

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA**

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

*Trabajo de titulación previo a
la obtención del título de
Ingeniera Ambiental*

TRABAJO EXPERIMENTAL:

**“ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE APROVECHAMIENTO DEL
HIDRÓGENO EN EL TRANSPORTE PÚBLICO DE A PARTIR DE
LOS EXCEDENTES GENERADOS POR LA ENERGÍA
FOTOVOLTAICA EN EL ÁREA URBANA DE CUENCA”**

AUTORA:

MARÍA ANTONIA CEVALLOS ESCANDÓN

TUTOR:

ING. EDGAR ANTONIO BARRAGÁN ESCANDÓN, Ph.D.

CUENCA - ECUADOR

2022

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, María Antonia Cevallos Escandón con documento de identificación N° 0106076391, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de soy autora del trabajo de titulación: **“ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE APROVECHAMIENTO DEL HIDRÓGENO EN EL TRANSPORTE PÚBLICO DE A PARTIR DE LOS EXCEDENTES GENERADOS POR LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN EL ÁREA URBANA DE CUENCA”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniera Ambiental* en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En la aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autora me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, enero de 2022.



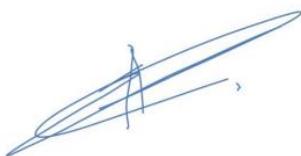
María Antonia Cevallos Escandón

C.I. 0106076391

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE APROVECHAMIENTO DEL HIDRÓGENO EN EL TRANSPORTE PÚBLICO DE A PARTIR DE LOS EXCEDENTES GENERADOS POR LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN EL ÁREA URBANA DE CUENCA”**, realizado por María Antonia Cevallos Escandón, obteniendo el *Trabajo Experimental* que cumple con los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, enero de 2022.



Ing. Edgar Antonio Barragán Escandón, Ph.D.

C.I. 0102516457

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, María Antonia Cevallos Escandón, con documento de identificación N° 0106076391, autora del trabajo de titulación: **“ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE APROVECHAMIENTO DEL HIDRÓGENO EN EL TRANSPORTE PÚBLICO DE A PARTIR DE LOS EXCEDENTES GENERADOS POR LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN EL ÁREA URBANA DE CUENCA”**, certifico que el total contenido del *Trabajo Experimental*, es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, enero de 2022.



María Antonia Cevallos Escandón

C.I. 0106076391

DEDICATORIA

El presente trabajo representa una gran satisfacción para mí, debido a que significa la culminación de una etapa de mi vida. Con mucho cariño dedico este trabajo a mi esposo Cristhian y mi hijo Samuel, que han sido un apoyo y pilar más importante para salir adelante.

También de manera especial quiero dedicar a mis padres, mi hermano que siempre has estado apoyándome incondicionalmente, recordando que soy capaz de todo si de verdad nos lo proponemos.

A toda mi familia que cada uno con sus consejos me han ayudado a no rendirme y creer en mí.

A mi suegro Víctor Bernal, que desde el cielo nos cuida y siempre estuvo ahí para apoyarme, a mi suegra, mis cuñadas y toda mi familia política por ser un gran apoyo.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, por haberme brindado la sabiduría necesaria para superar cada obstáculo y lograr cumplir mis objetivos y crecer personal y profesionalmente. Además, agradecer a mis padres, por el apoyo incondicional que me brindaron y siempre me recordaron que soy capaz y no dejarme rendir.

Quiero agradecer de manera especial a mi esposo Cristhian, por brindarme su apoyo creyendo siempre en mí, siendo un pilar importante para lograr hoy en día convertir mis sueños realidad.

Y a mí tutor de proyecto de titulación, Ing. Antonio Barragán E., por su paciencia, por guiarme en el trabajo para lograr que se cumpla el objetivo principal de este proyecto.

RESUMEN

El inconveniente de algunas tecnologías renovables es la falta de acoplamiento con la demanda de energía. Como consecuencia se tiene energía no aprovechada, que requiere ser recuperada. Una forma de lograrlo es empleando el hidrógeno como vector energético. El hidrógeno obtenido a partir de la electricidad proveniente de fuentes de energía renovable podría ser almacenado para ser empleado cuando se lo requiera, ya sea en forma directa o en pilas de combustible. Esta investigación se centra en determinar el potencial de hidrógeno que se puede obtener empleando generadores fotovoltaicos en áreas urbanas. El análisis se hace determinando la energía fotovoltaica producida al implantar paneles fotovoltaicos en el Centro Histórico de Cuenca. Con ello se determina que la electricidad producida es 5,5 veces la demanda del área de estudio. Con el excedente de energía se determinó que se puede disponer de energía que permitiría cubrir entre el 97% a 127 % de la demanda requerida para movilizar toda la flota de buses urbanos. Aunque hay ventajas evidentes como la reducción de emisiones o el aumento de la calidad de vida al aplicar estas tecnologías, el factor económico y tecnológico podrían ser barreras para la implementación de estas tecnologías a mediano o corto plazo.

Palabras claves: Energías Renovables, hidrógeno, vector energético, energía solar fotovoltaica, pilas de combustible, medio ambiente.

TABLA DE CONTENIDO

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR	2
CERTIFICACIÓN	3
RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
DEDICATORIA	5
AGRADECIMIENTOS	6
RESUMEN	7
TABLA DE CONTENIDO	8
INDICE DE ILUSTRACIONES.....	10
INDICE DE TABLAS.....	11
INTRODUCCIÓN	12
1.1 JUSTIFICACIÓN	14
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.2.1 <i>Objetivo General</i>	16
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	16
MARCO TEORICO CONCEPTUAL: ENERGÍA E HIDRÓGENO	17
2.1 SITUACIÓN MUNDIAL DE LA ENERGÍA.....	17
2.1.1 <i>Situación nacional de la energía</i>	17
2.1.2 <i>Situación local de la energía</i>	20
2.2 EL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO	22
2.2.1 <i>Características del hidrógeno</i>	23
2.2.2 <i>Producción de hidrógeno</i>	24
2.2.3 <i>Energía solar en ciudades</i>	32
2.2.4 <i>Energía solar fotovoltaica</i>	35
2.2.5 <i>Transporte en la ciudad de Cuenca</i>	43
2.2.6 <i>Transporte público en la ciudad de Cuenca</i>	44
2.2.7 <i>Desarrollo de vehículos a hidrógeno</i>	46
2.2.8 <i>Hidrógeno y pilas de combustible</i>	47
2.2.9 <i>Aplicación de la tecnología para obtener energía a base del hidrógeno</i>	48
2.2.10 <i>Enfoque del hidrógeno como vector energético</i>	49
METODOLOGÍA Y RESULTADOS	51
3.1 POTENCIAL DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN CUENCA URBANA	52
3.2 ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR APROVECHABLE.....	56

3.3	POTENCIAL TÉCNICO	56
3.4	PRODUCCIÓN DE H₂ FV	64
3.5	RESULTADOS	65
3.5.1	<i>Usos finales de H₂</i>	65
3.6	IMPLICACIONES	73
3.6.1	<i>Implicaciones ambientales</i>	73
3.6.2	<i>Implicaciones económicas</i>	74
3.6.3	<i>Implicaciones sociales</i>	76
	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES DEL PROYECTO	81
4.1	DISCUSIÓN	81
4.2	CONCLUSIONES	84
	ANEXOS	87
	BIBLIOGRAFÍA	91

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Demanda total de energía por fuente.....	18
Ilustración 2. Potencia nominal de energía eléctrica.	19
Ilustración 3. Demanda de energía por sector en el año 2019.....	19
Ilustración 4. Consumo de Energía Fósil en el 2015.....	21
Ilustración 5. Porcentaje de consumo de energía en la ciudad de Cuenca en el año 2015.	21
Ilustración 6. Demanda de energía por sector en la ciudad de Cuenca en el año 2019..	22
Ilustración 7. Técnicas de producción de hidrógeno.	24
Ilustración 8. Consumo mundial de energía primaria por fuentes.....	25
Ilustración 9. Potencia Fotovoltaica en Ecuador.	38
Ilustración 10. Irradiación Solar Global Horizontal (GHI) Anual.....	40
Ilustración 11. Irradiación Solar Directa Normal (DNI) Anual.....	40
Ilustración 12. Irradiación Solar Difusa Horizontal (DHI) Anual.....	41
Ilustración 13. Sistemas fotovoltaicos conectados a la red interna.	42
Ilustración 14. Esquema metodológico.	51
Ilustración 15. Casos de análisis.....	66

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. El hidrógeno en números.....	23
Tabla 2. Producción de hidrógeno a partir de energías renovables.	27
Tabla 3. Ventajas y desventajas de la energía solar fotovoltaica.	36
Tabla 4. Beneficios de la Energía Solar en Ecuador.	39
Tabla 5. Generación de energía solar y eólica de empresas distribuidoras en el Ecuador.	43
Tabla 6. Zonas censales escogidas para el área de estudio.....	53
Tabla 7. Cálculo de área disponible de techos.	55
Tabla 8. Los factores de utilización utilizados para el cálculo de la superficie del techo disponible.	60
Tabla 9. Valores típicos y utilizados de pérdidas de los paneles.....	62
Tabla 10. Consumo de energía en el área de estudio.....	63
Tabla 11. Producción de H ₂ en el Ciudad de Cuenca en el año 2015.	65
Tabla 12. Datos autobuses a diésel.	67
Tabla 13. Datos consumo buses a base de hidrógeno y porcentaje de sustitución.....	68
Tabla 14. Características pila de combustible tipo PEM.....	69
Tabla 15. Datos de Uso de Pilas de Combustible durante el año.	71
Tabla 16. Uso directo de la energía eléctrica.....	72
Tabla 17. Emisiones autobuses EURO V.....	74
Tabla 18. Proyectos de buses con celda de combustible de hidrógeno.	78

ANEXOS

Anexo 1. Las 80 zonas censales de la ciudad de Cuenca.	87
Anexo 2. Mapa de selección de zonas para el área de estudio.	88
Anexo 3. Área de las viviendas dentro de las zonas censales del área de estudio.	89
Anexo 4. Mapa delimitación del área de estudio.....	90

CAPÍTULO I

OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, el uso eficiente de los recursos y la energía se ha vuelto muy importante. La implementación de la certificación de economía sostenible para el suministro de energía, el desarrollo económico y la prevención de la contaminación ambiental son influyente a nivel nacional como internacional (Bhattacharya et al., 2016).

Frente al aumento de presión sobre los combustibles fósiles y los precios del petróleo, los combustibles fósiles seguirán siendo la base del desarrollo económico mundial (Scholten & Bosman, 2016). Sin embargo, se espera que en los próximos años la energía renovable aumenten su importancia y se conviertan en un mecanismo importante para el desarrollo y el bienestar humanos (Morales Ramos et al., 2017).

La necesidad de implementar herramientas de planificación que incentiven a tomar decisiones en el sector energético. Por lo tanto, se pretende evaluar con precisión las reservas de diferentes fuentes de energía en el mediano plazo, brindar garantías de seguridad para proyectos de infraestructura y promover la inversión económica del sector privado (Morales Ramos et al., 2017).

En el 2015, la Asamblea General de las Naciones Unidas ha implementado la Agenda 2030 y los estados miembros se comprometieron a lograr la utilización de la energía, la construcción de instalaciones y el mantenimiento urbano bajo la guía del desarrollo sostenible (U.N., 2015). También buscan hacer que las ciudades sean más resilientes frente al cambio climático, promover el desarrollo económico y reducir la pobreza (E. A. Barragán Escandón, 2018).

La energía suministrada por la ciudad a través de energías renovables está relacionada con todas sus necesidades, como la economía, la reducción de la pobreza y los recursos energéticos disponibles. Además, la alta densidad de población de las ciudades proporciona economías de escala que se puedan concentrar en el uso eficiente de la energía, el tratamiento de aguas residuales, los residuos o la infraestructura de transporte (Moles et al., 2008). Las investigaciones realizadas a nivel mundial han planificado alternativas a la gestión urbana, encaminadas a reducir el consumo de recursos materiales o de energía (Grewal & Grewal, 2013; Páez, 2010)

Las ciudades deben considerar nuevas opciones de suministro para satisfacer sus necesidades y garantizar su resistencia sin los recursos para mantener y mejorar (Bristow & Kennedy, 2013). Los municipios tienen libertad para planificar el transporte, el uso del suelo, la disponibilidad de agua y la gestión de residuos, pero el control y el suministro de energía son limitados (Agudelo-Vera et al., 2012).

En este proyecto se analiza el impacto de la sustitución del transporte público convencional por vehículos impulsados por hidrógeno producido mediante electricidad procedente de sistemas solares fotovoltaicos colocados en el área urbana. Especialmente se analiza el caso en el centro histórico de la ciudad de Cuenca. El objetivo es determinar qué cantidad de energía se puede obtener de los paneles solares fotovoltaicos. Luego se estima el potencial de almacenamiento de energía mediante la producción de hidrógeno (H₂) a partir de las energías renovables (ER). Finalmente, se hace una comparación de los datos obtenidos con los datos actuales del transporte público en la ciudad.

1.1 JUSTIFICACIÓN

Las cuestiones medioambientales relacionadas con el uso de la energía han impulsado a varios países desarrollados a incluir energías renovables en su matriz energética y promover vectores energéticos más respetuosos con el medio ambiente (Guzman & Spinsanti, 2011).

En los países ubicados en la línea ecuatorial, la influencia vertical de la radiación es una ventaja, porque la influencia de la inclinación y dirección del colector solar es menor que la de otras latitudes (Guzman & Spinsanti, 2011). En el caso de Ecuador, la radiación solar se mantiene constante durante la mayor parte del año, debido a que el ángulo de incidencia de radiación varía muy poco, que favorece la producción de energía auto sostenible de viviendas, edificios e industrias (Rodríguez & Arroyo, 2016).

El hidrógeno podría ser un vector energético en el futuro, ya que se puede almacenar como energía sin contaminar el medio ambiente. Sin embargo, la producción del hidrógeno (H_2) no es fácil, es necesario tomar medidas de seguridad para evitar accidentes. Se espera que el hidrógeno estimule la economía en las próximas décadas ya que es un elemento abundante y limpio, que podría favorecer al almacenamiento y transporte de energía (Fernández-Bolaños Badía, 2005). Existen varios métodos de producción del H_2 , por lo que es necesario promover tecnologías que permitan producir H_2 mediante métodos no contaminantes, eficientes y muy fiables (Urdiales et al., 2015).

Este proyecto analiza la captación del hidrógeno a partir de la electricidad, que se utilizara en pilas de combustibles en el transporte. Esto a largo plazo podría reemplazar combustibles fósiles y así se reducirían los gases de efecto invernadero promoviendo la protección del ambiente (Guzman & Spinsanti, 2011).

Existen muchos métodos para obtener hidrógeno. Este estudio analiza la electrolisis generada por la electricidad generada por módulos fotovoltaicos instalados en tejados de zonas urbanas (Peretti & Visintin, 2011).

El Art. 14 de la Ley Orgánica de Eficiencia Energética (R.O. 449 del 19 de marzo de 2019), define medidas de eficiencia energética en la proyección pública, limitando el consumo y cumpliendo con las emisiones los vehículos que se comercialicen en el mercado nacional. Señales que, a partir del 2025, todos los vehículos que sean implementados a los servicios de transporte público urbano e interparroquial en Ecuador, con excepción de las Islas Galápagos, deberán ser eléctricos. Además, las políticas y acciones para certificar la calidad del combustible se integrarán en el plan para adaptarse continuamente con las mejoras progresivas de la eficiencia, niveles de consumo de combustible y las emisiones (Luis Angel Paredes & Pozo, 2020). Además, se desarrollarán políticas para promover la producción de biocombustibles, así como los mecanismos necesarios para promover la movilidad eléctrica (Del Pozo Berrezueta, 2019).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Estimar el impacto de la sustitución del transporte convencional por vehículos que empleen hidrógeno producido por electricidad generada por sistemas solares fotovoltaicos instalados en el centro histórico de la ciudad de Cuenca.

1.2.2 Objetivos Específicos

-Determinar la cantidad de energía que se puede obtener a partir de paneles fotovoltaicos colocados en los techos de área urbana de Cuenca.

-Calcular la cantidad de hidrógeno obtenido y la posible aplicación en el sector transporte.

-Caracterizar la transportación pública de Cuenca y establecer recomendaciones para el aprovechamiento de la cantidad de H₂ obtenido a través de paneles fotovoltaicos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

MARCO TEORICO CONCEPTUAL: ENERGÍA E HIDRÓGENO

2.1 Situación mundial de la energía

La demanda mundial de fuentes de energía ha aumentado debido al crecimiento poblacional, el progreso industrial y el uso del transporte. En los últimos años, el consumo de energía ha incrementado drásticamente alrededor del mundo, impulsado por el aumento drástico de la población que creció a 7746 millones en la actualidad (Census Bureau United States, 2020).

El consumo mundial de energía primaria en todo el mundo aumenta constantemente, siendo los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural, las fuentes de energía más utilizadas. En 2020, el consumo mundial de energía primaria se incrementó en un 1,3% en comparación con el 2019 (Looney, 2020), del cual el petróleo representa el 33%, el 28% al carbón y 24% al gas natural (BP Statistical Review, 2019).

Aunque las energías renovables han aumentado 41% sin precedentes y su contribución sigue siendo baja (BP Statistical Review, 2019). Se espera que las mismas aumenten del 36 % al 69 % de la demanda total de electricidad para 2025 y 2050 (González Besa, 2016).

2.1.1 Situación nacional de la energía

En Ecuador, el 86,9% de las necesidades energéticas totales depende principalmente de los combustibles fósiles (Delgado Noboa, 2016). El principal combustible fósil utilizado es el diésel que alcanza un 31%, seguido de la gasolina con

23%. La energía eléctrica ocupa el tercer lugar con un 13% (Ilustración 1) (ARCONEL, 2019).

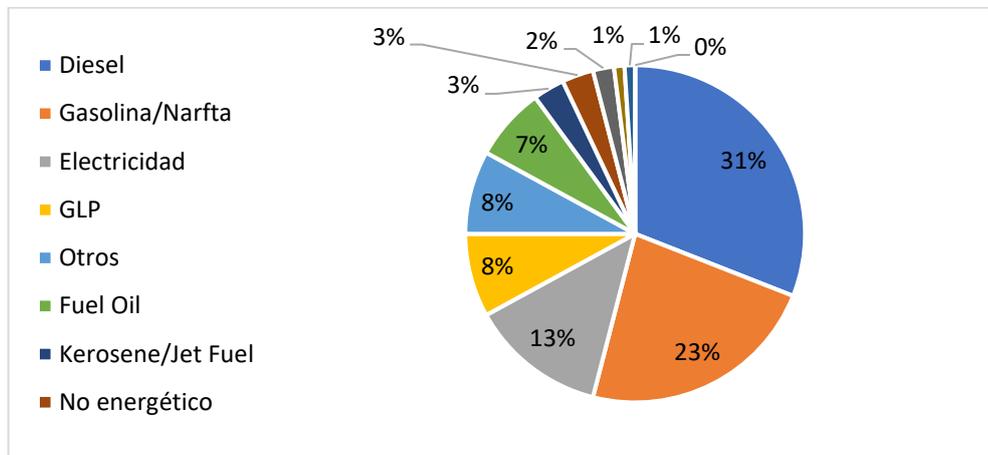


Ilustración 1. Demanda total de energía por fuente.

Fuente: (ARCONEL, 2019).Elaboración propia.

En el caso de la electricidad, el 49.5% de la generación eléctrica proviene de centrales hidroeléctricas, mientras que el 46.5% proviene de fuentes fósiles como la energía térmica (Delgado Noboa, 2016). Los precios al productor de las energías renovables no convencionales han ido disminuyendo con el tiempo a medida que se consolidaba su progreso tecnológico se ha ido consolidando. Sin embargo, existen limitaciones para que la energía tenga cierta importancia en comparación con la energía de las fuentes de energía térmica (Urdiales et al., 2015).

La Ilustración 2 muestra la capacidad nominal de electricidad procedente de fuentes renovables en abril del 2020, de la cual la principal fuente de energía es la hidráulica con 453,68 MW que representan un 63% (ARCONEL, 2021).

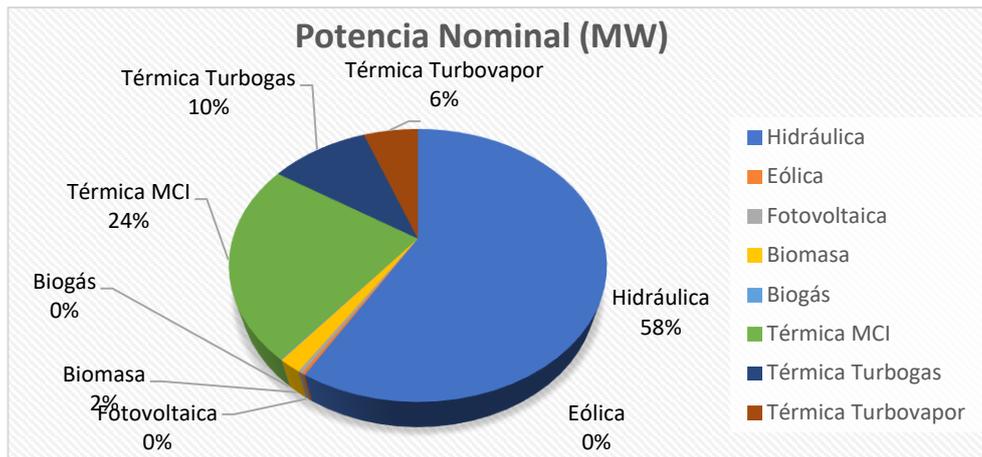


Ilustración 2. Potencia nominal de energía eléctrica.

Fuente: (ARCONEL, 2021). Elaboración propia

En 2019, el transporte tuvo una demanda de energía de 49,2%, el sector industrial el 14%, el sector residencial 13,4%, como se muestra en la Ilustración 3. La demanda energética del país para el 2019 incremento un 0,8% en comparación con el 2018 (Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2020). Siendo los combustibles fósiles, los energéticos con mayor demanda en el país. En el caso específico de la gasolina y el diésel, hubo un incremento de 58,4% en el 2019. La demanda de energía desde el 2009 hasta el 2019, aumento en un 71,8% (Lenín et al., 2019).

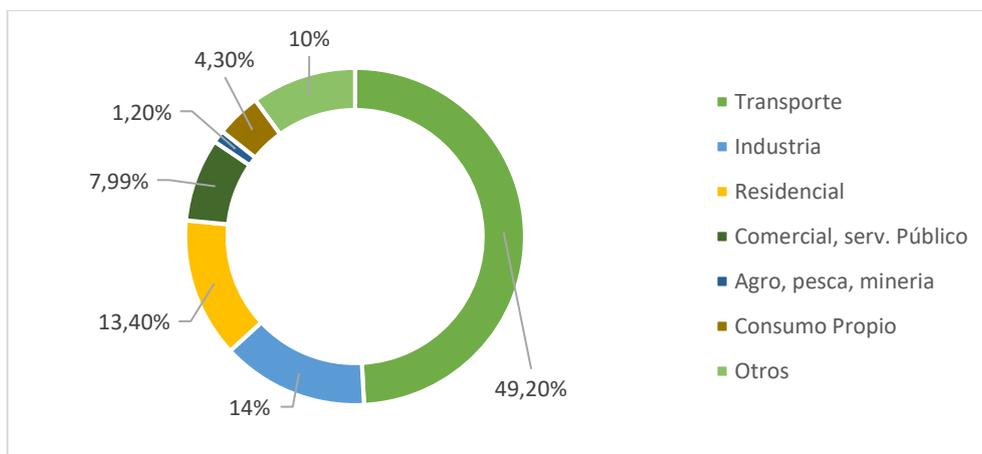


Ilustración 3. Demanda de energía por sector en el año 2019.

Fuente: (Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2020). Elaboración propia.

2.1.2 Situación local de la energía

En la ciudad de Cuenca, la empresa eléctrica Regional Centro Sur (CENTROSUR) es la proveedora de energía eléctrica de la ciudad, el suministro proviene de centrales termoeléctricas e hidroeléctricas. El consumo promedio mensual por hogar en las zonas rurales es de 166 kWh y en las zonas urbanas es de 288 kWh (Jaramillo, 2017). Los sectores que más electricidad consumen son la industria, el comercio y otros sectores.

La ciudad consume combustibles líquidos como fuel oíl, diésel 2, diésel premium, gasolina eco-país y súper, que son utilizados por el sector del transporte y el sector industrial. Igualmente, el gas licuado de petróleo se utiliza en los sectores comerciales, industriales y residenciales y el gas natural utilizado en el sector industrial (Urdiales et al., 2015).

En la ciudad de Cuenca, el consumo total de energía en 2015, fue de 11.683 kWh (42,06 GJ/hab/año), de los cuales la energía eléctrica se consumió 1.121 kWh/hab/año (4,04 GJ/hab/año) (Jaramillo, 2017).

Los combustibles más demandados son los fósiles como el diésel con un 39,2 % y la gasolina con 35% de energía fósil como se observa en la Ilustración 4, que cubren las necesidades energéticas de la ciudad en un 90,4% y la energía eléctrica apoya un 9,6%, como se observa en la ilustración 5. Basado sobre estas cifras, se puede decir que la principal fuente de energía proviene de la quema de combustibles fósiles (Jaramillo, 2017).

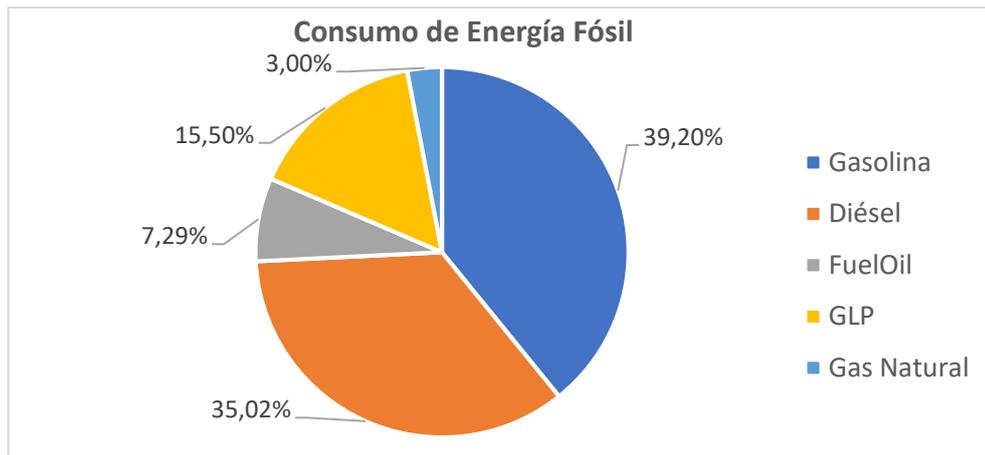


Ilustración 4. Consumo de Energía Fósil en el 2015.

Fuente: (Jaramillo, 2017) . Elaboración propia.

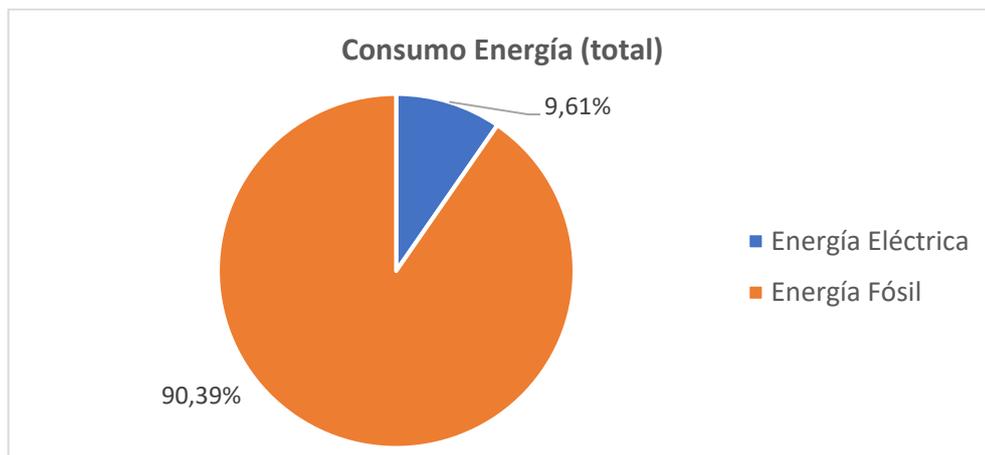


Ilustración 5. Porcentaje de consumo de energía en la ciudad de Cuenca en el año 2015.

Fuente: (Jaramillo, 2017) . Elaboración propia.

En 2020, el consumo de energía eléctrica fue de 762.285 MWh, el sector residencial tuvo una demanda de energía del 42%, el sector comercial el 14%, el sector industrial 26%, el alumbrado público el 12% y otros sectores el 6% , como se observa en la Ilustración 6 (Centrosur, 2020).

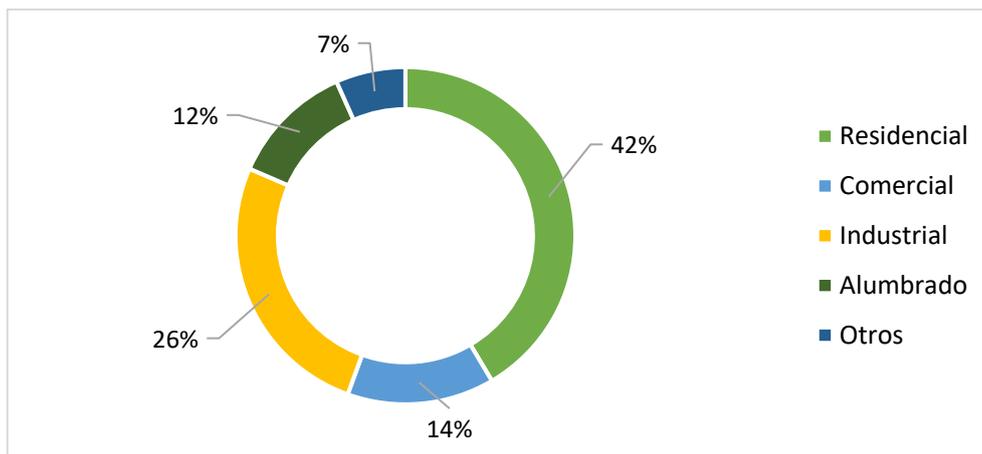


Ilustración 6. Demanda de energía por sector en la ciudad de Cuenca en el año 2019.

Fuente: (Centrosur, 2020). Elaboración propia.

2.2 El hidrógeno como vector energético

El hidrógeno podría ser perfecto para generadores de energía solar y eólica. La desventaja de utilizar sistemas solares o eólicos es que estos pueden generar energía en presencia de radiación solar o eólica, respectivamente. Sin embargo, en horas de baja demanda y alta producción de energía, sin la capacidad de almacenar energía, la energía se puede desperdiciar. Así, una de las opciones es utilizar la energía sobrante para producir H_2 , que será almacenado y transportado para su uso en pilas de combustibles que se utilizará para impulsar motores eléctricos en la tracción de un vehículo. Así, si el H_2 se produce a partir de energías renovables, habrá un sustituto del petróleo en el transporte (González Besa, 2016).

El hidrógeno se puede obtener de los excedentes de producción de energías renovables. De esta forma, con un exceso de electricidad, es posible separar el hidrógeno del oxígeno del agua (Cid Jiménez et al., 2010). A continuación, el hidrógeno se puede almacenar y distribuir (vector energético), a los puntos de consumo. El uso de una pila de combustible que son dispositivos electroquímicos, el hidrógeno y el oxígeno se

convertirán en electricidad, la cual se puede utilizar en motores eléctricos permitiría la tracción vehicular (Jiménez, 2010).

2.2.1 Características del hidrógeno

El hidrógeno es un intermediario energético eficaz y variable como la electricidad. En este sentido, el H₂ no es una fuente de energía, sino un “vector energético”, lo que permite que sea transportado y convertido en otras formas de energía (F. Posso & Zambrano, 2014).

El hidrógeno se puede utilizar como medio para almacenar energía de fuentes primarias como la eólica o la fotovoltaica. El hidrogeno se producirá cuando la demanda energía disminuya y el exceso de producción se utilizara para producirlo (Asensio, 2007b). En la Tabla 1, se presentan algunas características del hidrógeno.

Tabla 1. El hidrógeno en números.

Fuente: (Padilla & Mauricio, 2018). Elaboración propia.

EL HIDRÓGENO EN NÚMEROS	
Densidad:	0,089 kg/Nm ³ (gas) 0,0708 kg/lit (líquido)
Poder calorífico:	Inferior: 120 MJ/kg Superior: 141,86 MJ/kg
Límites de inflamabilidad:	4,0-75 %
Coefficiente de difusión:	0,61 cm ² /s
Límites de detonación:	18,3-59 %

2.2.2 Producción de hidrógeno

El 80% de las necesidades energéticas del mundo se satisfacen con combustibles fósiles que no solo generan contaminación, sino que su cantidad es limitada. Los expertos predicen que para 2050 estos recursos se agotarán o serán costosos de obtenerlos, por lo que se busca nuevas formas de energía limpia e ilimitada (Padilla & Mauricio, 2018).

Gracias al hidrógeno, la energía limpia se puede almacenar, siempre que la fuente involucrada en su producción sea renovable, como la biomasa, residuos, energía geotérmica, solar, hidráulica o eólica (González Besa, 2016). También, se puede obtener a partir de fuentes no renovables, pero los beneficios ambientales siguen siendo precisamente cuestionado por la contaminación provocada por la extracción, transporte y uso de esta materia prima.

2.2.2.1 Producción de hidrógeno empleando energías renovables

El hidrógeno al ser un elemento natural es abundante, y existen varias fuentes principales para obtenerlo, como se muestra en la Ilustración 7 (Venegas et al., 2016). Entre las diversas opciones se presentan, el presente trabajo se interesa en la que permite obtener hidrógeno utilizando el exceso de electricidad proveniente de la energía solar fotovoltaica.

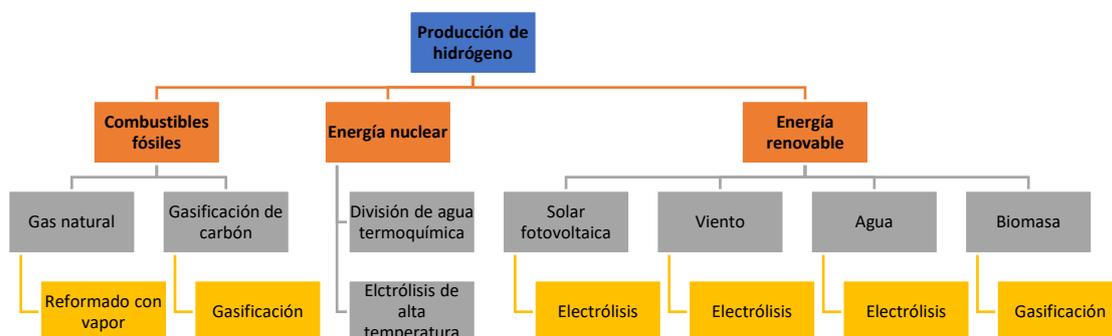


Ilustración 7. Técnicas de producción de hidrógeno.
Fuente: (Venegas et al., 2016). Elaboración propia.

El hidrógeno ha sido calificado como vector energético del futuro y varios megaproyectos se desarrollan en todo el mundo para expandir su uso. Esto ha llevado a una expansión significativa del mercado del hidrógeno verde y han aumentado la capacidad actual para 2020 de alrededor de 80 GW a 140 GW (Smink, 2021).

Sin embargo, actualmente las materias primas que se utilizan para producir hidrógeno son los combustibles fósiles, como el petróleo, el carbón y el gas natural que equivalen al 87%, por lo tanto, esta producción no es considerada sostenible en el tiempo (ver Ilustración 8). La producción de hidrógeno con los métodos y tecnologías actuales, genera gases de efecto invernadero, que promueve negativamente el cambio climático.

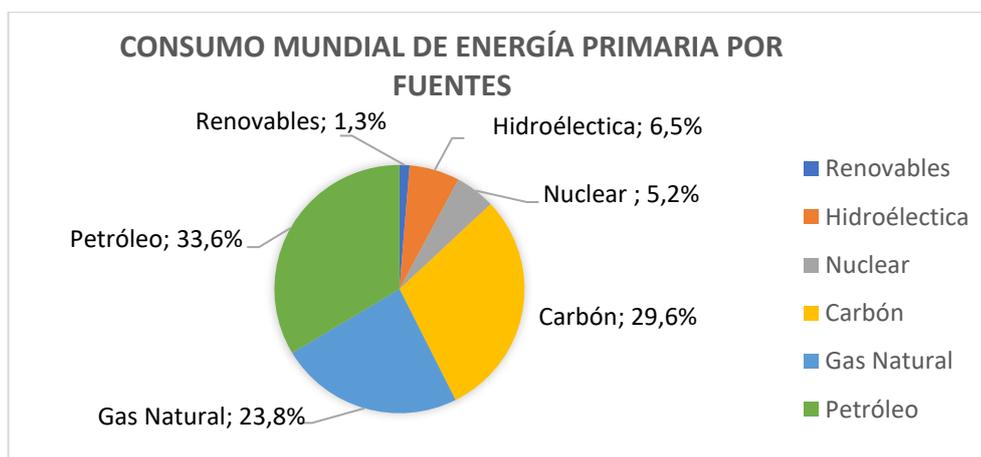


Ilustración 8. Consumo mundial de energía primaria por fuentes.

Fuente: (González Besa, 2016). Elaboración Propia

El hidrógeno se produce a partir de combustibles fósiles, con miras a su aplicación en diversos campos como la industria química, refino de petróleo, metalurgia, vidrio o electrónica. Los métodos de producción de H₂ más consumidos en la actualidad, son la síntesis de amoníaco, la hidrogenación, el procesamiento del carbón y los procesos de síntesis orgánica e inorgánica (González Besa, 2016).

El consumo de energía de la producción de hidrógeno se clasifica por color, dependiendo de si el proceso es limpio o no. Entre los más comunes tenemos el hidrógeno azul, que se puede obtener de los yacimientos de gas natural y el hidrógeno verde obtenido de fuentes de energía renovables, las energías más limpias son la solar o la eólica. Otros, como el hidrógeno negro o marrón que se obtienen de la gasificación del carbón y el hidrógeno gris que se produce a partir de la reformación del metano del gas natural (Brooks, 2020).

Desde el punto de vista medioambiental el tipo de hidrógeno dependerá de la fuente que permita su producción. Por lo tanto, la opción es producirlo a partir de las energías renovables de una manera que debe ser una oportunidad altamente sostenible en sectores reconocidos como fuente de contaminación (Guzman & Spinsanti, 2011).

El hidrógeno en 2025 representará el 11 % y se prevé que para 2050 alcance el 34% dentro del consumo de las energías renovables. A medida que se respalde mejor la producción de hidrógeno, el consumo de combustibles fósiles podría caer del 40,5% al 36,7 % para 2030 (González Besa, 2016).

La siguiente Tabla 2 presenta una serie de estudios que analizan la producción de hidrógeno a partir de energías renovables, la cual muestra que entre las tecnologías que permiten la producción de hidrógeno se encuentra la fotovoltaica:

Tabla 2. Producción de hidrógeno a partir de energías renovables.

Elaboración Propia.

Fuente	Energía renovable	País	Objetivo del estudio
(Smink, 2021)	Hidroelectricidad	Ecuador	Estimación del potencial de hidrógeno a partir de centrales hidroeléctricas.
(Kothari et al., 2008)	Fotovoltaica, eólica, hidroelectricidad	---	Analiza ambiental y económicamente la producción de hidrógeno con distintas tecnologías.
(F. Posso et al., 2016)	Fotovoltaica, eólica, geotérmica, hidroenergía	Ecuador	Analiza el potencial de la producción de hidrógeno a partir de distintas tecnologías.
(F. Posso et al., 2019)	Biomasa de los rellenos sanitarios	Ecuador	Analiza el potencial de hidrógeno a partir de procesos de gasificación.
(Ayodele & Munda, 2019)	Energía eólica	Sudáfrica	Evalúa la producción de hidrógeno mediante energía eólica.
(Stygar & Brylewski, 2013)	Biomasa, solar térmica, fotovoltaica, hidroenergía, eólica	Polonia	Estudia las posibilidades y limitaciones relativas a la transición a la energía del hidrógeno producida por renovables.

Fuente	Energía renovable	País	Objetivo del estudio
(Haghi et al., 2018)	Energía eólica	Canadá	Se analiza el efecto, la rentabilidad y el potencial de almacenamiento de energía de hidrógeno.
(Qureshy & Dincer, 2020)	Energía solar térmica	---	Se desarrolla un sistema de cogeneración apoyado en energías renovables para la producción de hidrógeno y electricidad.
(Shah, 2020)	Eólica, solar, biomasa, residuos sólidos urbanos (RSU), geotermia y micro hidráulica.	Pakistán.	Analiza la viabilidad de generación de hidrógeno a partir de varias energías renovables
(Ishaq & Dincer, 2021)	Fotovoltaica, geotérmica y la gasificación de biomasa.	---	Estudia configuraciones para la producción de hidrógeno a partir de renovables.
(Lokar & Virtič, 2020)	Fotovoltaica	Eslovenia	Destaca que, con un sistema híbrido con sistema fotovoltaico, sistema de almacenamiento de baterías y pilas de combustible de hidrógeno se puede llegar a la autosuficiencia total.

Fuente	Energía renovable	País	Objetivo del estudio
(Grimm et al., 2020)	Fotovoltaica	-----	Establece que la operación de un sistema fotovoltaico conectado a un electrolizador de agua es atractiva desde el punto de vista técnico y económico.

En varios países de América Latina, el potencial del hidrógeno verde no se ve como una tecnología, sino como una oportunidad para aprovechar el exceso de producción eléctrica. Esto se demuestra por el desarrollo de las capacidades renovables, que pueden utilizarse como vector energético para la exportación de energía limpia (CAF, 2021).

En Pakistán, existe un gran potencial para producir hidrógeno verde a partir de fuentes de energía renovables, la producción de ese país jugará un papel importante para contener la crisis energética y mejorar de la seguridad energética. En el estudio realizado evaluaron 6 fuentes de energía renovable, siendo el viento la fuente más adecuada para la producción de hidrógeno verde (Shah, 2020).

Según Rabiee et al. (2021), la producción de hidrógeno verde a partir de energías renovables ayuda a la transición energética. También contribuye a la integración y almacenamiento de las fuentes de energía renovables. Al implementar el hidrógeno como fuente de energía, es necesario estudiar los efectos en la producción y seguridad de los sistemas de energía.

Según Ozturk & Dincer. (2020), se propone implementar un sistema de mezcla de hidrógeno y gas natural para implementarlo en una zona residencial. Al aumentar la fracción de volumen de hidrógeno de 0 al 20% en la mezcla, el gas natural se reduce del

100 al 80% y también puede reducir las emisiones de dióxido de carbono por unidad de combustión.

En Ecuador, varios estudios han evaluado la producción de hidrógeno a partir de los excedentes de hidroelectricidad, energía fotovoltaica, eólica, biomasa. Esto muestra el interés local por estudiar las posibilidades de generar este vector energético (F. Posso et al., 2016, 2019; Smink, 2021)

Aquí hay algunos proyectos de producción de hidrógeno verde en varias ciudades del mundo (Smink, 2021):

- **Australia:** es el país más grande de Oceanía y este proyecto está a la vanguardia de la producción de un nuevo combustible limpio este proyecto con propuestas para la construcción de 5 megaproyectos en su territorio, para una gran cantidad de recursos renovables, eólicos y solares.

Asian Renewable Energy, es el mayor proyecto del mundo, está ubicado en Pilbara, Australia Occidental, donde se prevee la construcción de una serie de parques eólicos con una capacidad total de 14 GW con una serie de centrales eléctricas con electrificadores.

Otros proyectos aún están en las primeras etapas de planificación, que, de aprobarse, agregarían 13.1 GW adicionales.

- **Países Bajos:** la petrolera anglo-neerlandesa Shell está probando el proyecto NorthH2 en el puerto de Ems, en el norte de los Países Bajos, con el objetivo de construir alrededor de 10 GW de electrolizadores. El objetivo de este proyecto es tener 1 GW para 2027 y 4 GW para 2030, utilizando energía eólica offshore.

- **Alemania:** la población está planificando propios proyectos de hidrógeno verde en territorio nacional. Para 2035, se construirá 10 GW de capacidad, utilizando los fuertes vientos de la región como fuente de energía.

Varias empresas, institutos de investigación y organizaciones apoyan proyectos que utilizan los fuertes vientos de la región como fuente de energía.

Se planea un segundo proyecto más pequeño se planea en Rostock, en el que un consorcio liderado por la compañía de energía local RWE planea construir 1 GW adicional de energía verde.

- **China:** este país es el que más cantidad de hidrogeno produce a nivel mundial y actualmente utiliza hidrocarburos para producir toda esa energía. El país se introdujo en el mercado del hidrógeno verde con la construcción de un megaproyecto en la Región Autónoma de Mongolia Interior (Smink, 2021).El proyecto, dirigido por la empresa estatal de servicios públicos estatal Beijing Jingneng, invertirá una cantidad considerable de dinero para generar 5 GW a partir de la energía eólica y solar.

- **Arabia Saudita:** con mayores reservas de petróleo, el país también planea ingresar al mercado del hidrógeno verde, conocido como Helios Green Fuels Project, que espera que el proyecto de \$ 5.000 millones instale alrededor de 4 GW de electrolizadores para 2025.

- **Chile:** país sudamericano, fue el primer país de la región en proponer en el mercado una “Estrategia nacional de hidrógeno verde”, en el 2020, también está desarrollando 2 proyectos como: HyEx, de la empresa francesa Engie y la empresa de servicios mineros Enaex de Chile, Highly Innovative Fuels (HIF), de AME, Enap, En el Green Power, Porsche y Siemens Energy. En Antofagasta, utiliza

energía solar para ejecutar electrolizadores de 1,6 GW. El hidrógeno verde está diseñado para su uso en el sector minero con el objetivo de instalar 16 MW para 2024.

2.2.2.2 Producción de hidrógeno mediante energía solar

La energía solar directa es la energía proveniente del Sol sin modificaciones. Para aprovechar la radiación solar cuando el recurso no se combina con la carga, se requiere un sistemas de recolección y de almacenamiento (Guzman & Spinsanti, 2016).

La radiación solar se puede transformar de dos formas, una utilizando parte del espectro electromagnético de la energía solar para generar calor y la otra para generar electricidad (González Besa, 2016).

Lo siguiente se obtiene del efecto fotovoltaico. En la actualidad, este efecto se utiliza mucho en centrales eléctricas grandes y pequeñas que utilizan módulos fotovoltaicos o paneles solares (Guzman & Spinsanti, 2016).

Cuando comenzaron a producirse las células solares, una dificultad con esta tecnología es el alto coste. Sin embargo, los valores con el desarrollo del mercado (González Besa, 2016).

Es común obtener hidrogeno a partir del agua (H_2O), por descomposición química por la acción de una corriente eléctrica (electrólisis), que se puede obtener a partir de fuentes de energía renovable (solar fotovoltaica) (González Besa, 2016). Una ventajas del H_2 es que se puede comprimir y almacenar hasta que se lo necesite (Guzman & Spinsanti, 2016).

2.2.3 Energía solar en ciudades

Más del 50% de la población mundial vive en áreas urbanas. Se puede decir que, para combatir contra el cambio climático y la contaminación, se debe comenzar con

acciones promovidas en las ciudades. Una de las soluciones es diseñar ciudades responsables que busquen adaptarse al desarrollo y la sostenibilidad, así como promover y expandir la adopción de energías renovables como la solar (Garzon, 2015).

La Agencia Internacional de Energía (AIE) en el 2018, prevé en el escenario “Desarrollo Sostenible”, para el 2040 dos tercios de 37.114 TWh de la generación eléctrica provendrá de fuentes renovables (Roca, 2018). Casi el 40% de la generación eléctrica provendrá en su totalidad de energía eólica y solar (14.139 TWh), que tiene menores costos de producción. Teniendo esto en cuenta, se espera que estas fuentes produzcan más electricidad que el carbón, petróleo, gas y energía nuclear combinada para el 2040 (Roca, 2018).

La AIE sostiene que los combustibles fósiles no son la mejor manera de garantizar el acceso a la electricidad para todos. Para que toda la población acceda a la electricidad se necesitan fuentes de bajo costo. La cual se cumple en el caso de la energía solar fotovoltaica a pequeña escala, aislada o conectada a la red (Roca, 2018).

Las energías limpias continua creciendo y muchas ciudades planean reemplazar completamente el uso de combustibles fósiles por energía renovable (ECO-Inteligencia, 2019). La intervención de la generación distribuida presenta desafíos, ya que aumentar su participación requiere una reforma del mercado, una inversión en la red o implementar mejoras en las tecnologías que respondan a la demanda, tales como la medición del rendimiento, inteligencia y tecnología de generación de energía y poder almacenarlo en baterías (Roca, 2018).

Según el informe de *Carbon Disclosure Project*, más de 100 ciudades de todo el mundo integran el 70% de su energía de fuentes limpias, y otras 40 ciudades que utilizan 100% de energía renovable (ECO-Inteligencia, 2019).

En el caso específico de la energía solar, sus posibles aplicaciones corresponden a sistemas de suministro de agua caliente, generación de electricidad y producción de combustibles alternativos para vehículos (Garzon, 2015). Dado que la energía fotovoltaica se puede colocar en los techos, varias investigaciones han estudiado la posibilidad de la colocar paneles a gran escala. Esta producción ayudará a reducir el consumo de electricidad producida fuera de áreas urbanas, lo que contribuirá así a la autosuficiencia energética.

En Valencia (España) se está analizando la capacidad para cubrir la demanda de energía eléctrica con paneles fotovoltaicos instalados en cubierta. Se estima que la producción de energía potencial total es suficiente para satisfacer la demanda nacional de electricidad (Gómez-Navarro et al., 2021).

En el parque industrial de Ostim (Turquía), se analizan las aplicaciones económicas y las emisiones de carbono de las cubiertas fotovoltaicas. Además, se analizan las perspectivas del alumbrado urbano en las ciudades inteligentes con interesantes efectos estéticos.

En la ciudad de Gwanak (Corea del Sur), se estima que el potencial fotovoltaico de autobuses solares en áreas urbanas da una capacidad media por autobús de aproximadamente 2,7 kWh/día con una capacidad del sistema del 5,57%. En esta ciudad, la industria fotovoltaica ha florecido gracias al bajo coste de los paneles solares y al fomento de las políticas de la ciudad (Oh et al., 2020).

En Alejandría (Egipto), se planificó una selección óptima de paneles fotovoltaicos en el área urbana de la ciudad con la aplicación de GIS. Para lo que se elaboró y analizó un modelo geográfico que arrojara resultados precisos sobre las áreas de instalación, se

realizó una comparativa de varios módulos fotovoltaicos para hacer una elección óptima para su instalación (Aboushal, 2018).

En Karlsruhe (Alemania), se analizó un área urbana de 2 km² para evaluar el potencial económico de los sistemas fotovoltaicos para grandes edificios, especialmente en las fachadas. El estudio identifica el potencial en 8 MW con una tarifa de 0,25 €/kWh, equivalente a 0,30 \$/kWh, que es inferior al precio de la tarifa eléctrica residencial del 2014 (Fath et al., 2015).

2.2.4 Energía solar fotovoltaica

Es el aprovechamiento de la radiación solar incidente para generar energía, que puede almacenarse para su posterior consumo o venderse a la red eléctrica, instalaciones aisladas o conectadas a la red (Junta de Castilla y León, 2008).

El gran éxito de la tecnología fotovoltaica en el espacio es el inicio de la propuesta de varios dispositivos eficientes a nivel industrial. Hoy en día, esta tecnología no solo es aproximadamente accesible a gran escala sino también se aplica en el país. Con los avances tecnológicos y el desarrollo de economías de escala, la energía solar fotovoltaica es una de las fuentes de energía con mayor potencial para impulsar la futura revolución energética (Junta de Castilla y León, 2008).

La Tabla 3 presenta las ventajas y desventajas de la energía solar fotovoltaica. Algunos de estas limitaciones no están relacionadas con la economía o las infraestructura, pero pueden superarse parcialmente mediante una amplia aceptación pública y enormes beneficios ambientales (Clark & Rifkin, 2006).

Tabla 3. Ventajas y desventajas de la energía solar fotovoltaica.

Fuente: (Clark & Rifkin, 2006). . Elaboración propia.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Es limpia, renovable, infinita, silenciosa	Gran inversión inicial.
La producción para la venta a la red se remunera económicamente.	Es de difícil almacenamiento.
Subvenciones.	Su proceso de fabricación de módulos complejo y caro.
Corto pay-back de la energía.	No es competitiva con otras energías en la actualidad.
Sin partes móviles y modular.	Tiene una producción variable según meteorología de la zona.

2.2.4.1.1 Energía fotovoltaica a nivel mundial

Los gobiernos a nivel mundial están acelerando su evolución de un modelo centralizado a uno descentralizado. La energía solar es abundante, gratuita y limpia, no produce ruido, ni emisiones contaminantes (Berrío & Zuluaga, 2014)

En Japón, Alemania, España y Estados Unidos, la energía FV se ha desarrollado a lo largo de los últimos 25 años, no han logrado un desarrollo tecnológico simultáneo dentro del mismo marco de políticas. Varias políticas han llevado a un rápido crecimiento del mercado durante los últimos 10 años, pero han demostrado tener altos costos y ser ineficaces para responder a las condiciones del mercado (ONU, 2021).. La capacidad instalada está más concentrada en China, superando los 205 GW de capacidad instalada,

seguida de Estados Unidos con 76 GW, Japón con 63,2 GW, y otros países como Alemania con 49,2 GW, e India con 38 GW (NS ENEGY, 2021).

La capacidad fotovoltaica global en el mundo en 2020 fue de 709.493 MW (20% de energías renovables total). En 2000, la potencia instalada en el mundo era de 808 MW (0,1 % del total), lo que significa que en 18 años se multiplicado por más de 700 veces. La producción eléctrica en 2020 fue de 549.828 GWh (8,3% del total). Mientras que, en 2000, la producción de energía con esta tecnología fue de 805 GWh (0% del total). Esto muestra el enorme impacto de la tecnología durante los últimos 20 años (ONU, 2021).

2.2.4.1.2 Energía fotovoltaica en Suramérica

En algunos países de América, las comunidades rurales no cuentan con servicio eléctrico regular. En áreas remotas sin electricidad de la red, los gobiernos han alentado la adopción de sistemas fotovoltaicos aislados como una alternativa segura al suministro de electricidad a las personas.

Con el uso de energía fotovoltaica conectada a la red, y la construcción de grandes centrales fotovoltaicas, la capacidad y la energía en esta área también aumentaron. En 2000, la potencia instalada fue de 2 MW, y en términos energéticos fue de 8 GWh, mientras que en el año 2018 la potencia instalada fue de 10.701 GWh. A pesar de este aumento significativo, la energía generada por la energía fotovoltaica en América del Sur es alrededor del 2% (ONU, 2021).

En América del Sur en 2019, los países con la mayor capacidad fotovoltaica conectada a la red fueron Chile con 2,6 GW y Brasil con 2,4 GW de instalaciones acumuladas. Mientras que Sudamérica, la capacidad fotovoltaica sin conexiona a la red alcanzo 91.230 MW en 2019, de los que destaca Perú con 60,612 MW, Brasil con 7.227 MW, Bolivia con 4.860 y finalmente Colombia con 4.636 MW (Sánchez Molina, 2020).

2.2.4.1.3 Energía fotovoltaica en Ecuador

Ecuador, por su ubicación geográfica, es un país privilegiado en términos de recursos solares. De hecho, el ángulo de incidencia de la luz solar es perpendicular a la superficie durante todo el año. En el 2019, la Corporación para la Investigación Energética del Ecuador desarrolló el Atlas de Irradiación Solar del país, en el que se puede encontrar datos georreferenciados sobre radiación global, difusa y directa. Atlas es ahora una de las herramientas locales para promover proyectos e investigaciones solares (Corporación para la Investigación Energética, 2019).

En Ecuador, la potencia nominal de la energía solar de producción nacional es 27,63 MW, es decir, 0,32 % de la matriz energética en el 2020, donde 0,18 % corresponde a aislada y 0,14 % está conectada a la red. La potencia instalada representa el 0,5 % de las energías renovables del país (incluida las grandes centrales hidroeléctricas). La siguiente Ilustración 9 muestra el desarrollo de la potencia instalada en el Ecuador.

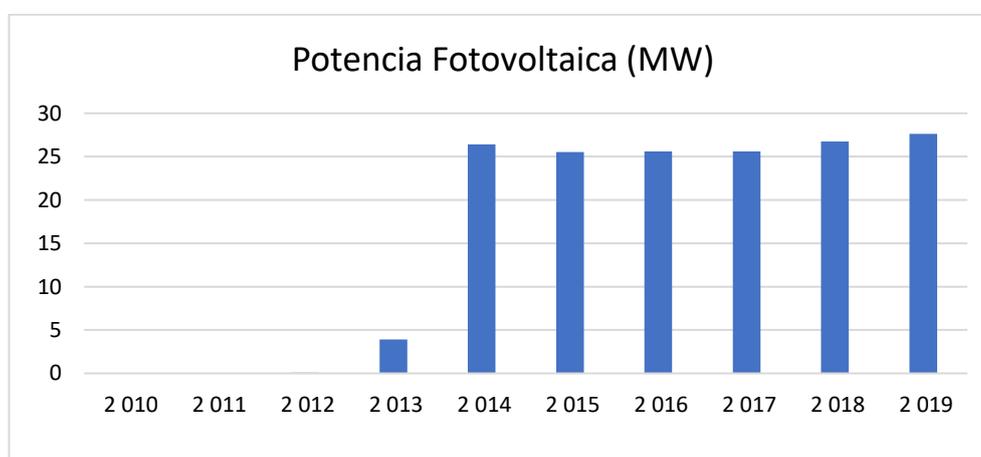


Ilustración 9. Potencia Fotovoltaica en Ecuador.

Fuente:(IRENA, 2021). Elaboración Propia.

El desarrollo energético apoyado por tecnología fotovoltaica que demuestren la autosuficiencia energética podría dar a los ciudadanos más libertad, lo que aliviaría la

carga de los gobiernos. A partir de este concepto, es posible comprender la motivación de ciertos países para invertir en nuevas fuentes de energía consideradas respetuosas con el planeta (Plaza Plaza, 2018).

Ecuador cuenta con incentivos económicos y fiscales para que las personas utilicen tecnologías para generar energía limpia, que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Beneficios de la Energía Solar en Ecuador.

Fuente: (Enercity S.A., 2019). Elaboración propia.

BENEFICIOS ECONÓMICOS	BENEFICIOS TRIBUTARIOS
Costo de cero producciones de energía eléctrica.	Reducción de aranceles.
Reducción de rubros altos de consumo de energía eléctrica.	Tarifa 0% del IVA en los paneles solares.
Uso de energía solar como autoabastecimientos.	Depreciación y amortización del 100% en equipos para generación de energía de fuente renovable.
Ahorro significativo en el tiempo.	

En el mapa solar del Ecuador, la Irradiación Solar Global Horizontal (GHI) anual sobre el Ecuador varía de 2,8 kWh/m² día a 6,4 kWh/m² día, lo suficientemente altos para el despliegue de grandes despliegues de tecnologías solares térmicas y fotovoltaicas, como se puede ver en la Ilustración 10 (Revelo Vaca et al., 2019).

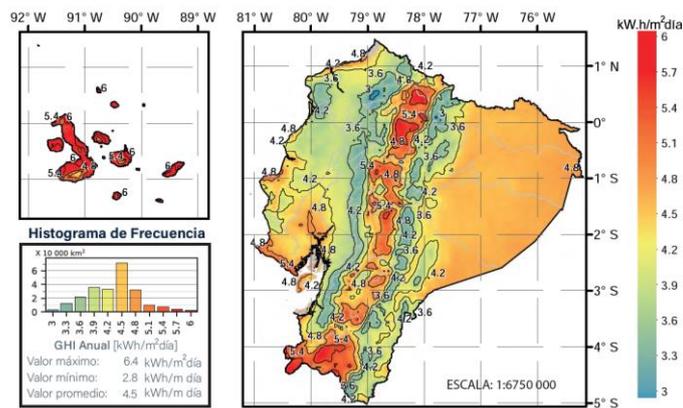


Ilustración 10. Irradiación Solar Global Horizontal (GHI) Anual.

Fuente: (Revelo Vaca et al., 2019).

La radiación que traspasa la atmósfera sin interactuar con ella se denomina Irradiación Normal Directa (DNI), mientras que la radiación que atraviesa la atmósfera o se refleja en la superficie terrestre se denomina Irradiación Horizontal Difusa (DHI). La unión de estos se le conoce como Irradiación Global Horizontal (GHI). Los mapas muestran DHI con un valor promedio de 2,4 kWh/m²día (Ilustración 12) y DNI con un valor promedio de 3 kWh/m²día (Ilustración 11) por año para el Ecuador (Revelo Vaca et al., 2019).

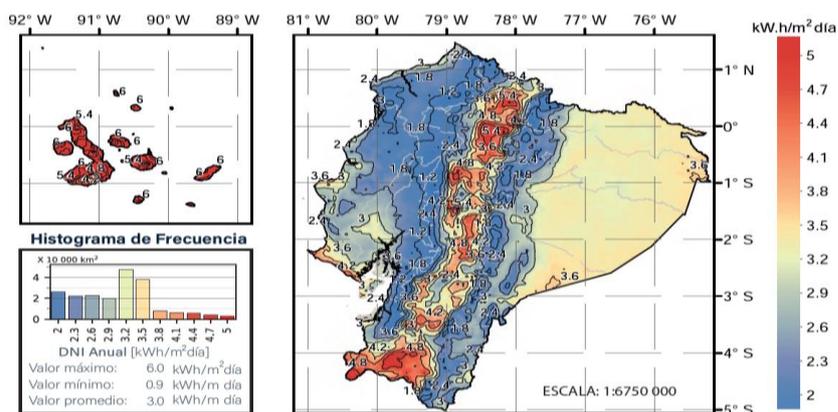


Ilustración 11. Irradiación Solar Directa Normal (DNI) Anual.

Fuente: (Revelo Vaca et al., 2019).

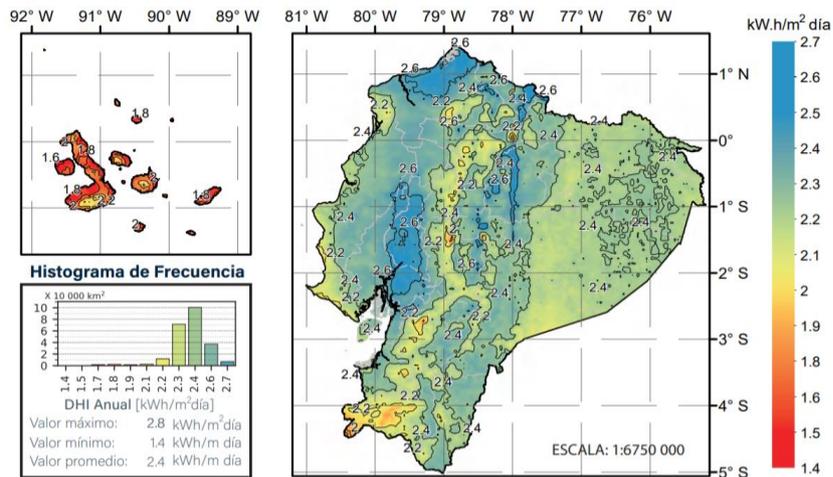


Ilustración 12. Irradiación Solar Difusa Horizontal (DHI) Anual.

Fuente: (Revelo Vaca et al., 2019).

En Ecuador hasta 2021 se incentiva la generación distribuida de energía en base a dos normativas que obligan a residentes y comercios a instalar sistemas de energía interconectados a la red eléctrica local:

ARCERNNR-001/2021 (Agencia de regulación y control de energía y recurso naturales no renovables, 2021a), tiene como objetivo “*determinar las disposiciones para el proceso de habilitación, conexión, instalación y operación de sistemas de generación distribuida de fuentes de energía renovable para el autoabastecimiento de consumidores regulados*”.

ARCERNNR-002/2021 (Agencia de regulación y control de energía y recurso naturales no renovables, 2021b), tiene como objetivo determinar las condiciones técnicas y comerciales en base al desarrollo y operación de centrales eléctricas descentralizadas por empresas autorizadas.

2.1.3.1.3.1 Proyectos con energía solar fotovoltaica en Ecuador

En su momento el *Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER)* estaba impulsado proyectos de gran escala como parques fotovoltaicos conectados a la red, en

todo el territorio nacional. Por otro lado, se han implementado diseños basados en normativas en los edificios que les permiten conectarse en red entre sí. La Ilustración 13 muestra una serie de proyectos que se han desarrollado o están en proceso de investigaciones de sistemas conectados a RED.

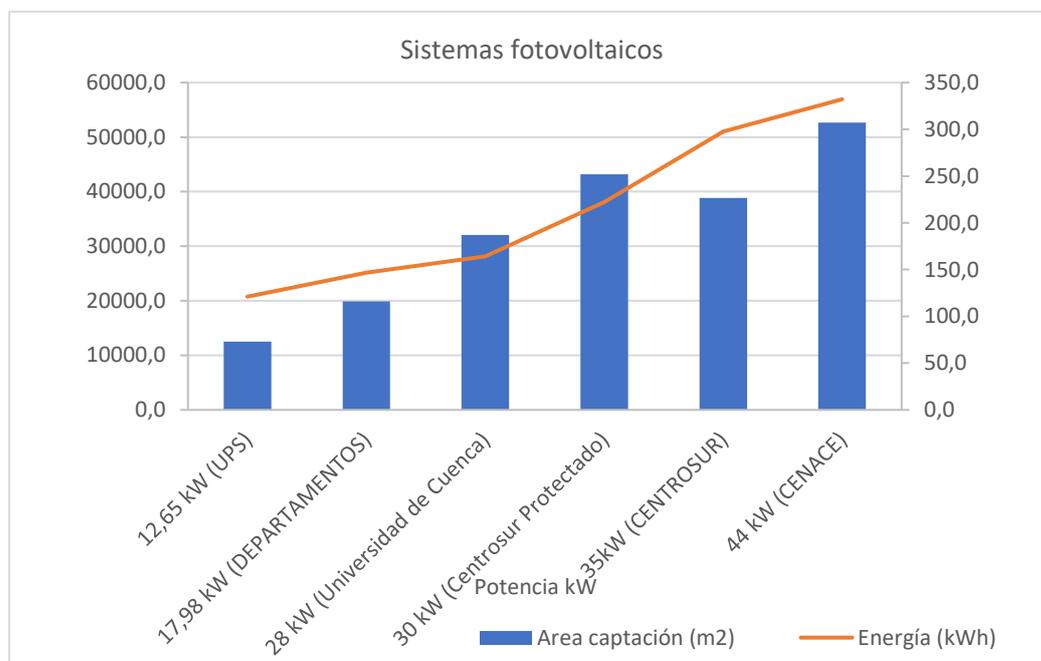


Ilustración 13. Sistemas fotovoltaicos conectados a la red interna.

Fuente: (E. A. Barragán Escandón, 2020). Elaboración propia.

Para las plantas solares, la Tabla 5 muestra los sistemas de generación de energía y los sistemas de generación registrados y que son propiedad de diferentes empresas eléctricas en el Ecuador.

Tabla 5. Generación de energía solar y eólica de empresas distribuidoras en el Ecuador.

Fuente (ARCONEL, 2019):. Elaboración propia.

Tipo de Central	Distribuidora	Central de Generación	
		Nombre	Energía Bruta (MWh)
Eólica	E.E. Galápagos	Santa Cruz Solar Puerto Ayora	2063,34
		Isabela Solar	1536,4
		Baltra Solar	103,59
		Floreana Solar	24,32
		San Cristóbal Solar Eólica	15,96
		Isabela Solar Aislados	8,93
		Santa Cruz Solar Aislados	8,35
		Floreana Solar Aislados	5,1
	E.E. Centro Sur	Panel Fotovoltaico	693,27
	E.E. Ambato	Panel Fotovoltaico	31,78
Total de la energía Solar- Fotovoltaica			4491,04

2.2.5 Transporte en la ciudad de Cuenca

2.2.5.1 Situación del transporte.

En la ciudad de Cuenca, el transporte público que utiliza combustibles fósiles tiene emisiones que reducen la calidad de vida. Se han creado marcos regulatorios y lineamientos para la planificación y operación. A partir de eso, se promueven soluciones

a los problemas de tráfico, contaminación atmosférica y el ruido. Una solución razonable es establecer un sistema de transporte público conforme a las necesidades de las personas que los incentive a usarlo y reemplazarlo en lugar de usar sus propios vehículos (Silva Morales & Torres Sánchez, 2017).

El número de propietarios de vehículos de motor ha aumentado en algunas ciudades latinoamericanas a medida que los ingresos por exportaciones de petróleo han aumentado rápidamente. Cuenca, la tercera ciudad más grande del Ecuador, aproximadamente con una población de 505.585 habitantes (Castillo, 2019), es una de las ciudades con mayor porcentaje de propietarios de automóviles per cápita: es decir, una de cada cuatro personas posee un automóvil (Moscoso Cordero, 2012).

Según información actualizada, desde enero a septiembre del 2021, la Empresa Pública de Movilidad, Tránsito y Transporte, EMOV EP (EMOV EP, 2021), registro 76.521 vehículos matriculados en la ciudad y 98.527 pasaron por la revisión técnica de los cuales una gran cantidad de ellos circulan por el centro histórico (Diario El Mercurio, 2020).

2.2.6 Transporte público en la ciudad de Cuenca

El transporte público en Cuenca afronta retos como los cambios de altitud, la estética y la prevención con la contaminación del tráfico. Cabe señalar que el aumento continuo del parque de vehículos provoca atascos y contaminación ambiental (Wenz et al., 2021).

En Cuenca, el transporte significa el 60% del consumo total de energía. En 2015, el combustible más consumido fue la gasolina (40,12%), seguido del diésel (32,16%) en el sector transporte (Wenz et al., 2021).

En Cuenca circulan alrededor de 128.072 vehículos, de los cuales el 10,68% funcionan con diésel. La Cámara de Transporte de Cuenca (CTC) es la empresa administradora del transporte público urbano en el cantón. La CTC se estableció en 2000 y está integrada por siete empresas de transporte existente. Los transportistas urbanos han formado dos consorcios que prestan servicios de transporte público, el Consorcio CONCUENCA es el organismo que gestiona y dirige todas las rutas y el Consorcio SIR es el organismo que gestiona el presupuesto operativo del transporte (Astudillo Bravo, 2016).

En la ciudad de Cuenca, con la renovación de la flota vehicular de transporte público que circula, utilizando un nuevo modelo de "buses tipo", se han reducido las unidades de transporte urbano, estableciéndose una flota vehicular de 475 buses, repartidos en 29 rutas (Consejo cantonal de Cuenca, 2018), que emiten 112 toneladas de CO₂ y quemas 11.175 galones de diésel por día (Wenz et al., 2021).

2.2.6.1.1 Uso del hidrógeno en el sector transporte

Una cierta cantidad de CO₂ emitido al medio ambiente es producida por la industria del transporte, lo que representa aproximadamente el 60 % del consumo mundial de petróleo. Por ello, es importante avanzar hacia el uso de fuentes alternativas, como el biodiésel, el etanol o el hidrógeno, para cambiar el combustible utilizado para la tracción de los vehículos (Guzman & Spinsanti, 2011).

El uso de hidrógeno en motores de combustión interna requiere ligeras modificaciones. Suponiendo un aumento significativo de la eficiencia, también pueden funcionar con pilas de combustible, que convierten la energía química en energía eléctrica para impulsar un motor eléctrico (González Besa, 2016).

Los vehículos de pilas de combustible aún no han alcanzado las mismas características que los vehículos de gasolina o diésel, especialmente los vehículos eléctricos que solo utilizan acumuladores. Las pilas de combustible de hidrógeno se pueden cargar más rápido que las batería de los vehículos eléctricos durante muchas horas (Guzman & Spinsanti, 2011).

2.2.7 Desarrollo de vehículos a hidrógeno

Los grandes fabricantes de automóviles no ignoran la posibilidad de una economía del hidrógeno en el futuro y creen que la economía del hidrógeno es una posible solución a una fuerte contaminación por CO₂ el medio ambiente. A continuación, un breve resumen del desarrollo de algunos de estos vehículos de parte de compañías automotrices.

BMW: El BMW Hydrogen 7 es un automóvil híbrido, tiene un motor de combustión interna impulsado por hidrógeno como por gasolina, es un motor V12 de 6 litros, impulsado por hidrógeno, genera 260 HP, puede acelerar en 9,2 segundos a los 100 km/h. El hidrógeno se almacena en forma líquida a -250°C aproximadamente.

DaimlerChrysler: Este vehículo posee un motor eléctrico accionado por una pila de combustible de hidrógeno, que tiene una capacidad de 65 kW. Su aceleración va de 0 a 100 km/h en 16 segundos y puede alcanzar una velocidad máxima de 140 km/h.

Ford Motors: Ford Focus FCV-Hybrid es una variación del tradicional Focus con un motor eléctrico de celda de combustible Ballard Mk 902 de 92 HP que proporciona una fuente de energía eléctrica para propulsar el automóvil. El bloque de la pila de combustible pesa 96 kg y funciona con hidrógeno gaseoso. La batería de 216 V no solo es útil para iniciar el sistema, sino que también proporciona un impulso adicional durante la aceleración (González Besa, 2016).

General Motors: El Chevrolet Sequel tiene un motor eléctrico con una celda de combustible de hidrógeno. Almacenado en forma de gas comprimido. También incluye un sistema by-wyre que reemplaza los sistemas mecánicos e hidráulicos de los automóviles convencionales por un sistema electrónico.

El HydroGen3, tiene un motor eléctrico que funciona con una celda de combustible de hidrógeno, que se almacena como gas comprimido o gas licuado.

Honda: el automóvil FCX funciona con una celda de combustible de hidrógeno con un motor que posee una potencia de 95 kW. El hidrógeno se acumula como gas comprimido.

Hyundai: Tucson FCEV, impulsado por celdas de combustible a base de hidrógeno con una autonomía de 300 km y puede alcanzar una velocidad máxima de 150 km/h.

2.2.8 Hidrógeno y pilas de combustible

Una pila de combustible es un tipo de batería de alta tecnología que convierte continuamente la energía química en energía eléctrica siempre que se mantenga la colaboración de este combustible (Asensio, 2007a). La mayoría de las pilas de combustible son una suma de celdas que están formadas por 2 electrodos, ánodo (-) y cátodo (+), separados por un electrolito sólido o líquido (Asensio, 2007b).

Las pilas de combustible fijas llenan el espacio entre las grandes unidades de cogeneración y las pequeñas calderas, extendiendo el uso de la cogeneración alrededor de los edificios (González García-Conde, 2005). La mejora de la infraestructura de suministro de hidrógeno para el transporte fomentará el uso del hidrógeno en baterías estacionarias (González García-Conde, 2005).

La unión del hidrógeno y la pila de combustible resulta importante para la naturaleza porque no producen emisiones contaminantes como SO₂, hidrocarburos no quemados y CO₂ ya que por el tubo de escape de un automóvil que funciona con pilas de hidrógeno, solo emite vapor de agua (Asensio, 2007b).

2.2.9 Aplicación de la tecnología para obtener energía a base del hidrógeno

Existen 2 tipos de tecnologías para capturar la energía presente en el hidrógeno, uno de los cuales es el de un motor de combustión interna alternativa que funciona de manera similar a un motor de combustión interna de hidrocarburos.

Otra opción, se puede aprovechar la energía potencial del hidrógeno mediante el uso una pila de combustible, que convierte la energía química en energía eléctrica en forma de oxidante (aire u oxígeno). Las pilas de combustible de hidrógeno están compuestas de celdas que constan de 2 electrodos positivos y un negativo, separados por un electrolito.

Según la Fundación Hidrógeno Argón (Fundación para el desarrollo de las nuevas tecnologías del hidrógeno de Aragón, 2020) y Estudios Superiores Abiertos S.A (SEAS, 2020), las ventajas y desventajas de las pilas de combustible son (Moreno Vallejo & Vargas Gallo, 2013):

- Posee una gran eficiencia en comparación con las máquinas térmicas, convirtiendo energía química en energía eléctrica, sin trabajo mecánico.
- Funciona silenciosamente y reduce la necesidad de mantenimiento.
- Posee un funcionamiento continuo, no es necesario rellenarlo sin un flujo constante de combustible.

- Las pilas de combustible están compuestas por celdas de combustible y pueden apilar para aumentar el voltaje de la batería de acuerdo con la demanda de energía.
- La vida útil de las pilas de combustible ha alcanzado un nivel adecuado para aplicaciones de desplazamiento de 4.000 a 10.000 horas de funcionamiento continuo en el sector turístico.

2.2.10 Enfoque del hidrógeno como vector energético

La economía del hidrógeno es un sistema que integra el hidrógeno como fuente de energía en el ciclo de suministro de energía. El H₂ no es una fuente de energía directa por lo que se lo presenta como vector energético, sino que se obtiene a partir de alguna fuente de energía. Puede utilizarse en muchas aplicaciones diferentes (Rivero, 2016).

Las pilas de combustible son dispositivos que convierten la energía química de un combustible, H₂ en energía eléctrica, sin generar contaminación en el proceso y con gran eficiencia (Rivero, 2016).

El uso del hidrógeno y pilas de combustible responden a la directriz hacia sistemas energéticos sostenibles, autosuficientes y libres de contaminación. Dado el alcance del desarrollo tecnológico, podemos decir que representan la tercera revolución industrial (Rivero, 2016). Al estudiar el papel del petróleo en la sociedad, su mayor efecto en la economía global se asocia con su potencial energético asociado a la movilidad (Solar Castillejos, 2017).

El petróleo es reconocido como un vector energético, por lo que las alternativas de inversión son escasas debido a la movilidad, flexibilidad, rapidez y disponibilidad del petróleo, independientemente de los efectos perjudiciales sobre la economía y el medio ambiente (Moreno Vallejo & Vargas Gallo, 2013).

El petróleo, el gas, y el carbón u otros combustibles fósiles naturales tiene una vida útil. Mientras que el hidrógeno, las baterías y otras fuentes provienen de fuentes de energía como la solar, eólica e hidráulica, que son inagotables (Solar Castillejos, 2017).

Para obtener un elemento de almacenamiento de energía con características similares o superiores a los combustibles fósiles, es necesario encontrar un vector energético alternativo que sus impactos ambientales negativos sean mínimos. El hidrógeno tiene la característica de ser un vector energético, gracias a su capacidad de almacenar energía eléctrica y de construir todo el ciclo de producción y consumo en torno a tecnologías de energía limpia (Moreno Vallejo & Vargas Gallo, 2013) .

En la actualidad, el hidrógeno y las pilas de combustible se han fusionado con la revolución tecnológica, trasladando a la humanidad a un nuevo estado de comprensión de la acción colectiva (Solar Castillejos, 2017).

Según Clark & Rifkin, (2006), durante la tercera revolución industrial, el hidrógeno surgió como un vector energético promovido por la reducción del petróleo, los problemas ambientales y la comercialización del crudo. Su objetivo es realinear la producción y consumo energético, por ejemplo, para descentralizar la producción de energía para que las zonas residenciales y comerciales tomen la iniciativa de gestionar la cobertura total o parcial de la demanda de energías renovables. De esta forma, el exceso o escasez de electricidad serán comercializara a través de la red energética publica, promoviendo una nueva idea de interacción energética conocida como generación eléctrica distribuida.

Esta propuesta tiene por objeto garantizar que el excedente de generación eléctrica distribuida se almacene en forma de hidrógeno y luego se utilice para la tracción de vehículos y edificaciones (Solar Castillejos, 2017).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

En este capítulo se establece la metodología para definir el potencial de energía solar fotovoltaica en un área urbana central definida de la ciudad de Cuenca. Se delimita esta área con información geográfica (Urgilés Ortiz & Yáñez Iñiguez, 2018). Luego se estima la radiación de energía aprovechable y con la ayuda de factores de reducción que consideran entre otros la eficiencia, arquitectura, inclinación u orientación se establece el potencial técnico. Una vez definido este potencial, se analiza la posible producción de hidrógeno por electrólisis. Para finalizar se establece si el hidrógeno producido permitiría sustituir vehículos del transporte público. En el diagrama indicado en la Ilustración 14, se muestra la metodología aplicada.

Metodología

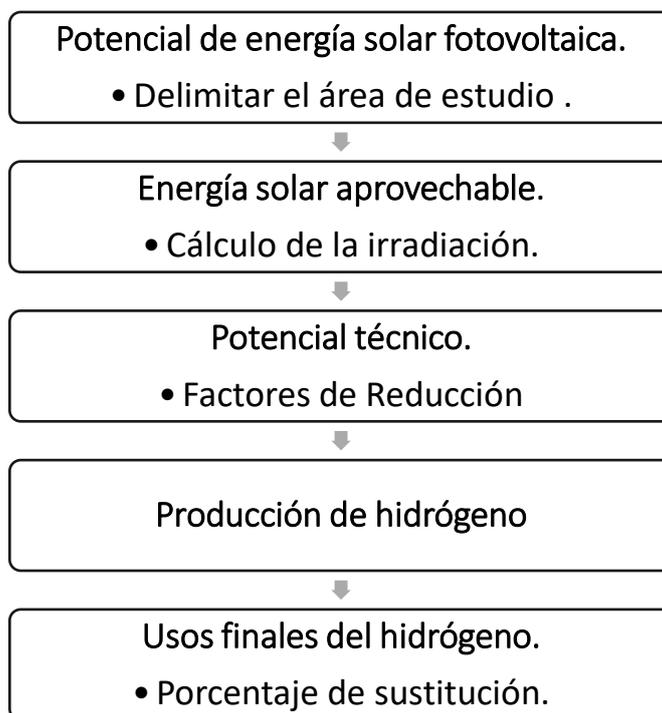


Ilustración 14. Esquema metodológico.

Elaboración propia.

3.1 Potencial de la energía solar fotovoltaica en Cuenca urbana

Para ello, se seleccionan un área determinada para definir la captación de energía en los techos. Cuenca, ubicada en los Andes cerca de la línea ecuatorial, se la considera una ciudad autosuficiente en energía debido a sus requerimiento energéticos y la baja variabilidad de irradiación (Zalamea-León et al., 2018).

Debido a la latitud ecuatorial, parecería que a ángulos con una gran inclinación la captación es perjudicial (latitud es de $2^{\circ}54'$), pero se ha demostrado que la inclinación y orientación de los paneles solares no es incidente entre los 0 a 30° (Zalamea-León et al., 2018).

Las superficies de techos y su orientación pueden beneficiar la captación solar, pero la presencia de obstáculos como conductos, ventanas y entre otros, impiden el funcionamiento sistemas fotovoltaicos. Para el centro histórico de la ciudad de Cuenca (zona de estudio) el posicionamiento horizontal de los paneles es teóricamente mejor, pero desde el punto de vista de limpieza, se recomiendan las instalaciones fotovoltaicas inclinadas para reducir 1% de las perdidas por acumulación de polvo, en zonas con altas cantidades de lluvia como Cuenca (Zalamea-León et al., 2018).

La información recolectada por Urgilés et al. (Urgilés Ortiz & Yáñez Iñiguez, 2018) se utiliza para delimitar el área de estudio, por lo que el INEC divide a la Ciudad de Cuenca en 80 zonas censales. ([Anexo 1](#)).

Puesto que la morfología urbana de Cuenca hace que los techos presenten diferentes pendientes y orientaciones, en este trabajo se ha delimitado la zona de estudio para el Centro Histórico de la Ciudad. Esta área comprende $2,58 \text{ km}^2$ (ver Tabla 6) que corresponden a las 10 zonas censales, tal como se observa en la [Anexo 2](#). Se empleó el

levantamiento realizado por Urgilés et al. (Urgilés Ortiz & Yáñez Iñiguez, 2018) que corresponde al 20% de las viviendas de cada zona censal.

Con el comando Calculate Geometry de la Tabla de atributos de ArcGIS, en las 10 zonas escogidas, se establece que el área de planta baja de las viviendas representa un 0,621 km², ver detalle en [Anexo 3](#).

Tabla 6. Zonas censales escogidas para el área de estudio.

Elaboración propia.

N°	Zona	Área (km²)
1	10	0,113
2	11	0,261
3	12	0,169
4	13	0,188
5	49	0,374
6	50	0,288
7	51	0,373
8	54	0,140
9	62	0,366
10	71	0,309
Total		2,58

En la investigación de la Universidad de Cuenca (Urgilés Ortiz & Yáñez Iñiguez, 2018), se evaluó en cada una de las zonas censales alrededor del 20% de la superficie, para determinar el área de los techos. Con esta aproximación, dada la homogeneidad de la zona, se puede estimar el área total de techos de las 10 zonas censales. En el [Anexo 4](#)

se muestra que el área del techo en el área de investigación, da un valor de 0,288 km² (20% de representatividad), el cual se calcula dividiendo el área para el área total de cada zona censal.

Para obtener el área de cubierta del Centro Histórico de la ciudad de Cuenca con representatividad del 100%, se aplica la fórmula (Urgilés Ortiz & Yáñez Iñiguez, 2018):

$$\text{Área total de techos por zona censal} = \frac{\text{área de techos estimada}}{\% \text{ de representatividad}} * 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

Esto permite estimar un área de 1,55 km², que corresponde al total de los techos de las viviendas de las 10 zonas censales escogidas, como se presenta en la Tabla 7 (Urgilés Ortiz & Yáñez Iñiguez, 2018).

Tabla 7. Cálculo de área disponible de techos.

Elaboración propia.

ZONA	AREA TOTAL DE LA ZONA (m2)	HABITANTES	AREA DE MUESTRA (m2)	% DE REPRESENTATIVIDAD	AREA MAPEADA PAR (m2)	AREA MAPEADA IMPAR (m2)	AREA MAPEADA (20%) (m2)	AREA EQUIVALENTE AL 100% (m2)	AREA EQUIVALENTE AL 100% (Km2)
ZONA 10	566.187,04	3.199	156.238,00	27,59%	17514,12		17.514,12	63.469,00	0,063
ZONA 11	499.265,54	5.759	123.017,99	24,64%		27556,12	27.556,12	111.835,85	0,111
ZONA 12	320.777,69	4.355	65.715,95	20,49%	23359,15		23.359,15	114.022,47	0,114
ZONA 13	196.577,23	3.612	47.651,36	24,24%		19203,56	19.203,56	79.220,88	0,079
ZONA 49	373.887,19	3.412	88.213,86	23,59%		42346,49	42.346,49	179.482,09	0,179
ZONA 50	314.167,46	4.474	65.211,17	20,76%	45881,55		45.881,55	221.043,25	0,221
ZONA 51	372.792,02	4.618	84.050,63	22,55%		37508,43	37.508,43	166.362,16	0,17
ZONA 54	657.363,28	5.820	139.800,98	21,27%	206,51		51.826,70	243.696,23	0,24
ZONA 62	571.669,99	4.687	107.917,15	18,88%	41868,68		41.868,69	221.791,18	0,22
ZONA 71	308.752,40	3.019	69.001,32	22,35%		34067,83	34.067,83	152.439,47	0,15
TOTAL	4.181.439,85	42.955	946.818,42	2,26%	128.830,01	160.682,43	341.132,65	1.553.362,58	1,55

No todos los techos de las casas del Centro Histórico pueden cubrirse con paneles fotovoltaicos, ya que las construcciones que reducen el área de instalación, también se ven influenciados por la sombra de las infraestructuras circundantes.

Existen varios tipos de panel fotovoltaico adecuadas para la instalación en casas, incluido silicio monocristalino o policristalino, lamina delgada de silicio amorfo, por lo que resulta difícil definir un valor representativo de la eficiencia de conversión eléctrica.

3.2 Estimación de la energía solar aprovechable

Para estimar la cantidad de H₂ de origen solar fotovoltaico, es necesario obtener los valores de irradiación solar en la ciudad de Cuenca, que se obtienen de la base de datos PVGIS. Debido a la situación geográfica del Ecuador, el recurso solar es casi constante a lo largo del año (Revelo Vaca et al., 2019).

Para evaluar el potencial solar urbano en Cuenca, se examina la exposición potencial del techo en una latitud cercana al Ecuador. Teóricamente, la irradiación se maximiza por la orientación de los módulos fotovoltaicos hacia el norte, es una pequeña inclinación de la superficie del colector pueden fluctúan entre un 3 y 4 % con diferentes orientaciones hasta 10% de la inclinación (A. Barragán Escandón et al., 2019). Debido a la luz solar directa y la luz solar directa y la baja nubosidad en las horas de la mañana, según estudios realizados, la ubicación optima es el este. (A. Barragán Escandón et al., 2019).

3.3 Potencial Técnico

El potencial técnico solar anual se puede calcular utilizando la ecuación (A. Barragán Escandón et al., 2019):

$$P = A_{FV} \times I \times Fr \times \eta_r \quad \textbf{Ecuación 2}$$

Donde

P es el potencial técnico en kWh/año.

A_{FV} es el área disponible para la instalación en los techos en m².

I es la irradiancia global media anual en kWh/m².

Fr es la corrección por disponibilidad arquitectónica.

η_r es la conversión fotovoltaica para la eficiencia tecnológica.

La irradiación media anual igual a 1528,51 kWh/m², según el estudio (Schallenberg-Rodríguez, 2013)..

Los factores de reducción (Fr) corresponden a restricciones en la ubicación de la energía FV en función de la disponibilidad arquitectónica o los recursos solares. Además, se incluyen los factores de reducción (η_r), que incluyen la eficiencia fotovoltaica del sistema, inversores, condiciones ambientales y de suciedad, que pueden afectar la temperatura de las celdas y su eficiencia. Se aplica un conjunto de factores de reducción para establecer FR, de acuerdo con la siguiente ecuación (A. Barragán Escandón et al., 2019):

$$F_r = C_{con} \times C_{prot} \times C_{so} \times C_{or} \times C_{in} \times C_{SM} \times C_{FV} \times C_{ST} \quad \textbf{Ecuación 3}$$

Donde:

C_{con} representa las restricciones de construcción. Los diferentes estudios muestran valores diferentes según el tipo de edificación, pendiente y otras condiciones. Según Romero y otros (Romero Rodríguez et al., 2017), los límites de construcción son 0,8 para cubiertas planos y 0,9 para cubiertas inclinados. Considerando que el área de

estudio se caracteriza por techos inclinados, asumimos $C_{con} = 0,9$ (Schallenberg-Rodríguez, 2013).

C_{prot} representa las limitaciones de edificios históricos. Esto se puede aplicar a edificaciones donde no es posible construir estructuras, debido a consideraciones históricas (Romero Rodríguez et al., 2017). El área de estudio se caracteriza por ser un área histórica, por lo que esta condición sería una limitación para el posicionamiento de los sistemas fotovoltaicos. Como el área de estudio se caracteriza por ser un área patrimonial, existirían restricciones para colocar este tipo de sistemas de generación ya que modificarían la arquitectura. Sin embargo, para los propósitos de esta investigación se asume que todos los edificios son factibles de incorporar estos sistemas, por lo que $C_{prot} = 1$.

C_{so} representa las restricciones debidas a las sombras. Esto depende de la densidad urbana y del tipo de edificación del área de estudio. Según Romero y otros (Romero Rodríguez et al., 2017), asume $C_{so} = 0,8$ para cubiertas inclinadas y $C_{so} = 0,7$ para cubiertas planas. Para el área de estudio se asume $C_{so} = 0,8$ considerando que los techos son inclinados (Romero Rodríguez et al., 2017).

C_{or} representa las restricciones debidas a la orientación. Para este caso se considera $C_{or} = 0,96$ ya que existe una variación de 3-4% bajo las diferencias de orientación de los paneles en base a la irradiación media anual igual a $1528,51 \text{ kWh/m}^2$ (Schallenberg-Rodríguez, 2013).

C_{in} representa las restricciones debido a la inclinación. Existe una variación de hasta un 10% entre los valores irradiación mínimo y máximo porque se utiliza el valor de $C_{in} = 0,9$ (Schallenberg-Rodríguez, 2013).

C_{SM} representa el espacio libre para las rutas de separación y mantenimiento de PV en terrazas. Existen diferentes coeficientes para diferentes ángulos para determinar el área de acceso y mantenimiento. Dado los techos se consideran inclinados, no se asumen áreas de mantenimiento o acceso por este motivo $C_{SM} = 1$ (A. Barragán Escandón et al., 2019).

C_{FV} representa la disponibilidad para el posicionamiento PV. No hay restricciones significativas para la ubicación de PV, por lo que se considera que $C_{FV} = 1$ (E. A. Barragán Escandón, 2018).

C_{ST} representa la disponibilidad para el posicionamiento de colectores solares. No se considera la instalación de paneles solares térmicos, lo que da un valor de $C_{ST} = 1$.

La Tabla 8 presenta un resumen de los factores de reducción utilizados para calcular el área del techo disponible.

Tabla 8. Los factores de utilización utilizados para el cálculo de la superficie del techo disponible.

Elaboración propia.

Factores de reducción	Valor	Fuente
C_{con}	0,90	(Zalamea-Leon et al., 2018)
C_{prot}	1	(Khan & Arsalan, 2016)
C_{so}	0,8	(Romero Rodríguez et al., 2017)
C_{or}	0,96	(Schallenberg-Rodríguez, 2013)
C_{in}	0,9	(Schallenberg-Rodríguez, 2013)
C_{SM}	1	(Byrne et al., 2015),(Luque & Hegedus, 2005)
C_{FV}	1	(E. A. Barragán Escandón, 2018)
C_{ST}	1	
F_R	0,62	Ecuación 3

Se registraron los factores de reducción del potencial técnico, factores que intervienen en la conversión de la irradiación en electricidad fotovoltaica, y se calculó la reducción mediante la siguiente fórmula:

$$\eta_r = \eta_{ef} \times PR \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

η_r es el factor de reducción del potencial solar.

PR es el factor de rendimiento de las instalaciones, considera pérdidas por suciedad, cableado, dispersión, reflectancia, sombras, transformadores, orientación e inclinación, por falta de disponibilidad. En la Tabla 9, se establece que un $PR = 0,76$.

η_{ef} es la eficiencia fotovoltaica. Según (Tritec Intervento, 2019), esto da un resultado de una eficiencia del 19% para los módulos monocristalinos, lo que nos da un $\eta_{ef} = 0,19$.

Por lo que $\eta_r = 0,14$, para poder calcular el potencial técnico del área de estudio de la ciudad de Cuenca.

Tabla 9. Valores típicos y utilizados de pérdidas de los paneles.

Elaboración Propia. Fuente:(Segui Chilet, 2019).

Valores típicos	Pérdidas por suciedad	Pérdidas del inversor	Pérdidas disparidad	Pérdidas por cableado	Pérdidas reflect. + transmit.	Pérdidas de transformadores	Pérdidas disponibilidad	Tolerancia de potencia de paneles
Pérdidas (%)	0-8%	3-10%	2-5%	1-2%	2-6%	1-5%	1-5%	±2-±10%

Valores utilizados	Pérdidas por inclinación y orientación	Pérdidas por sombras	Pérdidas por suciedad	Pérdidas disparidad	Pérdidas por cableado	Pérdidas reflect. + transmit.	Pérdidas del inversor	Pérdidas de transformadores	Pérdidas disponibilidad	Tolerancia de potencia de paneles
Pérdidas (%)	4%	0%	3%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	8%
PR	0,96	1,00	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,92

PR	0,76
-----------	-------------

La energía que generan los paneles FV en el área de estudio es:

$$P = A_{FV} \times I \times Fr \times \eta_r \quad \text{Ecuación 5}$$

$$P = 1.553.362,58 \text{ m}^2 \times 1528,51 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \times 0,62 \times 0,14$$

$$P = 212.974.794,51 \text{ kWh} = 212,97 \text{ GWh}$$

En 2020, la energía eléctrica consumida en las zonas censales del área de estudio, Centro Histórico de la ciudad de Cuenca fue de 38.366.701,47 kWh, datos proporcionados por la CENTROSUR (Centrosur, 2020), como se observa en la Tabla 10.

Tabla 10. Consumo de energía en el área de estudio.

Fuente: (Centrosur, 2020).

Zona Censal	Consumo kWh 2020
10	1.079.769,84
11	3.039.689,50
12	1.560.888,92
13	2.147.794,20
49	7.884.476,11
50	5.223.639,71
51	7.188.487,88
54	2.092.025,86
62	3.800.586,79
71	4.349.342,66
TOTAL	38.366.701,47

Los excedentes se calculan mediante la siguiente fórmula:

$$E_{PV} = P - \text{Consumo de Energía Total} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$E_{PV} = 212.974.794,51 \text{ kWh} - 38.366.701,47 \text{ kWh}$$

$$E_{PV} = 174.608.095,04 \text{ kWh} = 174,61 \text{ GWh}$$

Se estima que el potencial técnico de la energía solar fotovoltaica es de 5,5 veces la energía eléctrica consumida en el año 2020.

3.4 Producción de H₂ FV

Tan pronto como se conoce la disponibilidad de energía eléctrica, se define la producción de H₂, por electrólisis. En la Tabla 11 se puede ver las características un electrolizador PEM, con una eficiencia, η_e , del 75 %, y con un calorífico superior del H₂ de 141,86 MJ/kg (39,406 kWh/kg) (F. Posso & Zambrano, 2014), que incluye los sistemas de admisión y purificación de los gases, sistemas de control y equipos auxiliares.

Finalmente, se asume una disponibilidad del sistema de electrólisis, FD, del 95%.

La ecuación para determinar la cantidad de H₂ es así:

$$P_{H_2} = \frac{(E_{PV} * \eta_e * F_D)}{HHV} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$P_{H_2} = \frac{(174.608.095,04 \text{ kWh} * 0,75 * 0,95)}{39,406 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}}$$

$$P_{H_2} = 3.157.125,08 \frac{\text{kg H}_2}{\text{año}}$$

El hidrógeno fotovoltaico producido es de 3.157.125,08 kg. Como se puede observar en la Tabla 11, donde se detallan los datos de producción de H₂ en la ciudad de Cuenca.

Tabla 11. Producción de H₂ en el Ciudad de Cuenca en el año 2015.

Elaboración Propia.

PRODUCCION DE H₂ FV		
Excedente	174.608.095,04	kWh
η_e	0,75	%
F_D	0,95	%
HHV SUP	39,406	kWh/kg
P H₂	3.157.125,08	kg

3.5 RESULTADOS

3.5.1 Usos finales de H₂

Se plantea el uso del H₂ en el sector del transporte con la aplicación de pilas de combustible (Fausto Posso et al., 2015). En el transporte el hidrógeno puede ser empleado en forma directa como combustible o puede servir para producir electricidad a través de las pilas de combustible. Así mismo, para comparar las posibilidades de la energía disponible se analiza como la producción de electricidad a partir de los sistemas fotovoltaicos puede ser utilizada en electromovilidad (Ver Ilustración 15).

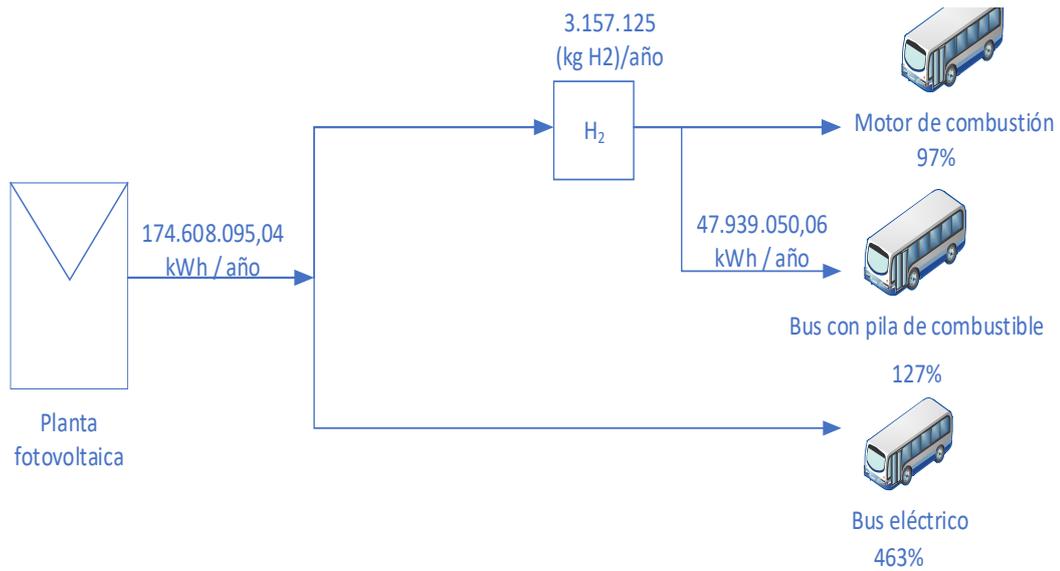


Ilustración 15. Casos de análisis.

Elaboración propia.

3.5.1.1 Buses de hidrógeno

Los vehículos grandes obtienen un mayor rendimiento por su movilidad constante y no desperdician energía presurizando hidrógeno mientras el vehículo está parado. También, permite almacenar grandes cantidades de hidrógeno, lo que es positivo debido a la baja densidad del hidrógeno. Se estima que el consumo de los autobuses es de 10 kg H₂/100 km (Fausto Posso et al., 2015).

Para realizar el análisis de consumo de energía del transporte público en la ciudad de Cuenca. Se considera que la distancia media recorrida por un autobús a diésel es de 68.654 km/año (188,09 km/día) (Tabla 12) (E. A. Barragán Escandón, 2018).

Tabla 12. Datos autobuses a diésel.

Fuente: (Fausto Posso et al., 2015). Elaboración propia.

BUSES DIESEL		
Recorrido diario	188,09	km/día* unidad
Recorrido anual	68.654	km/año* unidad
Buses	475	unidades
Recorrido total de todos los buses	32.610.650	km/año

Para el análisis del uso final del H₂, se plantea reemplazar el diésel que se usa actualmente en autobuses de combustión interna por autobuses a base H₂. La cantidad de H₂ para abastecer a los autobuses viene del excedente de energía solar fotovoltaica instalada en los techos de las casas del Centro Histórico de la ciudad.

La flota vehicular recorre alrededor de 32.610.650 km/año, conociendo el rendimiento de los autobuses de H₂, como 0,1 kg/ km (Fausto Posso et al., 2015), es necesario 3.261.065 kg H₂/año.

Como se estableció previamente el H₂ obtenido de energía FV en el área de estudio es 3.157.125 kg/ año. De esta manera se establece que la cantidad de hidrógeno disponible cubre el 97% de la demanda que requeriría una flota vehicular que emplea H₂, para cubrir el mismo recorrido anual (Ver Tabla 13).

Tabla 13. Datos consumo buses a base de hidrógeno y porcentaje de sustitución.

Elaboración propia.

BUSES HIDRÓGENO		
Consumo buses H₂	0,1	kg /km
H₂ necesario	2.934.959	kg/año
Producción de H₂	3.157.125	kg/año
Porcentaje de sustitución	97	%

3.5.1.2 Pilas de combustible

La mayoría de empresas fabricantes de vehículos, poseen un prototipo funcionando con hidrógeno y desarrollan varias investigaciones en sistemas de almacenamiento, estaciones de servicio o métodos para integrar baterías con pilas de combustible. Las pilas de combustible se identifican por tener “emisión cero”, emitiendo solo vapor de agua y una reducción significativa de contaminación acústica (Rosa Iglesias, 2010).

Las pilas de combustible tipo PEM (Polymer Electrolyte Membrane o membrana de intercambio protónico) consisten en una membrana polimérica que separa las partes del ánodo y el cátodo de una celda. El combustible se introduce a través del ánodo por los canales mecanizados en la placa bipolar, que son guiados por una capa de difusión de material carbonoso hasta la capa catalítica, donde tiene lugar la reacción de oxidación del hidrógeno. La capa difusora debe estar constituida por un material muy poroso para facilitar la difusión del hidrógeno con el fin de lograr una mayor eficiencia de las partículas del catalizador (Barreras & Lozano, 2012).

Las pilas de combustible PEM tienen las siguientes características que se observan en la Tabla 14.

Tabla 14. Características pila de combustible tipo PEM.

Elaboración Propia.

TIPO DE PILA	PEM	Fuente
Rango de Temperatura	50-90°C	(<i>Celdas de Combustible y Generacion Distribuida</i> , 2018)
Electrolito	Membrana polimérica	(<i>Celdas de Combustible y Generacion Distribuida</i> , 2018)
Estado Electrolito	Sólido, que reduce la corrosion y problemas de gestión de electrolitos.	(Narváez, 2021)
Potencia	100 W – 10 MW	(<i>Celdas de Combustible y Generacion Distribuida</i> , 2018)
Combustible	H ₂	(Narváez, 2021)
Oxidante	O ₂	(Narváez, 2021)
Catalizador	Platino	(Narváez, 2021)
Eficiencia	37%-40%. Para temas de cálculos de utiliza un valor promedio igual a 38,5%	(Narváez, 2021).
Costo de inversion	3000-4000 (USD/kWw)	(<i>Celdas de Combustible y Generacion Distribuida</i> , 2018)
Voltaje de la celda	0,7-1,1 V	(Mekhilef et al., 2012)
Aplicación	Vehículos, Transporte espacial. Da un arranque rápido de los vehiculos.	(<i>Celdas de Combustible y Generacion Distribuida</i> , 2018)

Al generar electricidad a partir de hidrógeno, la reacción inversa se produce de la misma forma que al generarlo. Eso significa que reacciona con el oxígeno y genera electricidad y agua. De esta forma, se puede decir que al generar electricidad con las pilas de combustible a partir de hidrógeno es 100% limpia, ya que se produce agua potable como subproducto (Orera, 2007).

Para el análisis del uso final del H₂, se plantea reemplazar el diésel que se usa actualmente en autobuses de combustión interna por autobuses a base H₂ a ser impulsados por pilas de combustible. La cantidad de H₂ para abastecer los autobuses con pilas de combustible, proviene de los excedentes generados de la energía solar fotovoltaica instalada en los techos de los domicilios del Centro Histórico de la ciudad.

El valor energético del hidrógeno es $E_{H_2-SPEC} = 39,44 \frac{kWh}{kg}$ (Lokar & Virtič, 2020), la eficiencia de conversión química es de 37 % a 40% de potencia nominal máxima. Para los cálculos se empleará una eficiencia promedio $\eta_{fc} = 38,5\%$ (Fletcher & Ebrahimi, 2020). De esta manera la cantidad de energía a partir del hidrógeno disponible está dada por:

$$Energia\ total_{PEM} = P_{H_2} * E_{H_2-SPEC} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$Energia\ total_{PEM} = 3.157.125,08 \frac{kg\ H_2}{año} * 39,44 \frac{kWh}{kg\ H_2}$$

$$Energia\ total_{PEM} = 124.517.013,16 \frac{kWh}{año}$$

Luego la energía eléctrica disponible con las pilas de combustible será:

$$Energia\ eléctrica\ disponible = Energia\ total_{PEM} * \eta_{fc} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$Energia\ eléctrica\ disponible = 48.124.041,16 \frac{kWh}{año} * 0,385$$

$$\text{Energía eléctrica disponible} = 47.939.050,06 \text{ kWh}$$

Si se considera que la cantidad de energía requerida para movilizar un bus eléctrico está entre 0,81 km/kWh (Barragán-Escandón et al., 2020) o 0,93 km/kWh (L.A. Paredes, 2019) (el promedio 0,865 km/kWh), la distancia a recorrer se puede estimar con la cantidad de energía disponible:

$$\text{Distancia} = \text{Energía eléctrica disponible} * \text{Rendimiento autobus}$$

Ecuación 10

$$\text{Distancia} = 47.939.050,06 \text{ kWh} * 0,865 \frac{\text{km}}{\text{kWh}}$$

$$\text{Distancia} = 38.830.630,55 \text{ km}$$

Puesto que la flota vehicular recorre alrededor de 32.610.650 km/año, la energía disponible podría cubrir el 127 % del recorrido de la flota vehicular (ver Tabla 15).

Tabla 15. Datos de Uso de Pilas de Combustible durante el año.

Elaboración propia.

USO DE PILAS DE COMBUSTIBLE DURANTE EL AÑO		
Total de H₂	3.157.125,08	kg/año
Energía hidrógeno	39,44	kWh/kg
Total de energía disponible	124.517.013,14	kWh/kg
Rendimiento celda de combustible	0,39	%
Energía eléctrica disponible para vehículo	47.939.050,06	kWh
Rendimiento de un autobús	0,865	km/kWh
Total de km con energía disponible	38.830.630,55	km
Total km demandados	41.467.278,30	km
Porcentaje de sustitución	127	%

3.5.1.3 Uso directo energía eléctrica

De los excedentes generados en los techos del Centro Histórico de Cuenca, se puede obtener alrededor de 174.608.095,04 kWh (174,61 GWh) y conociendo que el rendimiento de los autobuses eléctricos es de 0,865 km/kWh (Barragán-Escandón et al., 2020; L.A. Paredes, 2019), la distancia total de energía disponible puede estimarse a partir de :

$$\text{Distancia} = \text{Energía FV disponible} * \text{Rendimiento autobus} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\text{Distancia} = 174.608.095,04 \text{ kWh} * 0,865 \frac{\text{km}}{\text{kWh}}$$

$$\text{Distancia} = 151.036.002,21 \text{ km}$$

Considerando la distancia total demandada 32.610.650,00 km, se establece que se puede cubrir el 463% del recorrido de la flota vehicular (ver Tabla 16).

Tabla 16. Uso directo de la energía eléctrica.

Elaboración propia.

USO DIRECTO DE LA ENERGÍA ELECTRICA		
Total de energía disponible FV	174,61	GWh
	174608095,04	kWh
Requerimiento de un autobús	0,865	km/kWh
Total de km con energía disponible	151.036.002,21	km
Total km demandados	32.610.650,00	km
Porcentaje de sustitución	463	%

3.6 Implicaciones

3.6.1 Implicaciones ambientales

El análisis ambiental se centra en cuantificar las emisiones de CO₂ evitadas, al cambiar la tecnología empleada para la transportación pública.

Ecuador se encuentra en el puesto 97 de 242 países en las estadísticas de emisiones anuales per cápita con una cantidad de 2,5 t CO₂/persona (Banco Mundial, 2020). El sector del transporte es una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero en Cuenca. En 2014, las emisiones totales de CO₂ alcanzaron a 1372.434t/año de las cuales 801.285,9 t/año que equivalen al 58,4% del sector transporte, las emisiones de los buses a diésel fue 5,6 % de las emisiones del sector transporte (Parra, 2016).

Para estimar el impacto ambiental positivo del uso del H₂ para uso en la flota vehicular en Cuenca, se establece el volumen total de diésel consumido considerando la distancia recorrida en el año. Bajo estas consideraciones, se tomó el valor de 0,175 lt/km. Con estos valores es posible determinar la cantidad de CO₂ que genera el consumo de diésel en los buses de la ciudad de Cuenca, durante todo el año los buses recorren 32.610.650 km en promedio (Barragán-Escandón et al., 2020). Lo que resulta que se consume 5.710.124,82 lt/año.

Para calcular la cantidad de CO₂ emitido se tiene la relación que 1 lt de diésel genera 2,65 kg de CO₂ (Roncero, 2009), por lo que para los 5.710.124,82 lt/año se genera 15.121.830,76 kg de CO₂. También se reduciría las emisiones de otros contaminantes como los óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂) y material particulado. Si se toma como referencia los estándares de emisión de los EURO V que circulan en la ciudad de Cuenca, en la Tabla 17 indican las emisiones evitadas al año.

Tabla 17. Emisiones autobuses EURO V.

Fuente: (Ortiz Vallejo, 2014). Elaboración propia.

Tipo	Emisiones	Datos (g/km)	Recorrido de los autobuses (km)	Total de emisiones (kg)
Euro V	NO x	0,00018	32.610.650	5.869,92
	HC + NO x	0,00023		7.500,45
	CO	0,0005		16.305,33
	PM	0,000005		163,05

Un ámbito negativo de uso de esta tecnología es el requerimiento del agua que se necesita para su producción, pero no se considera un problema que afecte el déficit hídrico de un país. Para producir 1 kg de hidrógeno es necesario alrededor de 10-12 litros de agua (Gómez, 2021). Si se toma como valor referencia 11 lt/kg de H₂, en base a la demanda de kg de hidrógeno de la flota de autobuses, 3.261.065 kg/año, se necesita 35.871.715 lt/año de agua.

3.6.2 Implicaciones económicas

Para un análisis económico se considerará el total de la potencia del sistema, considerando la energía que se produce (212.974.794,51 kWh), aplicando la siguiente fórmula:

$$E = P \times FP \times H$$

Ecuación 12

Donde:

E : Energía (kWh)

P : Potencia (kW)

FP : Factor de planta del sistema

H : horas del año (8760 h)

Para el factor de planta del sistema se considera entre 15-20%, para temas de cálculos de utiliza un valor promedio igual a 17,5%.

$$P = \frac{E}{FP \times H}$$

$$P = \frac{212.974.794,51 \text{ kWh}}{0,175 \times 8760}$$

$$P = 138.926,81 \text{ kW}$$

El costo de la implementación del sistema fotovoltaico 1,69 \$/W (Muñoz et al., 2018), potencial multiplicar por la potencia estimada (138.926.807,90 W), el costo total de implementación sería de \$ 234.768.305,35.

El costo de producción de H₂ es 1,77 \$/kg (Fausto Posso et al., 2015) considerando costo de electricidad, agua, insumos, electrizador, inversión anual y operación y mantenimiento. Considerando la demanda de hidrógeno de la flota de autobuses, 3.157.125,08 kg, el costo total de implementación para producir hidrógeno sería \$ 5.588.111,39.

También, si se considera que en cada unidad de autobús de H₂ cuesta \$1.500.000, para sustituir el 100% de la flota de autobuses (475 unidades) se necesita \$712.500.000.

La inversión inicial es alta, lo que indica posibles desventajas para la implementación de este sistema.

3.6.3 Implicaciones sociales

Dentro de las ventajas de vehículos de hidrógeno sea de uso directo o a través de pilas, se puede decir que (Plaza, 2021):

- No generan contaminación ambiental, como ya se mencionó antes, estos vehículos solo liberan vapor de agua.
- Es necesario entre 3 a 5 minutos para repostar los vehículos de hidrógeno, un tiempo similar a los vehículos a diésel y para los vehículos eléctricos es necesario 30 min para un repostaje total.
- En comparación con los vehículos de combustión interna, para el mantenimiento de los vehículos de hidrógeno es mínimo y simple, ya que el hidrógeno es limpio en términos de producción y uso.
- Los vehículos de hidrógeno son silenciosos y cero contaminaciones. Los vehículos de hidrógeno tienen un aspecto muy importante: autonomía, los vehículos eléctricos viajan un promedio de 300 km con una carga, pero los vehículos de hidrógeno podrían hacer el doble.

Dentro de las desventajas de vehículos de hidrógeno se puede decir que (CNAE, 2010):

- La red de estaciones de servicio de hidrógeno es insignificante. Actualmente solo hay seis disponibles en Europa.

- En la actualidad no hay una variedad de modelos de vehículos de hidrógeno, porque los fabricantes no se intentan producir más modelos, por la falta de hidrogeneras y los costes elevados.
- Los vehículos de pila de combustible, debido a sus componentes, como los tanques de hidrógeno, llevan a las empresas a fabricar modelos bastante grandes.

Los buses de transporte público con celdas de combustible de hidrógeno son una gran oportunidad para implementar la tecnología Full Cell Electric Vehicle (FCEV), ya que son vehículos pesados, que recorren a diario largas distancias y tiene una demanda operacional alta. A continuación, en la Tabla 18 se presenta algunos proyectos implementados a nivel mundial.

Tabla 18. Proyectos de buses con celda de combustible de hidrógeno.

Elaboración Propia.

Proyecto	Características		Fuente
<p>Fuel Cell Buses De Alameda Contra Costa Transit District, California, EE. UU</p>	<p>Se implementó en 2006 con 3 buses, en el 2010 aumento a 12 buses del fabricante VanHool, lo más actual en 2019 operan con 24 buses.</p> <p>El AC Transit es el tercer sistema de buses públicos más grandes de California.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Celda de combustible de 120 kW. - Autonomía de 350-390 km por carga completa de combustible. - Longitud de 12 m. - Capacidad de almacenamiento de 40 kg H₂. - Tiempo de carga de 7 min aprox. 	<p>(Chandler & Eudy, 2007)</p>
<p>Fuel Cell Buses De Fébus Del Brt, Pau, Francia</p>	<p>Primer bus de tránsito rápido en el mundo impulsado por hidrógeno.</p> <p>Empezó en 2019 con una flota de 8 buses.</p> <p>Fébus consta de 14 estaciones en el centro de Pau con un recorrido de 6 km y está a cargo de la operadora SPL STAP de Pau.</p> <p>Las estaciones de recarga de hidrógeno construida por ITM Power, las cuales con capaces de producir entre 174 – 270 kg de H₂</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Buses del fabricante VanHool, modelo Exqui.City FC. - Celda de combustible Ballard FCVelocity-HD de 100 kW. - Autonomía de 300 km por carga completa de combustible. - Longitud de 18 m. 	<p>(SNCF, 2020)</p>

Proyecto	Características		Fuente
	<p>por día, utilizando un electrizador alimentado por energía solar.</p>		
<p>Fuel Cell Buses De Octa, California, EE.UU.</p>	<p>En el 2018, Santa Bárbara, California pidió buses de celda de combustible a hidrógeno a la operadora de transporte público Orange Country Transportation Authority (OCTA). Durante el 2019, realizaron pruebas piloto y test para autorizar el uso de la flota. En 2020, comenzó la operación de los autobuses conjuntamente con la estación de recarga de combustible.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Buses del fabricante New Flyer, modelo Xcelsior Charge H₂. - Capacidad de almacenamiento de 37,5 y 60 kg H₂. - Autonomía de 400 y 500 km por carga completa de combustible. - Longitud de 12 y 18 m. - Tiempo de carga de 6 – 7 min. 	<p>(OCTA, 2019)</p>
<p>Fuel Cell Bus Nyuti En Guanacaste, Costa Rica</p>	<p>En 2019 se estrenaron 3 buses eléctricos donados por Alemania y fundación local de desarrollo sostenible. Desde 2017, Nyuti es un bus eléctrico que circula en Guanacaste, tiene una capacidad de 105 pasajeros, con un alcance de 338 km, utilizando de 38 kg H₂.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Buses de la empresa Ad Astra Rocket Company. - Capacidad de almacenamiento de 38 kg H₂. - Autonomía de 338 km por carga completa de combustible. 	<p>(The Tico Times, 2018)</p>

Un punto importante de esta nueva tecnología es que debe tener compatibilidad con las gasolineras existente como punto de carga sin necesidad de crear estaciones de servicio, así se reduciría la inversión en infraestructura.

Con la creación o implementación de las estaciones de servicio, se pueden incentivar a los usuarios a apostar por los vehículos de pila de combustible, ya que a la larga los precios bajaran para competir con los vehículos tradicionales o eléctricos.

En comparación con los vehículos y los vehículos tradicionales, las Total, grandes ventajas de los vehículos de pilas de combustible son el tiempo de repostaje es corto y el combustible usado que no es ni limitado ni contaminante.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES DEL PROYECTO

4.1 Discusión

La energía solar fotovoltaica puede implantarse en las áreas urbanas, haciendo que se emplee las grandes extensiones de espacios intervenidos. Esto permitiría no solo que las ciudades puedan abastecerse de energía sino evitarían la construcción de nuevas infraestructuras en áreas naturales. Varias investigaciones como sostienen que esta propuesta debe ser analizada y al igual que esta investigación sostienen que el potencial permitiría suplir la demanda energética de las ciudades (ECO-Inteligencia, 2019; Gómez-Navarro et al., 2021; Oh et al., 2020; Roca, 2018) . En algunos casos incluso se establece que puede haber una excedente que podría ser exportado o que debería ser almacenado.

El almacenamiento de la energía no utilizada puede hacerse a través del hidrógeno verde, ya sea con hidroelectricidad (Kothari et al., 2008; F. Posso et al., 2016; Smink, 2021; Stygar & Brylewski, 2013), energía eólica (Ayodele & Munda, 2019; Haghi et al., 2018; Kothari et al., 2008), energía solar térmica (F. Posso et al., 2019; Qureshy & Dincer, 2020; Stygar & Brylewski, 2013) geotermia (Stygar & Brylewski, 2013). Al igual que esta propuesta algunos estudios (Grimm et al., 2020; Ishaq & Dincer, 2021; Kothari et al., 2008; Lokar & Virtič, 2020; F. Posso et al., 2016; Stygar & Brylewski, 2013) se centran en la posibilidad de obtener el H₂, a partir de la energía fotovoltaica.

Un análisis hecho en el área urbana de la ciudad de Cuenca estableció una producción de electricidad 1454,90 GWh, en 16,55 km² de techo(A. Barragán Escandón et al., 2019). En el caso del centro histórico el área disponible es 1,5 km² disponible y se obtiene 213 GWh. Los resultados se pueden considerar cómo comparables y la falta de completa

proporcionalidad puede deberse a los diferentes factores de reducción considerados en cada estudio.

El análisis de la producción del hidrógeno en el Ecuador no es una propuesta nueva (F. Posso et al., 2016, 2019; Smink, 2021) y tampoco lo es los estudios que valoren los usos (ARCONEL, 2019; E. A. Barragán Escandón, 2020) y potencial (Corporación para la Investigación Energetica, 2019; Revelo Vaca et al., 2019) de la energía solar fotovoltaica. Lo novedoso de este trabajo de titulación es que se propone emplear los excedentes de energía eléctrica desde generadores fotovoltaicos incorporados en áreas urbanas para producir hidrógeno.

Para la aplicación del hidrógeno con electrificadores se mencionó 3 tipos, alcalino convencional, PEM y estado sólido, este último se encuentra en investigaciones, mientras que los otros ya se comercializan (Barreras & Lozano, 2012). Una pila de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química en energía eléctrica y, en presencia de un oxidante, produce emisiones libres de contaminación (agua) (Rosa Iglesias, 2010).

En el artículo de Posso y Zambrano (2014), para un área de 65 km², establece una producción de $1,968 \times 10^{10}$ H₂ (kg/año), mientras en este estudio para el 2,3% de esa área se obtuvo un 0,016%. Estos datos indican que la influencia de la radiación disponible afecta la producción en las áreas analizadas. Aunque no es posible hacer una comparación con los resultados obtenidos en este proyecto por la falta de detalles del cálculo, en (Centrosur, 2020) también se estima que el potencial de hidrógeno en la provincia del Azuay es $10,8 \times 10^6$ kg/año (3 veces más de lo establecido en este proyecto).

En el Azuay se hace el análisis del potencial del hidrógeno empleando una metodología similar, pero se considera un área disponible de 221 km² (F. Posso et al.,

2016; Fausto Posso et al., 2016), mientras que el área de este estudio es 1,5 km², por tanto, la producción de hidrógeno es directamente proporcional a los resultados encontrados.

En el artículo de Pelaez y Samaniego (2014), establece la cantidad de hidrógeno para centrales hidroeléctricas con una disponibilidad de energía 293,3 GWh/año, para obtener 5400,8 H₂ T/año. Para esta misma tecnología con 8180 GWh, se consigue 114000 H₂ T/año. Mientras que con esta investigación se consideró 174,61GWh, para obtener 3157,1 H₂ T/año (Fausto Posso et al., 2015). Esto indica que los resultados obtenidos son consecuentes con otras investigaciones.

En el estudio realizado, en la ciudad de Cuenca se analizó tres escenarios de sustitución: 97% el hidrógeno empleándolo directamente en motores de combustión, 127% en pilas de combustible y 463% si aplicamos el uso directo de la energía eléctrica. En los tres casos el potencial de energía considerando solo en el área analizada es alentador. De antemano se supondría que si se emplea toda el área urbana se podría modificar la matriz de energética del transporte haciéndola más sostenible. Sin embargo, los costos y la madurez tecnológica harían inviable un cambio a corto o mediano plazo.

4.2 Conclusiones

A nivel mundial, el consumo de energía ha aumentado debido al incremento poblacional, siendo los combustibles fósiles los que más se utilizan para la producción de energía, lo que genera emisiones contaminantes para el medio ambiente.

Por esto, se esfuerza por desplegar energía limpia e ilimitada procedentes de fuentes renovables, como el hidrógeno, que se puede obtener de la energía solar, eólica, hidráulica. El hidrógeno es un elemento que abunda en la naturaleza, el interés de la investigación está en obtenerlos de la energía solar fotovoltaica.

En Ecuador, los combustibles fósiles tienen una alta demanda de energía, principalmente diésel y gasolina. Con el tiempo, la demanda de energía ha aumentado pero el modelo energético sigue siendo el mismo a nivel de local y nacional.

En la ciudad de Cuenca, los sectores que más energía eléctrica consumen son el industrial y el comercial. En cuanto al sector transporte, la ciudad consume combustibles líquidos, principalmente gasolina y diésel, cubriendo el 90% de sus necesidades energéticas.

El hidrógeno tiene un alto poder calorífico, no es tóxico, el 90% de átomos del universo son de H_2 y no está presente de forma natural en el planeta, por lo que es necesario estudiar los métodos de producción. Por estas razones se ha definido como vector energético.

Para la producción de hidrógeno es posible utilizar energías renovables y no renovables. El hidrógeno verde requiere electricidad y agua renovable, evitando así la contaminación ambiental. También dentro del proceso de recolección para una mayor eficiencia, ya que se utiliza agua de mar cruda para el suministro de electrolitos.

La producción de energías limpias ha crecido exponencialmente y varias ciudades de todo el mundo han iniciado programas para reemplazar los combustibles fósiles por energías renovables. Como cualquier proyecto, tiene ventajas e inconvenientes que pueden superarse con la aceptación pública y enormes beneficios hacia el medio ambiente.

El hidrógeno es un combustible que se puede producir a escala necesaria para su uso en todos los medios de transporte. En un futuro, el H₂ permitirá el uso completo de energía solar, eólica e hidráulica, lo que permitirá la transición a una era post-fósil. En el futuro, el hidrógeno ayudará a reducir la contaminación mediante la aplicación de pilas de combustible en los automóviles, porque su eficiencia es 3 veces mayor que la de los motores de gasolina, lo que puede ahorrar costos a largo plazo.

El suministro de combustibles fósiles y el desinterés por el desarrollo del hidrógeno son las principales razones por las que no se explota el hidrógeno.

Ecuador es un país privilegiado en cuanto a recursos de energía solar debido a su ubicación geográfica. En la ciudad de Cuenca, la radiación solar en promedio es de 1528,51 kWh/m², lo que favorece la explotación de este recurso gracias a su ubicación geográfica. Para aprovechar la radiación solar de la ciudad de Cuenca y producir electricidad, se realizó el estudio en el Centro Histórico con la proyección de instalación de paneles solares en los techos, y se analizó el excedente obtenido de los paneles, que alcanzó a 174,61 GWh.

En la ciudad de Cuenca, el transporte público se enfrenta a grandes desafíos, como el constante crecimiento de la flota vehicular, que provoca atascos y contaminación ambiental. El sistema de transporte consta de 475 buses que circulan en la ciudad que emiten alrededor de 112 ton de CO₂ y queman 11.175 galones de diésel por día.

En cuanto al medio ambiente, el uso del H₂ es factible ya que no genera gases de efecto invernadero y no afecta los factores ambientales (atmósfera, agua, suelo y componente biótico). Esto convierte al hidrógeno en una solución para evitar el agotamiento de los combustibles convencionales y los problemas medioambientales globales.

Grandes empresas como BMW, Ford Motors, Honda, Hyundai han implementado celdas de combustibles a base de hidrógeno en distintos modelos, logrando así una autonomía y velocidades óptimas en beneficio de los usuarios. Las pilas de combustibles combinadas con hidrógeno son importantes para el medio ambiente porque no generan emisiones contaminantes.

El uso del hidrógeno y pilas de combustible como respuesta a sistemas energéticos sostenibles, autosuficientes y respetuosos con el medio ambiente ha proporcionado una nueva aceptación de la acción colectiva en la población gracias al progreso tecnológico.

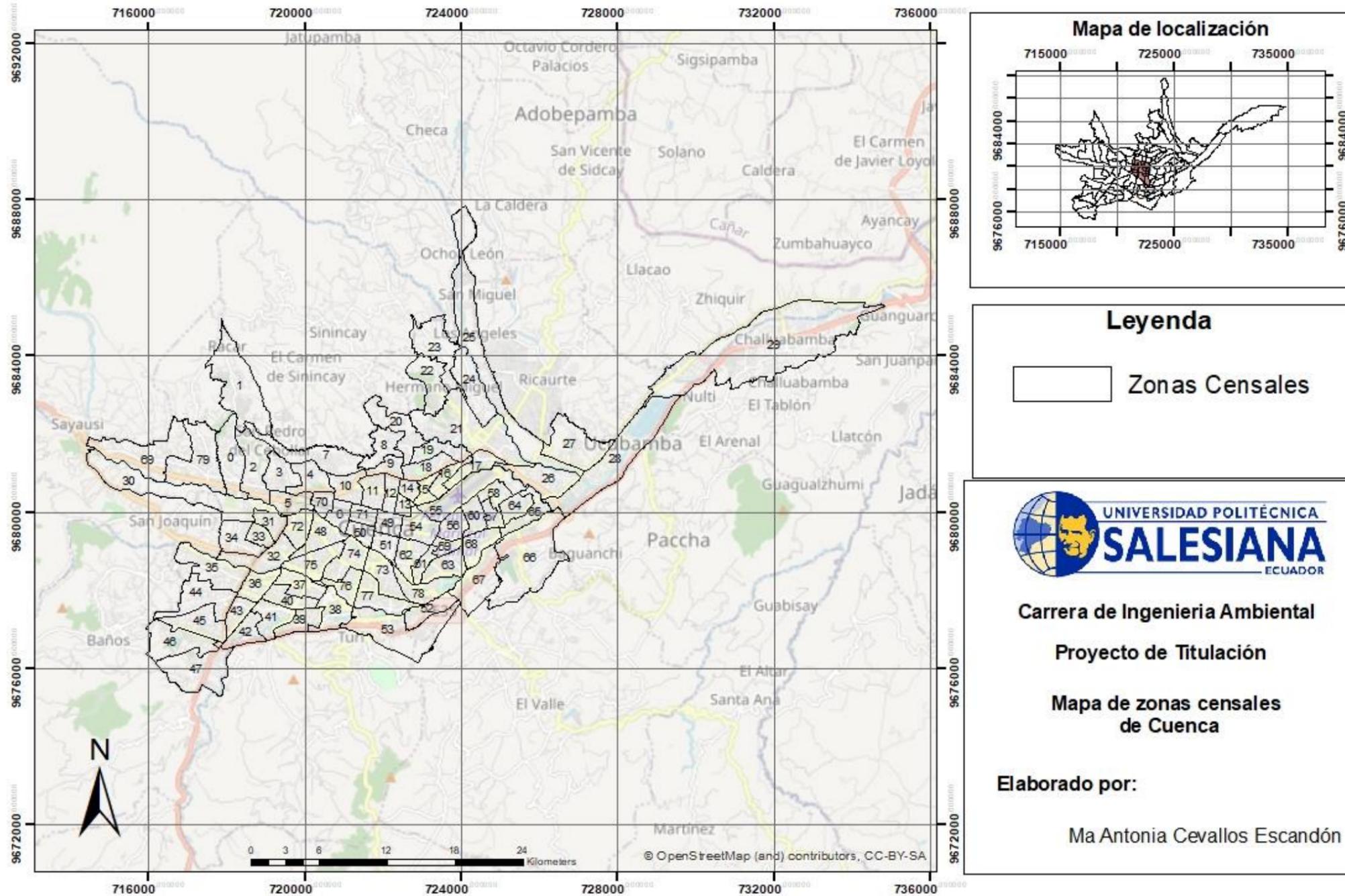
Considerar alternativas como el uso del hidrógeno en el transporte que eliminarían las emisiones contaminantes, equivalentes al 60% (Wenz et al., 2021). De hecho, el uso del diésel o gasolina se eliminará gradualmente en favor de un combustible más amigable con el medio ambiente (Guzman & Spinsanti, 2011). Como aspectos negativos desde un punto de vista ambiental es que se requieren de grandes cantidades de agua para completar el ciclo energético del hidrógeno.

El único límite es el almacenamiento, el hidrógeno es ligero, pero ocupa un gran volumen, por lo que es necesario buscar materiales resistentes para el mismo. Para que en su almacenamiento se pueda aplicar compresión de gas, criocompresión o almacenarlo de forma líquida.

ANEXOS

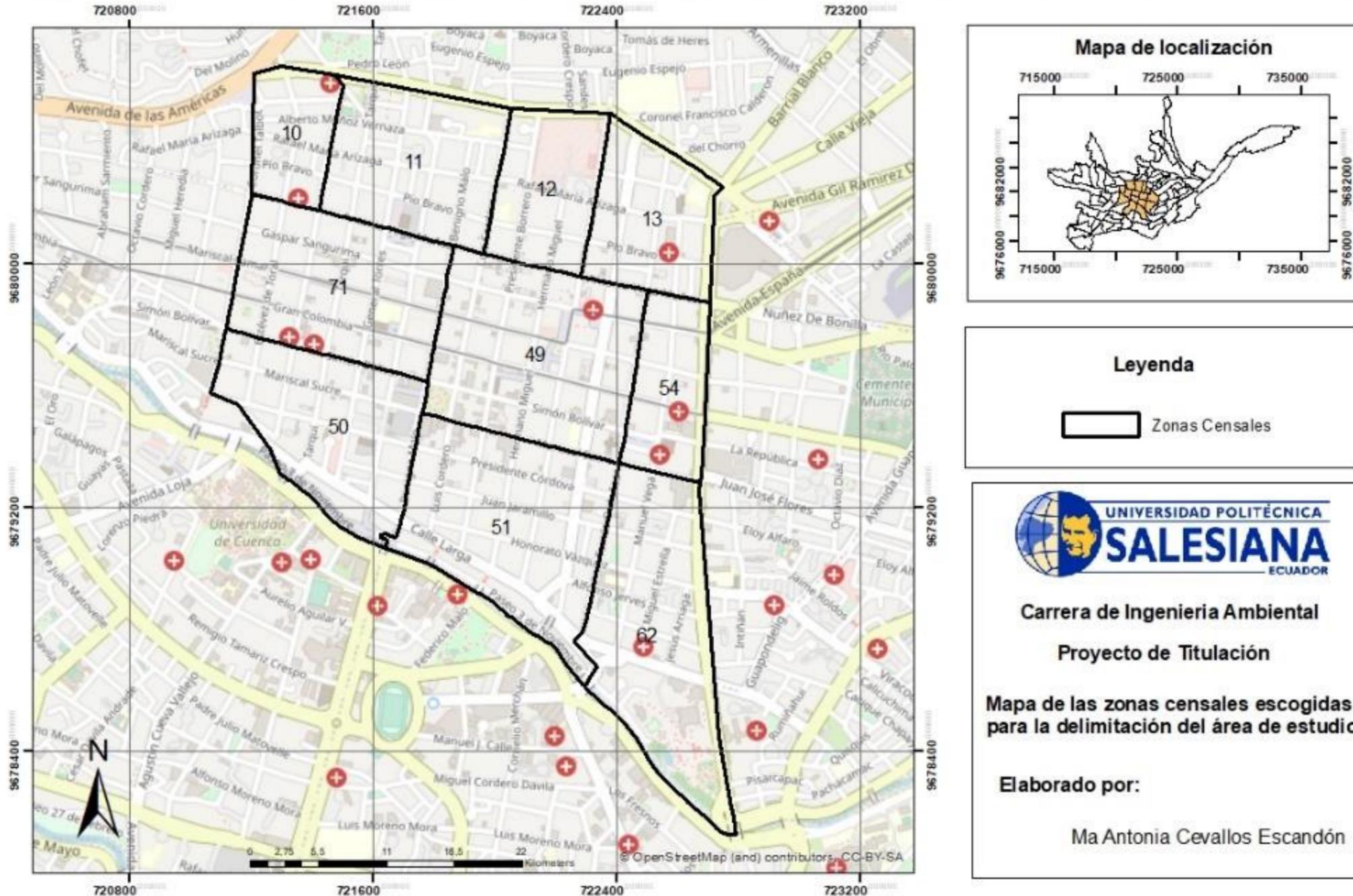
Anexo 1

Mapa de zonas censales de Cuenca



Anexo 1. Las 80 zonas censales de la ciudad de Cuenca.
Fuente: (Urgilés Ortiz & Yáñez Iñiguez, 2018), modificado de INEC, 2010

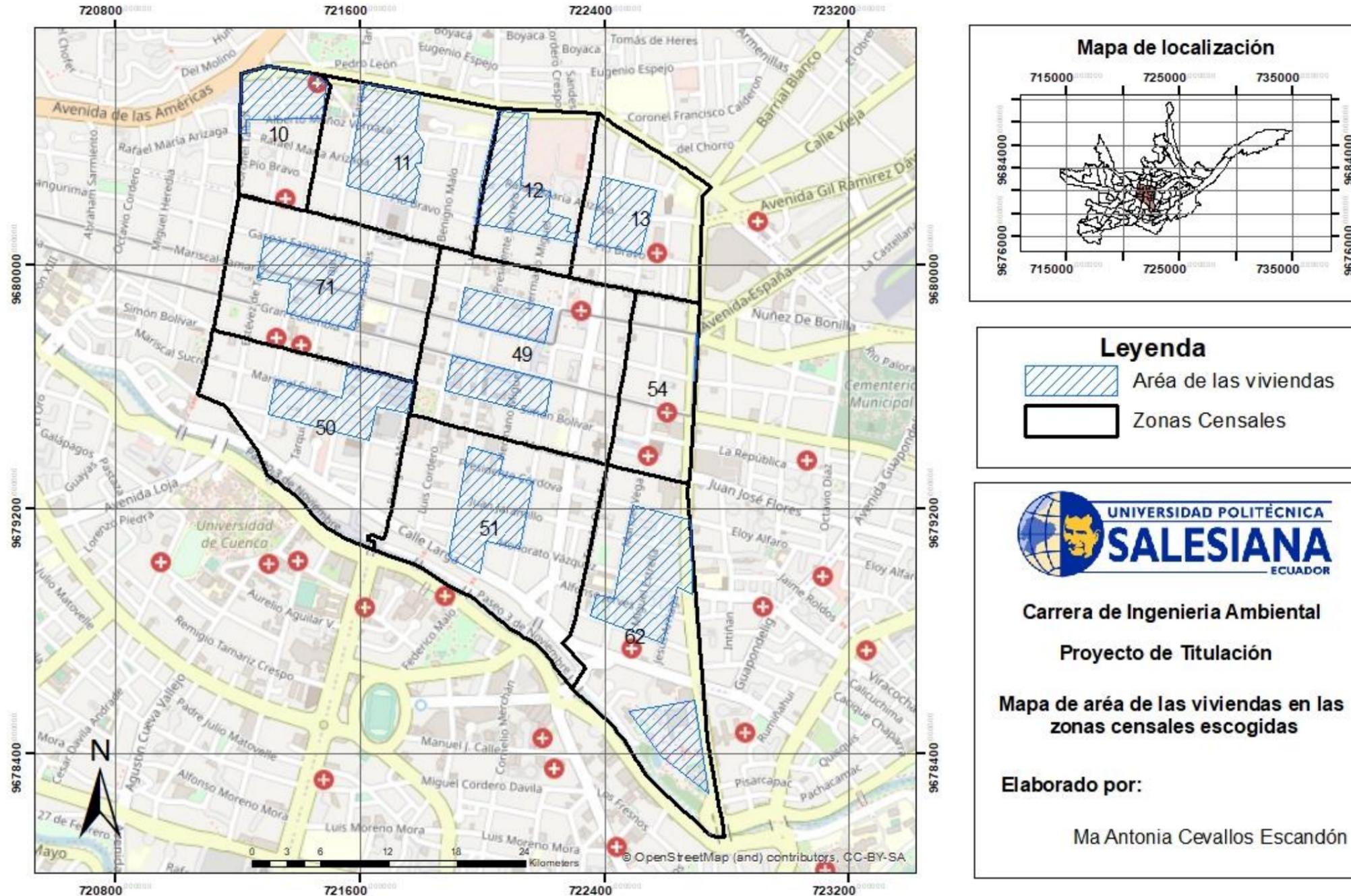
Mapa de las zonas censales escogidas para la delimitación del área de estudio



Anexo 2. Mapa de selección de zonas para el área de estudio.
Elaboración Propia.

Anexo 3

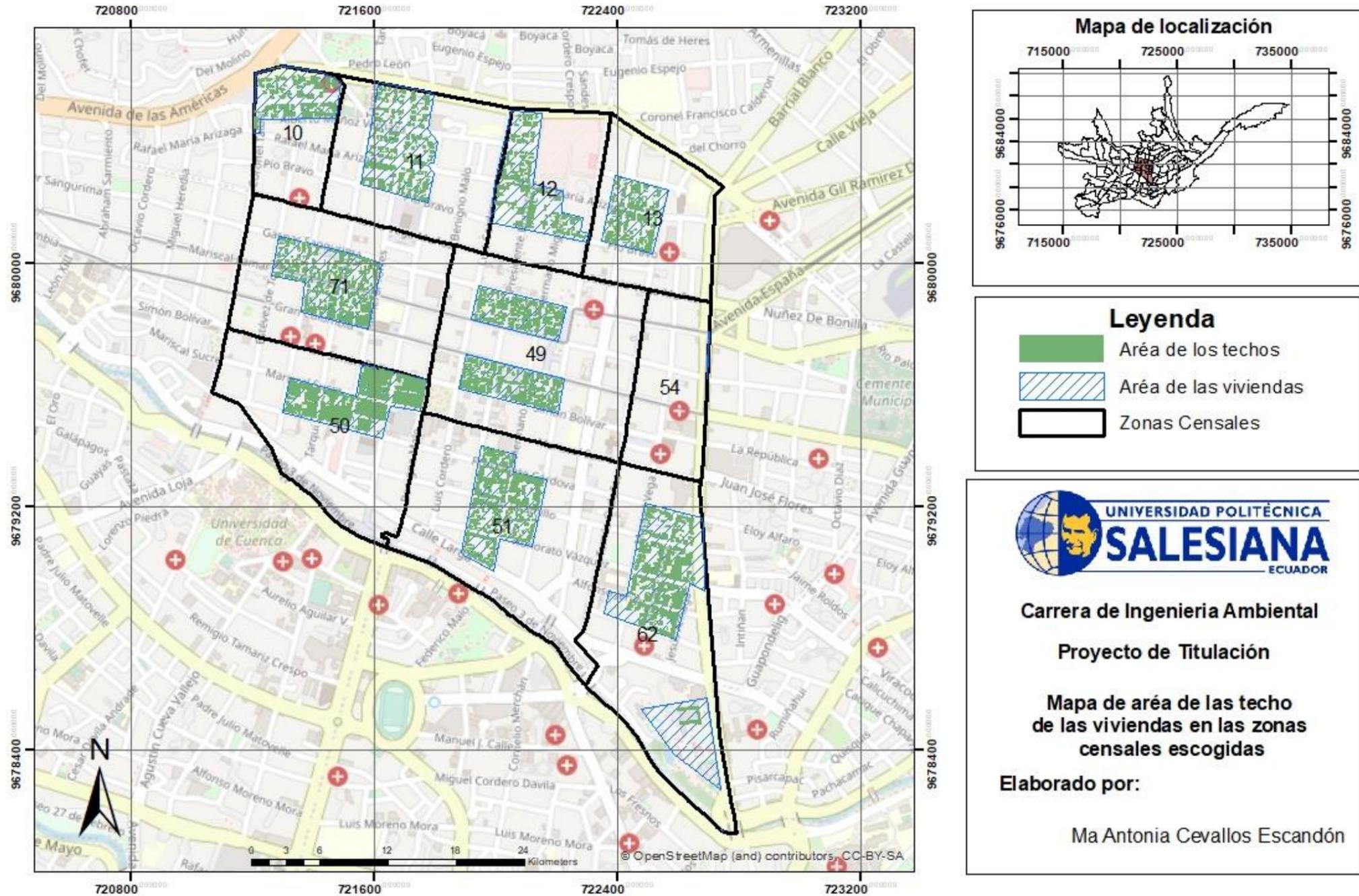
Mapa de área de las viviendas en las zonas censales escogidas



Anexo 3. Área de las viviendas dentro de las zonas censales del área de estudio.
Elaboración Propia.

Anexo 4

Mapa de área de las techo de las viviendas en las zonas censales escogidas



Anexo 4. Mapa delimitación del área de estudio. Elaboración propia.

BIBLIOGRAFÍA

- Aboushal, E. A. (2018). Applying GIS Technology for optimum selection of Photovoltaic Panels “Spatially at Defined Urban Area in Alexandria, Egypt.” *Alexandria Engineering Journal*, 57(4), 4167–4176.
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.11.005>
- Agencia de Regulación y Control de Electricidad. (2020). *Balance Nacional de Energía 2020*. <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/balance-nacional/>
- Agencia de regulación y control de energía y recurso naturales no renovables. (2021a). *Regulación Nro. ARCERNNR-001/2021*. <https://www.energiaestrategica.com/wp-content/uploads/2021/05/Resolucion-Nro.-ARCERNNR-013-2021-signed-signed.pdf>
- Agencia de regulación y control de energía y recurso naturales no renovables. (2021b). *Regulación Nro. ARCERNNR-002/21*. <https://www.energiaestrategica.com/wp-content/uploads/2021/05/Resolucion-Nro.-ARCERNNR-014-2021-signed-signed.pdf>
- Agudelo-Vera, C. M., Leduc, W. R. W. A., Mels, A. R., & Rijnaarts, H. H. M. (2012). Harvesting urban resources towards more resilient cities. *Resources, Conservation and Recycling*, 64(64), 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.01.014>
- ARCONEL. (2019). *Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2019 (Documento preliminar)*. 2019, 149.
- ARCONEL. (2021). *Balance Nacional de Energía Eléctrica Abril 2020*. ARCONEL. <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/balance-nacional/>
- Asensio, P. (2007a). *Hidrógeno y pila de combustibl. El Futuro de la Auto-movilidad*.

www.ariema.com

Asensio, P. (2007b). *Hidrógeno y pila de combustible Hidrógeno, ¿el sustituto del petróleo?* www.ariema.com

Astudillo Bravo, R. (2016). *Obtención de ciclos de conducción para la flota de buses urbanos del cantón Cuenca.*

Ayodele, T. R., & Munda, J. L. (2019). Potential and economic viability of green hydrogen production by water electrolysis using wind energy resources in South Africa. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(33), 17669–17687.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.077>

Banco Mundial. (2020). *Emisiones de CO2 (toneladas métricas per cápita) - Ecuador.*
https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.PC?end=2016&locations=EC&most_recent_value_desc=false&start=1960&view=chart

Barragán-Escandón, E. A., Zalamea-León, E. F., Terrados-Cepeda, J., & Vanegas-Peralta, P. F. (2020). Energy self-supply estimation in intermediate cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 129(June).
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109913>

Barragán Escandón, A., Zalamea León, E., & Terrados Cepeda, J. (2019). Incidence of photovoltaics in cities based on indicators of occupancy and urban sustainability. *Energies*, 12(5), 1–26. <https://doi.org/10.3390/en12050810>

Barragán Escandón, E. A. (2018). *El autoabastecimiento energético en los países en vías de desarrollo en el marco del metabolismo urbano: caso Cuenca, Ecuador.* 1–373. <http://ruja.ujaen.es/handle/10953/936>

Barragán Escandón, E. A. (2020). *Generador fotovoltaico Conectado a la red interna*

de Distribución eléctrica Edificio proyectado para la empresa eléctrica regional CENTROSUR.

Barreras, F., & Lozano, A. (2012). Hidrógeno. Pilas de combustibles de tipo PEM. *Año Internacional de La Energía Sostenible Para Todos*, 19. www.energia2012.es

Berrío, L. H., & Zuluaga, C. (2014). Smart Grid y energía solar fotovoltaica como fuente de energía renovable para la generación distribuida en el contexto energético global. *Ingeniería Y Desarrollo*, 32(2), 369–396.

Bhattacharya, M., Paramati, S. R., Ozturk, I., & Bhattacharya, S. (2016). The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from top 38 countries. *Applied Energy*, 162(November 2018), 733–741.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.104>

BP Statistical Review. (2019). Statistical Review of World Energy 2020 | 69th edition. *Bp*, 69, 8–11. www.bp.com/statisticalreview.

Bristow, D. N., & Kennedy, C. A. (2013). Urban metabolism and the energy stored in cities: Implications for resilience bristow and kennedy the energy stored in cities. *Journal of Industrial Ecology*, 17(5), 656–667. <https://doi.org/10.1111/jiec.12038>

Brooks, D. (2020). *Energías renovables: qué son los hidrógenos verde, azul y negro (y por qué se invierten miles de millones en 2 de ellos)*.
<https://www.bbc.com/mundo/noticias-53925884>

Byrne, J., Taminiiau, J., Kurdgelashvili, L., & Kim, K. N. (2015). A review of the solar city concept and methods to assess rooftop solar electric potential, with an illustrative application to the city of Seoul. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 830–844. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.023>

- CAF. (2021). *El Hidrógeno y su relación con energías renovables y sus excedentes*.
<https://www.caf.com/es/conocimiento/visiones/2021/02/el-hidrogeno-y-su-relacion-con-energias-renovables-y-sus-excedentes/>
- Castillo, L. (2019). *Cuenca se expande hacia seis parroquias rurales*. 24/05/2019.
<https://www.elcomercio.com/actualidad/cuenca-expande-parroquias-rurales-poblacion.html>
- Celdas de Combustible y Generación Distribuida*. (2018). 1–15.
[https://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno_00/Celdas de Combustible/cc.html](https://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno_00/Celdas_de_Combustible/cc.html)
- Census Bureau United States. (2020). *Population Clock: World*.
<https://www.census.gov/popclock/world>
- Centrosur. (2020). *Energía consumida en el 2020*.
<https://www.centrosur.gob.ec/energia-consumida/>
- Chandler, K., & Eudy, L. (2007). Alameda-Contra Costa Transit District (AC Transit)
Fuel Cell Transit Buses Preliminary Evaluation Results. *Statistics, March*, 1–53.
- Cid Jiménez, I., Torres Portero, M. Á., & Torres Portero, M. (2010). *Hidrógeno: vector energético en el siglo XXI*. Universidad de Zaragoza.
- Clark, W. W., & Rifkin, J. (2006). A green hydrogen economy. *Energy Policy*, 34(17), 2630–2639. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.06.024>
- CNAE. (2010). *Vehículos de hidrógeno: cómo funcionan, pros y contras*. Confederación Nacional de Autocuevas.
https://www.cnae.com/blog/index.php/vehiculos-hidrogeno-funcionan-pros-contras/#Ventajas_de_un_vehiculo_de_hidrogeno
- Consejo cantonal de Cuenca. (2018). *Ordenanza de Mejoramiento de Transporte*

Publico Urbano.

Corporación para la Investigación Energetica. (2019). *Energía Solar.*

<http://energia.org.ec/cie/energia-solar/>

Del Pozo Berrezueta, H. (2019). *Ley orgánica de eficiencia energética.*

Delgado Noboa, D. (2016). *Balance Energético Nacional 2016.*

<http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00366.pdf>

Diario El Mercurio. (2020). *919 vehículos más se matricularon en Cuenca.*

<https://ww2.elmercurio.com.ec/2020/01/04/919-vehiculos-mas-se-matricularon-en-cuenca/>

ECO-Inteligencia. (2019). *Los secretos de las top 3 ciudades con energía 100%*

renovable. <https://www.ecointeligencia.com/2019/11/ciudades-energia-renovable/>

EMOV EP. (2021). *Más de 75.000 vehículos fueron matriculados en Cuenca durante el*

2021 - EMOV EP. <https://www.emov.gob.ec/mas-de-75-000-vehiculos-fueron-matriculados-en-cuenca-durante-el-2021/>

Enercity S.A. (2019). *Beneficios Económicos Y Tributarios De La Energía Solar En*

Ecuador. <https://enercitysa.com/blog/beneficios-economicos-y-tributarios-de-la-energia-solar-en-ecuador/>

Fath, K., Stengel, J., Sprenger, W., Wilson, H. R., Schultmann, F., & Kuhn, T. E.

(2015). A method for predicting the economic potential of (building-integrated) photovoltaics in urban areas based on hourly Radiance simulations. *Solar Energy*, 116, 357–370. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.03.023>

Fernández-Bolaños Badía, C. (2005). *Energética del hidrógeno. Contexto, Estado*

Actual y Perspectivas de Futuro.

http://europa.eu.int/comm/energy/_transport/en/cut_en.html

Fletcher, T., & Ebrahimi, K. (2020). The effect of fuel cell and battery size on efficiency and cell lifetime for an 17e fuel cell hybrid vehicle. *Energies*, *13*(22).
<https://doi.org/10.3390/en13225889>

Fundación para el desarrollo de las nuevas tecnologías del hidrógeno de Aragón. (2020). *Fundación Hidrógeno*. <https://hidrogenoaragon.org/es/>

Garzon, B. (2015). *Ciudad y sostenibilidad: su potencial “Solar” como soporte alternativo*.

Gómez-Navarro, T., Brazzini, T., Alfonso-Solar, D., & Vargas-Salgado, C. (2021). Analysis of the potential for PV rooftop prosumer production: Technical, economic and environmental assessment for the city of Valencia (Spain). *Renewable Energy*, *174*, 372–381. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.049>

Gómez, M. (2021). El hidrógeno Verde y la escasez hídrica. Hay agua para todos. In *Reporte Sostenible*. <http://reportesostenible.cl/blog/el-hidrogeno-verde-y-la-escasez-hidrica-hay-agua-para-todos/>

González Besa, Y. (2016). *Producción de hidrógeno a partir de energía solar fotovoltaica. Análisis de sensibilidad de parámetros de diseño*.

González García-Conde, A. (2005). *La economía del Hidrógeno Por qué y para qué?*

Grewal, P. S., & Grewal, P. S. (2013). Can cities become self-reliant in energy? A technological scenario analysis for Cleveland, Ohio. *Cities*, *31*(2013), 404–411.
<https://doi.org/10.1016/j.cities.2012.05.015>

Grimm, A., de Jong, W. A., & Kramer, G. J. (2020). Renewable hydrogen production: A techno-economic comparison of photoelectrochemical cells and photovoltaic-

- electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(43), 22545–22555.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.092>
- Guzman, B., & Spinsanti, C. (2011). *Análisis de la producción de hidrógeno a partir de Energía Solar Fotovoltaica*. 221.
- Guzman, B., & Spinsanti, C. (2016). *Producción de hidrógeno on-site para automoción a partir de energía solar fotovoltaica* (p. 72). <http://hdl.handle.net/10251/59998>
- Haghi, E., Raahemifar, K., & Fowler, M. (2018). Investigating the effect of renewable energy incentives and hydrogen storage on advantages of stakeholders in a microgrid. *Energy Policy*, 113(July 2017), 206–222.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.045>
- IRENA. (2021). *Energía solar*. <https://www.irena.org/solar>
- Ishaq, H., & Dincer, I. (2021). Comparative assessment of renewable energy-based hydrogen production methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135(August 2020), 110192. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110192>
- Jaramillo, C. (2017). *Estudio de metabolismo urbano en la ciudad de Cuenca*. 131.
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14260/1/UPS-CT007009.pdf>
- Jiménez, I. (2010). *Hidrógeno : Vector Energético el siglo XXI*.
<https://core.ac.uk/download/pdf/289970908.pdf>
- Junta de Castilla y León. (2008). *Introducción a la Energía Solar*. 1–25.
<https://energia.jcyl.es/web/es/energias-renovables-ordenacion-energetica/introduccion-energia-solar.html>
- Khan, J., & Arsalan, M. H. (2016). Estimation of rooftop solar photovoltaic potential using geo-spatial techniques: A perspective from planned neighborhood of Karachi

- Pakistan. *Renewable Energy*, 90, 188–203.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.058>

Kothari, R., Buddhi, D., & Sawhney, R. L. (2008). Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 553–563.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.07.012>

Lenín, L., Garcés, M., María, A., Muñoz, A., Ortiz, I. R., & Por, E. (2019). *Balance Energético Nacional 2019*.

Lokar, J., & Virtič, P. (2020). The potential for integration of hydrogen for complete energy self-sufficiency in residential buildings with photovoltaic and battery storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(60), 34566–34578.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.170>

Looney, B. (2020). *Statistical Review of World Energy globally consistent data on world energy markets . and authoritative publications in the field of energy The Statistical Review world of World Energy and data on world energy markets from is The Review has been providing*. 66.

<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>

Luque, A., & Hegedus, S. (2005). Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. In *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* (Vol. 2).

<https://doi.org/10.1002/0470014008>

Mekhilef, S., Saidur, R., & Safari, A. (2012). Comparative study of different fuel cell technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 981–989.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.020>

Moles, R., Foley, W., Morrissey, J., & O'Regan, B. (2008). Practical appraisal of sustainable development-Methodologies for sustainability measurement at settlement level. *Environmental Impact Assessment Review*, 28(2–3), 144–165.

<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2007.06.003>

Morales Ramos, A. C., Pérez Figueroa, M., Pérez Gallardo, J. R., & Almaraz, S. D. L. (2017). Energías renovables y el hidrógeno: un par prometedor en la transición energética de México. *Investigación y Ciencia de La Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 70, 92–101. <https://doi.org/10.33064/iycuaa2017701856>

Moreno Vallejo, L. G., & Vargas Gallo, C. E. (2013). La tecnología del hidrógeno, una oportunidad estratégica para la perdurabilidad del sector energético en Colombia. *Tesis*, 1–149.

<http://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/4294/79952447-2013.pdf?sequence=3>

Moscoso Cordero, M. S. (2012). Los vehículos motorizados privados y el problema de transporte público en los centros históricos: el caso de Cuenca-Ecuador. *Estoa*, 1(1), 79–93. <https://doi.org/10.18537/est.001.09>

Muñoz, J. P., Rojas-Moncayo, M. V., & Barreto-Calle, C. (2018). Incentivo a la generación distribuida en el Ecuador. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, 60–68. http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-860X2018000100060&nrm=iso

Narváez, N. A. U. (2021). Análisis técnico-ambiental del uso de pilas combustibles de hidrógeno en el sector transporte. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 6. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/35612/1/Trabajo de>

Titulacion.pdf%0Ahttps://educacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/01/GUIA-METODOLOGICA-EF.pdf

NS ENERGY. (2021). *Los cinco países con mayor capacidad de energía solar del mundo - World Energy Trade*. <https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/energia-solar/los-cinco-paises-con-mayor-capacidad-de-energia-solar-del-mundo>

OCTA. (2019). *Bus eléctrico de pila de combustible de hidrógeno - Descripción general*. <https://www.octa.net/Bus/Hydrogen-Fuel-Cell-Electric-Bus/Overview/>

Oh, M., Kim, S. M., & Park, H. D. (2020). Estimation of photovoltaic potential of solar bus in an urban area: Case study in Gwanak, Seoul, Korea. *Renewable Energy*, 160, 1335–1348. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.048>

ONU. (2021). La promesa de la energía solar: Estrategia energética para reducir las emisiones de carbono en el siglo XXI | Naciones Unidas. *Cronicas ONU*. <https://www.un.org/es/chronicle/article/la-promesa-de-la-energia-solar-estrategia-energetica-para-reducir-las-emisiones-de-carbono-en-el>

Orera, V. M. (2007). *Hidrógeno y Pilas de combustible*. April.

Ortiz Vallejo, M. A. (2014). *Estudio Comparativo del Uso del Diesel Entre Europa y Ecuador , Utilizado para Motores de Vehículos . 1*, 111. <http://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/610/1/T-UIDE-0560.pdf>

Ozturk, M., & Dincer, I. (2020). Development of renewable energy system integrated with hydrogen and natural gas subsystems for cleaner combustion. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 83(August), 103583. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103583>

- Padilla, R., & Mauricio, B. (2018). *Análisis de la producción de hidrogeno a partir de energía solar fotovoltaica.*
- Páez, A. (2010). Energy-urban transition: The Mexican case. *Energy Policy*, 38(11), 7226–7234. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.07.053>
- Paredes, L.A. (2019). Electromovilidad y Eficiencia Energética en el Transporte Público de Pasajeros del Ecuador Continental. *Revista Técnica “Energía,”* 16(1). <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v16.n1.2019.340>
- Paredes, Luis Angel, & Pozo, M. (2020). Mobility and Energy Efficiency in the Public Transportation System of Ecuador a Mechanism to Reduce CO2 Emissions. *Revista Técnica “Energía,”* 16(2), 91–99. <http://revistaenergia.cenace.org.ec/index.php/cenace/article/view/356>
- Parra, R. (2016). *Inventario de Emisiones Atmosféricas del Cantón Cuenca 2014.* December, 88. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17665.66405>
- Pelaez-Samaniego, M. R., Riveros-Godoy, G., Torres-Contreras, S., Garcia-Perez, T., & Albornoz-Vintimilla, E. (2014). Production and use of electrolytic hydrogen in Ecuador towards a low carbon economy. *Energy*, 64, 626–631. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.012>
- Peretti, H. A., & Visintin, A. (2011). *Hidrógeno, Combustible del Futuro: ¿Por Qué, ¿Cómo Y Dónde?* <http://stonestorm.inifta.unlp.edu.ar/extension/Hidrogeno.pdf>
- Plaza, D. (2021). *El hidrógeno en los coches: ventajas e inconvenientes.* <https://www.motor.es/que-es/hidrogeno>
- Plaza Plaza, J. A. (2018). *Evolución tecnológica fotovoltaica en Ecuador respecto a Latino America en la última década.*

<http://biblioteca.uteg.edu.ec:8080/bitstream/handle/123456789/129/EVOLUCION-TECNOLOGICA-FOTOVOLTAICA-EN-ECUADOR-RESPECTO-A-LATINOAMERICA-EN-LA-ULTIMA-DECADA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Posso, F., Narváez, R. A. C., Siguencia, J., & Sánchez, J. (2019). Use of Municipal Solid Waste (MSW)-Derived Hydrogen in Ecuador: Potential Applications for Urban Transportation. *Waste and Biomass Valorization*, *10*(6), 1529–1537.

<https://doi.org/10.1007/s12649-017-0161-1>

Posso, F., Sánchez, J., Espinoza, J. L., & Siguencia, J. (2016). Preliminary estimation of electrolytic hydrogen production potential from renewable energies in Ecuador.

International Journal of Hydrogen Energy, *41*(4), 2326–2344.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.155>

Posso, F., & Zambrano, J. (2014). Estimation of electrolytic hydrogen production potential in Venezuela from renewable energies. *International Journal of Hydrogen Energy*, *39*(23), 11846–11853.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.06.033>

Posso, Fausto, Espinoza, J. L., Sánchez, J., & Zalamea, J. (2015). Hydrogen from hydropower in Ecuador: Use and impacts in the transport sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, *40*(45), 15432–15447.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.08.109>

Posso, Fausto, Sánchez, J., & Siguencia, J. (2016). Estimación del Potencial de Producción de Hidrógeno a partir de Energía Solar Fotovoltaica en Ecuador.

Energia, 373–378. <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/punto/1/energia-solar-fotovoltaica-en-ecuador>

Qureshy, A. M. M. I., & Dincer, I. (2020). A new integrated renewable energy system

for clean electricity and hydrogen fuel production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(41), 20944–20955.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.218>

Rabiee, A., Keane, A., & Soroudi, A. (2021). Green hydrogen: A new flexibility source for security constrained scheduling of power systems with renewable energies.

International Journal of Hydrogen Energy, xxxx.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.080>

Revelo Vaca, D., Ordóñez, F., & Villada López, J. (2019). Atla Solar Ecuador.

Scinergy, 12–26. [https://www.ingenieriaverde.org/wp-](https://www.ingenieriaverde.org/wp-content/uploads/2020/01/Mapa_Solar_del_Ecuador_2019.pdf)

[content/uploads/2020/01/Mapa_Solar_del_Ecuador_2019.pdf](https://www.ingenieriaverde.org/wp-content/uploads/2020/01/Mapa_Solar_del_Ecuador_2019.pdf)

Rivero, A. (2016). Análisis comparativo de los sistemas de producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables. *Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla*, 82.

Roca, J. A. (2018). *Informe WEO 2018 de la AIE : Dos tercios de la generación eléctrica mundial provendrá de fuentes renovables en 2040.*

[Www.Elperiodicodelaenergia.Com. https://elperiodicodelaenergia.com/informe-weo-2018-de-la-aie-dos-tercios-de-la-generacion-electrica-mundial-provendra-de-fuentes-renovables-en-2040/](https://elperiodicodelaenergia.com/informe-weo-2018-de-la-aie-dos-tercios-de-la-generacion-electrica-mundial-provendra-de-fuentes-renovables-en-2040/)

Rodríguez, D., & Arroyo, D. (2016). *Energía solar fotovoltaica en Ecuador.*

<https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/punto-de-vista/1/energia-solar-fotovoltaica-en-ecuador>

Romero Rodríguez, L., Duminil, E., Sánchez Ramos, J., & Eicker, U. (2017).

Assessment of the photovoltaic potential at urban level based on 3D city models: A case study and new methodological approach. *Solar Energy*, 146, 264–275.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.043>

Roncero, A. (2009). *Emisiones de CO₂: ¿qué contamina más, un gasolina o un diesel?*

<https://www.auto10.com/reportajes/emisiones-de-co2-que-contamina-mas-un-gasolina-o-un-diesel/588>

Rosa Iglesias, M. F. (2010). *Hidrógeno como vector energético: elementos y usos*. 27–40.

Sánchez Molina, P. (2020). *América Latina alcanza los 13 GW de capacidad*

fotovoltaica instalada. <https://www.pv-magazine-latam.com/2020/04/07/america-latina-alcanza-los-13-gw-de-capacidad-fotovoltaica-instalada/>

Schallenberg-Rodríguez, J. (2013). Photovoltaic techno-economical potential on roofs in regions and islands: The case of the Canary Islands. Methodological review and methodology proposal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 219–239. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.078>

Scholten, D., & Bosman, R. (2016). The geopolitics of renewables; exploring the political implications of renewable energy systems. *Technological Forecasting and Social Change*, 103, 273–283. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.10.014>

SEAS. (2020). *Estudios Superiores Abiertos Online*. <https://www.seas.es/>

Segui Chilet, S. (2019). *Instalaciones solares fotovoltaicas de conexión a red*.

<https://www.cursorfotovoltaica.com/>

Shah, S. A. A. (2020). Feasibility study of renewable energy sources for developing the hydrogen economy in Pakistan. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(32), 15841–15854. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.153>

Silva Morales, N. A., & Torres Sánchez, C. (2017). Calidad del servicio de transporte

urbano en la ciudad de Cuenca. *Universidad Politécnica Salesiana*, 101.

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14263/1/UPS->

[CT007011.pdf?fbclid=IwAR1XtLMXux6-](https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14263/1/UPS-CT007011.pdf?fbclid=IwAR1XtLMXux6-)

[MQambdSMVHb0IRTemVKWici4O0WIJKCuOSXJJqNB8kgmD2o](https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14263/1/UPS-CT007011.pdf?fbclid=IwAR1XtLMXux6-MQambdSMVHb0IRTemVKWici4O0WIJKCuOSXJJqNB8kgmD2o)

Smink, V. (2021). *Hidrógeno verde : 6 países que lideran la producción de una de las " energías del futuro " (y cuál es el único latinoamericano)*. 1–16.

<https://www.bbc.com/mundo/noticias-56531777?xtor=AL-73-%5Bpartner%5D->

[%5Bflipboard%5D-%5Bheadline%5D-%5Bmundo%5D-%5Bbizdev%5D-](https://www.bbc.com/mundo/noticias-56531777?xtor=AL-73-%5Bpartner%5D-%5Bflipboard%5D-%5Bheadline%5D-%5Bmundo%5D-%5Bbizdev%5D-)

[%5Bisapi%5D](https://www.bbc.com/mundo/noticias-56531777?xtor=AL-73-%5Bpartner%5D-%5Bflipboard%5D-%5Bheadline%5D-%5Bmundo%5D-%5Bbizdev%5D-%5Bisapi%5D)

SNCF. (2020). *Fébus: Pau lanza el BRT de hidrógeno 1st del mundo*.

<https://www.sncf.com/en/network-expertise/public-transport-/febus-pau-all->

[aboard-worlds-first-hydrogen-brt](https://www.sncf.com/en/network-expertise/public-transport-/febus-pau-all-aboard-worlds-first-hydrogen-brt)

Solar Castillejos, J. A. (2017). *Extracción del Hidrogeno contenido en la orina humana mediante el método de celda electrolítica para generar energía eléctrica*.

Stygar, M., & Brylewski, T. (2013). Towards a hydrogen economy in Poland.

International Journal of Hydrogen Energy, 38(1), 1–9.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.10.056>

The Tico Times. (2018). *El primer autobús de Centroamérica que funciona con hidrógeno sale a la carretera en Costa Rica:*

<https://ticotimes.net/2018/04/18/central-americas-first-hydrogen-fueled-bus-hits->

[the-road-in-costa-rica](https://ticotimes.net/2018/04/18/central-americas-first-hydrogen-fueled-bus-hits-the-road-in-costa-rica)

Tritec Intervento. (2019). *Eficiencia del panel solar*. <https://tritec->

[intervento.cl/eficiencia-de-diferentes-tipos-de-celulas-solares-de-silicio-parte-2/](https://tritec-intervento.cl/eficiencia-de-diferentes-tipos-de-celulas-solares-de-silicio-parte-2/)

- U.N. (2015). La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. *Naciones Unidas*, 7–9.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/#prettyPhoto>
- Urdiales, L., Espinoza, J. L., Vasquez, F., & García, M. (2015). Energía solar en el Ecuador. In *ResearchGate* (Issue January).
https://www.researchgate.net/publication/291356953_Energia_solar_en_el_Ecuador
- Urgilés Ortiz, J. A., & Yáñez Iñiguez, L. I. (2018). *Metodología para el calculo área de techos*. Universidad de Cuenca.
- Venegas, D., Meléndrez, M., Celi, S., & Ayabaca, C. (2016). Métodos Amigables De Producción De Hidrógeno Como Fuente De Energía Limpia. *II Jornadas Iberoamericanas de Motores Térmicos y Lubricación (La Plata, 2016)*, i, 95–104.
<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/77368>
- Wenz, K.-P., Serrano-Guerrero, X., Barragán-Escandón, A., González, L. G., & Clairand, J.-M. (2021). Route prioritization of urban public transportation from conventional to electric buses: A new methodology and a study of case in an intermediate city of Ecuador. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148(April), 111215. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111215>
- Zalamea-Leon, E., Barragan-Escandon, A., & Mendez-Santos, P. (2018). Assessment of Photovoltaic Potential on Sloped Roofs on Equatorial-Andean Housing Typology. *2018 IEEE ANDESCON, ANDESCON 2018 - Conference Proceedings*.
<https://doi.org/10.1109/ANDESCON.2018.8564731>
- Zalamea-León, E., Mena-Campos, J., Barragán-Escandón, A., Parra-González, D., &

Méndez-Santos, P. (2018). Urban photovoltaic potential of inclined roofing for buildings in heritage centers in equatorial areas. *Journal of Green Building*, 13(3), 45–69. <https://doi.org/10.3992/1943-4618.13.3.45>