H$  ... logo:
  - **$H \leq 347031,2895 \text{ kJ}$**
  - **$H \geq 347026,6800 \text{ kJ}$**  ... é a capacidade inicial do projeto, sem a aplicação de recursos de otimização.

Então, a condição restrita a que a função objetiva deve se submeter é aquela onde a quantidade potencial de energia produzida (H) pela combustão do Hidrogênio Gasoso deve ser menor ou igual a 347031,2895 quilojoules; e ainda, que esta mesma energia seja maior ou igual ao valor inicial do projeto – antes da otimização. Assim, a restrição do projeto fica:

$$\{ 347026,6800 \text{ kJ} \leq H \leq 347031,2895 \text{ kJ} \}$$

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 02 Páginas 27-56
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

Enfim, a condição a que se quer alcançar por meio da otimização de sistemas e projetos é aquela onde, se pode manter ou aumentar a produção de energia combustível de Gás Hidrogênio, desde que a demanda de energia que mantém o sistema possa ser minimizada.

#### 4.1 – Resultados Otimizados

Com a inicialização do ciclo evolucionário do método heurístico, na forma do Algoritmo Genético (GA) obtiveram-se dados satisfatórios no sentido de determinar uma correlação numérica entre a demanda de energia elétrica que abastece o sistema (CaC) e a capacidade energética do montante de gás hidrogênio produzido.

##### a) Iniciando o GA para a primeira geração:

```
[x endPop] = ga([347026.6800    347031.2895], 'gademol1eval1', [], initPop, [1e-6 1
1], 'maxGenTerm', 1, ... 'normGeomSelect', [0.08], 'arithXover', [2 0], 'nonUnifMutation', [2 1 3]);
```

1 2.744999 → *Demanda de energia elétrica do sistema*

2 2.744999 → *Demanda de energia elétrica do sistema*

- O melhor encontrado, primeira rodada ....  $x = 1.0e+005 * 3.47030.0000 = \mathbf{347030,00}$
- Para o intervalo  $\{ 347026,6800 \text{ kJ} \leq \mathbf{H} \leq 347031,2895 \text{ kJ} \}$  -> Melhor resultado = 347030,00 quando o objetivo é minimizar a demanda de energia elétrica do sistema, como mostra o próximo gráfico:

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 02 Páginas 27-56
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

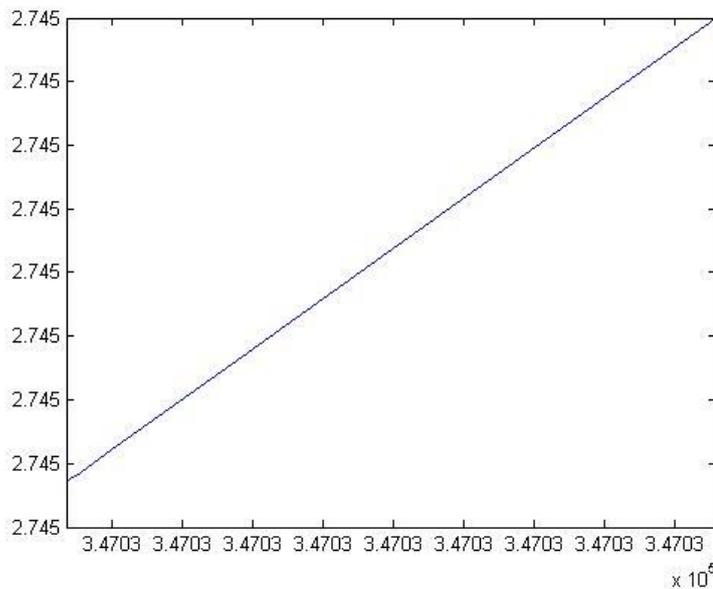


Gráfico 1 – Primeira geração indicando a direção do ótimo do projeto.

**b) Para as 25 gerações consecutivas:**

```
[x fimPop] = ga([347026.6800 347031.2895], 'ga_demonstracao', [], inicioPop, [1e-6 1
1], 'maxgen', 25, ... 'GeSelecao', [0.08], ['numerXcruzam'], [2], 'numUnifMutacao', [2 25 3]);
```

1 2.744999 → *Demanda de energia elétrica do sistema*

2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24

25 2.744999 → *Demanda de energia elétrica do sistema*

- O melhor encontrado, rodada seguinte ....  $x = 1.0e+005 * 3.47030.0000 = \mathbf{347030,00}$
- Para o intervalo  $\{ 347026,6800 \text{ kJ} \leq H \leq 347031,2895 \text{ kJ} \}$  -> Melhor resultado = 347030,00 quando o objetivo é minimizar a demanda de energia elétrica do sistema.

**Nota-se que a zona de convergência aponta para o valor 347030,00 como o ótimo para a minimização de demanda energética !!!**

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 02 Páginas 27-56
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

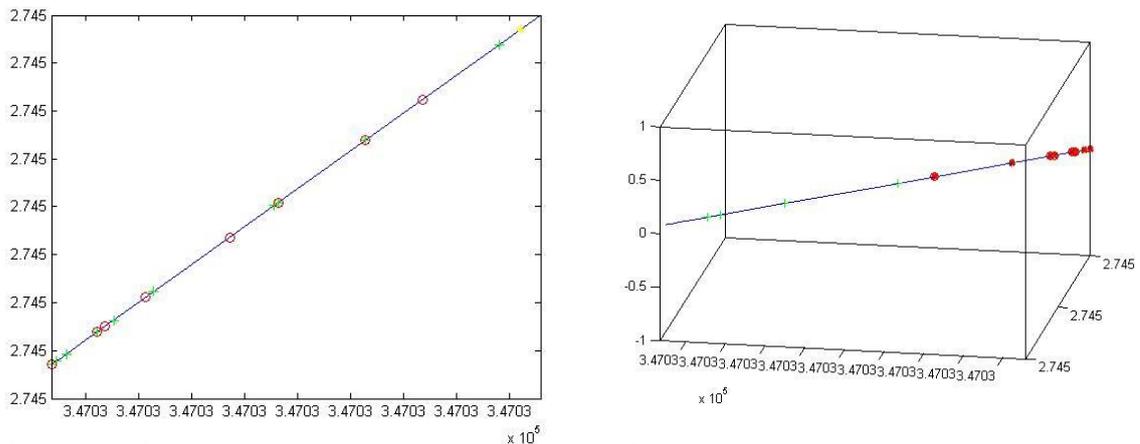


Gráfico 2 – Próximas gerações indicando a direção do ótimo do projeto, vistas 3D e 2D.

**c) Discussão dos Resultados Finais Otimizados:**

Ao final do processamento numérico, obtiveram-se os resultados da otimização do sistema, reforçando a convergência do ótimo para a direção indicada nos gráficos anteriores. Nos próximos gráficos, ficam claros os pontos ótimos, bem como, o ótimo geral, e a sua correspondência para o custo-benefício do projeto inicial. Enfim, o processo de otimização mostrou resultados satisfatórios, no que tange às imposições e restrições do sistema inicial, como o intervalo para a capacidade energética desejada (mínimo e máximo) desde que a intenção de minimizar a demanda de energia elétrica do sistema.

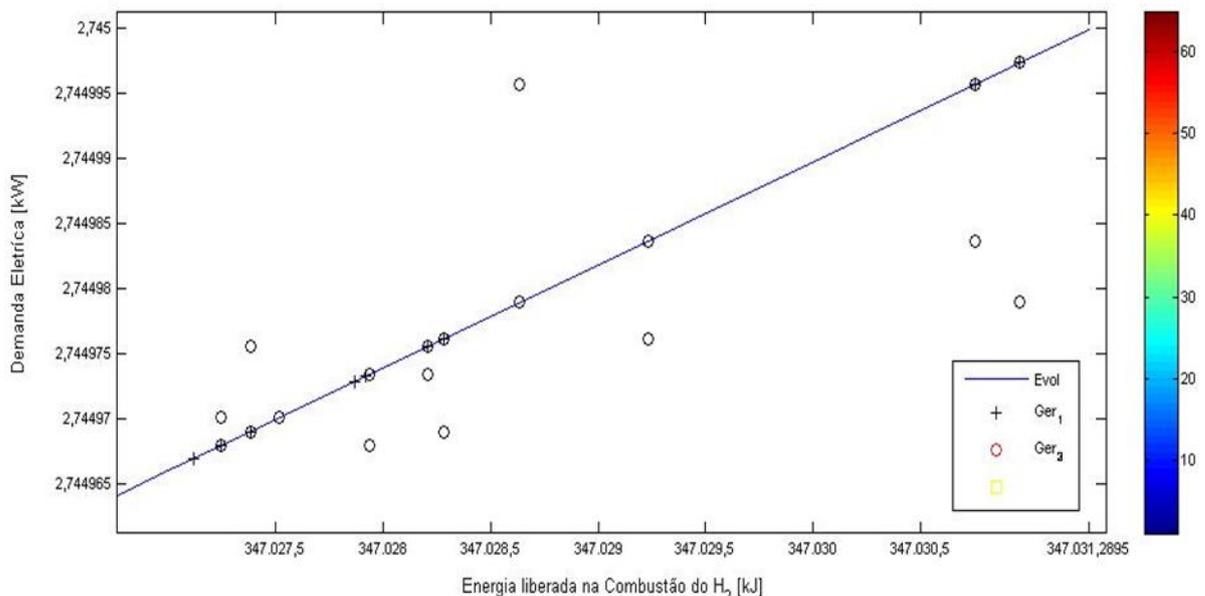


Gráfico 3 – Otimização dos resultados para as populações para os eixos X e Y.

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 02 Páginas 27-56
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

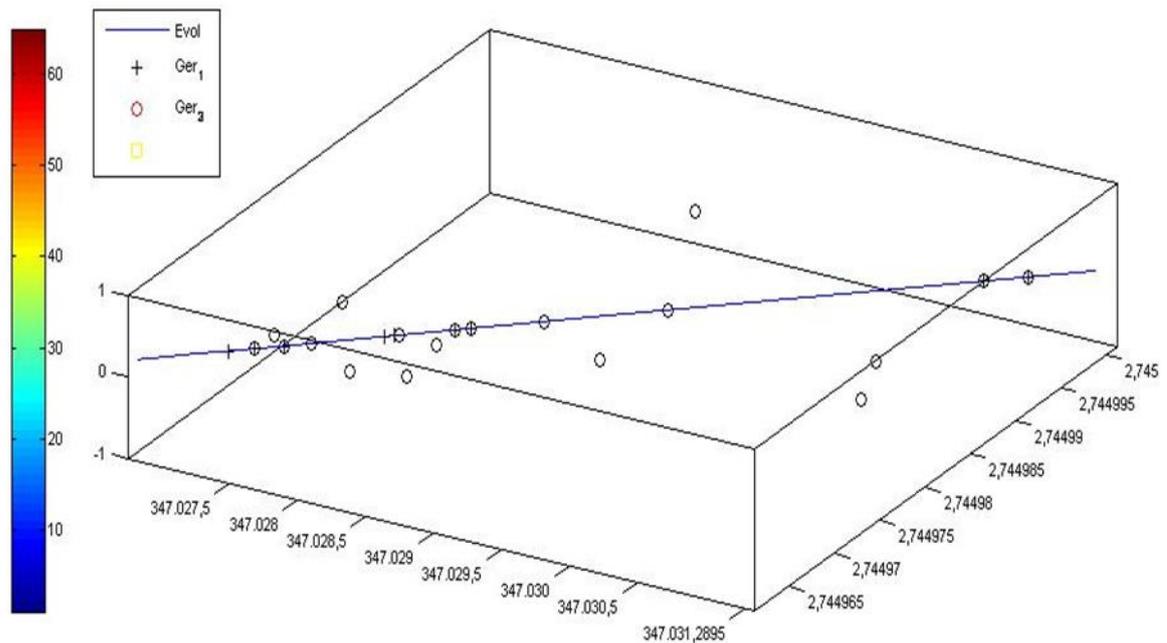


Gráfico 4 – Otimização dos resultados para as populações para os eixos X, Y e Z.

Enquanto os gráficos 2 e 3 apenas apontavam para a direção do ótimo, ainda durante o processo de otimização numérica (no instante em que o algoritmo ainda estava processando a função objetivo com sua restrição), os gráficos 4 e 5 determinam a região do ótimo com seus respectivos valores. Nota-se que a condição de minimização do consumo de energia elétrica foi respeitado, quando o intervalo de capacidade de produção energética (H) é imposto, com o seu devido mínimo e máximo.

Intervalo:  $\{ 347026,6800 \text{ kJ} \leq H \leq 347031,2895 \text{ kJ} \}$ . Sendo que a demanda energética do projeto inicial é 2,745 kW.

**Desta forma o ponto ótimo é onde o consumo de energia elétrica é até 2,744 kW e a eficiência energética é igual a 347030,0 kJ.**

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 02 Páginas 27-56
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

## 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora o processo de otimização tenha acontecido idealmente, por meio do emprego do método heurístico de GA – Algoritmo Genético, é percebido que a faixa de otimização é bastante reduzida, ou seja, as condições do projeto e sua restrição são minimamente flexíveis, de forma a não permitirem grandes alterações ou melhorias de desempenho. Entretanto, o comportamento dos dados, nos gráficos de resultados, mostra que houve uma melhoria no nível de desempenho do sistema.

A dificuldade em otimizar o projeto no sentido de reduzir a demanda de energia, e conseqüentemente, dos custos de produção também está relacionada à própria natureza termodinâmica da combustão do gás hidrogênio em função da energia para obtê-lo da molécula da água. A produção de gás hidrogênio combustível ainda é bastante custosa.

## 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASPO. Associação Para O Estudo Do Pico Do Petróleo E Do Gás. *O Pico de Hubbert*. Lisboa: ASPO, 2010. Disponível em: <<http://www.aspo-portugal.net/hubbertpeak.shtml>>. Acesso em: 23 de Março de 2012.

BONJORNO, José Roberto *et al.* *Física: História & Cotidiano*. Volume Único. São Paulo: FTD, 2009.

BROWN, Lawrence S.; HOLME, Thomas A. *Química Geral Aplicada À Engenharia*. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

BURNS, Lawrence D. et al. *Um Futuro Limpo: Automóveis movidos a células de hidrogênio poderão ser os catalisadores de um futuro mais limpo*. Scientific American Brasil. Ano I, nº 1. São Paulo: Moderna, 2009. p. 25.

CAPOZOLI, Ulisses. *Energia Limpa É O Novo Desafio Para A Ciência*. São Paulo: Com Ciência, 2001. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/reportagens>> Acesso em: 17 de Abril de 2012.

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 02 Páginas 27-56
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	periodicoscesg@gmail.com	

CECOMPI. *Empreendedorismo e Inovação Sustentável*. São Paulo: CECOMPI, 2012. Disponível em: <<http://www2.cecompi.org.br/st/?p=3237>>. Acesso em: 25 de Maio de 2012.

DA SILVA, Ennio Peres. *Introdução À Tecnologia e Economia do Hidrogênio*. Campinas: Unicamp, 1991.

DA SILVA, Gabriela Moraes *et al.* *Produção Biotecnológica de Hidrogênio*. Florianópolis: UFSC, 2009. Disponível em: <<http://www.eng.ufsc.br/labs/probio>>. Acesso em: 07 de Abril de 2012.

DA SILVA, Roseane Z. *et al.* *Ponte de Hidrogênio ou Ligação de Hidrogênio: eis a questão*. Sociedade de Química. Recife: UFPE, 2006. Disponível em: <<http://sec.sbg.org.br/cd29ra/resumos/T1907-1.pdf>>. Acesso em: 13 de Março de 2012.

DE ALMEIDA, Aníbal Traça. *Hidrogênio Como Combustível*. Coimbra: FCTUC, 2005. Disponível em: <<http://www.eq.uc.pt/inovar/hidrogenio>>. Acesso em: 26 de Março de 2012.

HYDROGENS. *Gerador de Hidrogênio: produtos*. Rio de Janeiro: Hydrogens, 2012. p. 01. Disponível em: <<http://www.hydrogens.com.br/produtos>>. Acesso em: 13 de Junho de 2012.

MASTERTON, William L.; SLOWINSKI, Emil J. *Química Geral Superior*. Rio de Janeiro: Interamericana, 1978.

VANDERPLAATS, Garret N. *Numerical Optimization Techniques For Engineering Design*. 4 ed. Colorado Springs: VR&D, 2005.

Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo	Número X Jul-dez 2014	Trabalho 02 Páginas 27-56
<a href="http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia">http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia</a>	<a href="mailto:periodicoscesg@gmail.com">periodicoscesg@gmail.com</a>	