

# ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO APROVEITAMENTO DA ENERGIA VERTIDA TURBINÁVEL DA USINA HIDRELÉTRICA DE ITAIPU PARA A SÍNTESE DE AMÔNIA PARA FERTILIZANTES NITROGENADOS

MICHEL OSVALDO GALEANO ESPÍNOLA <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Faculdade de Ciências Químicas da Universidade Nacional de Assunção do Paraguai

## RESUMO

Em muitas usinas hidrelétricas, quando as afluências são maiores que a demanda de energia, uma parcela de água que ainda poderia ser utilizada para gerar eletricidade é desviada para o vertedouro e literalmente desperdiçada. Essa energia, cuja denominação é Energia Vertida Turbinável, poderia ser aproveitada para gerar algum outro produto ou vetor energético que possibilitasse seu armazenamento e posterior utilização, já que nessas ocasiões os reservatórios de água estão cheios. Este trabalho estuda a viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da energia vertida turbinável da Usina Hidrelétrica de Itaipu para produção de hidrogênio eletrolítico que, juntamente com o nitrogênio do ar, é matéria-prima essencial para a síntese da amônia, utilizada na produção de fertilizantes nitrogenados. O custo mínimo de produção do hidrogênio eletrolítico foi estimado em US\$ 0,246/m<sup>3</sup> ou US\$ 2,750/kg para uma planta com capacidade de produção de 55.000 m<sup>3</sup>/h, correspondendo a 247,5 MW de potência, proveniente de 82% de energia vertida turbinável e 18% de energia garantida. Junto a uma planta de hidrogênio eletrolítico com essa capacidade, é possível acoplar uma planta de amônia com produção de aproximadamente 500 t/dia, operando 350 dias/ano, com um custo de produção de aproximadamente US\$ 562,81/t. Com esta capacidade é possível atender a 38,5% da demanda de amônia estimada para a região abrangida pelo projeto, de 1.300 t/dia. Atualmente a amônia está cotada no mercado brasileiro em torno de US\$ 525,60/t. Portanto, conclui-se que a produção de amônia via associação de energia garantida e vertida turbinável junto à Usina Hidrelétrica de Itaipu não é viável economicamente no momento, o que pode ser acreditado principalmente ao elevado custo dos eletrolisadores importados. No entanto, com a instalação de uma planta de amônia via eletrólise da água junto à Usina Hidrelétrica de Itaipu seriam evitadas as emissões relacionadas ao uso do gás natural e, mesmo considerando as emissões de metano e dióxido de carbono do reservatório da usina haveria um decréscimo nas emissões anuais da ordem de 234 mil toneladas de carbono. Caso o projeto seja aprovado pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, essa diminuição do impacto ambiental representaria um montante anual de € 3,8 milhões<sup>2</sup>, valor próximo a US\$ 5,5 milhões ou R\$ 9,9 milhões. Embora essa receita melhore o fluxo de caixa do projeto, ainda não seria suficiente para torná-lo viável economicamente em comparação com os processos de produção de amônia que utilizam gás natural a preços vigentes.

## ABSTRACT

*In many hydroelectric power plants, when the inflows are greater than the demand for energy, a portion of the water that could be used to generate energy is diverted to the spillway and literally wasted. This energy, designated as "Spilled Turbinable Energy", could be used advantageously to generate other products or an energy vector that could be stored for later use, since in these occasions the dam is full. The present work studies the feasibility of using the spilled turbinable*

1 Correspondência deverá ser enviada a Michel Osvaldo Galeano Espínola:

Tel.: (021) 585562/3; e-mail: michelosvaldo@qui.una.py

2 Cotação de fechamento do dólar no dia 19/12/2007, quarta-feira: 1 US\$ = € 0,6947 (Fonte: <http://yahoo.finance.com/currency/convert>)

energy of the Itaipu Hydroelectric Power Plant to produce electrolytic hydrogen that, together with the nitrogen from air, is an important feedstock for the ammonia synthesis, used to produce nitrogen fertilizers. The minimum production cost of electrolytic hydrogen was estimated in US\$ 0,246/m<sup>3</sup> or US\$ 2,750/kg, for a plant with capacity of 55 mil m<sup>3</sup>/h, which correspond to 247,5 MW of electrical power deriving from 82% of spilled turbinable energy and 18% of guaranteed energy. Next to that hydrogen plant it is possible to install an ammonia plant of approximately 500 t/day, operating 350 days/year, with a production cost of approximately US\$ 562,81/t. This capacity is enough to supply 38,5% of the ammonia demand estimated for the region focused in the project, 1.300 t/day. Nowadays, ammonia is commercialized in the Brazilian market by approximately US\$ 525,60/t. For that reason, it can be concluded that ammonia production through the association of spilled turbinable and guaranteed energy next to Itaipu Hydroelectric Power Plant is not economically feasible by the moment, mainly due to the high cost of imported electrolyzers. Nevertheless, with the installation of an ammonia plant based on water electrolysis next to Itaipu Hydroelectric Power Plant, it could be avoided an annual carbon emission of 234 thousand tons, even considering methane and carbon dioxide emissions of the Itaipu's reservoir. If such project were approved by the Clean Development Mechanism, that environmental impact decrease would represent an amount of € 3.8 million<sup>3</sup>, approximately US\$ 5.5 million or R\$ 9.9 million. Even with that revenue, the project would not be economically feasible yet, mainly because of the low prices of natural gas used as feedstock to produce ammonia nowadays.

## **PALAVRAS CHAVE**

Hidrogênio Eletrolítico, Energia Vertida Turbinável, Amônia, Fertilizantes Nitrogenados.

## **1. INTRODUÇÃO**

A produção de hidrogênio e oxigênio via eletrólise da água tem sido praticada em larga escala desde princípios do século XX, e a empresa norueguesa NORSK HYDRO tem utilizado esse processo em associação com a produção de amônia desde 1928, naquela época por meio do processo Birkeland Eide. No princípio da década de 1960, a NORSK HYDRO tinha em operação eletrolisadores com uma capacidade de 100.000 m<sup>3</sup>/h, equivalente a 1.200 t/dia de amônia. Desde então, parte da produção de amônia tem sido realizada por meio de processos que utilizam matérias-primas fósseis. Porém aproximadamente 55.000 m<sup>3</sup>/h de hidrogênio ainda são produzidos por meio da eletrólise da água, equivalentes a aproximadamente 660 t/dia de amônia. Apenas uma pequena parte da produção mundial de fertilizantes utiliza hidrogênio produzido via eletrólise da água. No entanto, o aumento do preço dos hidrocarbonetos tem despertado o interesse por essa tecnologia para a produção de fertilizantes em pequena escala [1].

Num sistema predominantemente hidrelétrico um dos principais objetivos dos reservatórios<sup>4</sup> nas usinas hidrelétricas é estocar a água que chega aos reservatórios na forma de vazão afluyente durante os períodos em que ela é abundante e utilizá-la nos períodos de escassez. Por exemplo, no sistema Sudeste, um reservatório com regularização intra-anual estocaria a água abundante durante os meses de dezembro a abril (período úmido) para utilizá-la nos meses de maio a novembro (período seco). Isto permite que durante os períodos secos o sistema hidrelétrico seja capaz de atender uma vazão firme<sup>5</sup> ou garantida<sup>6</sup>, bem maior do que se não houvesse os reservatórios de regularização [2].

Por outro lado, quando um reservatório atinge sua máxima capacidade de armazenamento, não será capaz de estocar toda a vazão afluyente num determinado intervalo de tempo. Este excesso

<sup>3</sup> Dolar final cotation on 19/12/2007, Wednesday: 1 US\$ = € 0,6947  
(Source: <http://yahoo.finance.com/currency/convert>)

<sup>4</sup> Os reservatórios também têm como principais funções: controle de cheias em bacias, navegação, saneamento, controle ambiental, etc (FORTUNATO *et al*, 1990);

<sup>5</sup> Vazão Firme – 100% de confiabilidade considerando-se o registro histórico de vazões afluentes;

<sup>6</sup> Vazão Garantida – 95% de confiabilidade considerando-se um grande número de cenários sintéticos de vazões [2].

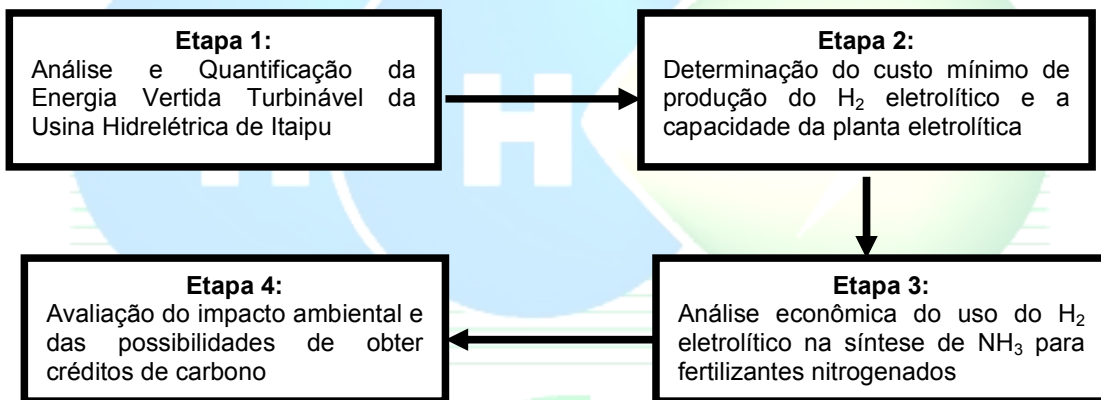
de afluência será vertido. Se a demanda já tiver sido atendida e a usina ainda apresentar capacidade de turbinamento, diz-se que ocorreu um vertimento turbinável. Conforme [3], considerando a utilização da energia vertida turbinável ou excedente, mais barata, disponível nas usinas hidrelétricas, aumenta a perspectiva de obter hidrogênio eletrolítico viável economicamente, tendo em vista a importância do custo da energia elétrica no custo final deste produto.

## 2. OBJETIVO

O principal objetivo deste trabalho é verificar a viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da energia vertida turbinável da Usina Hidrelétrica de Itaipu para a produção de hidrogênio eletrolítico visando à síntese de amônia, matéria prima essencial para a produção de fertilizantes nitrogenados.

## 3. METODOLOGIA

O procedimento proposto neste trabalho para analisar a viabilidade da produção de amônia junto à Usina Hidrelétrica de Itaipu tem a configuração apresentada na Figura 1:



**Figura 1:** Procedimento proposto para análise da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da energia vertida turbinável da Usina Hidrelétrica de Itaipu na síntese de amônia.

### 3.1 Análise do comportamento sazonal e anual e quantificação da energia vertida turbinável da Usina Hidrelétrica de Itaipu

Em primeiro lugar fez-se um levantamento da disponibilidade mensal de energia vertida turbinável na Usina Hidrelétrica de Itaipu entre os anos de 1991 e 2007 e, na seqüência, determinou-se a energia vertida turbinável média disponível a cada mês ao longo de um ano (média entre 2001 e 2007).

### 3.2 Determinação do custo mínimo de produção de hidrogênio eletrolítico junto à Usina Hidrelétrica de Itaipu e estimativa da capacidade de produção da planta eletrolítica

Primeiramente determinou-se o custo da eletricidade via associação de energia garantida e energia vertida turbinável da Usina Hidrelétrica de Itaipu para várias capacidades de produção de hidrogênio eletrolítico: uma planta com menor capacidade utilizará mais energia vertida turbinável durante o ano, e à medida que se aumenta a capacidade da planta de eletrólise recorre-se mais ao uso da energia garantida. O custo da eletricidade é calculado com base na média ponderada entre as quantidades de energia garantida e vertida turbinável utilizado pela planta de eletrólise.

Em segundo lugar, determinou-se o custo da planta de eletrólise em função da capacidade: os custos por unidade produzida serão maiores quanto menor a capacidade de produção da planta de eletrólise devido à influência da economia de escala. Utilizando-se uma planilha eletrônica desenvolvida para o cálculo do custo do hidrogênio eletrolítico considerando a disponibilidade de

energia vertida turbinável da Usina Hidrelétrica de Itaipu, foi possível determinar a capacidade da planta de eletrólise para obter um custo mínimo de produção de hidrogênio eletrolítico.

Após o cálculo da capacidade ótima da planta de eletrólise e o respectivo custo mínimo de produção de hidrogênio eletrolítico, foi possível dimensionar uma planta para a produção de amônia e seu custo, e comparar a capacidade da planta com a produção de amônia necessária para satisfazer o mercado de fertilizantes da região abrangida pelo projeto.

### 3.2.1 Custo unitário de capital da planta de eletrólise

O custo unitário de capital da planta de eletrólise ( $C_{EL}$ ) depende do tamanho da planta, ou seja, decresce com o aumento da capacidade de produção da planta. O aumento da produção permite uma melhor utilização da capacidade e com isto os custos fixos e invariáveis são distribuídos por maiores quantidades de produto (Adaptado de [4]).

Com base em [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12] e [13], foi possível estimar o custo de capital de algumas plantas de eletrólise de diferentes capacidades, conforme a Tabela 1.

**Tabela 1:** Custo unitário de capital da planta de eletrólise em função da capacidade de produção.

Capacidade de produção de H <sub>2</sub> (m <sup>3</sup> /h)	Potência da planta de eletrólise (MW)	Custo unitário da planta de eletrólise (US\$/kW)
485	2,3	1.304
3.907	18,6	945
15.627	74,5	853
31.254	149,0	841
46.880	223,5	780

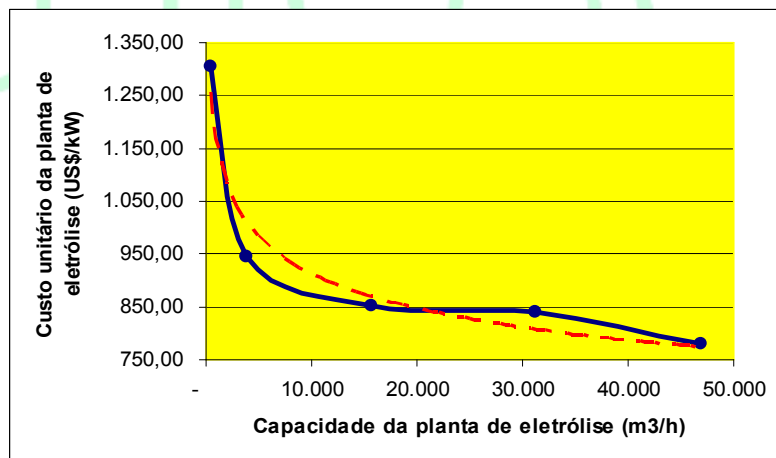
A Figura 2 mostra graficamente os dados da Tabela 1. Conforme se aumenta a capacidade de produção, o custo unitário de eletrólise diminui e a curva gerada é representada pela Equação 1:

$$C_{EL} = 2.424,9 \times Cp^{(-0,1062)}$$

$$R^2 = 0,9536$$

**Equação 1**

onde  $C_p$  é a capacidade da planta, em m<sup>3</sup>/h, e  $C_{EL}$  é o custo unitário da planta de eletrólise, em US\$/kW.



**Figura 2:** Custo unitário da eletrólise versus capacidade de produção da planta.

Uma vez conhecida a capacidade da planta de eletrólise, utilizando a Equação 1 é possível estimar-se o custo unitário de capital da planta ( $C_{EL}$ ), que é uma das variáveis da planilha

eletrônica desenvolvida que fornece o custo mínimo de produção do hidrogênio eletrolítico junto a Usina Hidrelétrica de Itaipu.

### 3.3 Análise econômica da utilização do hidrogênio eletrolítico produzido junto à Usina Hidrelétrica de Itaipu na síntese de amônia para fertilizantes nitrogenados

Nesta etapa foi desenvolvida uma planilha eletrônica que apresenta as demonstrações de resultados e fluxos de caixa do projeto necessários à análise de sua viabilidade econômica. A planilha eletrônica desenvolvida utiliza para a análise da viabilidade econômica do projeto o Método do Valor Presente Líquido e calcula a Taxa Interna de Retorno do investimento.

### 3.4 Avaliação do impacto ambiental e das possibilidades de obter créditos de carbono caso o projeto seja aprovado pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)

Nesta etapa fez-se uma comparação entre a emissão evitada de dióxido de carbono com a produção de amônia via eletrólise da água junto à Usina Hidrelétrica de Itaipu e as emissões de gases de efeito estufa provenientes do reservatório, para verificar se poderiam se obter créditos de carbono caso o projeto seja aprovado pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.

A formação de dióxido de carbono durante a produção de hidrogênio a partir de combustíveis fósseis é linearmente dependente da quantidade de combustível utilizado, assumindo uma eficiência de 100% na reforma do gás natural ou da nafta petroquímica ou na gaseificação do carvão [16]. Neste trabalho utilizou-se a seguinte expressão matemática para calcular a emissão de dióxido de carbono considerando uma eficiência de 100% nos processos de reforma a vapor e gaseificação:

$$e_{CO_2} = 3,67 \times m_F \times m_{fc} \quad \text{Equação 2}$$

onde:  $e_{CO_2}$  = emissão de dióxido de carbono (kg);

$m_F$  = massa do combustível (kg);

$m_{fc}$  = fração mássica de carbono (C) no combustível;

3,67 = razão entre a massa molar de dióxido de carbono e carbono puro (C).

Conforme [17], em 26 de setembro do ano 2007, a Prefeitura de São Paulo realizou na BM&F o primeiro leilão do Brasil de créditos de carbono, decorrentes do aterro sanitário Bandeirantes, no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. O banco holandês Fortis Bank NV/SA foi o vencedor do leilão ao pagar €16,20/t de carbono equivalente, o que representou um montante total de 13,1 milhões de euros, valor próximo a R\$ 34 milhões. Neste trabalho será adotado o valor de €16,20/t de carbono equivalente para calcular os possíveis benefícios econômicos decorrentes dos créditos de carbono que poderiam ser obtidos caso o projeto seja aprovado pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Análise e quantificação da energia vertida turbinável da Usina Hidrelétrica de Itaipu.

A Tabela 2 apresenta os registros anuais da energia vertida turbinável disponível na Usina Hidrelétrica de Itaipu no período de 1991 a 2006.

**Tabela 2:** Disponibilidade de energia vertida turbinável em Itaipu entre 1991 e 2006.

Ano	Energia Vertida Turbinável (TWh)	Ano	Energia Vertida Turbinável (TWh)
1991	34,8	1999	5,2
1992	44,9	2000	1,0
1993	34,0	2001	1,8
1994	24,4	2002	5,2
1995	17,3	2003	4,1
1996	11,7	2004	4,0
1997	10,4	2005	5,3

1998	11,7	2006	3,6
------	------	------	-----

Fonte: SANTOS Jr. (2007)

Observando a Tabela 2 pode-se perceber que entre os anos de 1991 a 1999 registraram-se grandes quantidades de energia vertida turbinável devido à falta de mercado consumidor naqueles anos. No ano 2000 obteve-se o menor valor para a energia vertida turbinável devido ao fato de que naquele ano registrou-se um ano hidrológico desfavorável (baixa ocorrência de chuvas). Portanto, neste trabalho considerou-se a disponibilidade de energia vertida turbinável entre o 1 de janeiro de 2001 e o 31 de março de 2007. A Tabela 3 mostra a disponibilidade mensal média de energia vertida turbinável da Usina Hidrelétrica de Itaipu no período citado anteriormente. Observa-se que nos meses de outubro a abril ocorre o maior vertimento, ou seja, este período corresponde à época chuvosa da usina.

**Tabela 3:** Média mensal de energia vertida turbinável entre janeiro de 2001 e março de 2007.

Mês	GWh	Frequência	Mês	GWh	Frequência
Janeiro	578	14%	Julho	121	3%
Fevereiro	944	23%	Agosto	8	0%
Março	713	17%	Setembro	26	1%
Abril	374	9%	Outubro	339	8%
Mai	170	4%	Novembro	280	7%
Junho	182	4%	Dezembro	339	8%
Julho	121	3%	<b>TOTAL</b>	<b>4.074</b>	<b>100%</b>

Fonte: [18]

#### 4.2 Determinação do custo mínimo de produção de hidrogênio eletrolítico junto à Usina Hidrelétrica de Itaipu e estimativa da capacidade de produção da planta eletrolítica.

Conforme os resultados obtidos, o custo mínimo do hidrogênio foi de US\$ 0,246/m<sup>3</sup> (US\$ 2,750/kg), obtido para uma planta eletrolítica de 55.000 m<sup>3</sup>/h de capacidade e 247,5 MW de potência, sendo alimentada com 82% de energia vertida turbinável e 18% de energia garantida. É importante ressaltar que o custo de produção calculado não inclui os custos de armazenamento e transporte. A distribuição percentual do custo do hidrogênio eletrolítico é a seguinte: 48,7% custo de capital; 19,3% custo com eletricidade (eletrolisadores e compressor); 16,6% custo com operação e manutenção dos eletrolisadores; 0,3% custo com operação e manutenção do compressor; 15,1% custo com água e eletrólito.

**Tabela 4:** Comparação dos resultados obtidos com os valores encontrados na literatura técnica.

Capacidade de produção (x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /dia)	Custo da eletricidade (US\$/MWh)	Custo do H <sub>2</sub> (US\$/kg)	Referencia bibliográfica
1.320,0	10,04	2,75	Elaboração própria
2.800,0	49,00	3,76	[19]
6.750,0	49,00	3,89	[20]
96,0	49,00	4,38	[21]
162,0	223,00	10,94	[22]
552,0	17,00	1,90	[4]
14,0	35,88	4,08	[23]
11,2	50,00	4,09	[24]

Como se pode observar na Tabela 4, o valor obtido para o custo do hidrogênio eletrolítico produzido junto a Usina Hidrelétrica de Itaipu via associação de energia garantida e vertida

turbinável é coerente com os valores encontrados na literatura. O custo do hidrogênio eletrolítico produzido junto a Usina Hidrelétrica de Itaipu é menor comparado com as plantas de maior capacidade de produção devido ao menor custo da eletricidade disponível em Itaipu (US\$ 10,04/MWh), o qual é cinco vezes menor que os valores considerados pelos autores citados (US\$ 49,00/MWh). O custo do hidrogênio eletrolítico produzido em plantas eletrolíticas de menor capacidade de produção que a de Itaipu é maior devido a influencia da economia de escala e pelo custo da eletricidade considerado nesses estudos.

#### 4.3 Análise econômica da utilização do hidrogênio eletrolítico produzido junto à Usina Hidrelétrica de Itaipu na síntese de amônia para fertilizantes nitrogenados.

Por meio dos cálculos feitos com ajuda da planilha eletrônica desenvolvida, obtém-se o custo da amônia produzida a partir da eletrólise da água via associação de energia garantida e vertida turbinável junto à Usina Hidrelétrica de Itaipu, cujo valor é de aproximadamente US\$ 562,81/t para uma planta de 500 t/dia trabalhando 350 dias/ano (8.400 h/ano). A Tabela 5 permite comparar o custo da amônia produzida via processo eletrolítico junto à Usina Hidrelétrica de Itaipu com o preço da amônia produzida a partir da oxidação parcial de resíduo asfáltico pela empresa Fósferil localizada em Araucária, Estado de Paraná.

**Tabela 5:** Comparação econômica da amônia produzida junto à Itaipu e pela Fósferil.

Fabricante	Processo	Custo da NH <sub>3</sub> (US\$/t)
Itaipu	Eletrólise da água	562,81
FOSFERTIL	Oxidação parcial de resíduo asfáltico	525,60

Conforme a [25], atualmente a amônia está cotada no mercado brasileiro em aproximadamente US\$ 525,60/t (R\$ 1.028,00/t). Observando-se a Tabela 5 conclui-se que a utilização do hidrogênio eletrolítico produzido junto à Usina Hidrelétrica de Itaipu na síntese de amônia não é viável economicamente no momento. Conforme observado na Tabela 5, a amônia produzida a partir da eletrólise da água via associação de energia garantida e vertida turbinável junto a Usina Hidrelétrica de Itaipu não pode competir, no momento, com a amônia produzida a partir da oxidação parcial de resíduo asfáltico pela empresa Fósferil, localizada em Araucária, Estado de Paraná.

A Figura 3 apresenta o resultado da análise de sensibilidade do custo do hidrogênio eletrolítico feita a partir das planilhas eletrônicas utilizadas para a análise do fluxo de caixa do projeto. Os cálculos foram feitos alterando-se os seguintes parâmetros: custo dos equipamentos, custo da eletricidade, Taxa de Desconto e disponibilidade da planta de eletrólise. Esses cálculos foram feitos para verificar a sensibilidade do custo do hidrogênio eletrolítico a alguns dos seus principais componentes.

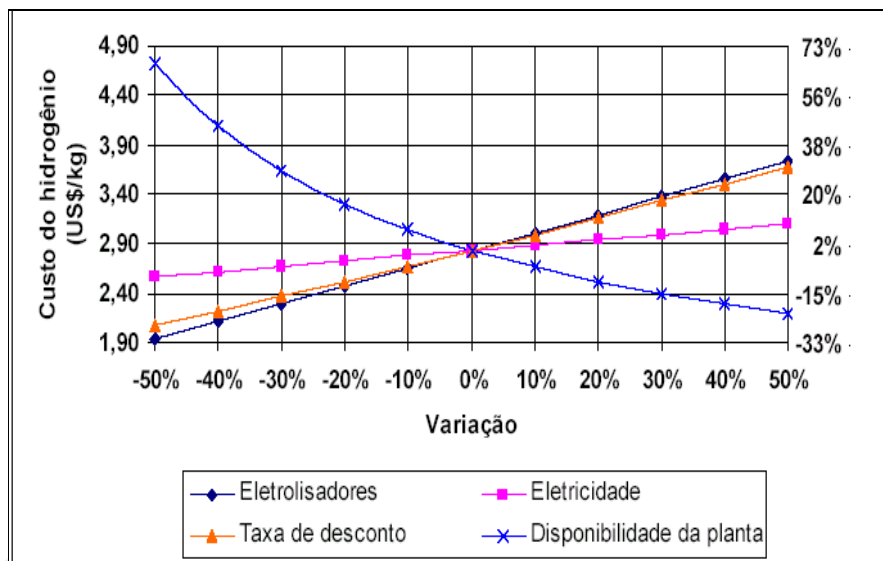


Figura 3: Análise de sensibilidade.

Na Figura 3 pode-se observar ainda, que o valor dos equipamentos, principalmente os eletrolisadores importados, têm um forte impacto no custo do hidrogênio eletrolítico produzido. Com uma redução de 50% no preço dos equipamentos, o custo do hidrogênio eletrolítico, nas condições estabelecidas neste trabalho, aproxima-se do custo do hidrogênio produzido a partir da reforma a vapor do gás natural informado na literatura. O custo da energia elétrica, entretanto, não apresenta um impacto tão significativo, para uma redução em 50% de seu valor, o custo do hidrogênio eletrolítico produzido foi reduzido apenas em aproximadamente de 9,4%.

#### 4.4 Avaliação do impacto ambiental e das possibilidades de obter créditos de carbono caso o projeto seja aprovado pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.

Conforme [26], a Usina Hidrelétrica de Itaipu emite anualmente 93.269 t de carbono, como se pode observar na Tabela 6

Tabela 6: Usina Hidrelétrica de Itaipu e emissões de carbono.

Parâmetro	Unidade	Valor
Índice de emissão de CH <sub>4</sub>	Kg.km <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup>	20,8
Índice de emissão de CO <sub>2</sub>	Kg.km <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup>	171
Emissão de carbono da hidrelétrica*	t/ano	93.269

\*Inclui o carbono do CH<sub>4</sub> (com GWP conforme IPCC, 1996) e do CO<sub>2</sub>: (CH<sub>4</sub> x 12/16 x 7,6 + CO<sub>2</sub> x 12/44) x 365/1000.

Fonte: [26]

Para a produção de uma tonelada de amônia via reforma de hidrocarbonetos leves são emitidas em média 0,706 t de dióxido de carbono [4]. Aplicando a Equação 6, uma planta de amônia de 500 t/dia a partir da reforma a vapor do gás natural emitiria anualmente 327.500 t de carbono. Portanto, pode-se concluir que com a instalação de uma planta de amônia produzida a partir da eletrólise da água junto à Usina Hidrelétrica de Itaipu e considerando as emissões anuais de metano e dióxido de carbono do reservatório da usina seria evitada uma emissão anual de 234.231 t de carbono. Caso o projeto seja aprovado pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, essa diminuição do impacto ambiental representaria um montante anual de € 3,8 milhões<sup>7</sup>, valor próximo a US\$ 5,5 milhões (R\$ 9,9 milhões).

<sup>7</sup> Cotação de fechamento do dólar no dia 19/12/2007, quarta-feira: 1 US\$ = € 0,6947 (Fonte: <http://yahoo.finance.com/currency/convert>)

## 5. DISCUSSÃO

Conforme os resultados obtidos, o custo mínimo do hidrogênio foi de US\$ 0,246/m<sup>3</sup> (US\$ 2,750/kg) para uma planta eletrolítica de 55.000 m<sup>3</sup>/h de capacidade e 247,5 MW de potência, sendo alimentada com 82% de energia vertida turbinável e 18% de energia garantida. O componente mais importante no custo final do hidrogênio eletrolítico é o custo de capital investido nos eletrolisadores importados. Além disso, o alto custo final da amônia via eletrólise da água também é devido ao alto custo do investimento na planta de separação de nitrogênio do ar. Conforme [27], o gás natural tem vantagens sobre outras matérias-primas, quando disponíveis, não somente devido àquelas associadas à tecnologia de produção propriamente ditas, como também às associadas à extração, produção e transporte do gás. Ao se comparar o investimento em unidades de amônia, associado à matéria-prima, observa-se que a unidade de amônia que processa gás natural é a que apresenta menor investimento. O maior investimento nas plantas de geração de gás de síntese pelos processos de oxidação parcial, eletrólise e gaseificação de carvão é devido à planta de separação de ar em seus componentes (nitrogênio e oxigênio). Apesar de que o custo da amônia via eletrólise da água não seja competitivo no momento, o custo do hidrogênio eletrolítico produzido junto à Usina Hidrelétrica de Itaipu é economicamente e ambientalmente atraente comparado com o hidrogênio produzido a partir de fontes fósseis.

## 6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados, pode-se concluir que a determinação de um valor de energia vertida turbinável que poderia ser utilizada na produção de hidrogênio eletrolítico visando à síntese de amônia para fertilizantes nitrogenados junto à Usina Hidrelétrica de Itaipu não é trivial, dado que a distribuição de frequências da energia vertida turbinável é bastante assimétrica, apresentando também dispersão elevada.

A disponibilidade anual de energia vertida turbinável na Usina Hidrelétrica de Itaipu está em torno de 4,0 TWh. Os meses de outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, março e abril apresentam maior percentual de disponibilidade de energia vertida turbinável devido à maior incidência de chuvas; já os demais meses são secos.

Neste trabalho foi verificado que o principal fator responsável pelo elevado custo do hidrogênio eletrolítico é o alto custo dos eletrolisadores importados. O custo da eletricidade não tem um impacto significativo. Além disso, mesmo para uma disponibilidade de energia elétrica a custo nulo, o custo de produção de hidrogênio eletrolítico refletiria a amortização do investimento, operação e manutenção e insumos de materiais. A somatória destas parcelas, independentes da energia elétrica, diminui com o aumento da escala de produção. Essa diminuição está de acordo com os dados encontrados na revisão da literatura técnica, uma vez que pelo menos duas das parcelas, operação e manutenção e custos de capital, tendem realmente a diminuir, em termos de US\$/m<sup>3</sup> de hidrogênio produzido, na medida em que se aumenta a escala de produção.

Vale lembrar ainda que o oxigênio eletrolítico, subproduto no processo de obtenção do hidrogênio a partir da eletrólise da água, também pode ser armazenado e comercializado, aumentando as oportunidades de negócios nas usinas hidrelétricas.

## 7. AGRADECIMENTOS

ITAIPU BINACIONAL.

Faculdade de Ciências Químicas da Universidade Nacional de Assunção do Paraguai.  
Laboratório de Hidrogênio do Instituto “Gleb Wathagin” da Universidade Estadual de Campinas, Brasil.

## 8. REFERÊNCIAS

- [1] GRUNDT, T. e CHRISTIANSEN, H.; **Hydrogen by Water Electrolysis as Basis for Small Scale Ammonia Production. A Comparison with Hydrocarbon based Technologies**, International Journal of Hydrogen Energy, 1982, Vol. 7, No. 3, pp. 247-257.
- [2] ALMEIDA, Tatiana; **Análise e Quantificação da Energia Vertida Turbinável no Sistema Sudeste Brasileiro**, Monografia de Trabalho Final de Curso submetida ao Departamento de Engenharia Elétrica do Curso de Graduação do Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro, CEFET/RJ, 2003, 80 p.
- [3] SANTOS Jr., Antônio Carlos Fonseca; **Análise da viabilidade econômica da produção de hidrogênio em usinas hidrelétricas: estudo de caso em Itaipu**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção).
- [4] SOUZA, Samuel Nelson Melegari; **Aproveitamento da Energia Hidroelétrica Secundária para Produção de Hidrogênio Eletrolítico**. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998. 192p. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos).
- [5] FLOCH, P-H. *et al*; **On The Production Of Hydrogen Via Alkaline Electrolysis During Off-Peak Periods**, International Journal of Hydrogen Energy, 2007, Vol. 32, pp. 4.641–4.647.
- [6] NORSK HYDRO ELECTROLYSERS AS, **Technical Information**, 2006.
- [7] HYDROGENICS, **Contato via e-mail com o senhor Bill Crilly** (Sales Director), On-site Generation, The Americas, 905-298-3345.
- [8] TELEDYNE ENERGY SYSTEMS, **Contato via e-mail com o senhor Max Flint** (Sales Engineer), Teledyne Energy Systems, +1-410-891-2253.
- [9] HYDRO OIL AND ENERGY – HYDROGEN TECHNOLOGIES, **Contato via e-mail com o senhor Henning G. Langås**, Director, Sales & Marketing, Hydro Oil and Energy - Hydrogen Technologies. Visiting address: Heddalsvn. 11, N-3674 Notodden, Norway Postal address: P.O. Box 44, N-3671 Notodden, Norway. Site: <http://www.hydro.com/electrolysers>
- [10] ENERGY TECHNOLOGY – DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS, **Contato via e-mail com o senhor Steve Szymanski** (Business Development Manager), Energy Technology DistributedEnergySystems10TechnologyDrive,Wallingford,CT06492  
E-mail: [sszymanski@distributed-energy.com](mailto:sszymanski@distributed-energy.com) Site: [www.distributed-energy.com](http://www.distributed-energy.com)
- [11] SAXE, M. e ALVFORS, P.; **Advantages of integration with industry for electrolytic hydrogen production**, International Journal of Energy, 2007, Vol. 32, pp. 42–50.
- [12] CONTRERAS, A. *et al*; **Modelling and Simulation of Hydrogen Production using Hydroelectricity in Venezuela**, International Journal of Hydrogen Energy, 2007, Vol. 32, pp. 1219-1224.
- [13] CASALE ELECTROLYSERS, **Contato via e-mail** e foi recebida proposta comercial de um eletrolisador pressurizado de 10 bar em junho de 2007.
- [14] LAPPONI, J. C.; **Avaliação de Projetos de Investimento: Modelos em Excel**. São Paulo: Lapponi Treinamento e Editora Ltda., 1996, 264 p.
- [15] GALESNE, A.; FENSTERSEIFER, J. E.; LAMB, R., **Decisões de Investimento da Empresa**. São Paulo: Atlas, 1999.
- [16] GREINER, C. J., *et al*; **A Norwegian Case Study on the Production of Hydrogen from Wind Power**, International Journal of Hydrogen Energy, 2006, Vol. 31, pp. 1500–1507.
- [17] WARTH, A.; **Aterro Bandeirantes utilizara tecnologia limpa em 2008**, artigo jornalístico disponível em <http://www.estadao.com.br>, 2007.
- [18] SANTOS Jr., Antônio Carlos Fonseca; **Produção de Hidrogênio em Hidrelétricas**, palestra apresentada no Fórum H2 Estratégico no evento Brasil H2 Fuel Cell Expo/Seminar, 24 a 26 de setembro de 2007, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil.
- [19] KIRK-OTHMER, 1991a. **“Hydrogen”** in Encyclopedia of Chemical Technology, 4<sup>th</sup> edition, Vol. 13, Helium Group of Hypnotics, John Wiley & Sons, New York.
- [20] FOSTER-WHEELER, 1996. IEA.Greenhouse Gas R&D Programme, **“Descarbonisation of Fossil Fuels”**, Report No. PH2/2, March.
- [21] ANDREASSEN, K. 1998. **“Hydrogen Production by Electrolysis”**, Hydrogen Power: Theoretical and Engineering Solutions. Kuwic Academic Publishers, the Netherlands, pp. 91 – 102.
- [22] SILVA, E. P. *et al*; **Analysis of hydrogen production from combined photovoltaic, wind energy and secondary hydroelectricity in Brazil**, International Journal of Hydrogen Energy, 2005, Vol. 78, pp. 670-677.

- [23] JOHANSSON, K. 1999. "Hydrogen as a fuel for turbines and engines", Sycon Energikonsult AB, Turbin & ProcessteknikReport, February 24.
- [24] LEVENE, J. e RAMSDEN, T.; **Summary of Electrolytic Hydrogen Production**. National Renewable Energy Laboratory: Golden, CO, MP-560-41099, 2007.
- [25] FOSFERTIL. Disponível em <http://www.fosfertil.com.br>
- [26] COPPE; **Emissões de Dióxido de Carbono e de Metano pelos Reservatórios Hidrelétricos Brasileiros, Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de efeito Estufa**, Relatórios de Referência, Ministério de Ciência e Tecnologia, 2006.
- [27] CEKINSKI, E. *et al*, **Tecnologia de Fertilizantes**, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 1990.

