

HIDROGÊNIO SOLAR-EÓLICO PARA A PRODUÇÃO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS NO ESTADO DO CEARÁ

luterо carmo de lima (UECE) - luterodelima@gmail.com

Rodrigo Alves Patrício (Instituição - a informar) - rodrigo.alpat@gmail.com

Caike Damiao Nascimento Silva (UNESA) - caikedamiao@gmail.com

Natasha Esteves Batista (UFC) - estevesnatasha@hotmail.com

Ellefson Emmanuel Souza de Oliveira (UFC) - ellefson_oliveira@hotmail.com

Francisco Hedler Barreto de Lima Morais (UECE) - frahedler@yahoo.com.br

Resumo:

O modelo matemático do sistema universal de energia a hidrogênio solar criado por Veziroglu e Basar foi estendido para o estudo de viabilidade da produção de amônia como componente principal para a síntese de fertilizantes nitrogenados no estado do Ceará - Brasil. O modelo adaptado considera inter-relações de parâmetros como população, demanda de energia, produto interno bruto per capita da região onde é aplicado e faz estimativas de longo prazo da produção de hidrogênio solar e eólico. Preço de energia, área necessária de painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas, capacidade da usina de dessalinização, investimentos de capital, custo de operação e manutenção, impactos ambientais e, recentemente, produção de amônia também foram incluídos nesse modelo. No presente estudo, investigamos como a produção de amônia por hidrogênio solar e eólico pode impactar no mercado futuro de fertilizantes nitrogenados do estado do Ceará - Brasil.

Palavras-chave: *Hidrogênio solar-eólico, Amônia, Fertilizantes nitrogenados.*

Área temática: *Mercado, economia, política e aspectos sociais*

Subárea temática: *Impactos sociais, econômicos e ambientais de energias renováveis*

HIDROGÊNIO SOLAR-EÓLICO PARA A PRODUÇÃO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS NO ESTADO DO CEARÁ

Lutero Carmo de Lima – lutero.lima@uece.br

Universidade Estadual do Ceará, Centro de Ciências e Tecnologia

Rodrigo Alves Patrício – rodrigo.alpat@gmail.com

Universidade de Fortaleza, Centro de Ciências Tecnológicas

Caíke Damião Nascimento Silva – caikedamiao@gmail.com

Universidade Estácio de Sá, Unidade Parangaba - Jóquei Clube

Natasha Esteves Batista - estevesnatasha@hotmail.com

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

Ellefson Emmanuel Souza de Oliveira – ellefson_oliveira@hotmail.com

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

Francisco Hedler Barreto de Lima Moraes – frahedler@yahoo.com.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo. *O modelo matemático do sistema universal de energia a hidrogênio solar criado por Veziroglu e Basar foi estendido para o estudo de viabilidade da produção de amônia como componente principal para a síntese de fertilizantes nitrogenados no estado do Ceará - Brasil. O modelo adaptado considera inter-relações de parâmetros como população, demanda de energia, produto interno bruto per capita da região onde é aplicado e faz estimativas de longo prazo da produção de hidrogênio solar e eólico. Preço de energia, área necessária de painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas, capacidade da usina de dessalinização, investimentos de capital, custo de operação e manutenção, impactos ambientais e, recentemente, produção de amônia também foram incluídos nesse modelo. No presente estudo, investigamos como a produção de amônia por hidrogênio solar e eólico pode impactar no mercado futuro de fertilizantes nitrogenados do estado do Ceará - Brasil.*

Palavras-chave: *Hidrogênio solar-eólico, Amônia, Fertilizantes nitrogenados.*

1. INTRODUÇÃO

Fertilizantes químicos, mecanização, melhoramento genético, controle químico de pragas, sistemas de processamento e armazenamento contribuíram para aumentar amplamente a produtividade na agricultura do século XX (Michalsky et al., 2012). Sem tais avanços e, em especial, sem fertilizantes nitrogenados, a agricultura seria capaz de apoiar um pouco mais da metade da atual população mundial. A agricultura, além de ser um usuário intensivo de combustíveis fósseis, também é um dos principais emissores de gases de efeito estufa do mundo e contribui com quase 14% de todas as emissões desse gás na atmosfera (Bardi et al., 2013).

Globalmente, mais de 100 milhões de toneladas de fertilizantes nitrogenados são usados todos os anos e sua produção consome muita energia, respondendo por 1,2% da demanda global de energia primária (Ahlgren et al., 2010). O componente básico na atual produção industrial de fertilizantes nitrogenados é a amônia, que utiliza gases nitrogênio e hidrogênio, com a reação geral sendo $N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$ sob a influência de um catalisador de óxido de ferro em um ambiente de pressões muito altas que variam de 100 a 250 bar e temperaturas moderadas variando de 350 °C a 550 °C (Tallaksen et al., 2015, Morgan et al., 2014). Embora a purificação de nitrogênio seja relativamente simples e economize energia, a geração de hidrogênio é um processo muito intenso em energia. Atualmente, o hidrogênio é mais frequentemente derivado de combustíveis fósseis e nitrogênio do ar. Basicamente, com base no processo de síntese Haber-Bosch, no mundo, cerca de 72% da amônia produzida é originada da reforma a vapor do gás natural, 22% da gaseificação de carvão, 4% do óleo combustível, 1% da nafta, 1% da nafta e 1% da amônia. outros (Bicer et al., 2016). Apenas 0,5% da amônia do mundo para fertilizantes é baseada no hidrogênio produzido pela eletrólise da água. Quando o gás natural é usado, são necessários 28-40 GJ por tonelada de NH_3 , emitindo até 2,3 toneladas de CO_2 por tonelada de NH_3 . Se o carvão for usado, os números são 16,7 a 165,9 GJ por tonelada de NH_3 e até 16,7 toneladas de CO_2 por tonelada de NH_3 , respectivamente (Michalsky et al., 2012).

O aumento constante do preço do gás natural e do carvão, seu esgotamento, particularmente o gás natural e as preocupações com as emissões de gases de efeito estufa, resultam em interesse na tecnologia de eletrólise da água, principalmente porque a energia renovável é uma expansão rápida e, conseqüentemente, mais competitiva, permitindo o processo de eletrólise para a produção de amônia (Morgan, 2013). De fato, no passado, a amônia era produzida a partir de hidrogênio eletrolítico em países onde a eletricidade estava disponível a baixo custo, por exemplo, de hidrelétricas na Noruega, Índia, Egito, Peru e Canadá. No entanto, essas plantas foram fechadas após o desenvolvimento de tecnologias eficientes para o uso de matéria-prima de hidrocarboneto (Tallaksen et al., 2015). Atualmente, o hidrogênio eletrolítico

é mais caro que o hidrogênio obtido a partir de hidrocarbonetos fósseis, mas a longo prazo o esgotamento progressivo de combustíveis fósseis está destinado a tornar o hidrogênio renovável mais conveniente e essa rota tem a vantagem de que as plantas existentes da Haber-Bosch poderiam ser mantidas e utilizadas sem grandes modificações (Bardi et al., 2013).

As implicações da produção de hidrogênio renovável para a síntese de amônia com excesso de energia eólica ou solar são vastas: a energia eólica ou solar reduzida pode ser convertida diretamente em amônia que pode ser usada como fertilizante para a agricultura ou como armazenamento de energia a granel para aplicações em redes. A amônia sintetizada usando energia renovável não estaria sujeita a flutuações nos mercados de combustíveis fósseis: seria estável a longo prazo, como os recursos renováveis usados para produzi-la. Preços de combustível estáveis também podem ser uma enorme vantagem econômica para as comunidades insulares dependentes de petróleo (Morgan et al., 2014). Área que não possui recursos de energia fóssil e, portanto, deve importar todo o seu fertilizante nitrogenado e, ao mesmo tempo, ter número suficiente de turbinas eólicas e/ou sistemas fotovoltaicos e cuja capacidade de produção de energia aumentou tanto que a rede elétrica regional existente se não puder aceitar energia de algumas turbinas ou sistemas fotovoltaicos durante o pico de produção, certamente aproveitará essa situação. Como a energia solar está disponível em todos os locais relevantes para a agricultura, ela representa o principal candidato a uma solução sustentável para alimentar um sistema distribuído de solução de fertilizantes nitrogenados (Du et al., 2015). Se a eletricidade fosse derivada da energia eólica ou solar, a amônia poderia ser sintetizada como um fertilizante ou combustível líquido livre de carbono, neutro em carbono.

O potencial de energia eólica do estado do Ceará, na região nordeste do Brasil, é estimado em 35 GW que, se efetivamente usado, corresponde a aproximadamente 40% da capacidade instalada de produção de energia elétrica no Brasil (Esteves et al., 2015). Atualmente, o estado do Ceará possui cerca de 1,4 GW de parques eólicos em operação. A maioria dos parques eólicos instalados e ainda a ser instalados no estado do Ceará está ou estará em seu litoral. Por outro lado, o estado do Ceará tem um potencial significativo para explorar a contabilidade da energia solar, de que a radiação solar média diária em um metro quadrado é de cerca de 5,7 kWh, uma das mais altas do território brasileiro. No ano de 2011, o estado do Ceará lançou uma usina solar privada e comercial de 1 MW na cidade de Tauá, a 350 km de sua capital, Fortaleza, e até o final do ano de 2016, havia cerca de 6 MW de sistemas fotovoltaicos instalados.

Os investimentos no campo da energia eólica são direcionados para a região costeira e os investimentos no campo da energia solar são direcionados para a região interior. Acontece que a região interior do estado do Ceará é a região onde ocorrem as atividades agrícolas e a maior parte do fertilizante necessário é importada. A cidade de Tauá localiza-se exatamente no centro de uma região onde são necessários fertilizantes e quais fertilizantes são importados de outras regiões do Brasil ou do mercado internacional. Em termos de logística, pode ser interessante ver a viabilidade da instalação de uma planta de amônia renovável no estado do Ceará, uma vez que existe uma disponibilidade abundante de energia solar e eólica e um mercado relativamente forte de fertilizantes nitrogenados no Brasil como um todo.

O principal objetivo do presente estudo foi realizar uma análise técnica-econômica a longo prazo da eventual utilização da energia fotovoltaica e eólica gerada no estado do Ceará para a síntese de amônia. O modelo matemático do sistema universal de energia de hidrogênio solar criado por Veziroglu e Basar (Patricio et al., 2012) foi adaptado para o estado do Ceará. Além do cálculo de diferentes parâmetros técnico-econômicos e ambientais, foram feitas estimativas de consumo de amônia no estado do Ceará e comparação de longo prazo do custo de produção de amônia com amônia com combustíveis fósseis convencionais.

2. FORMULAÇÃO DO MODELO

Em meados dos anos 70, Veziroglu e Basar apresentaram o modelo matemático para o cálculo a longo prazo de parâmetros técnicos, socioeconômicos e ambientais relacionados à introdução universal de hidrogênio solar como transportador de energia alternativa em vez de combustíveis fósseis. Após sua primeira aparição, o modelo foi aplicado a vários países e regiões como, por exemplo, Líbia, Paquistão, Egito, Espanha, Emirados Árabes, Brasil, Arábia Saudita e, mais recentemente, no estado do Ceará - Brasil (Sacramento et al., 2013). Basicamente, em sua versão original, para um país ou região de interesse, o modelo inter-relaciona parâmetros como população, demanda de energia, produção de energia, produto nacional ou doméstico bruto, taxas de produção de hidrogênio, importações de energia fóssil, preços mundiais de energia, poluição do ar, qualidade de vida, economia ambiental devido à maior eficiência na utilização de hidrogênio, crédito de subprodutos, renda agrícola, renda com a venda de hidrogênio, área de células fotovoltaicas, área total de terra, capacidade da usina de dessalinização de água, investimento de capital, custos de operação e manutenção e total renda do sistema.

3. DADOS E COMPUTAÇÃO

O ano inicial da simulação é 2000 e o período coberto se estende até o ano 2100. A energia solar-eólica gera hidrogênio para a produção de amônia no estado do Ceará. É simulado para início no ano 2020. Os dados iniciais para o mundo e para o estado do Ceará são mostrados na Tabela 1 (Patricio et al., 2013).

Tabela 1 - Dados iniciais para o mundo e para o Ceará.

DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS	VALORES PARA O MUNDO	VALORES PARA O CEARÁ
População	6,1 x 10 ⁹ habitantes	7,4 x 10 ⁶ habitantes
Demanda de energia	208,07 EJ	0,13 EJ
Demanda para fertilizantes nitrogenados		37,0 x 10 ³ ton
Produto interno bruto (PIB)	45 x 10 ¹² US\$	11,5 x 10 ⁹ US\$
Preço do hidrogênio	25,35 US\$/GJ	25,35 US\$/GJ
Preço do gás natural	9,11 US\$/GJ	9,11 US\$/GJ
Preço da amônia	27,11 US\$/GJ	27,11 US\$/GJ
Produção de gás natural	105,84 EJ	1,15 PJ
Importação de gás natural		0,69 PJ
Reversas de gás natural	6,52 x 10 ³ EJ	41,67 PJ
Produção de poluição	11,16 x 10 ¹² kg	48,3 x 10 ⁶ kg
Produção de energia do hidrogênio (ano de 2020)	3,2 EJ	2,75 TJ
Tempo de duplicação do crescimento populacional	59 anos	40 anos
Tempo de duplicação do crescimento da demanda de energia	36 anos	12 anos
Tempo de duplicação do consumo de energia para melhorar a qualidade de vida	92 anos	17 anos
Tempo de duplicação do produto interno bruto	22 anos	10 anos
Tempo de duplicação do produto bruto devido a avanços tecnológicos	57 anos	57 anos

Três taxas diferentes de tempo de duplicação de hidrogênio foram escolhidas para mostrar o efeito da introdução de hidrogênio na população, demanda de energia, produção bruta, poluição, produção de amônia etc.

$$\Theta_{hn} = 2,0 + 0,2(n-1) \quad (1)$$

$$\Theta_{hn} = 2,0 + 0,25(n-1) \quad (2)$$

$$\Theta_{hn} = \infty \quad (3)$$

Os tempos de duplicação dados pelas equações (1) e (2) representam as respectivas taxas de introdução rápida e lenta de hidrogênio, seguidas pelo caso em que o tempo de duplicação é igual ao infinito, correspondente à ausência de introdução de hidrogênio, em vez do gás natural para a produção de amônia.

Supõe-se que o hidrogênio solar-eólico para produção de amônia começará no ano de 2020 com a produção inicial de hidrogênio fornecida como $H_n = 2,75$ TJ/ano, o que corresponde a 2,42 toneladas de amônia por dia. O índice de eficiência de utilização η_f (eficiência de utilização de hidrogênio dividido pela eficiência de utilização de combustíveis fósseis) é considerado 1,36. A eficiência de conversão dos painéis fotovoltaicos é assumida como $\eta_{pv} = 0,13$; a eficiência do eletrolisador é assumida como $\eta_{el} = 0,75$ até o ano 2050 e $\eta_{el} = 0,90$ após esse ano, e a insolação média anual no estado do Ceará é assumida como $S_{av} = 7,5$ GJ/m²/ano. O coeficiente de impacto ambiental U e a proporção de poluição produzida por hidrogênio e por combustíveis fósseis ε são tomados em 4,74 kg/GJ e 0,04, respectivamente (Patricio et al., 2012). O processo de dessalinização da água do mar exigirá $2,48 \times 10^{-2}$ GJ de consumo de energia por m³ de água doce produzida. O consumo anual de água por eletrolisador por GJ de hidrogênio produzido é de 90×10^{-3} m³ de água por GJ de H₂. A demanda anual de água de irrigação por unidade de área é de $5,66 \times 10^5$ m³/km²/ano. A renda agrícola média anual por unidade de área é assumida como $4,0 \times 10^5$ US\$/km². O custo do dano ambiental por unidade de energia fóssil consumida é de 12,52 US\$/GJ. O crédito por oxigênio por GJ de hidrogênio produzido foi calculado em 3,50 US\$/GJ. O capital requerido pelo eletrolisador por GJ de hidrogênio produzido é dado em 3,40 US\$/GJ. O custo de armazenamento, compressão e transmissão de hidrogênio foi de US\$ 1,84 por GJ de hidrogênio produzido. Investimento de capital necessário para a usina de dessalinização por m³ de água 0,617 US\$/m³ de água doce. O custo anual de operação e manutenção por GJ de hidrogênio produzido necessário para eletrólise e armazenamento, compressão e transmissão, respectivamente, foi de 0,68 US\$/GJ e 0,4 US\$/GJ, respectivamente. O custo anual de O&M necessário para a usina de dessalinização por m³ de água é de 0,3 US\$/m³ de água doce. O capital anual necessário para a planta de produção de amônia é de 13,27 US\$/GJ e o custo anual de O&M necessário para a planta de produção de amônia é de 0,07 US\$/GJ de amônia produzida (Patricio et al., 2013).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Sacramento et al. 2013 desenvolveu estudos sobre a introdução de um sistema de energia de hidrogênio eólico solar para o estado do Ceará e avaliou as perspectivas de redução de emissões de poluentes de combustíveis fósseis. Utilizando o mesmo programa computacional do presente artigo, eles apresentaram avaliação de longo prazo das emissões de dióxido de carbono, metano, óxido de enxofre e óxido de nitrogênio desse estado quando o hidrogênio renovável substitui os combustíveis fósseis. Também foram estudados parâmetros como população, demanda de energia, produto interno bruto, preço de hidrogênio e combustíveis fósseis, produção de hidrogênio, demanda de energia fóssil, importação e produção, crédito para venda de subprodutos, aspectos ambientais e econômicos e indicador de qualidade de vida. por esses autores. Patrício et al. (2013), utilizando o mesmo código computacional do presente artigo, estudaram um sistema de energia de hidrogênio eólico visando a substituição gradual e a longo prazo do gás natural na matriz energética do estado do Ceará. A maioria dos resultados apresentados pelos quatro artigos acima mencionados não será reproduzida ou discutida aqui, exceto aqueles que são considerados significativos para análises no presente artigo.

Embora tenha sido atribuído três vezes a duplicação para a introdução de hidrogênio, como visto nas equações (1) a (3), que caracterizam cenários de introdução rápida, lenta e sem introdução de hidrogênio em uma região para a substituição de combustíveis fósseis, foi observado no presente estudo que, quando aplicado, não houve diferenças significativas no cálculo de todos os parâmetros entre os cenários de introdução rápida e lenta de hidrogênio ao substituir o gás natural para a síntese de amônia. Isso ocorreu devido ao fato de a demanda de fertilizantes nitrogenados no estado do Ceará não ser relativamente significativa se for feita em termos da demanda de energia desse estado, porque atualmente o gás natural corresponde a apenas cerca de 2% do total demanda energética do estado do Ceará e, principalmente, é utilizado como combustível de veículos automotores e na indústria. Portanto, os tempos de duplicação da introdução rápida e lenta de hidrogênio não causaram diferenças expressivas entre eles. Por esse motivo, apenas dois cenários serão considerados: o de introdução e o de não introdução de hidrogênio solar para a síntese de amônia no estado do Ceará.

A Figura 1 apresenta os recursos anuais de energia solar do estado do Ceará (Esteves et al., 2015). Observa-se que a irradiação solar nesse estado varia entre 5,25 e 6,25 kWh/m²/dia.

Existem regiões onde a irradiação solar apresenta valores mais altos do que outras regiões, como o semiárido central e as regiões de Inhamuns, com precipitação média anual inferior a 600 mm (desvio padrão de ±240 mm), atingindo valores tão baixos quanto 200 mm durante secas (Almeida et al., 2014). Esta é uma das razões do alto valor da irradiação solar nessa região. A região costeira recebe influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCT) e a região sul do Ceará recebe influências de frentes frias e vórtice ciclônico troposférico superior. Essa é também uma das razões pelas quais a região costeira desse estado recebe uma irradiação solar um pouco menor do que suas regiões montanhosas e interiores. Mesmo assim, é um alto nível de irradiação solar quando comparado a outras regiões do mundo.

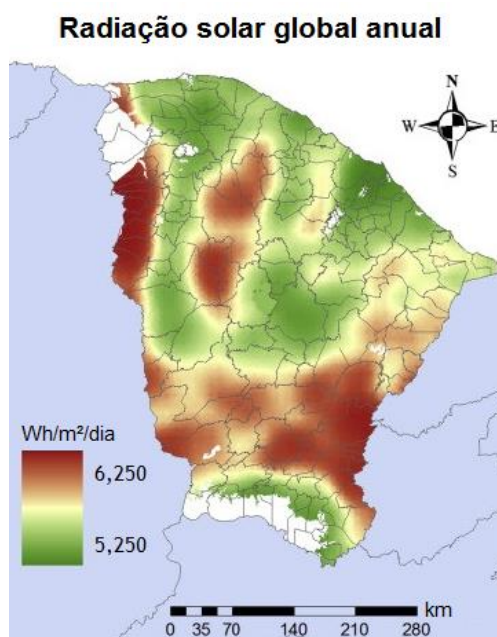


Figura 1 - Média anual de radiação solar diária no estado do Ceará.

Como pode ser observado na Figura 2, o recurso de vento do estado do Ceará é fortemente influenciado pelos ventos em tal estado, cuja direção é predominantemente do Leste nesta região. Há também um acoplamento durante o

dia entre a brisa do mar e os ventos alísios que intensificam o regime de ventos costeiros. As regiões com valores mais elevados são vistas na região costeira, bem como locais nas regiões montanhosas, como por exemplo, a Serra da Ibiapaba, localizada no oeste do estado do Ceará. Na região costeira desse estado, a 50 m acima do nível do solo, a velocidade anual do vento varia entre 6,0 e 8,5 m/s.

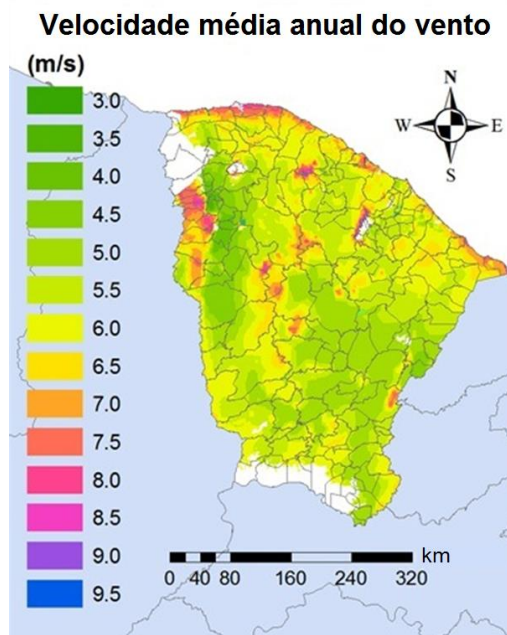


Figura 2 - Velocidade do vento a 50 m acima do nível do solo no estado do Ceará.

A Figura 3 apresenta a demanda projetada de fertilizantes nitrogenados no estado do Ceará até o ano 2100. No ano de 2000, o consumo de fertilizantes foi de cerca de 37.000 toneladas. Até o ano 2100, espera-se o consumo de mais de 400.000 toneladas de fertilizantes nitrogenados, se o Ceará continuar nas tendências dos últimos anos. Com a introdução do hidrogênio amônia por energia solar-eólica em 2020, a produção começará com 800 toneladas e, até 2057, a produção de fertilizantes nitrogenados derivados de amônia será de cerca de 400.000 toneladas. Se continuada, a produção de fertilizante nitrogenado derivado de hidrogênio eólico solar chegará a 2,2 milhões de toneladas até o ano 2100.

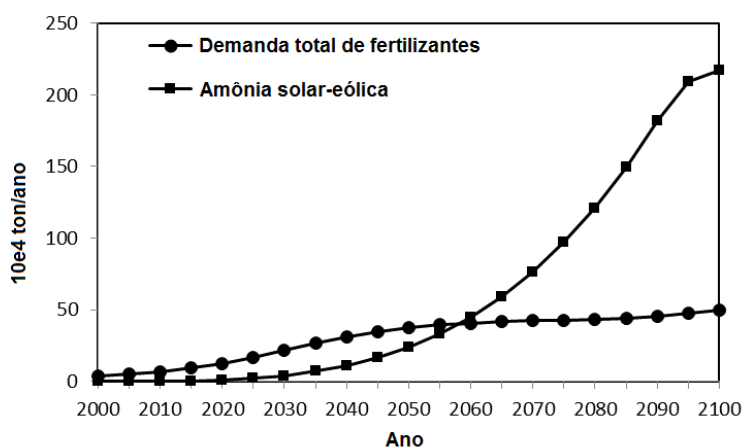


Figura 3 - Demanda de fertilizantes e produção de amônia no estado do Ceará.

Sabe-se que uma planta de amônia totalmente elétrica à base de hidrogênio eólico solar enfrentará uma série de desafios técnicos. Embora atualmente haja uma redução abrupta no custo de energia renovável, possibilitando a produção verde de amônia pelo menos do ponto de vista econômico, sua intermitência pode causar catalisador de envenenamento devido à sensibilidade ao oxigênio do processo Haber Bosch, que ainda é hoje em dia, o processo mais desenvolvido de produção de amônia. Outros desafios são: o desenvolvimento de reduções econômicas para escalas regionais ou locais, para evitar a necessidade de redes de transporte, robustez e resiliência a perturbações ou interrupções de serviços públicos, operabilidade intermitente a partir de recursos renováveis intermitentes e simplicidade tecnológica (Pfromm, 2017). Após os preços da eletricidade e o tamanho da planta, altos fatores de carga

seriam o próximo fator importante para as usinas de amônia. Essa é outra razão pela qual novas oportunidades de produção de amônia baseadas em energia solar e eólica devem ser consideradas na área de melhores recursos e o estado do Ceará é um exemplo delas (Philibert, 2017).

Por outro lado, também existe um problema de disponibilidade de água, principalmente pelo fato de o estado do Ceará estar localizado em uma região semiárida do nordeste brasileiro. A ideia da presente proposta é produzir hidrogênio derivado da água do mar dessalinizada, pois o estado do Ceará possui uma extensão costeira de cerca de 580 km. Até o ano 2060, o estado do Ceará estará produzindo cerca de 400.000 toneladas de amônia e essa quantidade precisará de cerca de 650.000 metros cúbicos de água com alto grau de pureza para alimentar os eletrolisadores. Conforme destacado por Philibert (2017), apenas o processo de compressão mecânica de vapor (CMV) pode fornecer grande quantidade de água com grau de pureza suficiente.

A Figura 4 apresenta a taxa de poluição adimensional em função do tempo. Pode-se observar que, se não for introduzido hidrogênio solar-eólico para a produção de amônia, a poluição aumentará e por volta de 2060 será 8 vezes o valor da poluição em 2000. A introdução de hidrogênio de energia renovável para a produção de amônia em vez de gás natural reduziria a taxa de poluição para cerca de 0,5 após aquele ano. As emissões de poluentes como CO₂, NO_x, SO₂ e CO serão de 680.000, 520, 4 e 12 toneladas, respectivamente, se a produção de amônia ainda continuar com gás natural. Outros materiais e emissões como catalisadores desperdiçados, amônia em si, metanol e aminas também serão liberados para o meio ambiente (Morgan, 2013).

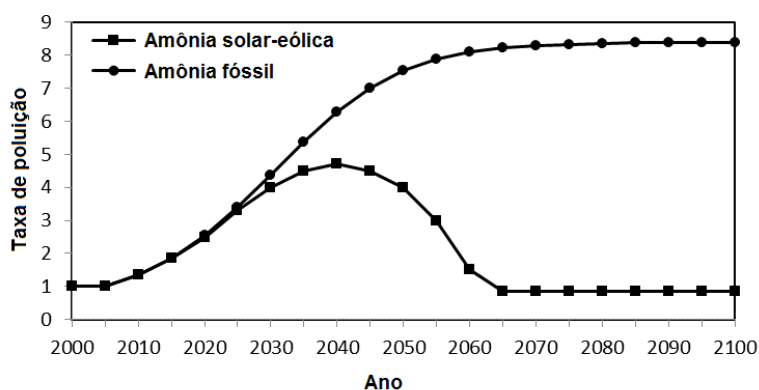


Figura 4 - Taxa de poluição.

Supondo que 54 kWh por kg de hidrogênio entregue a 30 bar e 234 kWh por tonelada de nitrogênio entregue a 40 bar, resulta em cerca de 10.200 kWh para produzir uma tonelada de amônia (Tallaksen et al., 2015; Pfromm, 2017). O hidrogênio consumirá 93,5%, o nitrogênio 0,7%, a Haber-Bosch consumirá 5,5% e a compressão mecânica de vapor (CMV) para dessalinização da água do mar consumirá 0,3%, respectivamente, desse total (Morgan, 2013).

A Figura 5 mostra o preço da amônia por tonelada durante o período estudado. O preço oficial da amônia a gás natural no ano de 2000 estava na média de cerca de US\$ 200 por tonelada (Schnitkey, 2016). Naquele ano, o presente estudo mostra que a energia solar-eólica produzia amônia a cerca de US\$ 950 por tonelada. Por volta do ano 2025, o preço da amônia derivada de combustível fóssil será praticamente igual ao preço de cada tonelada de amônia solar-eólica produzida nesse estado. No final do período estudado aqui, o preço da amônia derivada de combustível fóssil alcançará cerca de US\$ 500 por tonelada, enquanto a amônia eólica solar produzida no estado do Ceará alcançará cerca de US\$ 300 por tonelada.

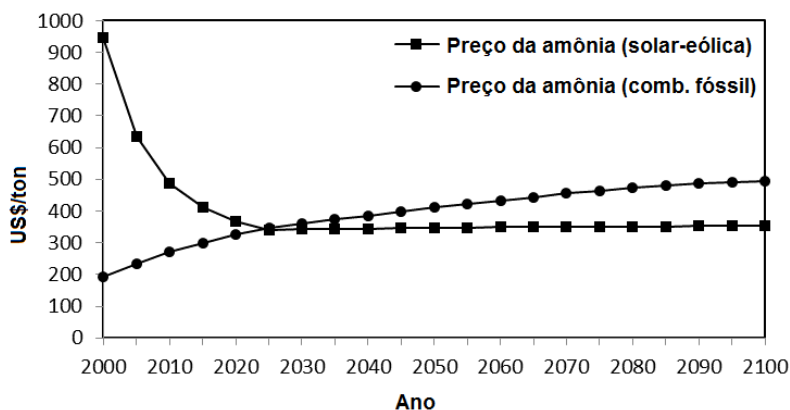


Figura 5 - Preços da amônia.

5. CONCLUSÕES

O uso mundial de gás natural como matéria-prima para a produção de amônia pressionará o preço dos fertilizantes nitrogenados, porque esse combustível fóssil está a caminho do esgotamento total. Embora ainda existam muitos desafios tecnológicos a serem enfrentados e custos relativamente altos, o hidrogênio solar-eólico para a produção de amônia apresenta perspectivas otimistas em um futuro próximo para regiões onde essa energia renovável é abundante.

Os resultados do presente estudo mostram o alto potencial do estado do Ceará na produção de amônia derivada do hidrogênio solar-eólico, com o objetivo de abastecer o mercado de fertilizantes nitrogenados no Brasil.

REFERÊNCIAS

- Ahlgren, S., Bernesson, S., Nordberg, A., Hansson, P. A., 2010. Nitrogen fertilizer production based on biogas – Energy input, environmental impact and land use, *Bioresource Technology*, vol. 101, pp. 7181-7184.
- Almeida, G. P., Borrmann, S., Leal Junior, J. B. V., 2013. Cloud condensation nuclei (CCN) concentration in the Brazilian northeast semi-arid region: the influence of local circulation, *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 125, n. 3-4, pp. 159-176.
- Bardi, U., El Asmar, T., Lavacchi, A., 2013. Turning electricity into food: the role of renewable energy in the future of agriculture, *Journal of Cleaner Production*, vol. 53, pp. 224-231.
- Bicer, Y., Dincer, I., Zamfirescu, C., Vezina, G., Raso, F., 2016. Comparative life cycle assessment of various ammonia production methods, *Journal of Cleaner Production*, vol. 135, pp. 1379-1395.
- Du, Z., Denkenberger, D., Pearce, J. M., 2015. Solar photovoltaic powered on-site ammonia production for nitrogen fertilization, *Solar Energy*, vol. 122, pp. 562-568.
- Esteves, N. B., Sigal, A., Leiva, E. P. M., Rodríguez, C. R., Cavalcante, F. S. A., Lima, L. C., 2015. Wind and solar hydrogen for the potential production of ammonia in the state of Ceará – Brazil, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, pp. 9917-9923.
- Michalsky, R., Parman, B. J., Boadu, V. A., Pfromm, P. H., 2012. Solar thermochemical production of ammonia from water, air and sunlight: thermodynamic and economic analyses, *Energy*, vol. 42, n. 1, pp. 251-259.
- Morgan, E. R., 2013. Techno-economic feasibility study of ammonia plants powered by offshore wind, Tese de Doutorado, University of Massachusetts, Amherst.
- Morgan, E. R., Manwell, J., McGowan, J., 2014. Wind-powered ammonia fuel production for remote islands: A case study, *Renewable Energy*, vol. 72, pp. 51-61.
- Patricio, R. A., Sales, A. D., Sacramento, E. M., Lima, L. C., Veziroglu, T. N., 2012. Wind hydrogen energy system and the gradual replacement of natural gas in the State of Ceará – Brazil, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, n. 9, pp. 7355-7364.
- Patricio, R. A., Batista, N. E., Duarte, J. B. F., Lima, L. C., 2013. Solar-hydrogen generated ammonia for the synthesis of nitrogen fertilizers in the state of Ceará – Brazil, 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM), Ribeirão Preto.
- Pfromm, P. H., 2017. Towards sustainable agriculture: Fossil-free ammonia, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 9, n. 34702, pp. 1-11.
- Philibert, C., 2017. Producing ammonia and fertilizers: new opportunities from renewable. Disponível em: <https://www.iea.org/media/news/2017/FertilizermanufacturingRenewables_1605.pdf>. Acesso em: 25.05.18.
- Sacramento, E. M., Carvalho, P. C. M., Lima, L. C., Veziroglu, T. N., 2013. Feasibility study for the transition towards a hydrogen economy: a case study in Brazil, *Energy Policy*, vol. 62, pp. 3-9.
- Schnitkey, G., 2016. Anhydrous ammonia, corn, and natural gas prices over time, *Farmdoc daily*, vol. 6, n. 112, Department of Agricultural and Consumer Economics, University of Illinois, Urbana-Champaign.
- Tallaksen, J., Bauer, F., Hultheberg, C., Reese, M., Ahlgren, S., 2015. Nitrogen fertilizers manufactured using wind power: greenhouse gas and energy balance of community-scale ammonia production, *Journal of Cleaner Production*, vol. 107, pp. 626-635.

SOLAR-WIND HYDROGEN FOR THE PRODUCTION OF NITROGEN FERTILIZERS IN THE STATE OF CEARÁ – BRAZIL

Abstract. *The mathematical model of the universal solar hydrogen energy system created by Veziroglu and Basar was extended for the feasibility study of producing ammonia as main component for the synthesis of nitrogen fertilizers in the state of Ceará – Brazil. The adapted model considers interrelationships of parameters such as population, energy demand, gross internal product per capita of the region where it is applied and makes long term estimates of the production of solar and wind hydrogen. Price of energy, necessary area of photovoltaic panels and wind turbines, capacity of desalination plant, capital investments, cost of operation and maintenance, environmental impacts and recently production of ammonia was also included in such model. In the present study it is investigated how the production of ammonia through solar and wind hydrogen can impact on the future market of nitrogen fertilizers of the federal state of Ceará in Brazil.*

Keywords: *Solar-wind hydrogen, Ammonia, Nitrogen fertilizers.*