

N. CLASS. M621.194  
CUTTER M152 v  
ANO/EDIÇÃO 2015

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**  
**FÁBIO BELTRÃO MACIEL**

**VIABILIDADE NA UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL  
PARA CALDEIRA FLAMOTUBULAR E AQUOTUBULAR: uma pesquisa sobre o  
hidrogênio**

**Varginha**  
**2015**

**FÁBIO BELTRÃO MACIEL**

**VIABILIDADE NA UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL  
PARA CALDEIRA FLAMOTUBULAR E AQUOTUBULAR: uma pesquisa sobre o  
hidrogênio**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do Prof. Mes. Luiz Carlos Vieira Gudes.

**Varginha  
2015**

**FÁBIO BELTRÃO MACIEL**

**VIABILIDADE NA UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL  
PARA CALDEIRA FLAMOTUBULAR E AQUOTUBULAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em:        /        /

---

Prof. Esp. Thairone Conti Serafini Aguiar

---

Prof. Esp. Alex Ribeiro Borges

---

Prof. Esp.

OBS.:

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo apoio  
e dedicação de uma vida toda.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a Deus por todas as maravilhas que faz em minha vida.

Aos meus pais que sempre apoiaram o meu crescimento e batalharam pela minha educação.  
Ao meu orientador Luiz Carlos Vieira Guedes pelos conselhos e direcionamentos e a professora Luciene de Oliveira Prósperi pelas orientações.

## RESUMO

Este trabalho consiste de uma pesquisa sobre o hidrogênio com o objetivo de analisá-lo como combustível para caldeira flamotubular e aquotubular analisando custos, pontos positivos e negativos desde o processo de separação por eletrolise até sua queima na caldeira.

O hidrogênio é um gás encontrado nos combustíveis fósseis, na água e em todos os seres vivos, não tem cheiro, não tem cor e é fundamental para a vida. Em várias situações já é empregado como combustível, mais o custo da energia elétrica para separar o hidrogênio por eletrolise é o mais caro do processo podendo chegar a 60%.

A queima de combustíveis fósseis ou biomassa emite CO<sub>2</sub> que é um gás prejudicial por um lado e essencial por outro enquanto que o hidrogênio é o combustível mais correto se formos analisar impacto ambiental, pois os gases emitidos em sua combustão não prejudicam a camada de ozônio, por outro lado o hidrogênio não é um combustível primário, ou seja, precisa passar por processos caros para obter-se o gás hidrogênio.

**Palavras-chave:** Hidrogênio. Caldeira. Eletrólise.

## **ABSTRACT**

*This work consists of research on hydrogen in order to analyze it as fuel for flame tube boiler and aquotubular analyzing costs, positives and negatives from the separation process electrolysis until his firing in the boiler.*

*Hydrogen is a gas found in fossil fuels, water and in all living beings, no smell, no color and is essential for life. In many situations it is already used as a fuel, plus the cost of electricity to separate hydrogen by electrolysis is the most expensive process and may reach 60%.*

*The burning of fossil fuels or biomass emits CO<sub>2</sub> is a harmful gas on the one hand and essential other while hydrogen is the most correct fuel if we analyze environmental impact because the gases emitted in its combustion does not affect the ozone layer, otherwise the hydrogen is not a primary fuel, or need to go through costly processes to obtain hydrogen gas.*

**Keywords:** *Hydrogen. Boiler. Electrolysis.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Tabela Periódica .....	14
Figura 02 – Eletrólise .....	16
Figura 03 – Máquina a vapor de Heron de Alexandria .....	18
Figura 04 – Gerador de vapor flamotubular combustível a gás.....	19
Figura 05 – Gerador de vapor flamotubular combustível a lenha.....	20
Figura 06 – Gerador de vapor flamotubular combustível a óleo. ....	21
Figura 07 – Funcionamento de um gerador de vapor compacto.....	22
Figura 08 – Gerador de vapor aquotubular combustível cavaco de madeira.....	23
Figura 09 – Funcionamento de um gerador de vapor complexo.....	24
Figura 10 – Gerador de vapor aquotubular combustível a gás .....	25
Figura 11 – Gerador de vapor mista com combustível a lenha e auxiliar gás .....	26
Figura 12 – Planta empresa produquímica em Igarassu - PE .....	27
Figura 13 – Célula de diafragma. ....	28
Figura 14 – Processo de eletrólise por diafragma .....	29
Figura 15 – Rampa de gás.....	30
Figura 16 – Tabela técnica da caldeira .....	31
Figura 17 – Desenho de Casa de Caldeira .....	32
Figura 18 – Custo para produção de hidrogênio através da eletrolise da água.....	32



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NR13 – Norma Regulamentadora 13

ASME - American Society of Mechanical Engineers

PCI – Poder Calorífico Inferior

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2 HIDROGÊNIO</b> .....	<b>18</b>
2.1 Impacto Ambiental .....	14
2.2 Custos do Processo Eletrólise .....	16
2.3 Armazenamento.....	17
<b>3 GERADOR DE VAPOR</b> .....	<b>18</b>
<b>3.1 Classificação de um Gerador de Vapor</b> .....	<b>18</b>
3.1.1 Gerador de Vapor Flamotubular.....	19
3.1.2 Gerador de Vapor Aquotubular.....	23
3.1.3 Gerador de Vapor Flamotubular com Fornalha Externa.....	26
<b>4 ESTUDO DE CASO</b> .....	<b>27</b>
<b>4.1 A Empresa pesquisada</b> .....	<b>27</b>
4.1.1 Metodologia.....	28
<b>5 RESULTADO E DISCUSSÕES</b> .....	<b>33</b>
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	<b>34</b>
REFERÊNCIAS.....	35

## 1 INTRODUÇÃO

O primeiro cientista digno de nota a entrever o potencial do hidrogênio foi John Burden Sanderson Haldane, que mais tarde se tornou um dos mais distintos geneticistas do século 20. Em 1923, com seus 20 anos Haldane proferiu uma palestra na Universidade de Cambridge dizendo que a energia do hidrogênio seria o combustível do futuro. E não estava errado, vivemos hoje num mundo onde o combustível fóssil lidera o consumo nas indústrias para geração de energia. Sabemos que o petróleo não é renovável e os gases que liberam em sua queima são poluentes e os geólogos já têm estimativas de que o pico do petróleo no mundo não está tão longe assim. É nesta hora que entra o hidrogênio, combustível inesgotável, ecologicamente correto, alto poder calorífico e não poluente.

Mais com tantas qualidades assim, também tem seus pontos negativos, como armazenagem no estado líquido somente abaixo de  $-253^{\circ}$  C. A separação do hidrogênio por eletrolise é um processo caro, pois utiliza muita energia e muita água. Falando de Energia e água nos dias de hoje, não podemos pensar em desperdícios, pois estamos vivendo um tempo de estiagem onde não se choveu o necessário para encher as represas e rios que abastassem famílias, cidades e estados.

Mesmo com esses pontos negativos, é uma boa opção para ter o hidrogênio como combustível, como na fabricação de ácido clorídrico "HCl" precisa-se do hidrogênio, portanto, é extraído o hidrogênio da água pelo processo de eletrólise para ser utilizado tanto como para fabricação de produtos químicos e ao mesmo tempo utilizar o hidrogênio como combustível.

O objetivo deste trabalho é apresentar a viabilidade ou não viabilidade do hidrogênio como combustível para caldeira flamotubular e aquotubular, analisando custos, benefícios, segurança e armazenamento.

Os objetivos específicos deste trabalho em relação ao hidrogênio são:

- Pesquisar sobre o hidrogênio e sua aplicação geral como combustível;
- Analisar impacto ambiental;
- Levantar Custos de energia consumida no processo eletrolise;
- Pesquisar sobre caldeiras flamotubular e aquotubular;
- Analisar a viabilidade custo beneficio de utilizar ou não o hidrogênio como combustível.

## 2 HIDROGÊNIO

O hidrogênio é o mais leve e mais onipresente dos elementos do universo. Quando processado para servir como forma de energia, torna-se “a energia eterna”. Ele nunca se esgota e, por não conter nenhum átomo de carbono, não emite dióxido de carbono. O hidrogênio se encontra por toda parte da Terra – na água, nos combustíveis fósseis e em todos os seres vivos. Todavia, raramente existe na natureza em estado puro e deve ser extraído das fontes naturais (JEREMY RIFKIN, 2003).

As fundações da economia do hidrogênio já estão sendo lançadas. Nos próximos anos, a revolução dos computadores e das telecomunicações se fundirão com a nova revolução da energia do hidrogênio, constituindo uma poderosa junção capaz de reconfigurar fundamentalmente os relacionamentos humanos nos séculos 21 e 22. Como o hidrogênio se encontra por toda parte e é inesgotável, se processado adequadamente, todas as pessoas na Terra poderão desfrutar de relativa “autonomia energética”, convertendo a energia de hidrogênio no primeiro regime energético verdadeiramente democrático da história (JEREMY RIFKIN, 2003).

O hidrogênio é o mais simples e mais conhecido elemento do universo! Está presente em quase tudo, inclusive em você! Ele compõe 75% da massa do universo e 90% de suas moléculas, como a água (H<sub>2</sub>O) e as proteínas nos seres vivos. No planeta Terra, compõe aproximadamente 70% da superfície terrestre.

No seu estado natural e sob condições ambientes de temperatura e pressão, o hidrogênio é um gás incolor, inodoro, insípido e muito mais leve que o ar. Ele também pode estar no estado líquido, ocupando um espaço 700 vezes menor do que se estivesse em forma de gás! Mas ele tem que estar armazenado numa temperatura de - 253°C, em sistemas de armazenamento conhecidos como “sistemas criogênicos”. Acima dessa temperatura, o hidrogênio não pode ser liquefeito, mais pode ser armazenado em forma de gás comprimido em cilindros de alta pressão. (Emilio Hoffmann Gomes Neto, Hidrogênio Evoluir sem Poluir, p 87).

Células combustível energizadas por hidrogênio já estão sendo produzidas comercialmente para a instalação em fábricas, escritórios, prédios comerciais e residências para produzir energia, luz e calor. As grandes indústrias automobilísticas investiram mais de dois bilhões de dólares no desenvolvimento de carros, ônibus e caminhões em tais células e esperam produzir em massa a nova geração de veículos antes do final desta década. A instalação de microusinas de força junto ao consumidor de força junto ao consumidor final – a chamada “geração distributiva” – ameaça o antigo domínio exercido pelas usinas centralizadas desde o início da era dos combustíveis fósseis.

As células combustíveis são como baterias – mas uma grande diferença. As baterias armazenam energia química e as convertem em eletricidade. Quando a energia química se esgota, a bateria é descarregada. As células a combustíveis, em

contrapartida, não armazenam energia química. Em vez disso, convertem a energia química de um combustível com que são abastecidas em eletricidade. Elas não requerem recargas e continuam a gerar eletricidade enquanto lhes for fornecido combustível externo e um oxidante. (Jeremy Rifkin, A Economia do Hidrogênio, p 195).

Nos dias de hoje, cerca de 400 bilhões de metros cúbicos de hidrogênio são produzidos no mundo – equivalente a aproximadamente 10% da produção global de petróleo em 1999. Grande parte do hidrogênio é usada como matéria prima química no fabrico de produtos como fertilizantes derivados de amônia, na hidrogenação de óleos orgânicos comestíveis, feitos de sementes de soja, peixes, amendoim e milho. O hidrogênio também é usado para converter o óleo líquido em margarina. É usado no processo de fabricação de polipropileno e também para resfriar geradores e motores (JEREMY RIFKIN, 2003).

Hoje, o usuário final se torna tanto produtor como consumidor de energia. Quando milhões de pequenas usinas de força estiverem conectadas em vastas redes energéticas, empregando os mesmos princípios arquitetônicos e a mesma tecnologia moderna que ensejaram uma World Wide Web, as pessoas poderão compartilhar energia e comercializa-la – numa partilha energética de igual para igual, libertando-se definitivamente das gigantes energéticas e elétricas.

Para Thorsteinn Sigfusson, professor de física da Universidade da Islandia em Reykjavik e presidente na Nova Energia no mesmo país, a meta do consórcio é rodar toda a economia islandesa com hidrogênio dentro de 20 anos, praticamente eliminando do país e energia de combustíveis fósseis. (Jeremy Rifkin, A Economia do Hidrogênio, p 195).

O hidrogênio é o elemento químico mais abundante do universo. Ele compõe 75% de sua massa, e 90% de suas moléculas. Empregá-lo efetivamente como fonte de força daria à humanidade uma reserva de energia virtualmente ilimitada.

O elemento químico hidrogênio, conhecido pelo símbolo H, é o primeiro elemento químico da tabela periódica, é o mais simples de todos os elementos pois é constituído de um próton e um elétron que gira em seu redor, figura abaixo, não pertencendo a nenhum grupo da tabela, por possuir propriedades distintas.

A energia do hidrogênio é 2,4 vezes maior que a do gás natural por unidade de massa, e é 1100 vezes maior que uma bateria ácida. Porém, para sua utilização precisa ser submetido a altas taxas de compressão, devido a sua propriedade de expansão em pressão ambiente Almeida e Moura (2005)

Figura 01: Tabela Periódica

1A		2A		3B-10B										11A		12A		3A-8A																																																																																																																																																																	
1	H Hidrogênio	2	He Hélio	3	Li Lítio	4	Be Berílio	5	B Boro	6	C Carbono	7	N Nitrogênio	8	O Oxigênio	9	F Fluor	10	Ne Neônio	11	Na Sódio	12	Mg Magnésio	13	Al Alumínio	14	Si Silício	15	P Fósforo	16	S Enxofre	17	Cl Cloro	18	Ar Argônio	19	K Potássio	20	Ca Cálcio	21	Sc Escândio	22	Ti Titânio	23	V Vanádio	24	Cr Cromo	25	Mn Manganês	26	Fe Ferro	27	Co Cobalto	28	Ni Níquel	29	Cu Cobre	30	Zn Zinco	31	Ga Gálio	32	Ge Germânio	33	As Arsênio	34	Se Selênio	35	Br Bromo	36	Kr Criptônio	37	Rb Rubídio	38	Sr Estrôncio	39	Y Ítrio	40	Zr Zircônio	41	Nb Níobio	42	Mo Molibdênio	43	Tc Técnetio	44	Ru Ródio	45	Rh Ródio	46	Pd Paládio	47	Ag Prata	48	Cd Cádmio	49	In Índio	50	Sn Estanho	51	Sb Antimônio	52	Te Telúrio	53	I Iodo	54	Xe Xenônio	55	Cs Césio	56	Ba Bário	57-71	**	72	Hf Háfnio	73	Ta Tântalo	74	W Tungstênio	75	Re Rênio	76	Os Ósmio	77	Ir Írídio	78	Pt Platina	79	Au Ouro	80	Hg Mercúrio	81	Tl Tálio	82	Pb Chumbo	83	Bi Bismuto	84	Po Polônio	85	At Astato	86	Rn Radônio	87	Fr Frâncio	88	Ra Rádio	89-103	**	104	Rf Rutherfordio	105	Db Dubnio	106	Sg Seabórgio	107	Bh Bohrío	108	Hs Háscio	109	Mt Meitnerio	110	Ds Darmstádio	111	Rg Roentgenio	112	Cn Copernício	113	Nh Nihônio	114	Fl Fleróvio	115	Uup Ununpêntio	116	Lv Livermório	117	Uus Ununseptio	118	Og Oganessônio

Nº Atômico	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Simbolo	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Nome	Lantânio	Cério	Praseolímio	Neodímio	Promécio	Samarco	Europio	Gadolínio	Térbio	Disprósio	Holmíio	Érbio	Tulio	Ítrio	Lutécio
	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
	Actínio	Tório	Protactínio	Úrânio	Neptúncio	Plutónio	Amérvio	Cúrio	Bérvio	Califórnia	Eínstáio	Férmio	Mendelevio	Noébio	Lórcio

Autor: desconhecido Fonte: <http://www.tabelaperiodicacompleta.com/> 2015

Como o hidrogênio se encontra por toda parte e é inesgotável, não é tão simples adquiri-lo pois ele nunca está só, ou seja, em sua forma pura H, e seu processo de separação tem um custo alto. Na composição química da água temos duas moléculas de hidrogênio e uma de oxigênio H<sub>2</sub>O talvez esta seja a combinação mais conhecida do elemento químico hidrogênio que em estado gasoso sua densidade é 14 vezes menor que a do ar (RIFKIN, 2003).

O hidrogênio é encontrado nas estrelas onde é convertido em hélio pela fusão nuclear, na terra, está em todas as substâncias animais e vegetais, é o gás mais leve que se conhece, é incolor, inodoro, insípido e insolúvel em água. Para obter-se o hidrogênio líquido é necessário esfria-lo com ar liquefeito e comprimi-lo fortemente a uma temperatura de -253° C a pressão atmosférica.

O poder calorífico do hidrogênio (energia por unidade de peso) supera o de todos os outros gases com uma taxa de 28.900 cal/kg, durante sua combustão é liberada uma energia 2.5 vezes maior do que de um hidrocarboneto (gasolina, metano, propano etc.)

## 2.1 Impacto Ambiental

O gás hidrogênio é incolor, insípido, inflamável, não metálico, insolúvel em água e menos denso que o ar e o resultado de sua combustão com oxigênio puro é calor e água, agora se o hidrogênio for queimado com o ar que respiramos o resultado é um pouco diferente devido a composição química do ar que é 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio e 1% de dióxido de

carbono, argônio, vapor de água e outros gases, como isso seriam produzidos alguns gases poluentes porém em quantidades bem menores comparado com outros combustíveis. Devido a composição química do hidrogênio não ter carbono, isso é um ganho muito grande para a sociedade e para a natureza, pois quando queimamos 1 kg de hidrogênio em vez de petróleo, 3 kg de carbono são evitados (dióxido de carbono) CO<sub>2</sub>.

Decerto, a reconversão do hidrogênio em eletricidade a partir de uma célula combustível não acarreta danos ambientais, visto que os subprodutos são a água e o calor (BRAGA, 2010).

Temos outros benefícios do hidrogênio pois ele não é tóxico, não é radioativo, não é corrosivo, por outro lado um dos pontos mais negativos é que não existe hidrogênio livre no nosso meio, e para obter-se hidrogênio livre o custo é alto.

Uma vez separado o hidrogênio gasoso, pode ser utilizado em várias situações como por exemplo: combustível para os foguetes, por ter a maior energia por unidade de peso, isso ocorre por que ele é o elemento mais leve que existe e não tem átomo de carbono. Isso é muito bom por um lado e muito ruim para o outro, ao mesmo tempo que ele te proporciona mais energia, suas explosões são mais violentas e mais rápidas, como no caso o desastre de Hinderberg em 1937 onde um dirigível explodiu quando pousava onde teve muitas vítimas fatais.

Segundo Santos et al (2004), a quantidade de energia libertada durante a reação do hidrogênio é cerca de 2,5 vezes maior do que o poder de combustão de hidrocarbonetos como a gasolina, metanol, gás natural, metano, etc. Sendo que na mesma quantidade de massa o hidrogênio apresenta o maior poder de combustão, isto o torna o combustível de maior potencial de geração de energia.

A Análise do Impacto Ambiental do Ciclo de vida (AICV) de um processo químico pode ser definida como a identificação e avaliação sistemática dos efeitos potenciais que este processo poderá exercer durante sua operação nos componentes ambientais biológicos, físico-químicos, culturais e socioeconômicos. (SILVA, 2005, p.19).

O limite de emissões de gases poluentes como dióxido de carbono "CO<sub>2</sub>" é um milhão de ppm (1.000.000 de partículas por milhão), isto é analisado com instrumento de medição de gases instalado na chaminé da caldeira, porém esses dados são baseados em caldeiras que ficam afastadas do meio urbano e considerando combustíveis sólidos como biomassa que são mais poluentes que o hidrogênio (CONAMA, 2006).

O hidrogênio tem sido utilizado como combustível alternativo, pois apresenta características que nenhum outro gás ostenta, tal como elevada quantidade de energia por unidade de massa, baixa densidade, é um elemento abundante no

universo e porque quando utilizado, o produto dessa reação é apenas H<sub>2</sub>O (STEVÃO, 2008 p.7).

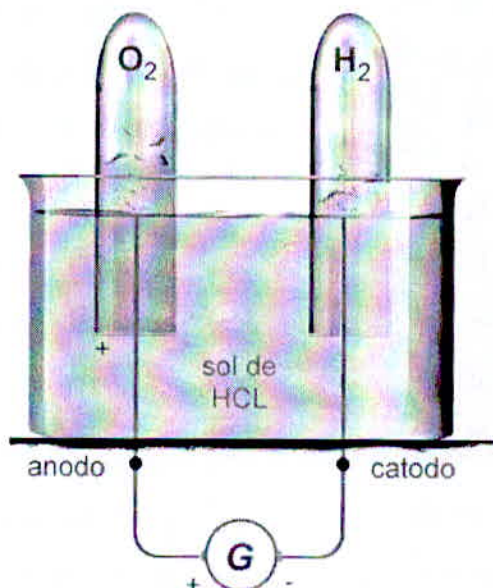
Na obtenção de hidrogênio a partir da eletrólise da água o preço da eletricidade é o fator mais importante no custo final de produção do hidrogênio eletrolítico (ESPINOLA, 2013, p. 108).

## 2.2 Custos do Processo Eletrólise

Eletrólise é o ramo da eletroquímica que caracteriza um processo não-espontâneo de descarga de íons, baseado na conversão de energia elétrica em energia química, ou seja, é utilizado a energia elétrica para romper as moléculas da água em átomos de hidrogênio e oxigênio. Como sabemos a água pura não é condutora de eletricidade, sendo necessário a adição de alguma substância (neste caso o cloreto de sódio), de modo a obtermos uma solução condutora (eletrolítica), e então apta a sofrer eletrólise. A esta uma solução aquosa saturada de NaCl (sal) dá-se o nome de Salmoura (JEREMY RIFKIN, 2003).

Este processo existe há mais de 100 anos. Eis como funciona: dois eletrodos, um positivo e outro negativo, são submergidos em água pura, a qual se deu maior condutibilidade pela adição de um eletrolítico. Quando a eletricidade a corrente contínua é aplicada, o hidrogênio borbulha em direção ao eletrodo de carga negativa (o cátodo), e o oxigênio rumo ao eletrodo de carga positiva (o ânodo). Abaixo desenho exemplificando a eletrólise.

Figura 02: Eletrólise



Autor: desconhecido Fonte: <http://efisica.if.usp.br>, 2007



A figura 02 nos mostra o modelo de processo eletrolítico onde temos a solução de HCL dissolvida na água, uma fonte de energia elétrica ligada nos eletrodos e quando a água recebe o choque, as moléculas da água H<sub>2</sub>O são quebradas e o hidrogênio se prende no catodo e o oxigênio no anodo.

Existem vários processos de eletrolise como Membrana, Diafragma, Mercúrio entre outros, sendo o custo médio de uma planta R\$800.000,00 reais. (GOMES NETO, 2005).

### **2.3 Armazenamento**

Para que o hidrogênio seja obtido em liquido sua temperatura deve estar a aproximadamente -253°C ocupando assim um volume 700 vezes menor do que em forma de gás (GOMES NETO, 2005).

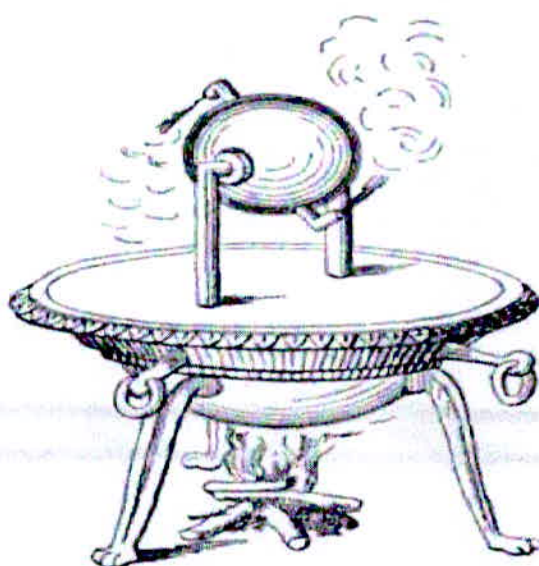
Assim que separado por eletrolise, o gás hidrogênio é armazenado um tanque chamado gasômetro. Apesar de ser altamente explosivo o hidrogênio não reage com o ar ambiente, ou seja, não explode sem o fogo, por isso pode ser canalizado facilmente para algum processo desejado. A pressão de compressão do hidrogênio pode andar entre 200 e 250 bar (GOMES NETO, 2005).

O armazenamento por absorção em um metal ou por formação de um hidreto de metal é muito caro, e depois do seu armazenamento é preciso aquecimento a 300°C antes do hidrogênio ser libertado.

### 3 GERADOR DE VAPOR

Caldeira é uma máquina térmica cujo o principal objetivo é gerar vapor. O vapor é um dos meios mais comuns para a transferência de energia. A utilização do vapor vem de muito tempo atrás, desde a era cristã, onde um estudioso chamado Heron de Alexandria, construiu uma espécie de turbina a vapor, chamada eolípila.

Figura 03: Máquina a Vapor de Heron de Alexandria



Fonte: Apostila Geração e Distribuição de Vapor – UNIS MG

Seu projeto era composto por uma esfera de metal e dois bicos, colocados em posições opostas. O funcionamento consiste no aquecimento da água colocada no interior da esfera que produzia o vapor, que por sua vez se expandia, escapando pelos bicos, fazendo a esfera girar, mas nenhum trabalho útil era produzido por esse movimento. Portanto, não havia nenhuma utilidade prática para esse projeto.

A utilização do vapor da caldeira pode ser para geração de energia elétrica ou processo.

#### 3.1 Classificação de um Gerador de Vapor

Os geradores de vapor podem ser classificados de acordo com:

- ✓ A classe de pressão;

[...] as caldeiras são classificadas em 3 categorias, conforme segue:  
 a) caldeiras da categoria A: são aquelas cuja pressão de operação é igual ou superior a 1960 kPa (19.98 kgf/cm<sup>2</sup>);  
 b) caldeiras da categoria C: são aquelas cuja pressão de operação é igual ou inferior a 588 kPa (5.99 kgf/cm<sup>2</sup>) e o volume interno é igual ou inferior a 100 (cem) litros;  
 c) caldeiras da categoria B são todas as caldeiras que não se enquadram nas categorias anteriores. [...] (Norma Regulamentadora 13, 2003, p. 117)

- ✓ A posição dos gases quentes provenientes da combustão e da água que é utilizada para a geração do vapor.

Uma classificação mais precisa, apresenta muita dificuldade por existirem vários tipos fundamentais. Dividimos os geradores de uma forma geral em:

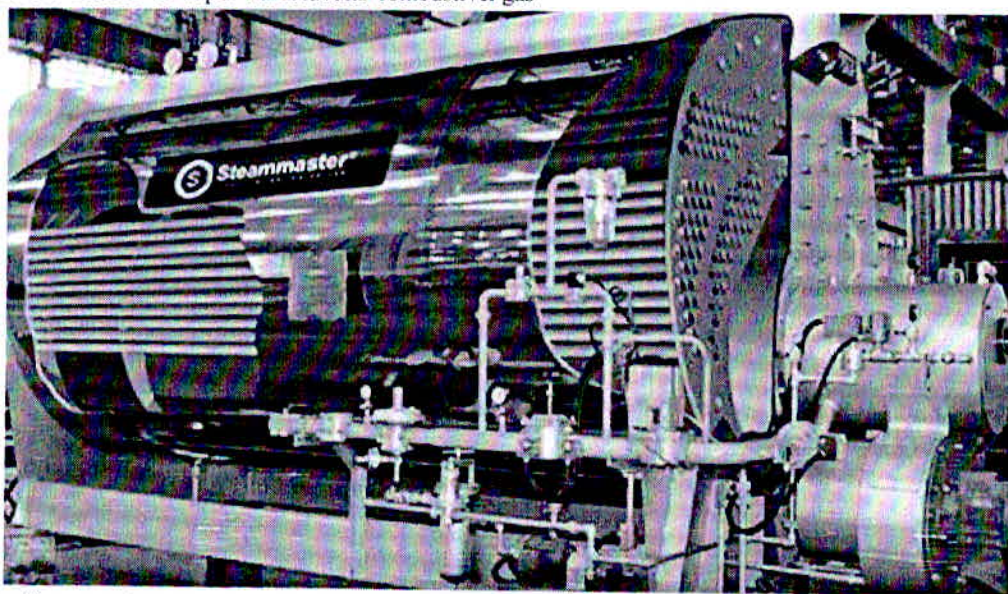
- ✓ Gerador de vapor Flamotubular;
- ✓ Gerador de vapor Aquotubular;

### 3.1.1 Gerador de Vapor Flamotubular

A caldeira flamotubular é compacta, geralmente menor que a aquotubular, podendo utilizar combustíveis sólidos líquidos ou gasosos.

Essas caldeiras tem o tempo de resposta menor que a aquotubular, devido seu tamanho, podendo atingir uma vazão de vapor de até 35 toneladas de vapor por hora, numa pressão de 30kgf/cm<sup>2</sup>.

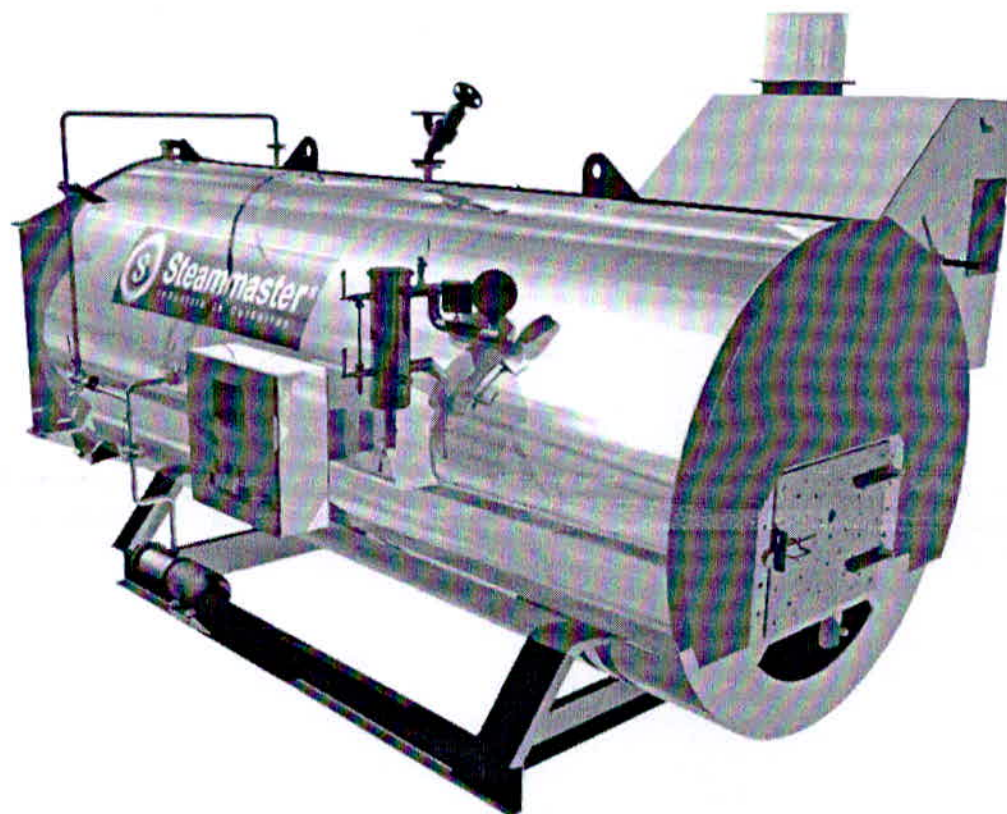
Figura 04: Gerador de vapor flamotubular combustível gás



Fonte: Steammaster

Observa-se nessa figura 04 a rampa de gás em amarelo que é por onde o gás hidrogênio entra passando pelo queimador fazendo a queima que geram os gases que em sequência passam pelos passes da caldeira até a saída pela chaminé. Neste modelo de caldeira temos um ventilador soprando, forçando os gases da combustão a passarem pelos passes da caldeira e saindo pela chaminé.

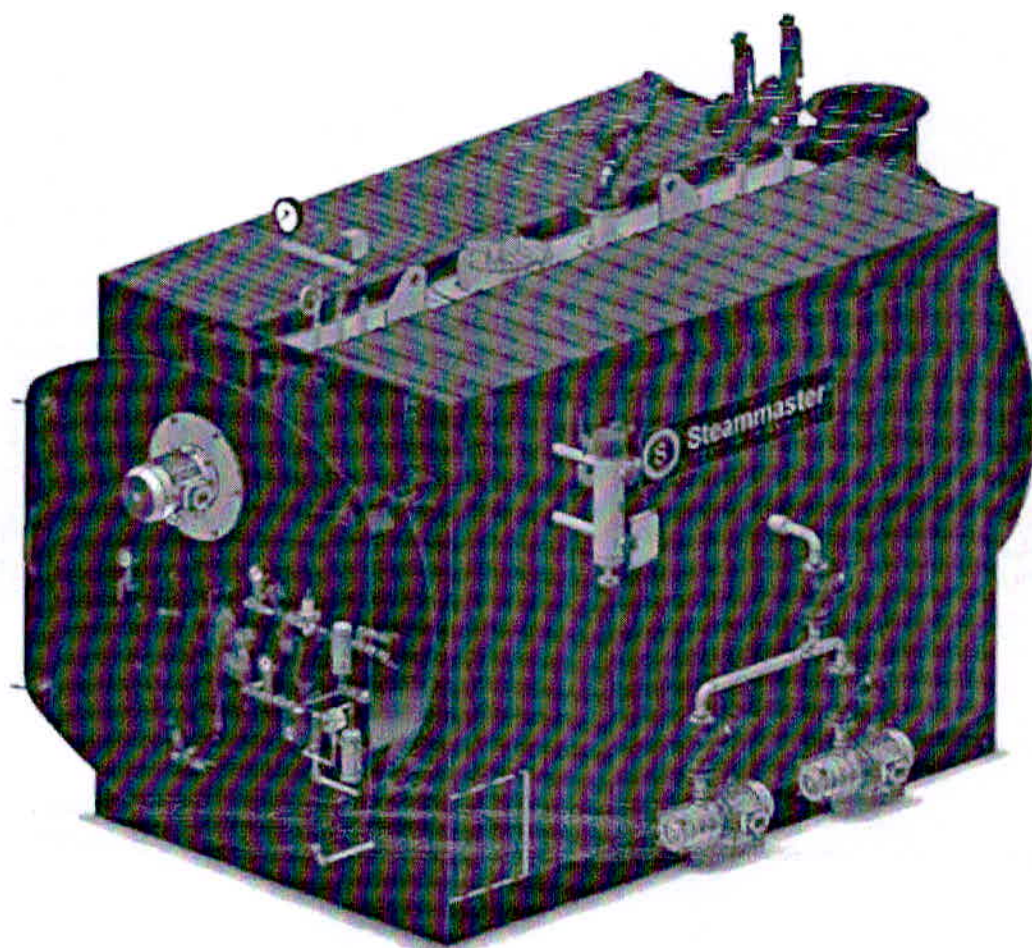
Figura 05: Gerador de vapor flamotubular combustível lenha



Fonte: Steammaster

Neste modelo de caldeira flamotubular conforme a figura 05 o combustível é a lenha, o processo nos passes da caldeira não muda, o que muda é a concepção da fornalha que agora precisa de uma grelha pois o combustível é sólido e acrescenta uma porta para alimentar a caldeira. Neste modelo não tem queimador, mais tem o exaustor que fica no final dos passes da caldeira puxando os gases da combustão para chaminé, é como se ele estivesse sugando os gases.

Figura 06: Gerador de vapor flamotubular combustível óleo

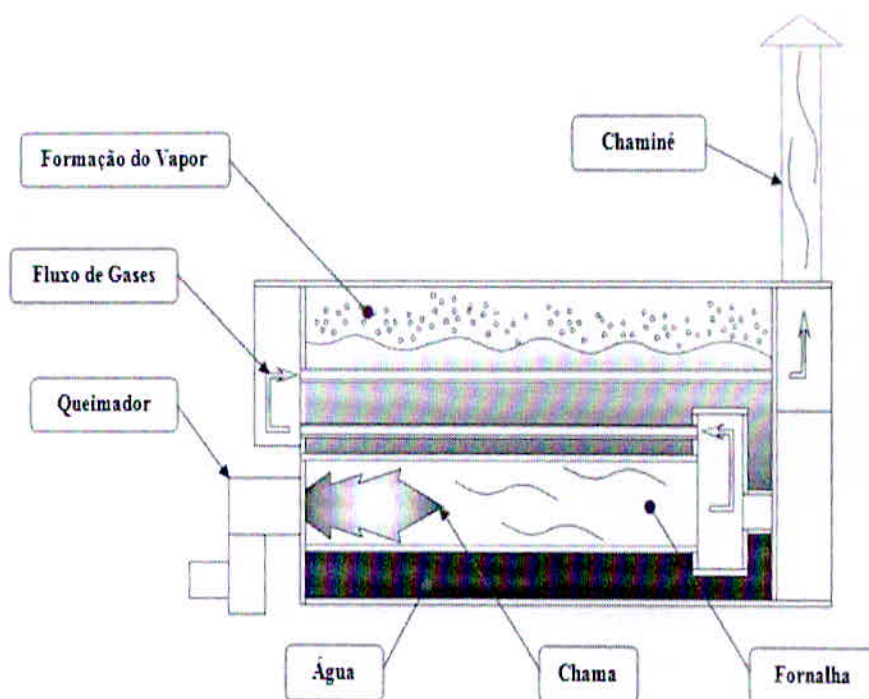


Fonte: Steammaster

Na figura 06 a caldeira é de três passes dos gases porém este modelo o combustível é a óleo diesel este modelo é chamado também de chama reversa, pois a chama do queimador vai pelo centro e retorna por fora, ou seja, pelas laterais, tudo isso dentro da fornalha sem passar por tubos no segundo passe, e em seguida no terceiro passe os gases passam pelos tubos e saem pela chaminé.

O funcionamento mais comum entre as caldeiras flamotubulares é contado como 3º passes, ou seja, os gases que são formado na combustão dentro da fornalha que é contado como 1º passe, sem seguida saindo da fornalha fazendo a curva passando pelo 2º passe e finalmente passando pelo 3º passe e saindo pela chaminé conforme desenho abaixo.

Figura 07: Funcionamento de um Gerador de Vapor Compacto



Fonte: O Autor

Essas caldeiras flamotubulares são utilizadas por empresas que necessitam de média escala de vapor de 300 à 40.000 kgv/h, pois sua área de aquecimento é baixa comparada a caldeira aquotubular e sua pressão é em média 30kgf/cm<sup>2</sup>.

São caldeiras com boa eficiência, alta segurança com duas válvulas de segurança, mais um sistema de eletrodos na coluna de nível impedindo que a caldeira fique sem água e um custo médio.

Estes geradores têm como principais vantagens:

- a) Construção simples e pouca alvenaria;
- b) Possibilidade de fácil substituição dos tubos,
- c) Menores exigências para tratamento da água de alimentação;
- d) Limpeza fácil de fuligem no interior dos tubos;
- e) Tempo para montagem e o "start" do equipamento mais rápido.

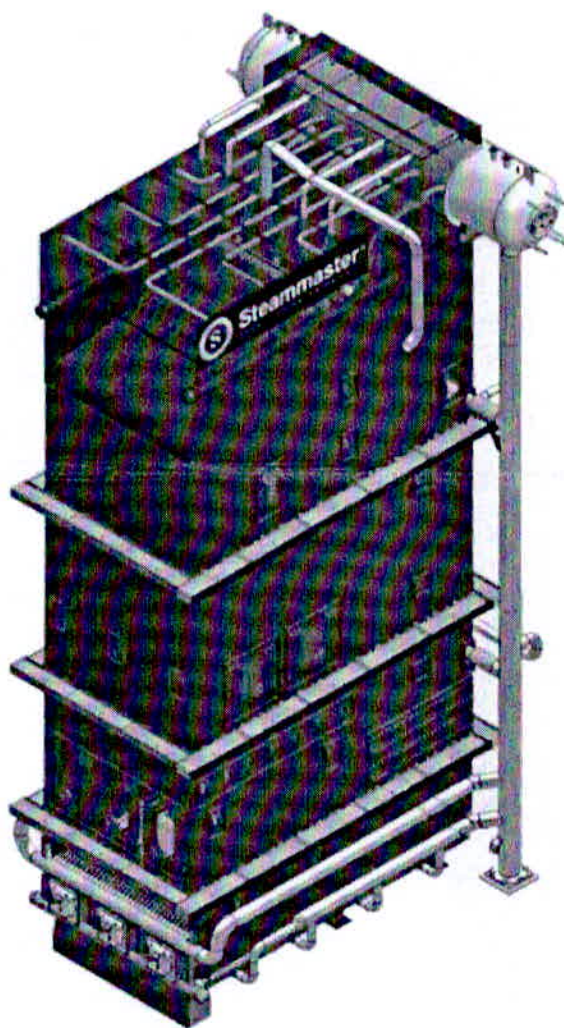
Como desvantagens apresentam:

- f) Destinam-se a pressões não muito elevadas, devido a razões de segurança para o vaso de pressão;
- g) Custo do combustível alto para queima de combustíveis líquidos ou gasosos;

### 3.1.2 Gerador de Vapor Aquotubular

Este modelo de caldeira precisa de um espaço físico maior para instalação, pois sua escala de vapor é bem maior podendo passar de 500 toneladas de vapor por hora com pressões acima de 120 kgf/cm<sup>2</sup>. Utilizando combustíveis sólidos como cavaco, lenha, biomassa em geral e podendo ter um queimador auxiliar para queima de combustível gasoso ou líquido.

Figura 08: Gerador de vapor aquotubular combustível cavaco de madeira

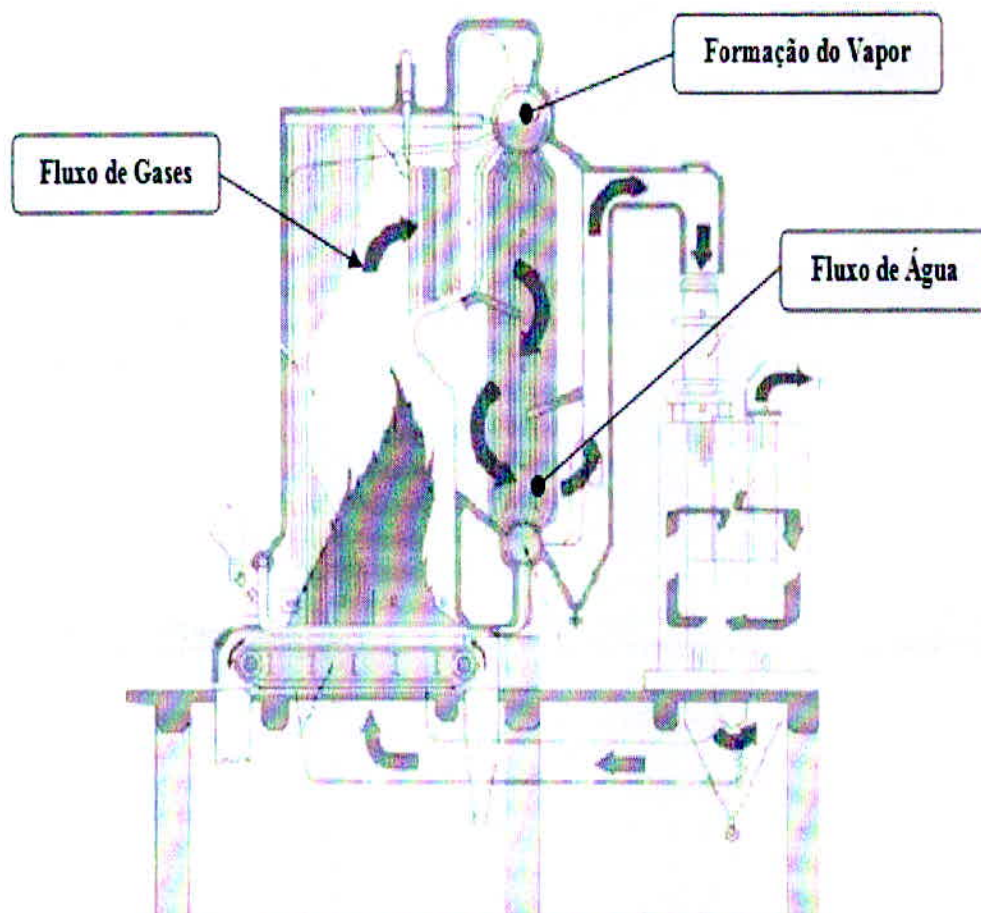


Fonte: Steammaster

O funcionamento de uma caldeira aquotubular é mais complexo que flamotubular, pois tem sua área de aquecimento maior e toda distribuída em tubos, sua fornalha é composta por paredes d'água em forma de uma caixa fechando todos os lados, onde a água corre por dentro

dos tubos e vai subindo conforme sua temperatura aumenta a ponto de passar do estado líquido para gasoso dentro do tubulão de vapor também conhecido como balão.

Figura 09: Funcionamento de um Gerador de Vapor Complexo

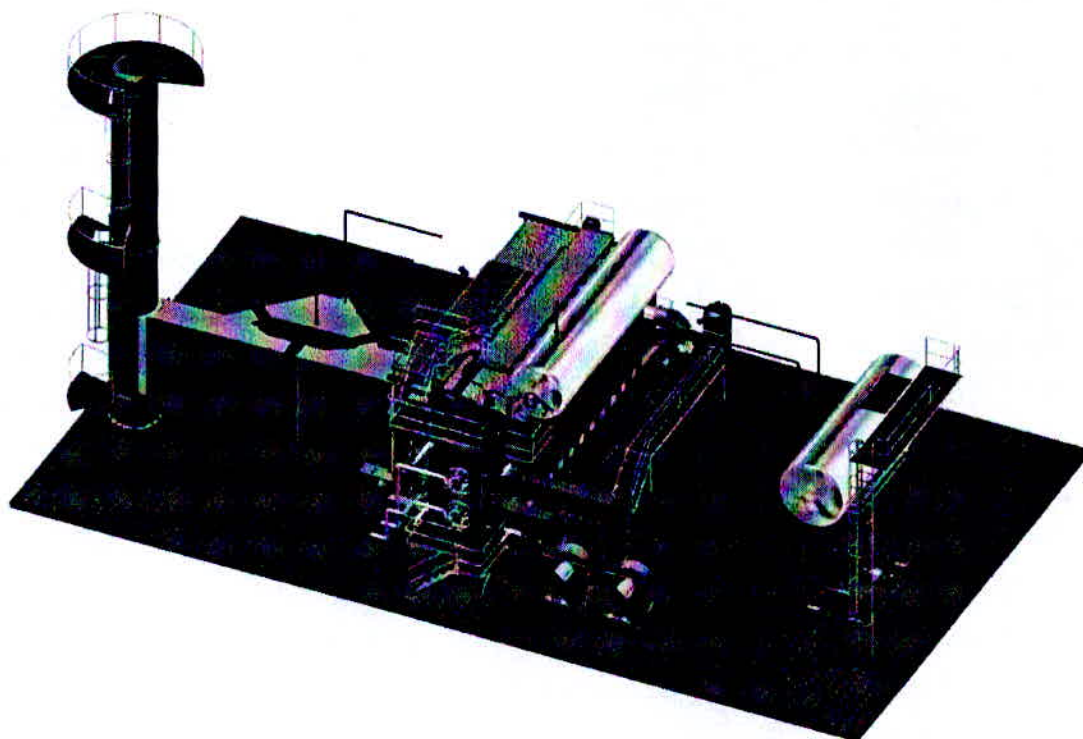


Fonte: Apostila Geração e Distribuição de Vapor – UNIS MG

Na figura 09 mostra os gases sendo gerado pela combustão dentro da fornalha e passando pelo tubulão de vapor onde é formado o vapor e seguindo seu fluxo para o multiciclone para eliminar as partículas pesadas dos gases.



Figura 10: Gerador de Vapor Aquotubular combustível gás



Fonte: Steammaster

Na figura 10 é de uma caldeira aquotubular de combustível gás, podendo ser gás natural, GLP ou hidrogênio. Está é uma caldeira que gera 40 toneladas de vapor/hora com um consumo considerável de combustível, pra este caso seja viável o combustível hidrogênio que tem o maior poder calorífico que por isso diminua a vazão de combustível por hora.

Os geradores de vapor aquotubulares são basicamente utilizados em indústrias e onde suas capacidades variam da ordem de 10.000 a 500.000 kg/h de produção de vapor, com pressão de trabalho até 120 kgf/cm<sup>2</sup>.

Esses geradores de vapor têm como principais vantagens:

- a) Possibilidades de queima de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos;
- b) Operar com produção e pressão de vapor elevadas;
- c) Permite instalação de superaquecedores.

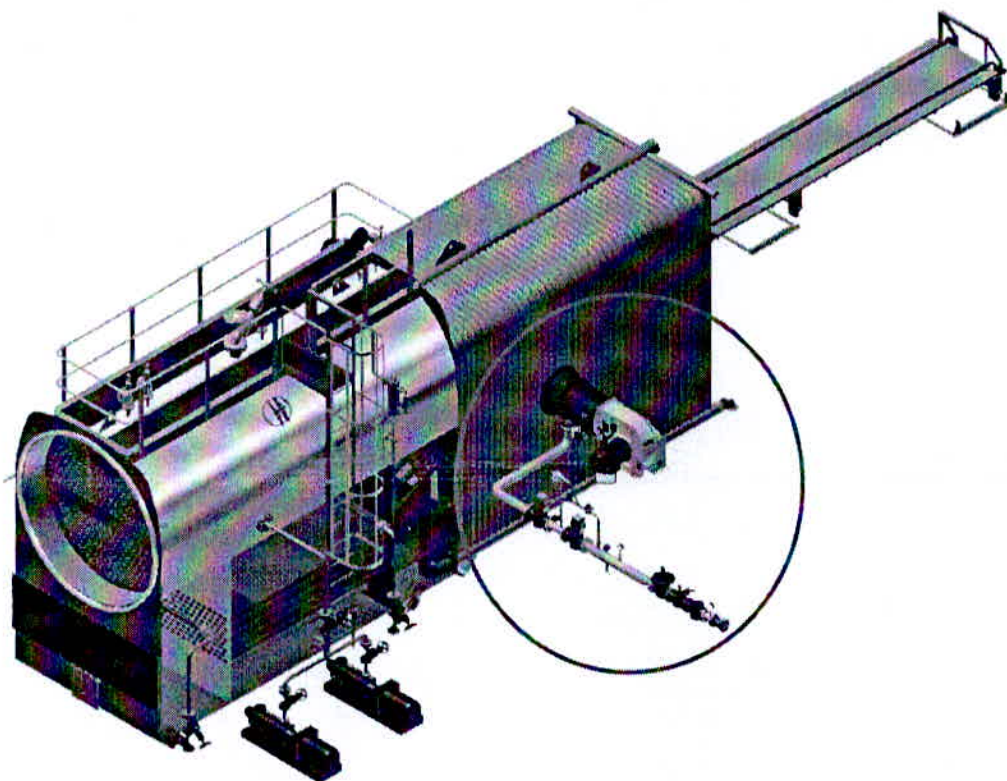
Como desvantagens apresentam:

- d) Requer maior espaço físico (casa de caldeira) para sua instalação;
- e) Maior exigência para tratamento da água de alimentação;
- f) Tempo de montagem e o “start” do equipamento mais longo.

### 3.1.3 Gerador de Vapor Flamotubular com Fornalha Externa (Mista)

Mais conhecida como caldeira mista, seu objetivo é unir a fornalha externa aquotubular com o corpo mais conhecido como casco ou costado flamotubular e com isso você ganha na área de aquecimento podendo queimar vários tipos de combustíveis como sólidos, gasosos e líquidos atingindo vazão de vapor e trabalhando com pressões altas.

Figura 11: Gerador de Vapor Mista com combustível lenha e auxiliar gás



Fonte: Steammaster

Este modelo de caldeira mista é muito procurado para empresas de médio porte que necessitam de vapor entre 10 a 40 toneladas de vapor. Esta figura 11 é de uma caldeira de 30 toneladas de vapor hora com combustível a lenha e com queimador auxiliar.

Para estes geradores de vapor, suas principais vantagens são:

- a) Possibilidades de queima de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos;
- b) Operar com produção e pressão de vapor elevadas;
- c) Permite instalação de superaquecedores.

Como desvantagens apresentam:

- d) Requer maior espaço físico (casa de caldeira) para sua instalação;
- e) Maiores exigência para tratamento da água de alimentação, pois sua fornalha são tubos de água;
- f) Tempo de montagem e o “start” do equipamento mais longo.
- g) Manutenção complicada.

#### 4 ESTUDO DE CASO

Neste estudo de caso estaremos analisando o hidrogênio como combustível de uma caldeira flamotubular de 10.000 kgv/h com selo ASME.

##### 4.1 A Empresa Pesquisada

A Produquímica é uma empresa multinacional, no Brasil tem suas plantas em Suzano SP, Jacareí SP, Mauá SP, São José do Campos SP, Cubatão SP, Varginha MG e Igarassu-PE e trabalha na área de fabricação de vários produtos químicos como cloro, ácido clorídrico entre outros.

Figura 12: Planta da empresa produquímica em Igarassu - PE



Fonte: (Produquímica, 2015)

#### 4.1.1 Metodologia

A metodologia utilizada foi obtida através de trabalhos na literatura em levantamentos em campo e bibliográficos. Os trabalhos permitiram um embasamento teórico para a realização desta estimativa.

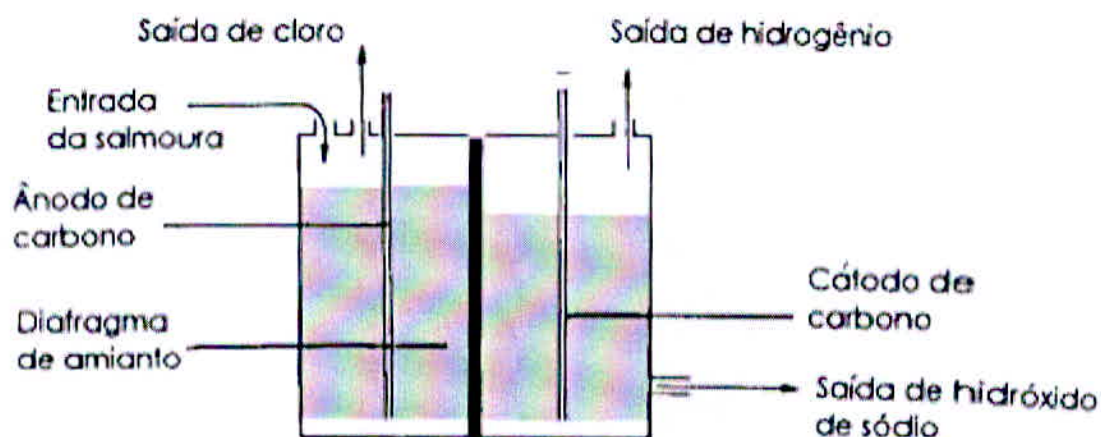
Para a produzir alguns de seus produtos como ácido clorídrico “HCl” é necessário o gás hidrogênio e o processo utilizado no caso da produquímica é por eletrólise.

A eletrólise se processa pela passagem de corrente elétrica em solução de cloreto de sódio (salmoura = água e sal) em um equipamento denominado de célula eletrolítica. Vários tipos de células foram desenvolvidos para esta finalidade, porém apenas três tecnologias predominam em escala industrial neste segmento, sendo elas as do tipo diafragma, mercúrio ou membrana.

No caso da empresa produquímica o hidrogênio é um resíduo da sobra do processo do cloro, ou seja, era lançado na atmosfera. Com isso surgiu a ideia de aproveitar esse hidrogênio lançado fora para queimar em uma caldeira gerando vapor e assim aquecer a salmoura.

Na eletrólise das salmouras, o cloro é produzido no ânodo e o hidrogênio, juntamente com o hidróxido de sódio, no cátodo.

Figura 13: Célula de diafragma



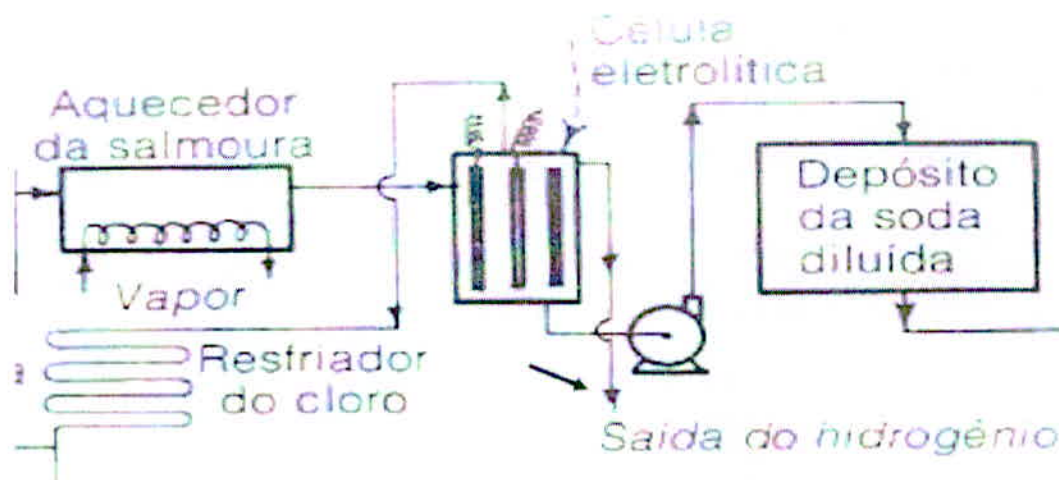
*Uma célula de diafragma.*

Autor: Vadson de Souza, Fonte: Universidade Federal da Paraíba, 2009

Na figura 13 temos uma célula de diagrama onde se faz o processo de eletrolise para se obter o hidrogênio. De um lado temos a entrada da salmoura, a saída de cloro o eletrodo de

ânodo de carbono e diafragma de amianto, do outro lado temos a saída de hidróxido de sódio o eletrodo cátodo de carbono e a saída do gás hidrogênio.

Figura 14: Processo eletrolise por diafragma



Autor: Vadson de Souza, Fonte: Universidade Federal da Paraíba, 2009

Na figura 14 temos a planta do processo de diafragma geral, onde podemos ver um tanque para aquecer a salmoura que é aquecida a vapor, em seguida esta salmoura vai para a célula eletrolítica de onde acontece o processo de eletrolise saindo o hidrogênio, o cloro e a soda caustica diluída.

O consumo de combustível hidrogênio é 243 kg/h ou 2.950m<sup>3</sup> e para se produzir essa vazão precisa de 14,16 MWh e o custo de 1 MWh é aproximadamente R\$360,72. Portanto temos 14,16 MWh x R\$360,72 = 5.107,8 reais por hora. Este valor vezes 24 horas = R\$122.587 reais por dia, e por mês R\$3.677.616 (VADSON W. B. DE SOUSA, 2009), (ALANA GANDRA, 2015).

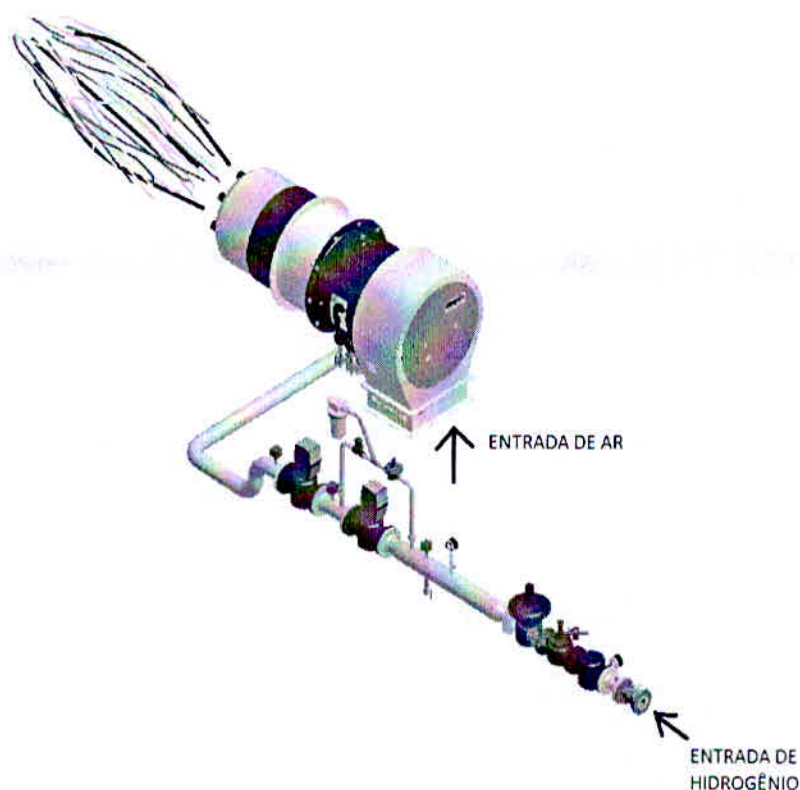
Podemos ver que este processo não é economicamente viável se for utilizar o hidrogênio somente como combustível, ou seja, ele deve ser utilizado como subproduto para queimar na caldeira.

O hidrogênio gasoso úmido gerado na eletrólise é resfriado seguindo para um tanque pulmão denominado gasômetro localizado em área adjacente aos demais tanques de armazenagem. Deste tanque, o hidrogênio é distribuído para a geração de vapor e para fabricação de produtos como amônia ou ácido clorídrico ou é empregado na hidrogenação de compostos orgânicos.

O hidrogênio sai do processo de eletrolise a pressão atmosférica e através de compressores e armazenado em um gasômetro, onde a pressão não pode passar de 200mbar, caso a pressão aumente, um dispositivo de segurança libera parte do gás para atmosfera, até a pressão estabilizar abaixo do 200mbar.

Conforme a figura 15 temos a rampa para direcionar o gás, controlar sua vazão e normalizar a pressão para 80 a 100mmbar através de um sistema automático de modulação de eletroválvulas. Na separação por eletrólise, o hidrogênio não vem puro, ou seja, ele vem com traço de soda caustica causada pelo processo, por esse motivo a rampa de gás deve ser fabricada de aço inoxidável para conter a oxidação, e com isso encarece mais o projeto.

Figura 15: Rampa de gás



Fonte: O autor

A queima do gás hidrogênio é ecologicamente correta, liberando apenas oxigênio para a atmosfera,  $H_2 + O_2 \rightarrow H_2O$  e excessos de  $O_2$ , no entanto dependendo do processo que ele é

retirado vem com algumas impurezas. Na produquímica, junto com o hidrogênio vem uma grande quantidade de solda caustica devido o processo de eletrólise por salmoura.

A utilização do vapor da caldeira neste processo é para aquecer a salmoura (salmoura = água e sal) antes de entrar na célula eletrolítica. O consumo de combustível hidrogênio em uma caldeira de 10.000 kgv/h é aproximadamente 243kg/h, isto considerando o “pci” do hidrogênio de 28.555 kcal/m<sup>3</sup>. (STEAMMASTER, 2013)

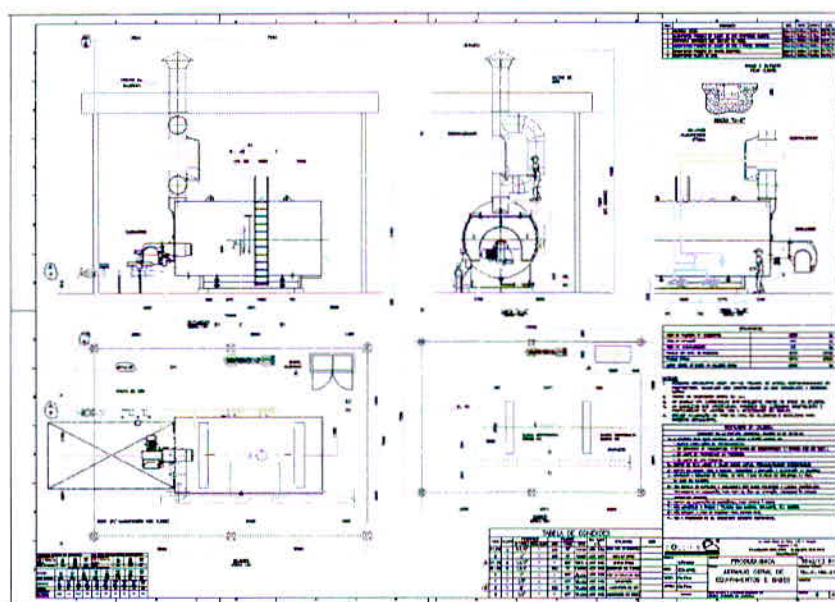
Abaixo na figura 17 a tabela de dados técnicos da caldeira flamotubular utilizada na empresa produquímica. Essa tabela contém modelo da caldeira, produção de vapor por hora, pressão de trabalho, combustível entre outras informações.

Figura 16: Tabela técnica da caldeira

MODELO	CIC-S	UNIDADE
Produção de vapor (Água de alimentação a 20°C)	10.000	Kg/h
Produção de vapor (Água de alimentação a 80°C)	11.025	Kg/h
Produção de vapor (Água de alimentação a 105°C)	11.517	Kg/h
Pressão máxima de trabalho permitida(PMTP)	13.0	Kgf/cm <sup>2</sup>
Pressão máxima de operação (PMO)	12,0	Kgf/cm <sup>2</sup>
Pressão de teste hidrostático	19,5	Kgf/cm <sup>2</sup>
Temperatura da água de alimentação normal	20	° C
Temperatura da água de alimentação recuperando condensado	80	° C
Temperatura da água de alimentação desaerada	105	° C
Capacidade térmica (output)	5.604.000	Kcal/h
Carga térmica (input)	6.025.806	Kcal/h
Superfície de aquecimento da caldeira	251,6	m <sup>2</sup>
Entalpia do vapor	665,4	Kcal/Kg
Combustível	HIDROGÊNIO	
PCI do combustível	28.555	kcal/kg
Consumo de combustível	243	kg/h
Taxa de evaporação	39,75	kg/h m <sup>2</sup>
Qualidade do vapor	Saturado	
Classificação	Fumotubular	
Passagem de gases	3	
Corpo	Cilíndrico horizontal	
Rendimento térmico queimando gás hidrogênio c/ economizador	93%	
Rendimento térmico queimando Óleo Diesel	90,0%	
Construção	abrigada	

Fonte: Steammaster

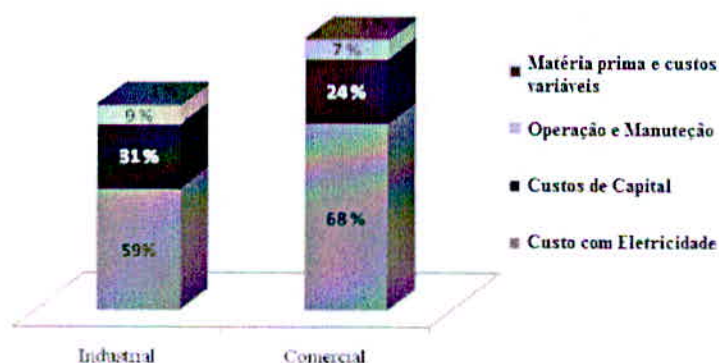
Figura 17: Desenho de Casa de Caldeira



Fonte: Steammaster

Abaixo na figura 18 o desenho da caldeira utilizado para enviar ao cliente para ser aprovado. Este desenho tem o título de Casa de Caldeira, onde se tem as medidas principais, a localização dos equipamentos, posição das tubulações entre outras informações.

Figura 18: Custo para produção de hidrogênio através da eletrólise da água



Fonte: (Carnieletto, 2011)

Segundo Hoffmann (2001) e Silva (1991), os principais componentes de um sistema de eletrólise típicos são o eletrolisador, a unidade de potência, o separador de gases, a unidade de purificação e as unidades de armazenamento.



## 5 RESULTADO E DISCUSSÕES

Como o hidrogênio é um subproduto, não é viável financeiramente produzir hidrogênio somente para queimar em caldeiras, pois o custo do processo é alto, se gasta muita água, e também com relação ao transporte e armazenamento existem norma rígida pois o hidrogênio é altamente explosivo. Por outro lado, em empresas que já utilizam o hidrogênio para fabricar algum produto e pretende também usá-lo como combustível é uma ótima opção visto que o hidrogênio tem um alto poder calorífico é ecologicamente correto, não agride o meio ambiente e é o mais abundante na atmosfera.

Se pegarmos a mesma caldeira de 10.000 kgv/h e trocarmos o combustível para gás natural onde seu PCI é 9.000 kcal/m<sup>3</sup> seu custo mensal será de R\$ 1.325.808,00 reais, e se utilizar óleo diesel com PCI de 8.466 kcal/l o custo será de R\$ 1.602.600,00 enquanto que o custo do hidrogênio com PCI de 28.555 kcal/m<sup>3</sup> ficaria em torno de R\$3.677.616 por mês de energia elétrica.

Analisando esses valores, o combustível mais econômico mensal é o hidrogênio por seu poder calorífico ser alto, utiliza-se menos combustível, porém o gasto com energia elétrica é alto, tem o custo das tubulações de inox para evitar corrosão por causa da soda caustica que sai junto com o hidrogênio pelo processo de eletrólise por salmoura.

Hoje em dia se fala muito em economia de energia nas residências, indústrias entre outros locais, e por esse motivo não seja viável fazer eletrólise somente com o objetivo de queimar hidrogênio em caldeira. O gás CO<sub>2</sub> que é emitido em combustíveis fósseis, biomassa fazem bem por um lado e mal por outro, as plantas agradecem a emissão deste gás CO<sub>2</sub> pois elas precisam para sua fotossíntese e por outro lado faz mal à saúde e todo os carros, aviões, caldeiras, e todas máquinas com combustíveis fósseis ou biomassa emitem CO<sub>2</sub> e este gás sobe para camada de ozônio diminuindo a espessura dessa camada de ozônio, fazendo com que os raios solares cheguem com mais força na terra, ou seja, aquecimento global. No pólo ártico em 10 anos aumentaram a quantidade de pessoas com câncer de pele, no local mais frio acabam sentindo mais esse aquecimento, por esse e outros motivos o hidrogênio seria perfeito, pois sua queima gera somente água, é o gás mais abundante na atmosfera, ou seja, pode-se dizer que é inesgotável, e poderia mudar fundamentalmente nossas instituições econômicas, políticas e sociais.

## 6 CONCLUSÃO

O hidrogênio mesmo sendo um combustível não primário ainda é uma ótima opção para se queimar em uma caldeira desde que seja como subproduto ou resíduo de algum outro processo, pois é um combustível de alta eficiência, é ecologicamente correto, por outro lado o custo da eletrólise encarece muito o processo e armazená-lo envolve normas rígidas devido alto poder calórico.

Sendo um subproduto ou resíduo de um processo, existem muitas vantagens em utilizar o hidrogênio como combustível para vários fins, como neste trabalho foi reduzir o custo com outro combustível fóssil substituindo por hidrogênio diminuindo assim os gases poluentes e aproveitando o hidrogênio que ficava armazenado.

Mesmo com normas rígidas e custos elevados hoje em dia se encontra no mercado vários protótipos de carros, ônibus motos, entre outros movidos a hidrogênio, isto é um grande passo da humanidade pois o hidrogênio poderá tornar o primeiro sistema energético democrático da história. O hidrogênio pode acabar com a dependência do petróleo, reduzir a emissão de dióxido de carbono e o aquecimento global, além de apaziguar guerras políticas e religiosas.

Ainda se sabe pouco sobre o hidrogênio como combustível, mais deve-se procurar alternativas de energia, pois o petróleo terá fim, a biomassa muitas vezes é utilizada fora de norma desmatando florestas, sendo assim o hidrogênio tem se destacado cada vez mais e ganhado espaço na área automobilística, industrial e equipamentos e locais que necessitam de energia limpa e inesgotável.

## REFERENCIAS

PERA, Hildo. **Geradores de vapor de água**. São Paulo: Escola Politécnica de São Paulo: 1982

RIFKIN, Jeremy. **A economia do hidrogênio**. São Paulo: M. Books do Brasil 2003.

STEVÃO, Tânia Esmeralda Rodrigues. **O hidrogênio como combustível**. [2008]. 89 f. Disponível em: <<http://www.rcaap.pt/detail.jsp?id=oai:repositorio-aberto.up.pt:10216/58102/>>. Acesso em: 02 março. 2015.

SILVA, Juliana Cintra da. **Análise do impacto ambiental do processo de produção do hidrogênio**. [2008]. 95 f. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000382724/>>. Acesso em: 02 março. 2015.

CONAMA, Conselho Nacional do meio ambiente; **Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas**. [2006]. 37 f. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res38206.pdf>>. Acesso em: 17 jun. 2015.

ESPINOLA, Michel Osvaldo Galeano. **Análise técnica e econômica da produção de hidrogênio eletrolítico no Paraguai**. [2013]. 124 f. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000917507&opt=4>>. Acesso em: 02 março. 2015.

PRODUQUIMICA. **Combustível Hidrogênio**, 2015. Disponível em <<http://www.produquimica.com.br/>>. Acesso em 20 abril 2015.

AMBIENTE BRASIL. **Fontes de hidrogênio**, 2015. Disponível em <[http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/celula\\_combustivel/fontes\\_de\\_hidrogenio.htm](http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/celula_combustivel/fontes_de_hidrogenio.htm)>. Acesso em 14 set. 2015.

HOFFMANN, Emilio Gomes Neto – **Hidrogênio, Evoluir sem Poluir: a era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível**. Curitiba: BRASIL H2 FUEL CELL EVERGY, 2005. 240p., il.

ALMEIDA, A. T. e MOURA, P. S. **Hidrogênio e células de combustível**. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, *Gazeta da Física*, p51-55, 2005.

BRAGA, L. B. **Análise Econômica do uso de célula a combustível para acionamento de ônibus urbano**. 2010. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Energia, Unesp, Guaratinguetá, 2010.

CARNIELETTO, R. **Aproveitamento de Energia Vertida Turbinável para Produção de Hidrogênio e Geração Distribuída**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Santa Maria, 174p, 2011.

SOUSA, Vadson W. B. OUSA. **Seminário de Físico Químico 2009**. Disponível em: <[http://www.quimica.ufpb.br/monitoria/ Disciplinas/termodinamica2/material/M5\\_Eletrolise\\_d e\\_salmoura\\_-\\_VADSON%20W.%20B.%20DE%20SOUSA.pdf](http://www.quimica.ufpb.br/monitoria/ Disciplinas/termodinamica2/material/M5_Eletrolise_d e_salmoura_-_VADSON%20W.%20B.%20DE%20SOUSA.pdf)> Acesso em: 20 Maio. 2015

GANDRA, Alana. AGENCIA BRASIL. **Custo médio de energia elétrica para indústria 2015**. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2014-12/custo-medio-da-energia-para-industria-sobe-23-no-ano>> Acesso 10 Outubro 2015.

GUEDES, Luis Carlos Vieira. **Geração e distribuição de vapor**. 2010 (Apostila de curso da faculdade de engenharia mecânica, UNIS-MG).

STEAMMASTER. Caldeiras e Equipamentos térmicos, 2015. Disponível em <<http://www.caldeiras.com>>. Acesso em 20 abril 2015.