

requieren de compresores para generar hidrógeno a 160 bar, no requiere electrolítico líquido pues utiliza membrana de intercambio protónico como electrolito sólido.

PREGUNTAS Y RESPUESTAS CLASE 3

1. SI BIEN SE CONSIDERA LA TURBINA A GAS CON HIDRÓGENO PRINCIPALMENTE PARA REEMPLAZAR A ALGUNOS SISTEMAS ENERGÉTICOS ESTACIONARIOS HABIENDO TECNOLOGÍAS DISPONIBLES A NIVEL COMERCIAL, ¿NO ESTÁ LA TECNOLOGÍA PARA APROVECHAR TÉRMICAMENTE LA COMBUSTIÓN DEL HIDRÓGENO COMO EN UNA CALDERA O CÁMARA DE COMBUSTIÓN INDUSTRIAL, APLICANDO EL CICLO RANKINE EN VEZ DE UNA TURBINA A GAS?

De hecho, si existen sistemas de hidrógeno que permiten hibridar las calderas haciendo que funcionen con una combinación mixta del combustible primario (gas natural, biomasa, combustibles fósiles sintéticos) más hidrógeno convirtiendo así una caldera estándar en un híbrido que permite ahorrar combustible y eliminar gran parte de las emisiones de gases CO₂. En general se están haciendo ensayos aún para adaptar, en específico, calderas pirotubulares alimentadas con hidrógeno como combustible (en combinación con gas natural y otros combustibles fósiles).

Aún no es una tecnología masificada en cuanto a sus volúmenes de manufacturación, dado que el sector es bastante difícil de descarbonizar debido a los menores costos de capital que proveen las calderas convencionales a gas natural. A medida que se va aumentando el porcentaje de hidrógeno que se desea inyectar a una caldera convencional que inicialmente se diseñó para funcionar a gas natural, se debe evaluar una eventual modificación de los quemadores y de los materiales de recubrimiento de la cámara de combustión. En este sentido se están diseñando, y ya probando en calderas, quemadores de hidrógeno catalítico para su funcionamiento con combustible dual (hidrógeno + gas natural) dentro de estas cámaras de combustión catalítica que estarían representando una innovación en las calderas de condensación.

2. CAMILA NIÑO MENCIONÓ EN EL CASO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA QUE SIEMENS ESTÁ APUNTANDO EL DESARROLLO DE TURBINAS A GAS QUE SEA 100% CON H₂ MÁS QUE HACIENDO MEZCLA POR VARIAS RAZONES. DESPUÉS CAMILA MENCIONÓ QUE HAY MÁS GENERACIÓN DE NO_x, PERO NO QUEDÓ CLARO SI UNA CONFIGURACIÓN 100% CON H₂ ES PEOR EN TÉRMINOS DE ESTE TIPO DE EMISIONES. POR FAVOR ACLARAR.

Cuando inyectas H₂ como combustible a una turbina a gas, si bien estar reduciendo, en específico, gases de efecto invernadero del tipo CO₂, no es esto lo que sucede con la emisión de gases NO_x (gases óxido nitroso sumamente contaminantes y nocivos, catalogados dentro de los gases de efecto invernadero). El problema que están viendo las grandes empresas líderes en esta adaptación de la tecnología de turbinas a gas con hidrógeno, como lo son Siemens o General Electric, es que a medida que se va aumentando el contenido de hidrógeno (en % volumétrico) al contenido de gas natural que utiliza la turbina para la combustión (combustible), se aprecia que disminuyen las emisiones de gases CO₂ y aumentan las

emisiones de gases NOx, esto se debe a la temperatura que alcanza la llama en la cámara de combustión. De hecho, esto también sucede con las turbinas a gas que funcionan con 100% gas natural, éstas en particular emiten NOx al ambiente, pero en considerables menores cantidades que las turbinas a gas que se están empezando a adaptar con porcentajes cada vez más crecientes de hidrógeno como combustible.

El aumento en las emisiones de NOx tiene una dependencia directa de la temperatura de la llama de combustión que se genera en la cámara de combustión, a mayor temperatura de llama, mayor serán las emisiones de NOx que se emitirán. Es por ello que existen distintas clases de quemadores cuyo objetivo está centrado en reducir la temperatura de la llama de combustión para poder reducir la emisión de NOx (quemadores que utilizan distintas etapas para generar la pre-mezcla entre combustible y comburente logrando así acondicionarla para disminuir su temperatura, quemadores que utilizan agua para disminuir la temperatura de llama y quemadores con tecnología “llama de difusión”, siendo estos últimos los quemadores que menos reducen las temperaturas de llama).

Ahora, cómo se explicó en la primera parte de la clase 3, la combustión entre aire e hidrógeno genera una llama de combustión con una temperatura 3 veces mayor que la llama de combustión que genera la mezcla aire y gas natural. Esta es la razón por la que las emisiones de NOx son mucho mayores y aumentan casi exponencialmente a medida que se va agregando un volumen más considerable de hidrógeno versus el volumen de gas natural como combustible.

Para evitar el aumento en las emisiones de NOx en turbinas de gas a hidrógeno se ha trabajado en inyectores de pre-mezcla cilíndricos rotativos (con anillos largos en su interior) cuyo objetivo es reducir las temperaturas de llamas por combustión de combustibles que posean mezcla entre hidrógeno y gas natural o que sean 100% de hidrógeno.

3. PREGUNTA PARA MARÍA DE LOS ÁNGELES, NO SE VIO EN EL MAPA DE TRABAJO NORMATIVO QUE HABLE DE MOVILIDAD. POR EJEMPLO, ESTO DEBIERA CONSIDERAR EL PODER HOMOLOGAR FCEV EN EL 3CV (LIVIANOS, MEDIANOS, PESADOS) PARA QUE PUEDAN SER COMERCIALIZADOS. ¿ESTÁ EN LAS CONVERSACIONES?

Así es, eso no se vio reflejado en los estudios del mapa normativo, dado que el objetivo de los estudios fue la regulación de seguridad que es competencia del Ministerio de Energía. El trabajo que realiza el 3CV corresponde al Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (MTT). Actualmente estamos trabajando con los diferentes servicios públicos que tienen o tendrán alguna relación con el hidrógeno y que son claves para el desarrollo de diferentes tipos de proyectos, como es para el caso vehicular el MTT y el 3CV.

4. ¿SI SE NORMA FINALMENTE EL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE, DEBERÁ INGRESAR UN PROYECTO QUE QUIERA UTILIZAR ESE COMBUSTIBLE AL SEIA?

Ya sea como sustancia peligrosa o combustible, un proyecto con H2 deberá presentarse al SEIA. Actualmente estamos trabajando en un estudio que realizará un levantamiento de información sobre posibles y eventuales impactos de carácter ambiental, la forma en que estos deben ser manejados, y la tramitación ambiental y sectorial chilena a la cual se deberán

someter para el normal desarrollo e implementación de proyectos futuros de Hidrógeno Verde, que contemplen durante su ejecución cualquier etapa de la cadena de valor: generación, almacenamiento, acondicionamiento, transporte y consumo de Hidrógeno Verde.

5. SI H2 ESTÁ REGULADO COMO SUSTANCIA PELIGROSA, ¿UNA PLANTA DE GENERACIÓN DE H2 SE DEBE REGIR EN ESTO?, ¿INDEPENDIENTE SI SU USO SERÁ DIRECTO O BIEN PARA CREAR OTRA SUSTANCIA COMO AMONIACO?, ¿LA SEC DEBE AUTORIZAR ESTE TIPO DE PROYECTO O SE VE CON MINSAL?

Actualmente al ser el hidrógeno considerado como sustancia peligrosa, su producción, independiente de cuál será su uso, debe ser autorizado por el MINSAL. Ahora bien, si es un proyecto que contempla más que producción y utilizará como combustible, esto debe ser autorizado por la SEC. Esto puede ser un poco confuso, por lo mismo es que estamos trabajando en el manual de cómo presentar estos proyectos y quién debe autorizar.

6. PARA REGULACIÓN EN TRANSPORTE, ACTUALMENTE HAY POCO (CASI NADA) RELACIONADO CON VEHÍCULOS ELÉCTRICOS, O POR LO MENOS EN REGIONES NO SE REALIZA REVISIÓN TÉCNICA EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS, COMO SE CONTRASTA CON LO QUE QUIEREN HACER PARA H2.

Uno de los puntos levantadas en el estudio regulatorio es justamente trabajar en la modificación al Manual existente de revisión técnica donde se incluirían los vehículos a hidrógeno gaseoso.

7. SOBRE LAS TECNOLOGÍAS H2 Y LAS OPCIONES DE APLICACIÓN EN EL MERCADO, ¿EXISTE(N) ALGUN(OS) ESTUDIO(S) SOBRE LA VIDA ÚTIL DE LOS VEHÍCULOS (AUTOS, MONTACARGAS, TRACTORES, OTROS) QUE FUNCIONARÍAN CON CELDAS DE COMBUSTIBLE H2 EN COMPARACIÓN A LA VIDA ÚTIL DE VEHÍCULOS A COMBUSTIBLE FÓSIL, BIOETANOL U OTROS? UNA ESPECIE DE TABLA CON UN PARALELO EN NÚMERO DE AÑOS O ALGO ASÍ, O SI ESTE FACTOR NO SE CONSIDERA TAN RELEVANTE Y POR QUÉ. PLANTEO LA PREGUNTA PENSANDO EN QUE PARA QUE LA TECNOLOGÍA SEA REALMENTE SOSTENIBLE TODA LA CADENA DE PRODUCCIÓN Y UTILIZACIÓN DEBERÍA SERLO (ES DECIR, DESINCENTIVAR EL RECAMBIO FRECUENTE). GRACIAS.

La vida útil de las tecnologías correspondientes a vehículos cuyos trenes de fuerza funcionan en base a celdas de combustible + batería o en base a motores de combustión interna depende en esencia de la vida útil de sus componentes internos. En general la vida útil de un motor a combustión interna es de 25 mil horas, mientras que la vida útil de una celda de combustible (dependiendo del tipo de celda combustible al que se refiera) cae dentro del rango de 40 mil a 80 mil horas, el valor específico de vida útil de las celdas dependerá fuertemente del tipo de combustible que se utilice y del proceso de reformado por el cual muchas veces se hace necesario hacer pasar al combustible, para así evitar corrosiones en los electrodos y membranas electrolíticas que poseen muchas configuraciones de celdas de combustible.

En este sentido existen estudios que indican que la vida útil de las celdas de combustible es mayor cuando existe un proceso de reformado previo del combustible (cuando este es bioetanol u otros tipos de combustibles fósiles), la vida útil se alarga aún más cuando se logra tener como combustible hidrógeno diatómico de alta pureza (99,99%).

Dentro de la bibliografía considerada y detallada en este curso existen estudios comparativos, relativos a la vida útil y eficiencia de las tecnologías, entre automóviles de desde carga ligera (automóviles particulares) hasta carga mediana-pesada (camiones de clase 6 a 8, tractores, montacargas, camiones mineros) que funcionan con distintas tecnologías en sus trenes de fuerza: motores a combustión interna (aplicaciones de movilidad convencionales), batería más motor a combustión interna (vehículos eléctricos) y vehículos eléctricos a celdas de combustible. Estos estudios los han realizado, entre muchos otros, World Energy Council, International Renewable Energy Agency, International Energy Agency, Hydrogen Council, European Commission, USA Department of Energy (DOE).

8. SOBRE LA ESTRATEGIA H2 Y REGULACIÓN, ¿SE PLANTEA LA EVALUACIÓN OBLIGATORIA DE LOS PROYECTOS DE PRODUCCIÓN DE H2 EN EL SEIA? (EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES)? AL SER H2 UN GAS PELIGROSO, DEBERÍA PASAR POR EIA, SIN EMBARGO, PODRÍAN 'AMPLIARSE' PROYECTOS EXISTENTES DE GENERADORAS EÓLICAS O SOLARES Y ENCONTRAR UN RESQUICIO PARA NO REALIZAR EL ESTUDIO. GRACIAS.

Ya sea como sustancia peligrosa o combustible, un proyecto con H2 deberá presentarse al SEIA. Actualmente estamos trabajando en un estudio que realizará un levantamiento de información sobre posibles y eventuales impactos de carácter ambiental, la forma en que estos deben ser manejados, y la tramitación ambiental y sectorial chilena a la cual se deberán someter para el normal desarrollo e implementación de proyectos futuros de Hidrógeno Verde, que contemplen durante su ejecución cualquier etapa de la cadena de valor: generación, almacenamiento, acondicionamiento, transporte y consumo de Hidrógeno Verde.

9. QUIZÁS ESTO YA SE HABLÓ EN LAS PRIMERAS DOS CLASES, PERO RECIÉN ME INTEGRE AL ABRIRSE LA LISTA DE ESPERA: ¿QUÉ AVANCES TECNOLÓGICOS HAY (EN LOS ÚLTIMOS 10 AÑOS) EN CUANTO AL ALMACENAMIENTO SEGURO DEL H2? YO HICE MI TESIS EN HIDROGENO EÓLICO EL AÑO 2011 Y AUN ERA UN GRAN DESAFÍO DE COSTOS Y TECNOLOGÍAS SEGURAS, DADA LA BAJA DENSIDAD ENERGÉTICA DEL GAS H2 POR UNIDAD DE VOLUMEN. GRACIAS.

En general, se ha optimizado el almacenamiento de hidrógeno gaseoso testeando en la última década nuevos materiales para manufacturar los estanques de alta presión y confinamiento (estanques tipo IV, típicamente se usan estos estanques en aplicaciones móviles particulares, como el Toyota Mirai, Hyundai Nexa, entre otros). En específico, se han probado materiales como nanotubos de fibra de carbono, polímeros de alta densidad y recubrimientos basados en fibra de vidrio (composites), los cuales confieren seguridad en cuanto a las presiones y volúmenes a las que se requiere almacenar el hidrógeno en aplicaciones de automóviles particulares (700 bar de presión para este aplicativo en específico).

10. ¿TIENEN NÚMEROS DE LA ENVERGADURA DE LA INDUSTRIA ACTUAL DEL H₂, COMO PRECIOS, PRODUCCIÓN Y CONSUMOS POR PAÍS Y DESTINO (TRANSPORTE, INDUSTRIA, ETC.)?

Sí existen, como se señaló en la primera parte de la Clase 3 existen 120 millones de toneladas anuales de hidrógeno producido, de este total 80 millones de toneladas se obtiene en forma de hidrógeno diatómico, mientras que los 40 millones de toneladas restantes se producen como hidrógeno combinado con otros gases. Internacionalmente el hidrógeno que más se produce hoy en día es el hidrógeno gris (a través del proceso de reformado de metano y gasificación de carbón) representando un 96% de los 120 millones de toneladas de hidrógeno que se producen anualmente, mientras que el 4% restante se produce a través del proceso de electrólisis del agua dentro de un dispositivo electroquímico llamado electrolizador.

Dentro del mercado internacional, en general el precio de producción del hidrógeno depende del país en que se produce y la accesibilidad que poseen estos a fuentes de energía renovable (eólica, solar, etc.), y fuentes de energías fósiles (gas natural, petróleo, carbón), sin embargo, hoy en día el mercado del hidrógeno posee precios de producción de hidrógeno gris y azul (mayormente) entre 5 a 7 euros por kilogramo de hidrógeno producido.

Dentro del mercado internacional del hidrógeno existen países involucrados como productores de hidrógeno, importadores (en caso de que no sea económicamente factible producir hidrógeno en localidades donde las materias primas mencionadas anteriormente no sean de fácil acceso económica y geográficamente) y exportadores (como podría llegar a serlo Chile, dado el gran recurso solar que posee Chile en el norte hacia el 2020 el precio de producción del hidrógeno podría llegar a ser de 1.2 USD por kilogramo de hidrógeno producido, lo cual lo hace bastante competitivo si lo comparamos con los costos de producción unitarios del diésel, gas natural, entre otros.

Para números específicos involucrados en todos los procesos dentro de la cadena de valor del hidrógeno (producción, almacenamiento, distribución, transporte y utilización de hidrógeno en dispositivos electroquímicos (celdas de combustible, generadores eléctricos, turbinas, entre otros), además del consumo específico por país y posibilidades que posee cada uno de importar o exportar recomiendo leer el último informe que ha publicado el World Energy Council y el estudio del mercado internacional del hidrógeno que realizó Shell en su informe: SHELL HYDROGEN STUDY: ENERGY OF THE FUTURE? SUSTAINABLE MOBILITY THROUGH FUEL CELLS AND H₂.

11. DE LA PARTE 2 ME GUSTARÍA CONSULTAR SI LOS AVANCES REGULATORIOS, COMO PARTE DE LA ESTRATEGIA NACIONAL, CONSIDERAN UNA REVISIÓN DEL PROCESO DE HOMOLOGACIÓN POR PARTE DEL 3CV, TRAMITACIÓN QUE EN GENERAL RESULTA MUY DEMOROSA Y COSTOSA, TRADUCIÉNDOSE EN UNA BARRERA DE ENTRADA PARA AQUELLOS QUE BUSCAN LA INCORPORACIÓN DE VEHÍCULOS CON NUEVAS TECNOLOGÍAS.C

Así es, sí está contemplado. No se vio reflejado en los estudios del mapa normativo, dado que el objetivo de los estudios fue la regulación de seguridad que es competencia del Ministerio de Energía. El trabajo que realiza el 3CV corresponde al Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (MTT). Actualmente estamos trabajando con los diferentes servicios

públicos que tienen o tendrán alguna relación con el hidrógeno y que son claves para el desarrollo de diferentes tipos de proyectos, como es para el caso vehicular el MTT y el 3CV.

12. ¿EN QUÉ PAÍSES SE ESTÁ PRODUCIENDO HIDRÓGENO AZUL?

Escocia, España, Alemania, Sudáfrica, Netherland, Noruega, Estados Unidos (California), Japón, China, Korea, Francia, Holanda y Australia son países reconocidos por producción de hidrógeno azul (en distintas capacidades). Cabe destacar que en Chile también existe una cantidad determinada de hidrógeno azul que se produce en su mayoría para la refinería del petróleo y otro porcentaje menor que se produce para almacenamiento, destinado para sustentar el back-up de la red eléctrica.

13. ¿A QUÉ TEMPERATURA COMBUSTIONA EL HIDRÓGENO?

El hidrógeno gaseoso hace autoignición entre 536 y 585 °C, sin embargo, para que haya combustión es importante recordar que, además de propiciarse una temperatura entre este rango, debe existir una cantidad determinada tanto de combustible (hidrógeno) como de comburente para así poder alcanzar la energía de activación y producirse, por tanto, una combustión hidrógeno + aire.

14. ¿CUÁL ES EL RENDIMIENTO DEL PROCESO DE ELECTRÓLISIS? ¿CUÁNTA AGUA SE NECESITA PARA PRODUCIR UNA CANTIDAD "X" DE HIDRÓGENO?

La electrólisis comercialmente ha desarrollado y posee actualmente eficiencias de conversión eléctrica (kWh a kg H₂) entre 60-70%. Más específicamente, se necesitan aproximadamente 50 kWh de suministro eléctrico y 9 kg de agua para producir 1 kg de hidrógeno (junto con 8 kg de oxígeno diatómico como subproducto). Es importante destacar que para la obtención de estas cantidades de productos en específico el suministro eléctrico normalmente varía entre 50-55 kWh y el agua entre 8-10 kg, las cifras exactas que toman ambos factores dependen del tipo de electrolizador considerado (material de ambos electrodos, constituyentes de cualquier electrolizador tipo, juega un rol fundamental en esto).

15. NO ME QUEDÓ TAN CLARO EL FUNCIONAMIENTO DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE, ¿RECOMIENDAN ALGÚN VIDEO O MATERIAL A REVISAR PARA REFORZAR ESTE PUNTO?

Este video lo explica: https://www.youtube.com/watch?v=SIw_2m5BcqY

El principio físico (generación eléctrica a través del modelamiento por medio de su principio fundamental de funcionamiento a través de ecuaciones entálpicas, energía libre de Gibbs, entalpía y potencial) y principio químico (reacciones REDOX óxido-reducción) a partir de las cuales funcionan las celdas de combustible se pueden encontrar en papers publicados en la página del Department of Energy of the United States (para estudiar principios electrofísicos) y en el informe publicado por Shell: SHELL HYDROGEN STUDY: ENERGY OF THE FUTURE? SUSTAINABLE MOBILITY THROUGH FUEL CELLS AND H₂ (para estudiar principios químicos).

MUCHAS GRACIAS POR PARTICIPAR DEL PRIMER CURSO CHILENO DE HIDRÓGENO REALIZADO POR MUJERES DE PARTE DE CWEEL CHILE.

CWEEL CHILE

Presidenta y co-fundadora: Romina Cid,

<https://www.linkedin.com/in/romina-cid-moris-%F0%9F%87%A8%F0%9F%87%B1-83918436/>

Directora y co-fundadora: Verónica Tapia,

<https://www.linkedin.com/in/ma-ver%C3%B3nica-tapia-jansen-6a6126113/>

Directora y co-fundadora: Liliana Guzmán,

<https://www.linkedin.com/in/lilianaguzmanr/>

Directora y co-fundadora: Yahaira Fiallos.

<https://www.linkedin.com/in/yahaira-fiallos-9a754729/>

PROFESORAS DEL CURSO

Paulina Ramirez, Directora de proyectos de Enel Green Power.

<https://www.linkedin.com/in/paulina-ram%C3%ADrez-del-barrio-00bb5a26/>

Maria Luisa lozano, CEO Asgreen.

<https://www.linkedin.com/in/marialuisalozano/>

Camila Niño, Memorista en Engie Latam.

<https://www.linkedin.com/in/camila-ni%C3%B1o-vega-21185ba2/>

Maria de los Ángeles valenzuela: Jeja de la unidad de hidrocarburos, Ministerio de Energía de Chile.

<https://www.linkedin.com/in/mariaangelesvalenzuelaarmijo/>