

## **Faz sentido pensar em etanol como fonte sustentável de hidrogênio verde - H2V ?**

Antonio Alvaro de Souza Camargo<sup>1</sup>

O hidrogênio é o elemento mais leve e abundante do universo visível. Na terra ele praticamente não existe em sua forma pura nas condições normais de temperatura e pressão - o gás H<sub>2</sub>. Assim mesmo o H é amplamente disponível na biosfera já que ele está na H<sub>2</sub>O (água), na biomassa (C 48%; H 6%; O 45%), no gás natural (CH<sub>4</sub>), no petróleo C<sub>n</sub>H<sub>x</sub> etc.

### **O hidrogênio é uma substância de contrastes**

Sendo o menor átomo, sua molécula é muito pequena e leve (1/14 da densidade do ar) e seu armazenamento como gás para uso veicular precisa ser feito com pressão entre 700 bar e 800 bar, condição que garante que ele terá boa chance de vazar. Como o H<sub>2</sub> ao ar livre queima a 2000 °C em chama invisível, imagine um acidente com veículo movido a hidrogênio dentro de um túnel? Ou mesmo um vazamento em garagem mal ventilada? A tecnologia resolverá isto, mas sua adoção não será trivial.

### **Densidade energética é o maior desafio ao uso do hidrogênio**

Nada tem mais energia por unidade de massa que hidrogênio: ao redor de 120 MJ/kg, contra 44 MJ/kg para a gasolina e 47 MJ/kg para gás natural (PCI). Por outro lado, a densidade energética do hidrogênio base é baixíssima sob qualquer métrica: como gás são 10,8 MJ/Nm<sup>3</sup> contra 36,6 MJ/Nm<sup>3</sup> para o gás natural. Já para o H<sub>2</sub> líquido são 8,5 MJ/litro contra os 32,34 MJ/litro da gasolina e os 35,8 MJ/litro para o diesel e o QAV (querosene de aviação). O litro do hidrogênio líquido (-253 °C) tem apenas 23,7% da energia do litro do QAV, mostrando o enorme desafio, por exemplo, em usá-lo para descarbonizar a aviação de média e longa distância. Todos os valores PCI.

---

<sup>1</sup> Engenheiro Químico pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e pós-graduado em Sistemas de Controle de Emissões Gasosas e Líquidas pelo College of Environmental Science and Forestry - State University of New York, Syracuse NY. Ex-pesquisador do IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas em SP.

## **1) O BioEtanol como fonte de H2V via reforma catalítica com vapor d'água**

Embora o bioetanol tenha algumas vantagens como veículo para armazenar e transportar hidrogênio verde - não é tóxico, é líquido à temperatura ambiente e já possui infraestrutura para produção e distribuição em larga escala nos EUA, Brasil, Índia e outros locais - apenas 13,04% da sua massa é hidrogênio contra 17,65% na amônia e 25% no biometano.

Provavelmente o método mais adequado para a produção de H<sub>2</sub> a partir de 1 litro de bioetanol seja sua reforma catalítica na presença de 1,5 litro de vapor d'água, realizada a temperaturas entre 500 e 780 graus celsius. Esta reação que demanda adição de energia externa pode ser resumida pela fórmula  $C_2H_5OH + 3H_2O \rightarrow 2CO_2 + 6H_2$ . Não é objetivo aqui discutir esta reação que depende de muitas alternativas de catalisadores, tipos de reator e temperatura em que ocorre. Mas não estamos longe da realidade se afirmarmos que de modo geral um mol de etanol (46 g) que contém 6 mols de H (6 g) deverá produzir através deste processo ao redor de 4 g de hidrogênio com taxa de conversão na faixa de 60% a 67%<sup>2</sup>.

Ou seja, em média quatro átomos de hidrogênio dos seis disponíveis na molécula do etanol devem ser extraídos. Há, no entanto, necessidade de se testar estas taxas de conversão em sistemas com escala industrial. Só assim conheceremos a realidade e eficiência desta tecnologia. Crucial lembrar aqui que cana de açúcar é um painel solar natural que energiza o processo de fotossíntese que depende ainda de nutrientes e muita água. A atratividade do etanol como via para o H<sub>2</sub>V dependerá muito do seu rastro ambiental. Plantas C<sub>4</sub>, adaptadas a temperaturas elevadas, alta absorção de CO<sub>2</sub> e menos perda de água, como a cana, milho e capim elefante, transformam luz em biomassa acima do solo com alta eficiência, entre 0,80% e 0,95%. No caso da cana em média 0,94% da energia na luz solar termina armazenada na biomassa acima do solo. Açúcares são 1/3 da biomassa seca da cana de modo que apenas uns 0,21% da luz solar vira etanol de fato.

### **A produtividade do H2V quando feito a partir do etanol de cana do Brasil.**

Segundo planilha da CONAB da safra 2019/2020, o estado de SP produziu 16.489 bilhões de litros de etanol a partir de 2,555 milhões de hectares, resultando numa

---

<sup>2</sup> Investigation of the Reaction Network in Ethanol Steam Reforming over Supported Cobalt Catalysts - Hua Song, The University of Calgary, Canada; Umit S. Ozkan, The Ohio State University, EUA (Article in Industrial & Engineering Chemistry Research · October 2010).

produtividade de 6.453 L etanol/ha-ano. Este volume de etanol à densidade média de 0,803 kg/L no mix de produção entre hidratado e anidro (2:1) resulta numa produção em massa de 5.182 kg etanol/ha-ano. Como o hidrogênio responde por 13,04% da massa do etanol, então temos 675,9 kg de H<sub>2</sub>/ha-ano embarcados nas moléculas do etanol produzido. Através da reforma catalítica a vapor espera-se extrair e armazenar em média 65% do hidrogênio do etanol, resultando em 440 kg de H<sub>2</sub>/ha-ano por esta via. Pode até passar de 440 kg de H<sub>2</sub>/ha-ano, mas ao custo de demandar mais água em relação ao volume de etanol além de possível gasto extra de energia externa.

## **2) A produção de H<sub>2</sub>V a partir de eletrólise de água movida por eletricidade solar FV**

O índice de radiação solar no interior do estado de SP, em áreas onde os canaviais predominam - latitudes iguais ou menores que as de cidades como Piracicaba, São Carlos, Sertãozinho, Ribeirão Preto entre outras - gira em torno de 5.400 Wh/m<sup>2</sup>-dia. Esta radiação e abundância de água faz o estado de São Paulo o maior produtor de cana do Brasil.

Uma usina solar fotovoltaica com potência total de painéis fixos de 850 kWp (corrente contínua) e saída de 650 kW (corrente alternada), construída em 1 hectare na região de Sertãozinho, SP, produzirá por volta de 1.330 MWh/ano de energia elétrica c.a. (1565 MWh/MWp/ano).

Como referência o sistema para eletrólise de água Silyzer 300 da Siemens - que pode produzir até 2000 kg de H<sub>2</sub>/hora - tem eficiência declarada pela empresa de 75%, baseados no PCS do Hidrogênio. Partindo desta premissa nosso hectare fotovoltaico seria capaz de produzir ao redor de 997,5 MWh de H<sub>2</sub>/ano (3,591 milhões de MJ ou 25.650 kg de H<sub>2</sub>). Assumindo por segurança mais 10% de perdas diversas, este sistema fotovoltaico ainda produzirá 3,232 milhões de MJ de hidrogênio ou mais de 23.000 kg de H<sub>2</sub>/ha-ano. Mesmo assim são números conservadores. É plenamente possível se colocar 1.000 kWp (800 kW c.a.) em um hectare o que resultaria em 1.565 MWh/ano, suficientes para produzir 27.000 kg de H<sub>2</sub> sob as mesmas premissas. Mas por questão de prudência, segue-se com os mesmos 23.000 kg/ano de H<sub>2</sub> da usina com 850 kWp.

### **Agora, quão verde de fato será o “HIDROGÊNIO VERDE”?**

*De Etanol*

Em fevereiro de 2010 a EPA (Environmental Protection Agency) dos EUA publicou uma revisão importante do seu RFS (Renewable Fuel Standard),

chamado de RFS-2, que talvez ainda seja o mais completo estudo sobre o ciclo de vida do etanol brasileiro.

Nele a ACV (análise do ciclo de vida) do etanol no Brasil produzido apenas pela fermentação dos açúcares (sem produção de etanol celulósico adicional a partir da palha da cana) sofreu importante alteração para melhor. O estudo indicou que a redução real de emissões (kg CO<sub>2</sub>e/do nosso etanol frente às emissões do ciclo de vida da gasolina padrão americana de 2005 seria de 61% e não dos 44% da avaliação inicial de 2008, contestada pelos brasileiros do setor e pela Embrapa. A nova leitura fez nosso etanol ser classificado pela EPA como “Advanced Renewable Fuel”, aquele que reduz em 50% ou mais as emissões frente à gasolina, índice que o etanol de milho não atinge. Os 61% renováveis do etanol do Brasil estão perto do topo da cena mundial de biocombustíveis, perdendo apenas para óleo vegetal de cozinha usado. Mas os 61% relembram também que não há energia 100% renovável por qualquer via.

Sabemos que 1 hectare de cana 5.180 kg de etanol que resultam em 440 kg de H<sub>2</sub> por ano. O carbono contido neste etanol produzirá 9.908 kg de CO<sub>2</sub> dos quais 39% seriam não-renováveis: 3.864 kgCO<sub>2</sub>/ano.

Para o etanol teremos emissões que somam 3864/440: 8,78 kgCO<sub>2</sub>/kg de H<sub>2</sub>

#### *De Sistema Solar Fotovoltaico*

Uma ACV de painéis solares de alta eficiência (20,1%) foi desenvolvida por time do Brookhaven National Laboratory do DOE dos EUA, pelo Center for Life Cycle Analysis da Columbia University e pela SunPower, fabricante dos painéis estudados.

Em termos gerais esta ACV considerou a energia primária usada em todas as fases da produção nas Filipinas - das minas ao descomissionamento - de 248.652 painéis fotovoltaicos de 1,62 m<sup>2</sup> e 327 watts cc. A matriz energética nas Filipinas na época do estudo - bem representativa da Ásia - era formada por carvão (25,9%); óleo (8,0%); gás (32,2%); hidro (16,2%) e geotérmica (17,7%), que resultou no total de 281 kgCO<sub>2</sub>e por m<sup>2</sup> de painel fabricado. Segundo o estudo o painel da SunPower devolve a energia usada em sua fabricação nas Filipinas em 1,4 ano. Mantendo os 850 kWp da usina solar no estado de SP que adotamos para o H<sub>2</sub>V (painel c/ efic. 16%) e compensando para maior eficiência do painel SunPower (efic. 20%), chegamos ao redor de 3.370 m<sup>2</sup> de painéis que se traduzem em 946.970 kgCO<sub>2</sub>e usados em sua fabricação segundo o estudo. O ideal é distribuir as emissões totais ao longo dos 30 anos de operação da usina solar, o que resulta em 31.566 kCO<sub>2</sub>/ano para a produção de 23.000 kg de H<sub>2</sub>.

Para a FV o resultado é 31.566 kCO2e-ano/23.000 kgH2 = 1,37 kgCO2e/kg de H2.

## CONCLUSÃO

Dois processos distintos – de um lado a reforma catalítica com vapor do etanol de cana obtido via fermentação e do outro a hidrólise de água a partir de eletricidade solar fotovoltaica – ambos operando a partir da mesma fonte de energia primária - os 1.972 kWh/m<sup>2</sup>-ano (5400 Wh/m<sup>2</sup>-dia) fornecidos pelo sol - produzem resultados muito diferentes na hora de produzir H2. Do ponto de vista do uso da terra, usar solar fotovoltaica ao invés de etanol para a produção de H2 verde reduz o impacto ambiental em termos de mudança do uso do solo em mais de 52X! Porque esta é a redução de área que a via fotovoltaica permite em relação ao etanol de cana para atingir a mesma produção de H2 verde. Estes números podem ser vistos na tabela seguir.

| DADOS PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR DE ENERGIA SOLAR NO ESTADO DE SP |                   |                        |                     |                      |                   |
|---|-------------------|------------------------|---------------------|----------------------|-------------------|
|   | RADIAÇÃO SOLAR    | PRODUTO                | MASSA DE HIDROGÊNIO | PRODUÇÃO FINAL DE H2 | EFICIÊNCIA SOL-H2 |
| H2 de Etanol via reforma catalítica   | 19.710 MWh/ha-ano | 5.182 kg etanol/ha-ano | 675,9 kg/ha-ano     | 440 kg/ha-ano        | 0,087%            |
| H2 de usina fotovoltaica via eletrólise                                     | 19.710 MWh/ha-ano | 1.330 Mwhe/ha-ano      |                     | 23.000 kg/ha-ano     | 4,555%            |

Em termos de emissões a vantagem é da FV também, mas de 6,4x.

A energia eólica é solução que se equipara à solução solar fotovoltaica porque ambas já são produzidas em alguns países a preços inferiores a USD 0,03/kWh. São as cotações mais baixas hoje disponíveis, inferior a carvão e gás natural. Usinas nucleares são excelente opção também em termos de sustentabilidade. O problema com elas são sempre os cronogramas de construção e conexão à rede que, geralmente, ultrapassa a data prevista em contrato em muitos anos, às vezes décadas.