



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**Laboratório de Hidrogênio - Departamento de Física Aplicada**  
**Instituto de Física “Gleb Wataghin”**

## **Sistema de Geração de Energia Elétrica através de Células a Combustível Operando com Hidrogênio obtido da Reforma do Etanol**

### **Introdução**

Há atualmente em todo o mundo um grande esforço e uma enorme expectativa quanto ao uso das células a combustível em diversos sistemas energéticos, estacionários ou móveis. A tecnologia de fabricação destes equipamentos já deixou os laboratórios dos centros de pesquisa e está agora sendo desenvolvida por empresas, a maioria grandes multinacionais, com vultosos investimentos financeiros.

As células funcionam através de uma reação eletroquímica, convertendo a energia química do combustível em eletricidade sem partes móveis nem ruídos. O combustível mais utilizado nas células de combustível é o hidrogênio, que pode ser gerado por meio de um grande número de processos artificiais envolvendo diversas fontes.

Dentre as várias alternativas de produção de hidrogênio para as células a combustível, o uso do etanol da cana-de-açúcar é uma opção extremamente interessante para o Brasil e para o Estado de São Paulo, considerando-se as quantidades deste produto anualmente disponível e o potencial de ampliação desta produção. Estes sistemas de geração de energia elétrica constituem-se em uma alternativa com reduzidos impactos ambientais para uso em geração distribuída, agregando vantagens como baixíssima emissão de ruídos e praticamente nenhuma emissão de poluentes, além de representar também uma alternativa para aplicações móveis (veículos).

No Brasil o parque gerador nacional apresenta o predomínio da geração hidráulica de energia elétrica. De fato, a participação hidroelétrica na capacidade instalada brasileira evoluiu de 84% (8,7 GW) em 1970, para 91% (56,0 GW) em 1998, ficando a geração térmica e nuclear responsável pelos 9% restantes. Assim, fica evidente o contexto distinto da situação brasileira em relação a outros países, pois aqui os combustíveis fósseis

ocupam uma posição coadjuvante na geração de energia elétrica, que deverá ser um pouco alterada nos próximos anos com a introdução progressiva do gás natural importado. De qualquer forma, o uso desta fonte de energia, a hidráulica, deverá continuar a ser expressivo, o que por outro lado denota pouca variedade no uso das fontes de energia, ficando-se sujeito assim a problemas de abastecimento quando ocorrem baixos índices pluviométricos.

Com relação ao Setor Elétrico Brasileiro - SEB, com as recentes privatizações das empresas e a reestruturação do setor vêm-se buscando estabelecer na geração e comercialização de energia elétrica a livre concorrência, abrindo espaço para a participação da iniciativa privada. Os sistemas de transmissão e distribuição têm permitido o livre acesso tanto de consumidores como de geradores. Como consequência deste processo, os agentes do setor (empresas elétricas, órgãos financiadores, os grandes consumidores e os fabricantes de equipamentos) tiveram que redefinir as suas estratégias, para explorarem as oportunidades e evitarem os riscos envolvidos. A crise de abastecimento de 2001 evidenciou a necessidade de planejamento e de investimentos estratégicos de todo o setor.

Percebe-se claramente aqui a questão das novas tecnologias como os sistemas com células a combustível, que podem representar importantes oportunidades de negócio, mas seus riscos devem ser muito bem avaliados. Estes aspectos diferem bastante da estrutura centralizada anterior, estatal, onde tanto a exploração de novas oportunidades como as avaliações de risco não representavam questões fundamentais para as empresas públicas. Neste quadro, o surgimento de tecnologias competitivas, que permitem a geração ou uma nova forma de armazenar eletricidade em quantidades adequadas aos consumidores de pequeno porte (geração distribuída), poderá ter um grande impacto sobre a estrutura de geração de energia elétrica.

A opção por tecnologias mais eficientes, com intuito de aumentar a competitividade dos novos agentes produtores e distribuidores de energia neste novo cenário, poderá impulsionar a introdução de novos combustíveis (diversificação de fontes) e novas tecnologias para a geração de energia elétrica. Assim sendo, torna-se fundamental o desenvolvimento das novas alternativas de geração de eletricidade e a análise das reais possibilidades de cada uma no cenário nacional.

## **Experiência Anterior da UNICAMP**

A UNICAMP vem a alguns anos desenvolvendo pesquisas na área de reformadores de combustíveis para a geração de hidrogênio a ser utilizado em células a combustível, com destaque para a reforma do etanol, tanto para aplicações estacionárias como veiculares, através de diversas unidades.

O Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético - NIPE tem realizado projetos envolvendo estudos sobre os impactos desta nova tecnologia na matriz energética nacional, estadual (SP) e municipal (São Paulo), através de diversos projetos com apoio institucional (FAPESP, MME, FINEP) e de empresas (PETROBRAS). O Laboratório de Hidrogênio do Instituto de Física da UNICAMP - LH2 vem desenvolvendo a tecnologia dos reformadores, possuindo um dos melhores e mais equipados laboratórios de análise de gases do país, contando também com apoios institucionais e de empresas (COPERSUCAR, OXITENO). O CENEH - Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio – tem contribuído de forma expressiva para a formulação de um programa nacional de Pesquisa e Desenvolvimento - P&D – em células a combustível (ProCaC – Programa Brasileiro de Células a Combustível, em implantação no âmbito do Ministério da Ciência e Tecnologia e do CTENERG – Secretaria Técnica do Fundo Setorial de Energia), contando hoje com um banco de dados sobre grupos de P&D atuando nestas áreas no Brasil e no exterior. No âmbito da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp - FEM, através do Programa de Pós-Graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos, tem sido realizado estudos em nível de mestrado e doutorado envolvendo esta tecnologia.



***Sistema de análise de gases do Laboratório de Hidrogênio da UNICAMP.***

## O Projeto

Este projeto busca desenvolver a alternativa do uso do etanol obtido a partir da cana de açúcar para a produção de energia elétrica, através do projeto (termodinâmico e técnico), construção e testes de um sistema integrado constituído de um gerador de hidrogênio utilizando o processo da reforma do etanol, de uma unidade de purificação deste gás, de uma célula a combustível alimentada com este hidrogênio e de um inversor de corrente CC/CA. Os dados obtidos com a operação deste sistema permitirão uma análise objetiva dos custos envolvidos e as reais possibilidades desta tecnologia no setor elétrico nacional, identificando-se os atuais nichos de mercado e os requisitos necessários para uma maior penetração destes sistemas, conhecidos por suas grandes vantagens ambientais.

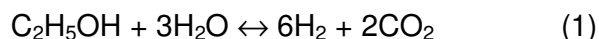


***Protótipo Semi-Industrial desenvolvido no Laboratório de Hidrogênio para reforma-vapor do etanol.***

## O Processo de Reforma

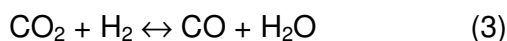
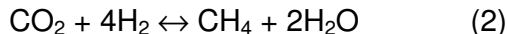
Um dos processos de produção de hidrogênio envolve a reforma de etanol ( $C_2H_5OH$  - álcool), que consiste em fazer reagir-lo com água em forma de vapor. O álcool é solúvel em água e as duas substâncias não reagem em condições ambientes, por isso são necessários alta temperatura (reação endotérmica) e catalisadores para que estes reagentes atinjam o complexo ativo.

Na reforma do etanol, ocorrem as seguintes reações:

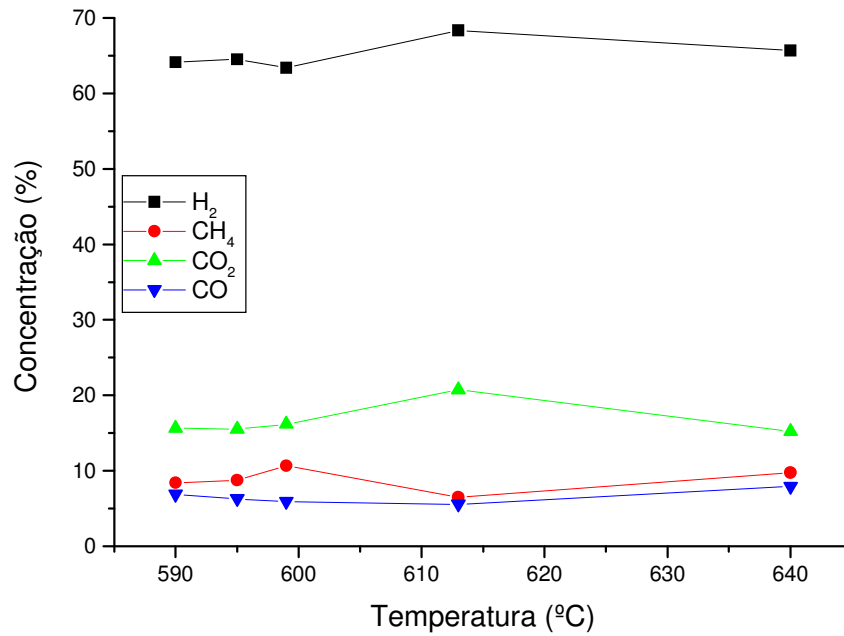


O conjunto catalítico utilizado no projeto é composto de níquel e cobre, suportados em alumina ( $\gamma-Al_2O_3$ ) e a temperatura em que a reação se processa melhor é de  $600^\circ C$ .

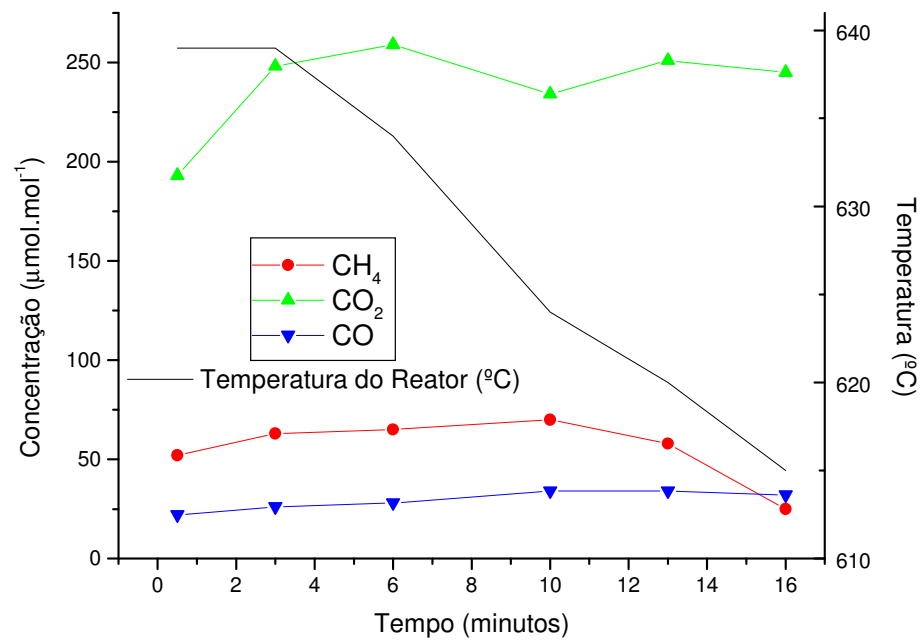
Após a formação de  $H_2$  e  $CO_2$ , os dois produtos começam a reagir entre si e formam metano ( $CH_4$ ) e monóxido de carbono ( $CO$ ) de acordo com as seguintes equações que representam a reversibilidade das reações:



Do reator sai uma mistura de gases chamada gás de síntese, composto pelos gases  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  e  $CO$ . O Hidrogênio é a substância mais importante na reforma do etanol, pois ele será utilizado em células a combustível, por isso é necessário que ele seja purificado pela remoção do  $CO_2$  e de produtos gerados nas reações 2 e 3, principalmente o monóxido de carbono, que é altamente tóxico. Para isso, a mistura passa por duas colunas de purificação que contém materiais que interagem com os gases oriundos da reação. Estes gases ficam retidos na superfície do material e o gás que sai das colunas apresenta uma pureza adequada à célula a combustível. Os gráficos abaixo mostram os teores dos gases oriundos da reforma-vapor de etanol.



**Distribuição dos teores dos produtos da reforma-vapor do etanol.**



**Concentração dos produtos após purificação.**

Os produtos hidrogênio e dióxido de carbono são constantemente removidos do sistema, sendo coletados para análise ou eliminados para a atmosfera. Também são feitas adições constantes de água e álcool no reator do reformador. Isto impede que o equilíbrio da reação 1 seja estabelecido e desta forma há produção contínua de  $H_2$  e  $CO_2$ . Quando se iniciam as reações 2 e 3, seus equilíbrios também são deslocados com a remoção de  $H_2$  e  $CO_2$ , de modo a aumentar a produção destas substâncias.

### **As Células a Combustível**

As células a combustível podem ser definidas como dispositivos eletroquímicos em que a energia química de um combustível é convertida em eletricidade em corrente contínua (C.C.) de baixa tensão. Seu princípio de funcionamento consiste em converter a energia da oxidação isotérmica do combustível em trabalho elétrico.

O combustível mais utilizado nas células de combustível é o hidrogênio, que pode ser gerado por meio de um grande número de processos artificiais envolvendo diversas fontes primárias, tais como carvão, petróleo, gás natural, pela eletrólise da água com a energia elétrica vinda da energia solar, hidráulica, eólica, nuclear; pela decomposição orgânica e a produção termoquímica solar.

Nestes tipos de células o hidrogênio é introduzido no ânodo, onde o catalisador que recobre o eletrodo quebra a molécula do hidrogênio, sendo seus elétrons capturados pelo eletrodo, deixando o hidrogênio na forma de um íon positivo (próton). Nas células alcalinas, por exemplo, estes íons passam para o eletrólito, enquanto no cátodo eles se combinam com íons hidroxila formados conjuntamente pelo oxigênio introduzido no cátodo, pela água do eletrólito e pela captura de elétrons deste eletrodo, resultando na formação de água e na liberação de calor. Criada esta diferença de potencial entre os eletrodos, os elétrons, incapazes de passar pelo eletrólito, deslocam-se pelo circuito externo, criando uma corrente elétrica contínua.

Há vários tipos de células de combustível sendo desenvolvidas. Sua classificação dá-se normalmente pelo tipo de eletrólito nas quais operam sendo as principais tecnologias atualmente em desenvolvimento e em utilização são:

- ✓ **AFC** – Célula de combustível do tipo alcalino (*Alkaline Fuel Cell*);
- ✓ **MCFC** – Célula de combustível do tipo carbonato fundido (*Molten Carbonate Fuel Cell*);
- ✓ **PAFC** – Célula de combustível do tipo ácido fosfórico (*Phosphoric Acid Fuel Cell*);
- ✓ **PEMFC** – Célula de combustível do tipo de membrana de troca de prótons (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*);
- ✓ **SOFC** – Célula de combustível do tipo óxido sólido (*Solid Oxid Fuel Cell*);
- ✓ **DMFC** – Célula de Combustível tipo metanol direto (*Direct Metanol Fuel Cell*).

Células de combustível tipo AFC, PEMFC e PAFC operam somente com hidrogênio puro, enquanto outras MCFC e SOFC podem utilizar além do hidrogênio o gás carbônico (CO<sub>2</sub>). Também diferem por sua temperatura de operação, o tipo de eletrólito que utilizam e pressão de trabalho, como mostrado na tabela a seguir.

**Comparação entre as principais células de combustível.**

	<b>PEMFC</b>	<b>PAFC</b>	<b>MCFC</b>	<b>SOFC</b>
<i>Eletrólito</i>	<i>Membrana de troca de prótons</i>	<i>Ácido fosfórico</i>	<i>Carbonato fundido</i>	<i>Óxido sólido cerâmico</i>
<i>Temp. Operação</i>	<i>80 °C</i>	<i>Cerca de 200 °C</i>	<i>650 °C</i>	<i>800 – 1.000 °C</i>
<i>Transportador de carga</i>	<i>Íon de hidrogênio</i>	<i>Íon de hidrogênio</i>	<i>Íon de carbonato</i>	<i>Íon de oxigênio</i>
<i>Reformador</i>	<i>Externo</i>	<i>Externo</i>	<i>Interno ou externo</i>	<i>Interno ou externo</i>
<i>Componentes primários da célula</i>	<i>Baseados em carbono</i>	<i>Baseados em grafite</i>	<i>Aço inoxidável</i>	<i>Cerâmicos</i>
<i>Catalisador</i>	<i>Platina</i>	<i>Platina</i>	<i>Níquel</i>	<i>Perovskites (Titanato de cálcio)</i>
<i>Eficiência (%)</i>	<i>40 a 50</i>	<i>40 a 50</i>	<i>&gt; 60</i>	<i>&gt; 60</i>
<i>Estágio de desenvolvimento</i>	<i>Sistemas em demonstração de até 50 kW; unidades de 250 kW esperadas dentro de poucos anos.</i>	<i>Sistemas comerciais operando, a maioria deles de 200 kW e um modelo de 11MW tem sido testado.</i>	<i>Sistemas em demonstração de até 2 MW</i>	<i>Unidades de até 100 kW tem sido demonstradas.</i>

As células a combustível foram originalmente desenvolvidas para o uso espacial. Logo se viu o grande potencial de sua utilização em aplicações terrestres dadas suas características de alta eficiência e pouca ou nenhuma poluição. Assim, podem-se destacar dois grandes campos de aplicação para esta tecnologia: aplicações estacionárias (médio, pequeno e portátil) e automotivas.

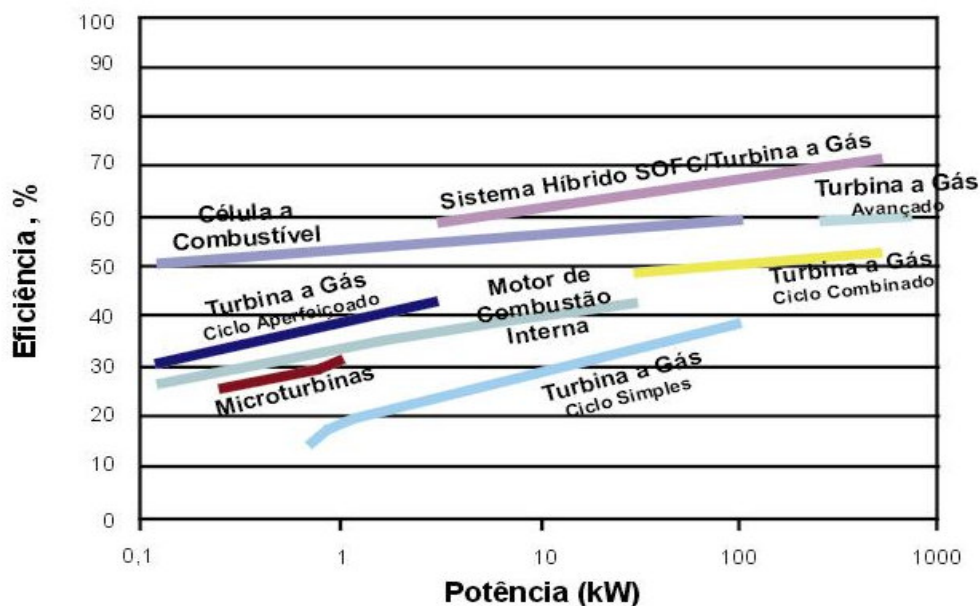
Nas aplicações estacionárias, as células a combustível já começam a substituir as tradicionais turbinas e motores de combustão interna. Para isso todas as tecnologias de células são indicadas, já que limitações de peso, volume e fonte para a extração de hidrogênio não são fatores cruciais. Especial atenção está sendo dada às células tipo carbonato fundido e óxido sólido, uma vez que operam em altas temperaturas o que as capacitam a reformar o combustível internamente (geralmente o gás natural), dispensar o uso de catalisadores de metal nobre e usar o calor para cogeração.

Embora as células de combustível não sejam máquinas térmicas, significantes quantidades de calor são produzidas em um sistema de grande porte, que pode ser usado para produzir vapor, água quente ou fria, ar quente ou frio, ou serem convertidas em eletricidade por uma turbina a gás ou a vapor, ou ainda uma combinação entre elas, o que corresponde a uma variedade de formas de cogeração, incrementando o rendimento global destes sistemas. As mais apropriadas para este fim são as PAFC, MCFC e SOFC, sendo que a primeira trabalha com temperaturas entre 180 e 210 °C, a segunda entre 650 e 700 °C e a terceira entre 900 e 1100 °C.

Apesar de ser uma tecnologia nova, estudos indicam que células tipo MCFC e PAFC podem apresentar rendimentos superiores às tradicionais formas de geração de energia elétrica. Unidades de geração com potência de alguns megawatts com estas tecnologias já estão sendo testadas.

Comparadas com plantas de cogeração convencionais, as plantas de cogeração com células de combustível emitem níveis mais baixos de NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub>, e atingem eficiências de aproximadamente 83%, que podem ser obtidas através da utilização do calor residual.

O gráfico abaixo compara a eficiência de conversão de tecnologias tradicionais de geração com células a combustível, no qual percebe-se um grande rendimento deste tipo de tecnologia o que significa na prática que mais energia pode ser retirada do combustível aliviando a pressão sobre os recursos naturais não renováveis como o petróleo e o carvão.



**Comparação da eficiência de conversão de tecnologias tradicionais de geração com células a combustível.**

Outro grande campo de aplicação e também um novo negócio principalmente para as distribuidoras de energia é a geração distribuída de energia elétrica. Unidades modulares são colocadas junto ao consumidor descentralizando a produção de energia. Nesse campo de aplicação as células a combustível apresentam muitas vantagens.



Foto de uma unidade de geração estacionária com células a combustível de carbonato fundido de 2 MW em Santa Clara – Califórnia – EUA.

Uma característica interessante das células a combustível é que sua eficiência de conversão é grande mesmo em unidades muito pequenas. Isto abre outro vasto campo de aplicação que são equipamentos portáteis como laptops e telefone celulares.



Foto de Laptop alimentado por uma célula a combustível tipo PEMFC.

Nas aplicações automotivas o motor a explosão é substituído por um motor elétrico que é alimentado com eletricidade produzida pelas células a combustível. Além de essa combinação ser mais eficiente, a emissão pode ser zero se o veículo utilizar o hidrogênio sem reforma. Nesse caso o tipo mais indicado são as células com eletrólito sólido (membrana de troca de prótons - PEMFC), pois operam em baixas temperaturas e possuem partida rápida. Grandes montadoras de veículos já lançaram seus protótipos e alguns deles, como alguns ônibus, já circulam em algumas cidades dos Estados Unidos e Europa.

	<p><b>Veículo: FCHV-3</b>  <b>Marca:</b> Toyota  <b>Combustível:</b> hidrogênio  <b>Célula a combustível:</b> PEMFC  <b>Motor:</b> magneto permanente sincronizado 90 kW  <b>Velocidade/autonomia:</b> 150 km/h – 300 km  <b>Lançamento:</b> 27/02/2001  <b>Fonte:</b> TOYOTA</p>
	<p><b>Veículo: Premacy FC-EV</b>  <b>Marca:</b> Mazda  <b>Peso:</b> 1850 kg  <b>Combustível:</b> metanol  <b>Célula a combustível:</b> PEMFC /reformador metanol  <b>Motor:</b> elétrico de indução CA – 65 kW  <b>Lançamento:</b> 13/02/2001  <b>Fonte:</b> MAZDA</p>
	<p><b>Veículo: NECAR 5</b>  <b>Marca:</b> Mercedes Benz  <b>Combustível:</b> metanol  <b>Célula a combustível:</b> PEMFC /reformador metanol  <b>Lançamento:</b> 07/11/2001  <b>Fonte:</b> DAIMLERCHRYSLER</p>

Veículos movidos com células a combustível.

A célula de combustível do tipo ácido fosfórico (PAFC) é a mais madura tecnologia das cinco e a única oferecida comercialmente em unidades de capacidade de até 250 kW. No Mundo, 12 empresas as estão vendendo ou desenvolvendo. Muitas dessas unidades ultrapassaram 40.000 horas de operação em serviço. O Brasil já possui esse tipo de unidade funcionando na cidade de Curitiba, Paraná. São três unidades de 200 kW que convertem gás natural em energia elétrica com eficiência próxima a 40%.



Célula a combustível instalada em Curitiba – PR.

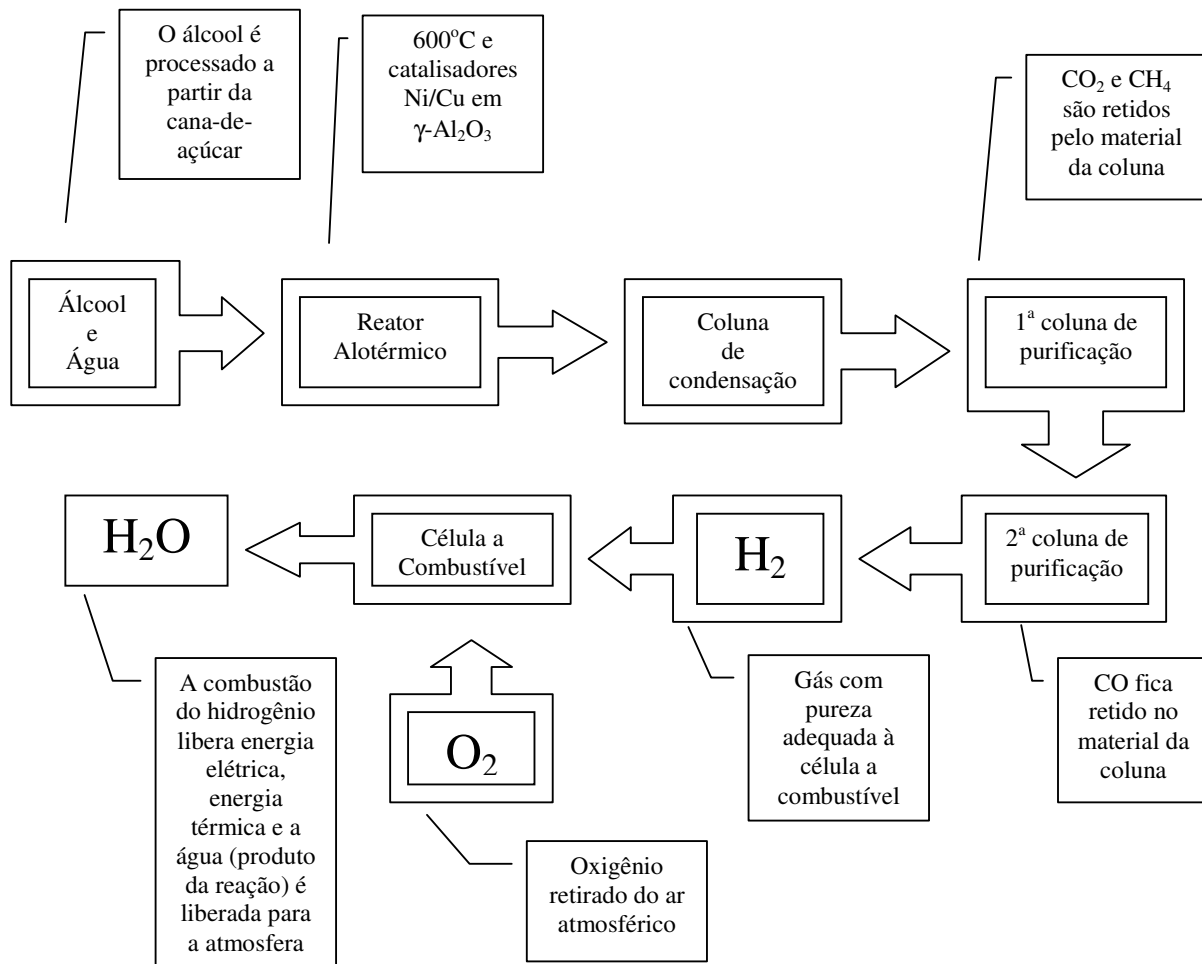
No entanto, a tecnologia das células de ácido fosfórico estacionou seu custo em US\$ 4.000/kW – cerca de três vezes mais do valor que se acredita ser necessário para as células serem competitivas (US\$ 1.500/kW). Este fato tem impulsionado muitas empresas para o desenvolvimento das células de combustível tipo MCFC e SOFC. São dois tipos de célula que não precisam de catalisadores especiais como a platina, pois operam em temperaturas elevadas. Há cerca de 40 empresas no mundo atualmente desenvolvendo células do tipo SOFC, sendo a maior delas a Siemens-Westinghouse. A tecnologia PEMFC é liderada pela Ballard Generation Systems com unidades estacionárias de 250 kW e fornece unidades para veículos de montadoras como GM, Ford e Daimler-Chrysler; a tecnologia MCFC pela Energy Research Corporation (ERC) e a M-C Power Corporation. Empresas de produção e/ou distribuição de energia elétrica como Southern California Edison – EUA, Ontario Power Generation – Canadá, Delta-Montrose Electric Association – EUA, Toshiba Corporation – Japão já estão utilizando as células de combustível para gerar energia elétrica em grandes centros urbanos.

Grandes esforços têm sido empreendidos por pesquisadores no intuito de reduzir a quantidade de platina utilizada como catalisador, principalmente nas células de combustível tipo PEMFC. O suprimento mundial de platina é limitado e o metal está em demanda para muitas outras aplicações. Isto lança sérias dúvidas se será possível equipar toda a frota mundial de veículos com células tipo PEMFC.

A célula alcalina (AFC) é muito utilizada nas aplicações espaciais. Possui um elevado rendimento, de até 70%, mas o seu alto custo e outros problemas a têm excluído, por enquanto, de um mercado de células de combustível. As células que operam diretamente com metanol (DMFC) são uma das mais promissoras tecnologias principalmente para o setor de transporte, mas muitos problemas técnicos ainda precisam ser resolvidos.

Inúmeros estudos apontam a penetração das células a combustível no mercado de energia dentro de alguns anos, e todos os dias novas experiências e aplicações destes dispositivos são relatadas, tantos em revistas especializadas como de divulgação, e até mesmo na grande imprensa. Nesse sentido, faz-se necessário a mobilização da comunidade científica para projetos que investiguem estes sistemas e analisem o efetivo estado da arte desta tecnologia, determinando suas potencialidades no âmbito da realidade energética brasileira, contribuindo assim para que as melhores decisões possam ser tomadas no que se refere às propostas já colocadas sobre tal tecnologia, tanto por empresas como por instituições governamentais brasileiras.

## Fluxograma do Sistema de Geração e Uso do Hidrogênio a partir da reforma do etanol.



## **Equipe**

Prof. Dr. Ennio Peres da Silva (Coordenador)

Instituto de Física “Gleb Wataghin” – UNICAMP

Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético – NIPE

Dr. Newton Pimenta Neves Jr.

Instituto de Física “Gleb Wataghin” - UNICAMP

Msc. Edgar Antonio de Godoi Rodrigues Pinto

Instituto de Física “Gleb Wataghin” - UNICAMP

Msc. João Carlos Camargo (doutorando PSE)

e-mail: [joaoc@fem.unicamp.br](mailto:joaoc@fem.unicamp.br)

home page: [www.geocities.yahoo.com.br/joao\\_1967sc](http://www.geocities.yahoo.com.br/joao_1967sc)

Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP

Msc. Cristiano da Silva Pinto

Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio – CENEH

home page: [www.ifi.unicamp.br/ceneh](http://www.ifi.unicamp.br/ceneh)

Msc. Paulo Fabrício Palhavam Ferreira (doutorando PSE)

Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP

Físico Fernando Rezende Apolinário (mestrando)

Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP

Iaponira Rando Carolino (graduanda)

Faculdade de Engenharia Química - UNICAMP

Antonio José Marin Neto (graduando)

Instituto de Física “Gleb Wataghin” – UNICAMP

Miriam Camila Garcia de Lima

Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético – NIPE

## Apoio



Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio  
[www.ifi.unicamp.br/ceneh](http://www.ifi.unicamp.br/ceneh)

## Colaboração

