Análisis de la conveniencia de la implementación de celdas de combustible PEM a base de hidrógeno en el sistema de iluminación en el edificio Transcoop

Autor

Cristian Danilo Montaña Castillo

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Facultad de Medio Ambiente y Recursos Renovables

Administración Ambiental

Bogotá D.C.

Mayo de 2018

Análisis de la conveniencia de la implementación de celdas de combustible PEM a base de hidrógeno en el sistema de iluminación en el edificio Transcoop

Autor

Cristian Danilo Montaña Castillo

Trabajo de grado en modalidad monografía para optar al título de Administrador Ambiental

Director

PhD Carlos Díaz Rodríguez

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Facultad de Medio Ambiente y Recursos Renovables

Administración Ambiental

Bogotá D.C.

Mayo de 2018

Dedicatoria

A mis padres, porque todo lo que soy es gracias a ellos, y muy seguramente sin su apoyo incondicional la conquista de este logro no hubiera sido posible.

Al saber de mi padre y el eterno amor y sabiduría de mi madre, todo es por ellos y para ellos.

Agradecimientos

A la ciudad de Bogotá y la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por ser el alma máter que ha permitido mi formación como profesional por medio de sus docentes, los mismos que han puesto su conocimiento a disposición de los alumnos, especialmente al profesor Carlos Díaz Rodríguez por su incansable vocación por la docencia que se refleja en la paciencia y la constancia dedicada a la dirección en la construcción de este documento.

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN 9
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 10
3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO 12
4. OBJETIVOS BÁSICOS 14
   4.1. OBJETIVO GENERAL 14
   4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 14
5. MARCO REFERENCIAL 15
   5.1. MARCO TEÓRICO - CONCEPTUAL 15
      5.1.1. Estudio de prefactibilidad 15
      5.1.2. Estudio técnico 16
      5.1.3. Estudio ambiental 17
      5.1.4. Análisis costo-beneficio 18
      5.1.5. Sistemas distribuidos 20
      5.1.6. Celdas de combustible 21
      5.1.7. Componentes del sistema de alimentación y funcionamiento 25
   5.2. ESTADO DE LA CUESTIÓN 30
   5.3. MARCO CONTEXTUAL 33
   5.4. MARCO LEGAL 37
      5.4.1. Ley 1715 de 2014 37
      5.4.2. Ley 1819 de 2016 37
      5.4.3. Decreto 3172 de 2003 38
      5.4.4. Resolución 136 de 2004 38
6. METODOLOGÍA 39
7. CAPITULO I: ESTUDIO TÉCNICO 40
   7.1. LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO 41
   7.2. TAMAÑO DEL PROYECTO 43
   7.3. IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS 50
      7.3.1. Identificación de tecnologías 50
      7.3.2. Selección de tecnología 51
   7.4. DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES Y PROCESOS 57
   7.5. RUTA CRÍTICA DEL PROYECTO 60

7.5.1. Red PERT 60
7.5.2. CPM 63
7.6. DISTRIBUCIÓN DE LA PLANTA 65
8. CAPITULO II: CAMBIO EN LA CALIDAD AMBIENTAL 67
8.1. METODOLOGÍA ENTRADAS – PROCESOS – SALIDAS (EPS) 67
8.1.1. Determinación de aspectos e impactos ambientales 67
7.2 ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL 72
8.1.2. Metodología 72
8.1.3. Matriz de identificación 76
8.1.4. Matriz de calificación 78
9. CAPITULO III: ANÁLISIS COSTO – BENEFICIO 83
9.1. COSTOS DEL PROYECTO 83
9.1.1. Inversión inicial 83
9.1.2. Costos de mantenimiento y operación 85
9.2. FLUJOS DE CAJA 86
9.2.1. Datos relevantes para elaborar los flujos de caja 86
9.2.2. Flujos de caja y valor presente neto sin proyecto 88
9.2.3. Flujos de caja y valor presente neto con proyecto 89
9.2.4. Flujo de caja incremental 91
9.3. HALLAZGOS 92
9.3.1. Relación Costo – Beneficio 92
9.3.2. Valor Presente Neto y Tasa Interna de Retorno 93
10. CONCLUSIONES 94
11. RECOMENDACIONES 97
12. BIBLIOGRAFÍA 98

Lista de tablas

Tabla 1. Metodología del proyecto 39
Tabla 2. Consumo promedio de energía del edificio Transcoop 44
Tabla 3. Estudio de cargas para el sistema de iluminación del piso 1 del edificio Transcoop 45
Tabla 4. Estudio de cargas para el sistema de iluminación del piso 2 del edificio Transcoop 46
Tabla 5. Estudio de cargas para el sistema de iluminación del piso 3 del edificio Transcoop 46
Tabla 6. Estudio de cargas para el sistema de iluminación del piso 4 del edificio Transcoop 46
Tabla 7. Factor de carga 49
Tabla 8. Análisis dimensional entre la marca Whole Win e Ice-City 53
Tabla 9. Especificaciones técnicas celda de combustible 500 Watts marca Whole Win 53
Tabla 10. Inversor de corriente aplicable al proyecto 55
Tabla 11. Red PERT del proyecto 61
Tabla 12. Aspectos e impactos ambientales aplicables al proyecto 68
Tabla 13. Metodología EPS aplicada al proyecto 69
Tabla 14. Parámetros de calificación 73
Tabla 15. Rangos de jerarquización de importancia del efecto 75
Tabla 16. Matriz de identificación 76
Tabla 17. Matriz de calificación 79
Tabla 18. Presupuesto inversión inicial 84
Tabla 19. Costos de operación mensual 85
Tabla 20. Datos relevantes para elaborar los flujos de caja 86
Tabla 21. Flujo de caja sin proyecto 88
Tabla 22. Flujo de caja con proyecto 90
Tabla 23. Flujo de caja incremental 91
Tabla 24. Indicadores del análisis financiero 92

Lista de figuras

Ilustración 1. Circuito Eléctrico en una celda de combustible PEM (Elías & Jara, S.F.) 22
Ilustración 2. Esquema simplificado del funcionamiento de una pila de H2 de tipo PEM. (Barreras & Lozano, S.F.) 24
Ilustración 3. Componentes del sistema de celdas de combustible. Fuente: (RUDNICK, s.f.) 26
Ilustración 4. Sistema de pilas de combustible conectada a la red. Fuente: (San Martín, Zamora, San Martín, Aperribay, & Buigues, s.f.) 30
Ilustración 5. Ubicación en el mapa de la carrera 13 # 23-16. Fuente: Google Maps..... 35
Ilustración 6. Fachada lateral del edificio Transcoop. Fuente: Administración del sindicato de la Cooperativa de Servicios de Transporte Transcoop (febrero, 2017). 36
Ilustración 7. Esquema organizativo del estudio técnico. Fuente: Autor 41
Ilustración 8. Fachada del edificio Transcoop. Fuente: (Google Maps, Street view, 2016) 42
Ilustración 9. Ubicación edificio Transcoop en la ciudad de Bogotá. Fuente: (Google Maps, Google Maps, 2018) 43
Ilustración 10. Perfil de carga para los pisos 1,2,3 y 4 del edificio Transcoop. Fuente: Autor 47
Ilustración 11. Perfiles de carga del edificio Transcoop. Fuente: Autor 48
Ilustración 12. Celda de combustible HYFC-500W. Fuente: (Whole Win, 2016) 54
Ilustración 13. Inversor de corriente aplicable al proyecto. Fuente: (Mercado libre, 2018). Elaboración: Autor 56
Ilustración 14. Diagrama de la Red PERT del proyecto. Fuente: Autor 62
Ilustración 15. Ruta crítica del proyecto. Fuente: Autor 64
Ilustración 16. Distribución de la planta, piso 1. Fuente: Autor..... 66

1. INTRODUCCIÓN

Con el fin de mitigar los impactos al ambiente producto del acelerado crecimiento mundial, numerosos países se han sumado mediante convenciones globales para lograr acuerdos que permitan trabajar en pro de la disminución de la contaminación y la conservación de los recursos naturales, para ello el Gobierno Colombiano ha optado por contribuir a dicha causa mediante diversos incentivos económicos y tributarios para aquellas organizaciones que trabajen en la investigación ambiental, apliquen mecanismos de desarrollo y producción limpia y/o generen energía eléctrica a partir de fuentes no convencionales.

Al reconocer que en Colombia el Sistema Interconectado Nacional opera de forma centralizada para el suministro de energía eléctrica al país, se evidencia que los sistemas distribuidos representan una alternativa para suplir las necesidades energéticas de las zonas no interconectadas, como también de aquellas organizaciones que vislumbren allí opciones para la autogeneración y/o la operación conjunta con las redes de suministro actuales.

Por lo tanto, se buscará analizar la conveniencia de la implementación de celdas de combustible PEM a base de hidrógeno en el sistema de iluminación del edificio Transcoop ubicado en la carrera 13 ° 23-16 de la ciudad de Bogotá a través del análisis técnico, ambiental y económico. Para el primer caso se deberá realizar un Estudio Técnico en el cual se analizaran las características físicas del lugar; en el segundo caso, se desarrollará un análisis de impactos ambientales; y por último se aplicará un análisis costo-beneficio de acuerdo a los resultados de los puntos anteriores en relación con los incentivos económicos que la legislación nacional y distrital ofrece a quienes apliquen alternativas tecnológicas para la producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Sistema Interconectado Nacional Colombiano – SINC- es la conexión entre los sistemas eléctricos regionales en el cual se integra la generación de energía y las redes eléctricas con el fin de proveer a todo el país (González, 2016). En el año 2016, el SINC se abasteció en 66,06% de las hidroeléctricas, 28,49% de centrales térmicas, 4,65% por fuentes menores, 0,60% por cogeneradores y 0,20% por autogeneradores (XM S.A. E.S.P., 2016). El SINC al consolidarse cómo un sistema centralizado, es decir, una red que recibe energía de diferentes centrales generadoras y se encarga de distribuirla a los puntos de demanda (Marco, 2014), provoca impactos ambientales acumulativos, especialmente derivados de las centrales hidroeléctricas y termoeléctricas; en el primer caso algunas de las consecuencias más graves son: la pérdida de cobertura vegetal, muerte y desplazamiento de la fauna silvestre y el fraccionamiento de ecosistemas (Hernandez, 2011); en la segunda situación se estima que la quema de carbón es una de las principales causas del smog, la lluvia acida, el calentamiento global y los tóxicos atmosféricos (Medellín, 2002).

Por su parte, los sistemas distribuidos se han constituido en una alternativa viable a causa de la reducción en pérdidas de energía debido a que se sitúan cerca de las zonas de consumo lo que también minimiza las interrupciones en la prestación del servicio, además de utilizar fuentes de energía renovable para la micro-generación disminuyendo así las emisiones de CO^2 (ENDESA, 2014) (Rodriguez & CREG, 2009).

Según XM (empresa operadora del SINC) los autogeneradores han presentado una variación del 100% entre el año 2015 y 2016, lo que representa la toma de fuerza en la generación de energía a través de sistemas descentralizados y en ese sentido significa una

oportunidad para las celdas de combustible a base de hidrógeno para suministrar ascensores junto con sistemas de iluminación residencial y de oficinas (Potosí-Guerrero, Ramos-Paja, & Serna-Garcés, 2016).

Reviste especial interés elaborar un estudio de pre-factibilidad acerca de la introducción de pilas de hidrógeno en edificios, ya que al año 2015 los hogares y el sector comercial tuvieron una participación del 42% y 20% respectivamente en el consumo de energía total de Colombia (UPME, 2015). En tal sentido Colombia ha decidido fomentar la implementación de Fuentes No Convencionales de Energía – FNCE- a través de la Ley 1715 de 2014 y por lo tanto, es pertinente presentar un caso aplicado de FNCE en los sectores de mayor consumo de energía del país, de esta forma se realizará un estudio de pre-factibilidad en el edificio Transcoop que se encuentra ubicado en la zona centro de la ciudad de Bogotá - Colombia, en la Carrera 13 N° 23-16, en el cual operan las oficinas del Sindicato de la Cooperativa de Servicios de la Empresa de Transportes Transcoop que opera con energía suministrada por la red eléctrica de CODENSA S.A. E.S.P..

Aunque en la Ley 1715 de 2014 no se contempla la producción de energía a partir del hidrógeno se cree que puede ser una fuente importante para la generación y el suministro de energía eléctrica a edificios, por lo tanto, el trabajo de grado busca responder la siguiente pregunta:

¿Cuáles son los factores que determinan la viabilidad técnica, ambiental y económica para la implementación de celdas de combustible PEM a base de hidrógeno en el edificio Transcoop?

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Los administradores del edificio Transcoop han identificado que el costo de mantenimiento de sus instalaciones es muy elevado, por lo cual han permitido el arrendamiento de algunos pisos para vivienda y la primera planta como un parqueadero de motos con el fin de solventar sus egresos. El consumo de servicios públicos es uno de los factores fundamentales que incide en las partidas presupuestales a tener en cuenta para el desempeño de las funciones del sindicato, por lo tanto, uno de los aspectos a analizar es la eficiencia en el consumo de energía eléctrica.

Se enfocará el análisis hacia la conveniencia del suministro de energía eléctrica según su fuente, es decir, se realizará la comparación entre la fuente de energía convencional actual en el edificio y una fuente de energía no convencional. Para este caso se toma como fuente de energía alternativa la que se genera por medio de celdas de combustible PEM a base de hidrógeno ya que se ha demostrado la viabilidad de su implementación gracias a los incentivos del Gobierno Nacional a través de la Ley 1715 de 2014, a los cuales pueden acceder las personas jurídicas como el Sindicato de la Cooperativa de Servicios de la Empresa de Transportes Transcoop.

De acuerdo a lo anterior es importante el desarrollo del estudio de pre-factibilidad por parte de un administrador ambiental que aborde las problemáticas de la organización no sólo como variables netamente económicas sino también como todo un conjunto de decisiones en las que influyen los factores internos (recursos humanos y la capacidad de las instalaciones), así como también las oportunidades externas entre las que se encuentran las nuevas tecnologías junto con su implementación al resaltar que en la mayoría de los casos las empresas carecen del conocimiento adecuado para afrontar sus desafíos perdiendo

flexibilidad en la toma de decisiones. Por otro lado, cabe resaltar que estos profesionales poseen la capacidad de ofrecer diferentes alternativas que se enmarcan en soluciones tendientes a la contribución en la construcción de un país más sostenible a partir del trabajo en puntos focales promoviendo la autogestión.

De esta forma los resultados de este trabajo constituirán una fuente de información técnica, ambiental y económica que permita a la administración del edificio tomar decisiones respecto a las celdas de combustible PEM como alternativa para la generación y suministro de energía a sus instalaciones.

4. OBJETIVOS BÁSICOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar la conveniencia de la implementación de celdas de combustible PEM a base de Hidrógeno en el sistema de iluminación del edificio Transcoop ubicado en la carrera 13 ° 23-16 de la ciudad de Bogotá.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Elaborar un estudio técnico orientado a la implementación del sistema de celdas de combustible PEM a base de Hidrógeno en el edificio Transcoop.

2. Identificar y calificar los impactos ambientales por la implementación de un nuevo sistema de abastecimiento de energía en el edificio Transcoop.

3. Realizar un análisis costo-beneficio de la implementación de un nuevo sistema de abastecimiento eléctrico por celdas de combustible PEM a base de Hidrógeno evaluado en el sistema de iluminación del edificio Transcoop.

5. MARCO REFERENCIAL

5.1. MARCO TEÓRICO - CONCEPTUAL

5.1.1. Estudio de prefactibilidad

Es aquel que comprende el análisis Técnico – Económico de las alternativas de inversión que dan solución al problema planteado. Los objetivos de la pre-factibilidad se cumplirán a través de la preparación y evaluación de proyectos que permitan reducir los márgenes de incertidumbre a través de la estimación de los indicadores de rentabilidad socioeconómica y privada que apoyan la toma de decisiones de inversión (Thompson, 2009).

Este estudio profundiza en la investigación, y se basa principalmente en información de fuentes secundarias para definir con cierta aproximación, las variables principales referidas al mercado, a las alternativas técnicas para la operación y a la capacidad financiera de los inversionistas, entre otras. En términos generales, se estiman las inversiones probables, los costos de operación y los ingresos que demandará y generará el proyecto. Este estudio se caracteriza fundamentalmente por descartar soluciones con mayores elementos de juicio, aunque sigue siendo una investigación basada en información secundaria, no demostrativa (Sapag & Sapag, 2008).

Debe concentrarse en la identificación de alternativas y en el análisis técnico de las mismas, el cual debe ser incremental, es decir, debe realizarse comparando la situación "con proyecto" con la situación "sin proyecto" para lo cual debe contar con (Thompson, 2009):

- El Diagnóstico de la situación actual, que identifique el problema a solucionar con el proyecto.

- La identificación de la situación “Sin proyecto”
- El análisis técnico de la ingeniería del proyecto
- El tamaño del proyecto que permita determinar su capacidad instalada.
- La localización del proyecto
- El análisis de la legislación vigente aplicable al proyecto
- La ficha ambiental del proyecto
- La evaluación socioeconómica del proyecto
- La evaluación financiera privada del proyecto sin financiamiento que permita determinar su sostenibilidad operativa
- Las conclusiones del estudio que permitan recomendar si se debe postergar, reformular, abandonar el proyecto o continuar con el estudio de factibilidad

5.1.2. Estudio técnico

El estudio técnico pretende verificar la posibilidad técnica de la fabricación de un producto, además de analizar y determinar el tamaño, la localización, los equipos, las instalaciones y la organización óptimos requeridos para realizar la producción, es decir, se busca resolver las preguntas referentes a dónde, cuánto, cuándo, cómo y con qué producir lo que se desea, por lo que el aspecto técnico-operativo de un proyecto comprende todo aquello que tenga relación con el funcionamiento y la operatividad del propio proyecto (Baca, 2010).

Tiene por objeto proveer información para cuantificar el monto de las inversiones y de los costos de operación pertinentes para el análisis de la viabilidad financiera de un proyecto (Sapag & Sapag, 2008).

Una de las conclusiones de este estudio es que se deberá definir la función de producción que optimice el empleo de los recursos disponibles en la producción del bien o servicio del proyecto. De aquí podrá obtenerse la información de las necesidades de capital, mano de obra y recursos materiales, tanto para la puesta en marcha como para la posterior operación del proyecto (Sapag & Sapag, 2008).

Según Baca (2010) las partes que conforman el estudio técnico son:

1. Análisis y determinación de la localización óptima del proyecto.
2. Análisis y determinación del tamaño óptimo del proyecto.
3. Análisis de la disponibilidad y el costo de los suministros e insumos.
4. Identificación y descripción del proceso.
5. Determinación de la organización humana y jurídica que se requiere para la correcta operación del proyecto.

5.1.3. Estudio ambiental

Una tipología de estudios de impacto ambiental permite identificar tres tipos: cualitativos, cualitativo-numéricos y cuantitativos. Los métodos cualitativos identifican, analizan y explican los impactos positivos y negativos que podrían ocasionarse en el ambiente con la implementación del proyecto. Tanto la jerarquización como la valorización de estos efectos se basan comúnmente en criterios subjetivos, por lo que su uso está asociado con estudios

de viabilidad que se realizan en el estudio de perfil. Los métodos cualitativo-numéricos relacionan factores de ponderación en escalas de valores numéricos a las variables ambientales los cuales señalan que para determinar la localización de un proyecto es necesario considerar la combinación de factores posibles de cuantificar (el costo de un sistema de control de emanaciones tóxicas, por ejemplo) con factores de carácter subjetivo (como la satisfacción de un paisaje limpio) asignándoles una calificación relativa a cada una de estas variables. Los métodos cuantitativos determinan tanto los costos asociados con las medidas de mitigación total o parcial como los beneficios de los daños evitados, incluyendo ambos efectos dentro de los flujos de caja del proyecto que se evalúa. Según estos métodos, las medidas de mitigación de daños ambientales se adelantan hasta el punto en que el valor marginal del daño evitado se iguala con el costo marginal del control (Sapag & Sapag, 2008).

5.1.4. Análisis costo-beneficio

El Análisis Costo-Beneficio (ACB) es una de las herramientas más empleadas en el ámbito de la Administración pública y, concretamente, en el campo de la política ambiental. Como tal, el ACB no es sino la racionalización de una práctica cotidiana: sopesar las ventajas y los inconvenientes de cualquier decisión, es decir, es un análisis comparativo, que establece la conveniencia de una alternativa en relación con otras (Azqueta, 2007).

El punto de partida del Análisis Costo Beneficio es la necesidad de resolver algún tipo de problema, y para ello se intenta estructurar la información relevante de una forma que pueda ayudar a quien tome la decisión en su tarea, el analista irá atravesando una serie de etapas que podrían resumirse como sigue (Azqueta, 2007):

a) Identificación de las alternativas relevantes: Es fundamental hacer un gran esfuerzo para identificar correctamente las alternativas relevantes, ya que de otro modo se estaría falseando el resultado del análisis, incluyendo la opción de dejar todo como está a lo que se conoce como *alternativa cero.*

b) Diseño de un escenario de referencia: El analista va a realizar la evaluación de hasta qué punto una alternativa cualquiera ayuda a conseguir el objetivo que se ha propuesto el decisor, con respecto a qué hubiera ocurrido con la consecución de dicho objetivo en ausencia de la decisión que se está evaluando.

c) Identificación de los costos y beneficios: En tercer lugar, el analista deberá identificar todos aquellos aspectos de cada alternativa contemplada que le acercan, o le alejan, de la consecución del objetivo propuesto.

d) Valoración de los costos y los beneficios: Una vez identificados los costos y beneficios de cada alternativa, el analista debe valorarlos: reducirlos a una unidad de medida común, que tenga relación con el objetivo perseguido, y que permita comparar los distintos componentes tanto de los costos como de los beneficios, como ambos entre sí.

e) Actualización: En general, los impactos positivos y negativos de cualquiera de las opciones analizadas no se suelen manifestar instantáneamente: lo normal es que se extiendan a lo largo del tiempo. Por lo tanto, se hace necesario reducir este flujo neto a un único valor presente que tenga en cuenta el hecho de que el presente no vale lo mismo que el futuro, y permita comparar la rentabilidad relativa de distintos proyectos cuyo perfil temporal puede diferir sustancialmente.

f) Riesgo e incertidumbre: El analista ha de tomar en cuenta el riesgo y la incertidumbre ligados a los diferentes resultados, para penalizar aquellas opciones cuya varianza asociada es superior.

g) Criterios de selección: Finalmente, se deberá presentar una serie de indicadores de rentabilidad, además de los comentarios y la información adicional que considere oportunos, que resuman los aspectos esenciales del trabajo realizado, y ayuden a formarse una opinión al respecto. En definitiva, algún indicador que condense los aspectos esenciales del proceso de evaluación.

h) Seguimiento y control: Todo el ejercicio se basa sobre una serie de predicciones y expectativas. Lo normal es que, luego, las cosas resulten de otra forma: que se produzcan desviaciones. Estas desviaciones pueden ser resultado de muchos factores, previsibles unos, imprevisibles otros. Lo primero que se debe hacer es explicarlas; lo segundo, aprender de ellas. Esta etapa es esencial en un proceso de retroalimentación.

5.1.5. Sistemas distribuidos

Los sistemas distribuidos o también conocidos como generación distribuida –GD- representan un cambio en el paradigma de la generación de energía eléctrica centralizada, y aunque este concepto se remonta a los albores de la industria eléctrica, consiste en generar la energía lo más cerca posible al lugar del consumo incorporando las ventajas de la tecnología moderna y el respaldo de la red del sistema eléctrico, para compensar cualquier requerimiento adicional de compra o venta de electricidad (CONUEE, 2014).

Cuando se habla de generación distribuida también se refiere a fuentes no centralizadas de generación eléctrica que utilizan recursos como la energía eólica, fotovoltaica o la producción combinada de calor y electricidad y que se encuentran cerca de los consumidores. Con esta se puede impulsar una economía con menos emisiones de dióxido de carbono y más opciones para los consumidores. La combinación de sistemas de almacenaje de electricidad cada vez más baratos y potentes, la caída del costo de generación de la energía distribuida y el creciente interés de la sociedad y los Gobiernos por reducir las emisiones abren muchas oportunidades para estos sistemas (Beato, 2015).

5.1.6. Celdas de combustible

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico cuyo concepto es similar al de una batería. Consiste en la producción de electricidad mediante el uso de químicos, que usualmente son hidrógeno y oxígeno, donde el hidrógeno actúa como elemento combustible, y el oxígeno como elemento oxidante que es obtenido directamente del aire. También pueden ser usados otros tipos de combustibles que contengan hidrógeno en su molécula, tales como el gas metano, metanol, etanol, gasolina o diésel entre otros (UTP, S.F.).

Es un sistema de flujo estable, en el cual el combustible y el oxidante se suministran desde una fuente externa que provee un medio de transformar energía química en eléctrica, sin combustión y sin contaminar el aire ni el agua, en un proceso continuo directo mediante reacciones de reducción y oxidación en presencia de un catalizador, y elimina los productos de la reacción (Acuña & Muñoz, 2001).

El proceso convierte la energía química de un combustible directamente en electricidad. En casi todos casos el combustible es hidrógeno o una mezcla de gases rica en hidrógeno que produce la siguiente reacción (SERC, 2014):

2 Hidrógeno (H_2) + Oxígeno (O_2) (del aire) --> Electricidad + 2 Agua (H_2O) (Vapor) + Calor

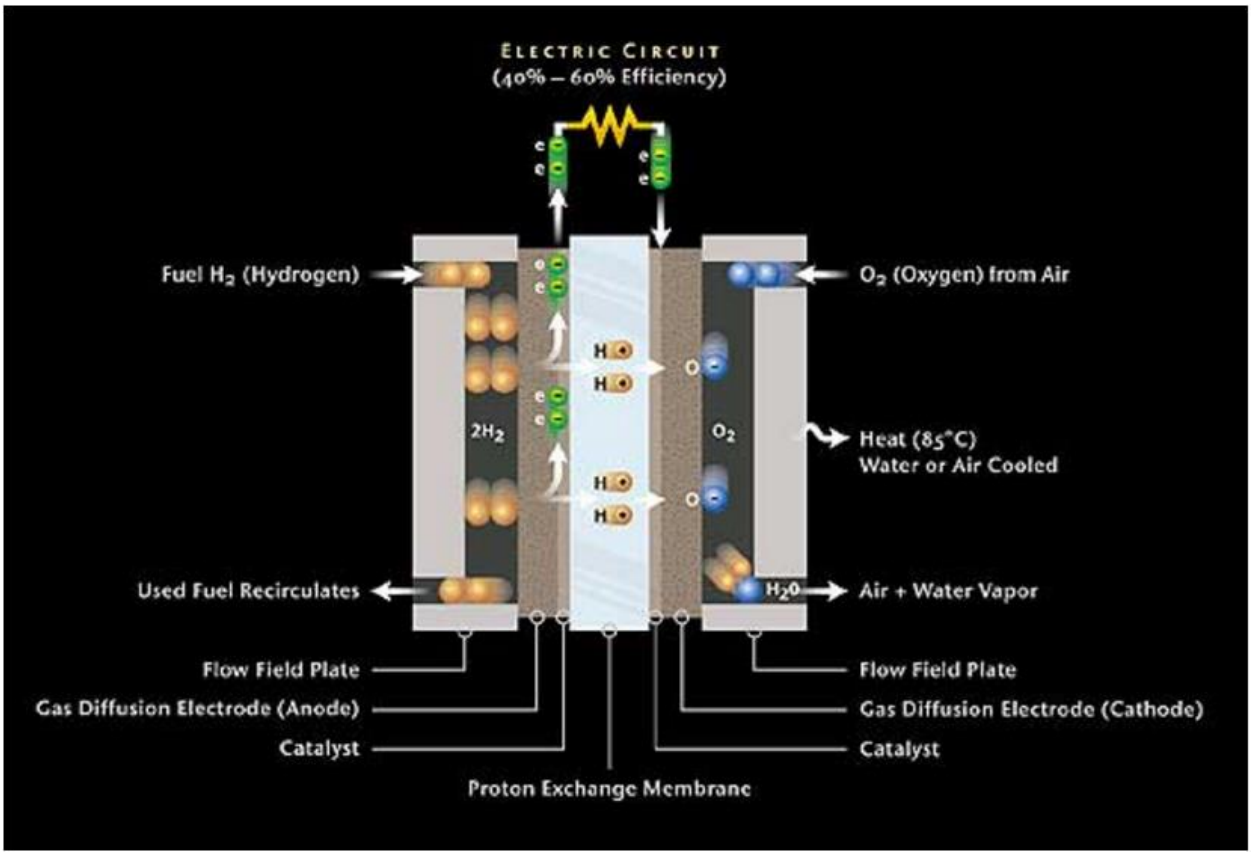

Ilustración 1. Circuito Eléctrico en una celda de combustible PEM (Elías & Jara, S.F.)

El proceso de generación eléctrica no considera la combustión del hidrogeno, sino que una asociación electrónica genera corriente eléctrica, agua y calor a partir de esta reacción. Además, la generación de energía es directa y dependiendo del tipo de celda en conjunto

con una operación, puede llegar a eficiencias de 60% y al no contar con partes móviles le otorga la característica de ser silenciosa (Elías & Jara, S.F.).

Existen varios tipos de celdas de combustible de acuerdo al combustible que utilizan y la temperatura en la que operan, estas celdas son de: Ácido Fosfórico (PAFC), Carbonato Fundido (MCFC), Óxido Sólido (SOFC), Alcalinas y de Polímero Sólido PEM por sus siglas en ingles *Proton Exchange Membrane*, o, membrana de intercambio protónico (UTP, S.F.).

Estas últimas se denominan así porque el electrolito está constituido por una membrana polimérica que separa la parte anódica y catódica de una celda. Se trata de un conductor protónico, que permite el paso a través de él de los iones H+, pero con la particularidad de ser impermeable al resto de sustancias (Barreras & Lozano, S.F.).

Básicamente, una celda está compuesta por tres zonas: un electrodo cargado negativamente (cátodo), un electrodo cargado positivamente (ánodo), y en medio la membrana electrolítica que separa físicamente los gases a ambos lados. El combustible, en este caso hidrógeno, es introducido por los canales mecanizados en la placa bipolar por el lado del ánodo y guiado a través de una capa difusora de material carbonoso hasta la capa catalítica, donde tiene lugar la reacción de oxidación del hidrógeno. La capa difusora debe ser un material altamente poroso, de modo que facilite la difusión del hidrógeno para alcanzar más eficientemente las partículas de catalizador (Barreras & Lozano, S.F.).

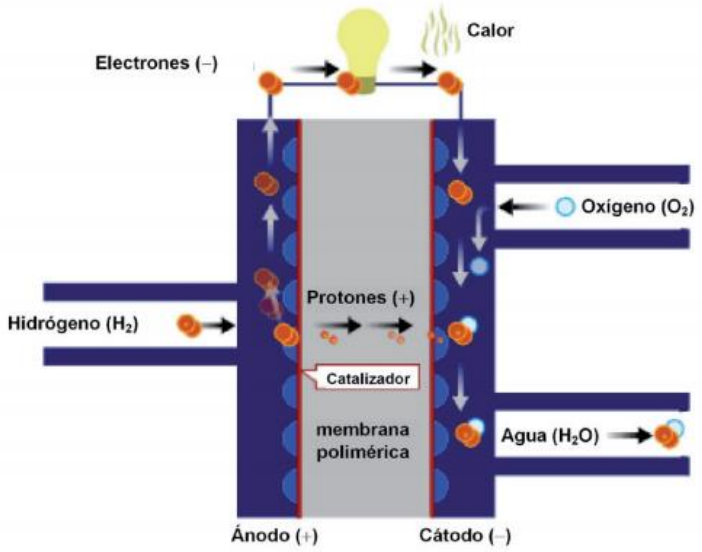

Ilustración 2. Esquema simplificado del funcionamiento de una pila de H2 de tipo PEM. (Barreras & Lozano, S.F.)

Los protones generados atraviesan la membrana polimérica de intercambio protónico, pero los electrones no pueden cruzarla, debido a que no es conductora electrónica y buscan la salida a través de un circuito alternativo: el formado por las capas difusoras (que al ser de un material carbonoso conducen la electricidad) y las placas, creando una corriente eléctrica disponible para la realización de un trabajo. Por otro lado, el aire entra a través de los canales del cátodo, atraviesa la capa difusora y el oxígeno se combina en la capa catalítica con los protones que pasan a través de la membrana y los electrones del circuito exterior, generando agua y calor. Estos dos subproductos son evacuados a través del flujo de gases en el cátodo y, en el caso del calor con el medio que rodea a la pila (Barreras & Lozano, S.F.).

5.1.7. Componentes del sistema de alimentación y funcionamiento

El diseño del sistema de celdas de combustible es complejo, y puede variar significativamente dependiendo del tipo de celda y su aplicación. Sin embargo, varios componentes pueden ser encontrados en muchos sistemas de celdas de combustible (ENERGY, s.f.). cómo lo son:

- Pila de celdas de combustible (Stack)
- Procesador de combustible
- Adaptadores de potencia
- Compresor de aire
- Humidificadores

El sistema de celdas de hidrogeno opera de tal manera que el Stack sea alimentado con hidrógeno con un grado de pureza que varía de entre 95 a 99% dependiendo del fabricante, este combustible puede ser suministrado de manera directa mediante pipetas que almacenan hidrogeno puro, como también puede ser suministrado a través de un reformador de combustible, el cual obtiene el hidrógeno de diversos combustibles ricos él tales como el metanol, diésel, gasolina o carbón gasificado (ENERGY, s.f.).

Una vez el hidrógeno se encuentre al interior de la celda esta realizara su proceso electrolítico que libera tanto energía en forma de corriente directa (DC) como también hidrógeno, este último debe liberarse en compañía de oxígeno para producir vapor de agua, en cuyo caso el oxígeno debe ingresar de manera paralela con el hidrógeno para lo cual es necesario contar con un compresor de aire que aumenta la presión de entrada del mismo incrementando la eficiencia del sistema, con este mismo objetivo se podrá incluir un

humidificador junto con el compresor el cual cumplirá con la función de humedecer el aire que ingresa puesto que la celda no funciona adecuadamente con aire seco. Para atender el principal producto de la electrólisis que es la energía DC se necesita de un inversor de corriente con el fin de transformar la energía de salida en corriente alterna (AC) que es la que se utiliza de manera residencial y comercial garantizando que los aparatos electrónicos funcionen de manera correcta.

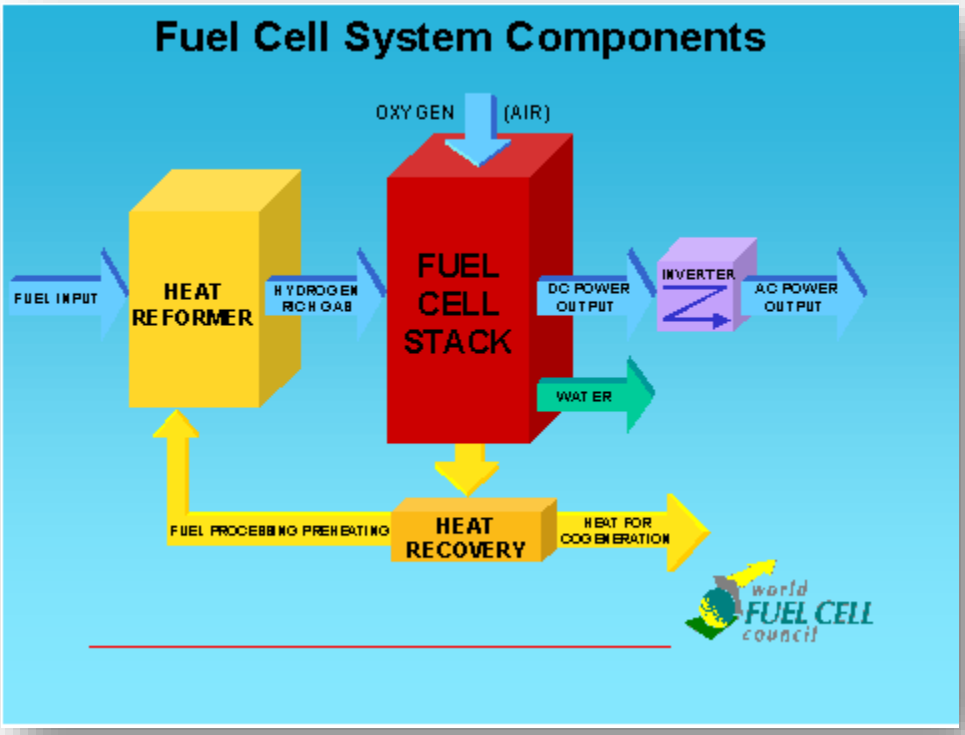

Ilustración 3. Componentes del sistema de celdas de combustible. Fuente: (RUDNICK, s.f.)

Por último y de manera opcional para manejar los remanentes del calor emitido por el trabajo de las celdas y dependiendo del tamaño de la misma, es posible la instalación de un recuperador de calor que brinde la posibilidad de cogeneración de energía.

5.1.7.1. Pila de celdas de combustible (Stack)

La pila de celdas de combustible es el corazón del sistema de poder de una celda de combustible. Esta genera electricidad en forma de corriente directa (DC) por medio de reacciones electro-químicas que tienen lugar dentro de la celda de combustible. Dicha reacción es producida al pasar corriente eléctrica por los electrolitos en disolución y tiene como resultado la separación de los elementos del compuesto disuelto, en este caso el hidrógeno, a esto se le llama electrólisis. Se debe tener en cuenta que los electrolitos son sustancias que en disolución se separan en iones y permiten el paso de la corriente eléctrica (Químicas, 2015).

Una sola celda de combustible produce menos de 1V, lo cual es insuficiente para muchas aplicaciones. Además, las celdas de combustible individuales son generalmente apiladas en series dentro de una pila de celdas de combustible (Stack). Una batería o pila de celdas de combustible convencional puede consistir de cientos de celdas de combustible. La cantidad de poder producido por la celda depende de varios factores, dependiendo del tipo de celda, tamaño de la celda, temperatura en la cual opera, y la presión de los gases suministrados a la celda.

5.1.7.2. Procesador o reformador de combustible

El procesador de combustible convierte el combustible en una forma aprovechable para la celda de combustible. Dependiendo del combustible y el tipo de celda, el procesador puede

ser una simple cama absorbente[1] para remover impurezas, o una combinación de múltiples reactores y absorbentes.

Si el sistema es operado por un combustible convencional rico en hidrógeno, como el metanol, gasolina, Diesel, o carbón gasificado, un reformador es usado convencionalmente para convertir hidrocarburos en un gas mezclado de hidrógeno y carbón llamado “reformado”. En muchos casos, la reformación es cuando se envía a un conjunto de reactores para convertir el monóxido de carbono a dióxido de carbono y remover cualquier traza de monóxido de carbono remanente y una cama absorbente (filtro) para remover otras impurezas, tales como compuestos de azufre, antes de ser suministrados a la pila de combustible. Este proceso evita que las impurezas en el gas se unan con los catalizadores de las pilas de combustible. Este proceso de unión también se denomina "intoxicación" porque reduce la eficiencia y la esperanza de vida de la pila de combustible.

Algunas celdas de combustible, como las de carbonato y oxido sólido, operan a temperaturas suficientemente altas para el combustible sea reformado por la misma celda. Este proceso es llamado reformación interna. Las celdas que usan reformación interna todavía necesitan de trampas para remover impurezas del combustible sin reformar antes de suministrarlo a la celda de combustible. Ambas, reformación interna y externa liberan dióxido de carbono, pero debido a la alta eficiencia de las celdas de combustible, menos dióxido de carbono es emitido por los motores de combustión interna, tales como los usados para operar vehículos a gasolina.

[1] Sorbent bed. Se utiliza cómo método de filtración físico-química en la que el absorbente depende del tamaño de las partículas que se espera retener.

5.1.7.3. Adaptadores de potencia

Los acondicionadores de potencia incluyen control de corriente (amperaje), voltaje, frecuencia, y otras características de la corriente eléctrica para encontrar las necesidades de aplicación. Las celdas de combustible producen electricidad en forma de corriente directa (DC). En un circuito DC, los electrones fluyen en una sola dirección. La electricidad en un hogar o lugar de trabajo se encuentra en forma de corriente alterna (AC), la cual fluye en ambas direcciones en ciclos alternos. Si la celda de combustible es usada para operar un equipo que usa AC, la corriente directa tendrá que ser convertida el corriente alterna.

Ambas potencias AC y DC tienen que ser acondicionadas. Inversores y acondicionadores actuales adaptan la corriente eléctrica de la celda de combustible para satisfacer las necesidades eléctricas de las aplicaciones, ya sea un simple motor eléctrico o una compleja red de suministro de energía. La conversión o acondicionamiento reduce ligeramente la eficiencia del sistema, alrededor del 2% y 6%.

5.1.7.4. Compresor de aire

El rendimiento de la celda de combustible mejoras a medida que aumenta la presión del gas reactivo; por lo tanto, muchos de los sistemas de celda de combustible incluyen un compresor de aire, el cual aumenta la presión de la entrada de aire de 2-4 veces la presión atmosférica ambiental. Para aplicaciones de transporte, los compresores deben tener una eficiencia de al menos 75%. En algunos casos, también se incluye un expansor para recuperar energía de los gases de escape de alta presión. La eficiencia del expansor debe ser de al menos 80%.

5.1.7.5. Humidificadores

La membrana de electrolito de polímero en el corazón de una celda de combustible PEM no funciona bien cuando está seca, por lo que muchos sistemas de celdas de combustible incluyen un humidificador para el aire de entrada. Los humidificadores usualmente consisten en una membrana delgada, la cual puede estar hecha del mismo material de la PEM. Al fluir el aire de entrada seco en un lado del humidificador y el aire de escape húmedo en el otro lado, el agua producida por la pila de combustible puede reciclarse para mantener el PEM bien hidratado.

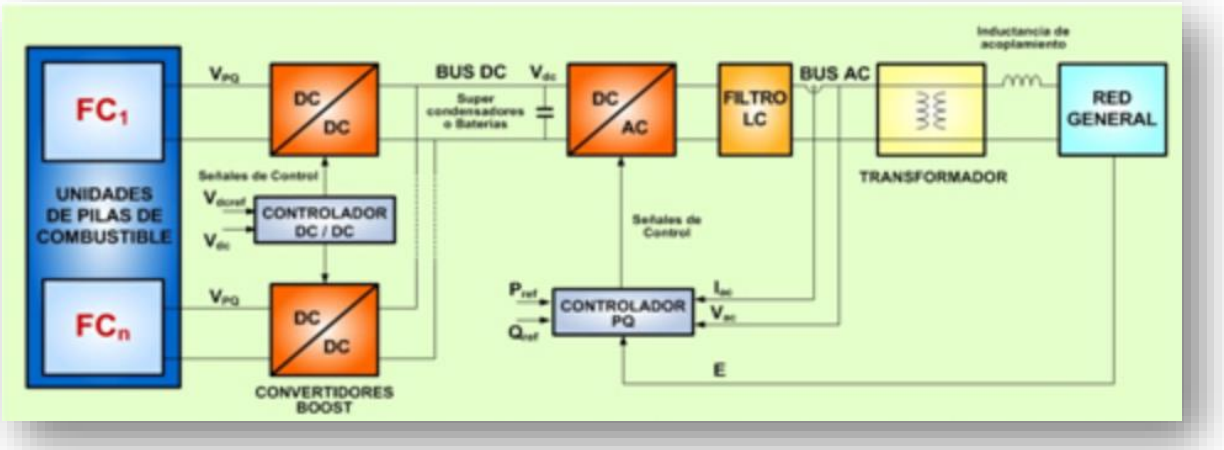

Ilustración 4. Sistema de pilas de combustible conectada a la red. Fuente: (San Martín, Zamora, San Martín, Aperribay, & Buigues, s.f.)

5.2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Las celdas de combustible emergen como una alternativa enmarcada en las fuentes de energía renovables dado que son ambientalmente amigables por ser poco ruidosas, altamente eficientes y casi libres de contaminantes residuales, además de poseer una fuente

de abastecimiento (Hidrogeno) más confiable que otras energías alternativas tales como las celdas fotovoltaicas o los generadores eólicos que se ven afectados por el cielo nublado y la baja velocidad del viento respectivamente; así como también , estas celdas poseen la capacidad de producir la misma cantidad de energía en un espacio más reducido ya que al comparar su generación de energía respecto al espacio utilizado para el funcionamiento de los equipos generadores se evidencia que es necesario contar con cerca de 200 veces más terreno para la instalación de paneles solares que producen 1,4 Megavatios y aproximadamente 600 veces más para la adecuación de seis turbinas eólicas que generen 14,9 Megavatios (Potosí-Guerrero, Ramos-Paja, & Serna-Garcés, 2016).

En un contexto internacional, Estados Unidos a través del Departamento de Energía (DOE – Department of Energy), la Administración Federal de Transito (FTA – Federal Transit Administration) y el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL), trabajan de forma conjunta con el fin de avanzar en el montaje de infraestructura, el conocimiento de la tecnología y la viabilidad comercial entorno a las tecnologías del Hidrogeno y la concordancia con los objetivos planteados por su gobierno (Moreno & Vargas, 2013).

A nivel mundial Canadá es un líder en el sector del hidrógeno y las celdas de combustibles, una de sus redes más reconocidas es el la Red de Ciencias Naturales e Ingeniería de Investigación de Canadá (NSERC - Natural Sciences and Engenieering Research Council of Canada) trabaja en pro de la superación de las barreras técnicas para la introducción de las tecnologías del hidrógeno para el desarrollo de métodos más limpios y renovables para la producción de hidrógeno de alta calidad a menor costo ya sea a partir de residuos o de los recursos renovables, el desarrollo de estrategias de almacenaje que sean prácticas y económicas y la elaboración de estrategias eficaces y seguras en cuanto a infraestructura

para el despliegue de las tecnologías del hidrógeno cuyos programas de investigación requieren de una investigación interdisciplinar entre ingeniería, física, química y biología (Moreno & Vargas, 2013).

Francia con su Comisión de Energía Atómica, tiene una división para el desarrollo completo de todas las tecnologías requeridas para el aprovechamiento del hidrógeno, desde su producción a través de electrolisis y des carbonización de hidrocarburos, hasta la investigación de pilas de combustible SOFC (Solid Oxid Fuel Cell) para aplicaciones estacionarias, pasando por el almacenamiento en todas sus formas (Moreno & Vargas, 2013).

Como iniciativa nacional, India ha creado un Grupo de Dirección encargado del diseño del Plan Nacional de Energía de Hidrógeno en la India, en el cual han participado importantes empresas interesadas en el desarrollo de esta tecnología. Este plan cubre la aplicación del hidrógeno en vehículos, en generación de energía, en almacenamiento y producción de hidrógeno y en sistemas de integración (Moreno & Vargas, 2013).

A modo de ejemplo latinoamericano se incluye a Argentina ya que también cuenta con centros de investigación, y uno de ellos es el Instituto de Investigaciones Físico Químicas Teóricas y Aplicadas (INIFTA), el cual cuenta con un amplio rango de líneas de investigación que se encuentra trabajando para el desarrollo de nuevos materiales para electrodos de baterías recargables, el estudio de sus propiedades frente al hidrógeno, y su comportamiento electroquímico. En el desarrollo de este país se puede evidenciar el enfoque investigativo hacia la producción y almacenamiento del hidrógeno en pilas de combustible, como de igual forma se han desarrollado prototipos de celdas multimodulo de tipo PEM (Moreno & Vargas, 2013).

Para el caso nacional, a pesar de los beneficios ambientales que ofrecen las celdas de combustible la mayor desventaja es su elevado costo, por lo tanto se ha visto limitada la implementación de esta alternativa de energía no convencional, sin embargo el Gobierno Colombiano ha propuesto diversos incentivos, tales como deducciones en la declaración de renta, la exclusión del IVA a la maquinaria y servicios, la exención del pago de derechos arancelarios en la importación de equipos, materiales e insumos, y por último la depreciación acelerada de maquinaria, equipos y obras civiles, contemplados en la Ley 1715 de 2014 por la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional, además de abordarse en el Estatuto Tributario para las personas jurídicas (cualquier empresa o compañía con capacidad de inversión) la deducción en su renta del 100% del valor de las investigaciones y mejoras ambientales (Potosí-Guerrero, Ramos-Paja, & Serna-Garcés, 2016).

Lo anterior indica que en Colombia se presenta un ambiente favorable para que las personas jurídicas en áreas urbanas contribuyan a la reducción de emisiones contaminantes por medio de la implementación o adopción de celdas de combustible para la generación de energía eléctrica en remplazo del suministro por parte de la red eléctrica convencional y el diésel, todo mediante los incentivos propuestos en la Ley 1715 de 2004 y el Estatuto Tributario (Potosí-Guerrero, Ramos-Paja, & Serna-Garcés, 2016).

5.3.MARCO CONTEXTUAL

El edificio Transcoop se encuentra ubicado en la carrera 13 ° 23-16 de la ciudad de Bogotá, en este operan las oficinas del sindicato de la Cooperativa de Servicios de Transportes Transcoop y cuenta con cuatro pisos, cada uno de aproximadamente 90m^2 distribuidos de la siguiente manera:

- Piso 1: Portería, local (abarca aproximadamente el 70% del espacio), baño, salón de oficios varios, escalera al mezanine o entre piso.
- Mezanine: Oficina, baño y salón de conferencias
- Piso 2: Oficina, baño, cocina y salón de reuniones.
- Piso 3: Dos cuartos y baño.
- Piso 4: Dos oficinas y cocina.

Actualmente el local del piso 1 se encuentra arrendado para ser utilizado como parqueadero de motos. De igual forma, los pisos 2, 3 y 4 se encuentran en arriendo para uso residencial, por lo tanto, las actividades propias del sindicato de la cooperativa de servicios se desarrollan en el mezanine, ubicado entre la primera y segunda plana de las instalaciones.

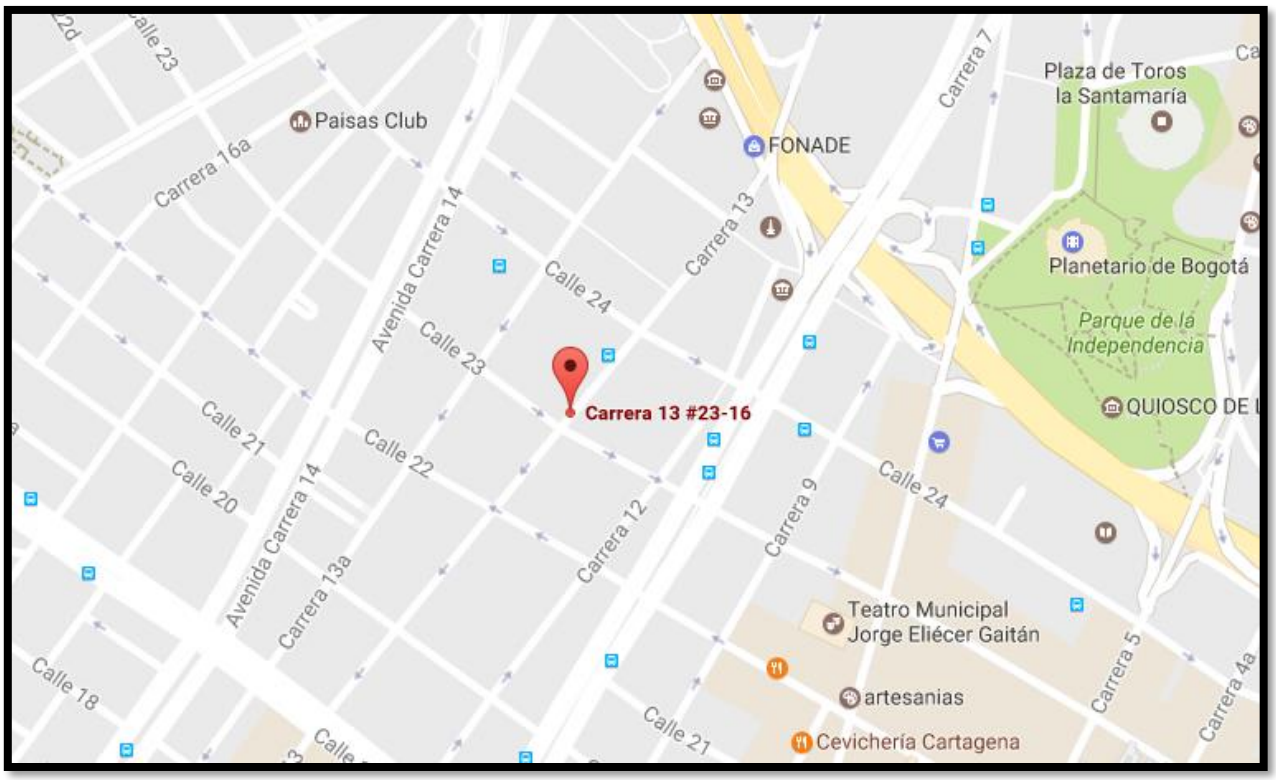

Ilustración 5. Ubicación en el mapa de la carrera 13 # 23-16. Fuente: Google Maps

Ilustración 6. Fachada lateral del edificio Transcoop. Fuente: Administración del sindicato de la Cooperativa de Servicios de Transporte Transcoop (febrero, 2017).

5.4. MARCO LEGAL

5.4.1. Ley 1715 de 2014

Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. En esta ley se abordan los incentivos para la promoción de la investigación, desarrollo y e implementación de Fuentes No Convencionales de Energía –FNCE- tales como la deducción del valor de la inversión en la declaración de renta, la exclusión del IVA a la maquinaria y servicios nacionales o importados destinados a las etapas de pre- inversión e inversión para la producción y utilización de energía a partir de las fuentes no convencionales, la exención del pago de derechos arancelarios en la importación de maquinaria, equipos, materiales e insumos necesarios para el desarrollo exclusivo de labores de pre-inversión y de inversión de proyectos con dichas fuentes, y por último la depreciación acelerada de maquinaras, equipos y obras civiles que sean necesarios y exclusivos para el desempeño de las FNCE como en los incentivos anteriores y en cuyo caso la depreciación no será mayor del veinte por ciento (20%) como tasa global anual (Congreso de Colombia, 2014).

5.4.2. Ley 1819 de 2016

Por medio del cual se adopta una reforma tributaria estructural. Por medio de esta ley se deroga el artículo 158-2 del Estatuto Tributario, en el cual se establecía el derecho de las personas jurídicas a deducir de su renta anual el valor de las inversiones en control y mejoramiento ambiental realizadas en el año gravable sin que este monto sobrepasara el 20% de la renta líquida del contribuyente (Estatuto Tributario Nacional, s.f.); y se agrega el articulo 255 al Estatuto tributario, el cual contempla que dicha deducción se realizara

únicamente por el 25% de las inversiones en control y mejoramiento ambiental realizadas en el año gravable, y así mismo se deberá contar con la previa acreditación que efectúe la autoridad ambiental respectiva, en la cual deberá tenerse en cuenta los beneficios ambientales directos asociados a dichas inversiones. Sin embargo, se hace la aclaración que la reglamentación aplicable al antiguo artículo 158-2 del Estatuto Tributario será aplicable al artículo 255 del mismo (Congreso de Colombia, Ley 1819 de 2016, 2016).

5.4.3. Decreto 3172 de 2003

Por medio del cual se reglamenta el artículo 158-2 del Estatuto Tributario. A través de este decreto se define qué y cuáles son las inversiones en control y mejoramiento ambiental, los beneficios ambientales directos, los requisitos para proceder a las deducciones tributarias, además de indicar cuáles son las entidades autorizadas para expedir las debidas certificaciones y en qué casos tomaran parte en la expedición de las mismas (Presidencia de la República de Colombia, 2003).

5.4.4. Resolución 136 de 2004

Por medio del cual se establece el procedimiento para solicitar la acreditación de las inversiones de control y mejoramiento ambiental. En esta se establecen todos los requisitos que se deben tener en cuenta al momento de solicitar ante la entidad ambiental competente la acreditación o certificación de las inversiones realizadas; se indica el procedimiento a seguir al momento de la solicitud, así como también se brindan instrucciones sobre cómo calcular el beneficio ambiental (Ministerio de Ambiente, 2004).

6. METODOLOGÍA

El desarrollo de este proyecto se llevará a cabo bajo el seguimiento de una metodología que contempla los instrumentos que se utilizarán para el desarrollo de los objetivos específicos. Tales instrumentos se han desglosado en actividades cuya ejecución favorecerá a dar respuesta al objetivo general del proyecto.

Tabla 1. Metodología del proyecto

	Instrumentos	Actividades
1. Elaborar un estudio técnico orientado a la implementación del sistema de celdas de combustible PEM a base de Hidrógeno en el edificio Transcoop	° Análisis dimensional ° Estimación del tamaño por crecimiento geométrico de la demanda ° Diagramas de flujo PERT y CPM ° Distribución de planta	° Ubicar el sector de la organización ° Determinar la localización optima del proyecto ° Determinar el tamaño optimo del proyecto ° Identificar y seleccionar tecnologías ° Analizar la disponibilidad y el costo de los suministros e insumos ° Identificar y describir los procesos ° Determinar los tiempos de los procesos ° Determinar la ruta crítica ° Identificar y describir los equipos e instalaciones ° Identificar la distribución de la planta

2. 1. Identificar y calificar los impactos ambientales por la implementación de un nuevo sistema de abastecimiento de energía en el edificio Transcoop.	° Estudio de Impacto Ambiental (EsIA) con la metodología de Entradas-Procesos- Salidas (EPS) ° Calificación de importancia de impactos con la metodología de Vicente Conesa modificada por Miguel Gamboa ° Matriz de importancia ° Matriz de calificación	° Elaborar la línea base del proyecto ° Identificar las áreas de significancia ° Identificar, calificar, priorizar y analizar los impactos
3. Realizar un análisis costo-beneficio de la implementación de un nuevo sistema de abastecimiento eléctrico por celdas de combustible PEM a base de Hidrógeno evaluado en el sistema de iluminación del edificio Transcoop	Análisis Costo - Beneficio (RCB)	° Elaborar los flujos de caja de cada alternativa ° Determinar el valor presente de los beneficios ° Determinar el valor presente de los costos ° Calcular los indicadores de decisión: RCB, VPN, TIR y PAYBACK

Fuente: Autor

7. CAPITULO I: ESTUDIO TÉCNICO

En el presente capítulo se abordarán las especificaciones técnicas del proyecto necesarias para la implementación del mismo en el edificio Transcoop, por lo tanto, se manejarán diferentes métodos de análisis para identificar la localización óptima de las celdas de combustible al interior del edificio, el tamaño del proyecto a través del cual se procederá a identificar y seleccionar la tecnología adecuada que cubra las necesidades allí documentadas para finalmente realizar la descripción de las actividades necesarias para la puesta en marcha del proyecto.

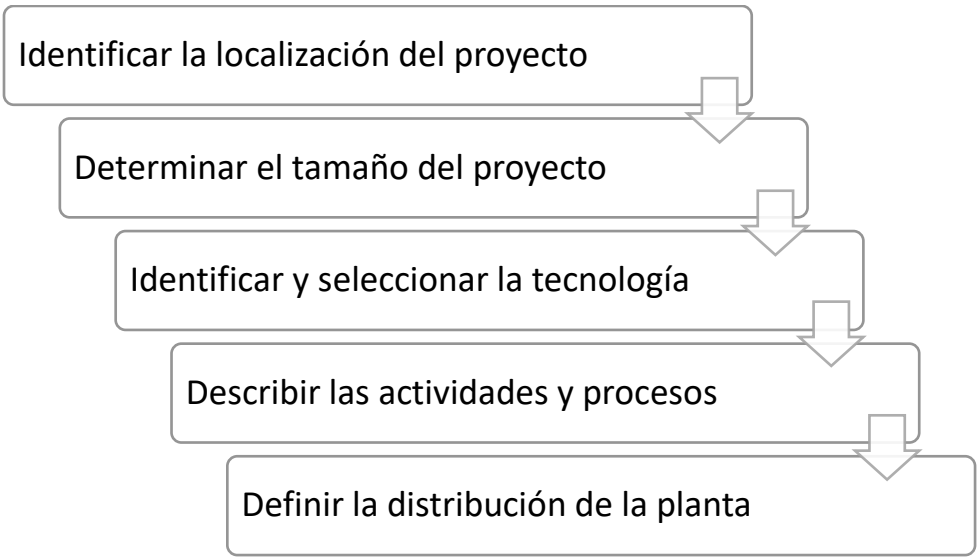

Ilustración 7. Esquema organizativo del estudio técnico. Fuente: Autor

7.1. LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto estará ubicado en la ciudad de Bogotá – Colombia específicamente en el barrio San Diego de la localidad Santa Fe, con dirección puntual en la carrera 13 ° 23-16, en este lugar se encuentra el edificio en el cual operan las oficinas del sindicato de la Cooperativa de Servicios de Transportes Transcoop que cuenta con cuatro pisos, cada uno de aproximadamente 210m^2 (SINUPOT, 2018).

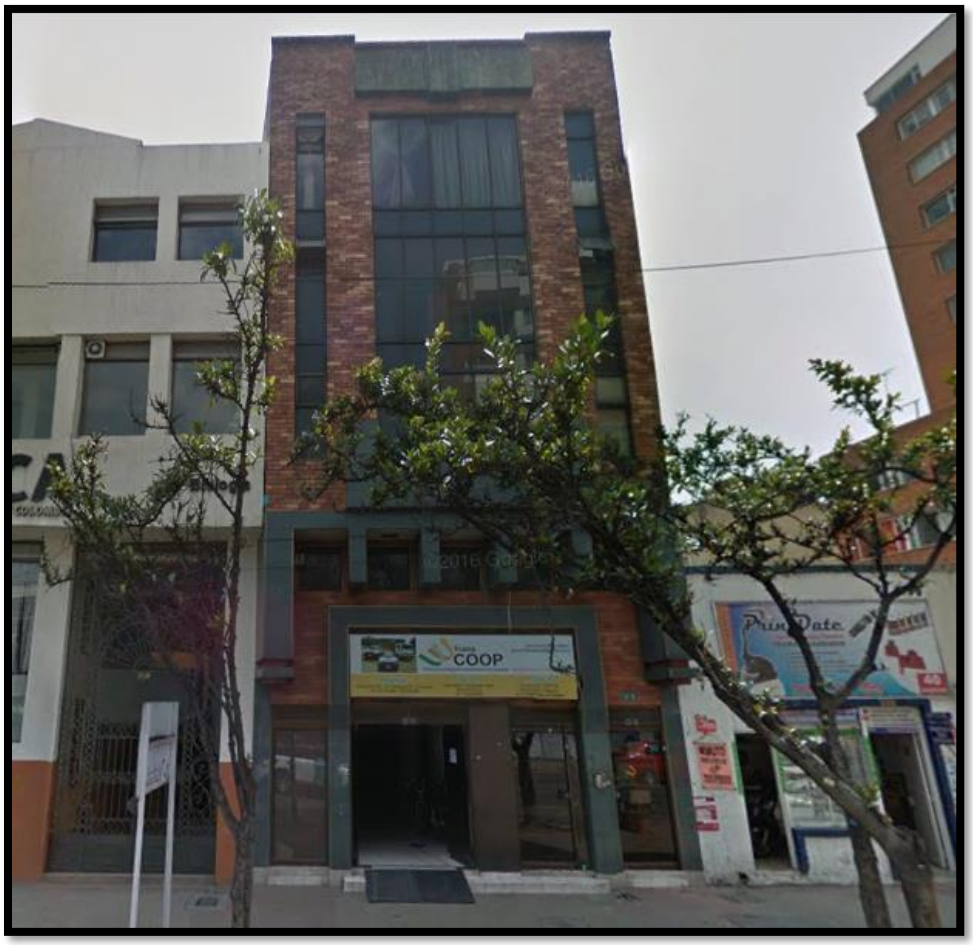

Ilustración 8. Fachada del edificio Transcoop. Fuente: (Google Maps, Street view, 2016)

Las coordenadas de ubicación del edificio son:

- Latitud: 4°36’38.19” N
- Longitud: 74°04’22.84”

En la siguiente imagen tomada de (Google Maps, Google Maps, 2018) se evidencia la ubicación del lugar con un punto rojo, el cual se encuentra entre la carrera 13 y 12 al norte de la calle 22 quedando situado al lado de la sede de Biología de la Universidad Incca de

Colombia –UNINCCA-.

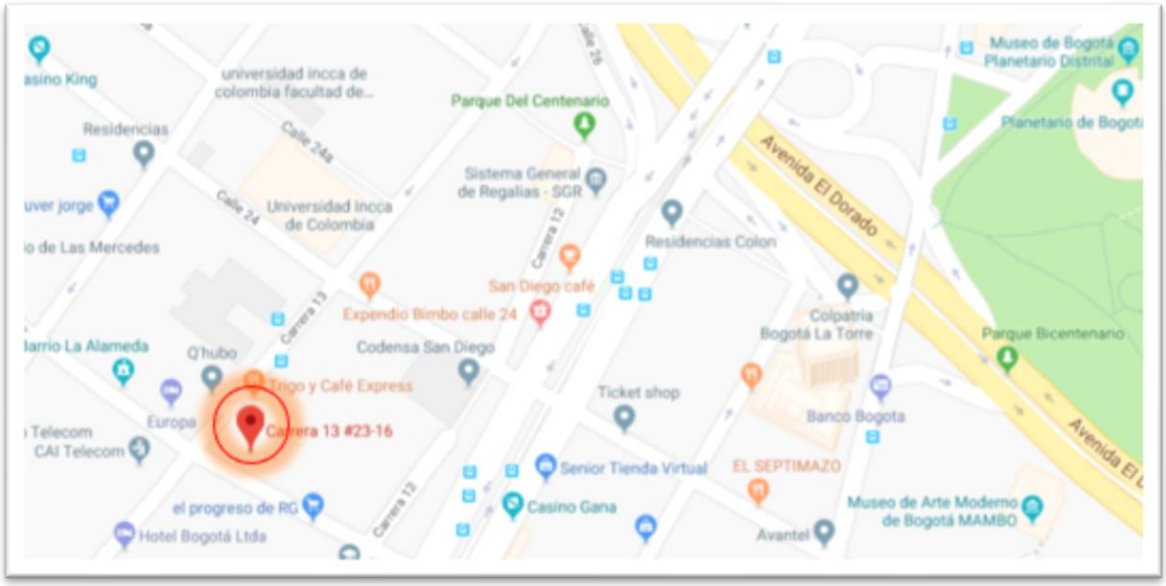

Ilustración 9. Ubicación edificio Transcoop en la ciudad de Bogotá. Fuente: (Google Maps, Google Maps, 2018)

7.2. TAMAÑO DEL PROYECTO

En el edificio se desarrollan actividades comerciales y residenciales que generan diversos consumos de energía y cargas variadas a la red eléctrica, por lo tanto, el comportamiento de cada planta se refleja en las facturas del servicio eléctrico que provee la empresa de energía para Bogotá, CODENSA S.A. ESP, las cuales se tomarán como marco de referencia para el presente estudio.

Tabla 2. Consumo promedio de energía del edificio Transcoop

	Consumo promedio de energía (Kwh/mes)
Piso 1	444,80
Piso 2	113,10 [2]
Piso 3	40,57
Piso 4	447,47
TOTAL	**1.045,94**
Kwh / Hora	**1,45**

Fuente: Autor

La tabla 1 muestra el consumo de energía eléctrica total del edificio, es decir, incluye los aportes de todos los equipos electrónicos además de las cargas al sistema por parte de la iluminación del lugar. Cómo resultado se evidencia que el consumo mensual de las instalaciones es de 1.045,94 Kwh, esto indica que por hora el edificio llega a utilizar 1,45 Kw de la red eléctrica.

Para identificar el tamaño óptimo del proyecto se realizó un estudio de cargas o aforo que consiste en la visita a las instalaciones que son objeto de estudio para ejecutar la verificación presencial y el recuento de los equipos eléctricos, bombillos y cualquier aparato que utilice energía eléctrica junto con las especificaciones técnicas de cada uno relacionadas al consumo de energía, luego de esto se procede a identificar el tiempo de uso de cada equipo con el fin de hallar el consumo de energía eléctrica. Los hallazgos serán comparables con las mediciones que arroja el contador de la red eléctrica del edificio que se encuentran en las facturas del servicio emitidas por CODENSA S.A. ESP.

[2]Por la ausencia de facturas se tomó el dato directamente del aforo aplicado

Se debe tener en cuenta que a pesar de haber realizado el aforo con la totalidad de equipos eléctricos y luminarias presentes en la mayoría de las plantas de las instalaciones del edificio Transcoop exceptuando el piso 4° por condiciones adversas, sólo se revisarán los hallazgos para el sistema de iluminación teniendo en cuenta que el proyecto se enfoca únicamente en esta área. Los datos encontrados a través del aforo son los siguientes:

Tabla 3. Estudio de cargas para el sistema de iluminación del piso 1 del edificio Transcoop

Equipo	Cantidad (Unidad)	Potencia (Watt)	Tiempo uso (Horas/ Día)	Tiempo uso (Horas/Semana)	Tiempo uso (Horas/ Mes)	Consumo (Wh/Día)	Consumo (Wh/Semana)	Consumo (Wh/Mes)
Piso 1								
Bombillo LED 17W	2	17	6	42	182	204	1.428	6.183
Bombillo incandescente	1	100	1	7	30	100	700	3.031
Bombillo LED 23W	3	23	16	112	485	1.104	7.728	33.462
Bombillo LED 32W	1	32	1	2	9	32	64	277
Bombillo incandescente	1	53	1	7	30	53	371	1.606
Bombillo LED 17W	1	17	14	98	424	238	1.666	7.214
Subtotal	**9**	**242**	**39**	**268**	**1.160**	**1.731**	**11.957**	**51.774**
Mezanine								
Bombillo LED 17W	12	17	5	25	108	1.020	5.100	22.083
Bombillo incandescente	1	100	0	1	5	25	125	541
Extractor automático	1	22	0	1	5	6	28	120
Bombillo LED 17W	1	17	5	25	108	85	425	1.840
Bombillo incandescente	1	100	0	0	0	0	0	0
Bombillo LED 17W	34	17	0	0	0	0	0	1
Bombillo incandescente	2	100	0	0	0	0	0	0
Extractor automático	1	22	0	0	0	0	0	7
Bombillo incandescente	1	100	0	0	0	0	0	0
Extractor automático	1	22	0	0	0	0	0	7
Subtotal	**55**	**517**	**11**	**53**	**228**	**1.136**	**5.678**	**24.601**
Total piso 1	**64**	**759**	**50**	**321**	**1.388**	**2.867**	**17.635**	**76.375**

Fuente: Autor

Tabla 4. Estudio de cargas para el sistema de iluminación del piso 2 del edificio Transcoop

Equipo	Cantidad (Unidad)	Potencia (Watt)	Tiempo uso (Horas/ Día)	Tiempo uso (Horas/Semana)	Tiempo uso (Horas/ Mes)	Consumo (Wh/Día)	Consumo (Wh/Semana)	Consumo (Wh/Mes)
Bombillo LED 17W	4	17	4	28	121	272	1.904	8.244
Bombillo incandescente	1	100	1	7	30	100	700	3.031
Bombillo incandescente	1	100	1	7	30	100	700	3.031
Bombillo LED 28W	4	28	6	42	182	672	4.704	20.368
Bombillo LED 17W	4	17	6	42	182	408	2.856	12.366
Bombillo LED 23W	3	23	0	1	5	12	81	349
Total	**17**	**285**	**18**	**127**	**551**	**1.564**	**10.945**	**47.390**

Fuente: Autor

Tabla 5. Estudio de cargas para el sistema de iluminación del piso 3 del edificio Transcoop

Equipo	Cantidad (Unidad)	Potencia (Watt)	Tiempo uso (Horas/ Día)	Tiempo uso (Horas/Semana)	Tiempo uso (Horas/ Mes)	Consumo (Wh/Día)	Consumo (Wh/Semana)	Consumo (Wh/Mes)
Bombillo LED 28W	4	28	2	14	61	224	1.568	6.789
Bombillo LED 23W	1	23	3	18	76	58	403	1.743
Bombillo LED 28W	1	28	4	28	121	112	784	3.395
Bombillo LED 15W	1	15	1	7	30	15	105	455
Bombillo incandescente	1	100	1	7	30	100	700	3.031
Total	**8**	**194**	**11**	**74**	**318**	**509**	**3.560**	**15.413**

Fuente: Autor

Tabla 6. Estudio de cargas para el sistema de iluminación del piso 4 del edificio Transcoop

Equipo	Cantidad (Unidad)	Potencia (Watt)	Tiempo uso (Horas/ Día)	Tiempo uso (Horas/Semana)	Tiempo uso (Horas/ Mes)	Consumo (Wh/Día)	Consumo (Wh/Semana)	Consumo (Wh/Mes)
Bombillo LED largo	40	28	3	21	91	3.360	23.520	101.842
	40	**28**	**3**	**21**	**91**	**3.360**	**23.520**	**101.842**

Fuente: Autor

En las Tablas 2, 3, 4 y 5 se muestran los datos de consumo energético por día, semana y mes, lo que permite conocer las cargas que aporta cada planta al consumo total de la edificación, siendo el piso 4 y el piso 1 las de mayor representatividad con un consumo de 3.360 Wh/día y 2.866,6 Wh/día respectivamente. Sin embargo, es importante conocer el comportamiento de consumo, por lo tanto, se realiza el análisis en un periodo de 24 horas (Ilustración 10), a partir del cual se identifican los picos de energía o consumo máximo, es decir, el mayor consumo de energía eléctrica que puede llegar a tener una zona de acuerdo a su uso.

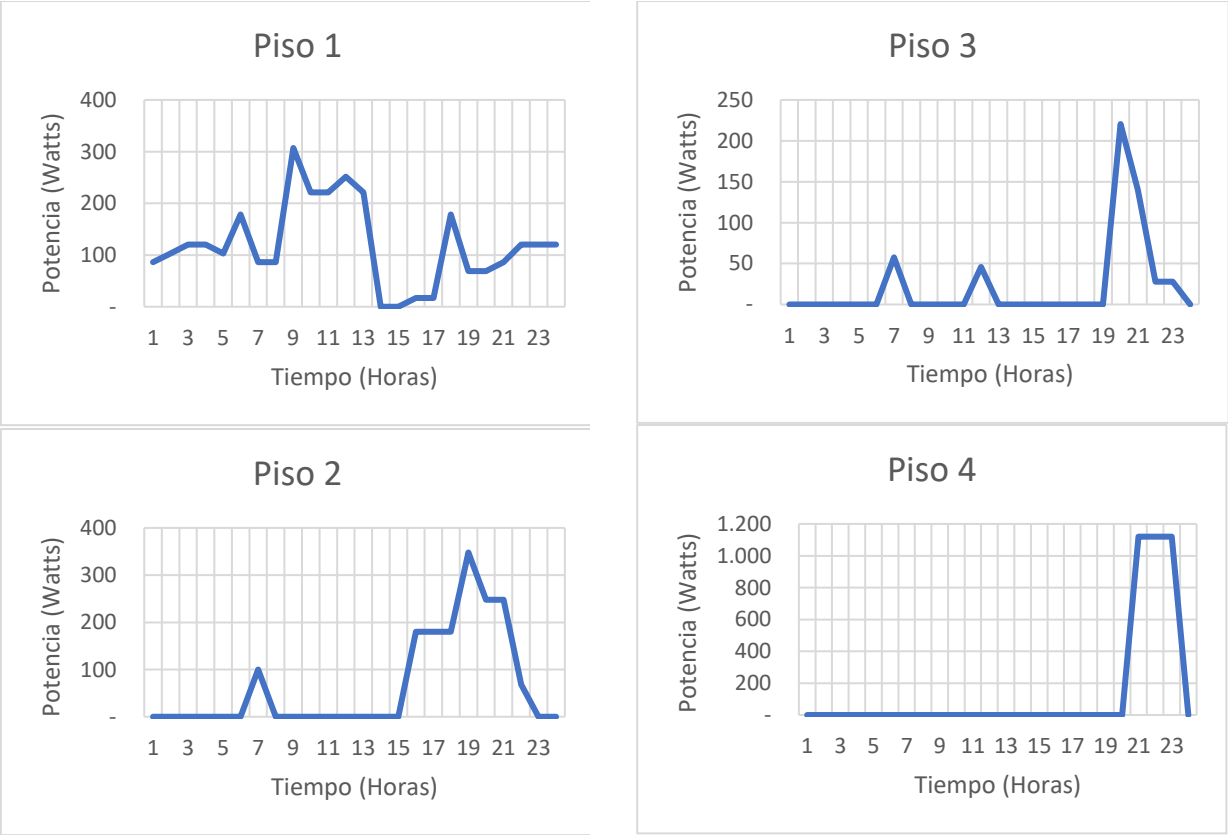

Ilustración 10. Perfil de carga para los pisos 1,2,3 y 4 del edificio Transcoop. Fuente: Autor

A partir de las gráficas (Ilustración 10) que evidencian los consumos máximos de todas las plantas del edificio se puede conocer que a excepción del piso 4 en el que su consumo llega a superar los 1.000 Watts, las demás plantas no superan los 350 Watts. Sin embargo, mediante la (Ilustración 11) se analiza el comportamiento completo del edificio durante 24 horas, tomando variables que incluyan el piso 1 teniendo en cuenta que allí operan las oficinas administrativas del edificio.

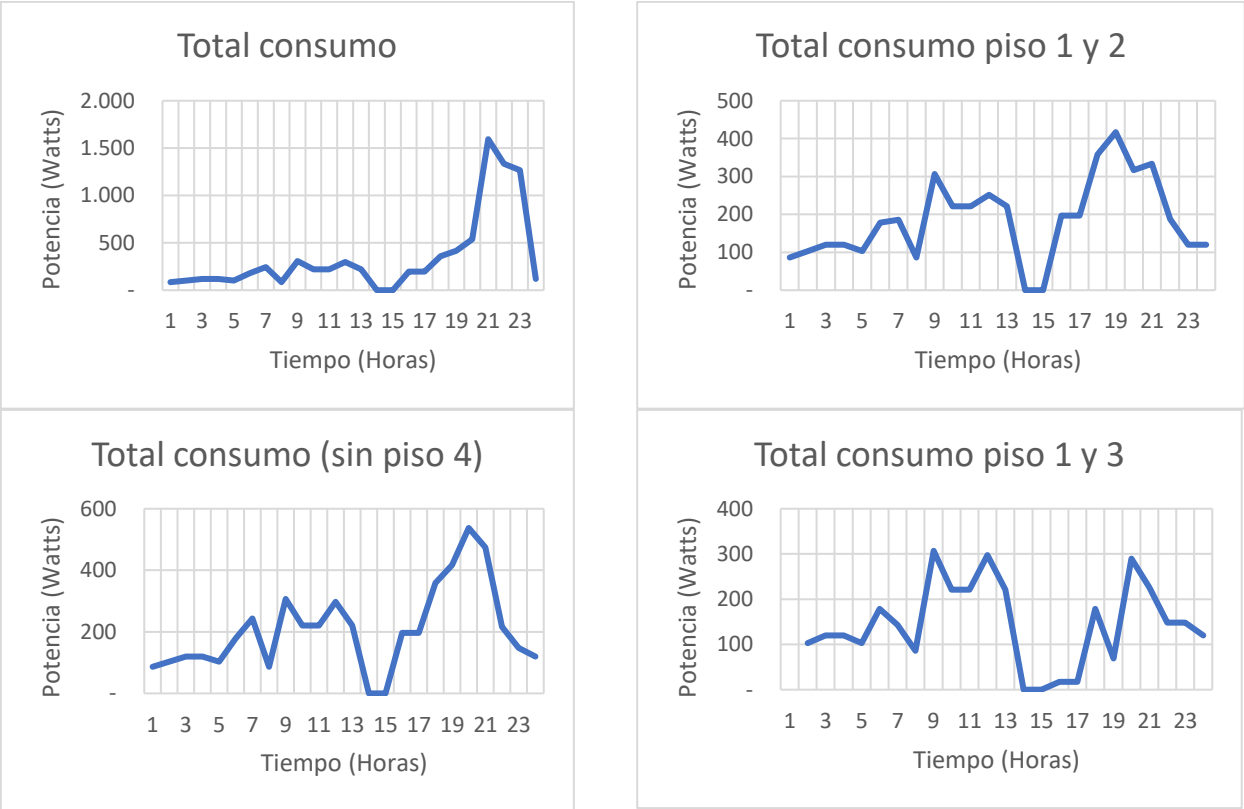

Ilustración 11. Perfiles de carga del edificio Transcoop. Fuente: Autor

Teniendo en cuenta la (Ilustración 11) se puede vislumbrar el comportamiento de las diferentes combinaciones entre las plantas del edificio, y con el fin de evitar al máximo capacidad ociosa en la selección de tecnologías, se analiza el Factor de Carga -FC- (Tabla

7) cómo el cociente de dividir la carga promedio entre la carga máxima, en la medida en que el resultado se aproxime a 1 habrá menos capacidad ociosa.

Tabla 7. Factor de carga

Lugar	Carga promedio (Watts/día)	Carga máxima (Watts)	Factor de carga
Total edificación	347,19	1.594	0,22
Total edificación (sin piso 4)	207,19	538	0,39
Piso 1 y 2	185,52	417	0,44
Piso 1 y 3	144,98	307	0,47

Fuente: Autor

De acuerdo al factor de consumo, la opción con menos capacidad ociosa es la relación entre el piso 1 y 3, sin embargo, por conveniencia técnica al tener en cuenta que en el mercado las pilas ofrecidas con más cercanía a la capacidad requerida son las de 200 y 500 Watts, por lo tanto, se decide trabajar con la combinación entre el piso 1 y 2 cómo la de mayor viabilidad con el fin de aprovechar en mayor medida una pila de 500 watts.

De esta manera se determina que al trabajar con el piso 1 y 2 se tendrá una reducción de aproximadamente 123,77 Kwh/mes del consumo actual del edificio, el equivalente al 11,8% del consumo total de las instalaciones y al 21% del consumo de los pisos 1 y 2.

Una vez definido el tamaño del proyecto, se procede a identificar una celda de hidrógeno cuya potencia mínima cubra la necesidad energética para tal demanda (417 Watts), para

ello se realiza el análisis dimensional teniendo en cuenta la tecnología que ofrecen los diferentes proveedores de acuerdo a su catálogo de productos que se adapten a las necesidades ya planteadas.

7.3. IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS

Teniendo en cuenta el tamaño del proyecto se procede a la selección de los componentes que integraran el sistema de celdas de combustible para el caso en cuestión de acuerdo a las especificaciones técnicas que se requiere, es decir, una celda de hidrógeno que genere como mínimo 500 Watts y los componentes que se adapten correctamente a este tipo de pila.

7.3.1. Identificación de tecnologías

En cuanto a las pilas de combustible se identifican dos fabricantes con la capacidad de suministrar celdas que satisfacen la cantidad de demanda que se identificó en los perfiles de carga analizados. Como primera opción se encuentra la marca (Whole Win) que trabaja desde el año 2000 en Beijing enfocada en la investigación y fabricación de productos relacionados con el almacenamiento de hidrógeno, nuevos tipos de baterías y celdas de combustible, contando con varias patentes y derechos nacionales de propiedad intelectual a su nombre; y, en segundo lugar, (Ice-City) es una combinación de producción comercial y una organización de investigación que forma parte de un equipo de cooperación entre diversas universidades, institutos y productores de máquinas eléctricas en China.

7.3.2. Selección de tecnología

A partir de la aplicación del análisis dimensional[3] entre los dos fabricantes antes mencionados, se evaluaron 12 factores relevantes según (Baca Urbina, 2016) y 2 más debido su pertinencia para el proyecto:

- **Proveedor:** Se tiene en cuenta el nivel de confiablidad hacia el fabricante o quien suministre el producto (tiempo en el mercado, referencias de calidad, entre otros), además de ser útil para la presentación formal de cotizaciones.
- **Precio:** Es importante para el cálculo de los costos de proyecto.
- **Área o dimensiones:** Se utilizará para distribución de la planta.
- **Capacidad:** Un aspecto de gran importancia para no incurrir en adquisición de capacidad ociosa o por el contrario cuellos de botella, cortos por sobre carga u otras consecuencias asociadas a las demandas del proyecto.
- **Mano de obra necesaria:** Aquí se analizará la necesidad de personal para el manejo de los equipos y el nivel de capacitación necesaria.
- **Costo de mantenimiento:** Es un dato importante relacionado con la vida útil del equipo, la calidad y los costos en los que incurrirá el proyecto en su operación.
- **Infraestructura necesaria:** Las características, condiciones e infraestructura que requieran los equipos para su funcionamiento serán de gran importancia al momento de prever aumentos en el valor de la inversión inicial.
- **Equipos auxiliares:** Existe maquinaria y herramientas que requieren equipos adicionales que proporcionen condiciones óptimas para su adecuado

[3] Análisis entre dos opciones de acuerdo al número de factores ponderados dada su importancia en la toma de decisión.

funcionamiento. Generalmente estos equipos no están incluidos en el precio de la maquinaria y contar con su conocimiento es de gran relevancia para el cálculo de la inversión y operación.

- **Costo de la instalación:** La complejidad en la instalación de los equipos puede elevar el valor de la inversión inicial.
- **Eficiencia:** No todos los equipos poseen las mismas características de funcionamiento y desarrollo de tecnología, lo que se reflejará en el consumo de materia prima y otros insumos, es decir, podrá aumentar o disminuir el costo de operación.
- **Vida útil:** La tecnología, materiales de fabricación junto con otros factores garantizaran el funcionamiento adecuado de los equipos durante cierto límite de tiempo.
- **Refacciones en el país:** De acuerdo al tipo de equipo que se esté utilizando puede requerir refacciones que no se encuentren en el país para lo cual deberán ser importadas deteniendo su operación o funcionamiento.

Dichos parámetros permiten la selección de la tecnología óptima para el proyecto con los siguientes hallazgos:

Tabla 8. Análisis dimensional entre la marca Whole Win e Ice-City

Factores relevantes	Peso (W) Mayor número mayor impacto	A: Whole Win	B: Ice-City	$(A/B)^W$
Proveedor	6	50	40	3,8
Precio (Con fletes y seguros)	8	20	65	0,0
Área (Dimensiones)	4	60	40	5,1
Capacidad	8	50	50	1,0
Mano de obra	2	50	50	1,0
Costo de mantenimiento	3	30	60	0,1
Infraestructura necesaria	3	60	40	3,4
Equipos auxiliares	5	40	40	1,0
Costo de la Instalación	2	50	50	1,0
Eficiencia	5	40	25	10,5
Vida útil	6	35	20	28,7
Refacciones en el país	3	50	50	1,0
		535	**530**	**0,1971**

Fuente: Autor

Como resultado, la opción favorece en mayor medida al proveedor Whole Win que presenta especificaciones técnicas acordes a la demanda identificada (Tabla 9).

Tabla 9. Especificaciones técnicas celda de combustible 500 Watts marca Whole Win

Parámetros	Especificaciones técnicas
Marca	WHOLE WIN
Modelo	HYFC-500
Potencia nominal	500W
Rendimiento nominal	14.4 V @ 35A
Tensión de la válvula de suministro	12V
Tensión del soplador	12V
Eficiencia del sistema	40% @ 14.4 V
Pureza de hidrógeno	≥99.95% Seco H2
Presión de hidrógeno	0.45 - 0.55 Bar
Hidrógeno consumo al máximo rendimiento	6.5L/min
Temperatura ambiente de trabajo	5°C a 30°C
Temperatura máxima de la celda	65°C

Humidificación	Auto-humidificación
Enfriamiento	Aire (Ventilador integrado)
Peso (con ventilador y caja)	3370g (± 50 g)
Peso del control	627g (± 30 g)
Dimensiones	13x26,8x10cm
Volumen (cm^3)	3484
Tiempo de inicio	≤30s a temp. ambiente
Protección contra bajo voltaje	12V
Protección contra sobretensión	42A
Protección contra sobre temperatura	65°C
Fuente de alimentación externa	13 v (± 1 V), 5A
Precio	2200 USD

Fuente: (Whole Win, 2016)

Ilustración 12. Celda de combustible HYFC-500W. Fuente: (Whole Win, 2016)

Dado el elevado precio de los reformadores de combustible y su impacto medio ambiental al utilizar combustibles fósiles para su funcionamiento, se decide suministrar el hidrógeno -

H_2- tipo 5 al 99,995% de pureza con un valor de 1,51 USD por Kg (Potosí-Guerrero, Ramos-Paja, & Serna-Garcés, 2016).

Para calcular el consumo en Kg de H_2 se utilizó la densidad de este elemento siendo 0.0838 kg/m³ (Energía sostenible, 2003) y el consumo por minuto de la celda (Tabla 10) tal como se evidencia en la siguiente operación:

$$Consumo\ H2 = \frac{6{,}5\ LH2}{1\ min} * \frac{1\ m3}{1000\ LH2} * \frac{0{,}0838\ KgH2}{1\ m3} = 0{,}0005447\ \frac{KgH2}{min}$$

Así mismo en el Tabla 10 se pueden observar un inversor de corriente que podrá cumplir con la función de transformar la Corriente Directa (DC) que arroja la celda de combustible en Corriente Alterna (AC) de manera tal que sea utilizable de manera residencia o comercial.

Tabla 10. Inversor de corriente aplicable al proyecto

Fabricante	Referencia	Especificaciones técnicas	Modelo
Jarrett	JM-500W	Potencia continua: 500W Potencia Máxima: 1.000W Entrada: 12V DC Salida: 110V AC 50Hz Precio: $109.900	

Fuente: (Mercado libre, 2018). Elaboración: Autor

La ilustración 13 muestra un ejemplo del montaje final del sistema de la celda de combustible en operación.

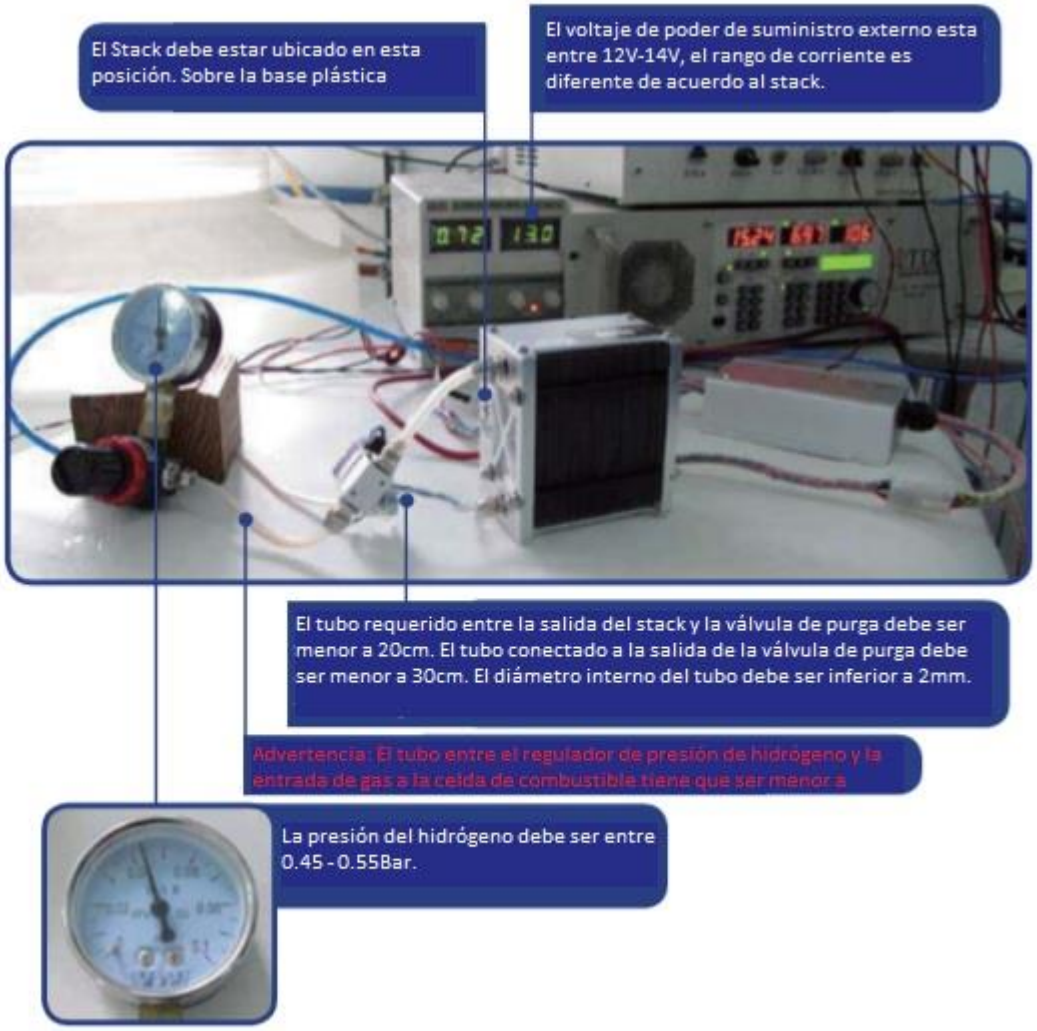

Ilustración 13. Inversor de corriente aplicable al proyecto. Fuente: (Mercado libre, 2018). Elaboración: Autor

7.4. DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES Y PROCESOS

Para esta parte se describen las actividades y procesos pertenecientes a la fase de construcción e instalación del sistema de celdas de hidrogeno.

a) **Solicitar autorización a Codensa:** La empresa de energía Codensa cuenta con procedimientos de registro cómo autogenerador o generador distribuido, para ello es necesario diligenciar su formulario según los requerimientos establecidos en la resolución CREG 030 de 2018 (Codensa S.A. ESP., 2018).

b) **Solicitud y compra de la pila de hidrógeno:** Consiste en realizar el contacto oficial con proveedor con el fin de efectuar la correspondiente orden de compra para generar los soportes necesarios que autoricen el envió de la mercancía, aquí se incluyen los procesos de solicitud de documentos legales entre las organizaciones, autorización de fondos para las transacciones internacionales a través de los bancos correspondientes, entre otros procedimientos internos de cada una de las partes.

c) **Solicitud y compra de los equipos complementarios:** Existen algunos equipos adicionales que permitirán el funcionamiento óptimo de la celda de combustible tales como el inversor de corriente y los cilindros de combustible (Hidrógeno). Al igual que la celda de combustible estos deben solicitarse con órdenes de compra a sus respectivos proveedores o fabricantes.

d) **Tramitación de pólizas:** Ya que el precio de producto es Free On Board -FOB-[4], es decir, que el proveedor se hace responsable hasta el embarque del producto en el puerto de origen y cómo tal el comprador debe hacerse cargo del transporte

[4] Libre a bordo o libre en puerto

(Significados, 2018), para lo cual es necesario adquirir una póliza de seguro para el producto, la cual será solicitada al momento de su nacionalización.

e) **Contratación de servicios de transporte:** Teniendo en cuenta las condiciones del producto que se está manejando se contratará una empresa de servicios de transporte que garantice la llegada de los equipos en óptimas condiciones.

f) **Llegada de la pila:** Se constituye como el tiempo que demora en ser trasladada la mercancía desde el país de origen hasta el puerto de arribo del país de destino.

g) **Nacionalizar productos:** Una vez la mercancía arriba al puerto correspondiente en el país de destino se entra en el proceso de legalización del producto, es decir, la presentación de soportes (declaración de importación) que permitirán la liberación de la mercancía para así proceder al transporte final hasta el punto de instalación.

h) **Transporte a las instalaciones de Transcoop:** Cuando la mercancía ha sido liberada por la aduana se procede al transporte desde el puerto de Buenaventura en el Valle del Cauca hasta la ciudad de Bogotá, específicamente a las instalaciones del edificio Transcoop. En este proceso se incurrirá en la contratación de una empresa transportadora o quien haga sus veces para garantizar la llegada efectiva del producto a la organización solicitante.

i) **Transporte de equipos complementarios:** Una vez las órdenes de compra de los equipos complementarios sean aceptadas y dependiendo de los acuerdos a los que se haya llegado con los proveedores, los equipos tendrán que ser llevados hasta las instalaciones del edificio Transcoop.

j) **Contratación de personal para la adecuación de instalaciones:** Una vez que han llegado la pila y los equipos auxiliares se procederá a la contratación de personal

que realizará las adaptaciones del lugar en el cual se ubicará el sistema de la celda de combustible al interior del edificio.

k) **Compra de materiales de adecuación de instalaciones:** Se realizará una toma de medidas una vez todos los equipos se encuentren en las instalaciones para así proceder a la compra de os materiales adecuados para esta función.

l) **Construcción de la estructura que contendrá los equipos:** Aquí se incluye la elaboración de estructuras metálicas, soportes y demás arreglos necesarios para el funcionamiento adecuado de los equipos.

m) **Contratación de personal para la instalación y verificación del sistema:** Se realizará la contratación de un técnico electricista con experiencia en las conexiones eléctricas de sistemas distribuidos.

n) **Compra de materiales eléctricos:** De cuerdo a las especificaciones y observaciones realizadas por el técnico, se procederá a la adquisición de los materiales y herramientas necesarios para la instalación.

o) **Instalación del sistema:** En este punto se adopta netamente lo relacionado con los arreglos eléctricos que permitan la conexión del sistema de la pila de combustible al sistema de iluminación de las áreas del edificio seleccionadas.

p) **Verificación de funcionamiento:** Una vez instalado el sistema de pilas de hidrógeno a la red de iluminación, el técnico ya contratado realizará las revisiones rutinarias sobre el funcionamiento de la pila durante 15 días calendario acerca.

q) **Informe de funcionamiento:** Una vez realizada la verificación del sistema por parte del técnico, este se reunirá con los encargados del proyecto para rendir informe acerca de los hallazgos encontrados.

7.5. RUTA CRÍTICA DEL PROYECTO

7.5.1. Red PERT

Una vez se han establecido los procedimientos de construcción y puesta en marcha de la instalación de las celdas de combustible tipo PEM para la alimentación del sistema eléctrico del edificio, se procede a realizar una evaluación de estos mediante la red PERT, siglas en inglés para Program Evaluation and Review Technique[5]. Esta red busca controlar, planificar y analizar todo el desarrollo de los procesos y actividades del proyecto.

Con esta técnica se establecen claves específicas a cada procedimiento para de esta manera relacionar la dependencia entre los mismos. En este caso se asignaron claves con letras del alfabeto desde la A hasta la Q.

De acuerdo a la experiencia del formulador del proyecto o referencias verificables se determinan los tiempos de ejecución de cada uno ya sea en días, semanas, meses e incluso años; para este caso se maneja en días de ejecución y se fija el tiempo optimista, el más probable y el pesimista, los cuales determinarán el tiempo esperado de acuerdo a la siguiente formula:

$$\boldsymbol{Te} = \frac{(To + 4(Tm) + Tp)}{6}$$

Cuando:

- Te: Tiempo esperado
- To: Tiempo optimista
- Tm: Tiempo más probable

[5] Técnica de Revisión y Evaluación de Programas

- Tp: Tiempo pesimista

Tabla 11. Red PERT del proyecto

Clave	Actividad	Tiempo (Días)				
		Predecesora	Optimista	Más prob	Pesimista	Esperado
A	Solicitar autorización a Codensa	N/A	12	15	20	15
B	Solicitud y compra de la pila de hidrógeno	A	10	12	20	13
C	Solicitud y compra de los equipos complementarios	A	1	2	4	2
D	Tramitación de pólizas	B y C	2	4	7	4
E	Contratación de servicios de transporte	D	5	7	10	7
F	Llegada de la pila	E	15	20	25	20
G	Nacionalización de productos	F	3	5	10	6
H	Transporte de la pila a las instalaciones de Transcoop	G	2	2	5	3
I	Transporte de equipos complementarios	G	1	2	4	2
J	Contratación personal para la adecuación de instalaciones	H e I	2	3	6	3
K	Compra de materiales de adecuación	J	1	2	5	2
L	Construcción de la estructura que contendrá los equipos	K	2	3	6	3
M	Contratación para la instalación y verificación del sistema	H e I	3	5	8	5
N	Compra de materiales eléctricos	M	3	3	6	4
O	Instalación del sistema	N	2	4	6	4
P	Verificación de funcionamiento	O	10	15	30	17
Q	Informe de funcionamiento	P	1	2	3	2

Fuente: Autor

Al momento de calcular los tiempos mediante la técnica PERT se determinó que los procesos que demandan más tiempo son los pertenecientes a las claves A, B, F y P. En primer caso, la solicitud de autorización a Codensa S.A. ESP puede presentar demoras debido al estudio del caso junto con la posible verificación a las instalaciones, en segundo lugar, en la compra de la pila de hidrógeno se tiene en cuenta el tiempo que demanda la verificación de documentos (existencia legal, transferencia de fondos, entre otros) por las organizaciones que hacen las veces de comprador y vendedor; como tercer lugar, la llegada de la pila contempla los días que puede llegar a demorar su transporte vía marítima desde Beijing; y, por último, en la verificación de funcionamiento se tuvo en cuenta un periodo prudente para identificar posibles fallas en el funcionamiento del sistema.

Los procesos descritos en la tabla 11 se diagraman en la ilustración 14 para evidenciar de manera clara la forma como se relaciona cada uno con el desarrollo del proyecto.

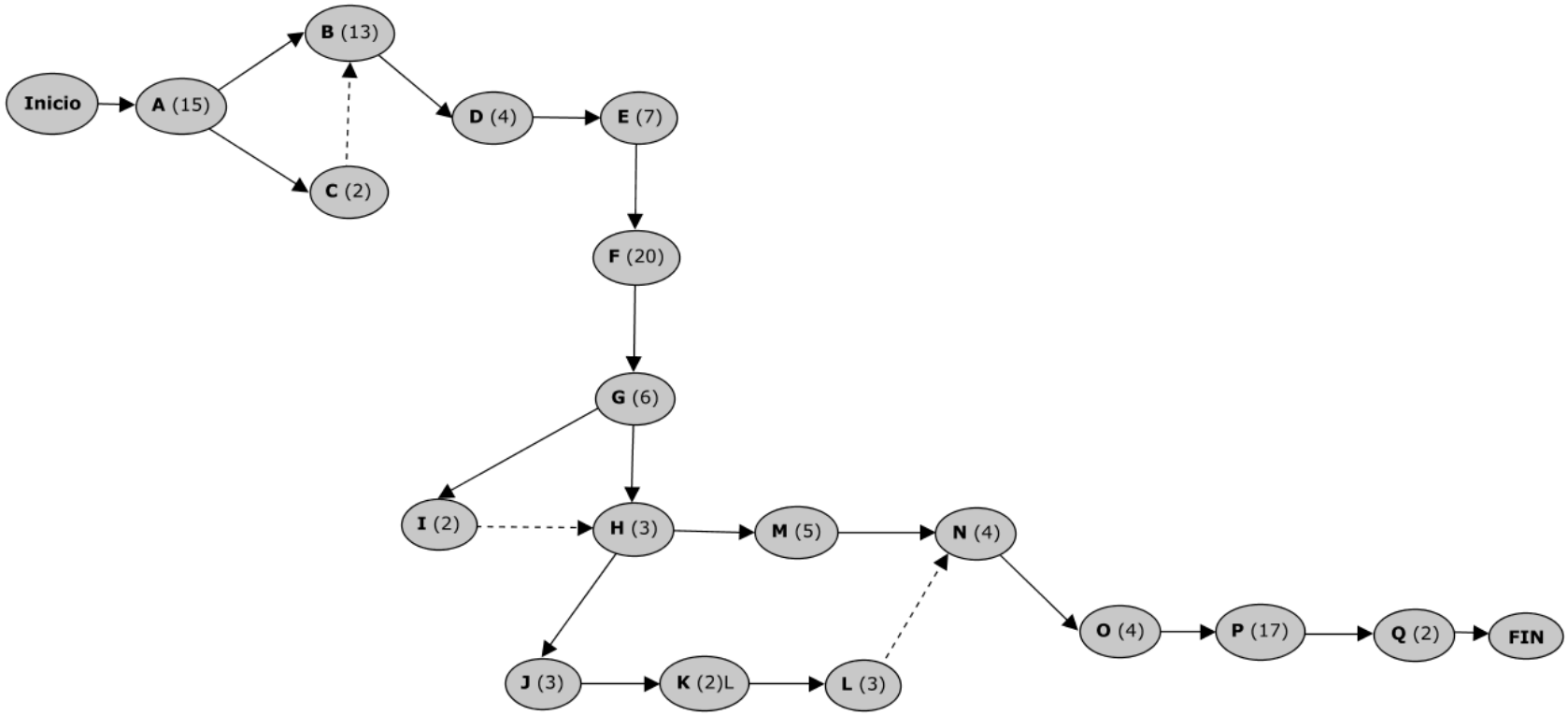

Ilustración 14. Diagrama de la Red PERT del proyecto. Fuente: Autor

7.5.2. CPM

Al establecer la relación entre los procesos del proyecto junto con el tiempo esperado de cada uno se puede determinar la ruta crítica del proyecto mediante el Critical Path Method[6] -CPM- que consiste en ubicar de manera sistemática la fecha de inicio más próxima y la fecha de terminación más próxima en las filas superiores, de igual manera en las filas inferiores se ubicará la fecha de inicio más lejana junto con la fecha de terminación más lejana de cada actividad.

Luego de esto se debe hallar la holgura en cada caso al restar a la fecha de terminación más lejana la fecha de terminación más próxima, si el resultado es mayor a 0 se entenderá como un tiempo de espera entre el inicio de un proceso y la finalización de su predecesor, lo cual generaría demoras en la puesta en marcha del proyecto, por lo tanto, la ruta crítica estará determinada por las actividades con holgura igual a 0.

[6] Método del camino crítico o ruta crítica

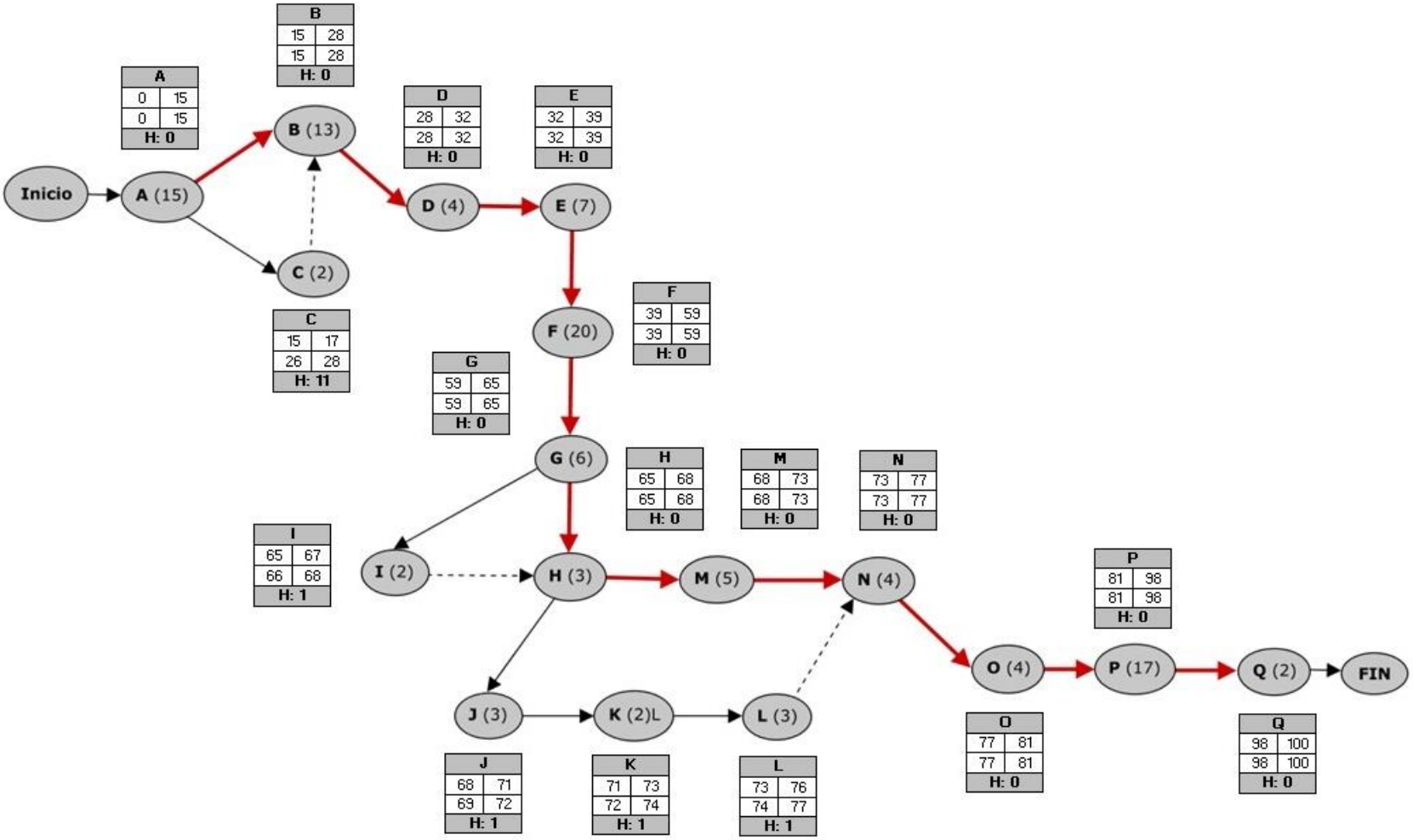

Ilustración 15. Ruta crítica del proyecto. Fuente: Autor

En la ilustración 15 se encuentra el diagrama CPM del proyecto con los tiempos de cada actividad. Las flechas rojas indican el camino que ha sido determinado para el proyecto de acuerdo a la holgura resultante, por lo tanto, la ruta crítica será la ejecución de las claves en el orden A-B-D-E-F-G-H-M-N-O-P-Q.

Por otra parte, las actividades C-I-J-K-L se podrán desarrollar de manera paralela a las actividades de mayor criticidad sin que se presenten demoras o retrasos en la puesta en marcha del proyecto.

La ruta crítica permite establecer que el tiempo máximo de ejecución del proyecto será de 100 días, que a diferencia de las variables donde se incluyen las claves C-I-J-K-L, arrojan rutas entre 87 y 99 días, lo que representa posibilidades de atraso para el proyecto.

7.6. DISTRIBUCIÓN DE LA PLANTA

Por último, se muestra la distribución de la planta 1 (Ilustración 16) en la cual estará ubicado el sistema de celdas de combustible por su cercanía a la caja de la luz donde se realizará el empalme al sistema de iluminación del edificio.

Ilustración 16. Distribución de la planta, piso 1. Fuente: Autor

La estructura del sistema se construirá en el fondo de las instalaciones teniendo en cuenta que el patio se considera una zona apta para no interrumpir las actividades que se desarrollan en el área además de presentar buena ventilación para las emisiones de vapor de agua generadas por la pila de combustible.

8. CAPITULO II: CAMBIO EN LA CALIDAD AMBIENTAL

En la evaluación de impacto ambiental se realizará un análisis del cambio en la calidad ambiental por la puesta en marcha del proyecto, lo anterior gracias a la identificación de las actividades, procesos e impactos de las que consta cada etapa de este mediante la metodología de Entradas, Procesos y Salidas – EPS -, luego de lo cual se llevará a cabo la priorización de impactos por medio de la metodología del autor Vicente Conesa Fernández modificada por el Msc. GA Miguel Ángel Gamboa Castellanos.

8.1. METODOLOGÍA ENTRADAS – PROCESOS – SALIDAS (EPS)

Esta metodología se utiliza para identificar los aspectos e impactos ambientales provenientes de las actividades o procesos en los que incurre el proyecto para su desarrollo.

8.1.1. Determinación de aspectos e impactos ambientales

En este caso se determinan los aspectos ambientales, es decir, aquel elemento derivado de una acción o proceso que tendrá consecuencias positivas o negativas en el medio, en otras palabras, lo que determinará los impactos ambientales. Por lo tanto, se entenderá que los

aspectos serán las entradas de un proceso, y los impactos resultarán ser las salidas del mismo.

Tabla 12. Aspectos e impactos ambientales aplicables al proyecto

Aspectos ambientales	**Impactos ambientales**
Consumo de agua	Agotamiento de un recurso natural
Consumo de energía	Agotamiento de un recurso natural
Generación de residuos sólidos: Ordinarios y peligrosos	Contaminación del suelo, aire y/o agua
Generación de vertimientos	Contaminación del agua
Generación de emisiones atmosféricas (gases, humos o vapores)	Contaminación del aire
Generación de ruido	Contaminación del aire
Consumo de productos forestales	Agotamiento de un recurso natural
	Daños a la flora y a la fauna
Consumo de combustibles	Agotamiento de un recurso natural
Uso de recursos humanos	Afectación social
	Afectación cultural
	Afectación económica

Fuente: Autor

Una vez identificados los aspectos e impactos ambientales con mayor probabilidad de suceder se aplican a las actividades de las diferentes fases del proyecto para así proceder a calificar su impacto.

Tabla 13. Metodología EPS aplicada al proyecto

Etapa	Entradas	Procesos	Salidas
Diseño	- Consumo de energía - Consumo de papel	Aforo o estudio de cargas	- Agotamiento de un recurso natural
	- Consumo de energía	Determinación o alcance del proyecto	- Agotamiento de un recurso natural
Construcción e instalación	- Consumo de energía - Uso de recursos humanos	Solicitud de autorización a Codensa	- Agotamiento de un recurso natural - Afectación social
	- Consumo de energía - Uso de recursos humanos	Solicitud y compra de la pila de hidrógeno	- Agotamiento de un recurso natural - Afectación social
	- Consumo de energía - Uso de recursos humanos	Solicitud y compra de los equipos complementarios	- Agotamiento de un recurso natural - Afectación social
	- Consumo de energía - Uso de recursos humanos	Tramitación de pólizas	- Agotamiento de un recurso natural - Afectación social
	- Consumo de energía - Uso de recursos humanos	Contratación de servicios de transporte	- Agotamiento de un recurso natural - Afectación social
	- Generación de emisiones - Generación de ruido - Consumo de combustibles	Llegada de la pila	- Contaminación del aire - Agotamiento de un recurso natural
	- Uso de recursos humanos	Nacionalización de productos	- Afectación social
	- Generación de emisiones - Generación de ruido - Consumo de combustibles	Transporte a las instalaciones de Transcoop	- Contaminación del aire - Agotamiento de un recurso natural
	- Generación de emisiones - Generación de ruido - Consumo de combustibles	Transporte de equipos complementarios	- Contaminación del aire - Agotamiento de un recurso natural
	- Uso de recursos humanos	Contratación de personal para la adecuación de instalaciones	- Afectación social - Afectación cultural - Afectación económica

	- Generación de emisiones - Generación de ruido - Consumo de combustibles - Uso de recursos humanos	Compra y transporte de materiales de adecuación de instalaciones	- Contaminación del aire - Agotamiento de un recurso natural - Afectación social - Afectación económica
	- Consumo de energía - Generación de emisiones - Generación de ruido - Uso de recursos humanos	Construcción de la estructura que contendrá los equipos	- Contaminación del aire - Agotamiento de un recurso natural - Afectación social - Afectación económica
	- Uso de recursos humanos	Contratación de personal para la instalación y verificación del sistema	- Afectación social - Afectación cultural - Afectación económica
	- Generación de emisiones - Generación de ruido - Consumo de combustibles - Uso de recursos humanos	Compra y transporte de materiales eléctricos	- Contaminación del aire - Agotamiento de un recurso natural - Afectación social - Afectación económica
	- Uso de recursos humanos	Instalación del sistema	- Afectación social - Afectación cultural - Afectación económica
	- Uso de recursos humanos	Verificación de funcionamiento	- Afectación social - Afectación cultural - Afectación económica
	- Uso de recursos humanos	Informe de funcionamiento	- Afectación social - Afectación cultural - Afectación económica
Operación	- Consumo de energía - Generación de emisiones - Generación de ruido - Uso de recursos humanos	Generación de energía eléctrica	- Agotamiento de recursos naturales - Afectación social - Afectación cultural - Afectación económica
	- Uso de recursos humanos - Generación de residuos	Mantenimiento	- Afectación social - Afectación cultural - Afectación económica - Contaminación del suelo

Desmonte	- Generación de emisiones - Generación de ruido - Uso de recursos humanos - Generación de residuos	Desmonte del sistema	- Contaminación del aire - Afectación social - Afectación cultural - Contaminación del suelo
	- Uso de recursos humanos	Separación de residuos	- Afectación social - Afectación cultural - Afectación económica
	- Generación de emisiones - Generación de ruido - Consumo de combustibles - Uso de recursos humanos	Transporte de residuos	- Contaminación del aire - Contaminación del suelo - Agotamiento de recursos naturales - Afectación social - Afectación económica

Fuente: Autor

Luego de la aplicación de la matriz ESP a los procesos del proyecto en sus diferentes fases se encuentra que, de los aspectos planteados, el uso de recursos forestales y la generación de vertimientos no aplican a ninguno de los procesos.

El papel utilizado en la elaboración del aforo o estudio de cargas no es considerado directamente como un recurso forestal, mientras que, la generación de vertimientos no es contemplada ya que no existen descargas de residuos sólidos o líquidos a cuerpos de agua.

El impacto que causa el uso de energía eléctrica convencional y el consumo de combustibles fósiles es considerado como agotamiento de recursos naturales. En el primer caso, por la pérdida de la calidad del agua al ser utilizada en el funcionamiento de las hidroeléctricas, y en el segundo caso, por la utilización de recursos no renovables como el carbón en la operación de las centrales termoeléctricas y el consumo de diésel o gasolina para el transporte terrestre o marítimo de los insumos o residuos del proyecto.

7.2 ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL

Se elaboró el Estudio de Impacto Ambiental -EsIA- con el fin de predecir, identificar, valorar y corregir las consecuencias o efectos ambientales que las acciones del proyecto pueden causar sobre la calidad de vida del hombre y su entorno, todo lo anterior para aportar información objetiva que permita conocer que tan afectados se encontrarán (Conesa, 1993).

8.1.2. Metodología

El autor Miguel Ángel Gamboa Castellanos modificó la matriz de causa-efecto que formuló Vicente Conesa Fernández y a esta la llamo matriz de evaluación del impacto / efecto ambiental, para la cual analiza ocho (8) parámetros y a su vez dentro de los mismos establece una serie de atributos, que al plasmarlos en la ecuación propuesta por el autor arrojan un resultado numérico, que corresponden a la importancia del impacto, posteriormente establece un rango de 0-100 y a los tres rangos propuestos le asigna la clase de efecto que hace referencia a si es bajo, medio o alto y a su vez establece un color para cada uno.

Los parámetros aplicables a la metodología son:

1. **Carácter o Clase:** Define si el impacto/efecto es POSITIVO o benéfico (+) y/o ADVERSO o Dañino (-) al ambiente.
2. **Magnitud (Mg):** Está determinado por el **grado de daño o beneficio** al ambiente.
3. **Cobertura (Co):** Definida por el **área de influencia** o por la distribución espacial del impacto/efecto ambiental
4. **Periodicidad (Pe):** Se define por el **plazo en que se manifiesta** el impacto.

5. **Duración (Du):** Se define por el tiempo en que **permanece o dura** el impacto/efecto ambiental.
6. **Acumulación (Ac):** Está determinado por la cantidad de recursos naturales o componentes ambientales que se pueden afectar.
7. **Recuperabilidad (Rc):** Se define por el grado de restablecimiento de los recursos naturales o el ambiente, por medio de medidas o programas de manejo ambiental.
8. **Reversibilidad (Re):** Cuando el impacto/efecto ambiental generado puede ser restituido por medios naturales (resiliencia, autodepuración, asimilación, entre otros) sin intervención humana.

Tabla 14. Parámetros de calificación

CARÁCTER Impacto beneficioso Impacto adverso	 + -	**MAGNITUD (Mg)** Baja Media Alta	 1 2 3
COBERTURA (Co) Directa Indirecta	 1 3	**PERIODICIDAD (Pe)** Largo plazo Mediano plazo Corto plazo o inmediato	 1 2 3
DURACIÖN (Du) Fugaz Temporal Permanente	 1 2 3	**ACUMULACIÓN (Ac)** Simple Compuesto Sinérgico (Efectos)	 1 2 3
RECUPERABILIDAD (Rc) Recuperable Parcialmente Recup. Irrecuperable	 1 2 3	**REVERSIBILIDAD (Re)** Corto y Mediano plazo Largo plazo Irreversible	 1 2 3

Fuente: (Gamboa)

Las anteriores calificaciones se evalúan en la ecuación planteada por el autor:

$$\boldsymbol{Cl} = -/+(Mg + Co + Pe + Du + Ac + Rc + Re)$$

Una vez se han calificado la totalidad de actividades o procesos del proyecto se deberán ubicar en la matriz de calificación (Tabla 17) para analizar las actividades y aspectos de acuerdo a su importancia de impacto:

- Impacto bajo. Impactos con calificación de importancia de 0 a 30% Son generalmente puntuales, de baja intensidad reversibles en el corto plazo. El manejo recomendado es control y prevención.
- Impacto medio. Impactos con calificación de importancia entre 31 y 60% Son impactos generalmente de intensidad media o alta, reversibles en el mediano plazo y recuperable en el mismo plazo. Las medidas de manejo son de control, prevención y mitigación.
- Impacto alto. Impactos con calificación de importancia entre 51 <= 75 unidades de calificación. Son generalmente de intensidad alta o muy alta, persistentes, reversibles en el mediano y largo plazo o en muchos casos irreversible, además dicha afectación puede ser local o no. Para su manejo se requieren medidas de control, prevención, mitigación y hasta compensación.

Tabla 15. Rangos de jerarquización de importancia del efecto

Rango de importancia en porcentajes (%)	Clase de impacto	Trama
0 - 30	Bajo	Verde
31 - 60	Medio	Amarillo
61 - 100	Alto	Rojo

Fuente: (Gamboa)

8.1.3. Matriz de identificación

El primer paso para realizar el EsIA se compone de la identificación de los impactos relacionados a través de una matriz en la cual se ubicarán los componentes ambientales, junto con sus respectivos subcomponentes e indicadores, que pueden ser afectados por la ejecución de cada actividad. Aquí se señalarán aquellos indicadores que se ven afectados por determinada actividad.

Tabla 16. Matriz de identificación

			ETAPAS DEL PROYECTO																								
			DISEÑO		CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN																	OPERACIÓN		DESMONTE		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
COMPONENTES	SUBCOMPONENTES	INDICADORES	Aforo o estudio de cargas	Determinación o alcance del proyecto	Solicitud de autorización a Codensa	Solicitud y compra de la pila de hidrógeno	Solicitud y compra de los equipos complementarios	Tramitación de pólizas	Contratación de servicios de transporte	Llegada de la pila	Nacionalización de productos	Transporte a las instalaciones de Transcoop	Transporte de equipos complementarios	Contratación de personal para la adecuación de instalaciones	Compra y transporte de materiales de adecuación de instalaciones	Construcción de la estructura que contendrá los equipos	Contratación de personal para la instalación y verificación del sistema	Compra y transporte de materiales eléctricos	Instalación del sistema	Verificación de funcionamiento	Informe de funcionamiento	Generación de energía eléctrica	Mantenimiento	Desmonte del sistema	Separación de residuos	Transporte de residuos
ATMOSFÉRICO	CALIDAD DEL AIRE	Emisiones de ruido								X		X	X		X	X						X		X		X
		Emisiones de gases								X		X	X		X	X						X		X		X

	METEOROLOGIA-CLIMA	Meteorología clima																								
GEOSFERICO	GEOMORFOLOGÍA	Morfología																								
		Drenaje																								
		Erosión																								
	EDAFOLOGÍA	Textura																								
		Estructura																								
		Usos																				X			X
	GEOLOGÍA	Estructura																								
	RECURSOS	Disponibilidad								X		X	X		X			X								X
HIDROSFÉRICO	HIDROGRÁFIA SUP	Calidad																								
	HIDROGRÁFIA SUB	Calidad																								
		Cantidad																								
	HIDROLOGÍA	Metales																								
		Residuos																								
		Biológicos																								
	RECURSOS	Disponibilidad	X	X	X	X	X	X	X							X						X				
BIOSFERICO	FLORA	Cobertura	X																							
		Especies																								
		Usos																								
	FAUNA	Cantidad																								
		Hábitat	X																							
		Diversidad																								
ANTROPOSFE	SOCIAL	Calidad de vida																X			X		X		

RICO		Empleo	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		Organización	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		Presencia del Estado			X						X											X			X	X
		Servicios			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	CULTURAL	Cosmovisión												X					X	X	X	X		X		
	ECONÓMICO	Estructura comercial			X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X		X	X
PAISAJISTICO	PAISAJISTICO	Calidad																								
		Fragilidad																								

Fuente: (Gamboa)

8.1.4. Matriz de calificación

Ya identificados los indicadores que se verán afectados se realiza la calificación de cada uno con los parámetros descritos por la metodología (Tabla 14) para finalmente ser evaluados en la ecuación ya antes descrita, el resultado se ubica en la matriz de calificación (Tabla 17), la cual permitirá realizar el análisis de los niveles de impacto por indicador y por actividad.

Tabla 17. Matriz de calificación

			ETAPAS DEL PROYECTO																														
			DISEÑO		CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN																	OPERACIÓN		DESMONTE									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24							
COMPONENTES	SUBCOMPONENTES	INDICADORES	Aforo o estudio de cargas	Determinación o alcance del proyecto	Solicitud de autorización a Codensa	Solicitud y compra de la pila de hidrógeno	Solicitud y compra de los equipos complementarios	Tramitación de pólizas	Contratación de servicios de transporte	Llegada de la pila	Nacionalización de productos	Transporte a las instalaciones de Transcogen	Transporte de equipos complementarios	Contratación de personal para la adecuación de instalaciones	Compra y transporte de materiales de adecuación de instalaciones	Construcción de la estructura que contendrá la pila para la instalación y verificación del	Compra y transporte de materiales eléctricos	Instalación del sistema	Verificación de funcionamiento	Informe de funcionamiento	Generación de energía eléctrica	Mantenimiento	Desmonte del sistema	Separación de residuos	Transporte de residuos		Sumatoria impactos positivos (+)	Porcentaje (%) de impactos	Sumatoria impactos negativos (-)	Porcentaje (%) de impactos
ATMOSFÉRICO	CALIDAD DEL AIRE	Emisiones de ruido								-9		-9	-9		-7	-10						-7		-6		-10	-67	0	0,0%	-67	100,0%
		Emisiones de gases								-16		-16	-16		-12	-8						-5		-7		-11	-91	0	0,0%	-91	100,0%
	METEOROLOGÍA-CLIMA	Meteorología clima																									0	0	0,0%	0	0,0%
GEOSFERICO	GEOMORFOLOGÍA	Morfología																									0	0	0,0%	0	0,0%
		Drenaje																									0	0	0,0%	0	0,0%
		Erosión																									0	0	0,0%	0	0,0%
	EDAFOLOGÍA	Textura																									0	0	0,0%	0	0,0%
		Estructura																									0	0	0,0%	0	0,0%

																											0%		
		Usos																				-14			-14	-28	0	0,0%	-28	100,0%
	GEOLOGÍA	Estructura																								0	0	0,0%	0	0,0%
	RECURSOS	Disponibilidad								-15		-15	-15		-15			-15								-15	-90	0	0,0%	-90	100,0%
HIDROSFÉRICO	HIDROGRÁFIA SUP	Calidad																								0	0	0,0%	0	0,0%
	HIDROGRÁFIA SUB	Calidad																								0	0	0,0%	0	0,0%
		Cantidad																								0	0	0,0%	0	0,0%
	HIDROLOGÍA	Metales																								0	0	0,0%	0	0,0%
		Residuos																								0	0	0,0%	0	0,0%
		Biológicos																								0	0	0,0%	0	0,0%
	RECURSOS	Disponibilidad	-11	-11	-11	-11	-11	-11	-11							-11						-11					-99	0	0,0%	-99	100,0%
BIOSFERICO	FLORA	Cobertura	-12																							-12	0	0,0%	-12	100,0%
		Especies																								0	0	0,0%	0	0,0%
		Usos																								0	0	0,0%	0	0,0%
	FAUNA	Cantidad																								0	0	0,0%	0	0,0%
		Hábitat	-12																							-12	0	0,0%	-12	100,0%
		Diversidad																								0	0	0,0%	0	0,0%
POS	SOCIAL	Calidad de																12			12		-11			13	24	68,6	-11	31,4%

		vida																										%		
		Empleo	7	7	8	8	8	8	8			10	10	9	7	7	7	7	7	7	10	9	7	5	5	7	168	168	100,0%	0	0,0%
		Organización	7	7	8	10	10	8	10	9	10	10	10	8	7	7	7	7	7	7	12	9	7	6	7	7	197	197	100,0%	0	0,0%
		Presencia del Estado			10						11											12			12	10	55	55	100,0%	0	0,0%
		Servicios			10	10	10	10	10	10	10	10	10	8	7		7	7	7	7	12	9	8	6	9	10	187	187	100,0%	0	0,0%
	CULTURAL	Cosmovisión												9					12	11	14	14		-12			60	48	83,3%	-12	16,7%
	ECONÓMICO	Estructura comercial			9	11	11	10	10		10	10	10	8	7	7	7	7	11			-13	7		9	10	154	141	92,2%	-13	7,8%
PAISAJÍSTICO	PAISAJISTICO	Calidad																									0	0	0,0%	0	0,0%
		Fragilidad																									0	0	0,0%	0	0,0%
			-21	3	34	28	28	25	27	-21	41	0	0	42	-6	-8	28	13	56	32	48	29	15	-19	42	-6					

Sumatoria Positivos (+)	14	14	45	39	39	36	38	19	41	40	40	42	28	21	28	28	56	32	48	65	29	17	42	44
Porcentaje (%) de impactos	28,6%	56,0%	80,4%	78,0%	78,0%	0,0%	77,6%	32,2%	100,0%	50,0%	50,0%	100,0%	45,2%	42,0%	100,0%	65,1%	100,0%	100,0%	100,0%	64,4%	67,4%	32,1%	100,0%	46,8%

Sumatoria Negativos (-)	-35	-11	-11	-11	-11	-11	-11	-40	0	-40	-40	0	-34	-29	0	-15	0	0	0	-36	-14	-36	0	-50
Porcentaje (%) de impactos	71,4%	44,0%	19,6%	22,0%	22,0%	0,0%	22,4%	67,8%	0,0%	50,0%	50,0%	0,0%	54,8%	58,0%	0,0%	34,9%	0,0%	0,0%	0,0%	35,6%	32,6%	67,9%	0,0%	53,2%

Según la matriz de calificación, de 24 actividades la mitad representan algún impacto al medio ambiente, sin embargo, tan solo 3 son altos y 9 son de nivel medio:

- Impacto alto:
    - Aforo o estudio de cargas
    - Llegada de la pila
    - Desmonte del sistema
- Impacto medio:
    - Determinación o alcance del proyecto
    - Transporte a las instalaciones de Transcoop
    - Transporte de equipos complementarios
    - Compra y transporte de materiales de adecuación de instalaciones
    - Construcción de la estructura que contendrá los equipos
    - Compra y transporte de materiales eléctricos
    - Generación de energía eléctrica
    - Mantenimiento
    - Transporte de residuos

Mientras que, de 33 indicadores analizados, son 7 los afectados por las actividades del proyecto, 6 de alto impacto y 1 de nivel medio:

- Impacto alto:
    - Emisiones de ruido
    - Emisiones de gases
    - Los usos edafológicos (del suelo)
    - La disposición de recursos geosféricos (Consumo de combustibles)

  - La disposición de recursos hídricos
  - La cobertura de flora
- Impactos medios:
  - La calidad de vida

9. CAPITULO III: ANÁLISIS COSTO – BENEFICIO

En este capítulo final se abordará el análisis costo beneficio para determinar la viabilidad del proyecto al recopilar los datos de los capítulos anteriores con el fin de utilizarlos en la construcción e interpretación de diferentes herramientas e indicadores tales como la Tasa Interna de Retorno -TIR-, el Valor Presente Neto -VPN- y Relación Costo – Beneficio -RCB-, para lo cual se deberá establecer el valor de inversión y los costos de mantenimiento en los que se incurrirá durante la vida útil del proyecto.

9.1. COSTOS DEL PROYECTO

Para efectos de la determinación de la viabilidad financiera del proyecto se procede a identificar los costos en los que se incurre para la puesta en marcha y operación del sistema de celdas de combustible tipo PEM.

9.1.1. Inversión inicial

Durante la formulación de este proyecto se llevaron a cabo cotizaciones con diferentes empresas proveedoras de productos y servicios que permitieron la construcción de la tabla 3 en la cual se reflejan los valores de los equipos, herramientas, mano de obra, imprevistos del 3,5%, transporte y pólizas, los cuales constituyen el valor de la inversión y operación del proyecto.

Tabla 18. Presupuesto inversión inicial

Descripción	Imagen	Cantidad	Valor unitario (Sin IVA)	Valor total (Sin IVA)
Celda de hidrógeno Whole Win HYFC-500		1	$ 6.244.326	$ 6.244.326
Inversor de corriente Jarrett JM-500W		1	$ 109.900	$ 109.900
Regulador de presión		1	$ 86.990	$ 86.990
Tubo para entrada y salida de hidrógeno		1	$ 15.000	$ 15.000
Estructura para el sistema de celdas de combustible tipo PEM		1	$ 650.000	$ 650.000
Instalación del sistema de celdas de combustible a la red eléctrica del edificio		1	$ 950.000	$ 950.000
Mano de obra		1	$ 1.000.000	$ 1.000.000
Transporte		1	$ 624.433	$ 624.433
Seguros y pólizas		1	$ 37.466	$ 37.466
Subtotal				**$ 9.718.115**
Provisión por imprevistos (3,5%)				**$ 340.134**
Total inversión				**$ 10.058.249**

Fuente: Autor

9.1.2. Costos de mantenimiento y operación

Constituidos por los egresos en la operación en los que incurre el proyecto mensualmente con el fin de mantener en funcionamiento el sistema de pilas de combustible. Aquí se tiene en cuenta la mano de obra, los cilindros de hidrógeno para el suministro de la celda y un precio mínimo del mantenimiento de la celda ya que este consiste esencialmente en una revisión preventiva de los ajustes de las válvulas conectadas al sistema y las conexiones a la red eléctrica.

Tabla 19. Costos de operación mensual

Descripción	Valor (Sin IVA)	
Revisión del sistema	$	5.000
Consumo de combustible (H2)	$	8.404
Total	**$**	**13.404**

Fuente: Autor

La revisión del sistema consiste en la verificación mensual del funcionamiento más los ajustes necesarios en las conexiones a la pila y los eventuales cambios de piezas pequeñas tales como tornillos o amarres. Por otra parte, el consumo de combustible es calculado con un uso promedio de 2 horas diarias a un precio de $140 la hora.

9.2. FLUJOS DE CAJA

Para el presente análisis se deben realizar diferentes flujos de caja entre los cuales se incluye el flujo sin proyecto, con proyecto e incremental, para los cuales se tendrán en cuenta tasas de interés aplicables para el proyecto, inflación, entre otros.

9.2.1. Datos relevantes para elaborar los flujos de caja

En la elaboración de los diferentes flujos de caja presentes en el análisis se debe tener en cuenta información que hará parte de los cálculos pertinentes de los cuales se alimentará cada flujo.

Tabla 20. Datos relevantes para elaborar los flujos de caja

Descripción	Valor
TIO	5%
Inflación de largo plazo	4,5%
TIO + Inflación	9,72%
% Ahorro en factura	21%
% Valor salvamento	40%
% Tasa de impuesto de renta	33%
% Devolución Imp. de renta	25%
Horas operación día pila	2
Consumo H2 Kg/min	0,0005447
Horas operación pila	2000
Precio H2 Kg/hora	$ 140

Fuente: Autor

Se maneja una Tasa de Interés de Oportunidad – TIO- del 9,72% que es el resultado de aplicar la tasa de inflación a largo plazo del 4.5% a la TIO de proyectos sociales o ambientales del 5% (DNP, 2018).

El ahorro de la factura del 21% proviene del ahorro que representa para la sumatoria de las facturas del piso 1 y 2 del edificio la implementación del sistema de pilas del hidrógeno.

Se estima que una vez acaba el ciclo de vida de la Membrana Protónica que da vida a las celdas de combustible, el 40% de la pila aún es aprovechable ya que sus componentes tienen una vida útil mayor a la de la membrana, a razón de esto se toma este porcentaje como el valor de salvamento.

El impuesto de renta para Colombia es del 33%, sin embargo, según la ley 1715 de 2014 se establecen incentivos tributarios para los proyectos que contribuyan a mejorar la calidad ambiental, dentro de los cuales se encuentra la deducción del 25% del valor de la inversión inicial que será descontado la renta anual para el año en que se presente la solicitud.

El precio del hidrógeno es calculado con el valor promedio del dólar entre el 1 de enero de 2018 y el 14 de abril del mismo año equivalente a $2.835,33 (Banco de la República, 2018). Este será el valor de referencia para cualquier calculo en el cual sea necesario la conversión de dólares a pesos colombianos.

9.2.2. Flujos de caja y valor presente neto sin proyecto

Para analizar el flujo de caja sin proyecto se toma el valor de salvamento como un ingreso (positivo) y el valor de la factura junto con las depreciaciones como un egreso (negativo), esto se proyecta a 10 años que es la vida útil del proyecto y de esta manera hacer comparable los flujos de caja.

Tabla 21. Flujo de caja sin proyecto

DESCRIPCIÓN	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Valor de salvamento											
Costo Factura energía	3.075.840	3.214.253	3.342.823	3.476.536	3.598.215	3.706.161	3.817.346	3.931.866	4.049.822	4.171.317	4.296.456
Depreciaciones											
Utilidad gravable	-3.075.840	-3.214.253	-3.342.823	-3.476.536	-3.598.215	-3.706.161	-3.817.346	-3.931.866	-4.049.822	-4.171.317	-4.296.456
Impuesto de renta	-1.015.027	-1.060.703	-1.103.132	-1.147.257	-1.187.411	-1.223.033	-1.259.724	-1.297.516	-1.336.441	-1.376.535	-1.417.831
Utilidad neta	-2.060.813	-2.153.549	-2.239.691	-2.329.279	-2.410.804	-2.483.128	-2.557.622	-2.634.350	-2.713.381	-2.794.782	-2.878.626
Depreciación											
Inversión						0					
Flujo de caja neto	**-2.060.813**	**-2.153.549**	**-2.239.691**	**-2.329.279**	**-2.410.804**	**-2.483.128**	**-2.557.622**	**-2.634.350**	**-2.713.381**	**-2.794.782**	**-2.878.626**

Fuente: Autor

9.2.3. Flujos de caja y valor presente neto con proyecto

Para el flujo de caja con proyecto (Tabla 22) se toma en cuenta el valor de salvamento del sistema como un ingreso menos las revisiones periódicas, el costo del combustible, las depreciaciones de la pila de combustible con vida útil de 3 años, el valor en libros y el 79% del valor de la factura del servicio de energía puesto que el sistema causa un ahorro del 21% del consumo de la red para el piso 1 y 2. De igual forma, el flujo de caja se proyecta a 10 años que es la vida útil de todo el sistema.

Tabla 22. Flujo de caja con proyecto

DESCRIPCIÓN	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Valor de salvamento				2.497.730			2.823.115			3.099.869	7.171.087
Costo factura energía	2.429.914	2.539.260	2.640.830	2.746.463	2.842.590	2.927.867	3.015.703	3.106.174	3.199.360	3.295.340	3.394.201
Revisiones periódicas		62.700	65.208	67.816	70.190	72.296	74.464	76.698	78.999	81.369	83.810
Costo combustible H2		106.853	111.127	115.572	119.617	123.206	126.902	130.709	134.631	138.669	142.830
Depreciaciones		2.844.227	2.844.227	2.844.227	4.115.534	4.115.534	3.352.750	2.583.224	2.583.224	2.583.224	2.822.759
Valor en libros activo											5.645.517
Utilidad gravable	-2.429.914	-5.553.040	-5.661.392	-3.276.348	-7.147.931	-7.238.903	-3.746.705	-5.896.806	-5.996.214	-2.998.734	-4.918.030
Impuesto de renta	-801.871	-1.832.503	-1.868.259	-1.081.195	-2.358.817	-2.388.838	-1.236.413	-1.945.946	-1.978.750	-989.582	-1.622.950
Utilidad neta	-1.628.042	-3.720.536	-3.793.133	-2.195.153	-4.789.114	-4.850.065	-2.510.292	-3.950.860	-4.017.463	-2.009.152	-3.295.080
Depreciación		2.844.227	2.844.227	2.844.227	4.115.534	4.115.534	3.352.750	2.583.224	2.583.224	2.583.224	2.822.759
Devolución IR (25%)		916.252	934.130	540.597	1.179.409	1.194.419	618.206	972.973	989.375	494.791	811.475
Valor en libros activo											5.645.517
Inversión	10.058.249			7.057.787			7.749.672			8.468.276	
Incentivo estatal	2.977.009										
Flujo de caja neto	**-8.709.282**	**39.942**	**-14.776**	**-5.868.116**	**505.829**	**459.888**	**-6.289.009**	**-394.663**	**-444.864**	**-7.399.413**	**5.984.671**

Fuente: Autor

9.2.4. Flujo de caja incremental

Se toman los valores resultantes de los flujos de caja con y sin proyecto para realizar la comparación y el análisis del valor presente neto del proyecto.

Tabla 23. Flujo de caja incremental

	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Flujo neto con proyecto	-8.709.282	39.942	-14.776	-5.868.116	505.829	459.888	-6.289.009	-394.663	-444.864	-7.399.413	5.984.671
Flujo neto sin proyecto	-2.060.813	-2.153.549	-2.239.691	-2.329.279	-2.410.804	-2.483.128	-2.557.622	-2.634.350	-2.713.381	-2.794.782	-2.878.626
FCI	**-6.648.469**	**2.193.491**	**2.224.915**	**-3.538.837**	**2.916.633**	**2.943.016**	**-3.731.387**	**2.239.687**	**2.268.517**	**-4.604.631**	**8.863.297**

Fuente: Autor

9.3. HALLAZGOS

Una vez elaborados los flujos de caja del proyecto es posible calcular el valor presente de los costos y beneficios para de allí calcular la Relación Costo-Beneficio y la Tasa Interna de Retorno – TIR- del proyecto.

Tabla 24. Indicadores del análisis financiero

VPN	0
VP Beneficios	13.462.739
VP Costos	13.462.739
RCB	1,0
TIR	9,72%

Fuente: Autor

9.3.1. Relación Costo – Beneficio

Luego de la elaboración del Flujo de Caja Incremental se pueden obtener los valores de carácter positivo y negativo del proyecto, con los cuales se podrá calcular el valor presente de los beneficios equivalente a $ 13’462.739, y el valor presente de los costos valuado en $ 13’462.739 debido a que el VPN es cero y la TIR es igual a la TIO.

El VPN igual a cero y la RCB es igual a 1,0 debido al incentivo gubernamental de $2.977.009. Es decir, la presencia de un incentivo gubernamental obliga a que en el proyecto se acepte una rentabilidad mínima equivalente a la TIO.

9.3.2. Valor Presente Neto y Tasa Interna de Retorno

El proyecto cumple con la rentabilidad mínima exigida por el mercado ya que la Tasa Interna de Retorno – TIR- del proyecto es del 9,72% que es igual a la Tasa de Interés de Oportunidad -TIO-.

El Valor Presente Neto igual a 0 corrobora que el proyecto ha producido la rentabilidad suficiente para cubrir el costo del dinero en operación, pero no ha logrado superar el beneficio normal (TIO).

10. CONCLUSIONES

a) Las instalaciones del edificio Transcoop en su mayoría se encuentran destinadas al uso residencial, por lo tanto, el tamaño del proyecto se sitúa en una carga máxima de 417 Watts para el piso 1 y 2 cuyo comportamiento de consumo en relación con la adquisición de una pila 500 Watts reporta un factor de carga de 0,44 que indica la subutilización del sistema instalado. Por su parte, la puesta en marcha del proyecto tomará 100 días distribuidos entre las actividades de construcción y verificación.

b) Durante las diferentes fases del proyecto las actividades en las que se analizó un mayor impacto al medio ambiente fueron aquellas en las que el proceso requiere la utilización de fuentes de energía convencionales junto con el consumo de combustibles fósiles que generan emisiones, en ambos casos afectando los indicadores relacionados a la disposición de recursos naturales. Los mayores impactos relacionados directamente con el sistema de pilas de combustible tipo PEM se presentan en la fase de desmonte del proyecto afectando así en mayor medida los indicadores sociales tales como la calidad de vida y la cosmovisión, refiriéndose esta última a la percepción de las energías renovables como una mejor alternativa a las fuentes de energías convencionales renovables y no renovables; de igual manera se afecta el componente atmosférico y geosférico por el transporte y disposición de los residuos provenientes de la estructura y las partes no recuperables del sistema.

c) Los altos costos en los que se incurre para la adquisición y transporte de la celda de combustible desde su lugar de fabricación hasta el lugar de utilización no permiten que el proyecto genere la rentabilidad mínima requerida por el mercado sin un

incentivo estatal adicional de $2’977.009 en la inversión inicial. Tal incentivo debe provenir de fuentes diferentes a la exención de los aranceles y del IVA en los productos importados, por ejemplo, el aumento del porcentaje deducible de la declaración de renta anual.

d) El proyecto presenta condiciones favorables que permiten la viabilidad técnica y ambiental, sin embargo, financieramente se encuentra sujeto a incentivos estatales que contribuyan a la reducción de los costos de implementación del sistema, los cuales se verán mayormente justificados en la medida en la que el consumo del edificio aumente o presente un consumo constante que pueda aumentar el factor de carga del sistema de celdas de combustible.

e) El rol del administrador ambiental a cargo de este proyecto representó un análisis objetivo e imparcial que tuvo en cuenta las condiciones del lugar al cual se va a aplicar en relación con las oportunidades ofrecidas para mejorar la calidad ambiental del país por medio de alternativas extranjeras, articulándose en un contexto global que permita un perspectiva de mayor envergadura en la oferta de soluciones que contribuyan a la parte medio ambiental sin perder de vista las condiciones locales tales como las capacidades técnicas y financieras del ejecutor.

f) La implementación del sistema de celdas de combustible tipo PEM a base de hidrógeno en el sistema de iluminación del edificio Transcoop está supeditada a la instalación de un sistema de celdas de combustible diseñado para suministrar 500 Watts de carga máxima en un plazo máximo de instalación de 100 días, teniendo en cuenta el diseño de planes de manejo para el impacto ambiental al componente atmosférico y geosferico que generan las actividades de transporte y construcción de las estructuras necesarias para su funcionamiento, adicionalmente se precisa de

una inversión inicial de $10.058.249, no sin antes resaltar la necesidad de un subsidio estatal por valor de $2.977.009 con el fin de evitar que la entidad sufra perdidas por la ejecución del proyecto.

11. RECOMENDACIONES

a) Con el fin de ampliar la exactitud del estudio es importante conocer el consumo real del piso 4 de las instalaciones del edificio Transcoop mediante una visita ya que por razones adversas esta información no pudo ser recopilada. De igual manera sería favorable contar con información verificable del consumo eléctrico del piso 2 por medio de la factura del servicio emitida por Codensa S.A. ESP.

b) A pesar de que los impactos ambientales que produce la puesta en marcha y desmonte de este proyecto no resultan ser un factor determinante para la no ejecución de este. Es de carácter fundamental elaborar los planes de manejo ambiental a los que haya lugar con el fin de prevenir y mitigar los daños causados a los diferentes componentes ambientales.

c) Vincular a la administración del edificio un administrador ambiental que permita a la organización seguir trabajando por el buen desempeño ambiental de las instalaciones de manera tal que esto represente beneficios económicos y tributarios a la organización.

12. BIBLIOGRAFÍA

1. Acuña, F., & Muñoz, V. (2001). Celdas de Combustible. Una alternativa amigable con el medio ambiente para la generación de potencia y su impacto en el desarrollo sostenible de Colombia en el siglo XXI. *Ingenieria & Desarrollo, 10*, 94-104.

2. Alibaba.com. (2018). *Alibaba.com*. Obtenido de pilas de combustible PEM de hidrógeno: https://spanish.alibaba.com/p-detail/pilas-de-combustible-PEM-de-hidr%C3%B3geno-300003475962.html?spm=a2700.8699010.29.293.7facdaf8Bs15kY

3. Azqueta, D. (2007). *Introducción a la Economía Ambiental.* Madrid: McGraw-Hill.

4. Baca Urbina, G. (2016). *Evaluación de Proyectos.* Ciudad de México: Mc Graw Hill.

5. Baca, G. B. (2010). *Evaluación de Proyectos* (Sexta ed.). México D.F.: McGrawHill.

6. Banco de la República, C. (14 de noviembre de 2017). *Banco de la República - Colombia*. Obtenido de Banco de la República reitera la meta de inflación de 3% y reduce la tasa de interés de intervención en 25 pb para situarla en 4,75%: http://www.banrep.gov.co/es/comunicado-24-noviembre-2017

7. Banco de la República, C. (22 de abril de 2018). *dolar/web*. Obtenido de Listado por días del Dólar Histórico del Año 2018 en Colombia: https://dolar.wilkinsonpc.com.co/dolar-historico/dolar-historico-2018.html

8. Barreras, F., & Lozano, A. (S.F.). *Energía2012.* Recuperado el 15 de Mayo de 2017, de Hidrógeno. Pilas de combustible de tipo PEM: http://www.energia2012.es/sites/default/files/Hidr%C3%B3geno.%20Pilas%20de%20combustible%20de%20tipo%20PEM.pdf

9. Beato, P. (18 de Abril de 2015). *El País*. Recuperado el 14 de Mayo de 2017, de El debate de la energía distribuida:

http://economia.elpais.com/economia/2015/04/17/actualidad/1429270074_528940.html

10. Bmasdigital. (2018). *Inversor de Interconexion a la red CFE 2.5 KW Serie FORTEPLUS*. Obtenido de https://www.bmasdigital.com/Inversor-interconexion-red-dispositivo-WIFI-FORTEPLUS2.5KM21

11. Codensa S.A. ESP., C. (2018). *Resolución CREG 030*. Obtenido de https://www.codensa.com.co/resolucion-creg-030

12. Conesa, F.-V. V. (1993). *GUIA METODOLOGICA PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL*. Madrid.

13. Congreso de Colombia, C. (13 de Mayo de 2014). *Ley 1715 de 2014*. Recuperado el 21 de Abril de 2017, de http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=57353

14. Congreso de Colombia, C. (29 de Diciembre de 2016). *Ley 1819 de 2016*. Recuperado el 21 de Abril de 2017, de http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=68189

15. CONUEE, C. N. (06 de Junio de 2014). *gob.mx*. Recuperado el 14 de Mayo de 2017, de ¿Qué es la generación distribuida? -Grandes Usuarios de la Energía-: http://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/que-es-la-generacion-distribuida-estados-y-municipios

16. DNP, D. N. (Abril de 2018). *Supuestos Macroeconómicos Generales*. Obtenido de https://www.dnp.gov.co/estudios-y-publicaciones/estudios-economicos/Paginas/supuestos-economicos.aspx

17. Elías, R., & Jara, C. (S.F.). *ELECTRIC POWER SYSTEMS*. Recuperado el 15 de Mayo de 2017, de Celdas de Combustible: http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno10/celdas/index.html

18. ENDESA. (2014). *ENDESA Educa*. Recuperado el 07 de Mayo de 2017, de Generación Distribuida: http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/smart-city/generacion-distribuida#distribuida

19. Energía sostenible, n. (2003). *Energiasostenible.net*. Obtenido de http://www.energiasostenible.net/fundamentos_hidrogeno.htm

20. ENERGY, O. O. (s.f.). *ENERGY.GOV*. Obtenido de FUEL CELL SYSTEMS: https://energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cell-systems

21. Estatuto Tributario Nacional, E. (s.f.). *Art. 158-2. Deducción por inversiones en control y mejoramiento del medio ambiente; Derogado.* Recuperado el 21 de Abril de 2017, de http://estatuto.co/?e=1109

22. Fronius. (s.f.). *FRONIUS GALVO*. Obtenido de http://exelsolar.com/Documentos/Productos/Galvo%202.5-1_DocumentoTecnico.pdf

23. Gamboa, C. M. (s.f.). EVALUACIÓN DEL IMPACTO/EFECTO AMBIENTAL. *METODOLOGÍAS PARA LA EVLUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL*.

24. González, C. (08 de Junio de 2016). *Twenergy.* Recuperado el 13 de Mayo de 2017, de GUÍA PARA ENTENDER EL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL COLOMBIANO: https://twenergy.com/co/a/guia-para-entender-el-sistema-interconectado-nacional-colombiano-2233

25. Google Maps, G. (2016). *Street view*. Obtenido de https://www.google.com.co/maps/@4.6106853,-74.0731103,3a,75y,158.89h,90t/data=!3m7!1e1!3m5!1s0iVO0F3UgJpO_hEtmmFW-w!2e0!6s%2F%2Fgeo3.ggpht.com%2Fcbk%3Fpanoid%3D0iVO0F3UgJpO_hEtmmFW-w%26output%3Dthumbnail%26cb_client%3Dmaps_sv.tactile.gps%26thumb%3D2%26w%3

26. Google Maps, G. (2018). *Google Maps*. Obtenido de Carrera 13 #23-16, Bogotá: https://www.google.com.co/maps/place/Cra.+13+%2323-16,+Bogot%C3%A1/@4.6111111,-74.0710483,18z/data=!4m5!3m4!1s0x8e3f999e96c09e91:0x2bc92db61092f442!8m2!3d4.6104802!4d-74.0729741

27. Hernandez, C. (2011). *ANÁLISIS AMBIENTAL DE LAS GRANDES CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DE COLOMBIA APLICANDO METODOLOGÍA MULTIOBJETIVO.* Recuperado el 13 de Mayo de 2017, de http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14037/T41.11%20H430a.pdf?sequence=2

28. Horizon. (2013). *Horizon Fuel Cell Technologies*. Obtenido de https://www.horizonfuelcell.com/the-company

29. Ice-City. (2015). *Jiangsu Ice-City Insulation Materials Stock Co. Ltd*. Obtenido de Profile: http://icecity-js.com/en/about/index.html

30. Kogan, V., Kuhlman, M. R., Coutant, R. W., & Lewis, R. G. (2012). Aerosol Filtration by Sorbent Beds. *Air & Waste*, 1367-1373.

31. Marco, R. (05 de Mayo de 2014). *Inarquia.* Recuperado el 13 de Mayo de 2017, de ¿Cómo funciona el sistema eléctrico?Generación centralizada vs. distribuida: https://inarquia.es/actualidad/748-como-funciona-el-sistema-electrico-generacion-centralizada-vs-distribuida

32. Medellín, P. (11 de Julio de 2002). *IMPACTO AMBIENTAL DE UNA TERMOELÉCTRICA.* Recuperado el 13 de Mayo de 2017, de http://ambiental.uaslp.mx/docs/PMM-AP020711.pdf

33. Merado libre, m. l. (2018). *mercadolibre.com*. Obtenido de Inversor De Corriente 500w 12v-110v Convertidor Energizer: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-443209025-inversor-de-corriente-500w-12v-110v-convertidor-energizer-_JM

34. Mercado libre, m. l. (2018). *mercadolibre.com*. Obtenido de Inversor Conversor De Corriente 500w 12v A 110v Con Usb: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-458328649-inversor-conversor-de-corriente-500w-12v-a-110v-con-usb-_JM

35. Ministerio de Ambiente, V. y. (06 de Febrero de 2004). *Resolución 136 de 2004*. Recuperado el 21 de Abril de 2017, de http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=45537#0

36. Moreno, L., & Vargas, C. (Febrero de 2013). *LA TECNOLOGÍA DEL HIDRÓGENO, UNA OPORTUNIDAD ESTRATÉGICA PARA LA PERDURABILIDAD DEL SECTOR ENERGÉTICO EN COLOMBIA.* Recuperado el 17 de Mayo de 2017, de http://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/4294/79952447-2013.pdf?sequence=3

37. Plug Power, P. P. (03 de 2016). *GENSURE FUEL CELL SYSTEMS*. Obtenido de Product Catalog: http://www.plugpower.com/wp-content/uploads/2016/03/GenSureProductCatalogsm_012716.pdf

38. Potosí-Guerrero, B. A., Ramos-Paja, C. A., & Serna-Garcés, S. I. (2016). Impact of goverment incentives in the profitability of green energy production usisng fuel cells in Colombia. *Tecno Lógicas*, *19*(37), 93-106.

39. Presidencia de la República de Colombia, P. (07 de Noviembre de 2003). *Decreto 3172 de 2003*. Recuperado el 21 de Abril de 2017, de http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=10682

40. Químicas. (28 de 08 de 2015). *La Electrólisis*. Obtenido de http://www.quimicas.net/2015/08/la-electrolisis.html

41. Rodriguez, H. A., & CREG, C. d. (24 de Noviembre de 2009). *La Generación Distribuida y su Posible Integración en el Sistema Interconectado Nacional.* Recuperado el 07 de Mayo de 2017, de http://www.creg.gov.co/phocadownload/presentaciones/generacion_distribuida_sin.pdf

42. RUDNICK, H. (s.f.). *Pontificia Universidad Católica de Chile*. Obtenido de ELECTRIC. POWER SYSTEMS. CELDAS DE COMBUSTIBLE Y GENERACIÓN DISTRIBUIDA: http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno%2000/Celdas%20de%20Combustible/cc.html

43. San Martín, J. I., Zamora, I., San Martín, J. J., Aperribay, V., & Buigues, G. (s.f.). *Pilas de combustible*. Obtenido de Aplicaciones estacionarias de las pilas de

combustible: http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/pilas_2/pilas_2.html#r5

44. Sapag, N., & Sapag, R. (2008). *Preparación y evaluación de proyectos* (Quinta ed.). Bogotá D.C.: McGrawHill.

45. SERC, S. E. (2014). *La Celda de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico*. Recuperado el 15 de Mayo de 2017, de http://www.schatzlab.org/spanish/fuelcell.html

46. Significados. (10 de 04 de 2018). *FOB*. Obtenido de https://www.significados.com/fob/

47. SINUPOT, S. d. (Abril de 2018). *sinupotp.sdp.gov.co*. Obtenido de Secretaría de Planeación: http://sinupotp.sdp.gov.co/sinupot/index.jsf#

48. Strata®. (s.f.). *Strata®SPE method development*. Obtenido de Select the proper tube dimension: https://www.brechbuehler.ch/fileadmin/redacteur/pdf/columns-sampleprep/sample-prep/z007.pdf

49. Thompson, J. (17 de Abril de 2009). *Estudio de Prefactibilidad*. Recuperado el 07 de Mayo de 2017, de http://todosobreproyectos.blogspot.com.co/2009/04/estudio-de-prefactibilidad.html

50. UPME, U. d. (Octubre de 2015). *Proyección de la Demanda de Energía Eléctrica y Proyección Máxima en Colombia.* Recuperado el 07 de Mayo de 2017, de http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/Proyeccion_Demanda_Energia_Electrica_Octubre2015.pdf

51. UTP, U. T. (S.F.). *UNIVIRTUAL*. Recuperado el 15 de Mayo de 20017, de CELDA COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO: http://univirtual.utp.edu.co/pandora/recursos/0/793/793.pdf

52. Whole Win. (28 de marzo de 2016). *HYFC-500W Fuel Cell Stack User Manual.*

53. Whole Win. (2016). *Whole Win (Beijing) Materials Sci. & Tech. Co., Ltd.* Obtenido de About us: http://www.bjhaoyun.com/abouten.php?cid=35

54. XM S.A. E.S.P., X. S. (2016). *Informe de Operación del SIN y Administración del Mercado 2016.* Recuperado el 07 de Mayo de 2017, de Capacidad Efectiva Neta: http://informesanuales.xm.com.co/2016/SitePages/operacion/2-6-Capacidad-efectiva-neta.aspx