



Entregable 3

Hoja de Ruta para el despliegue de Infraestructura de Recarga de Hidrógeno

Creación de condiciones habilitadoras del ecosistema hidrógeno en
aplicaciones de movilidad eléctrica

Documento elaborado por:

HINICIO

Calle 85 #19b-31, Bogotá, Colombia

Punto de contacto

Patrick Maio

CEO

+54 911 3646 3219

patrick.maio@hinicio.com

Versión 7 de julio de 2020

CONTENIDOS

Lista de Tablas	5
Lista de Figuras	6
Listado de Abreviaciones.....	7
1. Hoja de Ruta de Despliegue de Infraestructura de Recarga de Hidrógeno	8
1.1. Contexto.....	8
1.2. Fase 1 – Preparación del terreno.....	9
1.2.1. Objetivos específicos	9
1.2.2. Metas.....	9
1.3. Fase 2 – Despliegue de la Red Nacional de Cobertura.....	15
1.3.1. Objetivos específicos	15
1.3.2. Metas.....	15
2. Definición de necesidades de infraestructura de recarga de hidrógeno	18
2.1. Cuantificación de la demanda de hidrógeno	18
2.2. Cuantificación de Estaciones de Recarga de Hidrógeno.....	21
3. Propuesta de instalación gradual de la infraestructura	24
3.1. Etapa A: Despliegue mínimo de cobertura.....	24
3.2. Etapa B: Despliegue gradual localizado	26
3.2.1. Proyectos de adopción de FCEV	26
3.2.2. Densidad de población	29
3.2.3. Flujo carretero	30
4. Diseños tipo de estaciones de recarga de hidrógeno.....	33
4.1. Dimensionamiento de HRS – 350 bar tipo <i>on-site</i>	36
4.2. Dimensionamiento de HRS – 350 bar tipo <i>centralizada</i>	37
4.3. Dimensionamiento de HRS – 700 bar tipo <i>on-site</i>	38
4.4. Dimensionamiento de HRS – 700 bar tipo <i>centralizada</i>	39
5. Esquemas de financiación para proyectos de H ₂	40
5.1. Finanzas de carbono	41
5.2. Emisión de bonos	41
5.3. Créditos blandos.....	41
5.4. Financiamiento por proyecto	41
5.5. Fondos climáticos	42

5.6. Asociaciones público – privadas.....	42
5.7. Fondos corporativos	42
5.8. Fondos nacionales	42
5.9. Fondos de capital de inversión	43
5.10. Oferta Pública Inicial.....	43
5.11. Fondos de asistencia técnica	43
5.12. Fondos nacionales de innovación.....	43
5.13. Capital de riesgo	44
5.14. Presupuestos de i+D corporativos	44
5.15. Donaciones.....	44
Bibliografía	45
Anexo 1 - Guía Sintética de Despliegue de Estaciones de Recarga de Hidrógeno	46
Anexo 2 – Mapa de despliegue de HRS en Costa Rica	47

Lista de Tablas

Tabla 2-1 Demanda de hidrógeno en un escenario BAU. Fuente: Hinicio	21
Tabla 2-2 Criterios tecnológicos de las HRS. Fuente: Revisión bibliográfica por Hinicio .	22
Tabla 5-1 Financiamiento de proyectos según su madurez tecnológica	40

Lista de Figuras

Figura 1-1 Mapa de Ruta de la Fase 1 - Preparación del terreno	10
Figura 1-2 Mapa de ruta de la Fase 2 - Despliegue de la Red Nacional de Cobertura	16
Figura 2-1 Demanda de hidrógeno en Costa Rica escenarios BAU y HB. Fuente: Hinicio	19
Figura 2-2 Proporción de consumo de hidrógeno en Costa Rica por segmento vehicular. Fuente: Hinicio	20
Figura 2-3 Demanda de hidrógeno en Costa Rica ante distintos escenarios de penetración de FCEV. Fuente: Hinicio	20
Figura 2-4 Crecimiento acumulado de la infraestructura de recarga de hidrógeno en Costa Rica. Fuente: Hinicio	22
Figura 2-5 Comparativa de las HRS en Costa Rica en 2050 de distintos escenarios de penetración. Fuente: Hinicio	23
Figura 3-1 Localización de las HRS de cobertura inicial en Costa Rica. Fuente: Hinicio	25
Figura 3-2 Diagrama de flujo de cuantificación y localización de HRS en Costa Rica..	28
Figura 3-3 Localización de las actividades económicas y logísticas de Costa Rica	29
Figura 3-4 Distribución de HRS - 2030 - Escenario BAU	31
Figura 3-5 Distribución de HRS - 2050 - Escenario BAU	31
Figura 3-6 Comparación de la distribución de HRS (2050) con la distribución de gasolineras (2020). Fuente: Hinicio con información de RECOPE.....	32
Figura 4-1 Esquemas típicos de HRS a)Producción on site (superior) b) Producción centralizada (inferior). Fuente: Elaboración de Hinicio	33
Figura 4-2 Presiones de relleno en el esquema Cascade Filling	35
Figura A2-0-1 Vista general del Mapa de Despliegue de HRS.....	47
Figura A2-2 Cuantificación de HRS por región en el mapa interactivo	48

Listado de Abreviaciones

BAU	Business as Usual – Bajo condiciones normales del mercado
BB	Battery Breakthrough – Penetración de baterías
BEV	Battery Electric Vehicle – Vehículo Eléctrico a Baterías
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CRUSA	Fundación Costa Rica Estados Unidos para la Cooperación
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle – Vehículo Eléctrico de celda de combustible
H ₂	Hidrógeno
HB	Hydrogen Breakthrough – Penetración de hidrógeno
HDV	Heavy Duty Vehicle – Vehículo de carga pesada
HP	High Pressure – Alta presión
HPK ²	Habitantes por kilómetro cuadrado
HRS	Hydrogen Refueling Station – Estación de recarga de hidrógeno vehicular
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle – Vehículo de combustión interna
LDV	Light Duty Vehicle – Vehículo de carga ligera
LP	Low Pressure – Baja presión
MP	Medium Pressure – Presión media
O&M	Operación y Mantenimiento
RNC	Red Nacional de Cobertura (de estaciones de recarga de hidrógeno)
TRL	Technology Readiness Level – Nivel de madurez tecnológica

1. Hoja de Ruta de Despliegue de Infraestructura de Recarga de Hidrógeno

1.1. Contexto

Costa Rica es conocido internacionalmente como un país preocupado por el medio ambiente, donde la naturaleza puede convivir con el desarrollo y actualmente, como un líder de la descarbonización en Latinoamérica. El país ha establecido metas claras, plasmadas en el Plan de Descarbonización 2018-2050 en el que, a través de 4 sectores económicos, promueve 10 ejes de acción entre los que incluye

- Desarrollo de un sistema de movilidad basado en transporte público seguro, eficiente y renovable, y en esquemas de movilidad activa y compartida.
- Transformación de la flota de vehículos ligeros a cero emisiones, nutrido de energía renovable, no de origen fósil.
- Fomento de un transporte de carga que adopte modalidades, tecnologías y fuentes de energía cero emisiones o las más bajas posibles.

También en Costa Rica, a través del Plan Nacional de Desarrollo y de Inversiones Públicas 2019-2022 se establecieron metas país para la promoción de energías cero emisiones dentro del sector transporte, con el objetivo central de reducir la dependencia a los hidrocarburos y reducir las emisiones de carbono.

En concordancia con estas metas, la Fundación CRUSA y el BID Lab suscribieron el convenio de Cooperación Técnica No Reembolsable No ATN/ME-16972, "Camino a la Descarbonización: Promoviendo la Economía de Hidrogeno en Costa Rica", al tiempo que el compromiso para el desarrollo de un ecosistema para la economía del hidrógeno en Costa Rica ha unido voluntades de múltiples actores como la Fundación CRUSA, Purdy Motors, Ad Astra Rocket, y varios otros bajo la Alianza para Desarrollar el Ecosistema de Hidrogeno para el Transporte Costarricense (Alianza por el Hidrógeno, Alianza por el H₂, Alianza H₂) como un mecanismo de coordinación del ecosistema.

Como parte de sus actividades, la Alianza por el H₂ ha encomendado a Hinicio, bajo el contrato "Estudios técnico-financieros para la creación de condiciones habilitadoras del ecosistema del hidrógeno en aplicaciones de movilidad eléctrica", el desarrollo de la hoja de ruta para el desarrollo de la infraestructura de recarga de hidrógeno, misma que se presenta en este documento.

La hoja de ruta mostrada es el resultado de analizar las condiciones costarricenses para el desarrollo de la movilidad de hidrógeno, de múltiples entrevistas con los actores interesados en el país y de la experiencia de Hinicio sobre las condiciones que en otros lugares del mundo han habilitado el desarrollo del hidrógeno como energético para la movilidad.

Los actores que han sido consultados durante la elaboración de esta hoja de ruta son:

- Ad Astra Rocket Company
- Fundación CRUSA

- Ministerio de Ambiente y Energía – MINAE
- Instituto Costarricense de Electricidad
- Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica - INTECO
- Grupo Q – Hyundai Costa Rica
- MATELPA
- Universidad de Costa Rica

La hoja de ruta se divide en dos fases:

- Fase 1 – Preparación del terreno
- Fase 2 – Despliegue de la Red Nacional de Cobertura (RNC)

1.2. Fase 1 – Preparación del terreno

Durante la fase de preparación del terreno, se planea el desarrollo de las condiciones jurídicas y normativas que permitan utilizar el hidrógeno como un gas energético para la movilidad y que favorezcan la adopción de este tipo de vehículos.

1.2.1. Objetivos específicos

- Vincular el Hidrógeno Energético con los planes de desarrollo Energético de Costa Rica para la próxima década, como un eje estratégico de descarbonización desde la política pública
- **Permitir que las tecnologías del hidrógeno para energía y movilidad tengan acceso a incentivos tributarios e impositivos, compatibles con el marco normativo existente del país**
- **Desarrollar los lineamientos técnicos, reglamentos, y aclarar vacíos jurídicos para permitir la producción, transporte, y distribución del hidrógeno verde como un combustible para movilidad cero emisiones**
- **Establecer un panorama para que tanto desarrolladores privados como públicos identifiquen oportunidades en el desarrollo de estaciones de recarga en el país, reduciendo las barreras normativas y económicas actuales**
- **Permitir las condiciones para el despliegue de una Red de Cobertura Nacional de HRS a partir de 2025, así como para el desarrollo de estaciones adicionales.**

1.2.2. Metas

Para el cumplimiento de los objetivos específicos de esta fase se han planteado 12 metas del año 2020 al 2025, las cuales se describen a continuación.

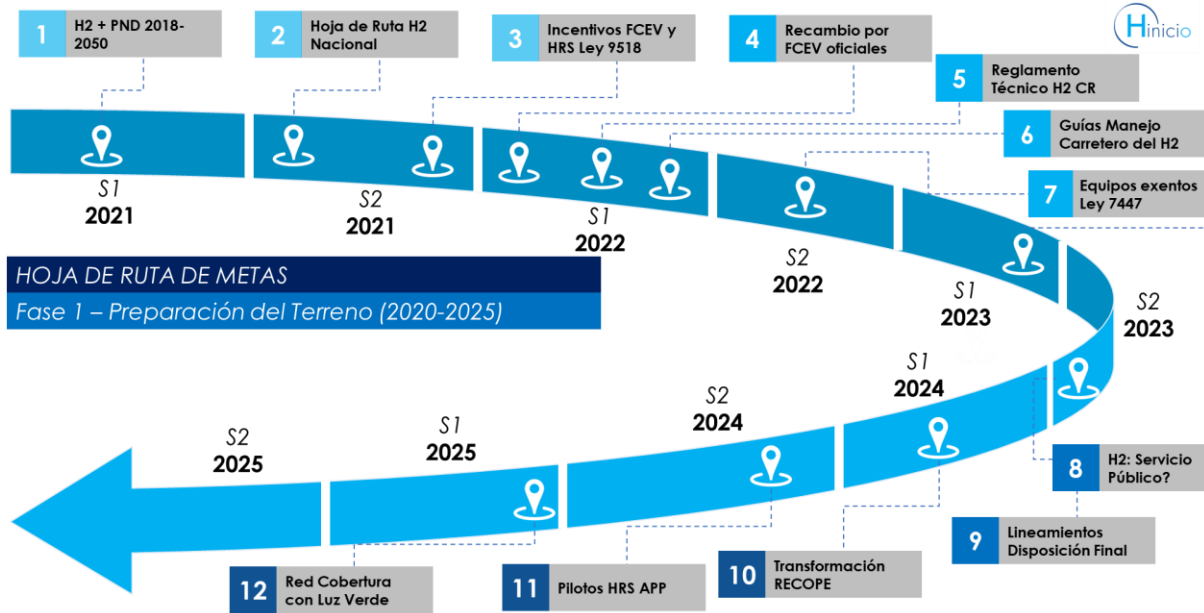


Figura 1-1 Mapa de Ruta de la Fase 1 - Preparación del terreno

1) Hidrógeno en el Plan Nacional de Descarbonización

El Plan Nacional de Descarbonización de Costa Rica (MINAE, 2018), menciona ya algunas acciones para trabajar en el desarrollo de las tecnologías de hidrógeno para la movilidad. Estas acciones forman parte de los Ejes 1 (Transporte Público), 2 (Vehículos ligeros), y 3 (Transporte de Carga) e incluyen:

- ➔ Diseñar y oficializar Hoja de Ruta para Consolidación del Cluster de Hidrógeno.
- ➔ Definir la Hoja de Ruta para consolidar un clúster de I+D en Hidrógeno o Implementar el Plan de Acción Interinstitucional para propiciar el uso del hidrógeno en el sector transporte.
 - Realizar estudios de prefactibilidad de los proyectos clave identificados, definir modelo de negocio, etc.
 - Diseño del piloto con buses públicos de hidrógeno.
 - Dar a conocer las lecciones en materia de costos, rendimiento e infraestructura.
- ➔ Establecer un proceso para evaluar opciones tecnológicas innovadoras, entre ellas, definir una visión transformativa a escala para futuros usos de hidrógeno y pilas de combustible como complemento de otras tecnologías cero emisiones.
- ➔ Complementar la red de recarga eléctrica a lo largo del país con infraestructura para tecnologías cero emisiones (ejemplo, estaciones de hidrógeno).
- ➔ Elaborar estudios de viabilidad financiera y tecnológica para la electrificación del transporte de carga mediante vehículos de hidrógeno en el corto y mediano plazo.

- ➔ Implementar proyectos piloto con tecnologías alternativas, incluido el hidrógeno, para el transporte de carga.

La primera meta de esta hoja de ruta es: generar una lista de acciones y definir a los actores de cada una de ellas para cumplir con las menciones del hidrógeno en el Plan de Descarbonización

2) Hoja de Ruta Nacional de Hidrógeno

Se deben ejecutar los estudios y diseño del plan de acción para que el hidrógeno sea considerado como un eje central en la descarbonización de los sectores transporte y energía, para lograr consistencia con lo estipulado en el VII Plan Nacional de Energía 2015-2030, el cual menciona el hidrógeno como combustible limpio, y como vector de almacenamiento, por lo cual la plataforma para materializar lo dispuesto en el plan debe ser elaborada en detalle (acciones específicas).

3) Hidrógeno en la Ley 9518

Con el fin de promover la adopción de FCEV entre la población de Costa Rica, es necesario realizar los estudios normativos para proponer ajustes, adiciones, o interpretaciones a la Ley N° 9518 - "Ley de incentivos y promoción para el Transporte Eléctrico", y a su decreto reglamentario N° 41092-MINAE-H-MOPT, para que los FCEV y las HRS gocen de todos los beneficios que tienen los BEV.

Mediante esta meta se busca garantizar que los FCEV se incluyan en la definición de "vehículo eléctrico" dada por la Ley N° 9518 - "Ley de incentivos y promoción para el Transporte Eléctrico", en lo referente a incentivos en materia de exoneración sobre impuesto general sobre ventas, impuesto selectivo de consumo, impuesto sobre valor aduanero, e impuesto a la propiedad de vehículos. Igualmente, esta definición debería ser válida para lo dictaminado por el Decreto N° 41092-MINAE-H-MOPT, que reglamenta la Ley.

Aunque el párrafo anterior, ayudaría sustancialmente a la adopción de los FCEV ligeros, ahora los buses o vehículos de carga pesada no son favorecidos por la forma en que la Ley establece las exoneraciones, por lo que se debe promover un mecanismo de apoyo a los vehículos de alto costo de adquisición para que sus beneficios fiscales sean tasados como un porcentaje de su costo y no por intervalos en montos absolutos de dinero.

Hasta ahora la Ley N° 9518 aplica solamente a la adquisición de vehículos, sin embargo, se podrá buscar la extensión del incentivo dado sobre exoneración del impuesto sobre las ventas y del impuesto selectivo de consumo los repuestos relacionados con el funcionamiento del motor eléctrico y las baterías de los vehículos eléctricos, hacia celdas de combustible y otros repuestos específicos de los FCEV.

La infraestructura de recarga de hidrógeno (HRS) jugará un papel muy importante en la penetración de los FCEV, por lo que se debe buscar que las HRS sean sujetas a lo dictaminado por el Artículo 19, en el cual "La Administración Pública, las empresas

públicas y las municipalidades realizarán la inversión necesaria para aquellas obras de infraestructura dirigidas al fortalecimiento y la promoción del transporte eléctrico, tales como centros de recarga, carriles exclusivos, parqueos preferenciales para vehículos eléctricos, redes ferroviarias y otros". Las HRS deberían también gozar del mismo impulso y estandarización que los centros de recarga para BEV.

Finalmente, se debe buscar incorporar, al artículo 26 de la Ley N° 9518 - "Ley de incentivos y promoción para el Transporte Eléctrico" el uso de hidrógeno verde o de bajo carbono como vector válido y sujeto a promoción acorde al Plan Nacional del Transporte Eléctrico.

4) Recambio de vehículos oficiales por FCEV

Una forma de adoptar los FCEV y promoverlos desde el ejemplo, es utilizarlos para fines oficiales. Se debe promover el desarrollo de un plan de apoyo institucional para incentivar el recambio de vehículos por FCEV, entre instituciones de la Administración Pública, empresas públicas y municipalidades, así como para transporte público (buses y taxis). Este plan debe considerar:

- Incluir guías de promoción y sensibilización sobre FCEV disponibles comercialmente en Costa Rica o para importación sencilla, y capacitar a los funcionarios en las entidades públicas encargados de compras y estrategias de renovación vehicular, para fomentar que las instituciones de la Administración Pública, empresas públicas y municipalidades promuevan la compra y la utilización de vehículos eléctricos que cumplan las especificaciones técnicas requeridas por la Administración Pública.
- Proponer una guía en el diseño de pliegos para contratación de renovación de flota, para priorizar tecnologías de baja emisión, incluyendo los FCEV.

5) Reglamento Técnico sobre Hidrógeno para Costa Rica

Un pilar para la adopción de las tecnologías de hidrógeno, de manera segura, es el desarrollo de normatividad técnica para los componentes de su cadena de valor como energético. Esta meta pretende generar el conjunto de normas técnicas nacionales y la homologación de las normas internacionales aplicables tanto a los FCEV, HRS y modos de producción, transporte y suministro de hidrógeno. Como resultado de estas acciones se debe obtener un Reglamento Técnico para Producción y Aprovechamiento del Hidrógeno en Costa Rica.

En este contexto, se propone también emitir un decreto reglamentario, paralelo al N° 41642-MINAE - "Reglamento para la construcción y el funcionamiento de la red de centros de recarga eléctrica para automóviles eléctricos por parte de las empresas distribuidoras de energía eléctrica " que defina las condiciones y requerimientos técnicos para el despliegue de HRS en Costa Rica.

6) Guías de manejo carretero de H₂

Mediante esta meta, se busca definir los actores habilitados para el transporte carretero de hidrógeno líquido o gaseoso, así como facilitarles guías para entender su manejo y transporte conforme a la norma vigente. Dentro del alcance de esta meta, se incluye:

- Facilitar a los transportadores de hidrógeno comprimido y líquido guías para entender su manejo y transporte carretero conforme a lo dispuesto en el "Reglamento para el Transporte Terrestre de Productos Peligrosos" N° 24715-MOPT-MEIC-S, dado que el hidrógeno comprimido se considera una mercancía peligrosa conforme a la lista de mercancías peligrosas de las Recomendaciones Relativas al Transporte de Mercancías Peligrosas (Rev. 19) de las Naciones Unidas (número de registro 1049), así como el hidrógeno líquido (registro 1966), y el hidrógeno contenido en un hidruro metálico (3468).
- Extender el alcance del Reglamento para la Regulación del Transporte de Combustible N° 36627-MINAET, para que el hidrógeno se le dé un tratamiento como "producto limpio" en la categoría de combustibles, y por ende, sea susceptible a que su transporte sea reglamentado con condiciones específicas por la Dirección General de Transporte y Comercialización de Combustibles (DGTCC) del MINAE.

7) Hidrógeno en la Ley 7447

Debido a la importancia de la infraestructura de recarga para habilitar la adopción de los FCEV, se debe proponer que electrolizadores, celdas de combustible, tanques para almacenamiento de hidrógeno gaseoso y líquido, estaciones de recarga de hidrógeno, y compresores para hidrógeno, queden exentos del pago de los impuestos selectivo de consumo, *ad valorem*, de ventas y afines, al considerarse en la lista de bienes exentos por promover uso racional de la energía, según lo previsto por la Ley de Regulación del Uso Racional de la Energía N.º 7447.

Se propone adicionar a la Lista oficial de bienes exonerados, conforme al artículo 38 de la Ley de Regulación del Uso Racional de la Energía, Ley N° 7447 del 03 de noviembre de 1994 y sus reformas, los siguientes equipos:

- Electrolizadores
- Celdas de combustible
- Tanques para almacenamiento de hidrógeno gaseoso y líquido
- Estaciones de recarga de hidrógeno
- Compresores para hidrógeno

8) Decisión sobre el H₂ como un Servicio Público

Se debe definir, mediante un estudio normativo y análisis de impactos *ex-ante* y *ex-post*, la conveniencia y viabilidad de considerar el hidrógeno como un servicio público

y/o combustible, regulado por la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos ARESEP, a través de modificación o interpretación sobre la Ley N.º 7593.

Se propone realizar esta serie de estudios para definir la conveniencia y los retos normativos y regulatorios de declarar el hidrógeno como un bien público sujeto a regulación por la ARESEP. Se prevé que en caso de que se determine conveniente realizar esta declaración, se requiera una modificación en la Ley N.º 7593 (Ley del ARESEP) que le permita regular sobre un bien como el hidrógeno. Como beneficios, esta declaración facilitaría la comercialización del hidrógeno como combustible en Costa Rica.

9) Lineamientos Disposición Final

Esta meta pretende incentivar la adecuada disposición final de baterías y celdas de combustible de vehículos BEV y FCEV, a través de la construcción de lineamientos o reglamentos específicos para estos equipos conformes a la Ley N.º 8839 "Gestión Integral de Residuos", que es la Ley marco que gobierna la política pública en materia de disposición final de residuos en Costa Rica, incluyendo además el tratamiento especial y las disposiciones generales de Responsabilidad Extendida del Productor.

Si bien la Ley toma su definición de residuos peligrosos o de manejo especial de listados marco internacionales (donde aparecen las baterías y celdas de combustible), resulta conveniente ahondar en una reglamentación más específica para los procedimientos de recuperación para disposición, reusó o reexportación de estos equipos en el país, vinculando además a los fabricantes importantes de BEV y FCEV activos en el país en el proceso de construcción de estos lineamientos.

10) Aprobación del proyecto de ley para la transformación de RECOPE

Mediante esta meta, se propone pugnar por que se apruebe el proyecto de Ley titulado "Ley de Transformación de RECOPE para la contribución hacia la transición energética", dando así facultades a la empresa para poder producir, distribuir y comercializar hidrógeno como un combustible limpio no derivado de hidrocarburos. Una vez aprobada esta Ley, RECOPE podría llamarse Empresa Costarricense de Combustibles y Energías Alternativas, Sociedad Anónima; que de este momento en adelante llamaremos ECOENA, y que tendrá como función principal incursionar en energías químicas alternativas.

Por medio de una reforma a la Ley N.º 6588, ECOENA estará facultada para investigar, producir, importar y exportar, industrializar, almacenar, comercializar y transportar energías químicas alternativas. De esta manera, ECOENA/RECOPE tendrá las facultades para ser un actor clave en el despliegue de la red de cobertura nacional, de las cuales carece en la actualidad.

11) Convenios de colaboración internacional

En la adopción de nuevas tecnologías, la formación de una red de colaboración y conocimiento compartido es importante. Por ello se propone la firma de convenios de

cooperación internacional con entidades multilaterales para recibir asistencia técnica en el planteamiento de pilotos de movilidad con hidrógeno, para varias flotas de tamaño importante (más de 50 vehículos) en Costa Rica, que incorporen el despliegue de las primeras HRS con inversión de capital mixto (APP).

Apalancándose en convenios de cooperación internacional y fondos multilaterales, se prevé dar soporte a pilotos de conversión de flotas a FCEV que además pretendan desarrollar HRS dedicadas, fomentando así el desarrollo de estaciones paralelas a la RCN, robusteciendo la infraestructura disponible.

12) Compromisos para el desarrollo de la RNC

Finalmente, en esta primera fase, se propone que las entidades del gobierno costarricense de soporte a entidades de carácter privado, interesadas en desarrollar infraestructura de producción y suministro de hidrógeno para movilidad, en superar las barreras de carácter normativo que se puedan encontrar en la fase 1, para facilitar el despliegue de la infraestructura de cobertura nacional y de proyectos piloto.

Al concluir esta fase de la hoja de ruta, es importante haber logrado compromisos institucionales para que entidades como la Alianza para el Hidrógeno puedan encontrar solución a las barreras normativas existentes en el mediano plazo y que permitan el despliegue temprano de HRS específicas a proyectos o que formarán parte de la RCN.

1.3. Fase 2 – Despliegue de la Red Nacional de Cobertura

En esta segunda fase, una vez que las condiciones normativas y jurídicas para el uso del hidrógeno como un energético para la movilidad sean claras, se deberá planear la construcción de una red de estaciones de recarga de hidrógeno que permita a los dueños de FCEV en Costa Rica trasladarse libremente dentro del país. A esta red la llamamos Red Nacional de Cobertura (RNC), y su desarrollo se plantea a partir de cinco metas.

1.3.1. Objetivos específicos

- **Definir las condiciones legalmente viables y convenientes desde el punto de vista institucional para la operación y/o concesión de las HRS de Costa Rica**
- **Elaborar los estudios, diseños, ingeniería y modelo de contratación que permita la construcción y puesta en marcha de la red de cobertura nacional**
- **Incentivar a la población en general a adquirir FCEV, a través de campañas de socialización y promoción de la tecnología del hidrógeno**

1.3.2. Metas

La Fase 2 de esta Hoja de Ruta contempla el cumplimiento de los objetivos específicos planteado 5 metas del año 2025 al 2028, las cuales se describen a continuación.

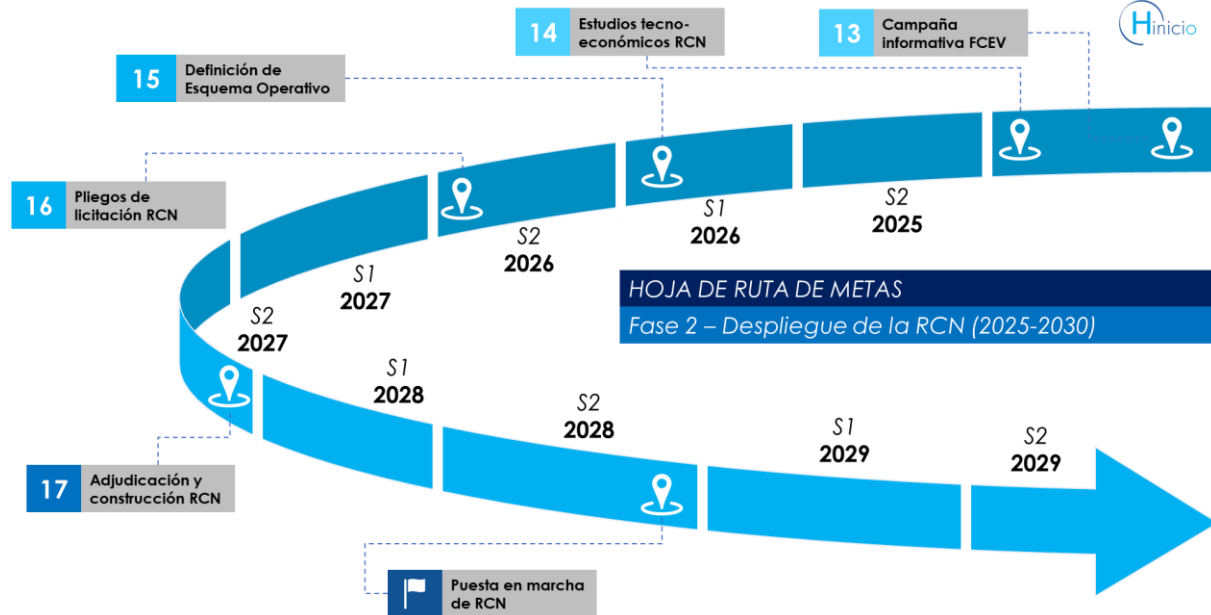


Figura 1-2 Mapa de ruta de la Fase 2 - Despliegue de la Red Nacional de Cobertura

13) Campaña informativa FCEV

Una vez establecido el marco normativo y jurídico, así como las alianzas estratégicas necesarias: la promoción de la tecnología deberá hacerse mediante campañas de difusión para el público en general a través de las cuales los ciudadanos puedan familiarizarse con los principios de operación de los FCEV, con la recarga de hidrógeno como combustible, así como para despejar dudas que pudiesen existir referentes a la seguridad de la tecnología.

14) Estudios tecno-económicos FCEV

El estudio dentro del cual se enmarca la presente hoja de ruta, suscrito entre Hinicio y la Alianza para el Hidrógeno, generó como entregables de base, además de este documento:

- Una **Guía Sintética de Despliegue de Estaciones de Recarga de Hidrógeno en Costa Rica**, dentro de la cual se presenta un trazado preliminar para la RCN
- Escenarios y proyecciones para la adopción de FCEV en el país

Tomando como base estos insumos, más la hoja de ruta nacional desarrollada en la Fase 1, se deberá contratar una consultoría encargada con el diseño detallado y los estudios de factibilidad para el despliegue de la RCN a nivel nacional, acotado para la demanda de hidrógeno en ese momento (2025-2026) y las proyecciones a futuro actualizadas en ese momento.

El resultado de la actividad deben ser los lineamientos técnicos completos para permitir la construcción de la RCN, y de su integración con las HRS que hasta ese punto en el tiempo existan ya en Costa Rica.

15) Definición de Esquema Operativo

Dado que en la actualidad las estaciones de servicio para combustibles líquidos en Costa Rica operan por un modelo de concesiones otorgadas a operadores autorizados por el MINAE (denominados pelders), será necesario realizar estudios que evalúen las opciones para determinar la manera óptima bajo la cual se operarán las nuevas HRS del país. Este modelo de operación/concesión deberá ser desarrollado conforme a los resultados de las acciones de fase 1, en particular, los resultados del estudio normativo, la normatividad técnica aplicable para las HRS, y los actores involucrados en el despliegue de la RCN.

16) Pliegos de Licitación RNC

Suponiendo que se dan las condiciones para la que RCN sea de operación pública o concesionada (hidrógeno es un bien público, suministrado principalmente por RECOPE bajo un mercado abierto o semi-abierto, y el estado tiene interés en participar en el despliegue de la infraestructura como planeador y regulador), se deberán elaborar pliegos para contratar la construcción de toda la RCN. En el momento, se ha de definir si se adjudica toda la red a un único oferente, o se hace un llamado a licitar por HRS o por región.

En función del modelo operacional resultante de los estudios de Fase 1, también deberá o no considerarse licitar la operación de la RCN.

17) Adjudicación y Construcción de la RNC

Como última meta de esta fase, se debe adjudicar y construir la Red Nacional de Cobertura, según los documentos técnicos y administrativos generados en las metas anteriores.

18) Puesta en Marcha de la RNC

Aunque esta no es una meta, se marca en la Hoja de Ruta como la acción que pone fin a las actividades que podrían habilitar la adopción de FCEV en Costa Rica.

La Red Nacional de Cobertura podría iniciar operaciones a finales de 2028 o a principio de 2029, momento para el cual los FCEV habrán disminuido sus costos y algunos ya habrán alcanzado o estarán a poco tiempo de su punto de equilibrio con sus homólogos de combustión interna o de baterías.

Posterior a la puesta en marcha de la RNC se podría esperar un despliegue gradual localizado, responsivo a las tendencias del mercado en la adopción de FCEV, despliegue del cual hablaremos más adelante.

2. Definición de necesidades de infraestructura de recarga de hidrógeno

La planeación de la infraestructura de recarga de hidrógeno se puede hacer de múltiples maneras, dependiendo de la estrategia de los países para la adopción de tecnologías de hidrógeno. Algunas formas que se han observado en los países con mayor adopción de FCEV son:

- ➔ **Vehicle driven:** instalación paulatina de estaciones de recarga de hidrógeno (HRS, por sus siglas en inglés) conforme los vehículos a celda de combustible (FCEV) comienzan a ser utilizados en el país o región.
- ➔ **HRS-driven:** instalación adelantada de estaciones de recarga de hidrógeno que permita a los usuarios la adquisición de FCEV con conocimiento de que tendrán donde recargar combustible. Generalmente se plasman metas en número de estaciones.
- ➔ **Híbrido Vehicle – HRS driven:** mediante un esquema moderado de instalación anticipada de HRS y constante monitoreo del avance en la penetración de los FCEV para generar el despliegue de las siguientes estaciones. Se establecen metas de despliegue de infraestructura a corto plazo que son constantemente actualizadas.

Mientras la opción *vehicle driven* deja muy poco margen para acelerar la introducción de los FCEV, la opción *HRS-driven* representa inversiones altas y riesgo de no aprovechar al máximo. La opción híbrida entre estas dos filosofías de despliegue representa una forma de planeación que, aunque demanda mayor atención, monitoreo constante del mercado y cálculos de actualización de la demanda de hidrógeno, es más económica y garantiza una mayor tasa de aprovechamiento de los activos. Esta opción híbrida es la que se sigue en este documento.

El Anexo 1 – **Guía Sintética de Despliegue de Estaciones de Recarga de Hidrógeno** presenta la metodología utilizada en este documento para la estimación de la demanda futura de hidrógeno en Costa Rica, la cuantificación de HRS y su localización geográfica entre las regiones socioeconómicas del país. Esta guía pretende ser una herramienta clave de apoyo en la planeación futura de HRS en Costa Rica.

El Anexo 2 – **Mapa de despliegue de HRS en Costa Rica** presenta a manera de mapa interactivo, los resultados de la aplicación de esta metodología al escenario de penetración Business as Usual definido por Hinicio en el Entregable 2 de esta consultoría.

2.1. Cuantificación de la demanda de hidrógeno

Los escenarios de penetración de FCEV han sido definidos en el Entregable 2 de esta consultoría. Se han planteado 3 escenarios:

- *Business as Usual (BAU)*
- *Hydrogen Breakthrough (HB)*
- *Battery Breakthrough (BB)*

En un escenario de penetración *Business as Usual (BAU)*, la demanda de hidrógeno en 2030 en Costa Rica podría ser de 532 toneladas H₂/año y podría crecer hasta 205,000 toneladas de H₂/año en 2050, sin embargo, si la penetración de FCEV ocurriera bajo un escenario la demanda en 2050 podría ser de hasta 600,000 toneladas de H₂/año (figura 2-1).

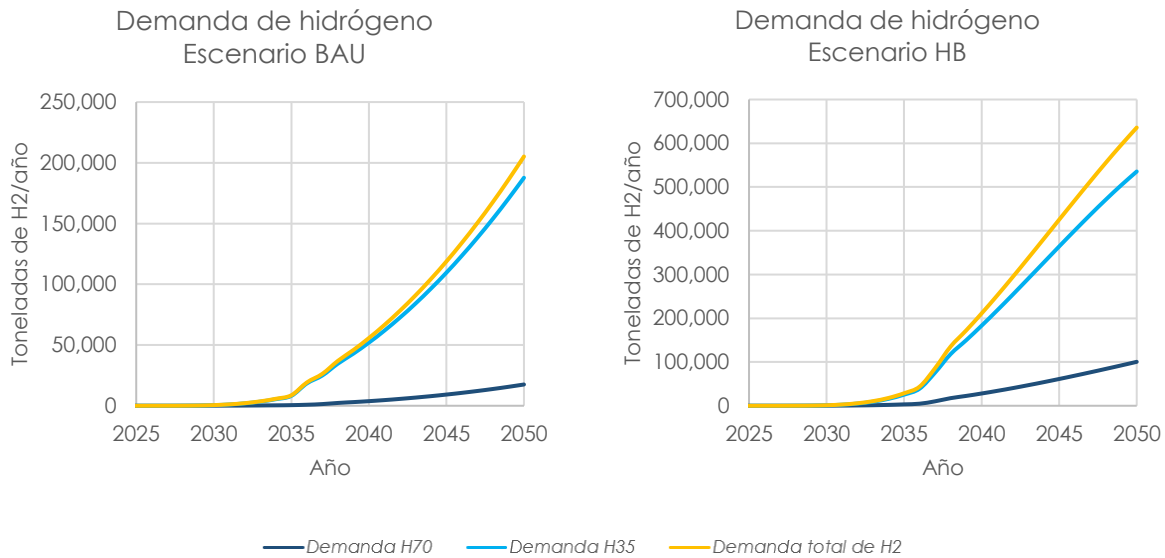


Figura 2-1 Demanda de hidrógeno en Costa Rica escenarios BAU y HB. Fuente: Hinicio

Tanto en el escenario BAU como en el escenario HB se observa que habrá una mayor demanda de hidrógeno a 350 bar de presión de recarga que de 700 bar. Esto responde a que los vehículos de mayor penetración serán los buses y vehículos de carga pesada, debido principalmente a su más temprana competitividad en costos frente a los vehículos convencionales.

Estos vehículos pesados consumen más hidrógeno por unidad por kilómetro debido a su mayor demanda energética. Por su parte, los vehículos de pasajeros particulares en un escenario BAU podrían consumir solo el 3% del total de hidrógeno vehicular de Costa Rica en 2050.

La proporción observada entre el consumo de hidrógeno a 350 y 700 bar en 2050 es aproximadamente 90 – 10% (figura 2-2).

Demanda de hidrógeno por segmento vehicular

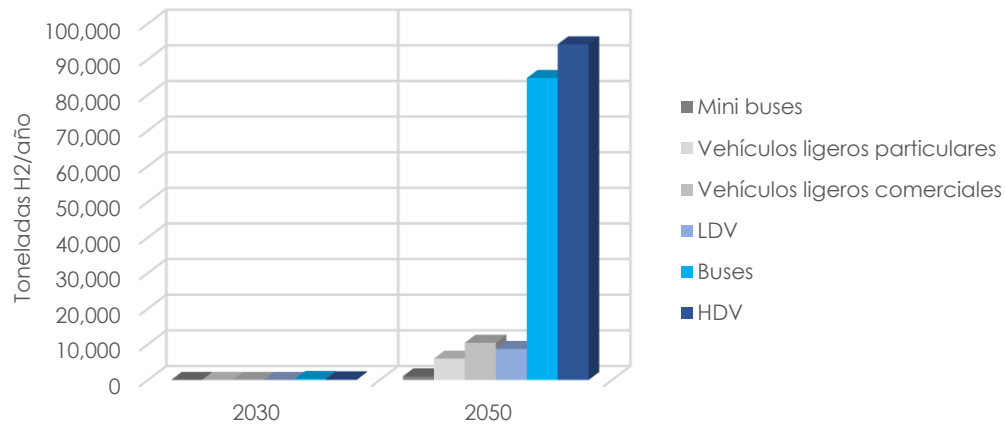


Figura 2-2 Proporción de consumo de hidrógeno en Costa Rica por segmento vehicular. Fuente: Hinicio

La cuantificación de la demanda es un cálculo que debe realizarse conforme nuevos datos o proyecciones de penetración de FCEV se van generando. La estimación de la demanda de hidrógeno a largo plazo conlleva una incertidumbre importante. En la figura 2-3 se muestran tres de las posibles curvas de aumento de la demanda de hidrógeno ante distintos escenarios de penetración de FCEV, todos probables.

Demanda de hidrógeno por escenario de penetración de FCEV

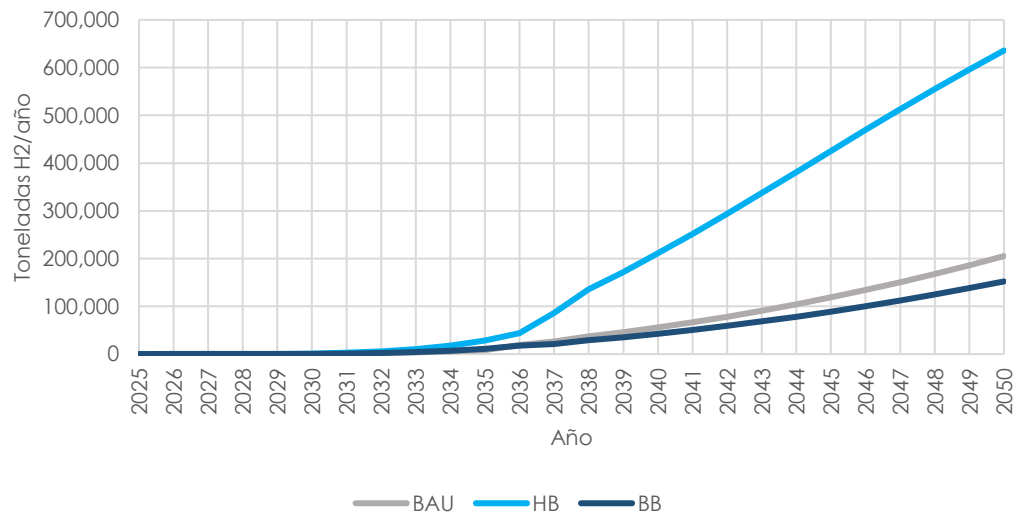


Figura 2-3 Demanda de hidrógeno en Costa Rica ante distintos escenarios de penetración de FCEV. Fuente: Hinicio

2.2. Cuantificación de Estaciones de Recarga de Hidrógeno

La cuantificación de estaciones de recarga de hidrógeno, o HRS, requiere de dos piezas de información principales:

- ➔ Demanda de H₂ por presión de recarga: Este dato debe ser constantemente actualizado, y de preferencia proyectado a corto plazo. En una estrategia híbrida *Vehicle-HRS Driven* se recomienda planear la infraestructura del año “n” sobre la demanda de hidrógeno del año “n+3”. Esto dará flexibilidad para favorecer la adopción de FCEV.
- ➔ Criterios tecnológicos sobre la capacidad de las HRS: A pesar de que las tecnologías de hidrógeno buscan que la experiencia de recarga de combustible vehicular sea muy parecida a la recarga de combustibles fósiles, el hidrógeno tiene características físicas muy diferentes a combustibles líquidos como el diésel o la gasolina. Las capacidades de despacho de HRS hoy en día suelen ser menores (en número de vehículos por estación) que las de combustibles líquidos.

Demanda de H₂ por presión de recarga

La demanda de hidrógeno en el escenario de penetración Business as Usual se reporta por lustro y por presión de recarga en la tabla 2-1.

Tabla 2-1 Demanda de hidrógeno en un escenario BAU. Fuente: Hinicio

Año	DEMANDA DE H70 (ton H ₂ /año)	DEMANDA DE H35 (ton H ₂ /año)
2025	0	0
2030	52	479
2035	499	8,126
2040	3,776	51,929
2045	9,208	109,574
2050	17,493	187,693

Criterios tecnológicos de las HRS

Los dos criterios tecnológicos más importantes para cuantificar HRS a partir de una demanda dada son:

- ➔ Número de vehículos atendidos por HRS: Cuando la planeación de infraestructura de recarga se hace desde una perspectiva *vehicle driven*, este es el criterio más acertado de usar.
- ➔ Capacidad de almacenamiento de hidrógeno de la HRS: Es un criterio más apropiado para estimar HRS desde una visión *HRS driven*, ya que se desconoce el número de vehículos que podrían ser atendidos, pero se lleva un control de la capacidad de despacho de hidrógeno de una región.

La tabla 2-2 muestra los valores que actualmente reporta la literatura para el número de vehículos que típicamente una HRS puede atender y las capacidades de almacenamiento usadas actualmente. Se muestran también estimaciones de los valores que podrían tener estos parámetros, sin embargo, la planeación futura de infraestructura de recarga deberá hacerse con datos actualizados.

Tabla 2-2 Criterios tecnológicos de las HRS. Fuente: Revisión bibliográfica por Hinicio

	Tipo de HRS	2020-2030	2030-2040	2040-2050
Vehículos atendidos por HRS	H35	200	400	800
	H70	400	1,200	3,000
Capacidad promedio HRS H35	H35	< 2000 kg H ₂ /día	< 3500 kg H ₂ /día	< 5000 kg/día
	H70	< 200 kg H ₂ /día	< 600 kg H ₂ /día	< 1300 kg/día

Atendiendo la metodología de la **Guía Sintética de Despliegue de Estaciones de Recarga de Hidrógeno** (Anexo 1) y haciendo uso de los criterios tecnológicos de la tabla 2-2, se obtienen 101 estaciones de hidrógeno a 350 bar y 40 estaciones a 700 bar en 2050.

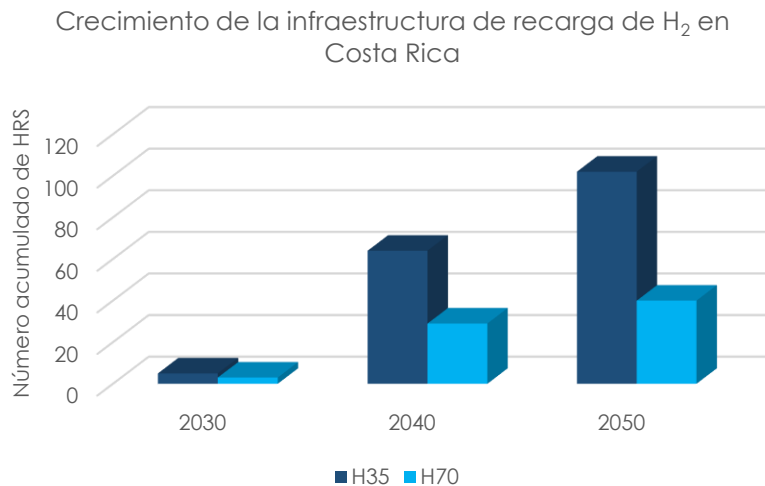


Figura 2-4 Crecimiento acumulado de la infraestructura de recarga de hidrógeno en Costa Rica. Fuente: Hinicio

De acuerdo con los escenarios de penetración estimados por Hinicio, la cantidad de HRS en 2050 podría ir desde poco más de 100 hasta casi 700, según el escenario de penetración de FCEV, por ello la importancia de actualizar constantemente los datos y de planear a corto plazo (3 – 5 años).

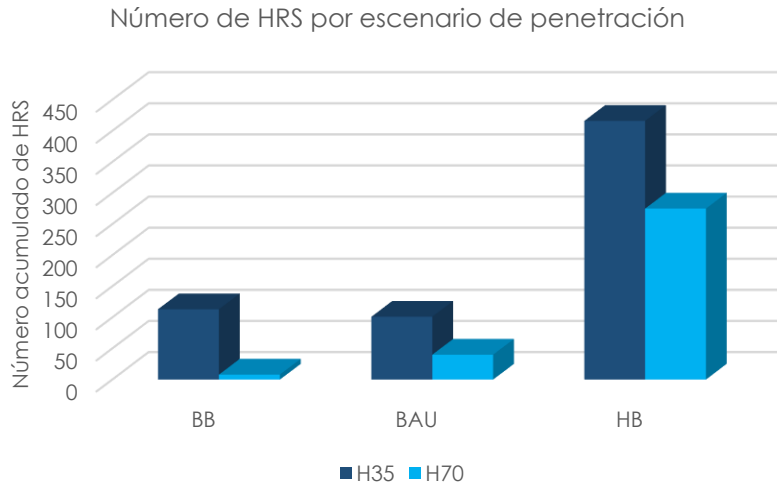


Figura 2-5 Comparativa de las HRS en Costa Rica en 2050 de distintos escenarios de penetración. Fuente: Hinicio

3. Propuesta de instalación gradual de la infraestructura

Con base en la experiencia de otras regiones en el mundo que han adoptado el uso de FCEV, y considerando que Costa Rica es un país pequeño en tamaño, se considera necesario un despliegue de HRS en dos fases:

- **Etapa A: Despliegue Mínimo de Cobertura:** Un factor que motiva a dueños de vehículos o de flotillas a sustituir sus unidades convencionales es que exista infraestructura de recarga del energético alternativo propuesto, sea electricidad para el caso de los BEV, o hidrógeno para los FCEV. Se propone en esta fase instalar en Costa Rica el número de HRS que permitan a un FCEV circular y recargar combustible libremente a lo largo y ancho del país sin problemas de autonomía.
- **Etapa B: Despliegue Gradual Localizado:** Una vez cubierta la necesidad mínima de cobertura que permitirá moverse libremente a un número limitado de FCEV por todo el país, se propone un despliegue gradual que responda al ritmo de adopción de FCEV en Costa Rica y que otorgue flexibilidad para recibir más vehículos sin que se comprometa la recarga de su combustible. Esta fase considera favorecer a las regiones de mayor actividad económica y de mayor tránsito carretero de Costa Rica.

3.1. Etapa A: Despliegue mínimo de cobertura

Costa Rica es un país con aproximadamente 450 kilómetros desde la frontera norte y la frontera sur y con 150 km entre el Océano Pacífico y el Atlántico. Esto hace posible que recorrer el país en todas direcciones conduciendo un FCEV con un número limitado de HRS.

Algunas consideraciones fueron tomadas en cuenta a la hora de elegir el número de estaciones necesarias para dar cobertura al país:

- ➔ **Presión de recarga:** Considerando que los vehículos que mayor penetración tendrán son los buses y vehículos de carga pesada, se propone que todas las HRS de esta fase sean de 350 bar. Además de poder atender a los vehículos citados, su inversión requerida es menor y si fuera necesario recargar vehículos de 700 bar de presión, estos podrían cargar el 50% de la capacidad de hidrógeno de sus tanques.
- ➔ **Distancia entre HRS:** Considerando que los buses y camiones de carga pesada podrán cargar el 100% de sus tanques, pero que los vehículos de pasajeros y mini buses solamente recargarán el 50% de su capacidad, se consideró colocar las HRS a menos de 200 km lineales para permitir que cualquiera que fuese el vehículo, pudiera ser conducido hasta el siguiente punto de recarga, o bien, conducir por 100 – 130 km a la redonda de su HRS local sin problemas de autonomía.

- ➔ Ubicación geográfica: Se analizó cuáles son las ciudades más importantes de Costa Rica, cuáles son las carreteras más transitadas y la posibilidad de desviarse desde carreteras secundarias hacia los puntos de recarga de hidrógeno de otras vías.
- ➔ Capacidad de despacho: Considerando que actualmente no existe una demanda de hidrógeno vehicular y que esta fase está pensada para ser un habilitador de la adopción de FCEV, se propone utilizar HRS con producción de hidrógeno on-site con capacidad de 200 kg-H₂/día, para evitar el desarrollo de una cadena de suministro de hidrógeno sofisticada.

Estableciendo la primera estación en San José, y recorriendo el país hacia todas las direcciones, se tiene que la fase de cobertura mínima deberá considerar HRS en:

- San José
- Limón
- Quepos
- San Isidro de El General
- Ciudad Neily
- Nicoya
- Limonal

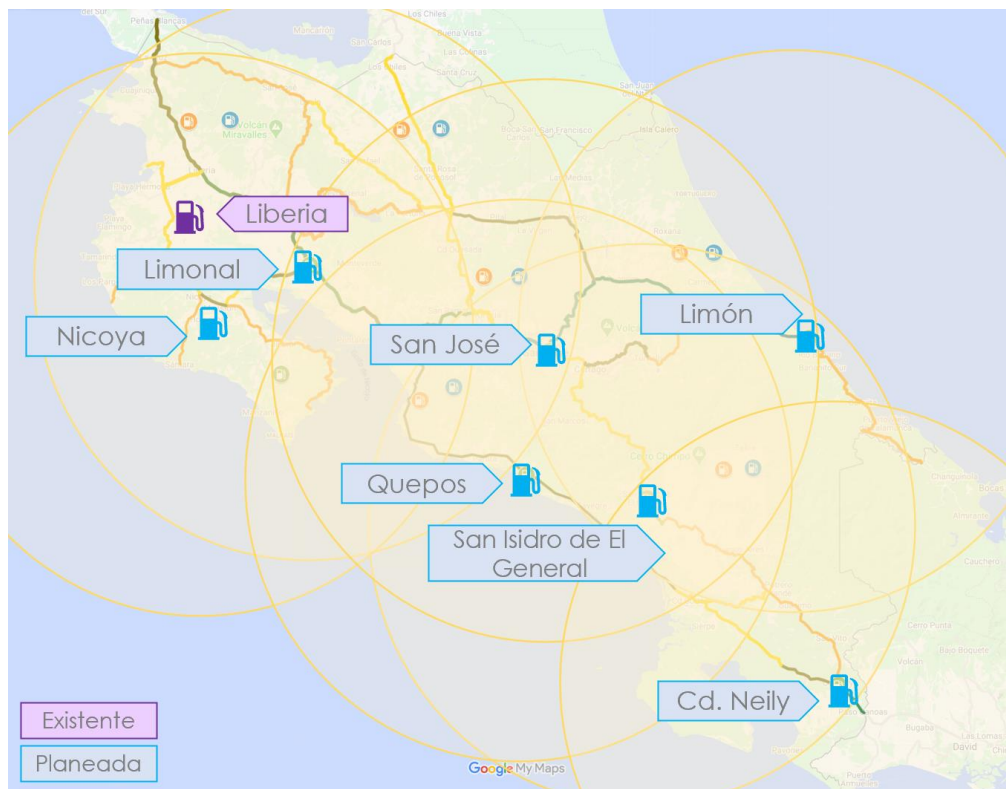


Figura 3-1 Localización de las HRS de cobertura inicial en Costa Rica. Fuente: Hinicio

Es importante notar que, aunque se aprecian HRS muy cercanas como la de Quepos y San Isidro de El General, geográficamente están separadas por un sistema montañoso

que hace que los vehículos tomen una ruta u otra, pero difícilmente podrían desviarse para recarga de combustible.

Las ciudades de Nicoya, Limonal y Ciudad Neily, aunque no son de las más pobladas o con mayor actividad económica en el país, guardan una posición estratégica frente a las carreteras que las atraviesan o que bifurcan en ellas.

3.2. Etapa B: Despliegue gradual localizado

Una vez que Costa Rica tenga una cobertura mínima para poder adoptar el uso de FCEV, se espera que más vehículos sigan llegando año tras año al país. Para satisfacer la demanda de hidrógeno de estos vehículos será necesario instalar más HRS en una cantidad tal que la infraestructura tenga una tasa adecuada de aprovechamiento y que haya holgura para seguir reemplazando vehículos convencionales por FCEV.

Para esta fase, la metodología a usar para planear el despliegue se describe en la figura 3-2. Más detalle sobre cómo usar esta metodología se puede consultar en la **Guía Sintética de Despliegue de Estaciones de Recarga de Hidrógeno en Costa Rica** (Anexo 1).

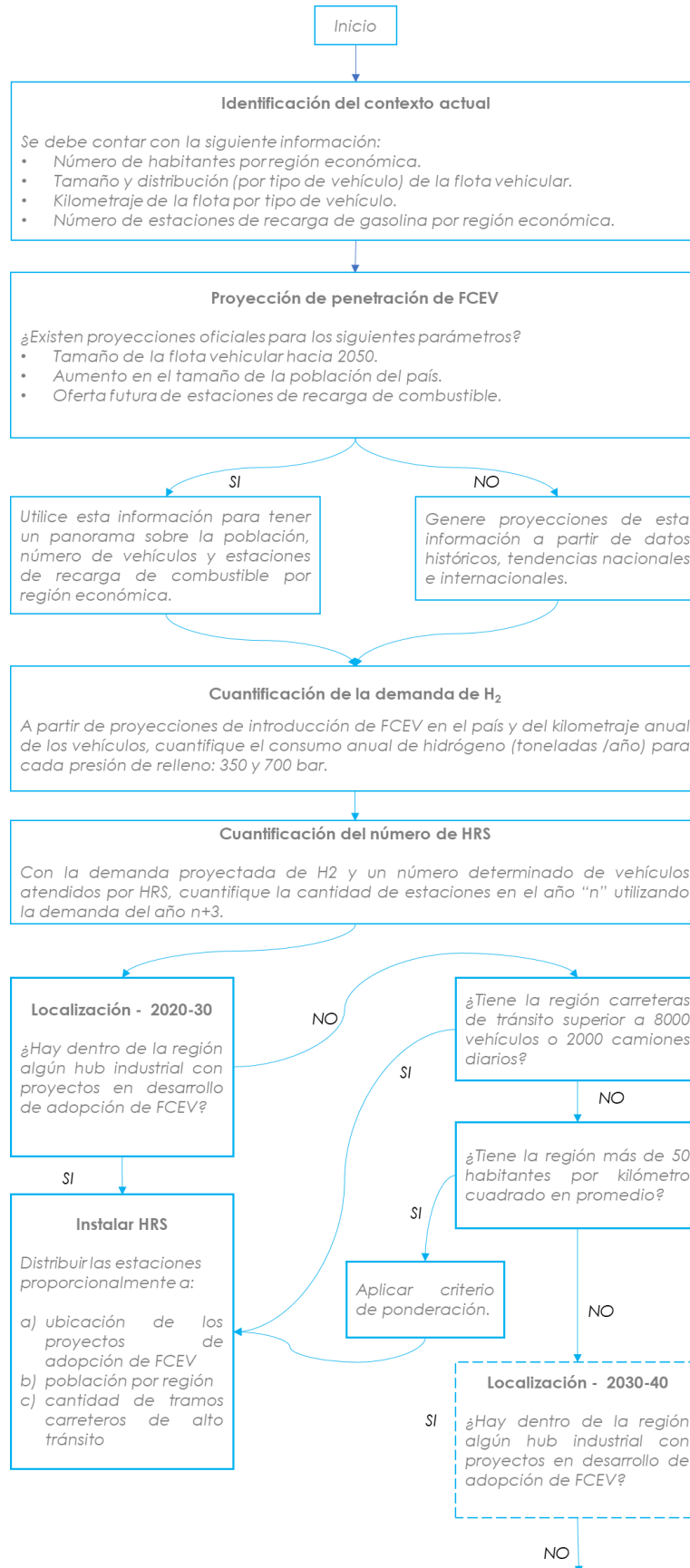
El proceso de la figura 3-2 basa la toma de decisión de número y localización de HRS en tres criterios, que, dependiendo del periodo de tiempo considerado, tienen diferente nivel de importancia:

- ➔ Proyectos de adopción de FCEV
- ➔ Densidad de población
- ➔ Flujo carretero

3.2.1. Proyectos de adopción de FCEV

Durante la década de 2020 a 2030 y aún durante los primeros años de la siguiente década, los FCEV que sean adoptados en Costa Rica serán, en buena medida, parte de flotas empresariales o públicas. La ubicación de las empresas propietarias de los vehículos será la directriz más importante para instalar las HRS que los abastezcan.

Como lo demuestra la experiencia en otros países, la penetración de FCEV se dará con mayor fuerza en las ciudades donde más centros productivos haya, sin embargo, otras regiones podrán tener una adopción motivada por razones como la investigación y el turismo.



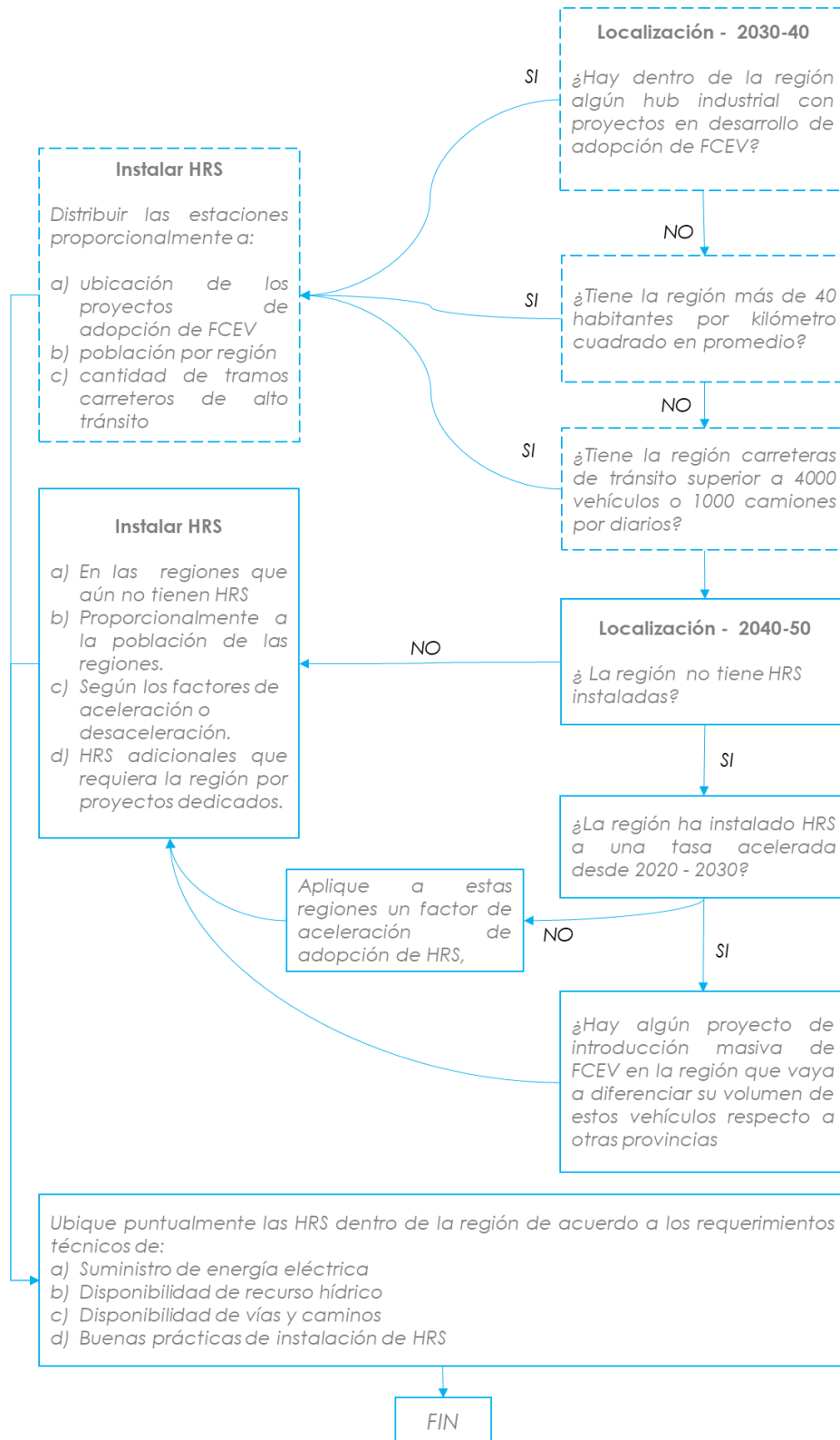


Figura 3-2 Diagrama de flujo de cuantificación y localización de HRS en Costa Rica

3.2.2. Densidad de población

Una consecuencia común del desarrollo industrial y económico de una región es el aumento en su densidad poblacional. El uso de este criterio como director de la localización de HRS responde tanto a la adopción de FCEV empresariales como a la adopción de vehículos particulares y de transporte de pasajeros tipo taxis.

Se ha hecho un análisis sobre la actividad económica de Costa Rica identificando en un mapa los centros de producción más importantes, centros corporativos, puertos marinos, aeropuertos y ciudades principales (ver Anexo 2). De este ejercicio se puede observar que en 2020 la actividad económica del país se centra en las regiones Pacífico Central, Central y Huetar Atlántica (figura 3-3). Mayor información y detalle sobre este mapa, puede ser encontrada en el Anexo 2.

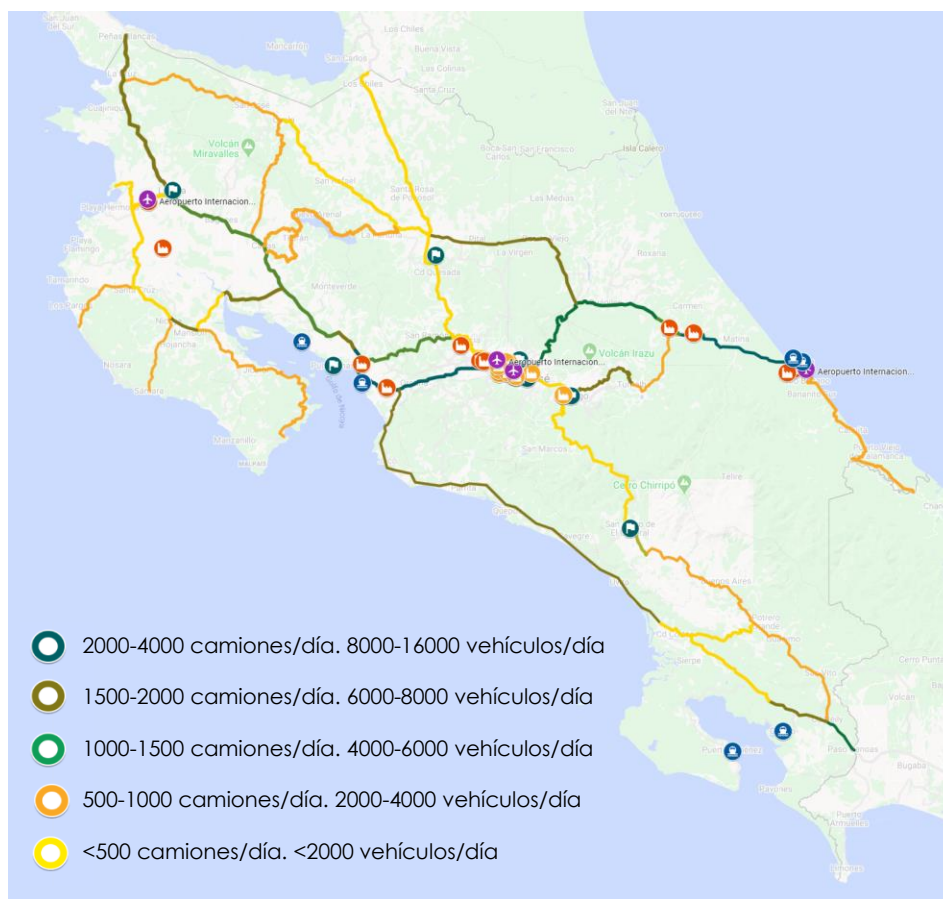


Figura 3-3 Localización de las actividades económicas y logísticas de Costa Rica

Partiendo de este análisis e identificando la densidad de población (en habitantes por kilómetro cuadrado- HPK²) de cada región (MEP, 2020), se hacen las siguientes recomendaciones:

- ➔ 2020 – 2030: favorecer las regiones cuyos HPK² superen los 50 habitantes/km².
- ➔ 2030 – 2040: favorecer las regiones cuyos HPK² superen los 40 habitantes/km².

- ➔ 2040 – 2050: favorecer a las regiones que aún no tuvieran HRS o que su volumen sea significativamente menor en comparación con otras regiones.

Otros valores de densidad de población podrían ser considerados a la hora de priorizar los esfuerzos de despliegue de HRS, sin embargo, los valores propuestos hacen que hacia 2035 – 2040 todas las regiones económicas del país tengan una capacidad adecuada de recarga de hidrógeno vehicular.

3.2.3. Flujo carretero

En el caso de regiones que no tengan proyectos de adopción de FCEV en el corto plazo y su densidad de población sea baja, pero que por su posición geográfica podrían tener un alto tránsito carretero, se debe pensar en el flujo carretero como factor para la planeación de HRS.

De acuerdo con el Diagnóstico sobre la situación del transporte y la movilidad en Costa Rica (Sánchez, 2018), la recomendación para priorizar la instalación de HRS sobre vías carreteras es:

- a) 2020 – 2030: más de 2000 camiones de carga u 8000 vehículos de pasajeros por día.
- b) 2030 – 2040: más de 1000 camiones de carga o 4000 vehículos de pasajeros por día.
- c) 2040 – 2050: más de 500 camiones de carga o 2000 vehículos de pasajeros por día.

Las carreteras más transitadas en el año 2020 y que cumplen con el criterio (a) son las que se trazan con color verde intenso en la figura 3-3.

La metodología descrita en la **Guía Sintética de Despliegue de Estaciones de Recarga de Hidrógeno en Costa Rica** (Anexo 1) hace uso de algunos factores de aceleración y desaceleración del despliegue de HRS: en los primeros años, para permitir que todas las regiones tengan cobertura de HRS y hacia 2050 para permitir que las regiones que menos capacidad de recarga de hidrógeno tengan, aumenten esta mediante la instalación de más estaciones.

Esta metodología responde a una estrategia híbrida *HRS-Vehicle driven* por lo que múltiples iteraciones de cálculo y distribución de estaciones deberán ser hechas, sin embargo, planeando en 2020 el despliegue y ubicación de HRS hacia 2050, se obtiene la distribución de las figuras 3-4 y 3-5 (se incluyen las HRS de la fase de RNC).

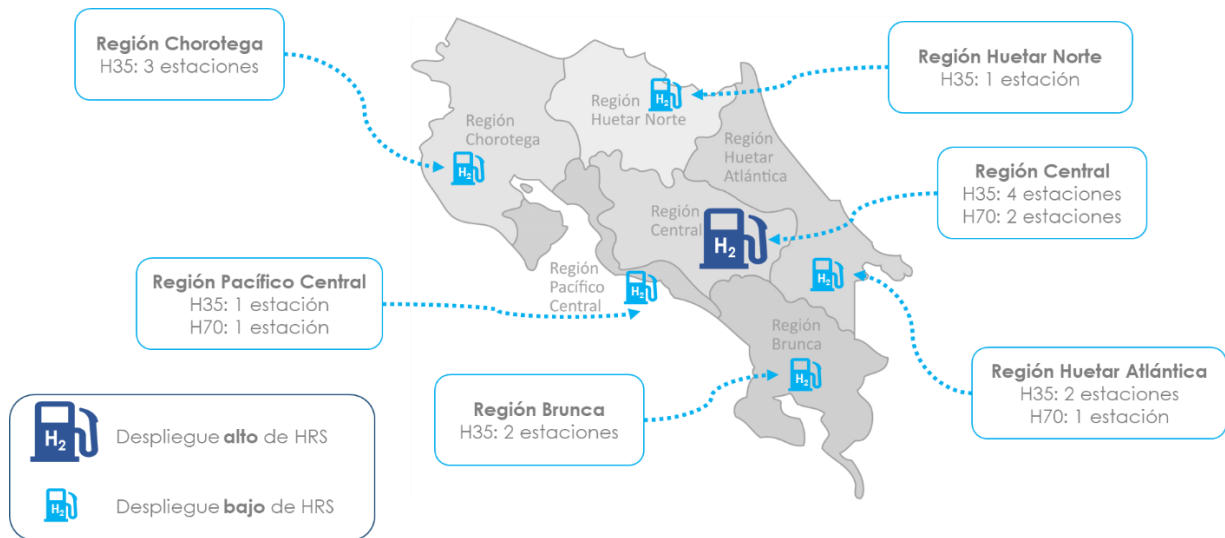


Figura 3-4 Distribución de HRS - 2030 - Escenario BAU

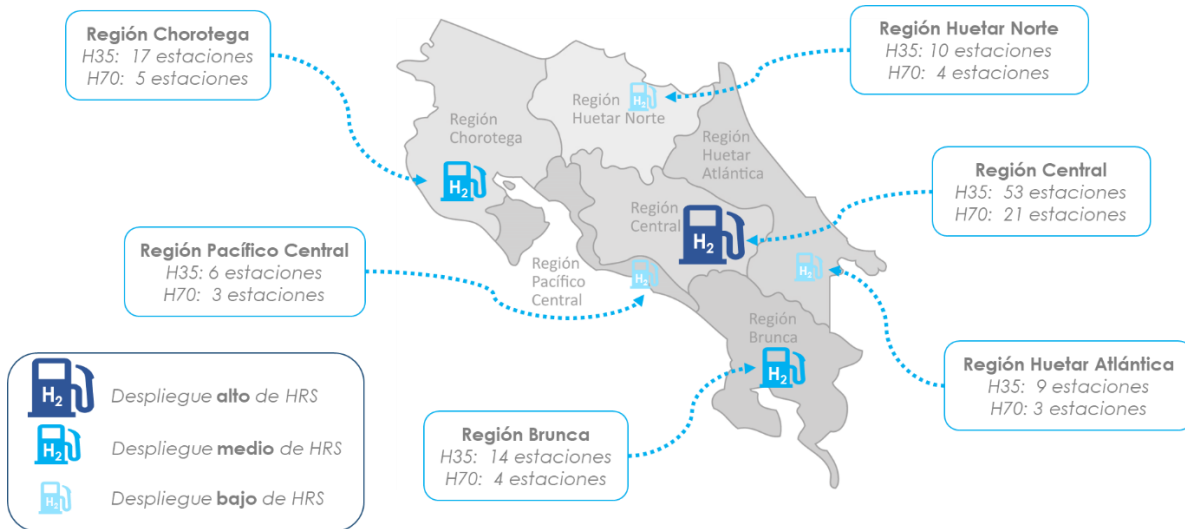
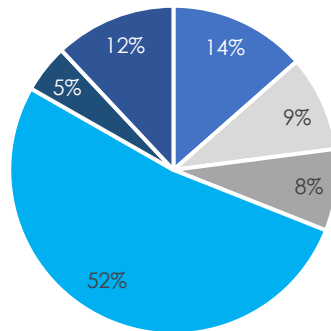


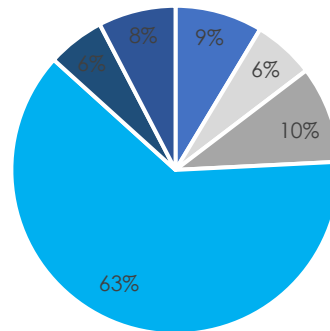
Figura 3-5 Distribución de HRS - 2050 - Escenario BAU

Para contrastar los resultados de la metodología de distribución geográfica de HRS con la realidad de las estaciones de recarga de combustible (gasolina o diésel) en Costa Rica, se contrastó la distribución porcentual de HRS por región en 2050 con la distribución en 2020 de gasolineras. Se comparan dos horizontes temporales diferentes porque se espera que en 2050 la tecnología de hidrógeno tenga una adopción masiva, tal como ocurre hoy con las gasolineras. Se observa que se conserva la proporción mayor de estaciones en la región central (figura 3-6). Lo anterior deja de manifiesto que la densidad de población y densidad de tráfico carretero son dos variables importantes de la distribución de estaciones de servicio.

Distribución 2050 HRS por región (%)



Distribución 2020 Gasolineras por región (%)



- Chorotega
- Huetar Norte
- Huetar Atlántica
- Central
- Pacífico Central
- Brunca

Figura 3-6 Comparación de la distribución de HRS (2050) con la distribución de gasolineras (2020). Fuente: Hinicio con información de RECOPE

4. Diseños tipo de estaciones de recarga de hidrógeno

Existen múltiples diseños de estaciones de recarga de hidrógeno, y se espera que la innovación tecnológica y el crecimiento del mercado de hidrógeno vehicular traiga consigo aún más. Sin embargo, esta sección tiene el objetivo de presentar algunos diseños típicos, que sirvan como guía de planeamiento.

Una estación de recarga de hidrógeno (HRS) es la suma del lugar y componentes tecnológicos que hacen posible dispensar hidrógeno en la calidad y condiciones adecuadas a un vehículo de celda de combustible. Sus componentes mínimos son un sistema de almacenamiento de hidrógeno a alta presión y los dispensadores que se conectan a los vehículos.

Según la forma de producir el hidrógeno, existen dos tipos de estaciones (figura 4-1):

- ➔ **Estaciones con producción on-site:** además de los elementos para almacenar y recargar el hidrógeno, integran una planta de producción de hidrógeno en el mismo sitio. Generalmente esta planta es de electrolisis de agua.
- ➔ **Estaciones con producción centralizada:** integra un espacio y sistema de conexión para recibir un camión que suministra el hidrógeno desde una planta de producción externa. La forma más común de entregar el hidrógeno a las HRS es en forma gaseosa a presión, pero la entrega de hidrógeno líquido también es posible.

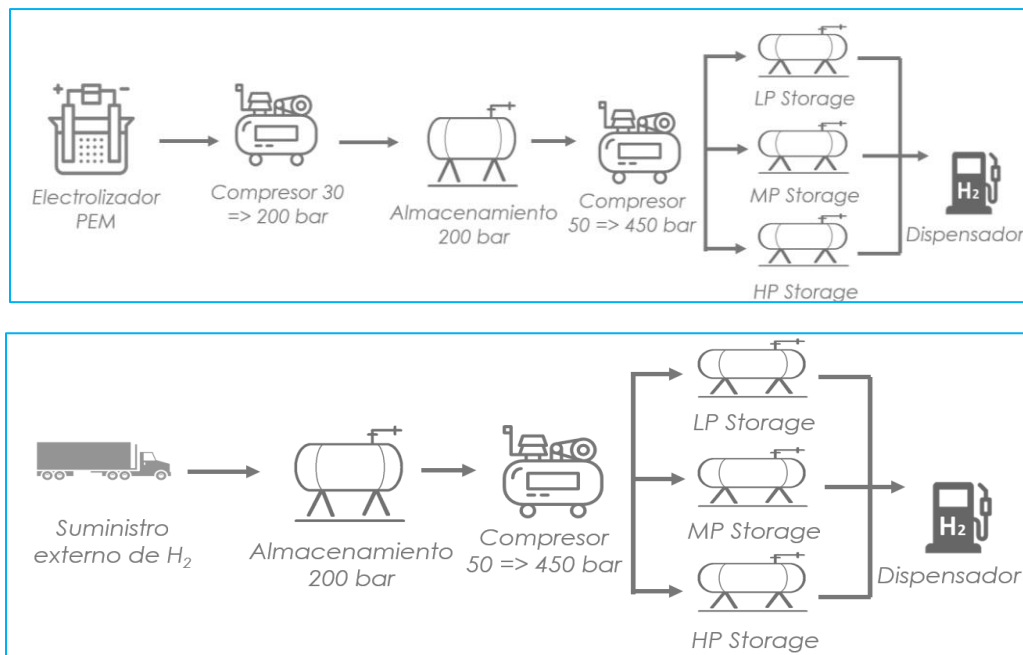


Figura 4-1 Esquemas típicos de HRS a) Producción on site (superior) b) Producción centralizada (inferior). Fuente: Elaboración de Inicio

Por ser las más comunes y fáciles de operar, nos enfocaremos en las HRS de hidrógeno gaseoso. Los componentes de una estación de recarga de hidrógeno se pueden agrupar de la siguiente manera:

- ➔ **Sistema de producción de hidrógeno:** Para el caso de las HRS con producción on-site. Típicamente consiste en un electrolizador y su balance de planta. El hidrógeno producido por este tipo de estaciones generalmente tiene una presión de 30 bar o menos.
Es necesario instalar un tanque de almacenamiento intermedio, denominado *buffer* entre el electrolizador y el sistema de acondicionamiento. Su función es evitarle al compresor las variaciones de flujo que pudiera ocasionar el electrolizador.
- ➔ **Punto de recepción de hidrógeno:** Las HRS de producción centralizada integran en su diseño un espacio con las conexiones necesarias para recibir el hidrógeno.
- ➔ **Sistemas de acondicionamiento:** Se le llama acondicionamiento al proceso de llevar el hidrogeno de una condición de origen a otra en la que podrá ser utilizado. En el caso de las HRS de tipo on-site, esta etapa consiste en comprimir el gas hasta la presión del almacenamiento principal, que es típicamente 200 bar.

Posteriormente, ese hidrógeno a 200 bar, tanto en HRS de producción on-site como en las de producción centralizada, debe llevarse hasta 450 o 900 bar, dependiendo de la presión de recarga de la HRS (350 o 700 bar, respectivamente).

El equipo más importante para ambas etapas de acondicionamiento son los compresores de hidrógeno.

- ➔ **Sistemas de almacenamiento:** Consisten en un sistema de tanques de gran volumen que guardan el hidrógeno que será despachado por la HRS. Generalmente existe un almacenamiento general del gas, a presión intermedia, y un almacenamiento de menor capacidad a alta presión, cuyo objetivo es la recarga de los FCEV.

La capacidad de almacenamiento general depende de la capacidad de diseño de la HRS y de las horas de operación del electrolizador, o número de recargas externas que reciba la HRS por día, pero por lo general este almacenamiento va de los 150 a los 2000 kg de hidrógeno.

El almacenamiento de alta presión generalmente está diseñado para operar bajo un esquema de relleno en cascada o *cascade-filling*. Esta forma de relleno emplea al menos tres tanques de diferentes tamaños para rellenar un vehículo

por intervalos. Estos tanques tienen diferentes presiones de hidrógeno y conforme el tanque del vehículo alcanza el equilibrio con cada uno de ellos, otro tanque, con mayor presión de hidrógeno, releva al anterior (figura 4-2).

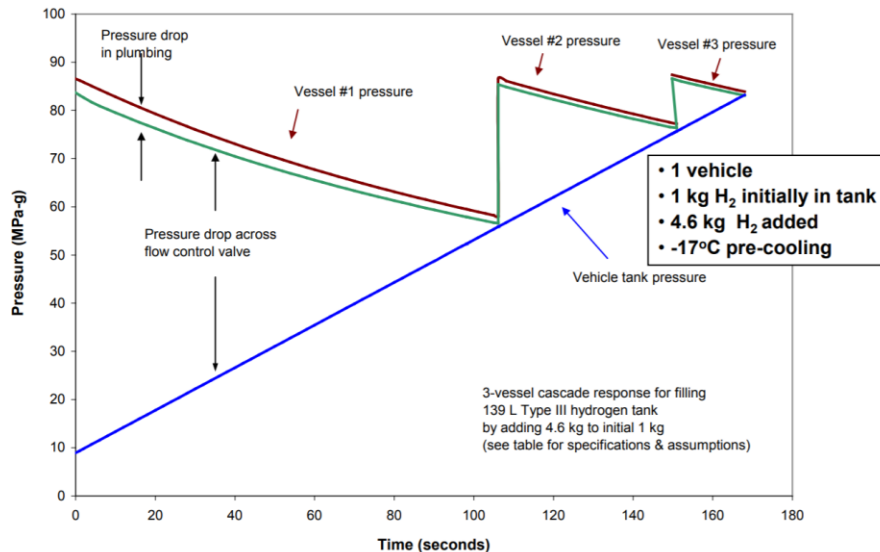


Figura 4-2 Presiones de relleno en el esquema Cascade Filling

- ➔ **Dispensador:** Es la conexión entre la HRS y el FCEV. A pesar de lucir como un conector macho de dispensación semejante a los de diésel o gasolina, el de hidrógeno es una conexión hermética que además puede contar con elementos de comunicación infrarroja con el vehículo para compartir información sobre la recarga, cantidad de gas dispensado, etc.

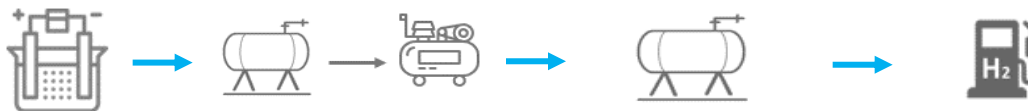
El número mangueras de dispensado de una HRS se calcula a partir de la capacidad de hidrógeno despachado por día, del número de vehículos a ser atendidos y de la velocidad de llenado de cada vehículo.

Cuando sea necesario que el tiempo de recarga sea corto y que el flujo de hidrógeno sea alto (kg H₂/min), podría ser necesario un sistema de refrigeración del gas previo a su salida del conector de dispensación. Esto mantendrá el hidrógeno en una temperatura menor a 85°C. (SAE, 2014).

Con esta información como antecedente, a continuación, se muestra el dimensionamiento de equipos y datos de costo para 4 estaciones de recarga de hidrógeno tipo: HRS de 350 y 700 bar en su configuración *on-site* y centralizada, cada una.

4.1. Dimensionamiento de HRS – 350 bar tipo on-site

- ➔ Capacidad de la HRS: 1500 kg H₂/día
- ➔ Número aproximado de vehículos atendidos por la HRS:
 - 38 buses de 40 kg H₂ de capacidad
 - 500 vehículos ligeros al 50% de su capacidad de recarga



Electrolizador		Acondicionamiento		Almacenamiento		HRS	
Variables Técnicas							
Potencia Equipo (MW)	2.5	Tamaño Buffer 30Bar (kg)	83.3	Presión (Bar)	200.0	Capacidad Almacenamiento Cascada (kg)	2,320.9
Número equipos (-)	2.0	Potencia Compresor 30-200 bar (kW)	129.5	Capacidad Requerida (kg)	1,031.3	Presión Almacenamiento Cascada (Bar)	450.0
Potencia Instalada (MW)	5.0			Volumen requerido (m ³)	71.2	Potencia compresor 50-450 Bar (kW)	156.3
Tecnología	PEM			Potencia Sistema enfriamiento (kW)	-		
Horas Diarias Operación (h/día)	18.0						
Producción (kg/año)	547,500						
CAPEX							
Electrolizador sin Stack (USD)	4,448,194	CAPEX Acondicionamiento (USD)	514,318	CAPEX Alm. 200 Bar (USD)	515,630	CAPEX HRS (USD)	1,975,836
Stack para recambio (USD)	2,395,181					Ingeniería, Construcción (USD)	1,969,832
						BOP (USD)	492,458
						Suministro Eléctrico (USD)	720,328
OPEX							
O&M Electrolyzador (USD/año)	222,410	O&M Acondicionamiento (USD/año)	25,716	O&M Alm (USD/año)	5,156	O&M HRS (USD/año)	98,792

Total de CAPEX (USD)	
CAPEX Equipos	\$ 9,849,159
CAPEX No Equipos	\$ 3,182,618
CAPEX Total	\$ 13,031,776

Total de OPEX Anual	
OPEX Equipos	\$ 471,833
OPEX No Equipos	\$ 31,826
OPEX Total	\$ 503,659

4.2. Dimensionamiento de HRS – 350 bar tipo centralizada

- ➔ Capacidad de la HRS: 2000 kg H₂/día
- ➔ Número aproximado de vehículos atendidos por la HRS:
 - 50 buses de 40 kg H₂ de capacidad
 - 660 vehículos ligeros al 50% de su capacidad de recarga



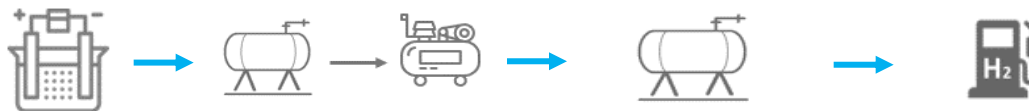
Acondicionamiento		Almacenamiento		HRS	
Variables Técnicas					
Capacidad Skid (Kg/h)	20	Presión (Bar)	200.0	Capacidad Almacenamiento Cascada (kg)	2,321
		Capacidad Requerida (kg)	2,062.5	Presión Almacenamiento Cascada (Bar)	450.0
		Volumen requerido (m3)	142.4	Potencia compresora 50-450 Bar (kW)	119.5
				Potencia Sistema enfriamiento (kW)	-
CAPEX					
CAPEX Acondicionamiento (USD)	144,000	CAPEX Alm. 200 Bar (USD)	1,031,261	CAPEX HRS (USD)	1,869,491
				Ingeniería, Construcción (USD)	608,950
				BOP (USD)	152,238
				Suministro Eléctrico (USD)	720,328
OPEX					
O&M Acondicionamiento (USD/año)	7,200	O&M Alm (USD/año)	10,313	O&M HRS (USD/año)	93,475

Total de CAPEX	
CAPEX Equipos	\$ 3,044,752
CAPEX No Equipos	\$ 1,481,516
CAPEX Total	\$ 4,526,268

Total de OPEX Anual	
OPEX Equipos	\$ 110,987
OPEX No Equipos	\$ 14,815
OPEX Total	\$ 125,802

4.3. Dimensionamiento de HRS – 700 bar tipo on-site

- ➔ Capacidad de la HRS: 200 kg H₂/día
- ➔ Número aproximado de vehículos atendidos por la HRS:
 - 40 vehículos ligeros
 - 20 mini buses



Electrolizador		Acondicionamiento		Almacenamiento		HRS	
Variables Técnicas							
Potencia Equipo (MW)	1.0	Tamaño Buffer 30Bar (kg)	16.7	Presión (Bar)	200.0	Capacidad Almacenamiento Cascada (kg)	307.9
Número equipos (-)	1.0	Potencia Compresor 30-200 bar (kW)	30.5	Capacidad Requerida (kg)	137.5	Presión Almacenamiento Cascada (Bar)	450.0
Potencia Instalada (MW)	1.0			Volumen requerido (m3)	9.5	Potencia compresor 50-900 Bar (kW)	56.5
Tecnología	PEM			Potencia Sistema enfriamiento (kW)	9.2		
Horas Diarias Operación (h/día)	12.0						
Producción (kg/año)	73,000						
CAPEX							
Electrolizador, exc. Stack (USD)	1,113,041	CAPEX Acondicionamiento (USD)	190,221	CAPEX Alm. 200 Bar (USD)	68,751	CAPEX HRS (USD)	839,917
Stack para recambio (USD)	599,330					Ingeniería, Construcción (USD)	576,755
						BOP (USD)	144,189
						Suministro Eléctrico (USD)	720,328
OPEX							
O&M Electrolyzer (USD/año)	55,652	O&M Acondicionamiento (USD/año)	9,511	O&M Alm (USD/año)	688	O&M HRS (USD/año)	41,996

Total de CAPEX (USD)	
CAPEX Equipos	\$ 2,883,776
CAPEX No Equipos	\$ 1,441,272
CAPEX Total	\$ 4,325,047

Total de OPEX Anual (USD)	
OPEX Equipos	\$ 141,439
OPEX No Equipos	\$ 14,413
OPEX Total	\$ 155,851

4.4. Dimensionamiento de HRS – 700 bar tipo centralizada

- ➔ Capacidad de la HRS: 200 kg H₂/día
- ➔ Número aproximado de vehículos atendidos por la HRS:
 - 40 vehículos ligeros
 - 20 mini buses



Acondicionamiento		Almacenamiento		HRS	
Variables Técnicas					
Capacidad Skid (Kg/h)	20	Presión (Bar)	200.0	Capacidad Almacenamiento Cascada (kg)	308
		Capacidad Requerida (kg)	275.0	Presión Almacenamiento Cascada (Bar)	450.0
		Volumen requerido (m3)	19.0	Potencia compresora 50-900 Bar (kW)	28.2
				Potencia Sistema enfriamiento (kW)	9.2
CAPEX					
CAPEX Acondicionamiento (USD)	144,000	CAPEX Alm. 200 Bar (USD)	137,501	CAPEX HRS (USD)	766,252
				Ingeniería, Construcción (USD)	209,551
				BOP (USD)	52,388
				Suministro Eléctrico (USD)	720,328
OPEX					
O&M Acondicionamiento (USD/año)	7,200	O&M Alm (USD/año)	1,375	O&M HRS (USD/año)	38,313

Total de CAPEX (USD)	
CAPEX Equipos	\$ 1,047,754
CAPEX No Equipos	\$ 982,266
CAPEX Total	\$ 2,030,020

Total de OPEX Anual (USD/año)	
OPEX Equipos	\$ 46,888
OPEX No Equipos	\$ 9,823
OPEX Total	\$ 56,710

5. Esquemas de financiación para proyectos de H₂

El financiamiento para desarrollo de proyectos de tecnologías de hidrógeno puede provenir de múltiples fuentes dependiendo del alcance y objetivos de cada proyecto. Una forma de clasificar estos posibles proyectos es según el nivel de madurez tecnológica que tengan los componentes a trabajar o a desarrollar.

La NASA identifica la madurez tecnológica en 9 niveles (TRL: Technology Readiness Level) , donde el 1 es el nivel de menor madurez, correspondiente a proyectos donde conceptos de ciencia básica comienzan a aplicarse a desarrollos tecnológicos y el 9 corresponde al valor más alto de madurez donde los desarrollos están en condiciones de operar bajo condiciones reales y de ser llevados a una producción formal, y por tanto: a su venta en el mercado (NASA, 2020). La tabla 5-1 muestra, para cada nivel de TRL (filas) el tipo de financiamiento (columnas) al que podrían ser sujeto los proyectos.

Tabla 5-1 Financiamento de proyectos según su madurez tecnológica

TRL	Finanzas de carbono	Emisión de bonos	Créditos blandos	Financiamiento por proyecto	Fondos climáticos	Asociaciones público-privadas	Fondos corporativos	Fondos nacionales	Fondos de capital de inversión	Oferta Pública Inicial	Fondos de asistencia técnica	Fondos nacionales de innovación	Capital de riesgo	Presupuestos de I+D corporativos	Inversionistas ángel	Fondos nacionales de I+D	Laboratorios privados	Incubadoras	Donaciones
9	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
8						■	■	■	■			■	■	■					
7							■	■				■	■	■		■			
6												■	■	■				■	
5													■	■	■			■	
4														■	■			■	
3															■	■	■	■	■
2																■	■		■
1																■			■

Actualmente (2020) los proyectos de movilidad con FCEV corresponden a niveles de madurez 8 y 9, dependiendo del tipo de vehículos que se adopten.

5.1. Finanzas de carbono

Definición: Son una subdivisión de los financiamientos medioambientales que está enfocada a proyectos que contribuyan a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Montos de inversión: 30 – 150 millones de USD

Instituciones de financiamiento ejemplo:

- Banco Mundial
- Emissions Reductio Fund
- California Climate Investments



5.2. Emisión de bonos

Definición: Son instrumentos de financiamiento para proyectos específicos con costos financieros bajos.

Montos de inversión: Menores a 100 millones de USD

Instituciones de financiamiento ejemplo:

- Banco Interamericano de Desarrollo
- Bolsa Nacional de Valores de Costa Rica



5.3. Créditos blandos

Definición: Son créditos generalmente otorgados por entidades públicas. Tienen plazos de devolución largos (hasta 15 años) y tipos de interés bajos. En inglés se les conoce como *Balance Sheet Financing*.

Montos de inversión: 3 a 200 millones de USD

Instituciones de financiamiento ejemplo:

- Banco Interamericano de Desarrollo
- GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit)
- Banco Europeo para la Reconstrucción y el Desarrollo



5.4. Financiamiento por proyecto

Definición: Financiamiento de banca o instituciones privadas con plazos de retorno e intereses según el riesgo del proyecto.

Montos de inversión: Hasta 100 millones de USD

Instituciones de financiamiento ejemplo:

- Banco Centroamericano de Integración Económica
- Banca privada



5.5. Fondos climáticos

Definición: Fondos de inversión diseñados por organismos internacionales para apoyar al desarrollo y adopción de tecnologías que apoyen al medio ambiente.

Montos de inversión: Menores a 10 millones de USD por proyecto

Instituciones de financiamiento ejemplo:

- UNIDO: United Nations Industrial Development Organization
- GEF: Global Environment Facility



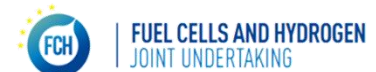
5.6. Asociaciones público – privadas

Definición: Son acuerdos entre gobiernos e iniciativa privada para el desarrollo de infraestructura útil para el gobierno mediante un convenio de mutuo beneficio.

Montos de inversión: Desde 1 hasta 200 millones de USD

Instituciones de financiamiento ejemplo:

- FCH-JU: Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking
- Toyota Mobility Foundation



5.7. Fondos corporativos

Definición: Financiamiento propio de las organizaciones para proyectos de inversión.

Montos de inversión: Según la organización y el tamaño de proyecto.

Instituciones de financiamiento ejemplo:

- Engie
- Shell
- Hyundai



5.8. Fondos nacionales

Definición: Financiamiento gubernamental para desarrollo de proyectos de tecnología y adopción de tecnologías en iniciativa privada.

Montos de inversión: Generalmente menores a 10 millones de USD en Latinoamérica.

Instituciones de financiamiento ejemplo:

- Ministerio de Ciencias, Tecnología y Telecomunicaciones



5.9. Fondos de capital de inversión

Definición: Es una forma de financiamiento en el que una entidad financiera compra parte de la entidad en la que invierte a través de acciones. Generalmente se invierte en proyectos de alta rentabilidad o empresas de gran potencial.

Montos de inversión: Más de 10 millones de USD

Instituciones de financiamiento ejemplo:

- TPG
- Idinvest
- Banca para el Desarrollo – CR



5.10. Oferta Pública Inicial

Definición: Es la primera oferta de acciones puestas a la venta del público de una empresa. Empresas pequeñas o en crecimiento recurren a este sistema.

Montos de inversión: Generalmente, menor a 5 millones de USD.

Instituciones de financiamiento ejemplo:

- Nasdaq
- Euronext
- SGX



5.11. Fondos de asistencia técnica

Definición: Fondos de apoyo a la contratación de servicios especializados en el desarrollo de proyectos de alto nivel de tecnificación.

Montos de inversión: Típicamente menores a 200 millones de USD.

Instituciones de financiamiento ejemplo:

- Banco Mundial
- GIZ
- CAF: Banco de Desarrollo de América Latina



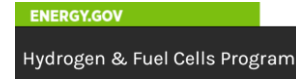
5.12. Fondos nacionales de innovación

Definición: Fondos para el desarrollo de proyectos de innovación tecnológica. Generalmente tienen como objetivo lograr la rentabilidad y adopción de tecnologías nuevas.

Montos de inversión: Generalmente son bolsas de hasta 100 millones de USD destinados a múltiples proyectos.

Instituciones de financiamiento ejemplo:

- Horizon 2020, Unión Europea
- H₂& Fuel Cell Program, Estados Unidos



5.13. Capital de riesgo

Definición: Financiamiento para empresas pequeñas o medianas que no pueden acceder a financiamiento en mercados públicos de acciones.

Montos de inversión: Entre 1 y 80 millones de USD.

Instituciones de financiamiento ejemplo:

- Total Ventures
- INVEN
- AP Ventures



5.14. Presupuestos de i+D corporativos

Definición: Presupuesto de las organizaciones para el desarrollo o adopción de nuevas tecnologías.

Montos de inversión: Desde unos pocos hasta cientos de millones de USD.

Instituciones de financiamiento ejemplo:

- Toyota
- Siemens
- Air Liquide



5.15. Donaciones

Definición: Financiamiento por campañas para proyectos particulares. Los donadores pueden ser actores gubernamentales, instituciones de promoción tecnológica e incluso asociaciones civiles.

Montos de inversión: Típicamente menores a 1 millón de USD.

Instituciones de financiamiento ejemplo:

- Toyota Mobility Foundation



Bibliografía

MEP, M. d. (18 de 06 de 2020). *Educatico*. Obtenido de Regiones Socioeconómicas de Costa Rica: <https://www.mep.go.cr/educatico/regiones>

NASA. (18 de 06 de 2020). *Technology Readiness Level*. Obtenido de nasa.gov: https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt_accordion1.html

SAE. (2014). *SAE J2601 - Hydrogen Refueling Protocol*. Int.: SAE International.

Sánchez, L. (2018). *Diagnóstico sobre la situación del transporte y la movilidad en Costa Rica*. San José, Costa Rica: Consejo Nacional de Rectores.

Anexo 1 - Guía Sintética de Despliegue de Estaciones de Recarga de Hidrógeno

Hinicio a elaborado este documento como una herramienta independiente, cuyo objetivo orientar a a los tomadores de decisiones sobre la **cuantificación de las estaciones, su dimensionamiento y distribución geográfica a lo largo del tiempo** (de 2020 a 2050). Esta guía provee el detalle completo de la metodología utilizada para cuantificar y localizar las HRS.

La guía provee también de orientación sobre **las especificaciones técnicas que deben tener las estaciones**, de acuerdo con el estado del arte de la tecnología, su evolución prevista y la experiencia de otros lugares donde se ha desarrollado la movilidad con hidrógeno.

Finalmente, este documento ofrece una **breve colección de recomendaciones** recopiladas de diferentes entidades (mayormente gubernamentales) que han desarrollado proyectos de movilidad de hidrógeno y despliegue de HRS para satisfacer la demanda de los vehículos.



Anexo 2 – Mapa de despliegue de HRS en Costa Rica

El mapa de despliegue de Estaciones de Recarga de Hidrógeno fue elaborado mediante la herramienta MyMaps de Google®. Esta herramienta funciona mediante el uso de puntos de localización agrupados en capas.

Para este trabajo, se crearon 10 capas, que incluyen los puntos de localización de:

- Ciudades más pobladas de Costa Rica
- Parques de manufactura
- Centros corporativos
- Aeropuertos
- Puertos marítimos
- Vías carreteras
- Hidroeléctricas
- Estaciones de Recarga de Hidrógeno en 2030
- Estaciones de Recarga de Hidrógeno en 2040
- Estaciones de Recarga de Hidrógeno en 2050

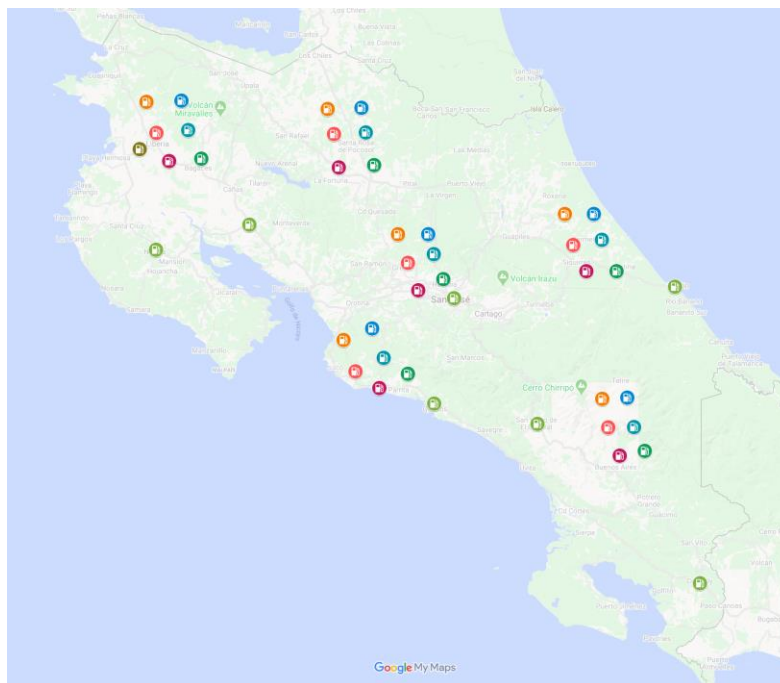


Figura A2-0-1 Vista general del Mapa de Despliegue de HRS

La distribución de HRS está hecha por década y por región socio-económica de Costa Rica. Las ubicaciones son indicativas (dentro de una región, pero no en un lugar específico dentro de esa región).

Para ver la cantidad de HRS en cierta región en algún año es necesario dar click sobre el ícono en el mapa. Una nube de texto como la de la imagen A2-2 se desplegará.

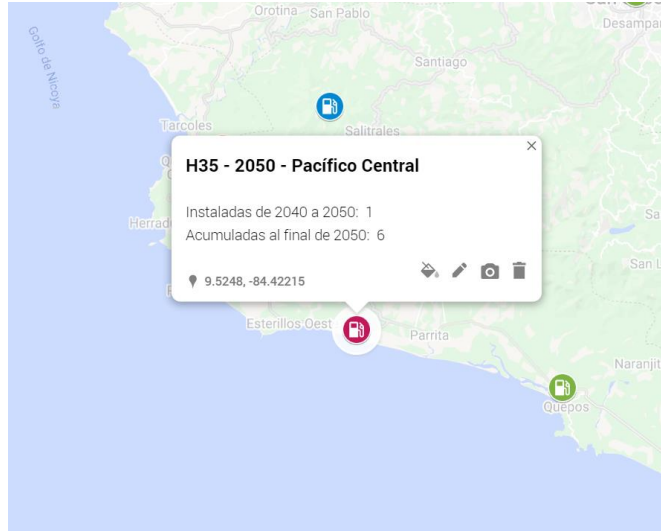


Figura A2-2 Cuantificación de HRS por región en el mapa interactivo

Para visualizar el mapa interactivo es necesario ingresar a través del siguiente vínculo:

- [Mapa Interactivo de Despliegue de HRS – Costa Rica](#)

O para los lectores de este reporte en su versión impresa, a través del enlace:

- <https://bit.ly/2CZ8NPP>