

Plan de acción interinstitucional para propiciar el uso del hidrógeno en el sector transporte

Elaborado por la Comisión de Hidrógeno integrada por:

Empresa de Servicios Públicos de Heredia S.A. (ESPH)

Instituto Costarricense de Electricidad (ICE)

Junta Administradora de los Servicios de Electricidad de Cartago (JASEC)

Ministerio de Ambiente y Energía - Dirección General de Transporte y Comercialización de Combustibles (MINAE - DGTCC)

Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT)

Refinadora Costarricense de Petróleo S.A. (RECOPE)

Secretaría de Planificación del Subsector Energía (SEPSE)

Noviembre, 2018

Contenido

PRESENTACIÓN.....	3
ABREVIATURAS.....	5
GLOSARIO.....	6
INTRODUCCIÓN.....	8
VINCULACIÓN CON POLÍTICAS Y PLANES NACIONALES.....	10
Plan Nacional de Desarrollo.....	10
Plan Nacional de Energía.....	10
Estrategia Nacional de Cambio Climático.....	11
MARCO LEGAL.....	12
DIAGNÓSTICO.....	18
Caracterización del hidrógeno.....	18
El hidrógeno como vector energético.....	19
Contexto internacional.....	19
• Consumo energético.....	19
• Generación de hidrógeno.....	20
• Costos de producción.....	21
• Usos del hidrógeno.....	22
• Uso del hidrógeno en el transporte.....	22
• Restricciones de uso.....	25
• Requerimientos para la distribución de hidrógeno para transporte.....	26
• El programa de incentivos públicos para el desarrollo del transporte a base de hidrógeno en California.....	28
Contexto nacional.....	29
• Consumo energético nacional.....	29
• Síntesis de estudios realizados en el país entorno al hidrógeno.....	30
• Infraestructura para la producción y comercialización de hidrógeno.....	35
Conclusiones del diagnóstico.....	35
MARCO ESTRATÉGICO.....	38
Plan de acción.....	38

PRESENTACIÓN

El plan de acción interinstitucional para el hidrógeno tiene por objetivo atender la directriz presidencial N° 002-MINAE que instruye a las instituciones del sector de ambiente y energía para que, dentro del marco de sus competencias, desarrollen un plan de acción a fin de propiciar la investigación, la producción y la comercialización del hidrógeno como combustible.

A fin de atender este lineamiento se crea la Comisión de Hidrógeno, cuyo objetivo es integrar los esfuerzos del subsector Energía y del MOPT en la elaboración de un Plan de Acción para el Hidrógeno, considerando la experiencia y el campo de acción de cada institución dentro de este contexto.

La formulación de este plan de acción responde al compromiso país por avanzar hacia la descarbonización de la economía en atención a lo establecido en la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC) y en la Contribución Nacionalmente Determinada de Costa Rica (NDC, siglas en inglés).

De igual forma en el VII Plan Nacional de Energía, en los ejes “**Hacia una flota vehicular más amigable con el ambiente**” y “**En la ruta hacia combustibles más limpios**”¹, se incluyen acciones orientadas a la incorporación de tecnologías más bajas en emisiones y mejoras en la calidad de los combustibles con el fin de reducir las emisiones derivadas de su uso. Este aspecto contempla el desarrollo de una industria de combustibles alternativos así como la realización de los cambios normativos necesarios para su incorporación en la matriz energética nacional.

En el plano internacional se han alcanzado acuerdos históricos, mediante los cuales cada país asume compromisos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero con el fin de evitar los impactos globales de un aumento excesivo de la temperatura. Costa Rica asumió este reto de manera ambiciosa y en sus Contribuciones Nacionalmente Determinadas estableció como meta una reducción de 3 067 708 toneladas de CO₂ para alcanzar una emisión neta de 9 373 552 toneladas de CO₂ al 2030. Para lograr este objetivo se requiere de una coordinación y la sumatoria de esfuerzos conjuntos de diferentes sectores, entre ellos, el sector energía. La tarea del subsector eléctrico se ha cumplido de forma exitosa, al contar con una matriz eléctrica renovable, no obstante la mayor parte del consumo energético se genera en el sector transporte mediante combustibles de origen fósil.

El uso de combustibles fósiles implica no sólo el empleo de recursos importados sino que conlleva a externalidades negativas en la calidad del aire, que afectan la salud de las personas.

Partiendo de este contexto, el reto principal es la transformación de este sector, desde una perspectiva amplia de movilidad sostenible que contemple además tecnología más eficiente y el uso de combustibles más limpios que propicien una reducción de los contaminantes locales y de los gases de efecto invernadero.

Como país enfrentamos una serie de retos en este campo, la clave es encontrar aquellas tecnologías que cuenten con un alto grado de madurez en su desarrollo para que sean accesibles

¹ VII Plan Nacional de energía 2015-2030, Orientaciones de política en transporte y combustibles, pp. 110 a 116 y 121 a 126.

en el mercado. Este enfoque permitiría lograr una propuesta integral, donde cada tecnología aporte al sector o sectores donde sea factible y presente ventajas importantes sobre otras.

En materia de oportunidades, ya se mencionó que Costa Rica destaca por su matriz eléctrica renovable, una ventaja que se asocia a un fuerte compromiso con el ambiente y que sirve como carta de presentación para lograr acceder a fondos climáticos destinados a apoyar procesos de transformación en los países. Internacionalmente, se está dando un fuerte impulso a la investigación y el desarrollo de diferentes tecnologías y fuentes de energía alternativa, acciones que sin duda contribuyen a impulsar mejoras importantes en beneficio del ambiente y la calidad de vida de las personas.

Diversas instituciones públicas costarricenses han realizado investigaciones para determinar el potencial del hidrógeno, entre ellas el ICE, ESPH y RECOPE. Esta última empresa desarrolló experiencia en el uso del hidrógeno en los procesos de refinación en Moín pues este elemento era un subproducto de dicha actividad industrial, que se aprovechaba para romper las cadenas de hidrocarburos y obtener así los diferentes combustibles terminados. En el campo de la investigación cuenta con uno de los proyectos a más largo plazo que inició en 2011 al establecer un convenio con la empresa Ad Astra Rocket orientado a desarrollar un sistema experimental de almacenamiento de hidrógeno para múltiples aplicaciones en el sector transporte e industria de la energía renovable. Parte de este proceso contempló la implementación de un sistema experimental para la producción, la compresión y el almacenamiento de hidrógeno gaseoso a alta presión. También formó parte del proyecto la operación y caracterización de una planta experimental y la evaluación de requerimientos para la realización de las mejoras al mismo.

Considerando que la orientación central de este plan de acción es propiciar la investigación, la producción y la comercialización del hidrógeno como combustible, los avances alcanzados en este primer esfuerzo realizado por RECOPE y Ad Astra son un insumo importante para contextualizar esta iniciativa país. Además el documento contempla los aportes en investigación realizados por el ICE, la Academia, así como expertos internacionales y referencias de organizaciones mundiales.

Este documento parte de un análisis del contexto nacional e internacional en torno al hidrógeno para plantear una serie de acciones orientadas a atender la Directriz 002-MINAE que busca propiciar la investigación, producción y comercialización del hidrógeno como combustible.

ABREVIATURAS

ARESEP: Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos.

CNFL: Compañía Nacional de Fuerza y Luz S. A.

ESPH: Empresa de Servicios Públicos de Heredia S. A.

ICE: Instituto Costarricense de Electricidad.

INTECO: Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica.

JASEC: Junta Administrativa del Servicio Eléctrico Municipal de Cartago.

MIDEPLAN: Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica.

MINAIE: Ministerio de Ambiente y Energía.

MOPT: Ministerio de Obras Públicas y Transporte.

PND: Plan Nacional de Desarrollo.

PNE: Plan Nacional de Energía.

RECOPE: Refinadora Costarricense de Petróleo S. A.

SEPSE: Secretaría de Planificación del Subsector Energía.

GLOSARIO²

Atm: Atmósfera. Unidad de presión que equivale a la presión que ejerce la atmósfera terrestre al nivel del mar.

Átomo: Es la partícula más pequeña de un elemento y posee las propiedades características de dicho elemento.

Bar: Unidad de presión. Equivale a aproximadamente una atmósfera (1 bar = 0,987 atm). Igualmente, 1 bar equivale a 14,503 psi o a 100 kPa.

Celda combustible: Dispositivo para generar electricidad por medio de una reacción en la que hay transferencia de electrones espontánea que requiere un suministro continuo de reactivos, como el hidrógeno y el oxígeno, para su funcionamiento.

Combustibles fósiles: Proceden de la biomasa generada en eras pasadas, que se depositó en el fondo de mares, lagos y otras masas de agua, cubierta por sucesivas capas de sedimentos. Reacciones químicas de descomposición y la presión ejercida por el peso de esas capas durante millones de años transformaron esos restos orgánicos en sustancias de gran contenido energético, como el carbón, el petróleo, o el gas natural.

Densidad energética: La densidad energética es un valor que permite medir la cantidad de energía contenida en un volumen determinado (energía/volumen) o en una sustancia específica (energía/masa).

Electrólisis del agua: Proceso mediante el cual el agua es separada en hidrógeno y oxígeno usando electricidad para inducir una reacción química no espontánea.

Electrón: Partícula que se encuentra alrededor del núcleo del átomo y que tiene carga eléctrica negativa.

Elemento: Tipo de materia constituida por átomos de la misma clase.

Flamabilidad: Menor temperatura a la cual un combustible en contacto con el aire puede encenderse o inflamarse en presencia de una fuente de calor.

GEI: Gases de Efecto Invernadero.

Hidrógeno: Elemento químico de número atómico 1, masa atómica 1,007 y símbolo H; es un gas incoloro, inodoro y muy reactivo que se halla en todos los componentes de la materia viva y en muchos minerales, siendo el elemento más abundante en el universo.

Intersticio: Espacio pequeño entre dos cuerpos o entre dos partes de un mismo cuerpo.

k: Sufijo para representar miles, por ejemplo, 1kg = 1000 gramos.

kWh: Kilowatt-hora – Sufijo que representa 1000 watt-hora. 1 watt-hora es la energía necesaria para mantener una potencia constante de un watt durante una hora.

² Chang, Raymond. Química_11va_Edicion

l: Sufijo para representar litros. Unidad de volumen, equivalente a 1000 ml o 1000 cm^3

Molécula: Grupo de átomos, iguales o diferentes, que se mantienen juntos y no se puede separar sin afectar o destruir las propiedades de las sustancias.

M: Sufijo para representar millones, por ejemplo $1 \text{ MPa} = 1\,000\,000$ de pascales.

Newton: Unidad de fuerza en el Sistema Internacional de Unidades, símbolo N.

Número atómico: Número total de protones que tiene cada átomo de un elemento dado.

Pa: Pascal -Unidad de presión del Sistema Internacional de Unidades. Equivale a la presión que ejerce la fuerza de 1 newton sobre una superficie de 1 m^2 .

Peso atómico: Peso relativo de los átomos de los distintos elementos.

Poder calorífico: Cantidad de energía que entrega un kilogramo o un metro cúbico de una sustancia dada, en un proceso de combustión. Aunque el término podría confundirse con densidad energética, esta última es más amplia, pues no solo contempla la energía obtenida en un proceso de combustión, sino además la energía obtenida de procesos como reacciones químicas, reacciones nucleares, procesos electroquímicos, entre otros.

Psi: Unidad de presión perteneciente al sistema inglés de unidades. Las siglas psi derivan de "pounds-force per square inch", se traduce como libras-fuerza por pulgada cuadrada.

Vector energético: Materiales y sustancias capaces de almacenar energía de forma recuperable.

INTRODUCCIÓN

La Directriz 002-MINAE firmada el 8 de mayo del presente año le encomienda a las instituciones del Sector Ambiente y Energía con competencia en el tema, el desarrollo de un plan de acción orientado a propiciar la investigación, la producción y la comercialización del hidrógeno como combustible.

En respuesta a la directriz, el jerarca del MINAE como Ministro Rector del tema, mediante oficio DM-216-2018 giró instrucciones a las instituciones correspondientes para conformar la Comisión de Hidrógeno cuyo fin era articular este plan. Asimismo, designó a la Secretaría de Planificación del Subsector Energía (SEPSE) como el área responsable de coordinar la elaboración del mismo.

La Comisión de Hidrógeno la conforman representantes del Sector Energía y el MOPT, que desde su quehacer particular pueden contribuir a abordar lo dispuesto en la directriz antes mencionada. Esta Comisión la constituyen las siguientes entidades:

- Dirección General de Transporte y Comercialización de Combustibles (DGTCC) del MINAE
- Empresa de Servicios Públicos de Heredia S.A. (ESPH)
- Instituto Costarricense de Electricidad (ICE)
- Junta Administrativa del Servicio Eléctrico Municipal de Cartago (JASEC)
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT)
- Refinadora Costarricense de Petróleo S.A. (RECOPE)
- Secretaría de Planificación del Subsector Energía (SEPSE)

Con el fin de enriquecer este proceso, durante la etapa de diagnóstico se convocaron a algunos de los actores que han tenido relevancia en el tema del hidrógeno, con el fin de recibir insumos especializados que contribuyan a aportar mayor información en el proceso de análisis. Se consideró el juicio experto de la Academia y de la empresa Ad Astra Rocket Company, quienes por su área de *expertise* aportaron mayores criterios y conocimiento respecto al tema. Asimismo, como información complementaria se realizó un análisis conjunto del entorno mundial, los campos de aplicación del hidrógeno y los costos de producción para contrastarlo con nuestra realidad país.

El presente documento sintetiza el trabajo realizado por la Comisión, abordando los elementos esenciales que se deben contemplar para atender una posible incorporación del hidrógeno en la matriz energética nacional. En primer lugar, se analiza la coherencia de la inclusión del hidrógeno dentro de los lineamientos y orientaciones de las políticas nacionales.

Asimismo, se evalúan las posibilidades legales de las instituciones del subsector energía para participar en la investigación, el desarrollo y la producción del hidrógeno como vector energético en el país.

Se incluye también un diagnóstico que recoge la experiencia internacional así como las incursiones a nivel nacional sobre el potencial desarrollo del hidrógeno como un vector energético. Se analizan los procesos internacionales de producción de hidrógeno, incluyendo la electrólisis, costos relativos de producción y campos de aplicación, tanto en transporte como otras posibilidades desarrolladas en la actualidad. De igual forma, se describen los requerimientos y algunas

referencias de costos de infraestructura para la distribución de hidrógeno. En el ámbito nacional, se consideraron los estudios realizados por instituciones nacionales como RECOPE, el ICE, Ad Astra Rocket, UCR, en particular sus conclusiones y recomendaciones, así como el estado actual del proyecto de generación de hidrógeno ubicado en Liberia, Guanacaste.

Finalmente, se identifican las acciones requeridas para crear un marco habilitante para la investigación, desarrollo y comercialización del hidrógeno como vector energético. Dichas acciones contemplan la creación de un marco jurídico que permita a las instituciones que lo requieren, incursionar en el campo del hidrógeno.

VINCULACIÓN CON POLÍTICAS Y PLANES NACIONALES

Con miras a analizar una posible inclusión del hidrógeno en el contexto nacional, se proceden a enumerar los principales lineamientos emanados como política de gobierno en materia energética y que resultan vinculantes para esta iniciativa.

Plan Nacional de Desarrollo

El Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2015-2018 es el plan estratégico que contiene el marco de la política nacional, en la cual se impulsan acciones de reducción de emisiones en sectores clave como transporte, energía, agricultura y residuos sólidos, para catalizar el proceso de transformación hacia un desarrollo bajo en emisiones y la meta de Carbono Neutralidad del país en el marco de las Contribuciones Nacionales ante la CMNUCC.

Partiendo de este contexto, en el PND se establecen una serie de lineamientos relacionados con la política energética del país, en procura de fomentar acciones que permitan reducir los impactos del cambio climático y que al mismo tiempo se supla la demanda de energía con una matriz energética que asegure el suministro óptimo y continuo de electricidad y combustible, promoviendo su uso eficiente para mantener y mejorar la competitividad del país. El modelo eléctrico de Costa Rica es referente a nivel internacional porque en los últimos años la generación con energía renovable ha representado más del 98% del total. Sin embargo, a nivel energético mantiene una alta dependencia de los combustibles fósiles importados para suplir las necesidades del sector transporte.

En este sentido al evaluar la introducción de alternativas energéticas como el hidrógeno en este sector, se responde a lo establecido en el PND que plantea el desarrollo de estrategias para continuar diversificando la matriz energética nacional, con energías sostenibles, alternativas y amigables con el ambiente.

Plan Nacional de Energía

El VII Plan Nacional de Energía (PNE) 2015-2030, establece su política con una orientación central de sostenibilidad energética con un bajo nivel de emisiones, basándose en el uso de fuentes limpias y renovables. Siendo evidente que sus acciones deben alinearse hacia la mejora del sector transporte desde todas sus aristas, ya que es el sector responsable de la mayor cantidad de GEI y gases contaminantes.

En este sentido, el PNE establece varios ejes estratégicos asociados a la incorporación de tecnologías y alternativas energéticas más limpias:

- **Hacia una flota vehicular más amigable con el ambiente:** establece acciones orientadas a renovar la flota vehicular para incorporar tecnologías más bajas en emisiones así como mejorar la normativa sobre control de emisiones, entre otros aspectos.

- **Con miras a un transporte público sostenible:** este eje promueve un mayor uso y eficiencia del transporte público así como el desarrollo del transporte no motorizado.
- **En la ruta hacia combustibles más limpios:** se incluyen acciones orientadas a mejorar la calidad de los combustibles con el fin de reducir las emisiones derivadas de su uso, desarrollar la industria de biocombustibles y combustibles alternativos y efectuar los cambios normativos necesarios para su incorporación en la matriz energética nacional.

En el componente de electricidad, también se contempla como parte del eje referente a la eficiencia energética un objetivo orientado a optimizar la eficiencia energética en la oferta, concretamente con miras a evaluar la posibilidad de almacenamientos de energía, donde se mencionan como opciones de estudio el hidrógeno y las baterías, entre otras posibilidades.

Estrategia Nacional de Cambio Climático

La Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC) es una iniciativa gubernamental cuyo objetivo general es reducir los impactos sociales, ambientales y económicos del cambio climático y tomar ventaja de las oportunidades, promoviendo el desarrollo sostenible mediante el crecimiento económico, el progreso social y la protección ambiental por medio de iniciativas de mitigación y acciones de adaptación, para que Costa Rica mejore la calidad de vida de sus habitantes y de sus ecosistemas, al dirigirse hacia una economía carbono neutral competitiva para el 2021. Esta responsabilidad compartida se debe dar por medio del desarrollo de capacidades y la legitimidad para incidir tanto en la Agenda Nacional como la Agenda Internacional.

La estrategia contempla una serie de ejes estratégicos de trabajo en el marco nacional e internacional:

1. Mitigación de gases de efecto invernadero.
2. Adaptación al cambio climático para reducir la vulnerabilidad de los principales sectores y regiones del país.
3. Sistema de métricas precisas, confiables y medibles (MRV).
4. Desarrollo de capacidades y transferencia de tecnología.
5. Financiamiento.
6. Sensibilización pública, creación de cultura y cambio de hábitos de consumo.

El eje de mitigación contempla varios sub-ejes, dentro de los cuales se visualizan dos de especial interés para este plan, el primer es Energía y el segundo Transporte, los demás están asociados al sector Agropecuario, Industrial, Residuos Sólidos, entre otros. Resulta conveniente destacar a la alusión textual que se efectúa con respecto al sector transporte: “El principal sector emisor de nuestro país lo constituye el transporte, por lo que cualquier acción orientada a la reducción de emisiones tendrá un alto impacto en los inventarios nacionales de GEI ...”.

MARCO LEGAL

Con miras a determinar las posibilidades país de incursionar en el campo del hidrógeno, se le solicitó a las empresas e instituciones vinculadas con el sector energía y al MOPT un análisis de su marco legal para determinar su competencia en la investigación, la producción y la comercialización del hidrógeno como combustible. En este apartado se transcribe textualmente parte de lo indicado por cada entidad consultada.

- Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE): Oficio P-DJ-1269-2018, Criterio legal sobre las competencias de RECOPE para la investigación, producción y comercialización del hidrógeno
 - “...de acuerdo con el dictamen emitido por la Procuraduría General de la República C-063-2015 de cita, RECOPE solo puede dedicarse a las actividades que se encuentran dentro de los objetivos de la empresa, tal como han sido definidos por el legislador (Ley N° 6588 y Ley N° 7356).
 - Es decir, para que RECOPE pueda incursionar en la investigación, producción y comercialización de hidrógeno en este momento, necesariamente debe, desde el punto de vista técnico, tener origen en un derivado del petróleo; a contrario sensu, dicha actividad no se enmarcaría dentro del objeto social definido por la ley N° 6588 para RECOPE y por lo tanto, sería necesaria una modificación de orden legal al Artículo 6 de la citada Ley 6588 en los términos señalados.
 - De ser así, la posible incursión de RECOPE en la investigación, producción o comercialización del hidrógeno no derivado del petróleo; quedaría supeditada a una modificación de su objeto social dado mediante ley, por lo que corresponde al legislador dicha tarea, no siendo viable jurídicamente ampliarlo a partir de normas de rango infra legal (Decreto Ejecutivo, Plan Nacional de Desarrollo, Plan Nacional de Energía u otros).
 - En este sentido, actualmente se encuentran en la corriente legislativa seis proyectos de ley (N°19493, N° 19498, N° 19569, N° 20382, N° 20641 y N° 20774) que modifican o amplían los objetivos sociales de la Empresa, posibilitándola a incursionar en energías alternativas como lo es el hidrógeno.
 - Puesto que es la ley la que define el objeto social de RECOPE, sólo una norma con rango de ley puede ampliar el ámbito de actividad de la Empresa, la que no puede, en consecuencia, fundarse en normas de inferior rango (como convenios o decretos ejecutivos a manera de ejemplo), para decidir asumir nuevas actividades no comprendidas en el artículo 6 antes transcrito. Lo que comprende, claro está, el financiamiento de actividades que no se deriven de ese numeral, esto en concordancia con la prohibición expresa contenida en el artículo 2 de la Ley de la ARESEP (Ley 7593), que preceptúa que *“Excepto mediante tributos establecidos por ley, las tarifas, precios y los tasas de los servicios públicos no podrán incluir ningún componente destinado al financiamiento de gastos o de inversiones en entes públicos o privados distintos del prestador del servicio público correspondiente.”*
 - Es conforme a lo anterior, que aplicándolo al caso en concreto, veríamos en principio una limitante legal para destinar aportes económicos, de personal y cualquier otro recurso de la Empresa, en actividades no propias de su giro o actividad habitual, razón

por la cual se concluye, que corresponde al legislador, en ejercicio de la potestad legislativa y por medio de una norma de rango legal, modificar el objeto actual de RECOPE para que puede participar en otras actividades como lo es la investigación, producción, o comercialización de hidrógeno en los términos expuestos”

- Instituto Costarricense de Electricidad (ICE): oficio 257-527-2018, Competencia del ICE para investigar, producir y comercializar hidrógeno.
 - A efecto de determinar el objeto consultado, es decir verificar si el ICE tiene competencia legal para investigar, producir y comercializar hidrógeno, se concluye:
 1. El hidrógeno es una fuente de energía secundaria, que se extrae de fuentes primarias como el agua, la biomasa, el gas natural, el petróleo y el carbón, y puede servir como combustibles en el transporte y en la generación eléctrica.
 2. La investigación, producción y comercialización del hidrógeno tiene un consustancial interés público. De acuerdo con el PND y PNE, la exploración y eventual explotación del hidrógeno está previsto en objetivos y acciones estratégicas del Estado costarricense para su uso como combustible en el subsector transportes, y aunque no se descarta en este dictamen, su uso a futuro como fuente de generación eléctrica, al menos expresamente no se establece.
 3. Por disposición constitucional, el agua y los hidrocarburos son bienes de dominio público con carácter reforzado, por lo que únicamente pueden ser explorados y explotados por ley o mediante autorización, permiso o concesión (según la figura que se disponga) y están sujetos a un régimen prestacional especial. El Régimen prestacional de los servicios que para su generación y comercialización requieren de bienes demaniales, supone la existencia de una autorización legal o el otorgamiento de autorización o concesión para una Administración concedente.
 4. El ICE conforme a la Ley No. 449 y Ley No. 8660 cuenta con competencias legales que le habilitan a la investigación, generación, y comercialización del hidrógeno, por lo tanto, no requiere de ningún tipo de concesión o autorización adicional.
 5. Las acciones de investigación y/o exploración que emprenda el ICE para determinar la viabilidad técnica del hidrógeno como combustible en Costa Rica, deben contar no sólo con análisis actualizado que demuestre su “razonabilidad” y con al menos un programa de trabajo que delimite el alcance de las investigación tanto al espacio geográfico (áreas superficiales y/o subterráneas) como del espacio temporal, un adecuado plan de inversiones debidamente justificado, así como la previsión de medidas de protección medioambientales y planes de restauración.
 6. En razón que el artículo 5 de la Ley No. 7593, no distingue la fuente para la generación de energía para considerar a este servicio de naturaleza pública, se concluye, a partir de una interpretación finalista y sistemática, que la generación de energía a partir del hidrógeno no solo está contemplado en dicha norma legal como un servicio público, sino que la ARESEP no requiere de otra habilitación legal para proceder a regular y fiscalizar dicho servicio de “generación”, salvo aquella normativa infralegal para regular aspectos técnicos, tarifarios, de calidad, seguridad, etc.

7. La habilitación legal del ICE en condición de “operador legal delegado” para la comercialización debe precisarse que es en doble vía:
 - Existe viabilidad legal para que el ICE comercialice el hidrógeno como “producto” para ser utilizado como combustible, para el subsector transportes, para lo cual está habilitado para realizar alianzas con entes públicos o privados, nacionales o extranjeros, por ejemplo, RECOPE.
 - Existe viabilidad legal para que el ICE comercialice la electricidad generada a partir del hidrógeno como insumo, en sentido similar al uso del agua, aunque científicamente este tipo de generación conlleva un alto costo por lo que no parece razonable en el corto plazo.
 8. Existe un vacío legal en relación a la regulación de la comercialización del hidrógeno como “producto” o combustible, a efecto de que ARESEP realice sus competencias de regulación, fiscalización, y fijación tarifaria. También existe un vacío normativo en cuanto a la regulación del almacenaje y transporte de este tipo de combustible.
 9. Cualquier alternativa energética nueva que se pretende agregar a la matriz energética nacional, sea a mediano o largo plazo, debe sentar sus bases en la razonabilidad tecnológica, sostenibilidad ambiental y rentabilidad financiera y ser coherente con la Estrategia Institucional y/o Corporativa.
- Junta Administrativa del Servicio Eléctrico Municipal de Cartago (JASEC): oficio GG-AJ-296-2018
- Sobre el particular, debe de indicarse primeramente que JASEC es una empresa pública que forma parte del sector descentralizado del Estado, por lo que, le resulta aplicable el principio de legalidad conforme al artículo 11 de la Ley General de la Administración Pública y el artículo No. 11 de la Constitución Política.
 - En tal sentido, a la vista de su marco legal sustancial, a saber, la Ley No. 7799 del 30 de abril de 1998, Reforma a la Ley de Creación No. 3300; Ley No. 8345 del 26 de febrero del 2003, Participación de las Cooperativas de Electrificación Rural y las Empresas de Servicios Públicos Municipales en el Desarrollo Nacional y Ley No. 7593, Ley de Creación de la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos, JASEC no tiene competencia legal para la investigación, la producción y la comercialización de hidrógeno como combustible.
 - Por lo tanto, resulta indispensable una ley de la República que modifique su marco legal y así permita a JASEC incursionar en tal actividad.
- Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPHS.A.): oficio DAJ-189-2018 Criterio legal tema hidrógeno.
- Siendo ESPHS.A. una empresa dirigida a la venta de servicios de energía eléctrica, dentro del marco legal establecido por la Ley 5589 y 7789, se sobreentiende que todas aquellas potestades y facultades que emanan de dicho cuerpo normativo le son aplicables en su totalidad, así tenemos que la ESPH está facultada para brindar servicios que van más allá de los simples servicios tradicionales de venta de energía eléctrica, agua potable, alcantarillado sanitario, y aguas residuales.

- Como puede notarse este artículo (artículo 6 de la ley 7789) contempla un sinnúmero de posibilidades que son inherentes al estudio, desarrollo y comercialización del producto final denominado HIDROGENO como fuente energética supletoria a las fuentes de energía actuales y explotadas en la nación.
- Así las cosas, ESPHS.A. se encuentra absolutamente empoderada legalmente y debidamente instituida como una empresa con capacidad jurídica para estudiar, implementar y comercializar el hidrógeno, en el tanto y en el cuanto dicho negocio no afecte los demás servicios esenciales para los cuales fue creada la ESPHS.A. y que se encuentra debidamente indicado en el artículo 5 de la ley 7789.
- Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP): Oficio OF-1565-IE-2018 Competencia Regulatoria sobre el hidrógeno como vector energético en el mercado nacional.
 - “2. El hidrógeno no está definido como un bien propio de la Nación ni forma parte del objeto social establecido como parte de la competencia exclusiva de RECOPE en materia de combustibles derivados del petróleo cuya titularidad pertenece al Estado.
 - 3. Corresponde a la Asamblea Legislativa, en el ejercicio de su potestad, establecer la calificación legal de los servicios públicos sujetos a las regulaciones de la Ley 7593.
 - El suministro del combustible hidrógeno, amparado en el artículo 5 de la ley 7593, no es competencia de la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos.
 - La regulación económica y de calidad que realiza la Autoridad reguladora, en lo que respecta al suministro de derivados de hidrocarburos, implica velar por el principio de servicio al costo, en el marco de lo que se establecen de manera expresa en la Ley 7593.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT): Oficio DAJ-2018-6026
 - Sobre el particular, el Ministerio de Obras Públicas y Transportes no ostenta ningún tipo de competencia en las áreas de investigación, producción y comercialización del hidrógeno indicadas en la Directriz que se menciona, por cuanto no forman parte del campo de acción y objeto de la institución.
 - No obstante lo anterior, es importante indicar que una vez que el o los entes competentes para conocer y atender la temática contenida en la Directriz de referencia realicen alguna modificación o implementen prácticas distintas a las utilizadas actualmente por los vehículos, deberá ser de conocimiento y consulta ante este Ministerio a fin de realizar un análisis de las normas que podrían verse afectadas y efectuar las valoraciones técnicas que podrían generar algún efecto o incidir en la revisión técnica vehicular.
- MINAE (Dirección General de Transporte y Comercialización de Combustibles DGTCC): oficio DGTCC-DL-196-2018.
 - “...las competencias de la DGTCC en materia de hidrógeno, y con vista en la reglamentación vigente, no se han asignado en forma específica competencias en materia de regulación o fiscalización de hidrógeno.

- Asimismo se aclara que no existe norma que califique la eventual venta de hidrógeno como un servicio público, categoría que por su naturaleza jurídica es reserva de ley.
 - No obstante lo anterior, en acatamiento de la directriz N° 002-MINAE de los ocho días del mes de mayo de dos mil dieciocho y en aplicación de los artículos 1, 5, 11, 45 y 109 de la Ley de Biodiversidad (Ley N° 7788 del 30 de abril de 1998) y los artículos 1, 2, 3, 4, 59, 60, 61 de la Ley Orgánica del Ambiente (Ley N° 7554 del 4 de octubre de 1995), se está trabajando en un proyecto de reforma al Decreto Ejecutivo N° 30131-MINAE-S, con el fin de evitar el surgimiento de riesgos inaceptables que atenten contra la seguridad humana, así como la protección al ambiente.
 - En dicha reforma se introducirán disposiciones referentes al cumplimiento de normativa técnica por parte de personas que produzcan, almacenen, transporten y manipulen hidrógeno, así como la correspondiente asignación de competencias a la DGTCC en materia de fiscalización en dicha área, de forma coordinada con instituciones como el Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica.
 - Conforme a la relación de las normas indicadas en el párrafo tercero, el MINAE ostenta sendas competencias que le facultan a realizar todas las acciones tendientes a prevenir la generación de riesgos en materia de seguridad humana y protección al ambiente, tareas que cotidianamente se ejecutan a través de las labores de fiscalización a cargo de la Dirección General de Transporte y Comercialización de Combustible.
- Secretaría de Planificación del Subsector Energía (SEPSE)
 - La planificación energética es un proceso en el que se establecen los requerimientos energéticos de la población y agentes económicos, y se elaboran y actualizan políticas, planes, programas y proyectos, de modo que se establezca la mejor manera de satisfacer dichos requerimientos, teniendo en cuenta criterios económicos, sociales, tecnológicos y ambientales y considerando la realidad nacional, regional y mundial, las proyecciones de demanda y análisis de escenarios, que tomen en cuenta la evolución de las variables demográficas, económicas y precios de los recursos energéticos.
 - El Reglamento de Organización del Subsector Energía, Decreto Ejecutivo 35991-MINAET y sus reformas, regula y organiza el subsector de la siguiente manera: establece un Consejo Subsectorial de Energía, presidido por el Ministro Rector e integrado por los jefes de las instituciones y empresas públicas del subsector; una Secretaría de Planificación del Subsector Energía (SEPSE), conformada por el director, así como por el personal técnico, administrativo y de apoyo, aportados por las instituciones y empresas públicas que conforman este subsector; y un Comité Técnico Subsectorial de Energía, integrado por el director de SEPSE, quien lo preside y por los jefes responsables de las unidades de planificación de las instituciones y empresas públicas del subsector.
 - El mismo Decreto define como parte de los objetivos del Subsector Energía b) Reducir la dependencia del país de los energéticos importados c) Estimular la evaluación y el desarrollo de las fuentes energéticas nacionales, y d) Incentivar la exploración y

aprovechamiento racional de nuestras riquezas naturales, especialmente de aquellos recursos energéticos que puedan contribuir a fortalecer nuestra economía.

- Es así como a la SEPSE le corresponde proponer estrategias, programas, planes y regulaciones para el logro de los resultados y metas establecidos por la política energética, junto con las funciones establecidas en el artículo 9 del Decreto mencionado, entre ellas: h) Elaborar estudios, diagnósticos y otros concernientes a la actividad del Subsector Energía, j) Realizar estudios integrales para el desarrollo y aplicación de opciones energéticas, así como k) Brindar permanente apoyo técnico a las instituciones y empresas públicas del subsector y suministrarles toda la información necesaria para la toma de decisiones en el campo energético.
- Partiendo de lo expuesto anteriormente, SEPSE tiene la potestad y el marco legal para abordar el tema del hidrógeno, conforme a lo indicado en el inciso j del artículo 9 del Decreto 35991-MINAET.

Al analizar el estado de las competencias legales de las instituciones públicas pertenecientes al subsector energía, se evidencia que algunas instituciones adolecen del marco normativo requerido para investigar, producir y comercializar el hidrógeno como vector energético. Por tanto, se requeriría habilitarlas legalmente para que puedan realizar las inversiones necesarias, condición sin la cual, no podrían sustentarse proyectos de esta índole.

Por otro lado, la Ley N° 7593, Ley de la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos, en el artículo 3, define como servicio público “el que por su importancia para el desarrollo sostenible del país sea calificado como tal por la Asamblea Legislativa, con el fin de sujetarlo a las regulaciones de esta ley”. En este mismo artículo señala que la fijación de tarifas y precios de los servicios públicos se debe hacer con base en el servicio al costo. Asimismo el artículo 5 de la citada ley define cuáles son los servicios públicos:

“d) Suministro de combustibles derivados del hidrocarburos, dentro de los cuales se incluyen: 1) los derivados del petróleo, asfaltos, gas y naftas destinados a abastecer la demanda nacional en planteles de distribución y 2) los derivados del petróleo, asfaltos, gas y naftas destinados al consumidor final. La Autoridad Reguladora deberá fijar las tarifas del transporte que se emplea para el abastecimiento nacional.”

Partiendo de lo antes expuesto, el hidrógeno no está definido como un servicio público, por lo que en caso de querer establecerlo, es necesario que la Asamblea Legislativa lo califique como tal.

DIAGNÓSTICO

Caracterización del hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más pequeño presente en la naturaleza. En condiciones normales es un gas incoloro, inodoro e insípido, compuesto de moléculas di-atómicas. Su símbolo H_2 , corresponde al átomo de hidrógeno (H) que consta de un núcleo de unidad de carga positiva y un solo electrón. Además tiene un número atómico 1 y peso atómico de 1.00797. Es uno de los componentes principales del agua y de toda la materia orgánica y se encuentra distribuido de manera amplia no sólo en la Tierra sino en todo el universo.

El hidrógeno es un poco más soluble en disolventes orgánicos que en el agua. Además muchos metales tienen la capacidad de absorberlo, por ejemplo la absorción del hidrógeno en el acero puede volverlo frágil, lo que conlleva a fallas prematuras.

En condiciones de presión y temperatura estándar, el hidrógeno posee una densidad energética de 0.003 kWh/l. Para efectos comparativos, el diésel tiene un valor de 9.938 kWh/l y el gas licuado de petróleo (GLP) de 0.026 kWh/l.

El hidrógeno gaseoso comprimido posee una mayor densidad energética que en estado natural, alcanzado valores de 0.50 kWh/l a 20 MPa (200 bar) y 1.34 kWh/l a 70 MPa (700 bar).

Si se realiza la comparación del poder calorífico por unidad másica (kWh/kg), se encuentra que el hidrógeno posee un poder calorífico tres veces mayor que el diésel y aproximadamente dos veces más que el poder calorífico del GLP.

El hidrógeno posee un rango de flamabilidad amplio, tanto la velocidad de la flama como la temperatura de ebullición del hidrógeno respecto al diésel y la gasolina, lo hacen un compuesto con peligros asociados, entre ellos, ser un gas inflamable a alta presión.

No es factible encontrarlo como un elemento puro, sino más bien como un componente de muchas sustancias en la naturaleza, por ejemplo en el agua, cuyas moléculas están formadas por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H_2O), o en los hidrocarburos (C_nH_{2n+2}). Por lo anterior, para obtenerlo en forma pura, debe ser separado mediante reacciones químicas u aplicación de energía.

El gas natural es la fuente más común a nivel mundial para obtener hidrógeno, sin embargo este proceso de producción de hidrógeno a partir del gas natural, no es limpio ya que también se libera carbono.

Otra fuente para la obtención de hidrógeno es mediante la refinación de petróleo, en el que dicho gas se convierte en un subproducto que es usado nuevamente para romper las cadenas largas de hidrocarburos, en cadenas más pequeñas. También por pirólisis de los productos secundarios en algunos procesos, tales como la glicerina generada de la producción del biodiesel o desechos de basura.

El hidrógeno también se puede extraer del agua mediante electrólisis, obteniéndose además oxígeno, en un proceso libre de carbono. El hidrógeno es almacenado a presión para su posterior uso.

El hidrógeno como vector energético

El hidrógeno no es una fuente de energía primaria, es un vector energético, en el sentido de que tiene la capacidad de almacenar la energía para extraerla posteriormente. Por ello, en algunos países es aprovechado como canalizador de energía para el transporte (especialmente transporte público y transporte de carga, incluidos trenes), o como base para sistemas estacionarios de almacenamiento de energía, por ejemplo de fuentes intermitentes como la solar o la eólica para posteriormente convertirla en electricidad por medio de celdas de combustible y cubrir así las demandas en horas pico.

Para aplicaciones energéticas, el hidrógeno puede ser considerado una energía limpia solo si el proceso utilizado para su obtención se basa en energía renovable. En Costa Rica la propuesta es obtener hidrógeno mediante la electrólisis del agua, aprovechando la electricidad proveniente de una fuente renovable disponible en el país, que además reporta una alta disponibilidad durante el año. Este factor permitiría eventualmente un alto aprovechamiento de nuestros recursos naturales, no obstante aún se requieren más estudios para determinar sus costos de producción.

En cuanto a su aplicación en celdas de combustible, su característica más relevante se asocia a las casi cero emisiones en el proceso de generación de electricidad (pues siempre se produce NOx, en cantidades muy pequeñas).

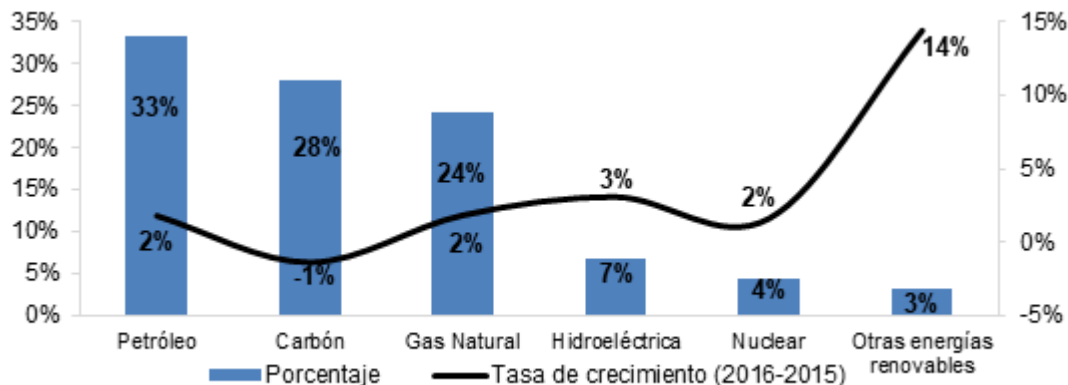
Contexto internacional

- Consumo energético

Las tendencias de consumo de energía primaria muestran para el periodo 2015 - 2016, que el petróleo sigue siendo la fuente con mayor demanda, representando cerca del 33,3% del consumo global de energía con un crecimiento de apenas 1,8% respecto al 2015. En segundo lugar se ubica el carbón, que representa para el mismo periodo un 28,1% del consumo global con una tasa de decrecimiento de -1%. Este comportamiento obedece en parte a que la producción de carbón en China disminuyó un 7,9%, mientras que en Estados Unidos el descenso fue de 19%. En tercer lugar, se ubica el gas natural que mantuvo el mismo ritmo de crecimiento que el petróleo al representar el 24,1% de la demanda total de energía.

En el siguiente gráfico se muestra como las fuentes de energía renovables fueron las que experimentaron el mayor crecimiento para el periodo analizado, tales como la energía hidroeléctrica con un crecimiento de 3% y otras energías como la eólica, la solar y la geotérmica con un incremento del 14,4% .

Gráfico N° 1: Consumo de energía primaria por tipo de fuente



Fuente: RECOPE con datos de BP Statistical Review of World Energy, 2017.

- Generación de hidrógeno

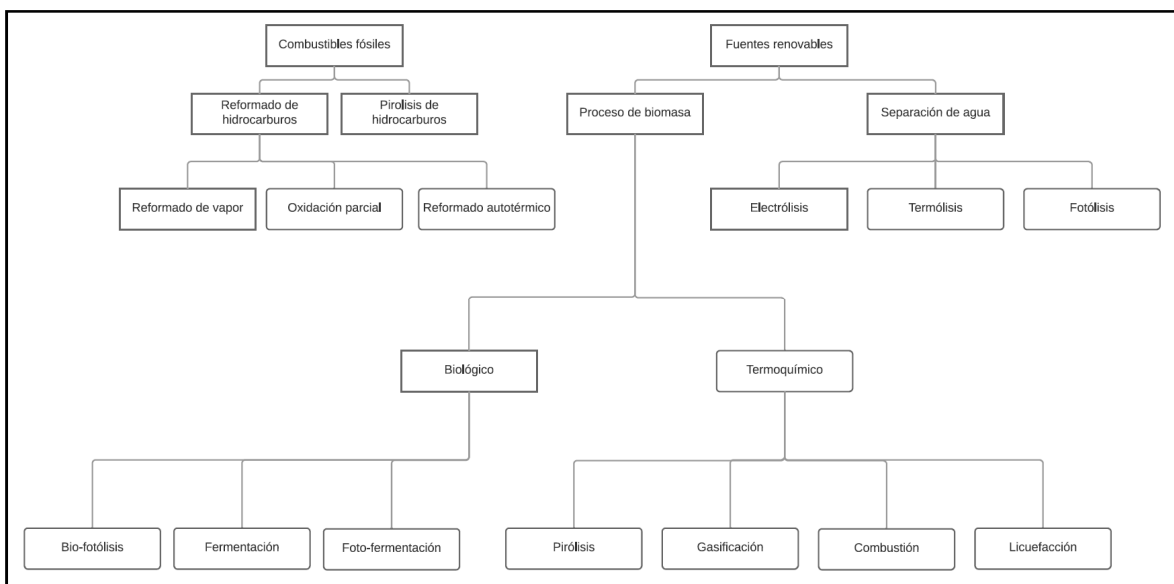
Mundialmente, alrededor del 96% del hidrógeno se genera a partir de combustibles fósiles, tales como gas natural (48%), petróleo (30%) y carbón (18%), o subproducto de procesos industriales. El hidrógeno también puede ser producido por otros métodos como la electrólisis del agua, sin embargo, representa apenas un 4% de la producción mundial³.

La técnica más utilizada para producir hidrógeno a partir del gas natural es el reformado. El proceso de combustión o gasificación de carbón es otra vía de producción, dada la enorme disponibilidad de recursos de carbón, no obstante presenta la desventaja de producir más del doble de emisiones de CO₂, emisiones que han de secuestrarse para darle viabilidad ambiental a esta alternativa.

En el siguiente esquema se pueden observar los diferentes procesos de producción de hidrógeno, partiendo de recursos no renovables y renovables, así como la correlación entre los diferentes procesos. Cabe resaltar que la gasificación de biomasa se encuentra en etapa de proyectos demostrativos y de investigación.

³<https://hipertextual.com/2015/09/economia-del-hidrogeno>

Figura 1: Principales métodos alternativos de producción de hidrógeno a partir de diferentes fuentes de energía



Fuente: P. Nikolaidis and A. Poullikkas, "A comparative overview of hydrogen production processes."

- Costos de producción

Los costos de producción del hidrógeno son muy variables y van a depender, entre otros, de la fuente de producción.

En el caso de la producción de hidrógeno por electrólisis, generalmente se lleva a cabo de la mano con energías limpias como la energía solar y la eólica a fin de reducir costos. El Laboratorio Nacional de Energía Renovable de los Estados Unidos, estudió el costo de generar hidrógeno por el método de valor estandarizado. Se analizaron tres escenarios, obteniéndose un costo de \$19.01/ kg de hidrógeno para producción a pequeña escala (~20 kg hidrógeno/ día); \$8.09/ kg de hidrógeno a mediana escala (~100 kg hidrógeno/día) y \$4.15/ kg a gran escala (~1000 kg hidrógeno/día). La influencia del costo de electricidad en la generación a gran escala es el factor de mayor importancia, representando un 58% del costo final; en el caso de mediana y pequeña escala el porcentaje de significancia de este costo es de un 35% y 17% respectivamente, siendo el costo de capital el factor más relevante con un 55% y 73%⁴.

⁴National renewable energy laboratory DOE, "Technology Brief: Analysis of Current-Day Commercial Electrolyzers" 2004.

- Usos del hidrógeno

El hidrógeno es ampliamente utilizado en diferentes industrias, por ejemplo en la química es empleado para producir amoníaco, utilizado en fertilizantes agrícolas (elaborado mediante el proceso de Haber), así como en la producción de ciclo hexano y metanol, que son intermediarios en la generación de plásticos y productos farmacéuticos. Es además un subproducto de los procesos de refinación de petróleo y se aprovecha para romper las cadenas de hidrocarburos (hydrocracking) así como para eliminar el azufre de los combustibles.

En la hidrogenación catalítica de aceites vegetales líquidos insaturados, se consumen grandes cantidades de hidrógeno para obtener grasas sólidas. También, se utiliza la hidrogenación en la manufactura de productos químicos orgánicos.

En la industria del vidrio, el hidrógeno se utiliza como atmósfera protectora para fabricar láminas de vidrio plano, mientras que en la industria electrónica se usa como gas de lavado durante la fabricación de chips de silicio, también se emplea como refrigerante en ciertas tecnologías de turbinas.

El mayor usuario de hidrógeno es la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) que lo emplea como combustible para cohetes desde la década de los 50s. La NASA fue una de las primeras en utilizar celdas de combustible para alimentar los sistemas eléctricos de las naves espaciales.

- Uso del hidrógeno en el transporte

En tiempos relativamente recientes, un gran número de empresas con un interés común en investigar y desarrollar el hidrógeno como fuente alterna de energía, conformó el Consejo del Hidrógeno. Dentro de estas empresas se pueden identificar algunas de gran renombre en diferentes sectores, tales como el automotriz, el petrolero y el sector de celdas de combustibles.

Las metas establecidas por el Consejo para lograr una penetración significativa del hidrógeno en el sector energía son a largo plazo y están definidas para el 2030 y el 2050, e incluyen aumentar la presencia del hidrógeno como fuente energética en el transporte público, transporte de carga, trenes, barcos y en algunos casos transporte particular de personas⁵. Dado que la implementación de sistemas basados en hidrógeno no es simple y a nivel mundial no se busca una descarbonización completa de la economía, las metas se establecen con horizonte a largo plazo⁶.

En la actualidad, algunos países utilizan autobuses de hidrógeno, por ejemplo, en el 2018 Estados Unidos contaba con 25 autobuses, proyectando aumentar su flota a 35. China por su parte cuenta con 23 autobuses, pero proyecta un alto crecimiento al tener como meta llegar a contar con 300 en un mediano plazo. En la Figura N°2 se muestra la situación actual y las proyecciones a nivel mundial.

⁵<http://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>

⁶ Dr. Giuseppe Spazzafumo, Simposio del Hidrógeno, Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, Agosto de 2018. <https://www.youtube.com/watch?v=pkf3y0ZNHec>

Figura N°2: Flota vehicular actual y proyectada de autobuses a hidrógeno



Fuente: California Fuel Cell Partnership <https://cafcp.org/buses-trucks#buses-action-plan>

Un punto crítico para sostener flotas vehiculares de hidrógeno es la disponibilidad de estaciones de abastecimiento. Para julio del 2018 Japón, Estados Unidos y Alemania reportan de 50 a 100 de ellas, Francia, Reino Unido, Corea del Sur y Dinamarca de 10 a 20, mientras que China, Noruega y España, de 5 a 10, y Canadá, Suecia, Italia y Costa Rica (entre otros) una estación de abastecimiento. Esto representa una limitación para la autonomía de los vehículos, dado que no pueden alejarse más allá de lo que su autonomía les permita antes de verse en la necesidad de cargar hidrógeno nuevamente. La Figura N°3 muestra la distribución de estaciones de abastecimiento a nivel mundial.

Figura N°3: Distribución actual de estaciones de suministro de Hidrógeno.
(Incluye proyección de nuevas estaciones)



Fuente: Electrive.com & H2 Stations.org <https://www.electrive.com/2018/02/15/hydrogen-fuelling-station-boom-germany/>

En términos de costos, las aplicaciones vehiculares aún son restrictivas, como se muestra la Tabla N°1, elaborada por el Departamento de Transporte de los Estados Unidos. Se puede observar el costo relativo de una unidad impulsada por hidrógeno así como el costo durante su ciclo de vida, evidenciándose que es 3 veces mayor que el de una unidad impulsada por diésel, lo que podría desestimular a un empresario a cambiar sus unidades.

Tabla N° 1: Costo comparativo de diferentes tipos de autobús a lo largo de su ciclo de vida

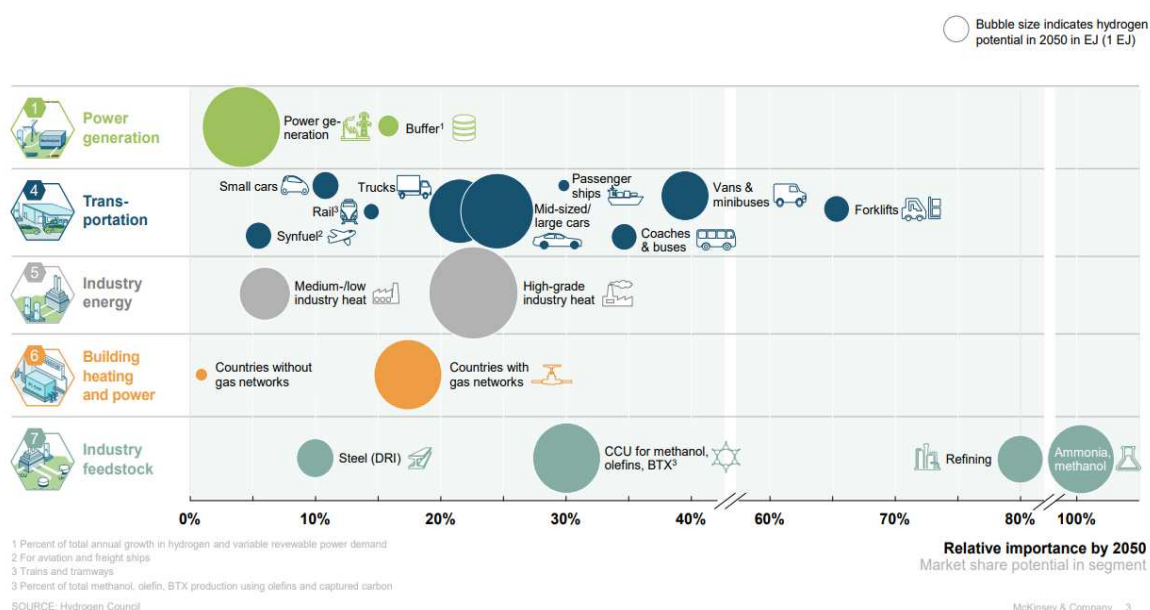
Tipo de combustible	Costo base de un autobús	Costo de combustibles a 12 años	Costos durante su ciclo de vida
Diésel	\$425 000	\$351 000	\$776 000
CNG	\$475 000	\$185 630	\$660 630
Híbrido diésel eléctrico	\$600 000	\$255 270	\$855 270
Eléctrico a baterías (Sin demanda)	\$750 000	\$129 600	\$879 600
Eléctrico a baterías (Con demanda)	\$750 000	\$259 200	\$1 009 200
Celda de combustible de hidrógeno	\$1 200 000	\$714 460	\$1 914 460

1. Para todas las categorías, se excluyen los costos de mantenimiento.
2. Se excluyen los costos relacionados con infraestructura: El costo de abastecimiento varía significativamente en función de la tarifa y la ubicación del centro de carga.
3. El precio base de las baterías eléctricas para autobuses, se ha reducido un 25% en los últimos 5 años.

Fuente: Departamento de Transporte de Estados Unidos
<https://www.transportation.gov/sites/dot.gov/files/images/Life%20Cycle%20Cost%20Overview%20for%20Different%20Transit%20Technologies.pdf>

En la Figura N°4, se muestra el potencial de aplicación del hidrógeno en diferentes áreas, tales como la generación eléctrica, aplicaciones industriales, habitacionales y otras. En el caso del transporte, se espera que para el 2050 el mayor potencial se desarrolle en el transporte público, de carga y buques, con una presencia relativa en el mercado de entre el 20 y 50%, dependiendo del tipo de transporte. También se observa que otros medios de transporte, como los vehículos familiares o privado, no proyectan gran presencia relativa (menor a 10%) para el 2050. Lo anterior se explica en el hecho de que otras fuentes energéticas, como las baterías y los sistemas híbridos, podrían resultar más viables para dichas aplicaciones en términos económicos, energéticos y ambientales.

Figura N°4: Potencial de uso del hidrógeno en varios segmentos



Fuente: Hydrogen Council <http://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2018/07/4.-PPT-McKinsey-FINAL.pdf>

En general, puede concluirse que a nivel mundial el desarrollo y el uso del hidrógeno como opción energética no se encuentra aún consolidada. Todavía restan algunas décadas para obtener una penetración significativa del hidrógeno en el sector energía en países avanzados. Igualmente es un hecho que el aprovisionamiento de hidrógeno se basará no solo en fuentes renovables, sino también en energía nuclear y combustibles fósiles, complementado con prácticas de captura de carbono para hacerlas viables ambientalmente.

- Restricciones de uso

Como se mencionó anteriormente, el hidrógeno puede ser encontrado en la naturaleza como compuesto en diferentes sustancias: hidrocarburos o agua y para obtenerlo como elemento puro es necesario aplicar energía. Por su bajo peso molecular y al presentarse en forma de gas, dadas las condiciones ambientales y atmosféricas de nuestro planeta, tenderá a elevarse fuera de la

atmósfera terrestre. Sin embargo, bajo condiciones propiciadas por procesos industriales, tenderá a mezclarse con otras sustancias, obteniéndose en condiciones controladas los resultados deseados; sin embargo bajo otras condiciones puede producir efectos no deseados, lo que conlleva a la necesidad de establecer procedimientos y cuidados para su manejo y aprovechamiento.

Actualmente, Costa Rica no cuenta con la normativa técnica necesaria para certificar la calidad y la seguridad a lo largo de los procesos de producción, almacenaje y distribución, entre otros, del hidrógeno como vector energético. Por ello, es necesario desarrollar las normas técnicas, preferiblemente en el marco del Sistema Nacional de la Calidad y por medio del Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO), para garantizar a los usuarios la calidad y la seguridad en toda la cadena. Posteriormente, las normas deberán hacerse de uso obligatorio en todo el país.

A continuación, se presentan algunas restricciones y cuidados que se deben considerar al utilizar hidrógeno.

Fragilización de los metales⁷: Bajo condiciones de alta temperatura, como en la cámara de combustión de un motor o en algunos procesos de soldadura, muchos metales absorben hidrógeno, provocando su fragilización e induciendo fallas prematuras en los equipos no diseñados para su uso.

Efectos del hidrógeno sobre la salud: altas concentraciones de este gas pueden causar un ambiente deficiente de oxígeno. Por ejemplo, si se producen fugas de un contenedor de hidrógeno, se alcanza rápidamente una concentración peligrosa. Los individuos que respiran esta atmósfera pueden experimentar síntomas que incluyen dolores de cabeza, pitidos en los oídos, mareos, somnolencia, inconsciencia, náuseas, vómitos y depresión de todos los sentidos. La piel de una víctima puede presentar una coloración azul. Bajo algunas circunstancias se puede producir la muerte. Las enfermedades respiratorias pre-existentes pueden ser agravadas por la sobreexposición al hidrógeno⁸.

Peligros físicos: el hidrógeno por ser más ligero, se mezcla bien con el aire y forma fácilmente mezclas explosivas.

Peligros químicos: el calentamiento puede provocar combustión violenta o explosión. Reacciona violentamente con el aire, el oxígeno, halógenos y oxidantes fuertes, provocando riesgo de incendio y explosión. Los catalizadores metálicos, tales como el platino y el níquel, aumentan enormemente estas reacciones.

- Requerimientos para la distribución de hidrógeno para transporte

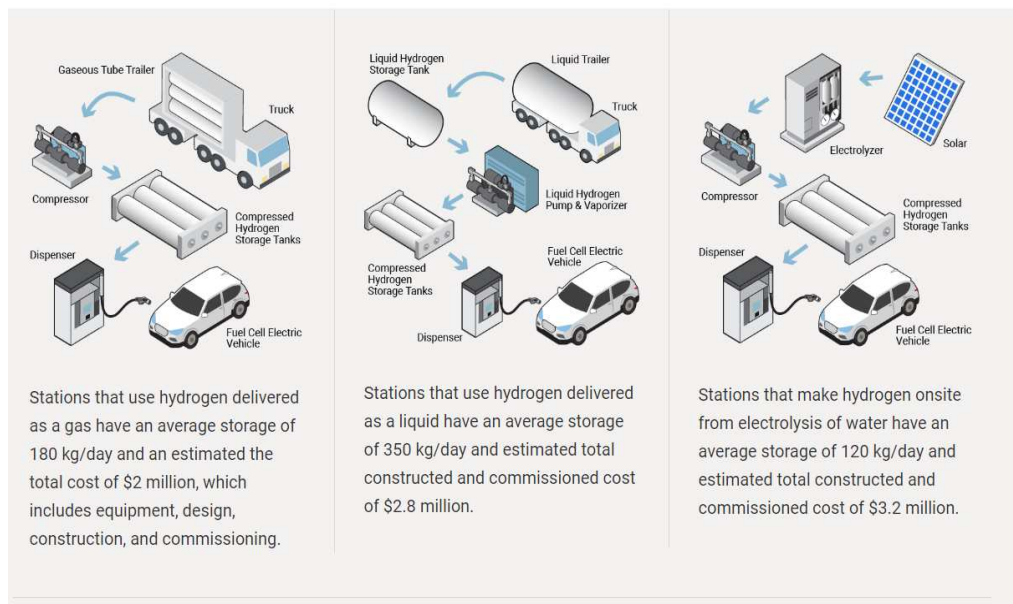
En general puede decirse que existen tres sistemas de distribución de hidrógeno:

⁷http://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/3620/pdf

⁸<https://www.lenntech.es/periodica/elementos/h.htm#ixzz5Vx6RslTV>

1. Estaciones que distribuyen hidrógeno recibido en forma gaseosa desde una planta central de producción.
2. Estaciones que distribuyen hidrógeno recibido en forma líquida desde una planta central de producción.
3. Estaciones que distribuyen hidrógeno generado en sitio.

Figura N° 5: Configuración típica de estaciones de distribución de hidrógeno



Fuente: California Fuel Cell Partnership - <https://h2stationmaps.com/costs-and-financing>

De acuerdo a la estimación de costos de California Fuel Cell Partnership, el costo de los 3 tipos de estaciones depende de la complejidad de las mismas, siendo la estación tipo 1 la menos costosa con un valor de \$2 millones de dólares, incluyendo el equipo, diseño, construcción y certificación. Las 3 estaciones modelo también presentan una producción variable, la estación tipo 1 produciría 120 kilogramos por día, la tipo 2, 350 kilogramos por día y la tipo 3, 120 kilogramos por día.

En el caso de Costa Rica, partiendo de un escenario donde se cuenta con la normativa técnica necesaria para la construcción de plantas de producción y estaciones de servicio y teniendo en consideración la extensión del territorio nacional, probablemente lo más favorable es construir varias plantas en puntos estratégicos para la producción y suministro de hidrógeno hacia estaciones de servicio para la venta al detalle.

Sin embargo, aún sin contabilizar el costo de la infraestructura de producción y almacenaje de una planta de producción de hidrógeno, el costo de construcción de una estación de servicio es sumamente elevado. Usando como referencia datos del Departamento de Energía de los Estados Unidos, para una estación de servicio tipo 1, con una capacidad diaria de 200 kilogramos por día,

el costo estimado del hidrógeno sería de \$7.82/kg, muy superior a los cerca de \$0.60/kg del hidrógeno obtenido a partir de gas natural.

- El programa de incentivos públicos para el desarrollo del transporte a base de hidrógeno en California.⁹

Con el fin de incentivar el cambio de uso de tecnología de transporte y reducir el impacto de las emisiones de gases efecto invernadero al ambiente, el Estado de California se ha planteado como meta establecer 100 estaciones de llenado de hidrógeno.

Para dar soporte a dicha iniciativa, la Comisión de Energía de California tiene la directriz de colocar \$20 millones de dólares anuales para el desarrollo Desarrollo de estaciones de carga de hidrógeno ligeras para Vehículos eléctricos de celda de combustible.

En el 2015 la Comisión de Energía de California y la Comisión de los Recursos del Aire presentaron un informe en el que, entre otras cosas, valora por cuánto tiempo se requerirá mantener el financiamiento a través del Programa de Tecnología de Vehículos y Combustibles Alternativos y Renovables (ARFVTP) para alcanzar la meta de 100 estaciones en California.

El informe establece que los costos para las estaciones de reabastecimiento de hidrógeno en el mercado inicial son altos y varían de \$ 2.1 millones a más de \$ 3 millones por 180 kilogramos por día (kg / día) y 350 kg / día de estaciones, respectivamente.

El financiamiento brindado oscila entre el 70 y el 85 por ciento de los costos totales de capital y se estima que será necesario mantenerlos por muchos años para alcanzar el objetivo de 100 estaciones. El monto total financiado a la fecha del informe fue de \$ 80.9 millones en apoyo de costos de capital y \$ 9.9 millones para operación y mantenimiento. Por su parte, el sector privado había invertido a ese entonces casi \$ 35 millones.

Para el 2016 se estimaba que se contaría con 50 estaciones de servicio con capacidad para más de 10,000 vehículos. El informe proyectaba que California alcanzará la meta de las 100 estaciones entre 2020 y 2024, para un monto acumulado de inversión pública de entre \$ 157 y \$ 170 millones de dólares.

Una de las conclusiones del informe es que en el escenario más conservador la viabilidad del uso de hidrógeno como vector energético sería incierto, especialmente si el interés del consumidor por adquirir FCEV es lenta y la inversión privada en el programa decrece, a pesar de que se mantengan las proyecciones de inversión pública, estimada en cerca de \$170 millones de dólares para alcanzar 100 estaciones.

⁹Edmund G. Brown Jr., Governor, : [“Joint Agency Staff Report on Assembly Bill 8: Assessment of Time and Cost Needed to Attain 100 Hydrogen Refueling Stations in California”](#)

Contexto nacional

- Consumo energético nacional

En el caso de Costa Rica en el 2016, el 62% del total de la energía que consumió el país provino de los derivados del petróleo. Del total de petróleo importado 67% lo consumió el sector transporte, 15% la industria y el 18% restante se distribuyó entre los sectores comercial, residencial, agrícola y construcción.

En el siguiente gráfico se evidencia la gran dependencia de la sociedad costarricense hacia los combustibles fósiles importados para generar energía y productos de consumo, con el consecuente riesgo para el ambiente, debido a que su combustión produce considerables cantidades de compuestos contaminantes como dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NOx) y azufre (SOx), entre otros. Estos componentes generan problemas de contaminación en el aire, el agua y daño a la capa de ozono, lo que contribuye al debilitamiento del ambiente e incremento en la temperatura global debido al efecto invernadero.

El Gráfico N°2 muestra la matriz energética y la distribución de hidrocarburos por sector, en Costa Rica para el año 2016.

Gráfico N°2: Matriz energética de Costa Rica y Distribución del consumo de hidrocarburos (2016)¹⁰



¹⁰ SEPSE <https://public.tableau.com/profile/sepse#!/vizhome/Flotavehicular/Dashboard1>

- Síntesis de estudios realizados en el país entorno al hidrógeno

En los últimos años, algunas entidades del estado como el ICE y RECOPE así como la academia han realizado estudios acerca de la aplicabilidad del hidrógeno en los procesos energéticos nacionales.

El ICE orientó sus investigaciones hacia el aprovechamiento del hidrógeno como sustituto de los combustibles fósiles para sus plantas térmicas y aplicaciones vehiculares. RECOPE por su parte, se enfocó en un proyecto de investigación para generar experiencia en temas como el manejo, almacenamiento y posibles aplicaciones del hidrógeno obtenido mediante electrólisis.

Desde el sector privado, la empresa Ad Astra Rocket trabaja en el desarrollo de una propuesta basada en el trabajo de investigación que RECOPE realizó, en la que propone el uso del hidrógeno como propulsor de automotores y contribuir así a la descarbonización de la economía, sin embargo, reconoce que aún está en la fase demostrativa del proyecto y que no han realizado estimaciones financieras detalladas sobre la viabilidad del mismo.

Por su parte, algunos investigadores y profesionales de la Universidad de Costa Rica y del Colegio de Químicos, han planteado fuertes críticas a la forma en que se ha presentado y promueve el proyecto de generación de hidrógeno mediante electrólisis, pues consideran que es un proceso con balance energético negativo, que no dimensiona adecuadamente la complejidad y el costo financiero asociado con su producción, almacenamiento y distribución en la realidad costarricense.

El ICE, RECOPE, Ad Astra Rocket e investigadores del sector académico en la Universidad de Costa Rica coinciden en que para obtener hidrógeno se requiere suministrar energía para separarlo de las sustancias que lo contienen. De acuerdo a la Academia, la forma más efectiva en términos de costos para obtenerlo es mediante su aprovechamiento como un producto secundario, ya sea de los procesos de refinación o químicos, e incluso del gas natural, sin embargo, estos procesos no son considerados limpios pues generan gases no deseados como CO y CO₂. En contraposición, aunque la electrólisis del agua es un proceso limpio, no se tiene un balance energético positivo, además de que el costo financiero para obtenerlo está directamente asociado con el costo de la energía que se utilice para su generación.

En este sentido, Ad Astra Rocket ha identificado una oportunidad potencial para reducir costos operativos mediante la comercialización del oxígeno que se produce en el proceso de separación del agua, no obstante la academia considera que dicha solución no es viable, pues los costos de producción de oxígeno por medio de electrólisis no compiten con los costos de empresas como Praxair que obtienen el oxígeno mediante la licuefacción del aire, invirtiendo mucho menos energía y con menores costos.

Todas las partes consultadas coinciden en que al ser el elemento más pequeño encontrado en la naturaleza, requiere consideraciones muy específicas para su almacenamiento, lo que afecta directamente sus costos de producción, transporte y almacenamiento.

Finalmente, algunos actores del sector académico han sido críticos al señalar que consideran que el proceso propuesto de producción de hidrógeno se ha manejado de una forma simplista, sin considerar las dificultades, cuidados y potencial práctico que tiene su producción, difundiendo el

mensaje de que la producción de hidrógeno por electrólisis de agua no representa mayor complejidad tecnológica y económica. Además, han externado su preocupación al indicar que aún faltan por calcular los costos detallados y reales para la producción de hidrógeno por electrólisis en el país, lo cual es información muy sensible para tomar la decisión de si el proyecto resulta conveniente o no.

A continuación, se presenta un resumen de los estudios realizados en el país en torno al hidrógeno.

RECOPE

RECOPE incursionó en el tema del hidrógeno con el interés de investigar aplicaciones dentro del campo de acción como empresa. En este sentido, funcionarios de la empresa visitaron universidades y otros puntos de interés en Estados Unidos para conocer acerca de los procesos de obtención del hidrógeno y sus aplicaciones, en empresas automovilísticas, petroleras y no petroleras, entre ellas la NASA.

En el contexto de Costa Rica, y como parte del proyecto de investigación de RECOPE, orientado hacia los medios de transporte, se determinó que el proceso más práctico para obtener hidrógeno era a partir del agua (electrólisis). No obstante, en la actualidad el proceso más rentable es la extracción de hidrógeno como subproducto de otros procesos, tal como la refinación de los hidrocarburos. Es importante añadir que cada proceso de extracción de hidrógeno tiene un costo y madurez asociados. Para los fines de este proyecto orientado hacia la investigación, realizar la factibilidad económica se programó para un momento posterior, en tanto se recopilaba y analizaba la información obtenida del proceso de electrólisis y almacenaje del producto obtenido.

El proyecto de investigación evolucionó de forma tal que RECOPE decidió construir una planta experimental, la cual fue instalada en Liberia y operó por varios meses. Durante el proceso investigativo y de aprendizaje, se determinó que una de las mayores dificultades en la producción del hidrógeno es su almacenamiento, pues por naturaleza sus moléculas son muy pequeñas, requiriendo un diseño especial de tanques para evitar que el hidrógeno se fugue a través de los intersticios moleculares de los metales con los que se fabrican los depósitos de almacenamiento convencionales. Además, al ser el hidrógeno un gas con una densidad muy baja, se requieren altas presiones para almacenarlo, del orden de 400 kPa o más. Ambos factores elevan los costos de producción en una forma importante, no obstante, el proyecto no contempló en ningún momento un análisis financiero o un estudio de factibilidad a escala comercial.

Igualmente se determinó que el precio de producción de 1 kg de hidrógeno estaría influenciado por la fuente de energía que se utilice, siendo probablemente más costoso emplear energía de la red eléctrica, en comparación con energía generada en el sitio a partir de fuentes solares y eólicas.

La Procuraduría General de la República mediante el oficio C-063-2015 respecto a la incursión de RECOPE en los biocombustibles, señaló que la empresa sólo puede dedicarse a las actividades directamente relacionadas con hidrocarburos; razón por la cual la empresa optó por suspender el proyecto de investigación, dado que el proceso de obtención de dicho gas no tenía relación con las actividades ordinarias aprobadas por ley a RECOPE. Sin embargo, tomó la decisión de mantener la planta experimental, brindándole mantenimiento preventivo a fin de conservarla a la espera de

que eventualmente una modificación a la Ley de RECOPE permita continuar con el proyecto de investigación.

Con fines demostrativos, RECOPE autorizó a la empresa Ad Astra Rocket a operar la planta y aprovechar el hidrógeno producido, para lo cual esa empresa gestionó la importación de un autobús propulsado a hidrógeno.

El hidrógeno en aplicaciones motrices se utiliza para producir electricidad por medio de una celda de combustible. En el caso del autobús que se encuentra en Liberia, la electricidad producida mueve los motores eléctricos ubicados en las ruedas del mismo, lo que le permite al bus moverse.

Las pruebas de campo realizadas por Ad Astra Rocket permitieron estimar que con 1 kg de hidrógeno a 700 bar de presión, podían recorrerse aproximadamente 100 km. Para el año 2014, producir 1 kg de hidrógeno costaba aproximadamente entre ₡ 13,000 y ₡ 14,000 colones.

En RECOPE, el proceso de refinación fue suspendido hace varios años. Si la empresa estuviera refinando, podría producir hidrógeno a partir de este proceso, sin embargo no es así y la producción a partir de electrólisis del agua no forma parte de su quehacer diario y constitución de su marco normativo.

ICE

El ICE por su parte ha llevado a cabo una serie de iniciativas conjuntas entre la Institución y universidades como la Universidad de Costa Rica y el Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Para ello, se gestionaron varias consultorías, como el “Análisis actual y tendencias futuras de la producción de electricidad a partir del uso de hidrógeno” en la que se abordan diversas metodologías energéticas, incluyendo su producción y analizando sus ventajas y desventajas. También sobre el “Uso de hidrógeno en motores de combustión interna”, “Problemas en motores diésel enriquecidos con hidrógeno”, “Reformado de etanol para la producción de hidrógeno”, “Electrolizadores alcalinos para la producción de hidrógeno”, “Eficiencia del uso del hidrógeno como aditivo en motores de combustión interna”, entre otros. Finalmente, se realizó un estudio de mercado que permitió identificar empresas en el país que utilizan hidrógeno en sus procesos.

Aún cuando el alcance de los estudios realizados fue diverso, el mayor interés del ICE para la realización de los mismos fue la valoración del hidrógeno como sustituto de los combustibles fósiles para la generación de electricidad en plantas térmicas, pues se tenía la hipótesis de que éste permitiría reducir los costos de generación térmica de electricidad.

Como común denominador, la principal conclusión que se desprendió de las investigaciones realizadas fue que no se daban las condiciones para que el ICE incursionara en el hidrógeno, pues no hay eficiencia en su producción y sus costos no son atractivos, por lo que se recomendó esperar a que posibles avances de la tecnología hicieran al hidrógeno económicamente más conveniente para los objetivos del ICE.

Ad Astra Rocket

Ad Astra Rocket Company inició la investigación acerca del hidrógeno y su potencial como fuente alternativa de energía, de la mano de la investigación iniciada por RECOPE sobre el hidrógeno y sus aplicaciones. De acuerdo a lo externado por representantes de la empresa, su mayor interés es desarrollar el conocimiento necesario para facilitar la incursión de otras empresas que quisieran eventualmente invertir en el proyecto.

La empresa visualiza al hidrógeno como una opción energética que podría contribuir a la descarbonización de la economía, aprovechando los recursos naturales existentes. Reconocen además que independientemente del proceso que se utilice para la obtención del hidrógeno, siempre se requerirá energía, pero, en el caso particular de Costa Rica existe la ventaja de que la electricidad proviene de energías renovables.

Una de las aplicaciones que identifica la compañía para el hidrógeno, es en el sector transporte particularmente, en el sector de carga, transporte público y trenes, que permitiría reducir las emisiones de GEI. De acuerdo Ad Astra, el costo de un autobús a hidrógeno se redujo de \$1M en el 2010 (Van Hool A330FC -“Nyuti”) a un monto cercano a \$527 000 en el 2018 (Foton AUV, 2018 - China). De mantenerse dicha tendencia, esperarían que lleguen a ser más competitivos frente al transporte convencional.

Aunque en forma general el hidrógeno está asociado con el transporte, no es la única aplicación que posee, ya que también puede considerarse un vehículo de almacenamiento para la energía eléctrica generada a partir de energía solar o eólica. Ad Astra ha identificado el empleo de energía eólica o solar para generar hidrógeno y a la vez utilizarlo para almacenar dicha energía a fin de utilizarla nuevamente en la generación de la electricidad, durante las horas pico o ante el faltante de luz solar o viento.

Actualmente los sistemas solares y eólicos deben almacenar los excesos de energía producida en baterías con capacidad limitada, mientras que el hidrógeno presenta mucha mayor capacidad. Aunque el planteamiento de Ad Astra es interesante aún no han realizado un estudio exhaustivo y formal. Para darle sostenibilidad económica al proyecto, Ad Astra ha identificado algunas oportunidades, entre ellas, aprovechar la energía solar y eólica para generar hidrógeno y además vender el oxígeno obtenido como subproducto del proceso.

En la actualidad, Ad Astra Rocket trabaja en optimizar lo que describe como el “Ecosistema de Transporte Auto-sostenible”. Este se divide en cuatro fases:

- Viabilidad técnica: la actual, que es una fase demostrativa. Aprovecha la disponibilidad de energía renovable.
- Viabilidad operativa: incremento en la producción de hidrógeno e incorporación de rutas de transporte.
- Viabilidad comercial: contempla un estudio de viabilidad financiera del proyecto, incluyendo el costo de capital
- Expansión comercial: introducción de vehículos en el mercado, estaciones de llenado y relacionados.

Universidad de Costa Rica – Escuela de Química (UCR)

Para este sector de la Academia, el proceso de producción de hidrógeno debe reflejar la complejidad del mismo, considerando las dificultades, cuidados y potencial práctico que tiene su producción, siendo realistas y objetivos al identificar las dificultades y limitaciones tecnológicas y económicas que conlleva la producción del hidrógeno por electrólisis de agua.

Consideran de suma importancia dejar en claro que el hidrógeno no es un combustible ni una fuente de energía, concepción errónea que maneja en forma general el público, sino un vector energético o sea una sustancia capaz de almacenar la energía para recuperarla posteriormente.

En su exposición, indican que en los países industrializados el hidrógeno es obtenido como un subproducto de otros procesos de producción, como la refinación de petróleo o la producción de polímeros. También se obtiene de los yacimientos de gas natural disponibles en algunos países. Debido a esto, el costo de producción se reduce considerablemente al ser un producto secundario de un proceso principal, pero que se aprovecha y recolecta para venderlo en el mercado para ser usado en aplicaciones como el transporte, con precios manejables por la influencia de la economía de escala.

Resaltan además que la obtención de hidrógeno del gas natural produce CO_2 , por lo cual este proceso no es considerado limpio. En este caso, por cada kilogramo de hidrógeno se generan 6 kg de CO_2 , por lo tanto, recomiendan que el Estado sea muy crítico al validar todo el proceso de obtención del hidrógeno frente a las políticas ambientales país y considerar los impactos que podrían tener los subproductos generados a lo largo de la cadena productiva total.

Para el caso de obtener hidrógeno de la electrólisis, al ser el agua una sustancia muy estable, el costo energético de suproducción es alto, estimando que se requieren 39.7 kWh por cada kilogramo de hidrógeno producido. Esto equivaldría a la energía consumida en 5 días por una familia que usa 250 kWh mensuales.

Es importante anotar que la referencia anterior es una estimación teórica que no considera:

- Pérdidas de energía por disipación de calor.
- Energía adicional requerida para la compresión del hidrógeno.

La Academia llama la atención al indicar que deben calcularse los costos detallados y reales para la producción de hidrógeno por electrólisis en el país, antes de tomar la decisión de si el proyecto es conveniente o no.

Finalmente indican que la obtención de hidrógeno por electrólisis del agua debe ser estudiado profundamente, incluyendo la evaluación de la termodinámica y la cinética envueltas en el proceso, con el fin de identificar métodos adecuados para la remoción y el control del calor producidos durante la reacción electroquímica así como la identificación de sistemas de control adecuados para evitar problemas mayores.

Las principales conclusiones de los estudios efectuados por la UCR son los siguientes:

- El proceso para obtener hidrógeno debe ser químicamente realista, con un balance energético positivo, financieramente atractivo y congruente con las políticas nacionales.
- La iniciativa para obtener hidrógeno por electrólisis de agua no parece cumplir completamente con las condiciones antes mencionadas.
- Infraestructura para la producción y comercialización de hidrógeno

En Costa Rica, específicamente en Liberia, RECOPE puso en marcha un sistema experimental de producción y almacenamiento de hidrógeno a baja presión (1.5 MPa). A fin de completar la instalación en sitio de los elementos principales del experimento, la planta cuenta con un sistema de almacenamiento de hidrógeno de alta presión (71 MPa, con su respectivo compresor de hidrógeno y sus subsistemas, tanques de alta presión con sus respectivos equipos).

Actualmente RECOPE no opera la planta, sin embargo le da mantenimiento periódico y mediante un convenio cedió su operación a la empresa Ad Astra para fines experimentales y demostrativos.

Como parte del valor agregado de la puesta en marcha de la planta, el equipo humano de RECOPE ha adquirido conocimiento y experiencia en el manejo de tecnologías de hidrógeno de alta presión que eventualmente permitirán replicar dicho proceso, si el país quisiera incursionar con esta tecnología en el sector transporte.

Conclusiones del diagnóstico

Algunos puntos importantes que se derivan de la discusión anterior se recogen a continuación:

- El 96% del hidrógeno que se produce a nivel mundial se obtiene como subproducto de la refinación de hidrocarburos, gas natural, procesos industriales, entre otros, reduciendo considerablemente sus costos de producción. El restante 4% proviene de la electrólisis, donde se obtiene hidrógeno como producto principal y en el que se utiliza electricidad de diversas fuentes (no necesariamente renovables), factor que incide en los costos de producción asociados.
- Para el 2015, en Estados Unidos el costo de producción de hidrógeno a partir de gas natural se estimaba en \$0.60/ kg, mientras que su producción por electrólisis del agua, usando energías renovables, se estimó en su mejor escenario en \$4.15/ kg (~1000 kg hidrógeno/día).
- En la industria, el hidrógeno se usa en el proceso de producción de fertilizantes, plásticos y productos farmacéuticos.
- En el transporte, el uso del hidrógeno para alimentar celdas de combustible es relativamente reciente. Las metas planteadas por el Consejo del Hidrógeno para su desarrollo son a largo plazo 2030 y 2050, pues la implementación de sistemas basados en hidrógeno es compleja.
- En California, el desarrollo del hidrógeno para aplicaciones de transporte cuenta con apoyo estatal por \$20 millones de dólares anuales, estimándose cerca de \$170 millones para completar 100 estaciones. Esto representa una participación del estado de entre

70% y 85% en los proyectos de inversión, junto con incentivos por parte de los vendedores de vehículos que incluyen cubrir los costos de mantenimiento y combustible por un plazo determinado.

- El aprovisionamiento de hidrógeno en el mundo se basará no solo en fuentes renovables sino también en energía nuclear y combustibles fósiles, complementado con prácticas de captura de carbono para hacerlas viables ambientalmente.
- A nivel mundial, la autonomía de los vehículos a hidrógeno se ve afectada por la disponibilidad de estaciones de recarga, las cuales en la actualidad son muy dispersas.
- El nicho de aplicación del hidrógeno en transporte se ha identificado en el transporte público, de carga y buques principalmente, lo anterior por la densidad energética del hidrógeno frente a las baterías. No se prevé una presencia importante en automóviles.
- El uso de autobuses a hidrógeno está presente en países desarrollados o en vías de desarrollo por ejemplo: EE.UU, Brasil, Alemania, Francia y China que cuentan con procesos de producción industriales desarrollados.
- El costo relativo de un autobús impulsado por hidrógeno y su costo de mantenimiento es 3 veces mayor que el de una unidad impulsada por diésel, lo que podría desestimular a los empresarios a cambiar sus unidades. Algunos sectores de la industria de celdas de combustible promulgan que con el paso del tiempo el costo de las unidades será más accesible, sin embargo, las proyecciones del Consejo del Hidrógeno sugieren largos plazos (2050) para una penetración significativa en el sector transporte.
- En general, puede concluirse que a nivel mundial el desarrollo y uso del hidrógeno como opción energética no se encuentra aún consolidada. Todavía restan algunas décadas para obtener una penetración significativa del hidrógeno en el sector energía en países avanzados.
- Para el caso de Costa Rica, es probable que se tome el modelo seguido en países que ya cuentan con experiencia en el campo del transporte a base de hidrógeno, restringiendo su ámbito de aplicación al transporte de carga pesada, trenes, autobuses y taxis.
- El entorno regional representaría una dificultad para la actividad comercial del transporte internacional, ya sea de pasajeros o de carga, puesto que en el marco del SIICA no existen iniciativas ni se contempla dentro de las propuestas de desarrollo para la región, implementación de una red regional de transporte basada en hidrógeno, por lo que Costa Rica sería el único miembro con una iniciativa de este tipo, limitando su uso a lo interno del país únicamente, ya que las estaciones de recarga más cercanas se encuentran en Argentina y Estados Unidos, lejos del alcance máximo de un vehículo de hidrógeno, hoy día.
- En Costa Rica no se cuenta con la normativa técnica necesaria para certificarla calidad y la seguridad a lo largo de los procesos de producción, almacenaje, distribución del hidrógeno como vector energético.
- La producción de hidrógeno mediante electrólisis del agua, significa para Costa Rica superar una serie de retos:
 - Dotar del marco legal y normativo requerido a las instituciones y empresas del sector energía para habilitarlas en la investigación, producción y comercialización del hidrógeno.

- Encontrar opciones viables para la producción del hidrógeno por electrólisis.
- Encontrar opciones viables económicamente para su almacenamiento y distribución.
- Es necesario el monitoreo periódico de las tecnologías asociadas.

MARCO ESTRATÉGICO

Partiendo del contexto nacional e internacional anteriormente expuesto y considerando que el país decida continuar avanzando en este tema, en este apartado se proponen una serie de acciones preparatorias necesarias para crear no solo el marco jurídico habilitante que les permita a las empresas del sector participar en el proceso, sino la puesta en marcha de una serie de estudios necesarios para determinar la viabilidad de la introducción del hidrógeno en la matriz energética nacional. Estas tareas constituirían el siguiente paso para avanzar en este proceso que incluso a nivel mundial necesita un tiempo de madurez para lograr consolidarse como una alternativa energética accesible.

Plan de acción

Eje temático	Resultado	Acciones	Indicador	Plazo	Encargado
Marco jurídico habilitante	Instituciones y empresas del sector público (energía y transporte) están habilitadas legalmente para incursionar en la investigación, producción, almacenamiento, distribución, comercialización y promoción del hidrógeno.	Elaborar propuesta para modificar la Ley 6588 de RECOPE a fin de que pueda incursionar en la investigación, producción y distribución de energías alternativas.	Propuesta elaborada	Dic.2019	MINAE, RECOPE
		Incorporar en el decreto N° 30131-MINAE-S, Reglamento para la Regulación del Sistema de Almacenamiento y Comercialización de Hidrocarburos, las potestades de regulación y fiscalización de la producción, almacenamiento y comercialización de hidrógeno para la DGTCC.	Decreto publicado	Jun.2019	MINAE

		Crear una ley de la República de Costa Rica que modifique el marco legal de la Junta Administrativa de Servicios Eléctricos Municipal de Cartago, JASEC, y le permita incursionar en la actividad de investigación, producción, aprovechamiento y distribución del hidrógeno con fines energéticos.	Ley de la República aprobada	Dic.2025	JASEC
	Existe un marco normativo para la incorporación del hidrógeno en la matriz energética	Elaborar las normas técnicas nacionales sobre los sistemas de certificación, construcción y almacenamiento de hidrógeno.	Normas técnicas aprobadas	Jun.2020	MINAE con apoyo de INTECO
		Elaborar los reglamentos técnicos que oficialicen las normas técnicas nacionales.	Reglamentos técnicos aprobados	Dic.2020	MINAE
		Analizar la conveniencia de que el hidrógeno sea declarado un servicio público.	Informe	Dic.2019	MINAE
		Considerar la tecnología del hidrógeno en la reglamentación de las exoneraciones de repuestos de la Ley 9518.	Reglamento	Jun.2019	MINAE
Estudios de viabilidad		Realizar estudios de proyecciones de demanda eléctrica y potenciales de las fuentes energéticas autóctonas, con el fin de determinar las	Informe	Jun.2020	ICE

		necesidades de producción y aplicación energética del hidrógeno, como una opción de oferta energética.			
		Identificar, evaluar y desarrollar desde el punto de vista técnico, ambiental y económico, a nivel de investigación, fuentes y procesos potenciales que permitan la obtención de hidrógeno.	Informes	Una vez aprobado su nuevo marco legal	RECOPE
		Elaborar estudios técnicos y económicos para valorar la utilización del hidrógeno como sistema de almacenamiento de energía, considerando que la producción del hidrógeno se realiza con fuentes renovables, como complemento o sustituto de baterías.	Informe	Dic.2021	ICE
	Se determina la viabilidad del hidrógeno para que sea incorporado en la matriz energética.	Elaborar estudios técnicos para identificar su óptima aplicación en los diferentes nichos considerando la experiencia ganada en otros países en este tema: transporte particular, público y de carga.	Informe	Una vez aprobado su nuevo marco legal	RECOPE
		Evaluar la puesta en marcha de un proyecto piloto de recarga de vehículos de hidrógeno para el sector público.	Propuesta plan piloto	Una vez aprobado su nuevo marco legal	RECOPE, MINAE

		Incluir en la agenda regional en el marco del SICA la opción de uso de hidrógeno en el transporte de carga.	Acuerdo aprobado	Dic.2020	MINAE SEPSE MOPT Con colaboración de: COMEX MEIC
--	--	---	------------------	----------	---