

ESTUDO EXPLORATÓRIO DA INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS DE CÉLULA A COMBUSTÍVEL NAS PLANTAS DE CLORO-SODA PARA UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO INDUSTRIAL

JOSÉ MAURO FERNANDES BRAGA, D. Sc.¹

Professor da Escola de Engenharia da UFF – Universidade Federal Fluminense, Niterói – RJ

LUIS PEREZ ZOTES, D. Sc.²

Professor da Escola de Administração da UFF – Universidade Federal Fluminense, Niterói – RJ

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo demonstrar a viabilidade econômica da aplicação do hidrogênio industrial nos sistemas de célula a combustível, e, para tanto, se buscou analisar as vantagens e desvantagens desse investimento nas plantas de cloro soda. Utilizaram-se os métodos do Valor Presente Líquido (VPL) e da Teoria das Opções Reais (TOR) para avaliar economicamente a integração com base nos parâmetros custo do investimento, volatilidade, taxa de juros livre de risco e taxa de dividendos.

ABSTRACT

This work aims to demonstrate the economic viability of the application of industrial hydrogen in fuel cell systems by analyzing the advantages and disadvantages of this investment in hydrochloric acid/ sodium hydroxide plants. Using the Present Liquid Value and the Real Options Theory an economic avaluation will be made of the integration of fuel cell system in these plants, based on investment cost, volatility, among other parameters.

PALAVRAS-CHAVE

célula a combustível, hidrogênio industrial, plantas de cloro-soda. Engenharia Química.

¹ Correspondência deverá ser enviada a José Mauro Fernandes Braga:
Tel/fax (21) 2714-9187 / (21) 2610-8986 – (21) 9677-0508 / 9877-0509; e-mail: jmfbraga@oi.com.br

² E-mail: lpzotes@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

A carência de adequada infra-estrutura de distribuição de hidrogênio é um dos maiores empecilhos para o desenvolvimento e comercialização industrial das células a combustível.

Em diversos estudos, como, por exemplo, no *National Hydrogen Energy Roadmap (US DOE 2002a)*, cita-se que as plantas de cloro-soda podem ser as mais importantes fontes industriais de hidrogênio puro, confirmado em laboratório, sendo o mais fácil e econômico combustível para as células a combustível.

As plantas de cloro-soda, um segmento básico da indústria química, produzem por eletrólise cloreto de sódio e soda cáustica, e o hidrogênio como sub-produto, com uma produção mundial de 50 milhões de MT (toneladas métricas) por ano de soda e uma relevante quantidade estequiométrica de cloro.

A maioria das plantas queima o hidrogênio produzido para sua valorização como combustível, complementada por gás natural (GN), e em alguns casos, com a aquisição de vapor, já que o processo produtivo é energético-intensivo, exigindo muita energia elétrica para eletrólise e muito vapor para concentrar a soda cáustica.

Uma pequena parte do hidrogênio (12%) é utilizada internamente como matéria-prima para a produção de ácido clorídrico – HCL, e neste caso, seu valor é tão alto que a recuperação como energia para células a combustível é seguramente improvável economicamente.

Em regiões no mundo, como China e Índia, é muito freqüente a não utilização de parte do hidrogênio produzido (mais do que 20%), sendo assim liberado para a atmosfera devido à ausência de infra-estrutura nas plantas e ao fato destas não serem interconectadas.

2. RECUPERAÇÃO DA ENERGIA

Segundo a empresa Nuvera, localizada na Itália, os sistemas de célula a combustível podem permitir a recuperação de até 20% da energia usada para eletrólise nas plantas de cloro-soda, em função de três critérios básicos:

- operação das células a combustível em baixa pressão, porque a energia necessária para comprimir o hidrogênio e o ar não pode ser plenamente recuperada
- utilização direta da célula a combustível na conversão da energia produzida em DC para CA em paralelo com retificadores na sala de célula, evitando o alto custo e a ineficiência da transformação de potência
- recuperação máxima do hidrogênio, obtido com um projeto detalhado e bem adaptado ao sistema da célula a combustível

Considerando que a necessidade mundial das indústrias de cloro-soda para seu processo produtivo é da ordem de 15.000 MW, é teoricamente possível economizar 3.000 MW, sendo provável que até o ano de 2015, mais do que 1.000 MW sejam economicamente factíveis, o que seguramente representa um dos mais promissores caminhos do desenvolvimento industrial das células a combustível.

A confirmação da importância desta solução já se configura nos fabricantes mundiais de equipamentos para o segmento cloro-soda, através dos estudos dos projetos nas instalações *Freeport Dow*, no Texas-EUA numa parceria GM-DOW e no futuro projeto *AKZO NOBEL-NedStack* para Botlek, na Holanda, assim como dos fabricantes nacionais, como *Electrocell*, *Unitech* e *Novo Cell*.

Os laboratórios da Nuvera FC e da DNTE C/A (Chlor-Alcali), localizados em Milão, na Itália, confiam neste desenvolvimento e estão propondo projetos de demonstração em parceria com indústrias de cloro-soda, para instituições interessadas em promover e financiar inovação tecnológica e aplicação em célula a combustível.

Os laboratórios dos citados fabricantes, que são próximos um do outro, organizaram um teste em parceria, alimentando *stacks* de células a combustível com o hidrogênio produzido por células eletrolíticas do tipo membrana, com resultado bem satisfatório.

O grande interesse nas plantas de cloro-soda para recuperação de hidrogênio industrial é que o melhor hidrogênio disponível é produzido pelas células eletrolíticas do tipo membrana, uma vez que ele:

- é suficientemente puro, devido ao estágio de separação, eliminando vestígios corrosivos alojados, para atingir temperatura e umidade corretas
- está, com frequência, sob um nível de pressão suficiente (1,25 *bar* absoluto) para alimentar diretamente a célula a combustível, dispensando estágio de compressão

3. O PROCESSO DE INTEGRAÇÃO – UMA SOLUÇÃO POSSÍVEL

Um aproveitamento nobre do HIDROGÊNIO para as indústrias do segmento cloro-soda está diretamente ligado no Brasil à matriz do GN (gás natural), que no momento, é deficitária, limitando à substituição do vetor energético para a produção de energia elétrica nas plantas do segmento, já que o óbice é o custo do gás. O custo do gás que substitui o hidrogênio não queimado é desfavorável, quando mantidas as atuais condições de contorno.

Em regiões como o nordeste do Brasil, para que não houvesse falta de gás natural para outros segmentos econômicos, foram despachadas termoelétricas a óleo diesel que geram energia com elevados custos, além das emissões de poluentes atmosféricos, principalmente dióxido de carbono e compostos sulfurados, exigindo que as termoelétricas passassem a operar com capacidade ociosa. Dessa forma foi incrementado o consumo de óleo diesel e óleo combustível atingindo, em horários de pico de demanda, tarifas ligeiramente superiores aos custos de geração de célula a combustível.

Em fevereiro de 2008, a situação dos reservatórios no nordeste, onde a capacidade instalada de produção de energia elétrica divide-se em 96% de fontes hidráulicas e 4% de térmicas, com forte dependência com respeito ao índice pluviométrico que é a característica do setor elétrico nacional, foi de 35,23%, inferior ao de janeiro de 2001 que atingiu a 41,39%, quase reproduzindo o cenário de racionamento de consumo de energia elétrica ocorrido naquele ano de 2001, com real ameaça de que as indústrias que usam gás natural ficassem sem energia. O preço da energia no mercado “spot”, que representa uma parte pequena do mesmo, mas que sinaliza o grau de incerteza sob a oferta futura, atingiu em Janeiro de 2008 o valor de R\$ 502,00 e recentemente reduziu-se para R\$ 256,00, afastando o risco de racionamento admitido pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). No auge do medo de que fosse necessário outra vez o racionamento no Brasil, a alternativa proposta para o setor elétrico nacional foi justamente aumentar o uso das fontes poluidoras (óleo combustível, óleo diesel e carvão), que seria idêntico ao cenário de 2001.

4. COMO AVALIAR? ANÁLISE ECONÔMICA

Face as considerações expostas no trabalho, além do tradicional fluxo de caixa descontado (VPL), deve ser também utilizada a Teoria de Opções Reais, para o detalhamento do projeto de integração no cenário da viabilidade econômico-financeira, face a aleatoriedade dos parâmetros envolvidos, gerando incertezas.

O método do VPL vem sofrendo críticas por ignorar opções implícitas em projetos (abandono, estratégia de crescimento e espera por melhores condições – *timing* de investimento, por exemplo), levando a erros significativos quanto a incerteza e/ou flexibilidades que são relevantes no projeto.

Na Teoria de Opções Reais é considerada a **natureza estocástica** da evolução dos preços ou qualquer outra variável, com um modelo estocástico, enquanto no método do VPL, o preço para calcular a receita é o preço atual do mercado, uma seqüência ou um valor esperado.

Quando aplicada a projetos de investimentos, a TOR integra estratégia e finanças, considerando analiticamente as flexibilidades gerenciais e as opções implícitas nos projetos.

O princípio de neutralidade ao risco, é uma boa ferramenta por permitir a superação de dois problemas de importância presentes nas técnicas tradicionais do VPL, que são:

- determinação da taxa de desconto
- estimativa das probabilidades dos diversos cenários futuros

Em um cenário neutro ao risco o retorno esperado para os ativos é a taxa livre de risco (r).

A regra de decisão *através do valor crítico (ou de gatilho)* é derivada de um processo de otimização sob incerteza, sendo os dois métodos mais usados a seguir lembrados, que dão resultados equivalentes:

- *Contingent claims*
- Programação dinâmica

A teoria das opções reais pode ser vista também como uma adequada combinação de *árvores de decisão* (podem ajudar a entender o processo decisório) com o VPL, desde que utilize-se probabilidades e taxas de desconto compatíveis. A tradicional abordagem de risco em projetos, a **CAPM**, embora não seja contraditória com a moderna teoria, é insuficiente para a análise de investimentos.

A **Simulação de Monte Carlo** [1], útil em algumas aplicações, não é uma ferramenta de otimização, e assim, não é compatível para tomada de decisões.

Na presença de incertezas, como é o assunto abordado neste trabalho, a empresa moderna necessita de uma abordagem científica para a análise de investimentos, e para isso é necessário utilizar técnicas mais sofisticadas da teoria de probabilidade e técnicas de otimização dinâmica sob incerteza, nas quais a Teoria das Opções Reais possui sofisticadas ferramentas matemáticas, que consideram as flexibilidades gerenciais existentes nas oportunidades de investimento, representando uma evolução na metodologia de análise de projetos para diversas aplicações em vários segmentos industriais, inclusive no **segmento cloro-soda** e projetos a serem desenvolvidos no **Setor Elétrico Brasileiro**.

5. UM ESTUDO DE CASO – AVALIAÇÃO ECONÔMICA DA INTEGRAÇÃO

Para atingir o objetivo deste trabalho, proceder-se-á uma avaliação de um sistema de célula a combustível utilizando o hidrogênio obtido como sub-produto de uma planta do segmento cloro-soda, utilizando-se para isso as duas metodologias, o tradicional fluxo de caixa descontado (VPL) [2] e a Teoria das Opções Reais (TOR) [3].

O projeto proposto que será avaliado é fictício, porém apresenta parâmetros possíveis com os que poderão ser praticados nas duas empresas brasileiras do segmento cloro-soda que, gentilmente, nos forneceram dados operacionais.

Os seguintes parâmetros serão utilizados como dados de entrada para as células:

- potência instalada/célula – **0,20 MW**
- custo de investimento “aceitável” [5], [6] e Pilhas a combustível [7] – **R\$20,6 milhões**

- custo de operação e manutenção – 0,01 US\$/KWh = (0,01 US\$/KWh) (15.200 KW 8.760h/ano) (1,7 R\$/US\$) = **2.263.584,00 R\$/ano**
- preço do projeto – consumo de energia evitado (energia elétrica que deixou de ser comprada devido a geração de eletricidade oriunda do sistema da célula a combustível) = **R\$10,0 milhões**
- vida útil do equipamento – **12/20 anos** e **5 anos** para troca de *stack*
- taxa de desconto – **10 a 12% ao ano**
- Impostos – 14% II, 5% IPI e 17% ICMS, aproximadamente

5.1 Avaliação por Fluxo de Caixa Descontado (VPL) [4]

Conforme o fluxo de caixa usado, o caso base do projeto apresenta os valores abaixo:

VPL= R\$ 35,12 milhões a uma taxa de desconto de 12%

TIR= 36,34% (valor particular da taxa de desconto que anula o valor atual da distribuição do fluxo de caixa)

IL = 2,71 relação entre o VPL e o Investimento inicial I
 $IL = (VPL + I)/I$ [3]

Para verificar a robustez da viabilidade econômica do projeto através dos valores obtidos no VPL, ao se considerar uma taxa de desconto de 12%, devem ser realizadas análises de sensibilidade para variações na referida taxa, nos custos operacionais e no preço da energia gerada pela célula a combustível.

5.2 Análise Econômica pela Teoria das Opções Reais (TOR)

A seguir, mostra-se a análise econômica do projeto, utilizando-se a Teoria das Opções Reais, seguindo a mesma metodologia adotada quando da análise pelo VPL tradicional, como ferramenta de análise em um projeto de investimento:

- custo de investimento (I) – Os investimentos totais somam **R\$ 20,6 milhões**
- valor do projeto (V) – **R\$10,0 milhões**
- taxa de juros livre de risco (r) – **5%**

A taxa considerada é a taxa média nos últimos anos da remuneração dos títulos de renda fixa de longo prazo do tesouro americano (*bonds*) e foi escolhida porque esses títulos são considerados pelo mercado como parâmetro de investimentos livres de risco.

- taxa de distribuição do fluxo de caixa do projeto (δ) – **9 %**

Representa um custo de oportunidade (custo de não se produzir o bem, que no caso é o consumo evitado de energia elétrica), que pode ser representado pela taxa de distribuição do fluxo de caixa do projeto ou *dividend yield*. Em outras palavras, é o custo de oportunidade de se manter a opção sem exercê-la, ou seja, o custo de adiamento. Os valores típicos se situam entre 2 e 12% e no nosso caso utilizou-se uma taxa de 9%.

- volatilidade (σ)– **10%**

Considera o desvio padrão da taxa de variação dos preços do projeto. A volatilidade do preço da energia elétrica no presente estudo de caso é diretamente proporcional a volatilidade de V, que

através de dados de séries históricas disponíveis na literatura utilizaremos uma volatilidade de 10%.

Uma vez apresentados os parâmetros do modelo de opções reais, e utilizando-se as equações do modelo matemático de Portfolio Livre de Risco [8], pode-se obter o valor crítico (V^*) a partir do qual é ótimo investir, bem como o valor da opção de investir $F(V)$, cujas respectivas soluções seguem abaixo:

$$F(V) = AV^\beta$$

$$V^* = (\beta/\beta-1) \cdot I$$

onde A , valor residual do projeto, análogo a uma opção de venda do valor presente do projeto (V) em que o preço de exercício é igual ao valor residual (A), e β , o quociente entre a covariância do retorno do valor do projeto V com o retorno do mercado e a variância do retorno do mercado σ_m^2 , são dadas por

$$A = \frac{V^* - I}{(V^*)^\beta} \equiv \frac{(\beta - 1)^{\beta - 1}}{\beta^\beta \cdot I^{\beta - 1}}$$

$$\beta = \frac{1}{2} - \frac{(r - \delta)}{\sigma^2} + \sqrt{\left[\frac{(r - \delta)}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right]^2 + \frac{2r}{\sigma^2}}$$

e conforme exposto os parâmetros envolvidos possuem os seguintes valores:

Parâmetros	Valor
I Custo do investimento	R\$ 20,6 milhões
σ Volatilidade	10%aa
r Taxa de juros livre de risco	5%aa
δ Taxa de dividendos	9%aa

E assim, os valores obtidos foram:

$$\beta = \frac{1}{2} - \frac{(r - \delta)}{\sigma^2} + \sqrt{\left[\frac{(r - \delta)}{\sigma^2} - \frac{1}{2} \right]^2 + \frac{2r}{\sigma^2}} = \frac{1}{2} - \frac{(0,05 - 0,09)/0,1^2}{\sqrt{\left[\frac{(0,05 - 0,09)/0,1^2 - 1/2}{\sigma^2} \right]^2 + 2 \cdot 0,05/0,1^2}} = 10,0$$

$$V^* = (\beta/\beta-1) \cdot I = (3,81/2,81) \cdot 20,6 = \mathbf{22,88 \text{ milhões}}$$

O valor de F segue as seguintes condições

$$\begin{cases} F(V) = AV^\beta & \text{para } V \leq V^* \\ V - I & \text{para } V > V^* \end{cases}$$

Como $V=10,0$ e $V^*=22,88$ milhões, o valor da opção de investir é dado por:

$$F(V) = AV^\beta$$

E, assim, vem:

$$A = \frac{(V^* - I)/(V^*)^\beta}{2,28/0,0484} = \frac{(22,88 - 20,6)/22,88^{10,0}}{2,28/0,0484} = 5,79 \cdot 10^{-14}$$

E,

$$F(V) = AV^\beta = 5,79 \cdot 10^{-14} \cdot 21,9^{10,0} = 1,47 \text{ milhões}$$

O valor da oportunidade de Investimento $F(V)$ cresce com a volatilidade σ , conforme mostrado abaixo:

- Para $\sigma = 34,40\%$ temos $V^* = 39,67$
- Para $\sigma = 0,20\%$ temos $V^* = 29,96$
- Para $\sigma = 0,10\%$ temos $V^* = 27,93$

Quanto maior a incerteza, expressa aqui pela volatilidade, maior será o valor da oportunidade de investimento $F(V)$ em função da evolução do valor do projeto.

No exame de um projeto usando a metodologia dos Direitos Contingentes da TOR [9], deverão ser obtidos gráficos, abaixo relacionados, para análise de sensibilidade do valor da oportunidade de investir em função da evolução do valor do projeto que em nosso caso será o consumo evitado (redução de custos com o consumo de energia elétrica).

- $F(V) \times V$
- $V^* \times$ Volatilidade (σ)
- $V^* \times$ Taxa de Dividendos (δ)
- $V^* \times$ Taxa de Juros (r)
- $V^* \times$ Investimentos

A Teoria das Opções Reais quando aplicada a projetos de investimento integra **estratégia e finanças**, por considerar analiticamente as flexibilidades gerenciais e as opções implícitas no projeto, que é o objetivo da estratégia empresarial [10]. Na abordagem do trabalho, o parâmetro decisório usado foi o do *timing* de investimento, que pode ser entendido como a tomada de decisão de investir ou não em um projeto, definindo o momento ótimo para a realização do mesmo.

A empresa moderna deve usar uma abordagem científica para análise de investimentos na presença de incertezas, utilizando técnicas mais sofisticadas da teoria de probabilidade e de otimização dinâmica sob incerteza [11]. A teoria das opções reais integra essas sofisticadas ferramentas matemáticas, considerando as flexibilidades gerenciais existentes nas oportunidades de investimentos.

6. Discussão dos Resultados

A integração de sistemas de célula a combustível com plantas que produzem hidrogênio, como a do segmento cloro-soda, representa uma solução para atingir concomitantemente as metas de ampliar a competitividade industrial e de contribuir com a política de redução de emissões de gases poluentes?

Os fabricantes internacionais, e de certa forma os nacionais, de sistemas de célula a combustível, estão dedicando muita importância para esses projetos de integração e realizando importantes pesquisas. Estas pesquisas estão focadas nos custos relativos ao ciclo de vida, nas corretas aplicações e em padrões de segurança, além da implementação de projetos de demonstração em parceria com empresas do segmento cloro-soda e fundos de investimento interessados em P&D. No Brasil, acordos específicos de trocas de informações entre as

universidades e fabricantes nacionais estão sendo programados para que assuntos de domínio público sejam publicados e as empresas do segmento sejam preservadas no que diz respeito aos seus interesses comerciais.

A partir dos dados obtidos, o custo por MWh gerado pelas células a combustível é muito sensível a uma quantidade importante de variáveis, tais como (investimento, fator de capacidade, impostos, usados nos cálculos de viabilidade econômico-financeira) e prazo de amortização. Os impostos federais II (imposto de importação) e IPI (imposto sobre produtos industrializados) podem ser eliminados através de um processo junto às autoridades fiscais, justificando a importância destes equipamentos como geradores de energia não poluentes e de alto rendimento. A experiência internacional mostra que nos países que utilizam esta tecnologia, as empresas não só são isentas de impostos como também os governos oferecem incentivos financeiros, bônus, para fomentar sua utilização. Ainda, eliminando os impostos, temos uma variação de valor muito grande relativo ao tempo de amortização já citado e ao aproveitamento ou não do calor gerado, pois na célula a combustível do tipo PAFC, proposta nesse trabalho, atinge a 200°C, podendo ser usada para aquecimento de água para diversos fins.

Considerando 10 (dez) anos para amortização do capital, o único gasto adicional é a troca dos eletrodos após 5 (cinco) anos de funcionamento, com as considerações pertinentes. Além disso, existem outras possibilidades da redução de custo das células a combustível, através de incentivos que podem ser usados, como por exemplo, o Departamento de Defesa dos Estados Unidos possui um programa de incentivo a utilização desses equipamentos, permitindo um reembolso de U\$ 1.000 por KW instalado. Outras possibilidades incluem financiamento de entidades como Banco Mundial ou o Banco Interamericano de Desenvolvimento – BID para a utilização dessas tecnologias não poluentes, com pequenas taxas de juros.

Outros países dentro do espírito do protocolo de Kioto e de outros tratados internacionais que promovem a utilização de tecnologias menos agressivas ao meio-ambiente, como Alemanha, países da Europa Setentrional e em menor escala Japão e o Canadá, onde a legislação ambiental está se tornando extremamente restritiva [12], oferecem créditos (bônus) de 30 a 100 € (euros) por tonelada de dióxido de carbono não produzido (operação mais limpa), já que 1 MW instalado reduz 4.600 ton de dióxido de carbono por ano, 2,0 a 5,0 c€/kWh elétrico gerado e 6,0 c€/kWh térmico gerado. Em regime estacionário as emissões da célula a combustível proposta do tipo PAFC, estão abaixo listadas:

- CO – 6 ppm
- NOx – 5 ppm
- SO₂ – 6 ppm
- H₂ – 15 ppm

Em situações especiais, onde são necessários cuidados adicionais com a poluição ambiental e sonora, ou ainda os casos onde existe um forte apelo pela qualidade da energia fornecida e pela confiabilidade do fornecimento, as células a combustível já são competitivas economicamente há mais de 10 (dez) anos [13].

Com respeito à qualidade referida, é mostrada abaixo a participação em diversos parâmetros elétricos com as respectivas caracterizações em testes realizados no Lactec-Curitiba em Março de 2002 [13]:

QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Parâmetro	Planta desconectada	Planta conectada
Tensões RMS	Estáveis e equilibradas	Estáveis e equilibradas
Correntes e potências ativas RMS	Levemente desequilibradas	Mais equilibradas em todas as potências
Potências reativas	Fortemente desequilibradas	Fortemente desequilibradas

Distorção total harmônica de tensão	$1,9\% < DTHv < 4,2\%$	$1,9\% < DTHv < 6,0\%$
Distorção total harmônica de corrente	$23\% < DTHi < 75\%$	200KW: $10\% < DTHi < 25\%$
Fator de potência	$0,8 < f_p < 0,95$	200KW: ~ 1

7. Conclusões

O projeto de integração de sistemas de célula a combustível dentro das plantas de cloro-soda para utilização do hidrogênio industrial pode ser viável dependendo de 3 (três) variáveis possíveis de ação governamental, a saber: preço da energia elétrica, preço do gás e de subsídios possíveis de serem praticados. A aplicação do VPL e da TOR ao uso do hidrogênio oriundo de plantas de cloro-soda em sistemas de células a combustível mostra que a energia gerada pelo uso do hidrogênio nas células anteriormente utilizado para produzir calor necessário para o processo, não cobre, nas condições atuais, o custo do gás ou outra fonte que terá que ser comprada para suprir o hidrogênio. Há um custo adicional e permanente durante a vida útil do projeto que mesmo com a receita oriunda do consumo evitado de energia térmica (economia gerada pelo aproveitamento do calor)³ não consegue suportar, e assim o projeto ainda não se tornou economicamente viável.

O uso do hidrogênio nas células, que no momento presente é queimado para aquecimento das caldeiras das plantas, terá que ser substituído por GN, sendo algumas vezes complementado por vapor, e que poderá também ser a solução, decisão estratégica de responsabilidade das empresas do segmento cloro-soda, fora do escopo deste trabalho de pesquisa, que é a integração de célula a combustível em plantas de cloro-soda (VPL = R\$ 35,12 milhões).

Oportuno ressaltar que o custo de compra do GN para substituir o hidrogênio utilizado nas células foi obtido de [14], referente a tarifa comercial da CEG no Rio de Janeiro, devido a inviabilidade de obter-se a tarifa real cobrada pela Petrobras, o que caracteriza a fragilidade do custo adicional obtido pela não utilização de hidrogênio como combustível em substituição ao gás natural.

Com a inserção de bônus idênticos àqueles praticados na Europa Setentrional, Alemanha, Canadá e Japão (em escala menor) [15], o projeto torna-se viável (VPL= R\$ 12,32 milhões). Se acrescido o bônus de redução de dióxido de carbono no valor de 0,05 € /kWh (1 MW reduz 4600 t dióxido de carbono/ano), obtido da mesma fonte acima citada, o projeto torna-se mais atraente, mesmo não sendo utilizado o bônus de 100 €/ton de dióxido de carbono não produzido (operação mais limpa) (VPL=139,30 milhões).

Finalmente pode-se concluir que com a tecnologia reinante e os custos incorridos, o projeto de uso de células a combustível dentro das plantas de cloro-soda para utilização do hidrogênio industrial, ficará com a sua atratividade vinculada a decisões do governo brasileiro de utilização dos bônus citados, igualando-se aqueles países referidos, em sintonia com os protocolos ambientais.

8. Referências

- [1]MAJD, S. e PINDYCK, R. **Time to Build, Option Value, and Investment Decisions** Journal of Financial Economics; 18; 7-27; North-Holland; 1987.
 [2]HAMMERSLEY, J. M. e HANDSCOMB, D. C. Monte Carlo Methods; Methuen & Co.; Londres Princeton University Press; 1964.

³ Lembramos que em regimes de funcionamento diferentes as *células a combustível de ácido fosfórico de 200 kW* contemplam, em alguns casos, a utilização unicamente da energia elétrica (200 kW_e), em outros a utilização da energia elétrica e térmica gerada (mais 200 kW_t).

- [3] ZOTES, P. Luis et al. Viabilidade econômico-financeira de projetos; Rio de Janeiro; Editora FGV; 2007.
- [4] DAMODARAN, A. **The promise and peril of real options**; Faculty Digital Archive; <http://archive.nyu.edu/handle/2451/26802> ; 2000.
- [5] AMRAM, Martha; KULATILAKA, Nalin. Real Options: Managing Strategic Investment in an Uncertain World. Boston; Mass.: Harvard Business School Press; 1999.
- [6] KREUTZ, T.G.; OGDEN, J.M.. **Assesment of Hydrogen Fueled Proton Exchange Membrane Fuel Cells for Distributed Generation and Cogeneration** Proceedings of the 2000 U.S. DOE Hydrogen Program Review; U.S. Department of Energy; 2000.
- [7] MARNAY, C; CHARD, J.S. **Modeling of Customer Adoption of Distributed Energy Resources, Consortium for Electric Reliability Tecnology Solutions**; California Energy Commision; 2001.
- [8] **PILHAS a combustível**. Análise Prospectiva da Introdução de Tecnologias Alternativas de Energia no Brasil Workshop, relatório preliminar; COPPE/UFRJ; 2002.
- [9] SOITO, João Leonardo S. **A Teoria das Opções Reais como Ferramenta na Avaliação de um Investimento de Capital no Setor Elétrico Brasileiro** Dissertação de Mestrado em Planejamento Energético na UFRJ; Riode Janeiro; p. 218; 2002.
- [10] BLACK, F.; SCHOLES, M. **The Pricing of Options and Corporate Liabilities** Journal of Political Economy; n.º 81; 637-659; 1973.
- [11] DIXIT, A. K.; PINDYCK, R. S.. Investment Under Uncertainty; Princeton; New Jersey; Princeton University Press.
- [12] TRIGEORGIS, Lemos. **The Nature of Options Interactions and the Valuation of Investment with Multiple Real Options** Journal of Financial and Qualitative Analysus; vol. 28; n.º 1; 202-224; 1993.
- [13] CANTÃO, Maurício P. **Células a Combustível de Ácido Fosfórico: Experiência e Perspectivas**; 2º WICC; 2004.
- _____ . Implantação e Avaliação da Tecnologia de Células a Combustível; 2002.
- [14] SERRA, Eduardo T. et al. Células a combustível. Uma alternativa para Geração de Energia e sua Inserção no Mercado Brasileiro; Rio de Janeiro; Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL; 2005.
- [15] SERRA, E.T. *Idem*.