



UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL

**ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO Y AMBIENTAL DE
LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO EN
BUSES URBANOS DE COOPERATIVA DE TRANSPORTE**

Trabajo de titulación presentado como requisito para la
obtención del título de
INGENIERA AMBIENTAL

AUTORAS
CUMBE PINTO JOHANNA VANESSA
INTRIAGO CALLE PALOMA CORINA

TUTOR
MOROCHO ROSERO LUIS ANTONIO

GUAYAQUIL – ECUADOR

2021



UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL

APROBACIÓN DEL TUTOR

Yo, **ING. MOROCHO ROSERO LUIS ANTONIO**, docente de la Universidad Agraria del Ecuador, en mi calidad de Tutor, certifico que el presente trabajo de titulación: **“ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO Y AMBIENTAL DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO EN BUSES URBANOS DE COOPERATIVA DE TRANSPORTE ”**, realizado por las estudiantes **INTRIAGO CALLE PALOMA CORINA**; con cédula de identidad N°0929721272 y **CUMBE PINTO JOHANNA VANESSA** con cédula de identidad N°0951896471 de la carrera **Ingeniería Ambiental**, Unidad Académica **Guayaquil**, ha sido orientado y revisado durante su ejecución; y cumple con los requisitos técnicos exigidos por la Universidad Agraria del Ecuador; por lo tanto, se aprueba la presentación del mismo.

Atentamente,

Ing. Morocho Rosero Luis Antonio

Guayaquil, 21 de junio del 2021



UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Los abajo firmantes, docentes designados por el H. Consejo Directivo como miembros del Tribunal de Sustentación, aprobamos la defensa del trabajo de titulación: **“ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO Y AMBIENTAL DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO EN BUSES URBANOS DE COOPERATIVA DE TRANSPORTE”**, realizado por las estudiantes **INTRIAGO CALLE PALOMA CORINA Y CUMBE PINTO JOHANNA VANESSA**, el mismo que cumple con los requisitos exigidos por la Universidad Agraria del Ecuador.

Atentamente,

Oce. Leila Zambrano Zavala
PRESIDENTE

Ing. Jean Andrade Tobar
EXAMINADOR PRINCIPAL

Ing. Wolfio Ribadeneira Arguello
EXAMINADOR PRINCIPAL

Ing. Morocho Rosero Luis
EXAMINADOR SUPLENTE

Guayaquil, 22 de junio del 2021

Dedicatoria

Esta tesis está dedicada a la memoria de mi hermano Roger Cumbe; la fuerza y la fe de Roger durante su enfermedad me dieron una nueva apreciación de la de la vida. Vivió su vida, puso su fe en Dios y quiso mucho a nuestra familia, nos enseñó lo importante que es la familia y el estar unidos. Se enfrentó valientemente a su muerte prematura. Su ejemplo me mantuvo firme cuando quise rendirme.

- **Johanna**

A mis padres, por estar conmigo, por enseñarme a crecer y a que si caigo debo levantarme, por apoyarme y guiarme, por ser las bases que me ayudaron a llegar hasta aquí.

- **Paloma**

Agradecimiento

Agradezco a Dios por estar siempre conmigo, guiándome, y fortaleciéndome para culminar esta etapa de formación profesional; a mis queridos padres Walter y Beatriz, pilares fundamentales en mi vida, sin ellos jamás hubiese podido conseguir triunfo alguno, la tenacidad y lucha incansable han hecho de ellos el gran ejemplo a seguir; a mis hermanos por ser mis modelos de constante esfuerzo y logros.

- **Johanna**

Agradezco a Dios por sus bendiciones durante mi vida, por guiarme a lo largo de mi existencia.

A mis padres Kleber y Alexandra y a mis hermanas por brindarme su apoyo y a mis amigos por confiar y creer en mí e inspirarme a seguir adelante y cumplir todos mis sueños.

- **Paloma**

Autorización de Autoría Intelectual

Nosotras **INTRIAGO CALLE PALOMA CORINA** y **CUMBE PINTO JOHANNA VANESSA**, en calidad de autoras del proyecto realizado, sobre **“ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO Y AMBIENTAL DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO EN BUSES URBANOS DE COOPERATIVA DE TRANSPORTE”** para optar el título de **INGENIERA AMBIENTAL**, por la presente autorizamos a la **UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR**, hacer uso de todos los contenidos que nos pertenecen o parte de los que contienen esta obra, con fines estrictamente académicos o de investigación.

Los derechos que como autoras nos correspondan, con excepción de la presente autorización, seguirán vigentes a mi favor, de conformidad con lo establecido en los artículos 5, 6, 8; 19 y demás pertinentes de la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento.

Guayaquil, 22 de junio del 2021

INTRIAGO CALLE PALOMA CORINA
C.I. 0929721272

CUMBE PINTO JOHANNA VANESSA
C.I. 0951896471

Índice general

PORTADA.....	1
APROBACIÓN DEL TUTOR	2
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	3
Dedicatoria.....	4
Agradecimiento	5
Autorización de Autoría Intelectual	6
Índice general	7
Índice de tablas	11
Índice de figuras.....	13
Resumen	14
Abstract.....	15
1. INTRODUCCIÓN	16
1.1 Antecedentes del problema.....	16
1.2 Planteamiento y formulación del problema	17
1.2.1 Planteamiento del problema.....	17
1.2.2 Formulación del problema.....	19
1.3 Justificación de la investigación	19
1.4 Delimitación de la investigación	21
1.5 Objetivos generales	21
1.6 Objetivos específicos	21
1.7 Hipótesis	22
2. Marco teórico.....	23
2.1 Estado del arte.....	23
2.2 Bases teóricas	24

2.2.1	Fundamentos de las celdas de combustible SOFC.	24
2.2.1.1	<i>Ley de Faraday</i>.....	25
2.2.1.2	<i>Ley de OHM</i>.....	26
2.2.1.3	<i>Curva de polarización</i>.....	26
2.2.1.4	<i>Sobrepotenciales</i>.....	27
2.2.1.5	<i>Reacciones</i>.....	27
2.2.2	Funcionamiento de las celdas de combustible SOFC	28
2.2.3	Configuración de la celda de combustible SOFC.....	29
2.2.3.1	<i>Ánodo</i>.....	29
2.2.3.2	<i>Cátodo</i>.....	29
2.2.3.3	<i>Electrolito</i>.....	29
2.2.3.4	<i>Canal de flujo</i>.....	30
2.2.4	Diseño de la celda de combustible SOFC	30
2.2.4.1	<i>Configuración Tubular</i>	31
2.2.4.2	<i>Configuración Planar</i>	32
2.2.5	Aplicaciones de la celda de combustible SOFC.....	32
2.3	Marco legal.....	33
2.3.1	Constitución de la República del Ecuador.....	33
2.3.2	Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial ...	34
2.3.3	Ley Orgánica de Eficiencia Energética	34
2.3.4	Ley de prevención y control de la contaminación ambiental.....	35
2.3.5	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático.....	36
3.	Materiales y métodos.....	37
3.1	Enfoque de la investigación.....	37

3.1.1	Tipo de investigación.....	37
3.1.1.1	<i>Investigación Documental.</i>	37
3.1.2	Diseño de investigación.	37
3.2	Metodología	38
3.2.1	Variables.	38
3.2.1.1	<i>Variable independiente</i>	38
3.2.1.2	<i>Variable dependiente</i>	38
3.3.2	Tratamientos.....	39
3.3.3	Diseño experimental.	39
3.3.4	Recolección de datos.	39
3.3.4.1	<i>Recursos.</i>	40
3.3.4.2	<i>Métodos y técnicas</i>	40
3.3.5	Análisis estadístico.....	41
4.	RESULTADOS.....	47
4.1	Análisis de la información existente para lograr un conocimiento detallado técnico - económico del uso de celdas de combustible de óxido sólido (SOFC) en buses urbanos de una cooperativa de transporte.....	47
4.2	Valoración de la viabilidad técnica de la celda de combustible de óxido sólido como fuente de energía alterna en los buses urbanos por medio de revisión bibliográfica.....	51
4.3	Determinación del consumo de combustible fósil de las 3 principales rutas de los buses urbanos de la Cooperativa 10 de agosto.	53
4.3.1	Ruta R21	53
4.3.2	Ruta R90.....	54
4.3.3	Ruta R59.....	55

4.4	Estimación de la viabilidad económica de la celda de combustible de óxido sólido como fuente de energía en buses urbanos.....	55
4.5	Análisis del impacto ambiental de las emisiones al aire que producen las celdas de combustible de óxido sólido en el momento de su funcionamiento mediante revisión bibliográfica.	58
4.6	Determinación de las emisiones al aire que producen los buses urbanos de la Cooperativa 10 de agosto.....	60
4.6.1	Ruta R21.....	60
4.6.2	Ruta R90.....	60
4.6.3	Ruta R59.....	61
4.7	Determinación de las diferencias entre las celdas de combustible de óxido sólido y el combustible fósil convencional en los medios de transporte.....	61
5.	Discusión	63
6.	Conclusiones.....	67
7.	Recomendaciones.....	70
8.	Bibliografía.....	72
9.	Anexos	80
9.1	Anexo 1. Figuras	80
9.2	Anexo 2. Tablas complementarias.....	85

Índice de tablas

Tabla 1. Recursos utilizados para la elaboración del proyecto.	40
Tabla 2. Costos de referencias de Buses urbanos.....	50
Tabla 3. Especificaciones económicas y técnicas para el autobús con celda de combustible SOFC	50
Tabla 4. Información de la ruta R21-Línea 120A.....	53
Tabla 5. Información anual de los 32 buses de la ruta R21-Línea 120A.....	54
Tabla 6. Información de la ruta R90-Línea 120B.....	54
Tabla 7. Información anual de los 30 buses de la ruta R90-Línea 120B.....	54
Tabla 8. Información de la ruta R59-Línea 157A.....	55
Tabla 9. Información anual de los 13 buses de la ruta R59-Línea 157A.....	55
Tabla 10. Costo de referencia de las características del autobús con celda de combustible SOFC	56
Tabla 11. Valor actual neto de los costos privados y externos: escenario de referencia (miles de dólares).	57
Tabla 12. Comparación de las emisiones de los sistemas SOFC Fuente:Karakoussis (2016)	59
Tabla 13. Típicas emisiones al aire de un sistema SOFC en un año de operación	59
Tabla 14. Emisión diaria y anual de la ruta R21	60
Tabla 15. Emisión diaria y anual de la ruta R90.....	61
Tabla 16. Emisión diaria y anual de la ruta R59.....	61
Tabla 17. Comparación de vehículos que operan con celdas de combustible SOFC contra motor de combustión interna.	62
Tabla 18. Ubicación geográfica.....	85

Tabla 19. Reacciones Químicas.	85
Tabla 20. Indicadores de efectividad técnica y económica de las celdas de energía.	85

Índice de figuras

Figura 1. Comparación de eficiencia de energía.....	42
Figura 2. Comparación de la potencia de energía	46
Figura 3. Datos a ingresar en la simulación del vehículo	48
Figura 4. Configuración del ciclo de manejo en un intervalo de 10 segundos..	49
Figura 5. Potencia del motor de una celda de combustible SOFC.....	51
Figura 6. Velocidad obtenida de una celda de combustible SOFC	52
Figura 7. Emisiones emitidas por una celda de combustible SOFC.....	52
Figura 8. Eficiencia del motor desarrollada por una celda de combustible SOFC	53
Figura 9. Emisiones de sistemas SOFC alimentadas por varios combustibles.	58
Figura 10. Consumo de energía por fuente (transporte)	80
Figura 11. Emisiones de GEI por actividad en Ecuador año 2019	80
Figura 12. Ubicación cooperativa de transporte urbano 10 de agosto LTDA...	81
Figura 13. Principio de funcionamiento de una celda de combustible de óxido sólido.....	81
Figura 14. Celda de combustible de óxido con sus partes	82
Figura 15. Conformación de una celda de combustible de óxido sólido usando configuración tubular	82
Figura 16. Sección transversal de células tubulares	83
Figura 17. Flujo de combustible de la configuración tubular	83
Figura 18. Celda de combustible de óxido sólido en configuración planar.....	84
Figura 19. Configuración planar de flujo cruzado.....	84

Resumen

La generación de energía por medios limpios, eficientes y respetuosos con el medio ambiente es ahora uno de los principales desafíos para ingenieros y científicos. Al realizar un análisis técnico, económico y ambiental del funcionamiento de las celdas de combustible de óxido sólido mediante revisión bibliográfica se puede evaluar la eficiencia y efectividad de estas en medios de transporte. Las celdas de combustible de óxido sólido convierten la energía química de un gas combustible directamente en trabajo eléctrico y son eficientes y ambientalmente limpias, ya que no se requiere combustión. Además, las pilas de combustible tienen el potencial de desarrollarse como una alternativa a los combustibles fósiles usados en los vehículos. Se identifican las ventajas en su eficiencia y su poco impacto ambiental al ser utilizadas y económicamente factible. Al analizar los buses de la cooperativa 10 de agosto, se reflejan las grandes cantidades de emisiones que liberan al aire y la gran cantidad de combustible fósil que consumen probando la necesidad de buscar alternativas y desarrollo de vehículos cero emisiones y nuevas tecnologías de automotores como los vehículos impulsados por una celda de combustible de óxido sólido.

Palabras clave: combustible fósil, energía limpia, transporte

Abstract

Generating clean energy, efficient and environmentally friendly is now one of the main challenges for engineers and scientists. By carrying out a technical, economic and environmental analysis of the operation of solid oxide fuel cells through bibliographic review, the efficiency and effectiveness of these for transport can be evaluated. Solid oxide fuel cells convert the chemical energy of a fuel gas directly into electrical work and are efficient and environmentally clean, as no combustion is required. Furthermore, fuel cells have the potential to be developed as an alternative to the fossil fuels used in vehicles. The advantages in its efficiency and its little environmental impact are identified when being used and economically feasible. When analyzing the buses of the 10 de Agosto cooperative, the large amounts of emissions that they release into the air and the large amount of fossil fuel they consume are reflected, proving the need to seek alternatives and development of zero-emission vehicles and new automotive technologies such as vehicles powered by a solid oxide fuel cell.

Keywords: fossil fuel, clean energy, transportation

1. Introducción

1.1 Antecedentes del problema

En 1973 se produjeron eventos importantes en el mercado del petróleo en el mundo, que se manifestaron en los años posteriores en un crecimiento notable de esta fuente de energía no renovable, resurgieron las preocupaciones sobre el suministro y precio futuro de la energía. Como resultado, los países consumidores, enfrentados a los altos costos del petróleo y a una dependencia casi total de este energético, tuvieron que modificar costumbres y buscar opciones para reducir su dependencia de fuentes no renovables (Tecner, 2019, p. 1).

La mayor parte de la producción de energía procede del uso de las reservas de combustibles fósiles. Aunque los combustibles fósiles, especialmente los líquidos derivados del petróleo seguirán siendo la principal fuente de energía en los próximos años, su consumo irá disminuyendo. Del 34 % del consumo total en 2010 se pasará aproximadamente al 28 % en 2040, ya que los precios previstos serán tan elevados que provocarán un cambio de tendencia en el tipo de energía demandada. En el caso de las energías renovables el consumo total de energía se eleva desde el 11 % en 2010 al 15 % en 2040 y la energía nuclear crece del 5 % al 7 % (Muñoz, 2016).

El Ecuador cuenta con una población aproximada de diecisiete millones de habitantes. De esta población el 60% aproximadamente hace uso del sistema de transporte público para el desenvolvimiento de sus actividades diarias. En la actualidad, mayoritariamente los autobuses del sistema de transporte público utilizan como energético principal el diésel para el sistema de tracción motriz de los motores de combustión interna, a excepción de una pequeña participación a nivel país del sistema Trolebús de la ciudad de Quito que funciona parcialmente con energía eléctrica (Paredes y Pozo, 2020).

Acorde al Balance Energético Nacional del 2019, presenta el consumo de energía por fuente en 2019. Puede observarse que el 98,3% de la energía consumida por el sector transporte provino de diésel y gasolinas (Ver Figura 10).

Los combustibles fósiles han sido los energéticos de mayor requerimiento en el país, con una participación promedio de 81% entre 2009 y 2019. El diésel y la gasolina son las fuentes de mayor demanda, mostrando un incremento entre 2009 y 2019 de 33,5% y 58,4% respectivamente. Por su parte, la demanda de energía eléctrica durante el período de estudio tuvo un crecimiento de 71,8%, mientras que el gas licuado de petróleo (GLP), principal energético consumido en la cocción, tuvo un crecimiento durante el mismo período de 29,5% (Instituto de Investigación Geológico y Energético, 2019).

El parque automotor de Guayaquil tiene un consumo diario de 194.628 gal de gasolina súper (anual 71'039.220), 465.245 de gasolina ecopaís (anual 169'814.425) y 447.887 gal de diésel premium (anual 163'478.755). Por lo que el consumo de gasolina emana 2'169.935 t CO₂, mientras que el diésel genera 1'636.414,90 tCO₂ a la atmosfera (Paredes, 2020).

1.2 Planteamiento y formulación del problema

1.2.1 Planteamiento del problema

El uso de combustibles fósiles como fuente principal de energía de los medios de transporte abarca del 80% al 95% de todo el transporte, mientras el 30% del total de las emisiones de gases de efecto invernadero proviene de esta actividad (Mendoza, 2017).

Las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) han presentado una tendencia creciente debido al incremento en la demanda de energía en los últimos 10 años. En este sentido, durante el período comprendido entre 2009 y 2019 se

incrementó de 32.743 kton CO₂ a un valor de 39.058 kton CO₂, lo cual representa un incremento de 19,3%. El sector con mayores emisiones durante el año 2019 fue el transporte, el cual es el principal demandante de energía proveniente de fuentes fósiles. Este sector generó el 50,1% del total de emisiones de GEI. Otros sectores con emisiones relevantes son el industrial con 8,2%, el residencial con 8,6% y otros con 9,5% (Instituto de Investigación Geológico y Energético, 2019) (Ver Figura 11).

Las energías no renovables han sido usadas globalmente por décadas, sin embargo, las energías no renovables provienen de fuentes de energía que tienden a agotarse, convirtiéndose en demasiado caros o demasiado contaminante para el medio ambiente (Planas, 2016).

Las principales fuentes de energía no renovable son el petróleo y el carbón las cuales tienen enormes consecuencias negativas para el medio ambiente, ya que la combustión del petróleo y sus derivados emite a la atmósfera una gran cantidad de gases contaminantes (CO₂, NO_x, SO_x, etc.) contribuyendo al calentamiento global (Ministerio de Industria, Energía y Minería, 2015)

A esto hay que añadir la contaminación de mares y suelo, cuando estos combustibles se filtran por accidentes que van desde vertidos de petróleo y desechos a océanos y ríos (Grupo Villar Mir, 2019).

En el año 2019 la mayor fuente de emisiones es el diésel con 37,0%, seguido de las gasolinas con 29,3% y GLP con 9,0%, alcanzando un porcentaje de participación de 75.3% del total emitido durante el año. Esto se debe a que los energéticos mencionados son los de mayor demanda en el sector transporte y residencial, principales emisores de GEI (Instituto de Investigación Geológico y Energético, 2019).

Centrándonos en la cooperativa de 10 de agosto y sus 3 rutas principales, la cual cuenta con 75 unidades o buses que conforman tres rutas que recorren la ciudad de Guayaquil, al ser estos partes del sector transporte e impulsados principalmente mediante motores de combustión interna alimentados por combustibles petrolíferos, emanan CO_2 a la atmósfera, gas que forma parte de los GEI, que acorde a Guayanlema (2013) el efecto final de estos sería el calentamiento global de la tierra, causando cambios en los patrones de comportamiento del clima, las lluvias y los vientos y aumentando el nivel del mar, cambios que ocasionarían catástrofes impredecibles.

1.2.2 Formulación del problema

¿Qué alternativa de fuente de energía renovable factible y beneficiosa para el medio ambiente puede ser utilizada en el transporte urbano?

1.3 Justificación de la investigación

La huella de carbono del transporte, y por consiguiente su contaminación ambiental, representa una amenaza mayúscula para la salud pública, y es uno de los mayores obstáculos que enfrentan las naciones en la lucha contra el cambio climático (Ágora, 2018).

El transporte es el sector responsable del mayor y más acelerado crecimiento en términos de emisiones de gases de efecto invernadero, causantes del cambio climático. Es a su vez un sector fuertemente desafiado ante potenciales escenarios de escasez de recursos energéticos que demanden una mayor eficiencia energética para asegurar la sostenibilidad en el desarrollo. Para hacer frente a estos retos será preciso adoptar enfoques innovadores en las políticas de transporte y establecer prioridades considerando los beneficios integrales (Barbero y Rodríguez, 2012).

Acorde a Barbero y Rodriguez (2012) el paso hacia el transporte sostenible y de bajo carbono requerirá de nuevas y mejores capacidades, tecnologías y fuentes de financiamiento, para así viabilizar el desarrollo integral promoviendo una menor dependencia de los combustibles fósiles y haciendo frente a la agenda de adaptación y mitigación al cambio climático.

En Ecuador el transporte por tierra se solventa casi exclusivamente por medio de vehículos en carreteras, calles etc. El transporte por medio de carreteras, calles etc. ha crecido de manera muy significativa en los últimos años. Un dato de 1990 nos indica que había un total de 320.000 vehículos matriculados, en el año 1998 eran unos 590.000 y en el 2011 llegó a 1'418. 339. Según esta información el crecimiento ha sido más fuerte por lado de los vehículos destinados al transporte de personas (Guayanlema, 2013).

En la ciudad de Guayaquil se percibe el aumento que ha tenido el servicio de transporte urbano, en consecuencia, ha aumentado la acumulación del CO_2 generados por esta actividad y el aumento de la temperatura media global; esto representa una amenaza a la calidad de vida de la población y al aire del ambiente en la ciudad (Paredes, 2020).

El uso de celdas de combustible para generar electricidad formaría parte de las fuentes de energía limpia con potencial de aprovechamiento que no produce gases de efecto invernadero ni emisiones contaminantes, reduciendo el uso de energía proveniente de la combustión de residuos fósiles.

Es una alternativa que debe ser profundizada en estudio para establecer su viabilidad y efectividad como alternativa a los sistemas energéticos convencionales en los buses urbanos.

1.4 Delimitación de la investigación

El presente análisis técnico-económico y ambiental servirá para fomentar la utilización de energías alternas amigables con el ambiente y así disminuir los impactos negativos del uso de energías a base de petróleo.

- **Espacio:** Cooperativa de transporte urbano 10 de agosto LTDA., ubicada en la Cdma. Garzota 1era etapa manzana 72 villa 11, ciudad Guayaquil. Sus coordenadas son 79°53'28.29" oeste y 2°08'54" sur (Ver anexos Figura 12 y Tabla 18).
- **Tiempo:** El presente trabajo se desarrollará en un tiempo aproximado de 4 meses.
- **Población:** Los habitantes de la ciudad de Guayaquil que acorde al INEC (2017) son 2'644.891.

1.5 Objetivos generales

Analizar técnica-económica y ambientalmente la factibilidad del uso de una celda de combustible de óxido sólido en los buses de una cooperativa de transporte urbano como fuente de energía alterna mediante revisión bibliográfica.

1.6 Objetivos específicos

- Analizar la información existente para lograr un conocimiento detallado técnico - económico del uso de celdas de combustible de óxido sólido (SOFC) en buses urbanos de una cooperativa de transporte.
- Valorar la viabilidad técnica de la celda de combustible de óxido sólido como fuente de energía alterna en los buses urbanos por medio de revisión bibliográfica.
- Determinar el consumo de combustible fósil de las 3 principales rutas de los buses urbanos de la Cooperativa 10 de agosto.

- Estimar la viabilidad económica de la celda de combustible de óxido sólido como fuente de energía en buses urbanos.
- Analizar el impacto ambiental de las emisiones al aire que producen las celdas de combustible de óxido sólido en el momento de su funcionamiento mediante revisión bibliográfica.
- Determinar las emisiones al aire que producen los buses urbanos de la Cooperativa 10 de agosto.
- Determinar las diferencias entre las celdas de combustible de óxido sólido y el combustible fósil convencional en los medios de transporte.

1.7 Hipótesis

El uso de celda de combustible de óxido sólido para la producción de energía en buses urbanos es técnico, económicamente y ambientalmente viable y factible.

2. Marco teórico

2.1 Estado del arte

Nesaraj (2009), mediante información técnica y bibliográfica recopilada, determinó que se puede comercializar SOFC de baja temperatura con componentes de celdas alternativas adecuadas para la generación de energía a granel con alta eficiencia energética. Los nanocompuestos basados en materiales de electrolitos y electrodos son adecuados para SOFC de baja temperatura, si la temperatura de funcionamiento de SOFC se reduce a 500°C, además los materiales de acero ferrítico barato con aditivos adecuados pueden considerarse como conectores entre celdas y el metanol puede considerarse como combustible.

Weimar, Chick, Gotthold, y Whyatt, (2013), se basaron en la recopilación de información económica dentro del mercado comercial, los costos de electricidad para un sistema de energía de SOFC de 270 kW fabricado en masa podría ser competitivo con las plantas de producción de energía centralizada con costos estimados en el rango de \$ 0.06 – 0.08/kWh basado en un modelo de costos usando un enfoque estándar para su fabricación de SOFC.

Rangel, Niño, y Ornelas, (2017) refieren el estudio denominado BATELLE propuesto por los Estados Unidos, el cual determino el costo para aplicaciones de sistemas de celdas SOFC con capacidad de 1 kW y 5 kW mediante aspectos técnicos, considerando un análisis de planta específico, bajo condiciones de operación y características concluyo que los costos con capacidad de 1 kW se derivan por las interconexiones con 34% del coste total de la celda y los costos con capacidad de 5 kW son atribuidos a la celda e interconexiones en proporciones de 35% y 44% del coste de la celda.

Rangel, Niño, y Ornelas, (2017) señalan el estudio realizado por Bloom Energy que mediante evaluaciones a la unidad compacta han desarrollado aplicación en sistemas estacionarios y mejoras tecnológicas logrando aumentar la oferta estándar de la compañía a partir de 100 kW a 200 kW.

Lane, (2016) menciona la investigación de la empresa automotriz Nissan, la creación del concepto e-Bio Fuel Cell está equipado con un sistema de celda de combustible SOFC que utiliza etanol al 100% o agua mezclada con etanol como combustible. Este concepto promete que la emisión de CO₂ será compensada logrando un ciclo de carbono natural que produce cero emisiones netas de CO₂. Además, Nissan asegura que esta Nissan e-Bio Fuel-Cell es capaz de recorrer más 600 km con una sola carga. Lo primero que hará será consumir la energía de sus baterías con 24 kWh de capacidad y posteriormente gastar los 30 litros de bio-etanol que caben en su depósito para llegar a esos más de 600 km.

Arenal, Angeles, y Ávalos (2010) mediante su investigación estima la reducción de costos del precio por kW, los cuales señala que en un motor de diesel en un tractor sería de U\$\$80-100/kW, en un motor de un vehículo familiar sería de U\$\$50/kW y por último la celda de combustible SOFC según el tamaño (kW) 1-300 tendría un costo de U\$\$800-1500/kW.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Fundamentos de las celdas de combustible SOFC

El primer modelo de una celda de combustible de óxido sólido (SOFC) fue presentado por Baur y Preis a finales de 1930, a pesar de ello no fue hasta 1950 que se reconoció su potencial como fuente de energía. Desde entonces ha habido avances considerables en este campo. Las celdas SOFC se basan en la generación de energía eléctrica a partir de una reacción química acompañado por

un intercambio de electrones. La reacción química que utiliza es la conocida como “RedOx”, ya que uno de los reactivos al recibir electrones se reduce que dando en un estado de oxidación (Castillo, 2018).

Estas celdas utilizan un sistema en donde los reactivos se los coloca en compartimentos independientes (ánodo y cátodo), así se acumulará compuestos iónicos en cada uno de ellos llevando a una cancelación inmediata de la reacción; los compartimentos se conectan entre sí a través de una membrana de intercambio iónico que permite el paso de compuestos cargados (reducidos y oxidados) y no el paso de los reactivos en su forma general neutralizándose entre sí con ellos la reacción sigue su curso produciendo energía eléctrica (Weimar, Chick, Gotthold, y Whyatt, 2013) (ver Figura 13).

2.2.1.1 Ley de Faraday

La ley de Faraday explica que la masa disuelta o depositada es proporcional al producto $I * t$, es decir la cantidad de electricidad (Q)

Ecuación 1.

$$m = K * Q$$

K una constante de proporcionalidad.

La cantidad de electricidad necesaria para un equivalente de una sustancia se utiliza la siguiente formula.

Ecuación 2.

$$Eq = K * F$$

Eq es el peso equivalente de la sustancia. Al reemplazar la ecuación 1 en la 2 se crea la siguiente formula

Ecuación 3.

$$m = \frac{Eq}{F} * Q$$

F es la constante universal de Faraday. El equivalente electrónico de la sustancia se expresa con la siguiente fórmula

Ecuación 4.

$$Eq = \frac{M}{n}$$

M es el peso molecular y n la valencia, Finalmente se reemplaza la ecuación 3 y Q en la ecuación 4.

Ecuación 5.

$$m = \frac{J * t}{F} * \frac{M}{n}$$

2.2.1.2 Ley de OHM

El voltaje que se necesita para una intensidad de corriente en el circuito es equivalente a la corriente y resistencia del circuito producida. $V = J * R$, V es el voltaje, J es la intensidad la cual en la celda de combustible SOFC es denominada densidad de la corriente y por último R que es equivalente a la resistencia del circuito al interior de la celda (Muñoz, 2016).

2.2.1.3 Curva de polarización

Desde la perspectiva de la investigación de Ludwig y Beckel (2004) menciona que una curva de polarización es la media estándar de la eficiencia o desempeño de una celda de combustible de Óxido Sólido, donde se incluye la información de las transferencias de resistencias óhmica, concentración y cinética, este coeficiente de transferencia se obtiene de la pendiente de Tafel de las curvas de polarización y es de gran importancia para la reacción electroquímica, debido a que hace posible la valorar el mecanismo de reducción y oxidación de la reacción.

El voltaje de salida de la celda incluye los sobrepotenciales de activación, óhmicas y concentración, como se ilustra en la siguiente ecuación:

$$V_{cell} = V_{Nernst} - \Delta V_{conc} - \Delta V_{ohmic}$$

Se usa la ecuación de Nernst en la celda de combustible de Óxido Sólido ya que esta es considerada un circuito abierto

$$V_{Nernst} = \frac{\Delta G}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{y_{O_2}^{0.5} y_{H_2}}{y_{H_2O}}\right)$$

En definitiva Ludwing y Beckel (2004) describen el sobrepotencial de activación con la ecuación de Butler-Volmer que tiene relación con el electrodo lento, el sobrepotencial o pérdida óhmica se da gracias a la resistencia al flujo de iones por el electrolito y electrones conductores por toda la celda y la pérdida de concentración tiene presencia en el momento en el que los reactivos se consumen de forma acelerada en el electrodo debido a la reacción electroquímica, y así tienen lugar los gradientes de concentración.

2.2.1.4 Sobrepotenciales

Las sobrepotenciales o polarizaciones producen pérdidas de voltaje de Nernst y ocasionan una baja en la eficiencia de la celda de combustible de SOFC. Se conocen tres sobrepotenciales; Pérdida óhmica (ΔV_{ohm}), pérdida de activación (ΔV_{act}) y Pérdida de concentración (ΔV_{con}) (Ludwing y Beckel, 2004).

2.2.1.5 Reacciones

Nigel, Bove, y Puzs (2006) mencionan en su investigación que las reacciones químicas con mayor importancia que se producen al interior de la celda son las reacciones de conversión, descomposición, desplazamiento y disociación; las reacciones se dan según el tipo de combustible utilizado en el dispositivo, como se mencionó anteriormente en este estudio el combustible utilizado es el gas de síntesis obtenido en la gasificación de la biomasa, este tipo de dispositivos tiene una selectividad por el hidrógeno como combustible debido a su reactividad, la cual facilita la conversión de energía.

Las reacciones de reformado de hidrocarburos y desplazamiento del agua se dan en el canal de flujo de la celda combustible SOFC a causa del tipo de combustible que se es empleado, existen cuatro reacciones que se dan comúnmente en la celda (Nigel, Bove, y Puzs, 2006) (ver Tabla 19).

Según las investigaciones de Nigel, Bove, y Puzs (2006) la reacción de conversión conlleva a la obtención de la energía eléctrica, teniendo como reactivo el combustible empleado en la pila de combustible de óxido sólido (SOFC) el cual puede ser hidrógeno como se ilustra en la Tabla 20. Las reacciones de descomposición o reformado de hidrocarburos aumenta la concentración de hidrógeno en la celda, las reacciones de desplazamiento aportan de igual forma a la concentración de hidrógeno, teniendo el monóxido de carbono como reactivo.

Las reacciones de disociación se deben evitar, puesto que el carbono presente en la reacción como producto de la misma es un compuesto que depositándose sobre este perjudica el catalizador, bloqueando y provocando fallos en su funcionamiento (Nesaraj, 2009).

2.2.2 Funcionamiento de las celdas de combustible SOFC

Astearazan (2019), describe que las SOFC son celdas que operan con temperaturas elevadas (ca. 800-1000°C) y suelen fabricarse en configuraciones tubular, bipolar o planar. El electrolito es un cerámico sólido en base a zirconio estabilizado con itrio (YSZ). Como material anódico suele emplearse $CoZrO_2$ o $NiZrO_2$ y el cátodo $LaMnO_2$ dopado Sr , por las altas temperaturas estas celdas pueden operar con varios tipos de combustibles H_2 , gas natural, biogas, gas de carbón, etc.

2.2.3 Configuración de la celda de combustible SOFC

2.2.3.1 Ánodo

El ánodo es un electrodo de combustible en el cual se produce la reacción de oxidación, perdiendo electrones y aumentando su oxidación. Es el terminal positivo en contacto con el electrolito. El ánodo es un electrodo con estructura porosa entre 20-40%, con el fin de favorecer la difusión gaseosa mientras se aumenta la superficie electroactiva. El material más usado para el ánodo está basado en un metal/cerámico llamado Ni-YSZ, donde el Ni es el metal agregado como óxido (NiO) y tiene como función facilitar la conductividad eléctrica. El YSZ es el cerámico zirconio estabilizada con itria y facilita la conductividad iónica (Castillo, 2018).

2.2.3.2 Cátodo

Castillo (2018) hace referencia que el cátodo es un electrodo en el cual produce la reacción de reducción, donde gana electrones formando se la reducción. El material más común para el cátodo es el LSM para aumenta la conductividad electrónica. El LSM ($La_{0.65}Sr_{0.30}MnO_3$) basado con el material zirconio (YSZ) debido a su alta conductividad eléctrica, estabilidad química térmica y compatibilidad con el electrodo anterior (ánodo) la estructura porosa en el cátodo es de importancia para asegurar una elevada velocidad de transporte de masa de los compuestos que reaccionan y aumentan la cantidad de sitios activos.

2.2.3.3 Electrolito

El electrolito es un conductor iónico en la cual los iones de oxígeno se reducen en el cátodo pasando posteriormente por el electrolito donde se da la reacción electroquímica, siguiendo hasta el ánodo para combinarse con moléculas de hidrógeno formando agua y otros gases (Castillo, 2018).

Según Castillo (2018), el electrodo divide al cátodo del ánodo. Para disminuir las pérdidas de corriente debe ser denso para que los gases no se mezclen, presentar una conductividad iónica alta y conductividad electrónica nula. El material más usado del electrolito es zirconio estabilizado con itria (YSZ).

2.2.3.4 Canal de flujo

El canal de flujo distribuye el hidrógeno que entra a la celda a través del ánodo y se moviliza hasta el electrolito en el cual se produce la reacción. Limita con el cátodo o ánodo para el agente oxidante o reductor respectivamente (Asteazarán, 2019).

Un canal de combustible directamente orientado hacia el ánodo, un conjunto de canales oxidantes directamente enfrentados a él cátodo, y una interconexión que conecta el cátodo de la celda con el ánodo de la siguiente celda en series eléctricas, para aumentar la tensión (Castillo, 2018) (ver Figura 14).

Asteazarán (2019) menciona que los canales de flujo del combustible se dividen en dos, del gas de síntesis y del agente oxidante. El canal de flujo del gas de síntesis enfrenta al ánodo movilizándolo el hidrógeno o el gas síntesis, este canal hace posible la interacción entre el fluido y el electrolito en la cual se da la reacción electroquímica. El fluido fluye a través del canal de flujo del agente oxidante que está entre el electrolito y el cátodo para proporcionar oxígeno al sistema iniciando la disociación.

2.2.4 Diseño de la celda de combustible SOFC

Las celdas de combustible de óxido sólido constan con diferentes geometrías para su fabricación debido a la ausencia de componentes líquidos en el dispositivo, estas geometrías mejoran su comportamiento y capacidad. Las configuraciones geométricas principales son planar y tubular (Milewski, 2010).

2.2.4.1 Configuración Tubular

Milewski (2010) cita el desarrollo de la configuración tubular desde finales de 1950. Mencionando que al operar entre 900-1,000 °C, los tubos largos tienen una resistencia eléctrica relativamente alta, pero son fáciles de sellar. Algunos diseños tubulares eliminan la necesidad de sellos y permiten la expansión térmica. Varias unidades tubulares son actualmente operando en el campo, con decenas de miles de horas de funcionamiento demostrado (Ver Figura 15).

Cabe destacar de la investigación de Milewski (2010) que, en la configuración tubular, el tubo de cátodo se fabrica primero con una porosidad del 30 al 40% para permitir un transporte rápido del reactivo y gases del producto a la interfaz cátodo - electrolito donde ocurren las reacciones electroquímicas. Se aplica el electrolito a los tubos del cátodo por deposición de vapor electroquímica (EVD). En esta técnica, el vapor de cloruro metálico apropiado se introduce en un lado de la superficie del tubo, y O_2 / H_2O es introducido en el otro lado (Ver Figura 16).

Milewski (2010) manifiesta que el combustible fluye por el exterior del tubo, el aire se alimenta a través de un fino tubo de suministro de aire de alúmina ubicado centralmente. El calor generado dentro la celda lleva el aire a la temperatura de funcionamiento. El aire luego fluye a través de la celda de combustible respaldando al extremo abierto (Ver Figura 17).

Por otra parte, Milewski (2010) alude que el aire y combustible no utilizado de la mezcla de escape del ánodo son instantáneamente quemados y la salida de la celda es por encima de 1000 ° C. Esta combustión proporciona calor adicional para precalentar el tubo de suministro de aire. Por lo tanto, la configuración de la celda de combustible de óxido sólido tubular no requiere sellos de alta temperatura.

2.2.4.2 Configuración Planar

Dentro del análisis de Milewski (2010) explica la configuración planar se compone de placas cerámicas planas y delgadas. Eso opera a 800°C o incluso por debajo. Utiliza Las láminas de electrolito ultrafino las cuales manejan baja resistencia eléctrica para poder lograr una alta eficiencia. Operación a temperatura más baja que el SOFC tubular permite materiales menos exóticos de construcción, por lo tanto, ahorro de costos (Ver Figura 18).

De este modo Milewski (2010) espeta que, en la configuración planar, el ánodo, electrolito y cátodo forman capas delgadas y planas que son sinterizados juntos, y luego separados por placas bipolares similares al diseño de otros tipos de pilas de combustible. Las placas pueden ser rectangulares, cuadrados, circulares o segmentados en serie y pueden ser múltiple externa o internamente. Muchos de los diseños planos utilizan placas bipolares metálicas y operan a una temperatura más baja que el diseño tubular totalmente cerámico (Ver Figura 19).

2.2.5 Aplicaciones de la celda de combustible SOFC

Conforme el artículo presentado por Rangel, Niño, y Ornelas (2017), las celdas de combustible tipo SOFC son un tipo de tecnología viable a futuro, diversas entidades gubernamentales han realizado trabajos de investigación, así como entidades privadas y academias, en busca de optimizar el potencial de estas tecnologías de acuerdo a las necesidades planteadas, dentro de las áreas de influencia las SOFC actualmente se desarrollan en:

Plantas estacionarias de generación de energía eléctrica.

Transporte.

Defensa.

Aeronáutica.

Con respecto al uso de las celdas de combustible de óxido sólido (SOFC) en el área de los medios de transporte, Boldrin y Brandon (2019) aseguran que debido a sus altas temperaturas y sus componentes cerámicos frágiles, las celdas de combustible de óxido sólido (SOFC) pueden no parecer la opción obvia para una fuente de energía para aplicaciones de transporte. Sin embargo, en los últimos años, los avances en materiales y diseño de celdas han comenzado a mitigar estos problemas, esto por la calidad de materiales para soportar las altas temperaturas, lo que lleva a que las ventajas de las SOFC, como un combustible con gran versatilidad y la alta eficiencia que puede ser explotada en los medios de transporte (Gutiérrez, 2015).

2.3 Marco legal

2.3.1 Constitución de la República del Ecuador (2008)

(Asamblea Constituyente, 2008)

Art. 14.- Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak kawsay*.

Se declara de interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados (pág. 13).

Art. 15.- El Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto. La soberanía energética no se alcanzará en detrimento de la soberanía alimentaria, ni afectará el derecho al agua (pág.13).

Art. 66.- Se reconoce y garantizará a las personas:

27. El derecho a vivir en un ambiente sano, ecológicamente equilibrado, libre de contaminación y en armonía con la naturaleza (pág. 29).

Art. 83.- Son deberes y responsabilidades de las ecuatorianas y los ecuatorianos, sin perjuicio de otros previstos en la Constitución y la ley:

6. Respetar los derechos de la naturaleza, preservar un ambiente sano y utilizar los recursos naturales de modo racional, sustentable y sostenible.

Art. 413.- El Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas, de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua (pág. 83).

2.3.2 Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial

(Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial, 2018)

Art. 211.- Todos los automotores que circulen dentro del territorio ecuatoriano deberán estar provistos de partes, componentes y equipos que aseguren que no rebasen los límites máximos permisibles de emisión de gases y ruidos contaminantes establecidos en el Reglamento (pág. 50).

Art. 212.- Los importadores y ensambladores de automotores son responsables de que los vehículos tengan dispositivos anticontaminantes (pág. 50).

Art. 213.- Los vehículos usados, donados al Estado ecuatoriano, que ingresen al país legalmente, serán objeto de una revisión técnica vehicular exhaustiva y más completa que la revisión normal. En estos casos los centros de revisión técnico vehicular inspeccionarán el resto de sistemas mecánicos, transmisión y motor, bajo el mecanismo de revisión completa de cada unidad, desde el puerto de ingreso, previo a su desaduanización y matriculación (pág. 50).

2.3.3 Ley Orgánica de Eficiencia Energética (2019)

(Ley de Eficiencia Energética, 2019)

Art. 2.- Declaración de Interés Nacional. - Se declara de interés nacional y como política de Estado, el uso eficiente, racional y sostenible de la energía, en todas sus formas, como elemento clave en el desarrollo de una sociedad solidaria, competitiva en lo productivo y preocupada por la sostenibilidad económica y ambiental. El Plan Nacional de Desarrollo debe contemplar dentro de sus procesos y lineamientos, elementos destinados específicamente a la política nacional de eficiencia energética y al uso racional de la energía (pág. 3).

Art. 3.- En materia de eficiencia energética, son principios de la presente Ley, todos los que emanan de la Constitución de la República, de los instrumentos internacionales ratificados por el Ecuador, de leyes de la materia y los contemplados en esta Ley:

1. Racionalización del consumo energético y preservación de recursos energéticos, renovables y no renovables;
2. Mejoramiento de la productividad y la competitividad a través de la reducción de costos por uso eficiente de la energía;
3. Promoción de energía limpia y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero;

4. Fomento de una cultura nacional orientada al uso eficiente de los recursos energéticos; y,
5. Transparencia e información adecuada para los consumidores y tomadores de decisión (pág. 3).

2.3.4 Ley de prevención y control de la contaminación ambiental

(Ley de prevención y control de la contaminación ambiental, 2004)

Art. 1.- Queda prohibido expeler hacia la atmósfera o descargar en ella, sin sujetarse a las correspondientes normas técnicas y regulaciones, contaminantes que, a juicio de los Ministerios de Salud y del Ambiente, en sus respectivas áreas de competencia, puedan perjudicar la salud y vida humana, la flora, la fauna y los recursos o bienes del estado o de particulares o constituir una molestia (pág. 1).

Art. 2.- Para los efectos de esta Ley, serán consideradas como fuentes potenciales de contaminación del aire: a) Las artificiales, originadas por el desarrollo tecnológico y la acción del hombre, tales como fábricas, calderas, generadores de vapor, talleres, plantas termoeléctricas, refinerías de petróleo, plantas químicas, aeronaves, automotores y similares, la incineración, quema a cielo abierto de basuras y residuos, la explotación de materiales de construcción y otras actividades que produzcan o puedan producir contaminación; y, b) Las naturales, ocasionadas por fenómenos naturales, tales como erupciones, precipitaciones, sismos, sequías, deslizamientos de tierra y otros (pág. 1).

Art. 3.- Se sujetarán al estudio y control de los organismos determinados en esta Ley y sus reglamentos, las emanaciones provenientes de fuentes artificiales, móviles o fijas, que produzcan contaminación atmosférica. Las actividades tendientes al control de la contaminación provocada por fenómenos naturales, son atribuciones directas de todas aquellas instituciones que tienen competencia en este campo (pág. 1).

Art. 4.- Será responsabilidad de los Ministerios de Salud y del Ambiente, en sus respectivas áreas de competencia, en coordinación con otras Instituciones, estructurar y ejecutar programas que involucren aspectos relacionados con las causas, efectos, alcances y métodos de prevención y control de la contaminación atmosférica (pág.2).

Art. 5.- Las instituciones públicas o privadas interesadas en la instalación de proyectos industriales, o de otras que pudieran ocasionar alteraciones en los sistemas ecológicos y que produzcan o puedan producir contaminación del aire, deberán presentar a los Ministerios de Salud y del Ambiente, según

corresponda, para su aprobación previa, estudios sobre el impacto ambiental y las medidas de control que se proyecten aplicar (pág.2).

2.3.5 Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático

(Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, 1992)

Art. 3.- Las Partes, en las medidas que adopten para lograr el objetivo de la Convención y aplicar sus disposiciones, se guiarán, entre otras cosas, por lo siguiente:

1. Las Partes deberán proteger el sistema climático en beneficio de las generaciones presentes y futuras, sobre la base de la equidad y de conformidad con sus responsabilidades comunes pero diferenciadas y sus respectivas capacidades. En consecuencia, las Partes que son países desarrollados deberán tomar la iniciativa en lo que respecta a combatir el cambio climático y sus efectos adversos.

3. Las Partes deberían tomar medidas de precaución para prever, prevenir o reducir al mínimo las causas del cambio climático y mitigar sus efectos adversos. Cuando haya amenaza de daño grave o irreversible, no debería utilizarse la falta de total certidumbre científica como razón para posponer tales medidas, tomando en cuenta que las políticas y medidas para hacer frente al cambio climático deberían ser eficaces en función de los costos a fin de asegurar beneficios mundiales al menor costo posible. A tal fin, esas políticas y medidas deberían tener en cuenta los distintos contextos socioeconómicos, ser integrales, incluir todas las fuentes, sumideros y depósitos pertinentes de gases de efecto invernadero y abarcar todos los sectores económicos. Los esfuerzos para hacer frente al cambio climático pueden llevarse a cabo en cooperación entre las partes interesadas (págs. 4 y 5).

3. Materiales y métodos

3.1 Enfoque de la investigación

3.1.1 Tipo de investigación

3.1.1.1 Investigación Documental

El tipo de investigación que se utilizó en la elaboración de la tesis es la investigación documental debido a que la información adquirida será seleccionada de documentos oficiales, estudios, artículos científicos y bibliografía general referente a la tecnología de celdas de combustibles de óxido sólido en buses urbanos.

Mediante la investigación documental se recolectó información para la elaboración de la tesis, cumpliendo con todos los objetivos que permiten analizar económica, técnica y ambientalmente el uso de celdas de combustible de óxido sólido como fuente de energía en buses urbanos.

3.1.2 Diseño de investigación

La investigación que se realizó no es experimental, es decir, las variables no fueron manipuladas directamente ni ningún tipo de resultado fue obtenido a través de experimentos controlados. En este caso, se consultó fuentes bibliográficas de autores previos, basándose en sus hallazgos y visión con respecto al análisis de celdas de combustible de óxido sólido como fuentes de energía alterna.

Las actividades que se realizaron estuvieron conformadas en 5 fases, en la primera fase se evaluó la problemática que causa el uso de combustibles fósiles en buses urbanos en la actualidad y la alternativa de usar una celda de combustible de óxido sólido para su reemplazo, seguida de la segunda fase donde se caracterizó el funcionamiento, desempeño, composición y configuración es decir la parte técnica de las celdas de combustible de óxido sólido.

La tercera fase correspondió a la caracterización de los costos fijos, capital fijo, costos de inversión y costos de operación del uso de la celda de combustible de óxido sólido y la viabilidad económica para su aplicación en buses urbanos y a su vez determinar el consumo de combustibles fósiles de las tres rutas principales de la Cooperativa de transporte urbano 10 de agosto, la cuarta fase se basó en estimar el impacto ambiental que causarían las celdas de combustibles de óxido sólido referentes a las cantidad y tipo de emisiones que liberan al aire y el impacto ambiental de las emisiones de los buses de transporte urbano de la Cooperativa 10 de agosto.

Por último, en la fase cinco, se realizó una comparativa entre los combustibles fósiles y las celdas de combustible de óxido sólido teniendo en cuenta los criterios de factibilidad técnica, viabilidad económica e impacto ambiental de ambas.

3.2 Metodología

3.2.1 Variables

Se utilizarán las siguientes variables.

3.2.1.1 Variable independiente

- Celda de combustible de óxido sólido (SOFC)
- Ánodo
- Cátodo
- Electrolito

3.2.1.2 Variable dependiente.

- Eficiencia combustible/electricidad kw
- Costo \$/kw
- Emisiones de CO,CO₂, NO_x y SO_x

3.3.2 Tratamientos

No se realizó ningún tipo de tratamiento, ni los datos e información recopilados fueron expuestos a tratamientos de ningún tipo, fueron analizadas mediante cálculos que permitan la comparación entre la energía generada mediante celdas de combustible de óxido sólido y la energía fósil convencional. La tesis se basará netamente en información recopilada de diferentes fuentes bibliográficas.

3.3.3 Diseño experimental

Este proyecto fue de carácter no experimental, se basó en la recolección de datos bibliográficos para elaborar un presupuesto de construcción y así se pudo analizar tanto económica –técnica y ambientalmente la efectividad en la utilización de celdas de combustible de óxido sólido como fuente de energía en buses urbanos.

3.3.4 Recolección de datos

La recolección de datos se llevó a cabo mediante la aplicación de métodos que tuvieron como finalidad obtener información acerca del tema, la base principal fue la revisión bibliográfica de artículos científicos extraídos de Scielo y Springer, editoriales de literatura científica como Elsevier, documentos, trabajos científicos de repositorios de universidades nacionales e internacionales, informes, leyes, entre otros de los cuales se recopilará la información necesaria para el proyecto.

3.3.4.1 Recursos

Tabla 1. Recursos utilizados para la elaboración del proyecto

Recursos Humanos utilizados/ Logística	Valoración Económica (\$)
Asesoría Técnica	-
Asesoría Estadística	-
Transporte	6,00
Materiales e Insumos	
Internet	40,00
Impresiones	10,00
Encuadernación	-

Cumbe e Intriago, 2021

3.3.4.2 Métodos y técnicas

La información técnica fue recolectada mediante bibliografía, utilizando buscadores como Scielo, Springer, Google Académico, entre otros. Mediante la recuperación de la información, se seleccionaron las variables esenciales a revisar para lograr el uso óptimo y viable de una celda de combustible de óxido sólido, incluyendo el funcionamiento, desempeño, configuración, diseño, composición tamaño y aplicaciones de la celda de óxido sólido.

Después de realizar el análisis técnico mediante la recuperación de información ya existente, el análisis económico se realizó de manera similar donde se tomó en cuenta bibliografía basada en el capital fijo, los costos fijos, la inversión total y el costo de operación necesario para el funcionamiento óptimo de las celdas de combustible de óxido sólido. En este punto también se determinó el consumo de combustibles fósiles de los buses urbanos de la Cooperativa 10 de agosto.

El análisis ambiental se realizó mediante la recopilación de datos de estudios que evaluaron el impacto ambiental y aspectos ambientales, principalmente de las

emisiones de los gases CO , CO_2 , NO_x y SO_x hacia el aire que generan las celdas de combustible de óxido sólido durante su funcionamiento y manufactura con el objetivo de analizar el impacto ambiental de esta alternativa de energía ya mencionada. También se analizará de manera similar el impacto ambiental que generan los buses urbanos de la Cooperativa 10 de agosto enfocados en el tipo y cantidad de emisiones que generan.

Esta información se utilizó para realizar una comparación del impacto ambiental que genera el uso de combustible fósil y el uso de celdas de combustible de óxido sólido como fuente de energía.

Una vez obtenida la información, esta se utilizó para comparar la energía producida por las celdas de combustible de óxido sólido y la energía producida por combustibles fósiles en buses urbanos en los ámbitos técnico, económico y ambiental.

3.3.5 Análisis estadístico

El análisis estadístico de este proyecto es descriptivo debido a que se basa en datos bibliográficos que serán evaluados mediante cálculos de eficiencia y potencia, para analizar la viabilidad y factibilidad de la utilización de energías alternas renovables como las celdas de combustible, técnica, económicamente y ambientalmente.

Los datos han sido recolectados de varias fuentes bibliográficas de temas relacionadas con la generación de energía y empresas las cuales han adaptado las celdas de energía como su fuente de energía.

La eficiencia de una celda de combustible, se evalúa sobre el valor de energía total correspondiente a la celda, en este caso la energía libre de gibbs y la energía libera por las transferencias de calor, como es en la entalpia. La eficiencia de una

celda de combustible definida por el contenido calórico ΔH , es obtenido dividiendo el trabajo máximo de la celda.

$$\eta_{\text{Celda de combustible}} = \frac{\Delta G}{\Delta H}$$

Para obtener el cálculo del cambio de la energía libre de gibbs es $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$, en donde se le resta la temperatura (T) a el cambio de entalpia (ΔH). Para calcular el cambio de entalpia se obtiene del valor del calor de reacción a presión constante (Q_p), por lo que $\Delta H = Q_p$.

$$\eta_{\text{Celda de combustible}} = \frac{157900}{241818} = 0.653 = 65.3\%$$

Al comparar con la eficiencia que brindan los motores de combustión interna, la eficiencia de una celda de combustible SOFC es mucho mayor (ver Figura 1).

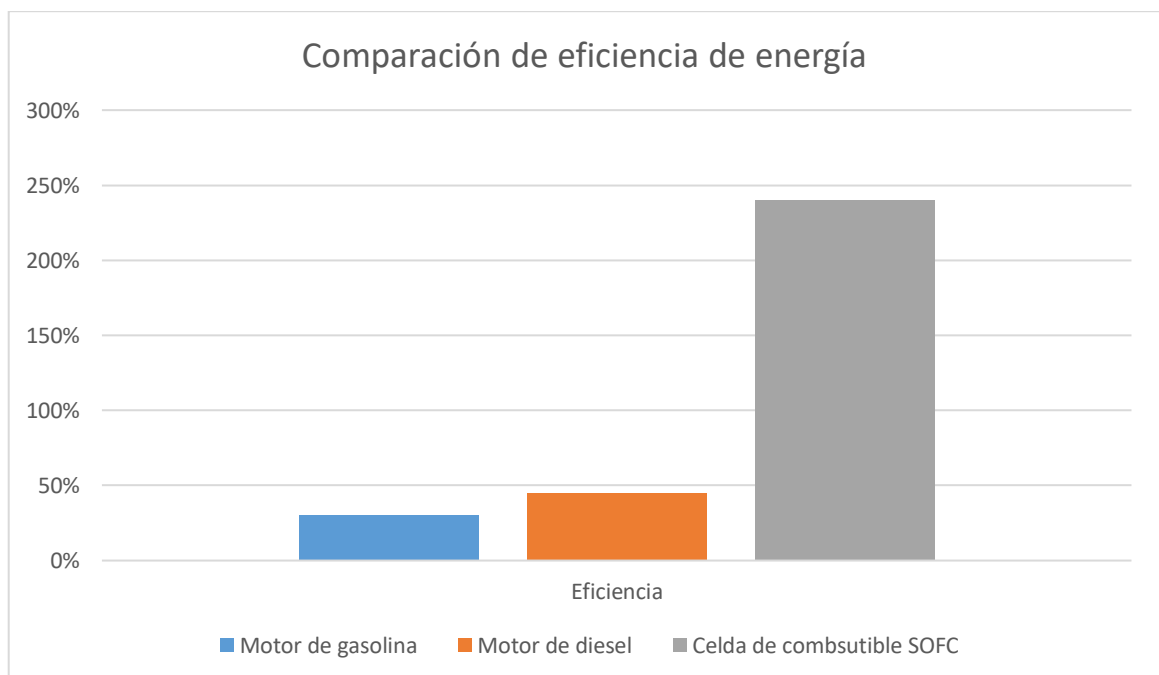


Figura 1. Comparación de eficiencia de energía
Cumbe e Intriago, 2021

Para el caso de la potencia, se calcula la capacidad de trabajo por unidad de tiempo, esto se expresa como el producto del voltaje generado en la salida de la celda por la intensidad máxima o total.

$$P_{\text{Celda de combustible}} = V * t_{\text{total}} * A$$

Donde:

- V: producto del voltaje
- t_{total} : Unidad de tiempo
- A: área de contacto

El voltaje depende de variables como la temperatura, presión, difusividad del tipo de material de los electrodos y la densidad de corriente, siendo estos dos últimos de mayor importancia para la obtención del potencial de la celda. Por otra parte, se asume que la corriente total como el promedio extraído de la celda a lo largo del paso del combustible a través del canal de flujo, tomando un valor de $1500 \frac{A}{m^2}$.

El área de contacto corresponde al área superficial del electrodo que permea el hidrógeno hasta el interior de la celda.

$$A_v = \pi * \text{seno}^2\theta * r_{el}^2 * n_t * n_{el} * n_{io} * \frac{Z_{el} * Z_{io}}{Z} * P_{el} * P_{io}$$

Donde:

- r_{el} : radio de partículas que conduce electrones. Es de $0.1\mu m$.
- n_t : número total de partículas por unidad de volumen.
- n_{el}, n_{io} : fracción numérica de las partículas conductoras de electrones e iones.
- Z: numero de coordinación total promedio de la partícula en el electrodo.

- Z_{el}, Z_{io} : numero de coordinación de la partícula conductora de electrones e iones.
- P_{el}, P_{io} : probabilidad de una partícula conductora de atraer un electrón o ion al final de su estructura.
- θ : Angulo de contacto entre la partícula y el ion o electrón transferido.

Cálculo de la fracción numérica de una partícula conductora de electrones.

$$n_{el} = \frac{\varphi}{\left[\varphi + \left(\frac{(1-\varphi)}{\frac{r_{io}}{r_{el}}} \right)^3 \right]}$$

$$n_{io} = 1 - n_{el}$$

Donde:

- φ : fracción volumétrica del electrodo que permite la conducción de partículas (electrones).
- r_{io} : radio de las partículas conductoras de iones.
- Calculo para obtener los números de coordinación.

$$Z_{el} = 3 + \frac{Z - 3}{\left[n_{el} + (1 - n_{el}) \left(\frac{r_{io}}{r_{el}} \right)^2 \right]}$$

$$Z_{io} = 3 + \frac{(Z - 3) * \left(\frac{r_{io}}{r_{el}} \right)^2}{\left[n_{el} + (1 - n_{el}) \left(\frac{r_{io}}{r_{el}} \right)^2 \right]}$$

Calculo para la obtener la probabilidad de partículas de atracción de iones y electrones.

$$P_{el} = [1 - (4 - Z_{el-el})^{2.5}]^{0.4}$$

$$P_{io} = [1 - (4 - Z_{io-io})^{2.5}]^{0.4}$$

Donde:

- Z_{el-el} : número de coordinación promedio entre las partículas electrónicas.
- Z_{io-io} : número de coordinación promedio entre las partículas iónicas.

Calculo para obtener el número de coordinación entre las partículas electrónicas y partículas iónicas.

$$Z_{el-el} = \frac{n_{el} * Z_{el}^2}{Z}$$

$$Z_{io-io} = \frac{n_{io} * Z_{io}^2}{Z}$$

Para obtener el área superficial basta con definir el número de coordinación, y los radios de partícula definidos para los iones y electrones, al igual que la porosidad que posee el ánodo, la fracción volumétrica del electrodo y el ángulo de contacto.

En consecuencia, el área requerida para el funcionamiento en la transferencia de iones y electrones es: $A = 0.035m^2$, siendo así, obtenidos todos los datos el valor de potencia de la celda de combustible SOFC es:

$$P_{Celda\ de\ combustible} = 0.52 * 1500 \frac{A}{m^2} * 0.035m^2 = 27.3\ W.$$

Las celdas de combustible tienen una potencia que puede llegar a 200 Kw, siendo no tan alta en comparación de un motor que trabaja con diésel, pero esto es debido a el área de requerimiento de la transferencia de iones y electrones. A mayor área mayor va a llegar a ser la operación de la potencia (Fuquene y Lopez, 2017) (ver Figura 2).

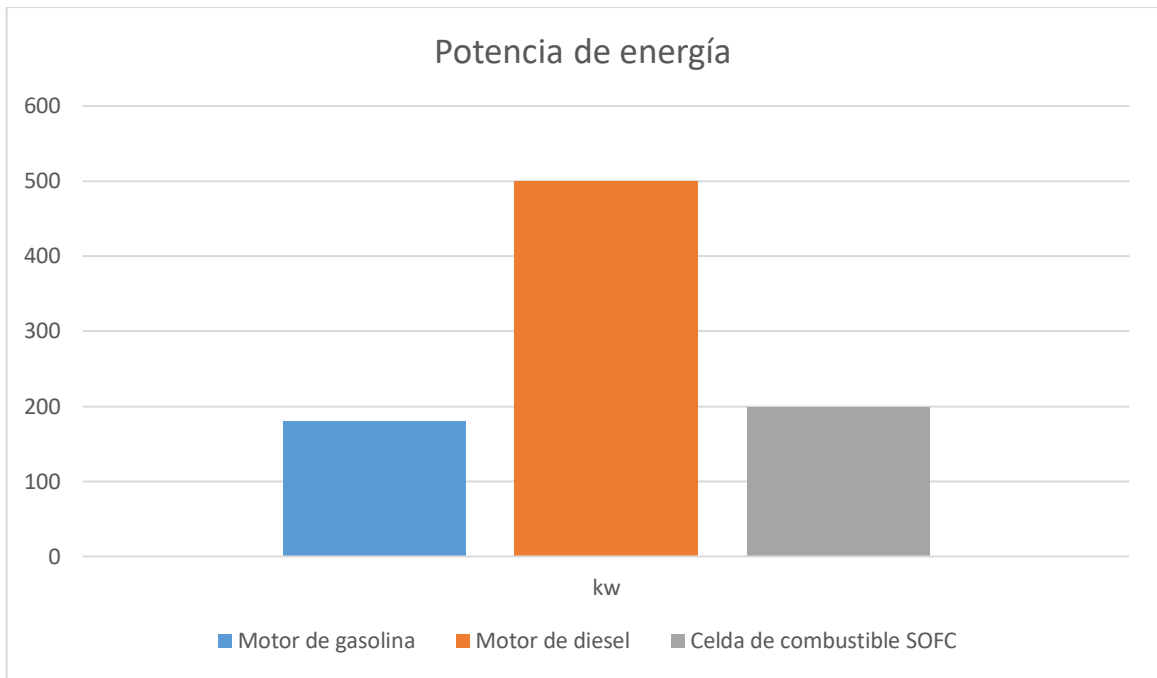


Figura 2. Comparación de la potencia de energía
Cumbe e Intriago, 2021

4. Resultados

4.1 Análisis de la información existente para lograr un conocimiento detallado técnico - económico del uso de celdas de combustible de óxido sólido (SOFC) en buses urbanos de una cooperativa de transporte.

Hoy en día a pesar de las innovaciones en el sector de transporte público en el Ecuador, todavía este requiere seguridad energética futura, mejorar la calidad del aire, disminuir gases de efecto invernadero y mejorar en la competitividad industrial y tecnológica. Para esto, las celdas de combustible se visualizan como un prometedor vector de energía limpia (Contreras, Fortuna, Ponce, y Smit, 2011).

Respecto al análisis técnico estudios realizados por previos han utilizado Advisor Powerful Vehicle Simulator Tool, el cual permite exponer distintos prototipos implementando celdas de combustible SOFC en vehículos con el objetivo de determinar si existe el suficiente conocimiento de ingeniería para efectuar un proyecto como es la implementación de una celda de combustible SOFC en un autobús urbano (Gutiérrez, 2015).

Conforme el estudio de Gutierrez (2015) al emplear el programa Advisor, utilizó el sistema métrico como sistema de unidad y dentro del programa selecciono el truck_menus debido a que contiene móviles del tipo pesado como lo son los autobuses. Posteriormente se efectuaron las siguientes selecciones para construir el vehículo (ver Figura 3).

Configuración del tren motriz, se utilizó la configuración de celdas de combustible SOFC (fuel_cell).

- El autous a utilizar fue orion VI (VEH_ORIONVI.m) características: 12.19m*2.59m; Combustible: Diésel.; Pasajeros: 60 a 80
- Transmisión ideal (TX_1SPD_IDEAL)

- Bateria de ión-litio (ESS_LI7_temp.m)
- Motor de imanes permanentes de 58KW (MC_PM58-58KW)
- Sin escape para celda de combustible SOFC (EX_FUELCELLSOFC_NULL).m
- ACC_SER_HYBRID_BUS, series hybrid transit bus vehicle accessory loads
- Tanques: 9 cilindros de 205 litros cada uno (46.125 l/kg de H₂) (12 galones/kg de H₂), va a tener una capacidad de almacenamiento de 40 kg de H₂
- Peso de la celda: 96kg

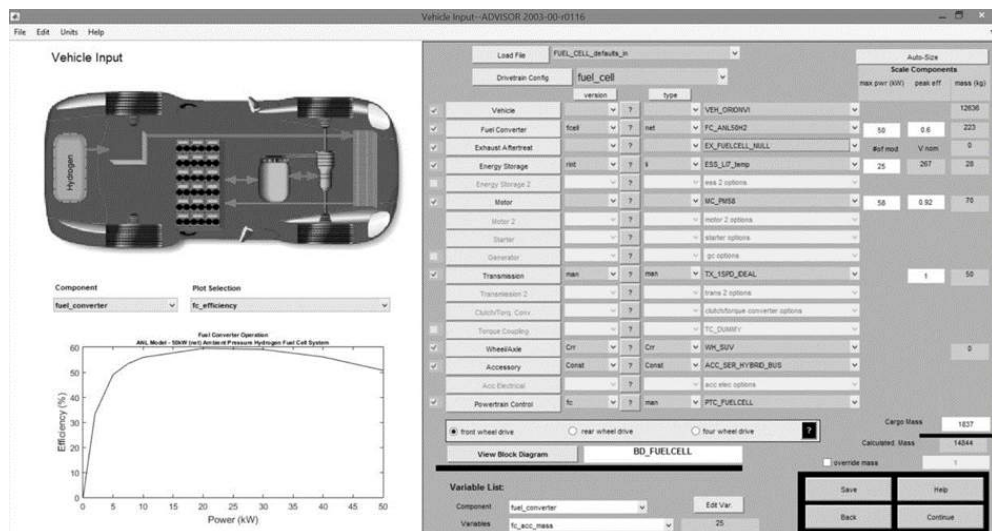


Figura 3. Datos por ingresar en la simulación del vehículo Gutiérrez, 2015

En conclusión, se seleccionó un intervalo de 10 segundos para el ciclo de manejo y así poder realizar la simulación. En la siguiente grafica se muestra la configuración (CYC_TEST_10sec) del intervalo de tiempo a poner en marcha la simulación del funcionamiento del vehículo (ver Figura 4).

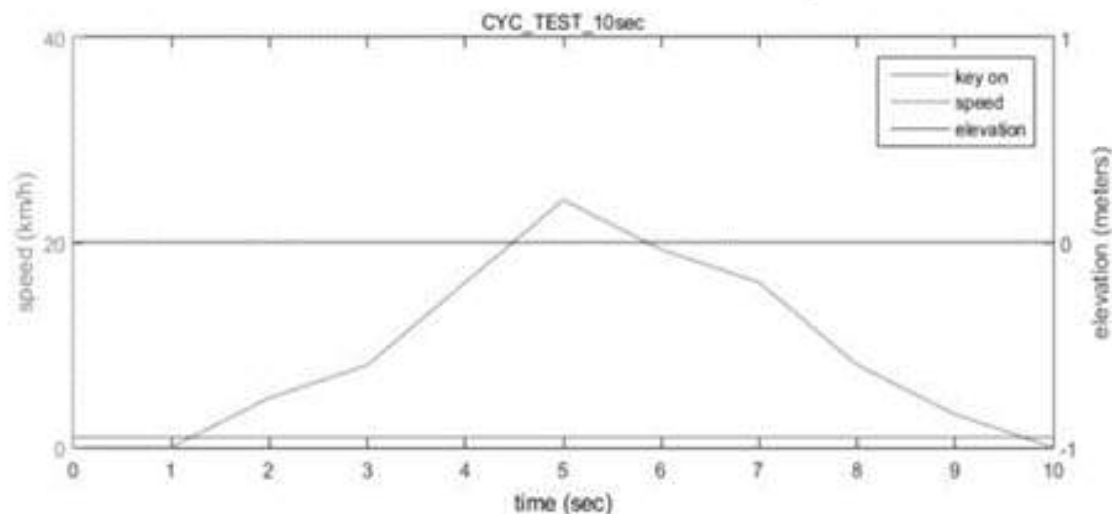


Figura 4. Configuración del ciclo de manejo en un intervalo de 10 segundos
Gutiérrez, 2015

La simulación durante ese período de tiempo, mostró como primer resultado un pico de velocidad máxima de 24,4 km/h los primeros 10 segundos, sobrepasando los 20 km/h que se usó de referencia en la simulación, demostrando la efectividad de la celda de SOFC con respecto a su velocidad.

Siguiendo con el análisis económico el costo actual de un autobús diésel es de \$360,000, sin requisitos de capital adicionales significativos a lo largo de su vida útil. Se asumió un valor residual de \$20,000 para la disposición del autobús después de 15 años de operaciones. Los autobuses a gas natural (GNC) cuestan \$ 414,000 cada uno, con pruebas de cilindros requeridas para ser realizado cada tres años. Se supone un valor residual de \$ 15 000 (Cockroft y Owen, 2014).

Según el trabajo de investigación de Cockroft y Owen (2014) el costo de los autobuses con celda de combustible SOFC es de alrededor de \$2.0 millones cada uno. El costo de la celda de combustible es aproximado el 85% del total del vehículo (ver Tabla 2).

Tabla 2. Costos de referencias de Buses urbanos

Costo Actual		
	Precio	Valor Residual
Autobús Diésel	\$360,000	\$20,000
Autobús GNC	\$414,000	\$15,000
Autobús Celda de combustible SOFC	\$2 millones	0

Cumbe e Intriago, 2021

Además, Cockroft y Owen (2014) mencionan que la construcción de la celdas de combustible y la prueba del cilindro cada tres años. Se empleó un valor residual de cero. Aunque la construcción de un combustible de hidrógeno sería necesaria una instalación de almacenamiento y llenado de combustible (ver Tabla 3).

Tabla 3. Especificaciones económicas y técnicas para el autobús con celda de combustible SOFC

Costos de mantenimiento	\$13.500 debido a fallos eléctricos		
Consumo de energía	11.99 MJ/km		
Consumo de Hidrogeno	\$5/kg H2 (viento / electrólisis)		
Emisiones (g/km)	Producción de combustible:	Metano de vapor Reforma (SMR) con	Producción de combustible:
	Combustión	CO2	Eólica terrestre y electrólisis
CO	0	0,14	0,09
NOx	0	0,64	0,47
NMHC	0	0,4	0,44
PM10	0	0,0081	0,0029
CO2	0	99,8	95

Cockroft y Owen, 2014

Contreras, Fortuna, Ponce, y Smit (2011) en su trabajo de investigación manifiestan que se tiene que la estimación de la inversión inicial requerida para una planta de producción y suministro de hidrogeno en el año 2012 con un sistema de energía conectado a la red eléctrica fue de 2,211,600.30 USD y el

costo de la implementación de un autobús con celda de combustible SOFC es de 724.87 USD.

4.2 Valoración de la viabilidad técnica de la celda de combustible de óxido sólido como fuente de energía alterna en los buses urbanos por medio de revisión bibliográfica.

A continuación, se mostrarán los resultados en gráficos obtenidos por Advisor.

En la gráfica (ver Figura 5) podemos observar la potencia del motor utilizado en el intervalo de 10 segundos de simulación, desde los 7 segundo de utilización la potencia alcanzada fue de 4×10^4 Hp.

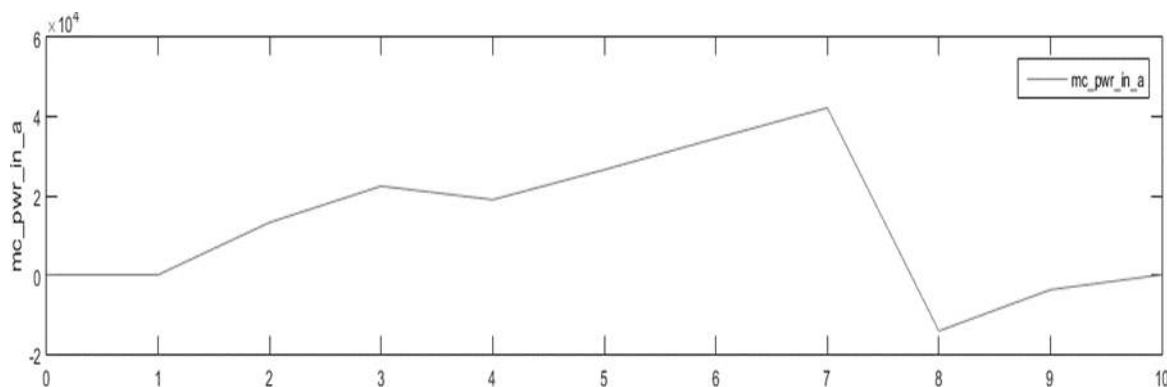


Figura 5. Potencia del motor de una celda de combustible SOFC
Gutiérrez, 2015

En la siguiente figura (ver Figura 6) se muestra la velocidad lograda utilizando 10 segundos de simulación, tenemos dos curvas las cuales nos muestran la velocidad máxima (cyc_kph_r) y la velocidad promedio (kpha). La velocidad máxima alcanzada en el intervalo de 10 segundos fue de 24.14km/h y la velocidad promedio alcanzada en el intervalo de 10 segundos fue de 14.84km/h.

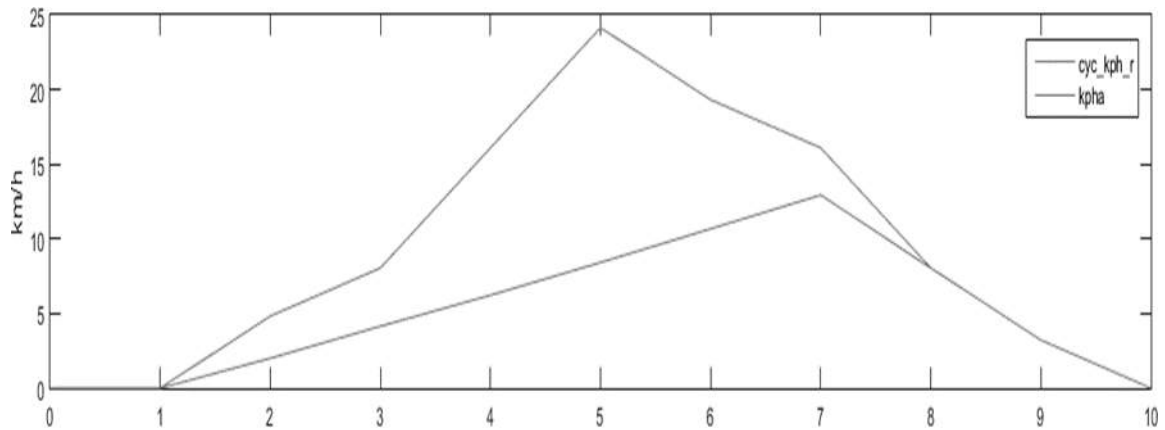


Figura 6. Velocidad obtenida de una celda de combustible SOFC
Gutiérrez, 2015

En el tercer gráfico (ver Figura 7) se puede comprobar que el autobús con la celda de combustible SOFC no produce emisiones ni en estado estacionario ni cuando arranca el vehículo.

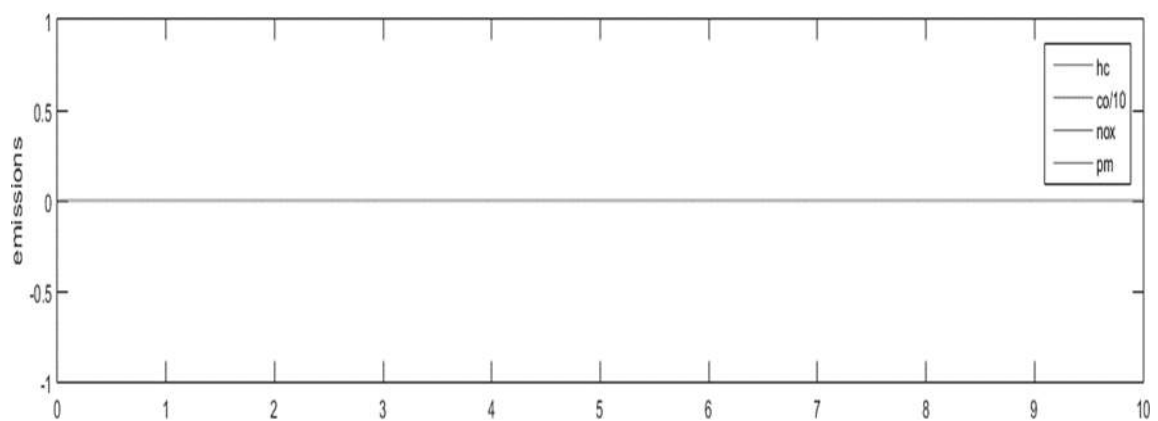


Figura 7. Emisiones emitidas por una celda de combustible SOFC
Gutiérrez, 2015

En el cuarto gráfico (ver Figura 8) podemos observar que entre el rango de 20kW y 30kW de potencia se desarrolla la mayor eficiencia.

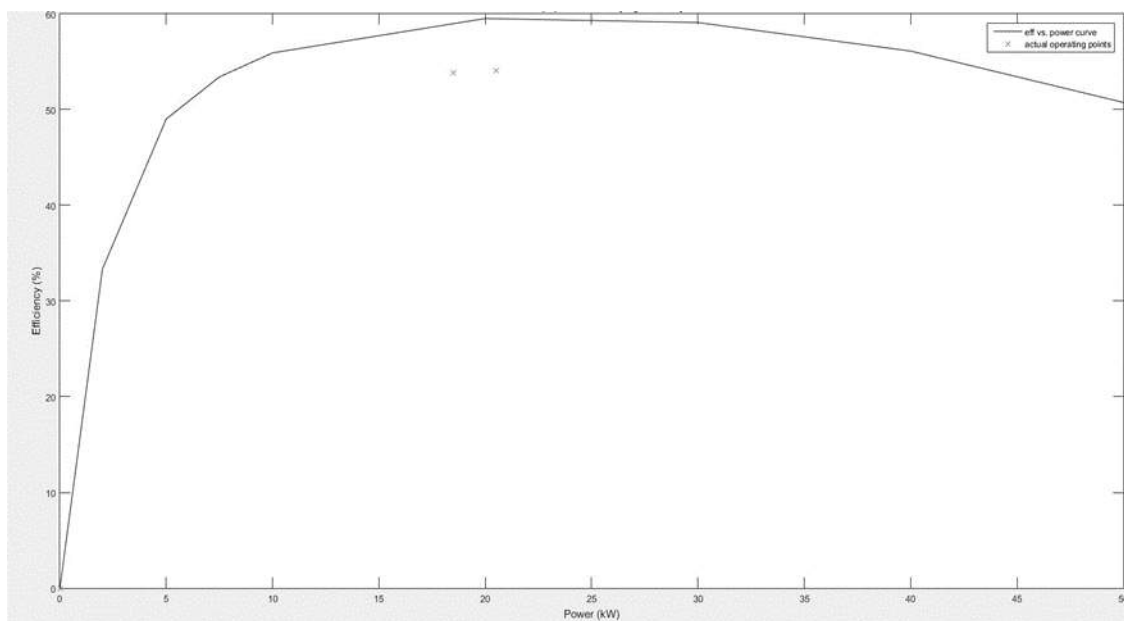


Figura 8. Eficiencia del motor desarrollada por una celda de combustible SOFC
Gutiérrez, 2015

4.3 Determinación del consumo de combustible fósil de las 3 principales rutas de los buses urbanos de la Cooperativa 10 de agosto.

4.3.1 Ruta R21

Una unidad o bus urbano de la ruta R21, realiza 6 vueltas y recorre 17,5 km por vuelta, es decir, que diariamente esta unidad transita 105 km, consume 30 galones de diésel (ver Tabla 4).

Anualmente, las 32 unidades de la ruta R21 recorren 1'226.400 km y consumen 350.400 galones de diésel (ver Tabla 5).

Tabla 4. Información de la ruta R21-Línea 120^a

Servicio diario	Servicio anual
Recorrido=105 km	Recorrido=38,325 km
Numero de vueltas=6	Número de vueltas=2,190
Combustible=30 galones de diésel	Combustible= 10,950 galones de diésel

Paredes, 2020

Tabla 5. Información anual de los 32 buses de la ruta R21-Línea 120A

Flota	Valores anuales
	Recorrido= 1'226.400 km
32 buses	Número de vueltas= 70.080
	Combustible= 350.400 galones de diésel

Paredes, 2020

4.3.2 Ruta R90

Una unidad de la ruta R90, realiza 5 vueltas, recorriendo 24 km por vuelta, resultando en un recorrido diario de 120, consume 30 galones de diésel (ver Tabla 6).

Al año, las 30 unidades de la ruta R90 realizan un recorrido de 1'314.000 km y consumen 438.000 galones de diésel (ver Tabla 7).

Tabla 6. Información de la ruta R90-Línea 120B

Servicio diario	Servicio anual
Recorrido=120 km	Recorrido=43,800 km
Numero de vueltas=5	Número de vueltas=1,825
Combustible=40 galones de diésel	Combustible= 14,600 galones de diésel

Paredes, 2020

Tabla 7. Información anual de los 30 buses de la ruta R90-Línea 120B

Flota	Valores anuales
	Recorrido= 1'314.000 km
30 buses	Número de vueltas= 54.750
	Combustible= 438.000 galones de diésel

Paredes, 2020

4.3.3 Ruta R59

Una unidad de la ruta R59, realiza 6 vueltas y recorre 15 km por vuelta, es decir, que este bus a diario transita 90 km y consume 28 galones de diésel (ver Tabla 8).

Los 13 buses de la ruta R59 transitan 427.050 km y consumen 132.860 galones de diésel (ver Tabla 9).

Tabla 8. Información de la ruta R59-Línea 157A

Servicio diario	Servicio anual
Recorrido=90 km	Recorrido=32.850 km
Numero de vueltas=6	Número de vueltas=2,190
Combustible=28 galones de diésel	Combustible= 10,220 galones de diésel

Paredes, 2020

Tabla 9. Información anual de los 13 buses de la ruta R59-Línea 157A

Flota	Valores anuales
	Recorrido= 427,050 km
13 buses	Número de vueltas= 28,470
	Combustible= 132,860 galones de Diésel

Paredes, 2020

4.4 Estimación de la viabilidad económica de la celda de combustible de óxido sólido como fuente de energía en buses urbanos.

Los objetivos de costos del Departamento de Energía de EE. UU. para los sistemas de celdas de combustible en 2010 son de US \$ 30 / kW para la celda de combustible SOFC y US \$ 15 / kW para el saldo de la planta de apoyo. Ballard Power Systems ha declarado que están en el objetivo de cumplir o superar estos objetivos (Cockroft y Owen, 2014).

Suponiendo que este sea el caso, Cockroft y Owen (2014) explican que el costo de un sistema de celda de combustible de 300kW requerido para un autobús de tránsito sería de aproximadamente US \$ 825.000. El autobús con celda de combustible SOFC atraería otros costos por encima de un autobús diésel estándar, como el fortalecimiento del cuerpo para acomodar los tanques del techo y mejorar la suspensión para tener en cuenta el aumento de peso.

Cuando estos se tienen en cuenta los costos adicionales de construcción y los costos del sistema de celdas de combustible, esto debe colocar el costo de un autobús de celda de combustible a aproximadamente el mismo costo que un autobús de GNC.

Según Cockroft y Owen (2014) los valores asumidos del costo total de la celda de combustible son atribuidos a la celda e interconexiones en proporciones del 35% y 44%. Los costos para el sistema de la celda son atribuidos a 24% intercambiadores, 21% electrónica y 13% suministros del aire del costo total de la celda (ver Tabla 10).

Tabla 10. Costo de referencia de las características del autobús con celda de combustible SOFC

Celda de Combustible SOFC	\$825,000
Mantenimiento	\$13,500
Operación	0,58 USD/km
Hidrógeno (viento/hidrolisis)	\$5/kg (\$4.16/kg o \$4.21/gge neto de impuestos)

Cockroft y Owen, 2014

La Tabla 11 muestra el valor actual neto (VAN) de los costos privados y externos, costos ambientales de las tecnologías de tres autobuses, cuatro combustibles. El

VPN de la capital y los costes de mantenimiento del autobús diésel son sensiblemente inferiores a los de otras tecnologías y, en consecuencia, convertirlo en la opción preferida sobre la base únicamente de la viabilidad financiera. Por el contrario, el autobús a diésel produce daños ambientales apreciablemente más altos que las otras tecnologías, con daños derivados de las emisiones de contaminantes atmosféricos locales (AP) como la principal fuente.

Tabla 11. Valor actual neto de los costos privados y externos: escenario de referencia (miles de dólares).

	Capital	Gasolina	Mantenimiento	Totales privados	AP	GEI	Totales externos
GNC	418,4	182	265,5	865,8	14,2	8,5	22,7
Diésel	352,8	141,8	185,8	680,3	93,5	8,7	102,1
Celda de combustible SOFC	453,7	208,4	284,1	946,1	4,8	0,5	5,3

Cockroft y Owen, 2014

En comparación, los daños derivados de la emisión de GEI son relativamente modestos. En general, en el contexto del medio ambiente, la tecnología de celda de combustible presenta una ventaja significativa sobre ambos tipos de fuentes de energía, siendo particularmente notable el valor extremo del daño que causa el diésel.

El diésel es la tecnología preferida basada en el costo social más bajo de "pozo a las ruedas" (en gran parte debido a sus costos de capital y combustible comparativamente bajos), con GNC y las celdas de combustible SOFC alrededor de un 22% más costosos (Cockroft y Owen, 2014).

4.5 Análisis del impacto ambiental de las emisiones al aire que producen las celdas de combustible de óxido sólido en el momento de su funcionamiento mediante revisión bibliográfica.

Un estudio realizado en el 2018 tuvo como objetivo realizar una evaluación integral del ciclo de vida ambiental de producción de calor y energía a través de celdas de combustible de óxido sólido (SOFC) alimentadas por diversos químicos, entre los que se encuentran el gas natural, hidrógeno, amoníaco y metanol.

Los resultados del impacto del impacto ambiental se ilustran en la Figura 9.

Se calcula el menor impacto ambiental entre todos para la celda de combustible de óxido sólido alimentada por el hidrógeno (obtenido por la electrólisis del viento) correspondiente a aproximadamente 50 g de CO₂ eq. por kWh de electricidad.

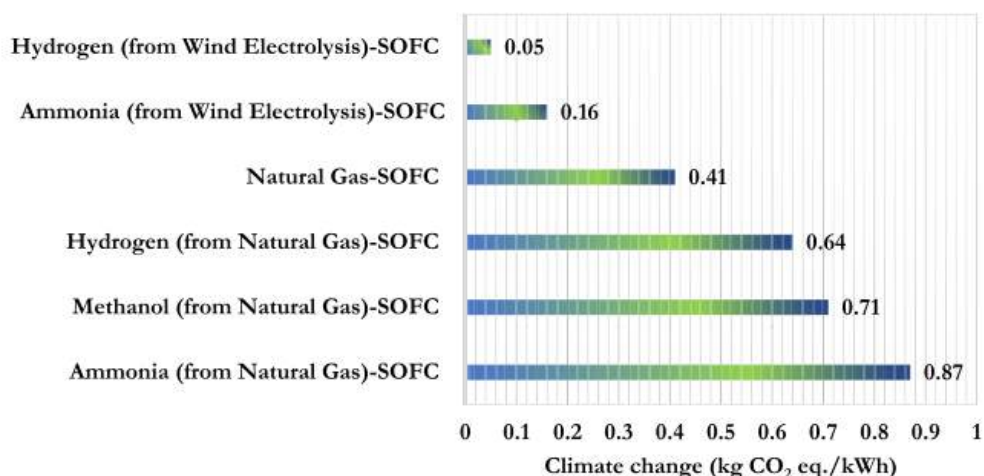


Figura 9. Emisiones de sistemas SOFC alimentadas por varios combustibles. Bicer y Khalid, 2018

Otra referencia muestra un estudio realizado para evaluar las emisiones hacia la atmósfera producidas por una celda de combustible de óxido sólido

La Tabla 12 muestra una comparación de las emisiones atmosféricas clave derivadas del uso de una planta estacionaria de energía proveniente de una celda de combustible de óxido sólido en la que se incluye las emisiones, tanto en su uso

diario, como en su uso durante su vida útil y la manufactura de un sistema planar y tubular.

Tabla 12. Comparación de las emisiones de los sistemas SOFC

Parámetro	En uso (100kW) g/kWh	En uso durante su vida g/kW	Manufactura configuración planar g/kW	Manufactura configuración tubular g/Kw
Partículas	0.000	0	650.140	242.464
CO	0.001	40	2.112.013	1.438.392
CO ₂	218.540	874	3.822.997.067	199.027.758
SOX	0.005	200	2.974.781	1.025.926
NOX	0.021	840	745.655	377

Karakoussis, 2016

Los factores de emisión por kWh se evaluaron para una celda de combustible de óxido sólido de 100 kW. Estos se han convertido en emisiones de por vida en gramos por kW de potencia, asumiendo 40.000 horas de funcionamiento a plena carga.

Una revisión de esta fuente ambientalmente limpia y eficiente de energía demostró las emisiones atmosféricas en kg por cada 1650 MWh típicas (ver Tabla 13) de una celda de combustible de óxido sólido en un año de funcionamiento comparada con una planta de generadora de energía alimentada por combustible fósil.

Tabla 13. Típicas emisiones al aire de un sistema SOFC en un año de operación

Emisiones de aire	Sox	Nox	CO	Partículas	Componentes orgánicos	CO ₂
Energía fósil	12.740	18.850	12.797	228	213	1.840.020
Sistema SOFC	0	0	32	0	0	846.300

Kg de emisiones por 1650/MWh de un año en operación total

Stambouli y Traversa, 2013

4.6 Determinación de las emisiones al aire que producen los buses urbanos de la Cooperativa 10 de agosto.

Se determinó la cantidad de emisiones de CO_2 utilizando las variables consumo de combustible y factor de emisión del método del Nivel 1 del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático en las tres rutas (R21, R90 y R59) de la Cooperativa de Transporte Urbano 10 de agosto.

4.6.1 Ruta R21

Usando la ecuación del Nivel 1 del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, se determinó que en el año 2019 se liberó 111.131,55 Kg de CO_2 a la atmosfera, indicando que a diario se emitieron 304,47 Kg. Anualmente, las 32 unidades de la ruta R21 emiten 3'556.209,6 kg de CO_2 a la atmosfera (ver Tabla 14).

Tabla 14. Emisión diaria y anual de la ruta R21

	Emisión diaria de CO2	Emisión anual de CO2
Una unidad	304,47 kg	111.131,55 kg
32 buses		Emisión anual de CO2 3'556.209,6 kg

Paredes, 2020

4.6.2 Ruta R90

Utilizando la misma ecuación, se determinó que en 2019 se expulsó a la atmosfera 148.175,4 Kg de CO_2 , es decir, que a diario se emite 405,96 kg de CO_2 .

Al año, las 30 unidades de la ruta R90 expulsaron 4'445.262 kg de CO_2 a la atmosfera (ver Tabla 15).

Tabla 15. Emisión diaria y anual de la ruta R90

	Emisión diaria de CO₂	Emisión anual de CO₂
Una unidad	405,96 kg	148.175,4 kg
30 buses	Emisión anual de CO₂	
	4'445.262 kg	

Paredes, 2020

4.6.3 Ruta R59

Utilizando la ecuación, se estableció que en 2019 se emitió a la atmosfera 103.722,1 kg CO_2 , es decir que a diario se emitió 284,17 kg de CO_2 . Los 13 buses de la ruta R59, en consecuencia, emanaron 1'348.387,3 kg de CO_2 a la atmosfera (ver Tabla 16).

Tabla 16. Emisión diaria y anual de la ruta R59

	Emisión diaria de CO₂	Emisión anual de CO₂
Una unidad	284,17 kg	103.722,1 kg
13 buses	Emisión anual de CO₂	
	1'384.387,3 kg	

Paredes, 2020

4.7 Determinación de las diferencias entre las celdas de combustible de óxido sólido y el combustible fósil convencional en los medios de transporte.

En la siguiente Tabla 17 se muestran las diferencias de vehículos operados por la celda de combustible SOFC contra motor de combustión interna.

Tabla 17. Comparación de vehículos que operan con celdas de combustible SOFC contra motor de combustión interna.

	Motor de combustión interna	Celda de combustible SOFC
Contaminación	Si	No
Desempeño	Alto	Alto
Mantenimiento	Alto	Bajo
Confiabilidad	No	Si
Confort	Si	Si
Ruido	Si	No
Eficiencia	Bajo	Alto
Libertad de diseño	No	Si
Potencia a bordo	No	Si

Yoder, 2007

Hoy en día los vehículos con motor contribuyen con 65% del consumo del petróleo de un país y aportan en emisiones el 78% de CO, 45% de NO y 37% de compuestos volátiles. Así mismo, por cada galón de gasolina fabricado, distribuido y consumido se emite aproximadamente 11.339 kg de CO_2 . Los vehículos operados con celda de combustible ahorran dinero, ya que el costo de mantenimiento es mínimo debido a que no contiene partes móviles y disminuye el uso de energía pagada de la red por lo que suministra energía complementaria (Yoder, 2007).

5. Discusión

A medida que aumentan la escasez de recursos, el cambio climático extremo y los niveles de contaminación, el crecimiento económico debe basarse en procesos de producción más ecológicos y eficientes. Las pilas de combustible son una alternativa ideal a los motores de combustión interna, sin embargo al tratarse de una nueva tecnología energética Wang y Fan (2018) determinaron en su estudio la importancia de analizar técnica y económicamente la implementación de celdas de combustible de óxido sólido y su aplicación en vehículos, esta idea es apoyada por Farias (2016) quien recalca la importancia de analizar la factibilidad técnica y económica de la tecnología de celdas de combustibles para la generación de electricidad.

De acuerdo a lo visto por una investigación elaborada por Gutiérrez (2015) mediante los análisis observados con el simulador de vehículos Advisor, un autobús con celda de combustible de óxido sólido puede llegar a una potencia total de motor de 4×10^4 Hp y velocidad promedio de 25 km/h lo que es equivalente a un autobús de combustible fósil. La celda analizada por Gutiérrez cuyo combustible utilizado fue el hidrógeno, hace que el resultado del proceso de generación de emisión sea exclusivamente agua, por lo que no expulsa gases contaminantes ni de efecto invernadero, de manera similar Mejía y Acevedo (2015) mostraron en un estudio que para implementar una flota de buses alimentados por celdas de combustible de óxido sólido, los buses que operaron con hidrogeno comprimido, llegaron a una velocidad tope de 50 mph (80 kmph), un alcance de 186 millas (300 km) y llegaron a generar 120 kw de energía.

Considerando lo anterior descrito, el costo del capital del autobús de celda de combustible SOFC se mantuvo más alto que su contraparte, el diésel, pero fue

comparable a GNC según el objetivo del DOE de EE. UU. Un impedimento económico importante para la competitividad de la tecnología de autobuses con celda de combustible SOFC es el costo del hidrógeno, el cual, es el combustible que cumple el propósito de alimentar la celda de combustible de óxido sólido para que funcione de manera eficiente y también el que genera menos emisiones de contaminantes, por ello es tomado en cuenta en la discusión.

De acuerdo al análisis económico realizado por Mejia y Acevedo (2015) para la determinación el costo de una flota de buses con celdas de combustible en Colombia, se elaboró un modelo económico tomando un consumo de 24 kg de H₂ /día para hacer un recorrido de 320 km, cada bus consumiría al año 7008 kg de H₂. Dio como resultado que el costo del proyecto total para los 20 buses puede variar entre 26'441.590 y 42'784.246 USD.

Por otro lado, el análisis Mejia y Acevedo (2015) de también habla sobre el proyecto que se desarrolló en Sao Pablo Brasil para 8 buses que está estimado en un valor de 16 millones de dólares, mediante la recolección de los valores del costo total de un bus en funcionamiento sumando el costo de consumo de hidrógeno al costo anualizado de un bus. El costo anualizado de cada bus se obtiene a partir del valor del bus, del costo de operación y mantenimiento y el costo anualizado por recambio de celdas.

En la revisión elaborada por Stambouli y Traversa (2013) acerca de las celdas de combustibles de óxido sólido como energía ambientalmente limpia y eficiente, mostró que el impacto medioambiental del uso de las SOFC depende de la fuente de combustible rico en hidrógeno que se utilice. Si se utiliza hidrógeno puro, las pilas de combustible no tienen prácticamente ninguna emisión, salvo agua y calor. En este escenario, las estaciones generadoras de SOFC no tendrían emisiones

reales de gases de efecto invernadero o de ácido o cualquier otro contaminante, de la misma manera, Bicer y Khalid (2018), mostraron en su estudio, la alta eficiencia de la SOFC hace que se consuma menos combustible para producir una cantidad determinada de electricidad, lo que corresponde a una menor emisión de dióxido de carbono CO_2 , el principal "gas de efecto invernadero" responsable del calentamiento global. Además, las emisiones de los sistemas de SOFC serán muy bajas, con niveles casi nulos de NO_x , SO_x y partículas.

Los buses de transporte son grandes emisores de gases contaminantes a la atmósfera, Guayanlema (2013) lo comprobó en su inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero en el sector transporte en Ecuador en el año 2012, donde obtuvo una relación en la cual indica que las emisiones de GEI por el transporte fueron alrededor de un 47 a 65% en el periodo 2006 a 2012, con un evidente un crecimiento de este sector, esta información de complementa con la información de Tomasseti (2013) en su estudio del impacto ambiental que generan los transportes urbanos, demostrando que estas emisiones generan una mala calidad de su aire, lo que incrementa el peligro de accidentes cerebrovasculares, patologías cardíacas, cáncer de pulmón y patologías respiratorias crónicas y agudas, como el asma o la neumonía.

Una investigación realizada por Ruiz, Marrero , y Ballesteros (2006) demostró que al contrario de los motores de combustión interna que emiten varios gases que ayudan al efecto invernadero, la única emisión de hidrógeno en las celdas de combustible SOFC es agua tibia. Los prototipos actuales de vehículos con celda de combustible SOFC tienen características de desempeño comparable o mejor que vehículos de combustión interna, ya que son más rápidos fuera de línea y comienzan a demostrar mayor potencia, por otra parte, Alegría (2005) asegura que,

las celdas de combustible al no tener prácticamente partes móviles, no requieren aceite para lubricación ni para mantenimiento general. La comodidad de los vehículos con celda de combustible SOFC es debido a que no constan con transmisión, bajo ruido, escape limpio, más espacio interior y libertad de diseño. El ruido que generan los vehículos con celda de combustible proviene del compresor y de los ventiladores por lo que es mínima.

Concorde a la investigación de Cornejo y Velasquez (2020) los vehículos con celda de combustible SOFC alcanzan una alta eficiencia de motor debido a que no están limitados por la absorción de calor por el ciclo de Carnot, ni conexiones mecánicas que creen fricción como los vehículos con motor de combustión interna.

Conforme al estudio de factibilidad del uso de celdas de combustible para buses de transporte público de Veléz y D'vries (2011) dio como resultado que la densidad de potencia de una celda esta entre 0.67 a 1.13 hp/kg (500 a 1000 W/kg) a consideración de 0.13 hp/kg (200 W/kg) que es la densidad de potencia de los motores de combustión interna. Para poder obtener este cálculo de la densidad de potencia se debe considerar el peso total de los componentes.

Según el estudio realizado por la Empresa Ballard Corfo (2015) los datos recopilados de buses con celda de combustible diariamente durante 14 millones de kilómetros de operación, validó el siguiente desempeño; gama de autobuses: más de 450 kilómetros con una durabilidad de la celda de combustible de más de 30,000 horas (sin reemplazo de pila o renovación) y un consumo de combustible de menos de 9kg / 100km.

6. Conclusiones

Las emisiones de los sistemas SOFC serán muy bajas, con niveles cercanos a cero de NOx, SOx y partículas, por lo que no eliminan contaminantes causantes del efecto invernadero en el medio ambiente. En cualquier caso, las SOFC generalmente proporcionan una de las emisiones más bajas de cualquier energía no renovable. Esto es muy importante con respecto a las preocupaciones ambientales relacionadas con la energía, esta tecnología puede considerarse viable como un contribuyente significativo a la reducción de las emisiones mundiales de CO_2 .

La flota que consume más combustible corresponde a la línea 120B, sus 30 unidades consumen 438,000 galones/diésel anualmente, con respecto a las emisiones, los 75 buses o unidades de la cooperativa emitieron 9'349.858,9 kg de CO_2 a la atmósfera. La ruta que más emana CO_2 es la R90 con 4'445.262 kg (48%), seguida de la ruta R21 con 3'556.209,60 kg (38%) y la ruta que menos emite CO_2 es la R59 con 1'348.387,3 kg (14%).

Cabe destacar que la Cooperativa 10 de agosto fue elegida para este estudio gracias a la información que brindaron acerca de la cantidad de diésel que consumieron sus buses y las emisiones de CO_2 que generaron hacia la atmósfera, la accesibilidad a sus datos proporcionaron un análisis enfocado hacia una pequeña cooperativa en la ciudad de Guayaquil y el impacto ambiental que genera su dependencia hacia los combustibles fósiles.

Este estudio ha presentado los resultados de un análisis de costes-beneficios comparando diésel, GNC y celda de combustible SOFC en autobuses en función de los costes y beneficios del ciclo de vida social de cada una tecnología. A pesar de sus importantes beneficios ambientales en operación, el muy alto costo inicial

del prototipo de autobús con celda de combustible SOFC lo hace económicamente superior en comparación con la tecnología actual de motores de combustión interna.

Este análisis se llevó a cabo asumiendo un desarrollo completo, emisiones netas de CO₂ cercanas a cero, infraestructura de combustible para el suministro de hidrógeno a los autobuses con celda de combustible SOFC. También asumió que los autobuses, incluida la celda de combustible, se produjeron en condiciones de economías de escala y que la vida útil de la celda de combustible era significativamente más larga que los autobuses con motor de combustión interna que es de 10 años.

Se puede concluir que la aplicación de las celdas de combustible SOFC en autobuses sería un proyecto de vista económicamente inviable debido a que demandaría una inversión monetaria significativa en términos de infraestructura y tecnología, la misma que se justificaría con la reducción de emisiones contaminantes.

El desarrollo de soluciones con menos emisiones de carbono y menos contaminación para el sector del transporte es vital para el luchar contra el cambio climático y la contaminación del aire, y está claro que las SOFC podrían ser una tecnología viable, dados los avances en el desempeño durante los próximos años.

Por otra parte, el aporte de las celdas de combustible a la conservación del medio ambiente sería un de los puntos claves para la implementación del sistema, de igual forma se debe tomar en cuenta la salud de la ciudadanía y la conservación de recursos naturales no renovables como el petróleo.

Este proyecto puede ser desarrollado, pero es necesario que las condiciones para que se pueda lograr su implementación sean existentes; es decir que el

desarrollo del mercado de las celdas de combustible y todo su entorno para su utilización estén en crecimiento. Cuando el aspecto ambiental y el de seguridad en la disponibilidad de recursos energéticos sean predominantes; los proyectos liderados por el gobierno pueden adelantarse al desarrollo pleno de este mercado en el mundo.

La implementación de las celdas de combustible de óxido sólido es los buses de la Cooperativa 10 de agosto en la ciudad de Guayaquil no es un proyecto factible ya que se requiere una gran inversión para la compra de autobuses con esta tecnología ya implementada, a pesar de que técnicamente una celda SOFC es capaz de alimentar un bus urbano y que este logre funcionar de manera efectiva y ambientalmente generaría muy pocas emisiones a la atmósfera, económicamente, los costos de esta tecnología son muy elevados lo que resta factibilidad a su implementación.

7. Recomendaciones

Las celdas de combustible de óxido sólidos como alternativa a las fuentes de energía existentes deben ser estudiada a profundidad, para su aplicación actual a medios de transporte deben considerarse mejoras cómo su vida útil, la flexibilidad del combustible, y la eficiencia, optimizar las características principales de la celda, ya que todos ellos reducen los costos del sistema.

Las grandes marcas fabricantes de automóviles deben realizar trabajos de investigación y desarrollo de celdas de combustible, con motores limpios, altamente eficientes, fácil de cargar y que funcionen con alternativas a la gasolina o diésel como el etanol o agua mezclada con etanol y los más importante que sus emisiones sean libres de carbono, características que superan la autonomía de vehículos impulsados por gasolina.

Es recomendable para que este proyecto sea viable que los buses utilizados para el transporte urbano ya vengan equipados con esta tecnología, y no adaptar los buses convencionales de combustión a buses de celdas de combustible ya que la inversión sería prácticamente la misma sin tener en cuenta los cambios estructurales y técnicos a los que se sometería las unidades convencionales.

Para que este proyecto sea factible, se recomienda promulgar políticas que incentiven el uso de esta tecnología verde. Para que este se cumpla es muy necesario que la normativa de los sectores involucrados como es el eléctrico, transporte y régimen tributario con el fin de incluir y promover este tipo de tecnología en el Ecuador.

Además, para que este proyecto sea viable y factible económicamente es preciso implementar en el modelo económico, las variables del detalle de costo por pasajero y por kilómetro recorrido, el consumo y costo de hidrógeno, el costo de

operación y mantenimiento, el consumo y costo de la energía eléctrica y el gas natural, el costo de instalación de la flota y hacer una comparación con los costos de los buses de combustión interna para que se pueda verificar que el costo inicial de los buses de celda de combustible es mucho menor que el costo a largo plazo de los buses de combustión interna.

8. Bibliografía

- Agencia Internacional de la Energía. (s.f.). Energías Renovables. Obtenido de Acciona: <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/>
- Ágora. (2018). Transporte y Cambio climático. Una realidad ineludible. Obtenido de <https://www.agorarsc.org/transporte-y-cambio-climatico-una-realidad-ineludible/>
- Alegría, M. (2005). Pilas de combustible. Obtenido de Instituto Nacional de Educación Tecnológica Argentina: http://www.ifdcvm.edu.ar/tecnicatura/Recursos_Didacticos/20.pdf
- Arenal, R., Angeles, F., & Ávalos, F. (2010). Celdas de combustible diseño, simulación, caracterización y aplicación a la industria automotriz. Obtenido de Repositorio Instituto Tecnológico de Monterrey: <http://hdl.handle.net/11285/629520>
- Asamblea Constituyente. (2008). Registro oficial 449. Obtenido de <https://www.wipo.int/edocs/lexdocs/laws/es/ec/ec030es.pdf>
- Asteazarán, M. (2019). Reparación y caracterización de materiales catalíticos para una celda de combustible de metanol directo. Obtenido de Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/82607>
- Barbero, J., & Rodríguez, R. (2012). Transporte y cambio climático: hacia un desarrollo sostenible y de bajo carbono. Revista Transporte y Territorio. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/3330/333027352004.pdf>
- Bicer, Y., & Khalid, F. (2018). Life cycle environmental impact comparison of solid oxide fuel cells. Obtenido de ELSEVIER: <https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.122>

- Boldrin, P., & Brandon, N. (2019). Progress and outlook for solid oxide fuel cells for transportation applications. *Nature Research*. doi:<https://doi.org/10.1038/s41929-019-0310-y>
- Cano, U. (1999). Las celdas de combustible: verdades sobre la generación de electricidad limpia y eficiente vía electroquímica. Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias de México. Obtenido de <https://www.ineel.mx/reno99/apli.pdf>
- Castillo, M. V. (2018). Modelamiento Matemático de una celda de combustible de óxido sólido (SOFC), usando como combustible el gas de síntesis obtenido de la biomasa. Obtenido de Repository U America : <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6850/1/6122905-2018-2-IQ.pdf>
- Cockroft, C., & Owen, A. (2014). ResearchGate. Obtenido de Hydrogen Fuel Cell Buses: An Economic Assessment: https://www.researchgate.net/publication/228835447_Hydrogen_Fuel_Cell_Buses_an_Economic_Assessment
- Contreras, A., Fortuna, J., Ponce, D., & Smit, A. (2011). CICY. Obtenido de Viabilidad técnico económica de la implementación de la tecnología del hidrógeno en el sector del transporte público urbano en la zona metropolitana de Mérida, Yucatán: http://www.ccpy.gob.mx/energias-renovables/documentos_posgrados_cicy/Transporte_publico_Hidrogeno_Aldo_Contreras.pdf
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. (1992). Obtenido de <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>

Corfo. (2015). Aplicación del Hidrógeno al Sector Transporte. Obtenido de Dirección de Desarrollo Tecnológico - Gerencia de Capacidades Tecnológicas de Chile: https://codesser.cl/bases/PEN042_Anexo_N4_Reporte_de_Inteligencia_Tecnologica.pdf

Cornejo, L., & Velasquez, D. (2020). Determinación de los ciclos termodinámicos en motores de encendido provocado de vehículos de categoría M1 en ciclos de conducción reales. Obtenido de Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18685/1/UPS-CT008740.pdf>

Farias, N. (2016). CIDETEQ. Obtenido de Análisis técnico-económico de la tecnología de celdas de combustible microbianas para la generación de energía para la producción de energías alternativas: <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/80/1/An%C3%A1lisis%20t%C3%A9cnico-econ%C3%B3mico%20de%20la%20tecnolog%C3%ADa%20de%20celdas%20bioelectroqu%C3%ADmicas%20microbianas%20para%20la%20producci%C3%B3n%20de%20energ%C3%ADas%20altern>

Fuquene, S., & Lopez, L. (2017). análisis del modelo matemático de una celda de combustible de óxido sólido (SOFC). Obtenido de Fundación Universidad de América: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6265/1/6121950-2017-1-IQ.pdf>

Google Earth. (2021). Ubicación y coordenadas cooperativa de transporte urbano 10 de agosto LTDA. Obtenido de

[https://earth.google.com/web/search/s11,+Guillermo+Pareja+,+mz72,+Garzota,+Centro,+Guayaquil+090505/@-2.14817996,-](https://earth.google.com/web/search/s11,+Guillermo+Pareja+,+mz72,+Garzota,+Centro,+Guayaquil+090505/@-2.14817996,-79.89173637,6.5520383a,123.50873352d,35y,51.55065764h,0t,0r/data=CiJgokCfwhMmylof-_EV8Xr0kAq_-_GVhbXpMT8FPAIXX-Wzdb8FPA)

[79.89173637,6.5520383a,123.50873352d,35y,51.55065764h,0t,0r/data=CiJgokCfwhMmylof-_EV8Xr0kAq_-_GVhbXpMT8FPAIXX-Wzdb8FPA](https://earth.google.com/web/search/s11,+Guillermo+Pareja+,+mz72,+Garzota,+Centro,+Guayaquil+090505/@-2.14817996,-79.89173637,6.5520383a,123.50873352d,35y,51.55065764h,0t,0r/data=CiJgokCfwhMmylof-_EV8Xr0kAq_-_GVhbXpMT8FPAIXX-Wzdb8FPA)

Grupo Villar Mir. (2019). Las energías no renovables no están de moda. Obtenido de Energya - VM: <https://www.energyavm.es/las-energias-no-renovables-no-estan-de-moda/>

Guayanlema, V. (2013). Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero en el sector transporte al 2012. Obtenido de Universidad Central del Ecuador : <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/1860/1/T-UCE-0017-43.pdf>

Gutiérrez, M. (2015). Estudio de factibilidad de una celda de combustible para aplicación en autobuses urbanos. Obtenido de Instituto Politécnico Nacional de México: <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/handle/123456789/15688>

INEC. (2017). Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Obtenido de <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/guayaquil-en-cifras/#:~:text=Al%202017%20Guayaquil%20tiene%20,habitantes%20menos%2C%20seg%C3%BAn%20proyecciones%20poblacionales.>

Instituto de Investigación Geológico y Energético. (2019). Balance Energético Nacional. IIGE. Obtenido de IGE.gob: <https://www.rekursyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2020/12/Balance-Energetico-Nacional-2019-1.pdf>

Karakoussis, V. (2016). Environmental emissions of SOFC and SPFC system. Obtenido de U.S. Department of Energy: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20082552>

- Lane, J. (2016). Nissan's Solid Oxide Fuel Cell system, and what the fuss is all about. BiofuelsDigest. Obtenido de <https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2016/06/15/nissans-solid-oxide-fuel-cell-system-and-what-the-fuss-is-all-about/>
- Ley de Eficiencia Energética. (2019). Ley de Eficiencia Energética. Registro 449. Obtenido de <https://www.recursoyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/03/Ley-Eficiencia-Energe%CC%81tica.pdf>
- Ley de prevención y control de la contaminación ambiental. (2004). Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/09/ley-de-prevencion-y-control-de-la-contaminacion-ambiental.pdf>
- Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial. (2018). Obtenido de <http://www.competencias.gob.ec/wp-content/uploads/2016/02/9.-Ley-Orga%CC%81nica-de-Transporte-Terrestre-Tra%CC%81nsito-y-Seguridad-Vial.pdf>
- Ludwing, J., & Beckel, D. (2004). Solid Oxide Fuel Cells: Systems and Materials. doi:10.2533/000942904777677047
- Mejia, J., & Acevedo, C. (2015). Determinación del costo de una flota de buses con celdas de combustible para el horizonte 2025 en el Valle de Aburrá. Obtenido de Universidad Tecnológica de Pereira: <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/9274/7261>
- Mendoza, V. (2017). Los combustibles fósiles y sus consecuencias. Obtenido de El telégrafo: <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/68/1/los-combustibles-fosiles-y-sus-consecuencias>

- Milewski, J. (2010). Analysis of design and construction of solid oxide fuel cell in terms of their dynamic operation. Obtenido de Researchgate: https://www.researchgate.net/publication/229047273_Analysis_of_Design_and_Construction_of_Solid_Oxide_Fuel_Cell_in_Terms_of_their_Dynamic_Operation
- Ministerio de Industria, Energía y Minería. (2015). Fuentes de energía no renovables. Obtenido de <http://www.energiasolar.gub.uy/index.php/aula-didactica/que-es-la-energia/fuentes-de-energia-no-renovables>
- Muñoz, D. (2016). Caracterización estructural y estudio de las propiedades electroquímicas de óxidos derivados del $\text{GdBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$: nuevos materiales para cátodos de pilas de combustible tipo SOFC. Obtenido de <https://eprints.ucm.es/36602/1/T36993.pdf>
- Nesaraj, S. (2009). Recent developments in solid fuel cell technology - a review. Obtenido de Journal of Scientific and Industrial Research: https://www.researchgate.net/publication/267236868_Recent_developments_in_solid_oxide_fuel_cell_technology_-_A_review
- Nigel, S., Bove, R., & Puzs, J. (2006). Solid Oxide Fuel Cells. doi:10.1007/1-84628-207-1_1
- Paredes, C. (2020). Cuantificación de dióxido de carbono en las rutas 21, 90 y 59 de la Cooperativa de Transporte Urbano 10 de Agosto, en la ciudad de Guayaquil. Obtenido de Facultad de Ciencias Naturales. Universidad de Guayaquil: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/49960>
- Paredes, L., & Pozo, Á. (2020). Movilidad Eléctrica y Eficiencia Energética en el Sistema de Transporte Público del Ecuador un Mecanismo para Reducir

- Emisiones de CO₂. Revista Energía. Obtenido de <http://revistaenergia.cenace.org.ec/index.php/cenace/article/view/356/414>
- Planas, O. (2016). Energías no renovables. Obtenido de Energía Solar: <https://solar-energia.net/energias-no-renovables>
- Rangel, V. H., Niño, A. M., & Ornelas, R. (2017). Panorama general de las celdas SOFC en la generación de energía eléctrica. Obtenido de Ecofan: http://www.ecofan.org/spain/researchjournals/Aplicacion_Cientifica_y_Tecnica/vol3num7/Revista_de_Aplicacion_Cientifica_y_Tecnica_V3_N7_6.pdf
- Rincón, E., García, J., & Bermúdez, J. (2018). Estado del arte de las celdas de combustible. doi:DOI: 10.24054/16927257.v33.n33.2019.3320
- Ruiz, J., Marrero, D., & Ballesteros, B. (2006). Pilas de combustible. Obtenido de Dialnet: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2082855>
- Stambouli, A., & Traversa, E. (2013). Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy. Obtenido de ELSEVIER: [https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00014-X](https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00014-X)
- Tecner, M. (2019). Las energías renovables en México y en el Mundo. Obtenido de Scribd: <https://www.scribd.com/document/219030392/Antecedentes-de-Energias-Renovables>
- Tomasseti, Z. (2013). Impacto ambiental del transporte urbano . Obtenido de Asociación Argentina de Economía Política : <https://aaep.org.ar/anales/works05/tomasseti.pdf>
- Veléz, E., & D'vries, A. (2011). Factibilidad del uso de celdas de combustible a base de hidrogeno como energia alterna para buses de transporte urbano en la

- ciudad de cuenca. Obtenido de Universidad del Azuay:
<http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/6297/1/08081.pdf>
- Wang, J., & Fan, Y. (2018). Techno-Economic Challenges of Fuel Cell Commercialization. Obtenido de Science Direct:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809917307750>
- Weimar, M., Chick, L., Gotthold, D., & Whyatt, G. (2013). Cost study for manufacturing of solid oxide fuel cell power systems. Obtenido de U.S department of energy:
https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-22732.pdf
- Yoder, A. (2007). El hidrogeno como fuente alterna de energia. Obtenido de Instituto Politécnico Nacional:
<https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/3263/50.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Yuan, J. (2008). Solid oxide fuel cells. Obtenido de Lund Institute of Technology:
http://www.lth.se/fileadmin/ht/Kurser/TFRF05/Chapter_7.pdf

9. Anexos

9.1 Anexo 1. Figuras

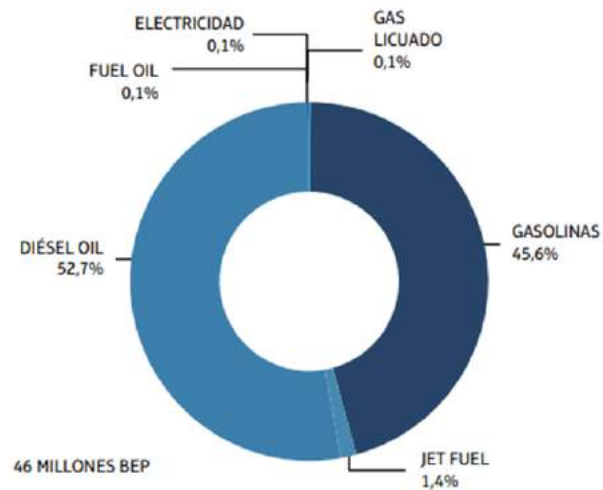


Figura 10. Consumo de energía por fuente (transporte)
Instituto de Investigación Geológico y Energético, 2019

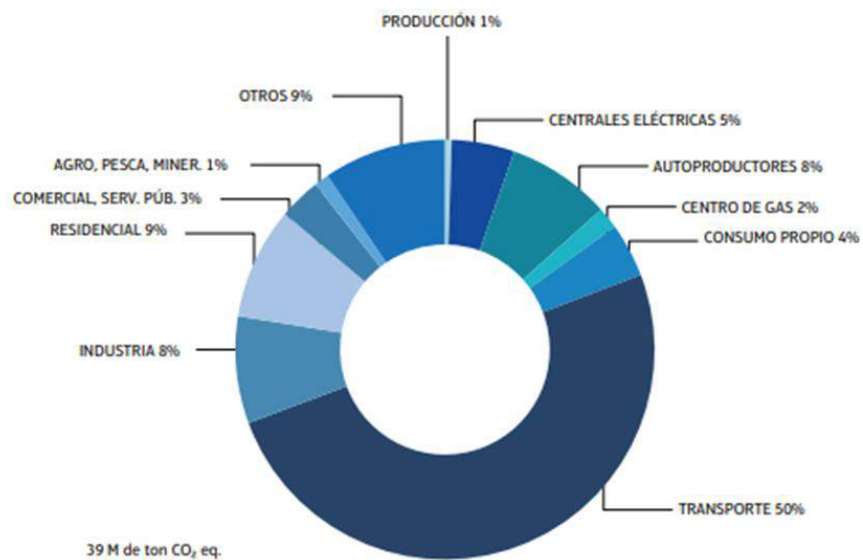


Figura 11. Emisiones de GEI por actividad en Ecuador año 2019
Instituto de Investigación Geológico y Energético, 2019

: Cooperativa de transporte urbano 10 de agosto LTDA.

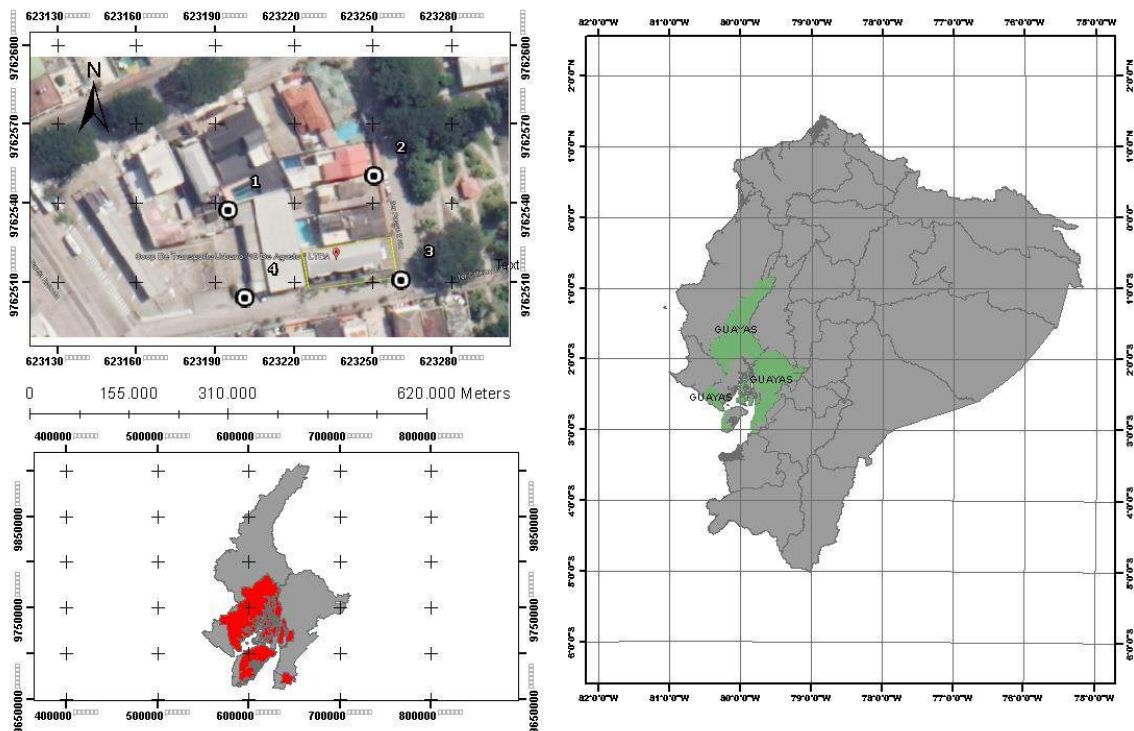


Figura 12. Ubicación cooperativa de transporte urbano 10 de agosto LTDA. Cumbe e Intriago, 2021

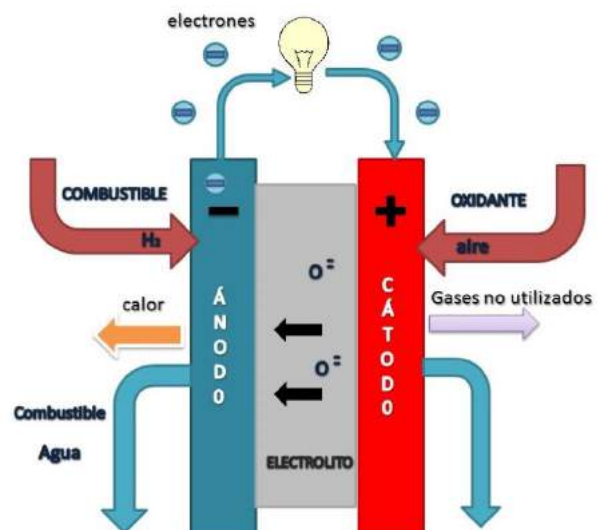


Figura 13. Principio de funcionamiento de una celda de combustible de óxido sólido
Astearazan, 2019

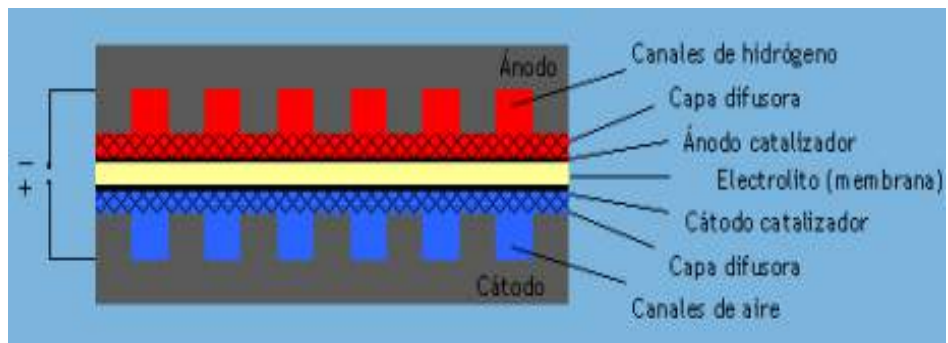


Figura 14. Celda de combustible de óxido con sus partes
Astarazan, 2019

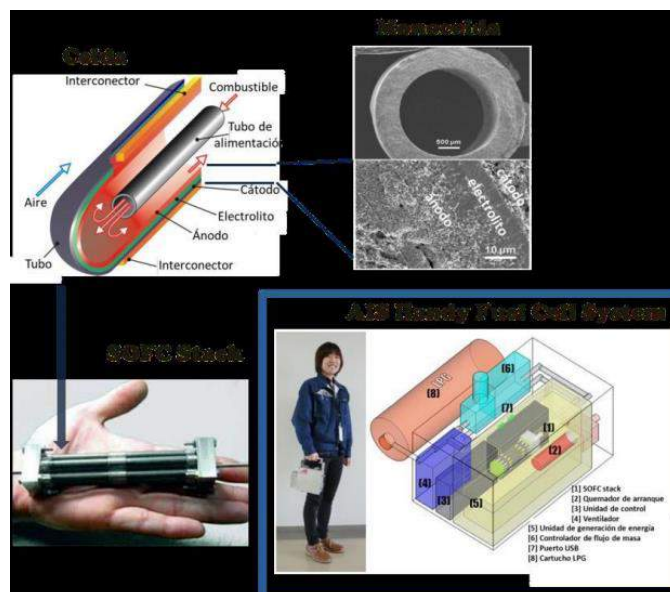


Figura 15. Conformación de una celda de combustible de óxido sólido usando configuración tubular
Yuan, 2008

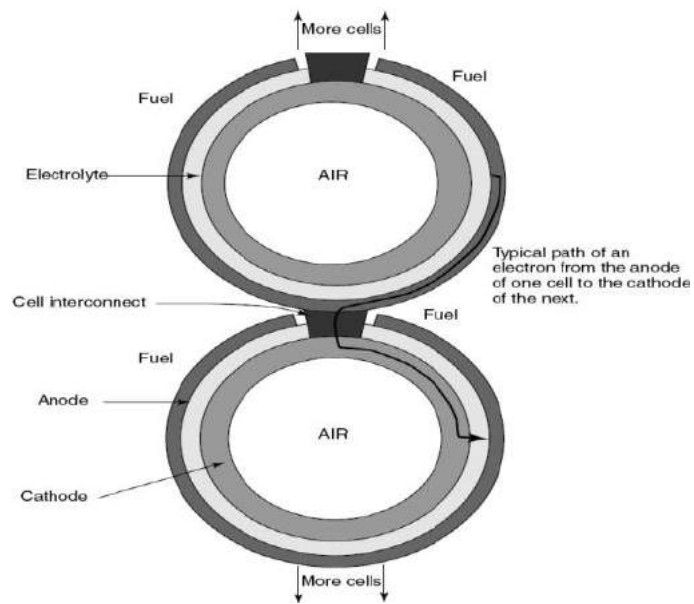


Figura 16. Sección transversal de células tubulares
Yuan, 2008

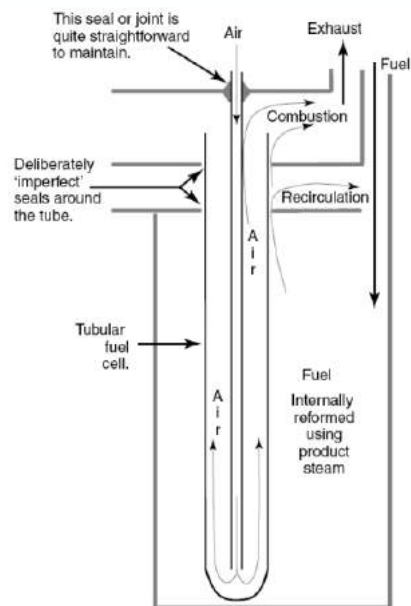


Figura 17. Flujo de combustible de la configuración tubular
Yuan, 2008

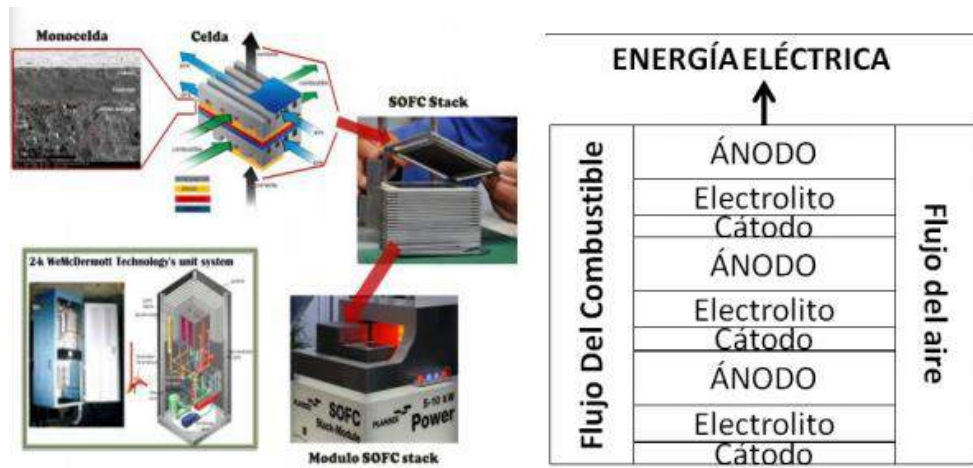


Figura 18. Celda de combustible de óxido sólido en configuración planar
Rincón, García y Bermúdez, 2018

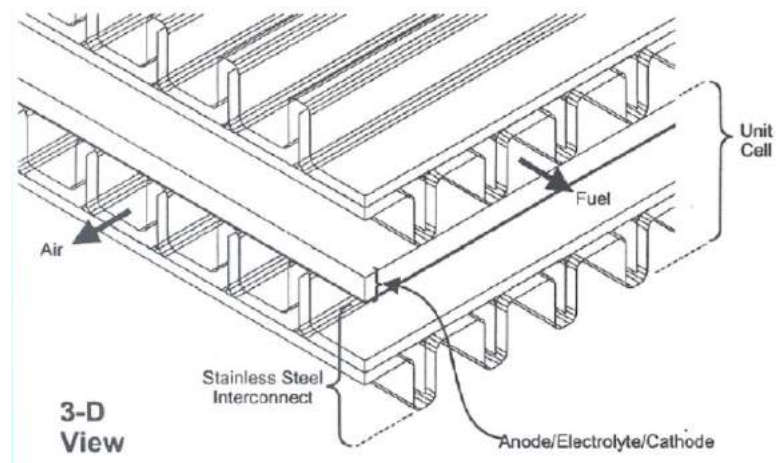


Figura 19. Configuración planar de flujo cruzado.
Rincón, García, y Bermúdez, 2018

9.2. Anexo 2. Tablas complementarias

Tabla 18. Ubicación geográfica

Coordenadas		
Grados y minutos decimales	Longitud Latitud	79°53'28.29" W 2°08'54" S
Google Earth, 2021		

Tabla 19. Reacciones Químicas

Nombre	Reacción
Reacción de conversión	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$
Reacción de descomposición	$CH_4 + H_2O \rightarrow 3H_2 + CO$
Reacción de desplazamiento	$CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2$
	$CH_4 \rightarrow C + 2H_2$
	$2CO \rightarrow C + CO_2$
Reacción de disociación	
Castillo, 2018	

Tabla 20. Indicadores de efectividad técnica y económica de las celdas de energía.

	Celdas de combustible SOFC
Eficiencia de combustible/ Electricidad	70%
Reducción de emisiones CO ₂	32%
Costo por kw	1 500 dólares/kW
Cano e Ineel, 1999	