

# Células Combustíveis a Alumínio: uma reavaliação oportuna para o planejamento energético brasileiro

Francisco Carlos C. Schwab  
franciscoschwab@hotmail.com  
Faculdade de Engenharia da AEDB, Resende-RJ, Brasil

## RESUMO

*Mais de 70% do potencial hidroelétrico do Brasil – sua principal riqueza energética – encontra-se em regiões distantes dos grandes centros consumidores, que por sua vez já utilizam todo o potencial localmente disponível. Para assegurar o abastecimento e atender a demanda adicional para crescer, será necessário aproveitar o potencial remanescente. As células combustíveis, em especial as que utilizam Alumínio, podem ser uma forma de armazenar, transportar e aproveitar esta energia. Em função disso, seriam uma boa alternativa para substituir o petróleo atualmente consumido no sistema de transportes, com menos impacto ambiental e mais eficiência. O objetivo deste artigo é revisar alguns pontos básicos sobre esta tecnologia e situá-la no contexto brasileiro, como contribuição inicial para uma reavaliação e possível retomada em sua pesquisa e desenvolvimento no país.*

Palavras-Chave: Energia renovável. Células combustíveis. Alumínio. Energia para veículos.

## 1. INTRODUÇÃO

O aproveitamento das potencialidades do alumínio como fonte de energia em células combustíveis tem sido alvo de muitas pesquisas e desenvolvimento de protótipos desde os anos 60. Apesar de suas vantagens, alguns problemas tecnológicos ainda parecem persistir, levando a que novos tipos de células combustíveis, de desenvolvimento mais recente, ganhem preferência nas pesquisas internacionais.

Entretanto, se levarmos em conta algumas características específicas do Brasil, justifica-se uma reavaliação desta tecnologia, para utilizar o alumínio como armazenador e portador de energia renovável. Poderia ser uma alternativa estratégica interessante para o planejamento energético nacional, considerando os seguintes pontos principais:

- O maior potencial atual de energia limpa e renovável encontra-se muito distante dos grandes centros consumidores, necessitando normalmente extensas linhas de transmissão que oneram o empreendimento e aumentam a insegurança do sistema;
- Na região deste potencial energético existem vastas minas de bauxita, minério que justamente requer grande suprimento de energia elétrica para ser transformado em alumínio, metal considerado como “energia condensada”;
- Parte deste alumínio poderia ser usada como “portador de energia”, se utilizado em células combustíveis, e capaz de devolver sua energia através de reação química, mantendo-a armazenada para ser usada quando, onde e na quantidade necessária;
- Estas células poderiam ser excelente alternativa para substituir parte do petróleo consumido no sistema de transportes do país, com menos impactos e muito mais eficiência, particularmente para o transporte de cargas e transporte coletivo;

É fundamental identificar e explorar as alternativas que interessam ao país, mesmo em casos onde não tenha havido atratividade suficiente para os pesquisadores de outros países.

Neste momento de transição, pelo qual está passando a conjuntura energética mundial, pode existir uma janela de oportunidade insuspeitada, capaz de nos trazer perspectivas similares às do álcool combustível.

A conclusão deste artigo é sugerir como pertinente uma reavaliação científica, técnica e econômica mais detalhada das Células combustíveis a Alumínio, considerando que poderão se mostrar uma boa alternativa para aproveitamento das oportunidades e vantagens do contexto, no caso específico do Brasil.

## **2. UM MUNDO EM TRANSIÇÃO: SEUS DESAFIOS E RISCOS**

Todas as evidências indicam que o mundo já está passando por uma grande transformação na área de energia. Trata-se de um grande impacto, pois energia é como se fosse o sangue que circula nas veias da civilização atual, acarretando mudanças que deverão se definir ao longo das próximas duas décadas. Isto deverá ocorrer não só por problemas como o crescente custo do petróleo, ou pelas restrições quanto à poluição e os impactos ambientais, mas principalmente pela disponibilização de novas tecnologias. O momento atual reflete a grande tensão desta transição: há um formidável esforço de pesquisa e desenvolvimento de inúmeras possibilidades, com inovações surgindo a cada dia. Ao acompanhar as notícias do setor observa-se como as tecnologias se alternam na crista da onda, tão logo as novidades são divulgadas.

Devido ao ritmo de crescimento populacional combinado ao desenvolvimento econômico, a demanda por energia até 2015 já deverá ter crescido 50%, num período de apenas 10 anos (SIQUEIRA, 2004). A incorporação de grandes contingentes de populações à sociedade de consumo – como é o caso da China e da Índia – trará uma pressão ainda maior sobre as demandas energéticas e ambientais. Ainda estarão disponíveis grandes reservas de petróleo e carvão: os principais combustíveis da nossa época. Em função disso, é provável que os combustíveis fósseis ainda continuem como fonte principal nas próximas décadas, se bem que com predomínio cada vez maior do gás natural, mais limpo. Teremos também um período com grande participação das chamadas “tecnologias de transição”, como é o caso dos veículos híbridos que já começaram a ser comercializados. Entretanto, já se prevê o crescente predomínio das células combustíveis, à medida que as tecnologias forem evoluindo e se tornando mais competitivas.

As células combustíveis representam a tecnologia mais promissora a longo prazo, constituindo-se numa alternativa muito eficiente, flexível, limpa, e com impacto ambiental extremamente reduzido. Alguns tipos de células já se encontram bastante desenvolvidos, com modelos comerciais já em operação, enquanto que outros tipos – como Alumínio/Ar (Al/Ar) – ainda carecem aperfeiçoamentos em busca da competitividade. Segundo um relevante estudo de Lenssen (1996: 779) “a célula combustível poderá um dia ser considerada o chip de silício da economia do hidrogênio”, prevendo-se que esta nova era estará consolidada ao final do século XXI, quando captações de energias eólicas e solares deverão prover 90% do consumo mundial, gerando eletricidade e produzindo o portador de energia considerado ideal: o hidrogênio.

Nesta conjuntura de desafios e riscos, percebe-se uma oportunidade: que as Células combustíveis a Alumínio poderão se mostrar uma boa alternativa como “tecnologia de transição”, dentro do contexto nacional.

### 3. CÉLULAS COMBUSTÍVEIS: UM PANORAMA DE REFERÊNCIA

O nome “célula combustível” já é consagrado em nosso país, mas não é conceitualmente correto, pois se trata de uma tradução – deturpada ou simplificada – do termo “fuel cell”, que quer dizer “célula a combustível”. Este nome reflete o seu modo de funcionamento, pois é um dispositivo que produz energia elétrica através de um processo eletroquímico, a partir de um “combustível” que vai sendo alimentado numa “célula”. O nome faz distinção em relação às pilhas e baterias, pois estas precisam ser substituídas, recondicionadas ou recarregadas quando gastam toda a sua carga.

É importante observar que as células combustíveis se tornaram muito atraentes porque, até agora, as baterias não se mostraram capazes de atender adequadamente aos crescentes e variados requisitos para armazenagem e transporte de energia elétrica. As principais fontes alternativas de energia renovável e limpa têm como produto a geração de eletricidade, que é uma forma de energia com limitações técnicas para distribuição e armazenamento. Estes são justamente dois pontos fortes dos combustíveis fósseis, principalmente no caso do petróleo e seus derivados: são mais facilmente transportados, armazenados, distribuídos e utilizados. As células combustíveis resolvem estes problemas e ainda trazem diversas vantagens, cujas principais podemos resumir como sendo:

- Alta eficiência no aproveitamento do combustível, pelo menos o dobro da eficiência energética dos motores de combustão interna (MCI);
- Constituem uma tecnologia bem mais limpa, com baixo impacto ambiental;
- Operam com componentes quase exclusivamente eletro-eletrônicos, sem peças móveis, livre de atritos e desgastes, com alta confiabilidade e durabilidade;
- Geram energia na medida das necessidades, de maneira distribuída junto aos pontos de consumo, independentes dos grandes sistemas de distribuição;
- Podem utilizar uma grande variedade de combustíveis, desde os tradicionais como gás natural, até os renováveis como o nosso etanol da cana-de-açúcar.

A primeira célula combustível foi demonstrada por Sir William Grove em 1843, de princípio similar às células de ácido fosfórico atuais. A idéia em si não é nova, porém ficou sem viabilidade prática de aproveitamento, devido a dificuldades de materiais adequados e tecnologias de suporte. Além disso, levou desvantagem frente a outras tecnologias mais viáveis e acessíveis. Só recentemente, a partir da década de 70, começaram a serem usadas como fontes de energia, a partir das missões espaciais da NASA, que adotaram o tipo Alcalino, utilizando hidrogênio para gerar energia elétrica e liberando vapor d’água que também era aproveitado.

Desde então muitos avanços foram feitos com o lançamento de modelos comerciais de células, principalmente do tipo “membranas de troca” usando diretamente hidrogênio ou outros combustíveis capazes de desempenho similar. Entretanto, até o momento, nenhum tipo de célula nem novo combustível podem ser considerados tecnologia madura. A humanidade se encontra, efetivamente, numa era de transição, premida pela necessidade de buscar alternativas para a sua principal base energética: o petróleo.

Os pontos cruciais para viabilização das células combustíveis a hidrogênio são: (i) custo elevado e vida útil restrita, que precisa ser aumentada pelo menos 5 vezes para viabilizá-las; (ii) com as tecnologias atuais, se gasta 60% mais energia para produzir hidrogênio do que se obtém ao utilizá-lo nas células; (iii) a eletricidade gerada por estas células nos veículos é cara demais, sendo necessário reduzir em 10 vezes este custo para tornar o seu uso

economicamente viável. Isto para não falar em outras dificuldades, como infra-estrutura de abastecimento, atingir produção em grande escala, etc.

O setor de transporte é um dos que apresentam maiores desafios e também grandes oportunidades para novas tecnologias, com diversos modelos de células em estágio pré-comercial. Sabe-se que os veículos (e os meios de transporte em geral) são os maiores consumidores de combustíveis de petróleo e constituem grande fonte de emissão de gás carbônico, principal causador do aumento do efeito estufa.

Um desdobramento da atual fase de transição são os veículos chamados “híbridos”, ou seja, que apresentam uma combinação de diferentes tecnologias e/ou formas de energia, em busca de maior eficiência energética. Estes veículos híbridos são dotados de frenagem elétrica regenerativa, para recuperar parte da energia motriz original e armazená-la nas baterias para reutilização, atingindo assim uma alta eficiência global. Segundo um estudo do MIT, os veículos híbridos estão desenvolvendo uma supremacia que deverá perdurar até o ano 2020, ver: <http://fee.mit.edu/features/hydrogen.vehicles> . Um exemplo próximo de nós é o ônibus brasileiro da Eletra, com motorização diesel-elétrica e baterias, em circulação experimental na linha Centro-Barra da Tijuca, no Rio de Janeiro. Nos Estados Unidos, o primeiro híbrido vendido em massa foi o automóvel Honda Insight lançado em dezembro de 1999, com motorização gasolina/eletricidade, que atinge 30Km/litro. Outro exemplo atual é o automóvel híbrido Prius da Toyota, eleito o carro do ano nos Estados Unidos em 2004, cuja produção já atinge 30.000 veículos/mês e mesmo assim estava com fila de espera de 6 meses. Entretanto, há inúmeras outras tecnologias em gestação e testes, competindo pela supremacia, muitas tentando substituir o motor de combustão interna por célula combustível. Como por exemplo o Quark, carro-conceito apresentado pela Peugeot no Salão de Paris em 2004, com célula que utiliza hidrogênio comprimido e baterias de níquel-hidreto metálico. Estas informações podem ser acessadas em [www.portalve.com.br](http://www.portalve.com.br) bem como também em [www.babex.de/peugeot/quark.php](http://www.babex.de/peugeot/quark.php) .

A tecnologia ideal para veículos elétricos seria os chamados “puramente elétricos”, ou seja, tipo “plug-in” que usam apenas motor elétrico e baterias que são periodicamente ligadas em tomadas para recarregar, que permitem maximizar a eficiência energética. Uma tentativa que atingiu escala comercial foi feita pela General Motors-GM a partir de 1996, restrita à Califórnia, para atender exigências de uma nova legislação local. Foram produzidas mais de 1.000 unidades do EV1 (electrical vehicle 1) e arrendadas mediante contrato de leasing para usuários que se interessaram em participar do teste. Os carros eram não poluentes, silenciosos, bom desempenho, montagem mais simples e com poucas peças, manutenção fácil, e o custo de energia mostrou-se compensador. Considerando o preço médio atual da energia elétrica e da gasolina, um carro elétrico teria custo de combustível 2,6 vezes mais barato. Entretanto, as baterias eram um problema e continuam a ser ainda hoje. No caso do EV1 pesavam 750Kg, dobrando o peso total do carro, e mesmo assim só conseguiam reter energia suficiente para uma autonomia máxima de 145Km em estradas. Após alguns anos (3 a 4 anos) o conjunto de baterias tinha que ser substituído, gerando uma despesa tão elevada que tornaria o custo do ciclo de vida maior do que o dos carros com motor de combustão interna(MCI). A partir de 2002 a GM resolveu encerrar o teste, rompeu os contratos e recolheu todos os carros, que foram sucataados até o final de 2004. Houve forte reação por parte do público, questionando a decisão e tentando reverter a situação, acusando que o teste fora positivo mas que diminuiria os lucros da GM. Esta por sua vez, alegou que havia poucos clientes e que aquela tecnologia não tinha futuro. Isto deu origem a um polêmico documentário intitulado “Quem matou o carro elétrico”, atualmente disponível em locadoras de vídeo, ver <http://www.pluginamerica.com/wktec.shtml> ou [www.imagemfilmes.com.br](http://www.imagemfilmes.com.br) , ver trailer em <http://www.pbs.org/now/shows/223/index.html#here> .

Uma novidade surpreendente foi o lançamento pela GM de seu novo veículo elétrico, o carro-conceito Volt E-flex Electric Hybrid, realizado em Janeiro de 2007: Trata-se de um híbrido convencional, porém dotado de baterias com grande capacidade, possibilitando reabastecê-lo também como um plug-in. Divulgaram que este carro-conceito deverá ser comercializado em breve, assim que terminarem o desenvolvimento de uma nova bateria. Interessante ver o vídeo onde são mostradas as características deste veículo, disponível em <http://www.evworld.com/article.cfm?storyid=1166> , ver também [www.chevy-volt.net](http://www.chevy-volt.net) .



O presidente da GM, Bob Lutz, apresenta o veículo elétrico Chevrolet Volt na abertura do North American International Auto Show, em Detroit.

Até recentemente as células do tipo Metal/Ar não eram consideradas uma fonte viável de energia, porém grandes progressos tem sido alcançados. Neste caso o processo se baseia em aproveitar elétrons liberados na reação de oxidação do metal com oxigênio do ar, para gerar energia elétrica. Para alguns, estas células devem ser consideradas, mais propriamente, como “baterias”, sendo que outros as consideram “semicélulas”. O fato é que o anodo metálico é consumido ao longo da produção de energia: gera resíduos que precisam ser removidos e deve ser substituído periodicamente, ou seja, não se trata de apenas reabastecer combustível. Estas MAFC (Metal Air Fuel Cell) também não operam em circuito inverso, recebendo eletricidade para acumular energia, como seria ideal para recuperar a energia inercial na frenagem. Porém apresentam algumas vantagens atrativas e já tem seus nichos de mercado. É interessante analisar os resultados das MAFC porque as células Alumínio/Ar são deste tipo, basicamente com as mesmas dificuldades e barreiras.

Dentre as MAFC, as que tem tido mais sucesso comercial são as de Zinco, como, por exemplo, no automóvel apresentado pela eVionyx em parceria com o governo da Malásia, dotado de célula MAFC de Zinco e baterias Níquel-Zinco, cujo modelo de demonstração apresentou desempenho recorde: 1.000 Km num único percurso, sem reabastecer nem recarregar, com impacto ambiental mínimo. Ver: [www.inventqjaya.com](http://www.inventqjaya.com) .

Outro exemplo de sucesso com célula Zinco/Ar tem sido as demonstrações do ônibus totalmente elétrico realizadas em conjunto pelo fabricante do sistema de propulsão, a empresa israelense Electric Fuel Co., e a Agencia Federal de Transportes (FTA) dos Estados Unidos. Os primeiros testes foram em 1998 e em Janeiro de 2004 o protótipo foi aprovado para a última fase de benchmarking com os concorrentes restantes, que deve terminar este ano. Estas células Zinco/Ar se mostraram atrativas, mesmo tendo necessidade de serem retiradas do

veículo, e encaminhadas para serem recondiçionadas após cada ciclo, num processo bem mais trabalhoso do que simplesmente encher um tanque com combustível.



Ônibus elétrico com célula Zinco/Ar, em operação experimental no Arizona, EEUU, 2004.  
Ver Relatório dos testes - fase III [www.electric-fuel.com/evpro/Phase3.pdf](http://www.electric-fuel.com/evpro/Phase3.pdf)

O sistema fornece energia para um motor elétrico de 200hp com bons indicadores de desempenho, similares aos obtidos de células Alumínio/Ar já testadas, o que é um bom sinal.

#### 4. PORQUE CÉLULAS COMBUSTÍVEIS A ALUMÍNIO?

Há um interesse estratégico especial para o Brasil: o país possui um grande potencial hidroelétrico ainda sem utilização, justamente nas proximidades de vastas reservas de bauxita de boa qualidade, além de dominar o processamento e ser um dos maiores produtores mundiais de alumínio.

O alumínio reúne pelo menos três características básicas que o tornam muito atrativo: (i) é uma das espécies químicas mais abundantes e tem grande produção em muitas partes do mundo, (ii) seu preço é relativamente mais baixo do que outras alternativas, (iii) tem a mais alta capacidade de estocagem de energia por unidade de peso.

As células a Alumínio foram das primeiras a serem pesquisadas e muito conhecimento foi sedimentado. Já em 1960 Salomon Zaromb, trabalhando para a Philco Company - USA, fabricou o primeiro protótipo deste tipo de célula. Em 1992 a empresa Alupower, subsidiária da Alcan no Canadá (fabricante de alumínio) iniciou o desenvolvimento de um veículo elétrico com apoio da UQM([www.uqm.com](http://www.uqm.com)). O Eng<sup>o</sup> Steve Lapp coordenou a conversão de um Dodge Caravan para motorização elétrica, acionado por célula Alumínio/Ar e baterias, que rodou 300Km. O principal problema foi a rápida degradação da membrana de troca, uma tecnologia que então estava começando. A tecnologia também exigia uma liga de alumínio de alta pureza, de custo elevado. Este projeto foi descontinuado em 1994 quando a subsidiária foi vendida para a EnerTek.

Os diversos experimentos realizados mostraram algumas dificuldades, que parecem não ter sido satisfatoriamente resolvidas. Como consequência, as aplicações práticas e modelos comerciais tem sido escassos, podendo-se considerar que o único segmento onde as



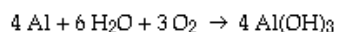
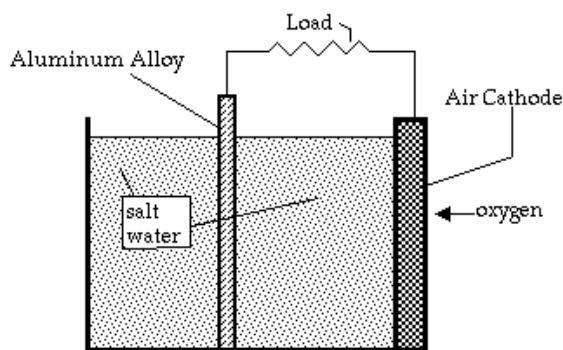
células Al/Ar se consolidaram são como fonte de energia para emergência ou reserva, em centrais telefônicas e instalações similares, bem como aplicações militares e de campo que exijam alta densidade de corrente elétrica.

Entretanto, o potencial e atratividade das células Al/Ar é tão grande que sua pesquisa nunca foi totalmente abandonada, e novos avanços tem sido constantemente registrados, apesar da forte concorrência de outras tecnologias.

#### 4.1 CARACTERÍSTICAS DAS CÉLULAS A ALUMÍNIO

Células Al/Ar não tem emissões gasosas, não desprendem vapor d'água como no caso do uso do Hidrogênio: o resíduo não tem impacto ambiental significativo e pode ser reciclado. Estudos indicam que sua eficiência energética global atinge cerca de 20% com a reciclagem do óxido de alumínio gerado, contra 13% dos motores de combustão interna (MCI). É um índice que pode ser superado por alguns outros tipos de células, mas é bem superior aos motores a explosão e combustíveis fósseis atuais, tomando como referência a eficiência global no ciclo de vida. Comparado com outros portadores de energia como gasolina, gás natural ou hidrogênio, o alumínio tem enormes vantagens como baixo peso, combinado com alta capacidade de armazenar energia, estabilidade numa faixa ampla de temperaturas. Como não é volátil, nem explosivo, não requer tanques nem transporte especial, pode ser armazenado sem nenhuma instalação ou dispositivo de segurança. Este é, atualmente, um dos pontos críticos no desenvolvimento de tecnologia para uso do Hidrogênio: ainda não há uma solução efetivamente satisfatória para estes aspectos.

Esquema e funcionamento de uma Célula Combustível a Alumínio:



Esquema básico de uma célula Alumínio/Ar:

Fonte: <http://129.93.84.115/Chemistry/DoChem/DoChem117.html>

Componentes de uma célula Alumínio/Ar:

- Anodo constituído por placa de alumínio (Alluminum Aloy)
- Catodo poroso ao Oxigênio do Ar (Air Cathode)
- Eletrólito líquido, neste caso solução aquosa de cloreto de sódio (Salt water)
- Carga elétrica produzida entre os polos (Load)

Cada quilo de alumínio consome 14kWh para ser produzido, na sua fabricação original a partir do óxido de alumínio, e parte desta energia pode ser devolvida numa célula Al/Ar, numa reação química inversa. Para isso, a capa de óxido que existe normalmente sobre a superfície do alumínio metálico precisa ser rompida, de modo que uma reação de oxidação se processe continuamente, e este é o papel do eletrólito, sendo o mais comumente usado uma solução de hidróxido de potássio.

A reação química completa produz uma voltagem bastante elevada:

	Reações parciais	Voltagem
Anodo	$\text{Al} + 4 \text{OH}^- \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_4^- + 3\text{e}^-$	-2.35
Catodo	$3/4 \text{O}_2 + 3/2 \text{H}_2\text{O} + 3\text{e}^- \rightarrow 3\text{OH}^-$	0.40
Global	$\text{Al} + 3/2 \text{HO} + 3/4 \text{O}_2 \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3$	2.75 V

Reações químicas e produção de energia numa Célula Al/Ar  
 Fonte: <http://www.powerstream.com> acessado em 07Jan2007

## 4.2 DESAFIOS TECNOLÓGICOS

É geralmente mais fácil levantar as descobertas e conquistas dos pesquisadores do que seus fracassos e frustrações, pois isto não costuma ser tão divulgado. Não é diferente no caso da célula Alumínio/Ar.

Há várias dificuldades, típicas do processo em si, que já foram ou estão sendo superadas. A primeira é o controle da reação, pois assim que o Al é colocado em contato com o eletrólito a reação começa, tornando a armazenagem destas células complicada e exigindo que anodo e eletrólito sejam separados.

O controle da reação de oxidação, de modo a modular o fluxo de energia é outro desafio que já recebeu inúmeras propostas de solução. No caso das células que usam combustíveis líquidos ou gasosos isto é simples, bastando controlar o fluxo do combustível. Mas no caso Al/Ar o anodo é sólido e mesmo as tentativas de pulverizá-lo não foram bem sucedidas. Uma possível solução é o controle do acesso do oxigênio, patenteada pela eVionyx.

A acumulação de uma geléia pelo hidróxido de alumínio formado é outro problema, pois se deposita na superfície do anodo bloqueando a reação, absorve líquido do eletrólito e obstrui a célula exigindo uma limpeza periódica. A solução mais comum é prover um sistema de recirculação do eletrólito e uma caixa separadora. Este é um problema que a Europositron alega ter resolvido satisfatoriamente.

A troca do anodo de alumínio gera diversas dificuldades, para garantir a vedação sem criar obstáculos à operação normal da célula. A Alupower tem patente de um sistema com cartucho que parece bem prático, pois torna a recarga mais simples sem requerer troca da célula.

Finalmente, segundo informação ao autor, dada pelo Dr. Harry Knickle da Universidade de Rhode Island, que fez avaliações em protótipos destas células, uma das maiores dificuldades é que a reação produz elétrons mas também desprende hidrogênio como reação secundária, dependendo das condições de operação. Segundo ele, é bastante problemático controlar esta reação secundária.

Uma verdadeira revolução está em andamento na área energética, estrategicamente fundamental para a moderna sociedade tecnológica. Muitas novas tecnologias disputam a



supremacia em diferentes aplicações e nichos de mercado. As células combustíveis do tipo Alumínio/Ar são uma possibilidade real e já encontram diversas aplicações comerciais.

#### 4.3 PERSPECTIVAS PARA AS CÉLULAS A ALUMÍNIO

Além da célula Al/Ar, diversas outras possibilidades tem sido testadas, algumas já com relativo sucesso, como: Al/peróxido de hidrogênio para veículos e equipamentos submarinos; Al/permanganato, entre outras. Também diversas combinações de ligas de Alumínio e adições no eletrólito tem sido experimentadas, principalmente para controlar a taxa da reação e a formação de geléia do resultante hidróxido de alumínio.

Dentre as novidades recentes e possibilidades que merecem atenção podemos destacar:

##### **Nova patente da Europositron**

Submetida em Jul/2004 pelo finlandês Rainer Partanen, constitui uma novidade importante em função da performance indicada pelo protótipo, porém ainda deverá ser desenvolvido um modelo para demonstração. Trata-se de uma nova bateria, que pode ser recarregada cerca de 3.000 ciclos, utilizando eletroquímica com base em nanotecnologia, com as seguintes características: densidade de energia 2100 Wh/litro ou 1330 Wh/Kg, opera bem entre  $-40^{\circ}\text{C}$  e  $+70^{\circ}\text{C}$ , vida esperada até 30 anos.

Para exemplificar suas vantagens, estima-se que um veículo elétrico como o EV1 da General Motors poderia usar uma bateria de 60Kg ou 40 litros com capacidade de 80kWh, suficiente para uma autonomia média de 780Km entre recargas. Entretanto, com as baterias usadas pela GM, o peso do carro aumenta de 816 para 1550Kg, com autonomia limitada a 145Km trafegando em estradas. Ver [www.europositron.com](http://www.europositron.com) acessado em 06/01/2005.

##### **Células para aplicações navais**

Num primeiro fornecimento para a marinha canadense em 1992, a célula Al/Ar da Alupower mostrou desempenho equivalente ao da célula a metanol da Ballard, ambas usando oxigênio líquido no catodo, porém depois outras possibilidades foram preferidas. Mais recentemente, em Agosto de 2004 a eVionyx ganhou duas etapas seguidas de uma concorrência para a marinha americana desenvolvendo uma célula Al/Ar com energia específica de 500Wh/Kg e altas densidades de corrente. É um grande mercado potencial.

##### **Aplicações em veículos**

Um artigo muito esclarecedor resume as pesquisas de YANG e KNICKLE. “Design and analysis of aluminum/air battery system for electric vehicles” (Projeto e análise de células Al/Ar para veículos elétricos). É apresentada uma avaliação do desempenho, descrição de todo o processo de produção de alumínio e uma avaliação global de custos, considerando todo o ciclo, com o reaproveitamento dos resíduos das células. Neste artigo foram relatados seu desempenho e as vantagens comparativas com outros tipos de baterias.

Durante a década de 90 houve uma grande busca por uma bateria que permitisse as montadoras oferecer um carro elétrico com desempenho e atratividade similar aos veículos tradicionais de motor a combustão interna, porém aparentemente sem sucesso. A grande novidade recente foi desenvolvida no MIT com base em tecnologia de nanofosfatos, que deu origem a empresa A123Systems para fabricar novas baterias do tipo lítio-ion de alta capacidade e baixo peso. A General Motors está contando com estas baterias para seu novo veículo VOLT e planeja realizar os primeiros testes no início de 2008, prevendo a comercialização do veículo até 2010. Ver [www.A123Systems.com](http://www.A123Systems.com)

Entretanto, o custo e questões de segurança ainda são obstáculos para baterias tipo lítio-ion. Por isso, outras montadoras ainda estão preferindo baterias tipo Níquel Hidreto, que tem custo menor, porém são mais volumosas e mais pesadas para uma capacidade de acumulação de energia equivalente. Aí poderia haver uma grande oportunidade para baterias de alumínio, algo que vale a pena ser verificado em profundidade, pelo interesse que representa para o nosso país, como será mostrado no item 5 abaixo.

### Baterias para equipamentos fixos e portáteis

Para equipamentos fixos, como baterias de emergência ou de reserva já se usa células Al/Ar, consagradas como uma boa alternativa, com modelos comerciais disponíveis, tais como os oferecidos pela Alupower, Fuel Cell Technologies, Yardley e outras. Também são a melhor alternativa para equipamentos portáteis especiais que exigem alta densidade de corrente elétrica, como em aplicações militares e outras.

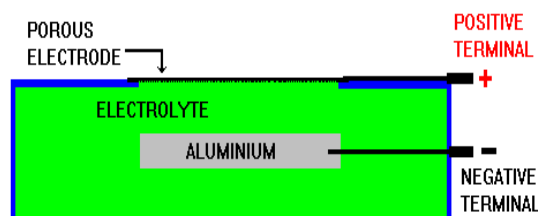


*2.85 kWh  
Man Portable  
Aluminum-Air Fuel Cell  
Power Systems*

Bateria comercial Al/Ar de alta capacidade, ver [http://www.yardney.com/alu\\_power/index.html](http://www.yardney.com/alu_power/index.html)

Entretanto, há ainda um grande potencial de aplicações para células Al/Ar em baterias para portáteis, como computadores, telefones celulares e inúmeros outros equipamentos similares, como mostraram protótipos como da Alupower, patenteado em Março de 2002. Teoricamente, as baterias Al/ar são consideradas ideais para portabilidade, pois sua energia específica teórica alcança 8100 Wh/Kg, ou seja, muita energia em pouco peso.

A constituição esquemática de uma bateria Alumínio/Ar é a seguinte:



Fonte: <http://www.ectechinc.co.uk/alumair.html>

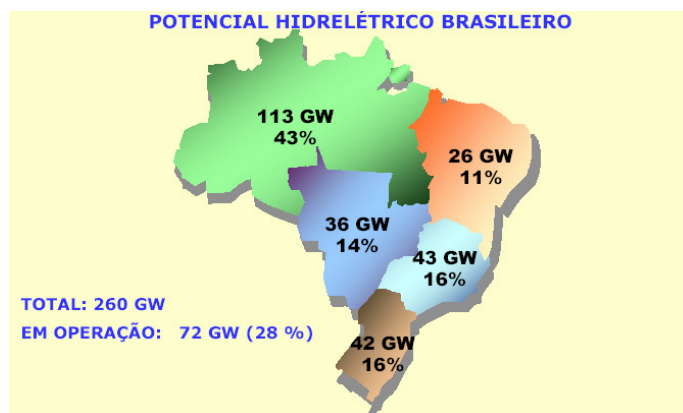
Recentemente este mercado vem sendo dominado pelas baterias de Lítio-ion, que tiveram um grande desenvolvimento. Entretanto, estas baterias geram um calor considerável durante sua operação e há vários casos de problemas com explosões e incêndio em computadores portáteis, telefones celulares e outros eletrônicos portáteis, lançando uma grande dúvida quanto a sua segurança. Elas são muito sensíveis tanto ao carregamento rápido quanto à demanda por descargas fortes de energia em curtos espaços de tempo.

O consumo global de baterias representou US\$ 48 bilhões em 2003, incluindo 110 milhões de baterias chumbo-ácido para reposição em cerca de 80% dos veículos existentes. Este mercado deverá atingir 65 bilhões até 2008 e, com o crescimento acelerado dos veículos elétricos, tornou-se ávido de novas soluções.

As fortes demandas do mercado e os desenvolvimentos de pesquisas recentes determinarão, nos próximos poucos anos, o futuro das células Al/Ar. Há reais possibilidades de que se consolidem – pelo menos – como a melhor alternativa para algumas aplicações específicas, podendo representar um papel auxiliar na transição para a Economia do Hidrogênio.

## 5. OPORTUNIDADES NO CONTEXTO ENERGÉTICO BRASILEIRO

A proposição deste artigo, a ser avaliada em mais detalhe, é estudar o aproveitamento do alumínio – como portador de energia – para auxiliar no aproveitamento do potencial brasileiro ainda não utilizado, que se concentra na Amazônia e Centro-oeste. A distribuição atual é a seguinte:



Fonte: CEPEL, Nov. 2004.

Até o momento, apenas cerca de 28% do potencial eletrohidráulico brasileiro foi aproveitado, e encontra-se praticamente esgotado nas regiões Sul e Sudeste, justamente as mais desenvolvidas e demandadoras de energia. O aproveitamento de, pelo menos, parte do potencial restante, se feito em grande escala, não teria justificativa econômica face aos consumos tradicionais, principalmente das regiões circunvizinhas. Entretanto, poderia ser utilizado como energia para o sistema de transporte do país, através de um portador como o alumínio e veículos elétricos, sem necessidade de grandes e custosas linhas de transmissão e distribuição.

Estas extensas linhas de transmissão são um aspecto relevante para o aproveitamento da hidroeletricidade a grandes distâncias. A confiabilidade e qualidade do suprimento de energia são hoje fatores essenciais para grande parte dos consumidores. A medida que a distância aumenta, passando por regiões nas mais diversas condições, perde-se bastante nestes dois fatores. Também é grande o impacto ao meio ambiente, nos ecossistemas por onde passam estas linhas, aumentando com sua extensão e com as necessidades de duplicação e vias de acesso para manutenção. Além disso, há que considerar as perdas de energia por efeito Joule,

que são proporcionais ao comprimento do condutor. Para avaliar as implicações deste efeito basta lembrar toda a tecnologia que precisou ser desenvolvida quando da construção da hidroelétrica de Itaipú e que foi considerada como tendo alcançado o limite de viabilidade técnico-econômica.

Em relação ao alumínio, por coincidência, já existem grandes minas de bauxita de ótima qualidade na região, minério que poderia ser usado para produção de alumínio (eletrometalurgia). É o que a Albrás (Barcarena-PA) e Alumar (S. Luis-MA) já estão fazendo, e com grandes ampliações de capacidade produtiva, colocando-as entre as maiores operações integradas (do minério ao metal) a nível mundial.

Projetos de novas hidroelétricas, como Belo Monte p.ex., têm estimativa de custo de produção da ordem de US\$0,012/kW, um dos mais baixos do mundo, o que aumenta a atratividade de novos empreendimentos eletro-intensivos. A previsão é de que deverá estar em operação a partir de 2012. Entretanto, a necessidade de linhas de transmissão onera muito os investimentos, causa perda de energia considerável por efeito Joule e aumenta o impacto ambiental do empreendimento.

Para dar idéia da dimensão e das implicações destas linhas de transmissão basta observar uma representação gráfica, mostrando a sua localização geográfica e extensão:



Fonte: CEPEL, Nov. 2004.

Considerando toda esta conjuntura, há casos como o da Islândia, que está desenvolvendo estudos e empreendimentos com a idéia similar de “exportar energia”, sendo a produção massiva de alumínio a estratégia principal, com a possibilidade de também usa-lo como portador de energia (VAN PELT, 2004).

Para complementar, podemos afirmar que o Brasil já possui atualmente base suficiente para realizar pesquisas nacionais visando o desenvolvimento e melhorias em células combustíveis. Uma das áreas de destaque tem sido a de Nanotecnologia, com realizações

fundamentais para obtenção de novos materiais, como para anodos, catodos e – principalmente – membranas de troca, que constituem questões chave para estas novas tecnologias. Recentemente os pesquisadores do CNEN, Comissão Nacional de Energia Nuclear, anunciaram a produção de uma membrana composta de nanopartículas de carbono, adequada para ser usada em células combustíveis.

## 6. CONCLUSÕES

Face ao exposto, consideramos justificado que se promova um esforço de reavaliação técnica, científica e econômica para as Células Combustíveis a Alumínio, tendo em vista os interesses para o planejamento energético brasileiro e seu futuro aproveitamento.

Apesar de terem sido, historicamente, uma das primeiras a serem pesquisadas, apresentaram algumas dificuldades tecnológicas que ainda não parecem totalmente superadas na prática. Isto se deve, segundo esta avaliação, ao fato de que os interesses em jogo desviaram as forças impulsionadoras das pesquisas para outras direções. Apesar disso, as células Al/Ar já se consolidaram como a melhor alternativa em diversas aplicações comerciais. Por outro lado, seu grande potencial de benefícios continua mantendo a atratividade para pesquisa e desenvolvimento deste tipo de células, fazendo com que alguns inovações recentes lancem novas possibilidades, que poderão vir a ser confirmadas e alcançar o mercado comercial em futuro próximo.

O eventual aproveitamento desta oportunidade, neste momento favorável de transição de tecnologias, pode trazer uma nova alternativa, pela utilização do Alumínio como armazenador e portador da energia hidroelétrica gerada em regiões distantes do Brasil, de modo a poder ser utilizada nos centros consumidores de maneira racional, ambientalmente correta e energeticamente eficiente: quando, onde e na quantidade necessária.

Finalmente, não podemos ficar esperando que outros países, com outros interesses e objetivos, desenvolvam tecnologias que possam ser úteis para o Brasil. Precisamos estar atentos para identificar e tratar de desenvolver as tecnologias de interesse estratégico para o país, como pode ser o caso das Células Combustíveis a Alumínio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

YANG, S., KNICKLE, H. **Design and analysis of aluminum/air battery system for electric vehicles.** Journal of Power Sources, 112 (2002) p. 162-173.

KNICKLE, H. Mensagem através de correio eletrônico, enviada em 11/01/2005 para <franciscoschwab@hotmail.com>

LI, Q., BJERRUM, N. **Aluminium as anode for energy storage.** Journal of Power Sources, 110 (2002), p. 1-10.

LENSSEN, N., FLAVIN, C. **Sustainable energy for tomorrow's world – The case for an optimistic view of the future.** Energy Policy, v.24, n.9, p.769-781.

PARRISH, A. **Controlling corrosion enables Aluminum Air fuel cell.** Fuel Cell Today, 13/03/2002, cópia em papel nos arquivos do autor.

ALUMINUM POWER INC. **Aluminum – The latest fuel in the Power Revolution.** Fuel Cell Online, 7/10/2001, disponível em <<http://www.infowebcom.com/fuelcell/articles/april01>> acessado em 20/09/2004.

PERES, L.A.P. **Baterias para VE: alguns aspectos tecnológicos.** Disponível em <<http://www.gruve.eng.br>> site do Grupo de Estudos de Veículos Elétricos, da UERJ, datado 26/04/2004, acessado em 03/01/2005.

EVIONYX, INC. **eVionyx awarded SBIR Phase II for Aluminum-Air fuel cell development.** Disponível em <[www.eVionyx.com](http://www.eVionyx.com)> acessado em 10/12/2004.

VAN PELT, P. **Cheap electricity from Iceland.** Disponível em < <http://www.batteriesdigest.com/id301/htm>> acesso em 06Jan2004.

SIQUEIRA, Ethevaldo. **2015 – Como viveremos.** S. Paulo: Saraiva, 2004.

ALMEIDA, P.C. **Planejamento e operação de grandes redes elétricas.** In Workshop CEPEL 30 anos: Planejamento e Operação na CEPEL.

EVWORLD. Entrevista com Steve Lapp 23set2005, revista especialista em veículos elétricos; Ver em: <http://www.evworld.com/article.cfm?archive=1&storyid=898&first=6057&end=6056> Lapp Renewables Co. <http://www.lapprenewables.com/> e-mail: [SLapp@ati.sl.on.ca](mailto:SLapp@ati.sl.on.ca)

PAINE, Cris, diretor. **Quem matou o carro elétrico?** Produção de Dean Devlin & Plinyminor, “Who killed the electric car?” foi lançado em Junho/2006 nos Estados Unidos; versão brasileira: Imagem Filmes, São Paulo [www.imagemfilmes.com.br](http://www.imagemfilmes.com.br); para informações, entrevistas, videos e artigos analíticos ver <http://www.pluginamerica.com/wktec.shtml>

CRONOLOGIA HISTÓRICA DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS disponível em <http://www.pbs.org/now/shows/223/electric-car-timeline.html> , consulta em Agosto/2007.

BRODRECHT, D, RUSEK, J. **Aluminum – hydrogen peroxide fuel-cell studies.** Applied Energy 74, 2003, p.113-124.

LOVINS, A, CRAMER, D. **Hypercars, hydrogen, and the automotive transition.** Int. J. Vehicle Design, vol. 35, n°s 1-2, 2004, p.50-85 disponível em PDF para download no site do Rocky Mountain Institute [www.rmi.org](http://www.rmi.org) , consulta em Junho/2007.

LICHT, S. **A novel aqueous aluminum/ permanganate fuel cell.** Elsevier: Electrochemistry Communications I, 1999, p.33-36.