

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Integración de una unidad generadora de energía eléctrica, a partir
de la combustión de hidrógeno, producto de la electrólisis de orina
humana

Trabajo de graduación en modalidad de Megaproyecto presentado por:

Eduard Peters Chaves y

Margarita María Flores de la Riva para optar por el grado académico de Licenciados en
Ingeniería Química y

Rossana Loí Lau Muñoz para optar por el grado académico de Licenciada en Ingeniería y
Ciencia de la Administración

Guatemala,

2016

Integración de una unidad generadora de energía eléctrica, a partir de la combustión de hidrógeno, producto de la electrólisis de orina humana

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Integración de una unidad generadora de energía eléctrica, a partir
de la combustión de hidrógeno, producto de la electrólisis de orina
humana

Trabajo de graduación en modalidad de Megaproyecto presentado por:

Eduard Peters Chaves y

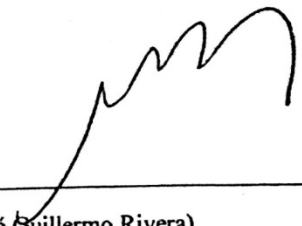
Margarita María Flores de la Riva para optar por el grado académico de Licenciados en
Ingeniería Química y

Rossana Loí Lau Muñoz para optar por el grado académico de Licenciada en Ingeniería y
Ciencia de la Administración

Guatemala,

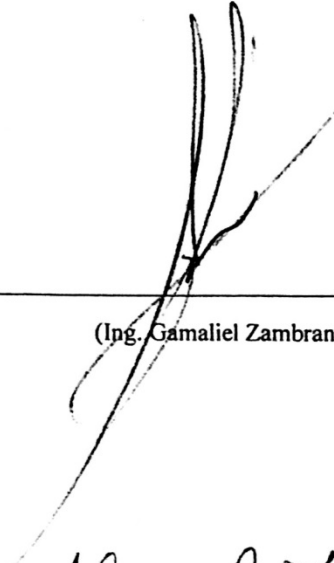
2016

Vo. Bo.

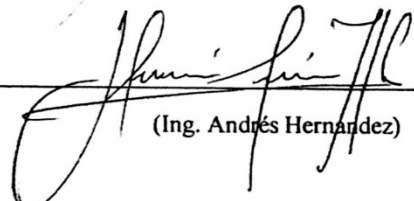
(f): 

(Ing. José Guillermo Rivera)

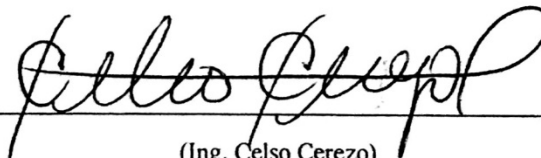
Tribunal examinador:

(f): 

(Ing. Gamaliel Zambrano)

(f): 

(Ing. Andrés Hernández)

(f): 

(Ing. Celso Cerezo)

Fecha de Aprobación: Guatemala 10 de junio del 2015

PREFACIO

Este trabajo cobra vida gracias al apoyo y confianza que los Ingenieros Cristian Rossi, Andrés Hernández, Esteban Rodríguez y el Licenciado Jose Guillermo Rivera depositaron hace más de un año en un grupo de tres estudiantes cuando sembraron en nosotros la semilla de la curiosidad científica y la responsabilidad social. Le agradecemos a nuestros futuros colegas: Diego Figueroa, Soffa Pallais y Raúl Rivera por acompañarnos en esta exploración intelectual que va más allá de nosotros. También extendemos nuestro agradecimiento a nuestros padres, familiares y amigos, quienes en todo momento nos recordaron que la excelencia descansa en la actitud y el trabajo duro, jamás nos dejaron bajar la cabeza. Por último, queremos agradecer a la Universidad del Valle de Guatemala por brindarnos las herramientas con las cuales logramos realizar este trabajo.

Esperamos que este trabajo le otorgue los cimientos a futuros investigadores y con ello traigan al mundo lo que un día se nos ocurrió soñar a un pequeño grupo de ingenieros en esta institución.

ÍNDICE

PREFACIO	vi
LISTA DE CUADROS	viii
LISTA DE FIGURAS	xi
RESUMEN.....	xiii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	3
III. JUSTIFICACIÓN.....	4
IV. MARCO TEÓRICO	5
V. ANTECEDENTES	37
VI. METODOLOGÍA.....	44
VII. RESULTADOS	50
VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	87
IX. CONCLUSIONES.....	105
X. RECOMENDACIONES	107
XI. BIBLIOGRAFÍA	110
XII. ANEXOS.....	115

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Propiedades de combustibles a 25°C y 1atm	9
Cuadro 2. Especificaciones técnicas del motor GX-120.	16
Cuadro 3. Emisión de dióxido de carbono por distintas fuentes de energía convencional	27
Cuadro 4. . Oferta de edificios de apartamentos y oficinas por mes en la ciudad de Guatemala	33
Cuadro 5. Especificaciones del motor de prueba utilizado por Kosar <i>et al.</i> , 2011	37
Cuadro 6. Especificaciones de las líneas de flujo utilizadas en el banco de pruebas.	45
Cuadro 7. Especificaciones de los equipos utilizados en el banco de pruebas.	45
Cuadro 8. Especificaciones de las válvulas utilizadas en el banco de pruebas.....	46
Cuadro 9. Especificaciones de los instrumentos de medición utilizados.....	46
Cuadro 10. Consideraciones de operación para lograr el arranque del motor Honda GX-120	47
Cuadro 11. Descripción de clientes seleccionados	48
Cuadro 12. Listado de modificaciones realizadas al motor Honda GX -120 para su funcionamiento con hidrógeno.....	50
Cuadro 13. Velocidad del motor Honda GX-120 a diferentes relaciones aire / combustible (AFR). El hidrógeno es alimentado desde el tanque de hidruros marca Highland modelo Metal Hydride Tank NO. MH300-1-SS-1113.	53
Cuadro 14. Velocidad del motor Honda GX-120 a diferentes relaciones aire / combustible (AFR). El hidrógeno es alimentado desde el cilindro principal de gas a alta presión.	54
Cuadro 15. Condiciones del operación requeridas por el motor GX-120 utilizando hidrógeno como combustible.	56
Cuadro 16. Datos termodinámicos del ciclo de combustión	56
Cuadro 17. Resumen de flujos de materia.....	58
Cuadro 18. Resumen de flujos de energía	59
Cuadro 19. Balance global de masa y energía para una hora de operación.....	59
Cuadro 20. Hoja de selección de vasos	60
Cuadro 21. Hoja de selección de tanques	61
Cuadro 22. Hoja de selección de reactores.....	62
Cuadro 23. Hoja de selección de motores	63
Cuadro 24. Hoja de selección de generadores eléctricos.....	64
Cuadro 25. Hoja de selección de alternadores.....	65

Cuadro 26. Hoja de selección de baterías.....	66
Cuadro 27. Hoja de selección de paneles solares	67
Cuadro 28. Requerimientos técnicos de la unidad.....	72
Cuadro 29. Resultados del análisis CANVAS.....	74
Cuadro 30. Motivadores de compra para clientes	75
Cuadro 31. Comentarios acerca de motivación de compra	76
Cuadro 32. Importancia de distintos factores para el cliente.....	77
Cuadro 33. Orden de importancia de los factores o requisitos del cliente.....	81
Cuadro 34. Costos en el área de investigación y desarrollo	81
Cuadro 35. Costos específicos del producto final	82
Cuadro 36. Datos de producción de energía de la unidad	83
Cuadro 37. Costos del equipo.....	84
Cuadro 38. Costo beneficio general, ahorro generado por la unidad y ahorro ideal.....	84
Cuadro 39. Datos para Oakland Mall	84
Cuadro 40. Costo beneficio para Oakland Mall	85
Cuadro 41. Datos para escuelas.....	85
Cuadro 42. Costo beneficio para escuelas	85
Cuadro 43. Costo beneficio para el escenario de una casa particular	86
Cuadro 44. Revoluciones por minuto obtenidas a diferentes relaciones aire / combustible alimentando el motor a partir de tanques auxiliares de hidrógeno. El aire se encuentra a presión ambiental (14 psi).	115
Cuadro 45. Revoluciones por minuto obtenidas a diferentes relaciones aire / combustible alimentando el motor directamente del cilindro de hidrógeno. El aire se encuentra a presión ambiental (14 psi).	116
Cuadro 46. Parámetros de operación para cuantificación de flujo de hidrógeno.	116
Cuadro 47. Medición de temperaturas en diferentes puntos del motor en operación.	117
Cuadro 48. Tiempo promedio necesario para proporcionar el volumen de orina a la unidad según tamaño de población.....	125
Cuadro 49. Altura de descarga de VS-101 relativa a la alimentación de R-101 por diámetro de tubería ...	132
Cuadro 50. Resumen de tanques, vasos, reactores y válvulas	134
Cuadro 51. Resumen de equipo electromecánico.....	135
Cuadro 52. Resumen de selección de equipo del Megaproyecto (1).....	136
Cuadro 53. Resumen de selección de equipo del Megaproyecto (2).....	137
Cuadro 54. Costos del proyecto	138
Cuadro 55. Costos finales de la unidad	142

Cuadro 56. CANVAS.....	147
Cuadro 57. Análisis desarrolladores de proyectos de construcción.....	148
Cuadro 58. Análisis casas particulares	148
Cuadro 59. Análisis casas particulares	149
Cuadro 59. Análisis escuelas.....	149
Cuadro 60. Beneficios no esperados desarrolladores de proyectos de construcción	149
Cuadro 62. Beneficios no esperados desarrolladores de proyectos de construcción	150
Cuadro 61. Análisis para el sector público	150
Cuadro 62. Cálculos realizados para cc. Oakland Mall.....	151
Cuadro 63. Cálculos realizados para las escuelas.....	152

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comparación del rango de inflamabilidad del hidrógeno, metano y gasolina	7
Figura 2. Ciclo de Otto estándar de aire	11
Figura 3. Comparación del volumen ocupado en la cámara de combustión y el contenido energético para motores de gasolina e hidrógeno	14
Figura 4. Curva de potencia para el motor Honda GX-120.....	17
Figura 5. Algunos componentes principales del motor Honda GX – 120	17
Figura 6. Algunos componentes y controles principales del motor Honda	18
Figura 7. Fuentes de energía más utilizadas en Guatemala	27
Figura 8. Distribución de la energía en Guatemala	29
Figura 9. Consumo energético en Guatemala.....	30
Figura 10. Construcciones por sector de la industria.....	32
Figura 11. Construcciones en el sector de comercio en Guatemala	32
Figura 12. Potencia obtenida versus velocidad del motor para el motor DATSU LT 2000.....	38
Figura 13. Consumo específico de combustible para gasolina e hidrógeno versus velocidad del motor DATSU LT 2000.....	38
Figura 14. Modificación para ingreso de hidrógeno al motor	39
Figura 15. Efecto de usar gasolina o hidrógeno sobre las emisiones de NO _x del motor DATSU LT 2000 ..	39
Figura 16. Efecto de usar gasolina o hidrógeno sobre las emisiones de CO del motor DATSU LT 2000...	40
Figura 17. Efecto de usar gasolina o hidrógeno sobre las emisiones de CO ₂ del motor DATSU LT 2000..	40
Figura 18. Efecto de usar gasolina o hidrógeno sobre las emisiones de hidrocarburos del motor DATSU LT 2000.....	40
Figura 19. Análisis de pérdidas en comparación al ciclo teórico: gasolina vrs. hidrógeno	41
Figura 20. Presión versus volumen para IMEP de 2 bar para gasolina, hidrógeno PFI y DI	42
Figura 21. Diseño del banco de pruebas utilizado para la obtención de resultados experimentales.....	44
Figura 22. Diseño del banco de pruebas utilizado para la obtención de resultados experimentales exitosos.....	44
Figura 23. Parte del carburador del motor Honda GX-120 utilizada para la combustión con hidrógeno.....	50
Figura 24. Vista en elevación de la línea de ingreso de mezcla combustible al carburador.....	51
Figura 25. Vista lateral de la línea de ingreso de mezcla combustible al carburador	51
Figura 26. Imágenes termográficas del motor GX – 120 en funcionamiento utilizando hidrógeno como combustible	52

Figura 27. Comportamiento en la velocidad del motor Honda GX-120 a diferentes relaciones aire / combustible (AFR). El hidrógeno es alimentado desde el tanque de hidruros marca Highland modelo Metal Hydride Tank NO. MH300-1-SS-1113.....	53
Figura 28. Comportamiento en la velocidad del motor Honda GX-120 a diferentes relaciones aire / combustible (AFR). El hidrógeno es alimentado desde el cilindro principal de gas a alta presión.	54
Figura 29. Comparación del comportamiento en la velocidad del motor Honda GX-120 a diferentes relaciones aire / combustible (AFR) al alimentar el hidrógeno desde el cilindro principal de gas a alta presión y al utilizar el tanque de hidruros marca Highland modelo	55
Figura 30. Diagrama de flujo de proceso de unidad.....	57
Figura 31. Distribución en planta de la unidad propuesta	68
Figura 32. Distribución en planta de un corte que remueve el vaso de almacenamiento y mezcla de solución electrolítica.....	69
Figura 33. Distribución de elevación frontal de la unidad propuesta	70
Figura 34. Distribución en elevación lateral de la unidad propuesta	71
Figura 35. Resultados de motivadores de compra de los consumidores.....	75
Figura 36. Generación de malos olores como el requisito más importante para el cliente	77
Figura 37. Generación de ruido como segundo requisito más importante para el cliente	78
Figura 38. Precio de la unidad siendo el tercer requisito más importante para el cliente	78
Figura 39. Ahorro generado por la unidad como el cuarto requisito más importante para el cliente	79
Figura 40. Espacio que ocuparía la unidad como el quinto requisito más importante para el cliente	79
Figura 41. Vida útil de la unidad como el sexto requisito de importancia para el cliente	80
Figura 42. Comodidad y estética como el requisito con menos importancia para el cliente	80
Figura 43. Diagrama de bloques de entradas y salidas	120
Figura 44. Diagrama de bloques de operaciones unitarias	121
Figura 45. Tiempos de mezclado en tanques agitados.	128
Figura 46. Formato de encuesta realizada	146

RESUMEN

El megaproyecto consiste en la propuesta de una unidad que genera energía eléctrica a partir de hidrógeno, producido en la electrólisis de la urea en orina humana. En este estudio se muestra el proceso y resultado de la adaptación un motor Honda GX-120 para que pueda realizar una combustión adecuada utilizando hidrógeno como combustible, ajustando parámetros de operación y modificaciones físicas; el diseño de la unidad, integrando los resultados experimentales y de revisión bibliográfica de los demás módulos y por último, la clasificación de costos que llevó todo el estudio y la identificación de clientes potenciales para el producto final.

Se encontró que la relación aire / combustible requerida para que el motor Honda GX-120 trabaje a 2,600 rpm es de 23.00 (g/g), la cual equivale a una presión de hidrógeno de 8.711 psi al utilizar aire a presión atmosférica (14 psi). Bajo estas condiciones, el flujo requerido de hidrógeno es de 233.44 g/h. Debe asegurarse que el flujo de alimentación de hidrógeno al motor sea constante, ininterrumpido y estable para evitar problemas de combustión anormal. La eficiencia térmica máxima del motor es de 57.15% a la relación de compresión de 8.5:1, siendo posible su aumento hasta 14.05.

Se obtuvo como resultado un diagrama de flujo de proceso con balances de masa y energía para la generación continua durante una hora. También se presentan las hojas de selección de equipo y distribución de equipo, que representa un posible objetivo de diseño a futuro. La unidad no es práctica de construir en este momento, debido a limitantes técnicas de consumo elevado de energía y orina, condiciones y tiempos de operación desfavorables. Se plantean propuestas de mejoras para trabajos futuros que involucran modificaciones a los materiales y operación de la celda, la solución electrolítica y el adecuado acondicionamiento del motor.

El análisis de los costos identifica que los paneles solares constituyen un 93% de los costos totales, resultando en un elevado costo de la unidad y estableciendo que debe aumentar la eficiencia de la celda electrolítica. De acuerdo al análisis de costo beneficio la unidad no es rentable al producir 1.2 kWh con 173 kg de orina, aproximadamente la producción diaria de orina de 300 personas. El ahorro anual de la unidad equivale a Q11,983.68; sin embargo, comparado con el costo de la unidad de aproximadamente Q5 millones esta no es rentable. El escenario para recuperar la inversión en 3 años establece que el ahorro necesario es de Q1,894,264.90 con una producción de energía de 189.68 kWh.

I. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se pretende diseñar una unidad que sea capaz de realizar los procesos necesarios para extraer energía eléctrica de la orina por medio de la combustión de hidrógeno producido en la electrólisis de la urea. Consiste en la consolidación de los módulos del Megaproyecto que se hacen cargo de la caracterización y conservación de la urea, del estudio y diseño de los procesos de electrólisis y combustión, así como los procesos electromecánicos involucrados en el funcionamiento de la electrólisis y la generación de energía.

En función de los datos experimentales, cálculos y propuestas técnicas se diagrama el proceso conjunto, se calculan balances de masa y energía, se diseñan equipos para almacenamiento y mezcla e incorporan aquellos seleccionados por los distintos módulos. Con los cálculos y el equipo propuesto se estudian los factores técnicos y económicos que hacen problemática la creación de dicha unidad y se proponen mejoras para su futuro estudio. Se diagraman distribuciones de los equipos en un escenario favorable de operación de conversión de urea a energía eléctrica.

El motor Honda GX-120 forma parte de la unidad generadora de energía eléctrica a partir de la orina. El hidrógeno se obtiene por electrólisis de la orina para luego quemarse en el motor que provee energía a un generador eléctrico. Por ello se busca adaptar el motor para que la combustión con hidrógeno sea adecuada y estable, sin necesidad de modificaciones complejas o requerimiento de operación sofisticados que impacten en el costo y desempeño de la unidad global.

Para definir las modificaciones a realizar, se realizó una revisión bibliográfica. Las variables seleccionadas son la relación aire / combustible, la apertura de la válvula del acelerador y la válvula de aire. La principal modificación física realizada, fue la adaptación de la línea de alimentación de hidrógeno, eliminando una parte del carburador. Posteriormente, con esta base teórica, se construyó un banco de pruebas experimental en el cual se graduó la relación aire / combustible y se registró el desempeño del motor. Al alcanzar el desempeño deseado, se cuantificaron las condiciones de operación como el flujo de hidrógeno y la temperatura.

La relación aire / combustible requerida para que el motor Honda GX-120 trabaje a 2,600 rpm es de 23.00 (g/g), la cual equivale a una presión de hidrógeno de 8.711 psi al utilizar aire a presión atmosférica (14 psi). Bajo estas condiciones, el flujo requerido de hidrógeno es de 233.44 g/h. Debe asegurarse que el flujo de alimentación de hidrógeno al motor sea constante, ininterrumpido y estable para evitar problemas de combustión anormal. La eficiencia térmica máxima del motor es de 57.15% a la relación de compresión de 8.5:1, siendo posible su aumento hasta 14.05.

Las tendencias de cuidado del medio ambiente han tomado auge gracias al apoyo de organizaciones internacionales y demás entidades que promueven el uso de tecnologías verdes como las energías

renovables. Dichas energías se llaman así dado que su materia prima proviene de una fuente inagotable como el sol o una fuente cuyo ritmo de producción es más rápido que su ritmo de uso. En base a lo anterior, se desarrolló el diseño de una unidad generadora de energía a partir de la orina humana mediante la electrólisis de la misma. Este trabajo pretende identificar los motivadores de compra de los clientes más atractivos y analizar los costos que conlleva esta investigación.

Para llevar a cabo lo anterior se realizaron encuestas en donde se pretendía identificar qué hacía que las personas estuvieran interesadas en esta unidad y al mismo tiempo cuales eran los atributos que la unidad debía evitar para lograr una mejor atracción por parte de los clientes. Con base en las crecientes tendencias actuales del cuidado del medio ambiente se asumió que uno de los más grandes motivadores iba a ser el compromiso con el medio ambiente junto con el ahorro que esta unidad debía de producir.

El análisis que se realiza a cada etapa del proceso permite la identificación de mejoras tales como: materiales de electrodos para la celda, el electrolito utilizado para llevar a cabo la reacción, la posibilidad de realizar electrólisis de agua al agotarse la urea que impactan directamente en la reducción de la demanda energética y de materia del proceso de electrólisis, así como aumentar la eficiencia de la conversión de energía en el motor a través del acondicionamiento adecuado y la evaluación de la reducción de la presión de la mezcla combustible demandada.

Por otro lado, el análisis de los costos fue esencial para identificar que materiales, instrumentos y herramientas formaban gran parte de los costos totales; los paneles solares presentaron un 93% de los costos totales, el anterior fue el responsable del costo tan alto de la unidad por lo que se determinó que se debe aumentar la eficiencia de la celda electrolítica. Se realizó el análisis de costo beneficio para determinar si la unidad era rentable o no. Sin embargo, se obtuvo que la unidad no es rentable dado que se logra producir 1.2 kWh con 173 kg de orina, aproximadamente la producción diaria de 300 personas. La unidad logra ahorrar anualmente Q11,983.68; sin embargo, al compararlo con el costo de la unidad de aproximadamente Q5 millones esta no es rentable. Por ende, se establece el escenario para recuperar la inversión en 3 años y se obtiene que el ahorro ideal debería ser Q1,894,264.90 con una producción de energía de 189.68 kWh.

Las condiciones de demanda energética en la electrólisis, de orina para realizarla y los parámetros de operación que incluyen temperaturas de solución electrolítica, presión de mezcla combustible demandada por el motor y los tiempos de arranque y operación no hacen técnica ni económicamente viable la construcción de la unidad en el estado actual de los módulos.

II. OBJETIVOS

A. General

Diseñar una unidad para la generación de energía eléctrica a través de la combustión de hidrógeno, en un motor de combustión interna, producto de la electrólisis de orina.

B. Específicos

1. Adaptar un motor Honda GX-120 para que pueda realizar una combustión adecuada utilizando hidrógeno como combustible, ajustando parámetros de operación.
2. Diseñar la unidad para la producción de energía eléctrica a partir de la combustión de hidrógeno proveniente de la electrólisis de urea en orina humana determinando los parámetros de operación que combinen los otros módulos del proyecto.
3. Identificar a los clientes más atractivos y el beneficio para ellos de un sistema de generación de energía mediante la combustión de hidrógeno a partir de la electrólisis de orina humana.

III. JUSTIFICACIÓN

La producción de energía eléctrica utiliza combustibles fósiles que producen una alta contaminación ambiental y adicionalmente, los altos costos de los recursos energéticos, han obligado a buscar nuevas alternativas para cubrir la demanda mundial de energía. Se pronostica que para el 2040, el consumo energético aumente en un 56% respecto al 2010 (U.S. Energy Information Administration, 2013). Mundialmente, un 73.9% de la energía consumida es generada por fuentes no renovables (World Bank, 2012). Actualmente las tendencias verdes han ido tomando auge como la construcción limpia, el reciclaje y en general el cuidado y conservación del medio ambiente. La unidad propuesta, se concentra en utilizar un desperdicio generado por el ser humano diariamente, convirtiéndolo en energía eléctrica para continuar promoviendo las tendencias verdes ya mencionadas a un costo accesible. La producción de hidrógeno a partir de la urea representa un costo de energía 30% menor respecto a su producción a partir del agua. La electrólisis de urea elimina este componente del agua residual, disminuyendo los contaminantes en el afluente final (Boggs, King, & Botte, 2009)

Para lograr que el motor de combustión GX-120 funcione con hidrógeno, se requieren ciertas modificaciones. Estos cambios son de dos tipos: de operación y mecánicas. Es importante mencionar que el principal reto al adaptar motores de combustión a hidrógeno, es la pre ignición que caracteriza a este combustible. Es por esto que es necesario identificar y realizar modificaciones a las condiciones de operación para que la combustión pueda llevarse a cabo sin problemas al momento de utilizar hidrógeno.

El sistema propuesto involucra la unión de diferentes subsistemas, pues existe la necesidad de establecer un proceso de la orina a la energía, determinando los parámetros de operación que permitan a los sistemas conectarse y funcionar. Se deben presentar los equipos necesarios para lograr esto, así como su distribución espacial dentro de la unidad.

El cliente es la razón de crear sistemas innovadores que solucionen problemas mundiales que se acoplen a las tendencias actuales. Identificar los motivadores de compra de los clientes de la unidad es importante para entender los pensamientos de la persona y lograr explotar los atributos o ideas que los conmueven.

La unidad genera energía y un ahorro económico para todos los usuarios; es importante lograr cuantificar el mismo para hacer atractiva la unidad y para ello se realiza un análisis de costo – beneficio para hacer el ahorro algo tangible. Realizar dicho análisis también implica la clasificación de los costos para poder realizar una comparación.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Hidrógeno como combustible

1. Propiedades del hidrógeno. A continuación se presentan las propiedades más relevantes del gas, relacionadas a su utilización como combustible. Se clasifican en propiedades físicas y propiedades químicas.

a. Propiedades físicas: se presentan las propiedades físicas más relevantes relacionadas al hidrógeno como combustible.

1) Estado físico: su punto de ebullición es $-252.77\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el punto de fusión es -259.2°C a presión atmosférica. A condiciones ambientales habituales se encuentra como gas, lo cual debe tomarse en cuenta para su almacenaje al ser utilizado como combustible. A pesar de aumentar la presión para aumentar el punto de ebullición, esta propiedad tiene un máximo de -240°C a una presión cercana a 13 bar (Fàbrega Ramos, 2009). Su capacidad calorífica a presión constante (c_p) es de $28,623\text{ kJ/kmol}\cdot\text{K}$ y a volumen constante (c_v) de $20,309\text{ kJ/kmol}\cdot\text{K}$ (Fàbrega Ramos, 2009).

2) Apariencia: es un gas inodoro, incoloro e insípido, lo cual dificulta su detección (Fàbrega Ramos, 2009). Toxicidad: no es considerado tóxico por sí mismo. Sin embargo, puede actuar como asfixiante pues puede desplazar al oxígeno en el aire. Esto conlleva consecuencias como hiperventilación, disminución de capacidades mentales, falta de coordinación muscular y juicio, fatiga, entre otros. También debe considerarse que su inhalación da lugar a una mezcla inflamable dentro del cuerpo, por lo que se deben cuidar las fugas especialmente en recintos cerrados, de tamaño reducido o con ventilación escasa (Fàbrega Ramos, 2009).

3) Densidad: a 20°C y 1 atm, su densidad en estado gaseoso es de 0.08376 kg/m^3 . El volumen específico asociado es de $11.9\text{ m}^3/\text{kg}$. Su relación de expansión es 1:848 lo cual representa que en estado gaseoso a condiciones atmosférica, ocupa 848 veces más que cuando se encuentra en estado líquido. Al almacenarse como gas a alta presión, como en los cilindros utilizados frecuentemente, la relación de expansión a presión atmosférica es de 1:240 para presiones de almacenaje de 250 bar. La baja densidad conlleva problemas para el almacenaje y reduce la cantidad de aire que puede ingresar a la cámara de combustión, lo cual reduce la potencia obtenida (Fàbrega Ramos, 2009).

4) Fugas: las moléculas de hidrógeno presentan un tamaño reducido en comparación a otros gases, lo cual facilita su difusión a través de muchos materiales y hace que sea difícil de almacenar. A pesar que esto representa un riesgo de fugas y explosiones, el tamaño molecular facilita que la fuga se evapore y se diluya rápidamente en el ambiente (Fàbrega Ramos, 2009).

b. Propiedades químicas: se presentan las propiedades químicas más relevantes relacionadas al hidrógeno como combustible.

1) Reactividad: es altamente reactivo, lo cual lo caracteriza como un combustible. El hidrógeno forma enlaces con oxígeno dando lugar a productos con menor energía que los reactivos, lo cual implica liberación de energía que se convierte posteriormente en trabajo. Esta reacción de combustión tiene asociada una baja energía de activación que se puede proporcionar en forma de chispa por ejemplo (Fàbrega Ramos, 2009).

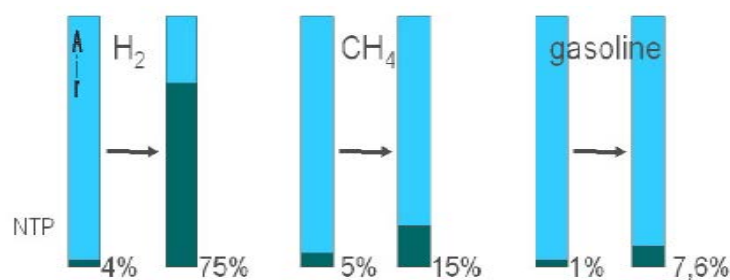
2) Calor de combustión: el poder calorífico superior del hidrógeno es de 141.86 kJ/g a 25°C y 1atm y el poder calorífico inferior en las mismas condiciones es de 119.93 kJ/g. Se caracteriza por tener la relación peso – energía más alta que cualquier otro combustible (Fàbrega Ramos, 2009).

3) Punto de inflamación (*flashpoint*): esta propiedad refleja la facilidad de evaporar un combustible; es la temperatura mínima a la cual el combustible genera vapores inflamables suficientes para que ardan al estar en contacto con una fuente de ignición a presión atmosférica, sin propagar la combustión a la fase líquida. Siempre es más bajo al punto de ebullición, por lo que para el hidrógeno presenta un valor muy por debajo de la temperatura ambiental y no resulta relevante pues se encuentra en estado gaseoso (Fàbrega Ramos, 2009).

4) Rango de inflamabilidad: está comprendido entre el límite inferior y superior de inflamabilidad. El primero representa la mínima concentración del gas que puede admitir una llama y por debajo de esta no se da la combustión. El segundo representa la máxima concentración que permite la combustión, pues en concentraciones mayores no hay suficiente oxígeno para quemar el hidrógeno. El rango para este gas es de 4 – 75%. Esta gama permite quemar el combustible con amplias relaciones aire/combustible, aun en mezclas pobres donde la cantidad de combustibles es menor a la estequiométrica. Esto conlleva que la temperatura final de la combustión sea más baja, lo cual reduce los contaminantes como NO_x en los gases de combustión (Fàbrega Ramos, 2009).

En comparación a otros combustibles, el hidrógeno presenta un rango de inflamabilidad sumamente amplio. En la Figura 1 se muestra un diagrama que compara esta propiedad para el hidrógeno con el metano y la gasolina.

Figura 1. Comparación del rango de inflamabilidad del hidrógeno, metano y gasolina



(Bhaskar, Hari Prakash, & Prasad, 2013)

5) Temperatura de autoencendido: es la temperatura en la cual se da la combustión sin necesidad de una fuente de ignición. Para el hidrógeno este valor es de 585°C, la cual es relativamente elevada respecto a otros combustibles. Esta propiedad resulta relevante pues limita la relación de compresión según la siguiente ecuación:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}$$

Ecuación 1

donde V_1/V_2 representa la relación de compresión, T_1 la temperatura inicial absoluta y T_2 la temperatura final absoluta. La alta temperatura de autoignición del hidrógeno hace posible que se utilicen mayores relaciones de compresión que en los motores que utilizan combustibles fósiles por ejemplo (Fàbrega Ramos, 2009).

6) Número de octano: esta propiedad describe las características antidetonantes de un combustible cuando se utiliza en un motor de combustión interna. El hidrógeno tiene un número de octano elevado en comparación a otros combustibles, lo cual hace que sea resistente a golpeteos o detonaciones secundarias que ocurren después de la ignición debido a la acumulación de calor. Para este gas el número de octano es de 130, en comparación de 87 para la gasolina y 30 para Diésel (Fàbrega Ramos, 2009).

7) Energía de ignición: es la cantidad de energía que debe proveerse para encender una mezcla combustible. Debe ser mayor que la temperatura de autoencendido y suministrarse por un tiempo suficiente para calentar hasta la temperatura de ignición. En los motores de combustión interna, esta energía proviene de las bujías (también llamadas chispas). A pesar que el hidrógeno presenta una temperatura de autoencendido superior, su energía de ignición es de 0.02 mJ, la cual es mucho más baja que la de otros combustibles y por esto es más propenso a inflamarse. Esto también favorece que sea posible realizar la combustión con mezclas pobres y la ignición se dé rápidamente. La desventaja que conlleva es que los

gases de combustión y otras zonas a altas temperaturas pueden ser fuentes de ignición causando preencendido y retroceso de llama (Fàbrega Ramos, 2009).

8) Velocidad de quemado: es la velocidad a la que viaja la llama a través de una mezcla de gas combustible. Indica qué tan severa será la explosión, pues a altas velocidades de quemado apoyan que se dé la transición desde la deflagración (explosión isóbara) hasta la detonación (explosión supersónica en la que se produce una expansión). Este valor varía, dependiendo de la concentración, entre 2.65 – 3.25 m/s para el hidrógeno. Por esto, al tener lugar una fuga de este gas, se quemará rápidamente y la combustión tiene una duración corta (Fàbrega Ramos, 2009).

9) Distancia de apagado: describe las propiedades de extinción de la llama cuando se utiliza en un motor de combustión interna. Representa la distancia a la que se apaga la llama por pérdidas de calor tomando como referencia la pared del cilindro. Para el hidrógeno es de 0.064 cm, aproximadamente tres veces menor a la de otros combustibles como la gasolina. Por esto, las llamas producidas en la cámara de combustión circulan más cerca del cilindro antes de apagarse y esto hace que sea más difícil que se extingan. Otro efecto de esta propiedad, es que hay mayor tendencia a pequeñas explosiones pues la llama puede pasar con mayor facilidad en válvulas entre abiertas que en el caso de los hidrocarburos. Esto favorece el retroceso de llama (Fàbrega Ramos, 2009).

De todas las propiedades mencionadas, las que contribuyen a utilizar hidrógeno como combustible son la amplia gama de inflamabilidad, baja energía de ignición, pequeña distancia de apagado, temperatura de autoignición elevada, alta velocidad de llama, elevada difusividad y baja densidad. A continuación se muestra un cuadro comparativo entre las propiedades más significativas del hidrógeno, con el gas natural y la gasolina:

Cuadro 1. Propiedades de combustibles a 25°C y 1atm

Propiedad	Hidrógeno	Gas natural	Gasolina
Densidad (kg/m ³)	0.0824	0.72	730 (líquida a 0°C)
Rango de inflamabilidad (% v/v en aire)	4 – 75	4.3 – 15	1.4 – 7.6
Rango de inflamabilidad (ϕ)	0.1 – 7.1	0.4 – 1.6	\approx 0.7 – 4
Energía de ignición (mJ)	0.02	0.28	0.24
Velocidad de llama (m/s)	1.85	0.38	0.37 – 0.43
Temperatura de llama adiabática (K)	2480	2214	2580
Distancia de apagado (mm)	0.64	2.1	\approx 2
Relación combustible / aire estequiométrica	0.029	0.069	0.068
Fracción volumétrica estequiométrica (%)	29.53	9.48	\approx 2 (vapor)
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	119.7	45.8	44.79
Calor de combustión (MJ/kg aire)	3.37	2.9	2.83

(White, Steeper, & Lutz, 2006)

B. Cuantificación de aire y combustible en mezclas

En la práctica se utilizan diferentes cantidades de aire para realizar la combustión. Cuando se utiliza menos cantidad de aire que lo establecido por la reacción estequiométrica, se dice que la mezcla es rica. Cuando se utiliza aire en exceso respecto al estequiométrico, se dice que la mezcla es pobre. La cantidad de aire y combustible puede cuantificarse a través de varios parámetros: relación aire / combustible (AFR por sus siglas en inglés), relación de equivalencia (ϕ) o aire en exceso (λ o %EA por sus siglas en inglés). A continuación se presentan ecuaciones para cada uno de ellos (McAllister, Chen, & Fernandez-Pello, 2011).

1. Relación aire / combustible:

$$\text{AFR} = \frac{m_a}{m_f}$$

Ecuación 2

donde AFR representa la relación aire / combustible, m_f la masa de combustible y m_a la masa de aire (McAllister et al., 2011).

2. Relación de equivalencia:

$$\phi = \frac{m_{as}}{m_a}$$

Ecuación 3

donde ϕ representa la relación de equivalencia, m_{as} la cantidad de aire requerido estequiométricamente y m_a la masa de aire real (McAllister, Chen, & Fernandez-Pello, 2011).

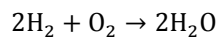
3. Relación estequiométrica:

$$\lambda = \frac{1}{\phi} = \frac{m_a}{m_{as}}$$

Ecuación 4

donde λ es la relación estequiométrica ϕ representa la relación de equivalencia, m_{as} la cantidad de aire requerido estequiométricamente y m_a la masa de aire real (McAllister, Chen, & Fernandez-Pello, 2011).

La reacción de combustión de hidrógeno es la siguiente:



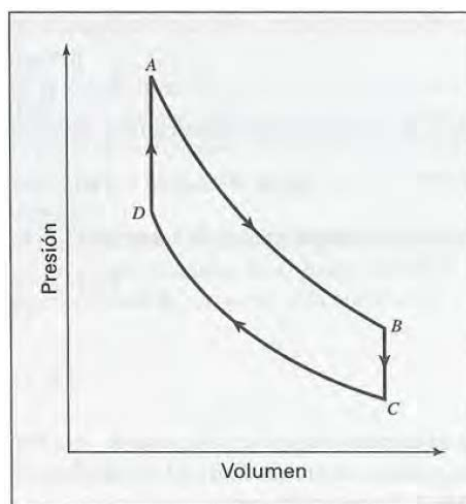
Ecuación 5

Tomando en cuenta que la composición molar de oxígeno en el aire es del 21%, la relación estequiométrica es de 34.33:1 en masa o 2.4:1 en volumen. Sin embargo, dado el amplio rango de inflamabilidad del hidrógeno, se pueden utilizar mezclas desde 34:1 hasta de 180:1 en unidades de masa (College of the Desert, 2001).

C. Ciclo de combustión interna de Otto

Este ciclo está compuesto por cuatro tiempos como se muestra en la Figura 2. El primero es el de admisión a presión constante, en el cual un pistón al moverse hacia afuera arrastra una mezcla de aire / combustible hacia adentro del cilindro. En el segundo tiempo, todas las válvulas se cierran y la mezcla aire / combustible se comprime de manera aproximadamente adiabática como lo muestra la línea CD en la figura. Posteriormente la mezcla se enciende y la combustión tiene lugar en un tiempo suficientemente corto para considerar que el volumen permanece constante y la presión aumenta (línea DA). En el tercer tiempo se produce trabajo pues los productos de la combustión se expanden de forma adiabática (línea AB). Posteriormente la válvula de descarga se abre y la presión baja rápidamente a volumen prácticamente constante (línea BC). En el cuarto tiempo, el pistón empuja los gases de combustión restantes.

Figura 2. Ciclo de Otto estándar de aire



(Smith, Van Ness, Abbott, & Alatorre Miguel, 2007)

D. Combustión anormal de Hidrógeno

Las propiedades únicas del hidrógeno que lo diferencian de otros combustibles traen beneficios anteriormente mencionados. Sin embargo, también son causantes de problemas en la combustión. Especialmente las propiedades que intervienen en esto son: amplio rango de inflamabilidad, baja energía de ignición y alta velocidad de llama. Las anomalías pueden clasificarse en: encendido de superficie, retorno

de llama, pre encendido y auto ignición. El primero término se refiere a la ignición descontrolada causada por un punto caliente en la cámara de combustión. El retorno de llama ocurre cuando la mezcla aire – hidrógeno combustiona durante el ingreso al motor, generalmente en el colector de admisión. El pre encendido se refiere a combustiones dentro de la cámara de combustión durante la etapa de compresión del ciclo, previo a que se accione la chispa. La auto ignición, comúnmente conocida como “golpeteo”, ocurre en la última parte de la combustión con el gas remanente y causa oscilaciones altas en la presión y ruido. A continuación se detallan los principales problemas asociados a la combustión anormal (Verhelst & Wallner, 2009).

1. **Pre encendido.** Este fenómeno también se conoce bajo el nombre de pre ignición. Ocurre en la etapa de compresión con la válvula de admisión está cerrada por diferentes causas. Es importante mencionar que es considerado un evento estocástico por lo que su investigación resulta complicada. Algunas de las causas son puntos calientes en las bujías o válvulas de escape, gas residual, partículas de aceite calientes remanentes de otras combustiones y carga residual en el sistema de ignición. En general, tanto las altas temperaturas como las cargas pueden causar pre ignición. Debido a que la temperatura mínima de ignición depende de la relación aire/combustible, la pre ignición es más pronunciada cuando las mezclas se aproximan a la relación estequiométrica. Adicionalmente, algunas condiciones de operación como altas velocidades y cargas del motor, aumentan la ocurrencia de pre ignición dado que conllevan altas temperaturas en los componentes y el gas (Verhelst & Wallner, 2009).

Algunas medidas para evitar este tipo de anomalía en la combustión son la selección de bujías adecuadas, diseño de un sistema de ignición con bajas cargas residuales y ventilación adecuada. Otra alternativa es la inyección directa del hidrógeno a la cámara de combustión (Verhelst & Wallner, 2009).

2. **Retorno de llama.** Esta anomalía describe la combustión de la alimentación aire – hidrógeno durante la etapa de admisión y puede ocurrir en el sistema de admisión o en la cámara de combustión. Cuando se abren las válvulas de admisión se introduce la mezcla por succión y ocurre ignición por puntos calientes, residuos de gas calientes o cargas residuales. La principal diferencia con el pre encendido es el momento en el que cada uno de estos ocurre. La pre ignición tiene lugar en la etapa de compresión cuando las válvulas de admisión están cerradas, como se mencionó anteriormente. El retorno de la llama ocurre con la válvula de admisión abierta y resulta en un aumento en la presión en el colector de admisión. En algunas ocasiones no se escucha pero puede dañar o incluso destruir el sistema de admisión de combustible. Dada la baja energía de ignición del hidrógeno, la ocurrencia de esta anomalía ocurre con mayor frecuencia con mezclas cercanas a la estequiométrica (Verhelst & Wallner, 2009).

Se considera que la pre ignición es antecesora del retorno de llama. El primer evento caliente la cámara de combustión, lo cual causa retorno de llama y así sucesivamente, formando un ciclo. Por esto, las medidas que reducen la pre ignición también son efectivas para disminuir el retorno de llama.

Adicionalmente, se han creado sistemas de inyección que dejan fluir aire en la cámara de combustión para enfriar posibles puntos calientes, antes del ingreso de la mezcla aire – hidrógeno. Algunos experimentos han mostrado que las anomalías en la combustión limitan el rango de operación de los motores. Esto se puede evitar con una adecuada inyección de combustible, combinada con el ajuste en los tiempos de las válvulas de admisión y escape (Verhelst & Wallner, 2009).

3. **Auto ignición.** Cuando el gas remanente se encuentra bajo condiciones de presión y temperatura determinadas, se da auto ignición espontánea seguida de liberación de energía generando ondas de presión de alta amplitud. Este golpeteo puede causar daños al motor debido al estrés térmico y mecánico. La tendencia a que se produzca este evento depende del diseño del motor y las propiedades de la mezcla aire / combustible. La auto ignición está fuertemente relacionada con el número de octano, propiedad que refleja que el hidrógeno tiene baja resistencia al golpeteo (Verhelst & Wallner, 2009).

E. Eficiencia térmica

El rendimiento termodinámico teórico del motor se calcula tomando el ciclo de Otto como referencia del comportamiento ideal. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}}$$

Ecuación 6

donde η_t es el rendimiento termodinámico teórico, V_1/V_2 representa la relación de compresión y γ la relación de calores específicos (Fàbrega Ramos, 2009).

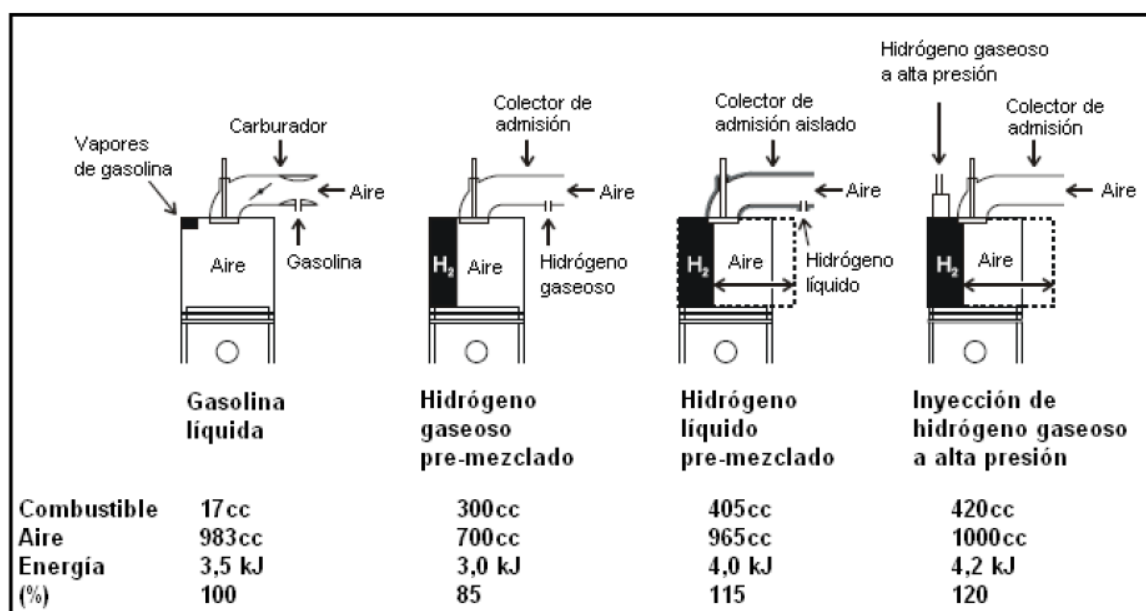
A mayores relaciones de compresión y relaciones de calores específicos, se obtienen mayores rendimientos termodinámicos teóricos. La relación de compresión se encuentra limitada por la resistencia del combustible a sufrir golpeteo. Al utilizar mezclas pobres de hidrógeno, hay menor tendencia a este fenómeno que cuando se utiliza gasolina, por lo que se puede aumentar la relación de compresión. En cuanto a la relación de calores específicos, el valor está influenciado por la estructura molecular. A menor complejidad en la misma, mayor es esta relación. Para el hidrógeno es de 1.4 y para la gasolina es 1.1, lo cual va de acuerdo a la simplicidad de este gas en comparación al segundo combustible (Fàbrega Ramos, 2009).

F. Inyección de hidrógeno en motores de combustión

El hidrógeno puede ser alimentado al motor en tres principales formas: inyección central (carburado), inyección en puerto o inyección directa. A continuación se describe cada una de ellas.

1. **Inyección central (carburado).** Es el método más simple y no requiere que la presión del hidrógeno sea tan elevada como en otros métodos. Dada su simplicidad, facilitan la conversión de motores de gasolina a hidrógeno. Sin embargo, presenta la desventaja de ser más susceptible a combustión anormal, específicamente pre ignición y retorno de llama. Debido a la larga distancia entre el punto de inyección y la cámara de combustión, hay un retraso en la respuesta. Adicionalmente, pueden presentarse diferencias en la concentración de los cilindros si el manifold no está diseñado correctamente. Por su densidad, el hidrógeno desplaza más volumen en la cámara de combustión, lo que reduce la potencia obtenida como se muestra en la Figura 3 (Liu, 2004).

Figura 3. Comparación del volumen ocupado en la cámara de combustión y el contenido energético para motores de gasolina e hidrógeno



(Fàbrega Ramos, 2009)

2. **Inyección en puerto (PFI por sus siglas en inglés).** En este sistema el combustible se inyecta en el manifold en la válvula de admisión. Generalmente, se inyecta al manifold después de haber iniciado la etapa de admisión. En este caso, el problema de retorno de llama se evita y la probabilidad de pre ignición se reduce. En este método el aire se inyecta por separado al inicio de la etapa de admisión para diluir los gases residuales calientes y enfriar cualquier punto caliente. Dado que menos gas está presente en el manifold en cualquier momento, la pre ignición es menos severa. Requiere una presión de inyección mayor al sistema carburado, pero menos que el de inyección directa (Liu, 2004).

3. **Inyección directa (DI por sus siglas en inglés).** Es el método más sofisticado y consiste en inyectar directamente el hidrógeno a la cámara de combustión durante la etapa de compresión. Se evita por completo la pre ignición, pues la válvula de admisión está cerrada cuando el combustible se inyecta, por lo que tampoco se puede producir retorno de llama. Sin embargo, este método requiere mayor presión de hidrógeno que los otros métodos, lo cual se compensa con una mejor aceleración y mayor potencia entregada. Se reporta que la potencia entregada por el motor con este sistema de inyección es 20% mayor que para la utilización de gasolina, y 42% mayor que cuando se utiliza carburador con hidrógeno (Liu, 2004).

Debe mencionarse que dado el corto tiempo que tienen para mezclarse el aire y el combustible, es posible que se produzcan mezclas no homogéneas, lo cual conlleva dificultades en la combustión. En consecuencia, las emisiones de NO_x pueden aumentar y la eficiencia térmica disminuye. Es así como se muestra la relevancia que tiene la formación de la mezcla para un diseño adecuado del sistema de inyección (Liu, 2004).

G. Consumo específico de combustible

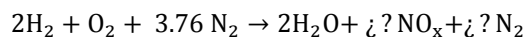
El consumo específico de combustible es la razón entre el consumo de combustible (flujo másico) y la potencia, por lo que indica la masa de combustible que necesita el motor para ejecutar un trabajo determinado. Se ve influenciado por la relación aire/combustible utilizada, disminuyendo a medida que esta relación aumenta hasta alcanzar un valor mínimo. A partir de este valor, se producen combustiones incompletas que aumentan el consumo de combustible (Bauer, 2003).

H. Potencia

La potencia obtenida depende de la relación aire / combustible y del sistema de inyección utilizado. Se ha registrado que al utilizar hidrógeno en motores de combustión, se obtiene una potencia 24% menor en promedio, dado que se utiliza una relación aire / combustible de 1.5 en comparación a la gasolina que utiliza una relación de 1.0. Al utilizar hidrógeno como combustible, una cantidad másica menor ingresa al cilindro en comparación a la gasolina debido a la baja densidad de los gases. Por esto, el volumen debe ser entre 40 – 60% mayor para producir la misma cantidad de potencia. Sin embargo, esto se compensa en cierto grado por la alta velocidad de quemado de hidrógeno, la cual provoca una mejor combustión a velocidades altas (Kosar *et al.*, 2011).

I. Emisiones

A pesar que la reacción de combustión teórica de hidrógeno únicamente tiene agua como producto, esto no ocurre en la realidad. Dado que se utiliza aire y no oxígeno puro para la combustión, la reacción que ocurre es



Ecuación 7

La cantidad de nitrógeno que se convierte en NO_x y la que permanece sin oxidarse depende de la temperatura y otras condiciones de la combustión. Es importante mencionar que la combustión de hidrógeno no produce productos tóxicos como hidrocarburos, CO, SO_x , ácidos orgánicos o CO_2 (Kosar *et al.*, 2011).

J. Motor Honda GX-10

El motor Honda modelo GX-120 puede ser utilizado para distintas aplicaciones como equipos de construcción, generadores eléctricos, soldadores, bombas y otras operaciones industriales. En el Cuadro 2 se muestran sus especificaciones técnicas relevantes (Honda, 2014).

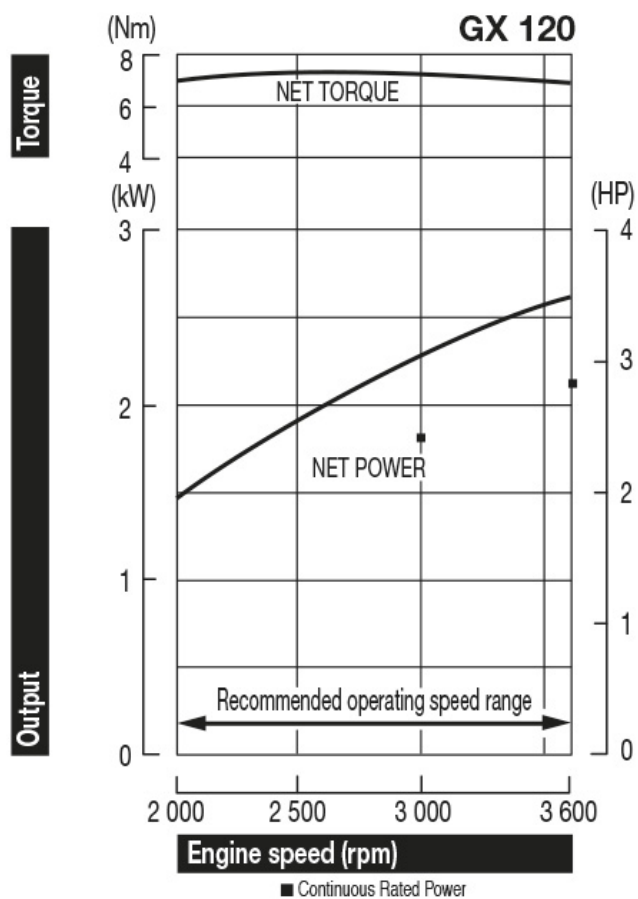
Cuadro 2. Especificaciones técnicas del motor GX-120.

Especificación	Dato
Tipo de motor	4 tiempos, válvulas en cabeza, monocilíndrico
Calibre X Carrera	60.0 x 42.0 mm
Desplazamiento	118 cm ³
Relación de compresión	8.5:1
Potencia neta	2.6 kW (3.5 HP) a 3,600 rpm
Potencia nominal continua	1.8 kW (2.4 HP) a 3,000 rpm 2.1 kW (2.8 HP) a 3,600 rpm
Par motor neto máximo	7.3 N m (0.74 kgf m) a 2,500 rpm
Sistema de encendido	Magneto transistorizado
Capacidad del depósito de combustible	2.0 L
Capacidad de aceite de motor	0.56 L
Consumo de gasolina a potencia nominal continua	1.0 L/h a 3,600 rpm
Dimensiones (largo x ancho x altura)	297 x 346 x 329 mm
Masa en seco	13.0 kg
Sistema de enfriamiento	Aire forzado
Rotación del eje de la toma de fuerza	Hacia la izquierda

(Honda, 2014)

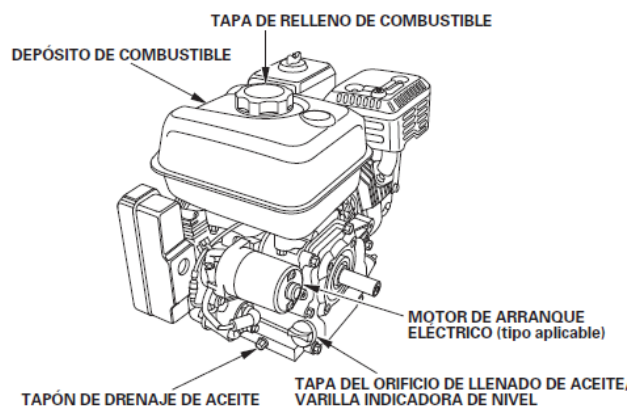
La curva de potencia es obtenida en un motor de prueba siguiendo la norma SAE J1349. La potencia real entregada por el motor en la instalación dependerá de varios factores como la velocidad de operación, condiciones ambientales, mantenimiento, entre otros. La curva para el motor Honda GX-120 se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Curva de potencia para el motor Honda GX-120



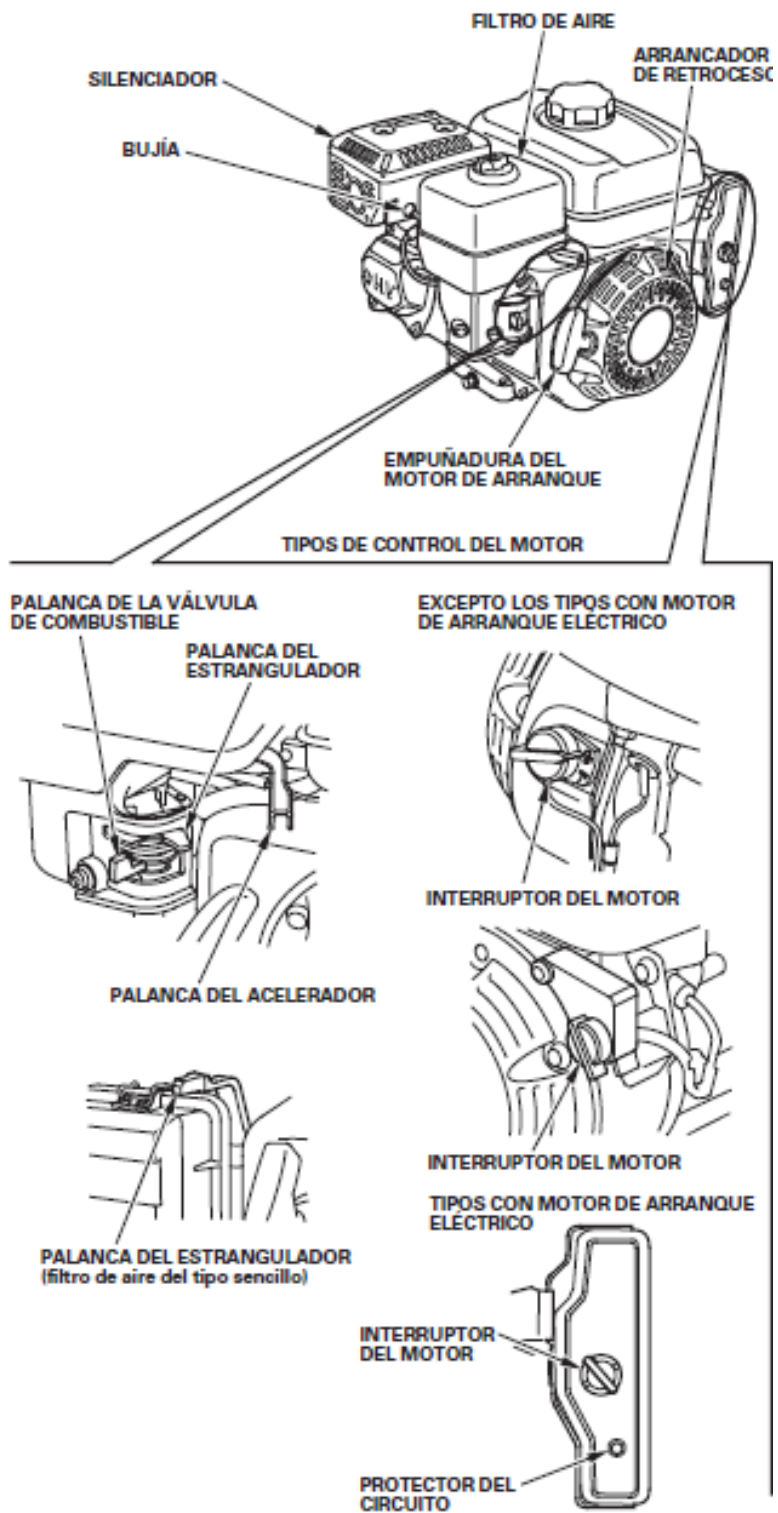
(Honda, 2014)

Figura 5. Algunos componentes principales del motor Honda GX – 120



(Honda, 2014)

Figura 6. Algunos componentes y controles principales del motor Honda



(Honda, 2014)

K. Modificaciones al motor de combustión interna

Se han realizado estudios para adaptar motores de gasolina para que utilicen hidrógeno como combustible. El principal reto es evitar las anomalías en la combustión mencionadas anteriormente. A continuación se mencionan una serie de consideraciones que deben ser tomadas en cuenta en el diseño (Bhaskar *et al.*, 2013).

1. **Bujías.** Utilizar bujías de baja temperatura para evitar temperaturas que excedan la temperatura de auto ignición, lo cual causa retorno de llama (Bhaskar *et al.*, 2013).

Se recomiendan bujías frías y sin punta de platino, pues este es un catalizador. Estos están diseñados para enfriarse más rápido que los convencionales, evitando ser una fuente de ignición. Se recomiendan especialmente bujías con punta de alambre fino de iridio (Fàbrega Ramos, 2009).

2. **Sistema de ignición.** Se debe evitar ignición no controlada por energía residual. Esto se logra aterrizando correctamente el sistema de ignición o sustituyendo la resistencia eléctrica del cable (Bhaskar *et al.*, 2013).

3. **Sistema de inyección.** La inyección de combustible debe darse en el momento del ciclo adecuado. Se puede utilizar un sistema de inyección que permita programar este tiempo de manera que se tenga un período inicial en el que se enfría el sistema por una corriente de aire en la fase inicial de admisión y al final de la inyección. De esta manera también se logra que todo el hidrógeno ingrese a la cámara de combustión y no exista gas remanente en la entrada de combustible cuando la válvula de admisión se cierra. Otra alternativa es utilizar inyección directa durante la etapa de compresión (Bhaskar *et al.*, 2013).

4. **Puntos calientes.** Se busca evitar cualquier punto con temperatura elevada. Se puede lograr con válvulas de escape ventiladas o usando varias válvulas para disminuir la temperatura en cada una de ellas (Bhaskar *et al.*, 2013).

5. **Anillos de pistón y volumen de grietas.** Disminuir el espacio libre en la parte superior de los pistones para prevenir que las llamas de hidrógeno se propaguen (Bhaskar *et al.*, 2013).

6. **Asientos de válvulas e inyectores.** Dada la baja lubricación del hidrógeno, se deben considerar materiales adecuados para los asientos de las válvulas y también el diseño de los inyectores (Bhaskar *et al.*, 2013).

7. **Lubricación.** El aceite lubricante debe ser compatible con una concentración alta de agua (Bhaskar *et al.*, 2013). Se recomienda utilizar aceite sintético como lubricante para evitar la pirolisis que tiene lugar en pequeñas zonas calientes de la cámara de combustión, las cuales pueden provocar pre ignición. Para evitar que el aceite se filtre a la cámara de combustión, se puede colocar recubrimiento de

diamante en los asientos de las válvulas. Controlar la presencia de hidrocarburos en los gases de combustión ayuda a monitorear que exista un buen sellado en el motor (Fàbrega Ramos, 2009).

8. **Ventilación.** Se recomienda ventilación positiva en el cigüeñal para evitar altas temperaturas que dan lugar a puntos calientes (Bhaskar *et al.*, 2013).

9. **Turbulencia en los cilindros.** Dada la alta velocidad de flama del hidrógeno, para aumentar la eficiencia energética se recomienda baja turbulencia en la cámara de combustión (Bhaskar *et al.*, 2013).

10. **Acelerador (estrangulador) electrónico.** En general, los motores de hidrógeno se deben operar con el acelerador totalmente abierto cuando sea posible. Sin embargo, a bajas cargas se debe regular esta válvula para mantener una combustión estable y reducir emisiones de hidrógeno sin quemar. Con cargas medias y altas esto también es importante para reducir la emisión de NO_x . Esto únicamente se puede lograr controlando la apertura de la válvula estranguladora electrónicamente (Bhaskar *et al.*, 2013).

11. **Pre mezcla aire – combustible.** Si la mezcla del aire con el combustible se forma en el carburador, el volumen entre el mismo y la válvula de admisión se llena de la mezcla combustible, la cual tiene un gran potencial para producir retorno de llama. Para solucionar esto se propone realizar una mezcla previa de aire – combustible y alimentarla directamente a la válvula de admisión (Kosar *et al.*, 2011)

L. Diseño

El proceso de diseño de un proyecto en Ingeniería Química se puede dividir en dos fases generales. En la primera fase se incluye la selección del proceso, elaboración de diagramas, selección y especificación del diseño desde el punto de vista de la Ingeniería Química. En la segunda fase de tiene el diseño mecánico del equipo, incluyendo además las consideraciones de la Ingeniería Civil, Estructural y Eléctrica que le acompañen al proceso para cumplir con los requisitos de operación que la Ingeniería Química demande. (Sinnott, 2009)

La primera fase se desarrolla por etapas, cada una agregando más detalle a la anterior. Inicia con la definición de bases de diseño, que incluyen todas las características deseadas del proceso para poder diseñarlo. En este paso se define qué, cómo y cuándo se hará. Desde este punto se define el producto y el proceso a llevar a cabo. Según la naturaleza se pueden detallar distintos estándares que habrán de seguirse. (Peters, Timmerhaus, & West, 2004)

El diseño del proceso se concluye con el diagrama de flujo de proceso, con el que ya se cuenta con balances de masa y energía, operaciones unitarias y los equipos que se requieren. Para alcanzar este punto se inicia con un diagrama de entradas y salidas: un bloque general de proceso en el que se detallan los ingresos que tiene el proceso y todos los productos que genera. Luego se amplía el diagrama para incluir todos los bloques de procesos con sus flujos de entrada y salida para cada etapa. Un último paso antes de trasladar el diagrama a su forma final de diagrama de flujo de proceso se trasladan los bloques de procesos

a operaciones unitarias para identificar apropiadamente el tipo de equipo que se requerirá en cada punto. Hasta este punto los diagramas son todos de bloques, pero una vez finalizados se hace el traslado de bloques a simbología y se genera la base del diagrama de flujo de proceso. (Gutiérrez, 2003)

M. Diagrama de flujo del proceso

Un diagrama de flujo de proceso es la herramienta utilizada en la ingeniería de procesos para mostrar los flujos de materia, operaciones unitarias, equipo necesario e información especial adicional referente a temperaturas y presiones de operación en un proceso químico. En este se emplea simbología estandarizada para representar las etapas del proceso y los equipos que intervienen, aunque existen distintos estándares para definir las figuras a utilizar y cabe la posibilidad que se creen nuevos símbolos si el proceso lo exige. Todo flujo y proceso se encuentra debidamente identificado y se adjunta un resumen de flujos y equipos para poder conocer a qué se refiere cada parte del diagrama. (Peters et al., 2004)

N. Orina

La orina, en humanos, es la sustancia líquida por medio de la cual se expulsan los residuos del procesamiento de los riñones. Contiene una amplia variedad de solutos, dependientes de las condiciones físicas y hábitos del organismo excretor. (Putnam, 1971)

En general se compone cerca del 95% de agua y por esta razón presenta una gravedad específica que oscila entre 1.000 y 1.022. (University of Utah, 2015)

O. Urea

La urea $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ es uno de los principales solutos orgánicos presentes en la orina. En el caso de los humanos puede encontrarse entre concentraciones de 9.3 g/L hasta 23.3 g/L. Aunque la urea puede sintetizarse en un laboratorio, para efectos de este trabajo se obtiene de la producción diaria de orina de los seres humanos, que se estima en un promedio de 1.42 L/cap/día. (Rose, 2015).

P. Almacenamiento de orina

Recolectar y almacenar orina es un proceso que sanitariamente se recomienda se realice en recipientes sellados para evitar cualquier escape de agentes patógenos. Para mitigar aún más el riesgo se sugieren temperaturas de almacenamiento entre los 4 y 20 °C y tiempos de almacenamiento que asciendan de un mes previo a su liberación al ambiente cuando se le utiliza como fertilizante. (Schönning, 2004)

Cuando se almacenan muestras de orina para análisis se tiene especial consideración en la conservación de sus características, especialmente conservación de su composición. Esto debido a la necesidad que existe de transportar o recolectar un número grande de muestras antes de aplicar el estudio

correspondiente. Entre los materiales más efectivos para el almacenamiento y conservación de la orina se encuentran: polietileno, polipropileno, poliestireno, vidrio de borosilicato y vidrio de pedernal. Todos estos materiales han demostrado en estudios la conservación del estado general de la muestra de orina durante 10 días a 22°C. (Subramanian, 1985)

Q. Transporte de orina

La selección de materiales para el transporte de orina debe considerar si el mismo es apropiado para la aplicación, que no sea nocivo para los usuarios en condiciones normales ni que exista riesgo que el material sea liberado parcialmente con el flujo de líquido. (WHO, 2010)

Los materiales más comúnmente utilizados para movilizar agua potable y de desecho por consumo humano son acero galvanizado, hierro, cobre, polibutileno, polivinilcloruro (PVC) y polietileno (PE). Este último tiene la particularidad de ser considerablemente flexible si se obtiene en baja densidad, por lo que aunque no soporta altas presiones, puede utilizarse en sistemas compactos. (WHO, 2010)

R. Polietileno

Polímero conformado de unidades de etileno con la fórmula química $C_{2n}H_{4n+2}$. Presenta alta resistencia a medios básicos provocados por soluciones concentradas de hidróxido de sodio, tanto a temperaturas de 20 °C como 60 °C. (Peacock, 2000)

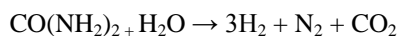
S. Polivinilcloruro

Polímero termoplástico conformado de unidades de cloruro de vinilo con la fórmula química $C_{2n}H_{3n}Cl_n$. Se utiliza ampliamente por su versatilidad en el manejo de distintos materiales y su elevada resistencia química. Soporta temperaturas de operación continua de hasta 65 °C e intermitentes de hasta 80 °C, aunque en este punto comienza a emblandecerse. (Titow, 2012)

T. Electrólisis

La electrólisis es el proceso mediante el cual el paso de corriente eléctrica provoca una reacción química, generalmente provocándose separaciones. La urea puede ser sometida a electrólisis en medios alcalinos conductivos como es el caso de este trabajo, dando como resultado Hidrógeno, Nitrógeno y carbonatos. Teóricamente el voltaje requerido para provocar esta reacción es de 0.37 V, lo cual la sitúa por debajo de los requerimientos energéticos de la electrólisis del agua, de 1.23V. Los electrodos más eficientes para esta reacción son los de níquel. (Boggs, 2009)

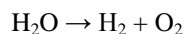
La reacción global para el caso de la electrólisis de urea es como sigue:



Aunque dado el medio básico en el que ocurre la reacción el dióxido de carbono se neutraliza y genera carbonatos. Específicamente se recomienda trabajar con hidróxido de potasio para la preparación de una solución electrolítica, por lo que se forma carbonato de potasio (K_2CO_3). (Boggs, 2009)

La solución electrolítica constituye el medio de transporte de electrones en esta reacción electroquímica, por lo que la adición de una base fuerte proporciona las partículas cargadas que hacen posible la reacción entre ánodo y cátodo. (Boggs, 2009)

La alternativa electrolítica más común para la producción de hidrógeno es la separación del agua en hidrógeno y oxígeno:



Ecuación 9

Como se menciona anteriormente, esta reacción requiere un potencial casi cuatro veces mayor respecto a la demanda de ejecutar la reacción con urea. (Mazloomi, Sulaiman, & Moayedi, 2012)

La demanda energética de una celda electrolítica de agua suele encontrarse en valores cercanos a 4.5-5 kWh/m³ de hidrógeno producido. (Stojić, Marčeta, Sovilj, & Miljanić, 2003)

U. Factores involucrados en la eficiencia de la electrólisis

En desarrollos recientes se ha utilizado líquido iónico en lugar de ácidos y bases fuertes para acondicionar el medio para la transferencia electrónica. En trabajos investigativos se ha mejorado la conversión electrolítica hasta valores del 96% si se utiliza una solución de 1-butil-3-metil-imidazolio-tetrafluoroborato al 10% w/w, un compuesto que sustituye al ácido o la base. En comparación una conversión usual para la electrólisis de agua es del 73% utilizando soluciones básicas al 30% w/w. (Mazloomi *et al.*, 2012)

La presencia de bases o ácidos fuertes en soluciones electrolíticas hacen necesaria la elección de electrodos que puedan soportar el medio propenso a reaccionar. La posible formación de sales, corrosión y deterioro de la superficie de las placas, así como el consumo de los iones en la solución aumentan la resistencia eléctrica del medio y disminuyen con el tiempo la capacidad productiva de la celda. (Zeng & Zhang, 2010)

La temperatura es un factor determinante en la eficiencia de la reacción electroquímica, por lo que se obtienen mejores resultados con celdas a altas temperaturas (superiores a los 100°C). En la práctica se estudian procesos de electrólisis de vapor de agua sobrecalentado como procesos de alta eficiencia. (Hauch, Ebbesen, Jensen, & Mogensen, 2008)

Altas presiones también resultan favorables para los procesos electrolíticos. Se han reportado considerables aumentos en eficiencia cuando una celda es operada a presiones de 70 MPa y simultáneamente a temperaturas de 250 °C. Las condiciones descritas provocan cambios en la energía de Gibbs y la entalpía de la reacción, lo que reduce el voltaje requerido. (Leroy, Bowen, & Leroy, 1980)

Los electrodos deben tener formas que permitan el escape de las burbujas que se formen en su superficie. Estas burbujas limitan el área efectiva del electrodo y en consecuencia reducen la eficiencia de

la celda. En general se recomienda que se fabriquen electrodos con la menor altura posible y se aproveche alargando el ancho, a forma que la columna de líquido por encima de la burbuja sea lo más reducida posible. (Mazloomi *et al.*, 2012)

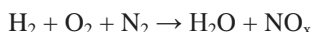
El material del electrodo es determinante para el funcionamiento de la celda. Este se selecciona en función de nivel de actividad, resistencia eléctrica y resistencia a la corrosión. El platino y el oro son los materiales ideales para electrodos, pero los altos precios hacen poco viable su uso. Las alternativas con mejor respuesta son aluminio, níquel y cobalto, los cuales satisfacen las tres características deseadas. (Mazloomi *et al.*, 2012)

Se reportan altos niveles de eficiencia de celda en condiciones de presión entre 1 y 10atm, temperaturas entre 25 °C y 90 °C, electrodos de platino (99.99% de pureza) o níquel (Ni 200) y densidades de corriente de 1 mA/cm² (0.001 A/cm²). El efecto de la presión y temperatura es la disminución del potencial requerido para el funcionamiento de la celda, mientras que la densidad de corriente se limita por las capacidades conductivas de los materiales seleccionados. (Appleby, Crepy, & Jacquelin, 1978)

En la literatura se reportan densidades de corriente para el níquel que alcanzan entre 40 y 50 A/dm² (0.4 – 0.5 A/cm²). (Lee, Wu, Nguyen, & Chuang, 2013)

V. Combustión de Hidrógeno

El hidrógeno en presencia de oxígeno y una chispa lleva a cabo una reacción de combustión. En el proceso de este trabajo que involucra el uso de aire como fuente de oxígeno, se conoce que la reacción también sucede entre el alto contenido de nitrógeno y el oxígeno. La ecuación que describe la reacción que se llevará a cabo en el caso de una combustión de hidrógeno y aire es:



Ecuación 10

Este es el caso esperado en un motor de combustión interna modificado para utilizar hidrógeno como combustible en lugar de gasolina. (Kosar, 2010)

La reacción presenta un valor de calor de combustión de -286 kJ/mol. (White, Steeper, & Lutz, 2006)

La temperatura de los gases de combustión provenientes de un motor que gira a 2600 rpm se acerca a los 225 °C. (Kahmaran, 2015)

W. Motor de combustión interna

Un motor de combustión interna hace uso de la expansión provocada por la reacción química entre un combustible y un agente oxidante. Los motores de gasolina de cuatro tiempos hacen uso de este principio en un proceso cíclico. Estos motores son sencillamente adaptables a utilizar hidrógeno en sustitución de la gasolina como combustible. (Kosar, 2010)

X. Generador eléctrico

Un generador es un equipo que transforma energía mecánica en energía eléctrica por efecto de inducción electromagnética para su posterior uso. Operan haciendo uso de la inducción eléctrica, en la que el campo magnético provoca el flujo de corriente eléctrica cuando el rotor accionado mecánicamente gira rápidamente dentro de una bobina. (Sinnot, 2009)

Usualmente el nombre se le otorga al equipo que se acopla a turbinas de generación, aunque el principio de funcionamiento es idéntico si el eje es accionado por una combustión. Se asocia directamente a la generación de corriente alterna. (U.A.Bakshi & M.V.Bakshi, 2009)

Y. Alternador

Es un equipo cuyo fin es la generación de corriente eléctrica alterna por efecto inductivo, por lo que es un generador eléctrico. Suelen emplearse para la recarga de baterías en sistemas con ejes móviles, como un aprovechamiento adicional del torque generado. Dado que las baterías operan con corriente directa, un alternador requiere la inclusión de un rectificador para transformar la corriente. (U.A.Bakshi & M.V.Bakshi, 2009)

Un rectificador es un aparato eléctrico que convierte corriente alterna y directa. Esta transformación puede realizarse a la onda completa de corriente o solo a su mitad. Para efectos prácticos resulta conveniente la conversión de la onda completa para mantener la potencia. (U.A.Bakshi & M.V.Bakshi, 2009)

Z. Panel solar

Un panel solar es un arreglo bidimensional de celdas fotovoltaicas que transforman la energía del sol, en forma de luz, en energía eléctrica con corriente directa. Esto sucede al aprovechar el efecto fotovoltaico, por medio del cual la absorción de la energía de fotones excita electrones entre las capas de la celda, provocando su movimiento de una capa a otra. El intercambio de posiciones de los electrones dentro de la celda produce diferencias de cargas y con ello corriente eléctrica. Naturalmente la generación por esta vía se encuentra limitada a la disponibilidad e intensidad de la luz solar que puede recibir el panel, así como consideraciones probabilísticas de las colisiones entre los fotones y los electrones. (Boxwell, 2012)

AA. Neutralización de residuos alcalinos

Las aguas residuales alcalinas se tratan por medio de tres alternativas principales: neutralización con ácido sulfúrico, ácido clorhídrico o dióxido de carbono. (Armenante, 2009)

La neutralización con ácido sulfúrico es una de las opciones más viables económicamente, con tiempos de reacción cercanos a los 15-30 minutos y con riesgo de formación de lodos de sulfato de calcio si las aguas contienen iones de calcio disueltos. (Armenante, 2009)

La neutralización con ácido clorhídrico por otra parte resulta una alternativa más costosa, pero más veloz pues sus tiempos de reacción son cercanos a los 5-20 minutos. No existe formación de lodo alguno, aunque sí se genera una neblina corrosiva durante el proceso de reacción. (Armenante, 2009)

Utilizar dióxido de carbono en la neutralización únicamente es una solución cuando se tiene fácil acceso a gases de combustión, de lo contrario el acceso al gas es muy costoso. El gas se burbujea al agua residual que se desea neutralizar, formándose ácido carbónico el cual neutraliza el medio en tiempos alrededor de 1.5-2 minutos. Pueden formarse precipitados de carbonato de calcio si las aguas contienen iones de calcio disueltos. Esta neutralización es favorecida pues se controla de forma más sencilla que con otros ácidos. (Armenante, 2009)

BB. Generación de energía

1. **Energía no convencional.** En general, la generación de energía consiste en transformar algún tipo de energía (química, solar, nuclear, etc.) en energía eléctrica. Hay dos tipos de energía: convencional y renovable. La energía convencional es aquella que se produce a partir de combustibles fósiles como el carbón, gas y petróleo; por otro lado, la energía renovable es aquella que se produce a partir de fuentes naturales inagotables como la luz solar (Sarmiento, 2007).

Según Sarmiento en su libro *Energía Solar en Arquitectura y Construcción*, actualmente la energía más utilizada en el mundo es la energía no convencional. Esta se obtiene a partir de centrales termoeléctricas o nucleares; esta segunda forma de obtener la energía fue desarrollada alrededor de un siglo después de las termoeléctricas y básicamente utilizan el mismo principio pero distinta materia prima. Cuando se habla de energía no convencional se hace la asociación que se utilizan recursos no renovables dado que la materia prima son combustibles fósiles los cuales tomaron años en formarse y son finitos; por ende, estos recursos no pueden generarse a la misma tasa de uso que en la actualidad se está dando. En una central termoeléctrica la energía es liberada en forma de calor a partir de la quema de combustibles fósiles – los cuales son llamados de esta manera porque se les utiliza como tales y a partir de su combustión liberan la energía solar que han acumulado durante años (Joaquim, 1990) – para generar vapor y convertir este en energía eléctrica; entre las principales desventajas de este tipo de energía es la contribución al efecto invernadero y la posible terminación de los recursos primarios para la producción. La contribución al efecto invernadero sucede a raíz de la quema de combustibles fósiles que produce dióxido de carbono; el Cuadro 2 fue extraído del libro *La Ruta de la Energía* por Josep Joaquim y se puede visualizar la cantidad de kilogramos de dióxido de carbono emitido por KWh de energía producido. Por otro lado, una central nuclear obtiene energía a partir de una fisión nuclear que no aporta hacia el efecto invernadero, pero como residuo se obtienen radioactivos que son altamente peligrosos durante miles de años.

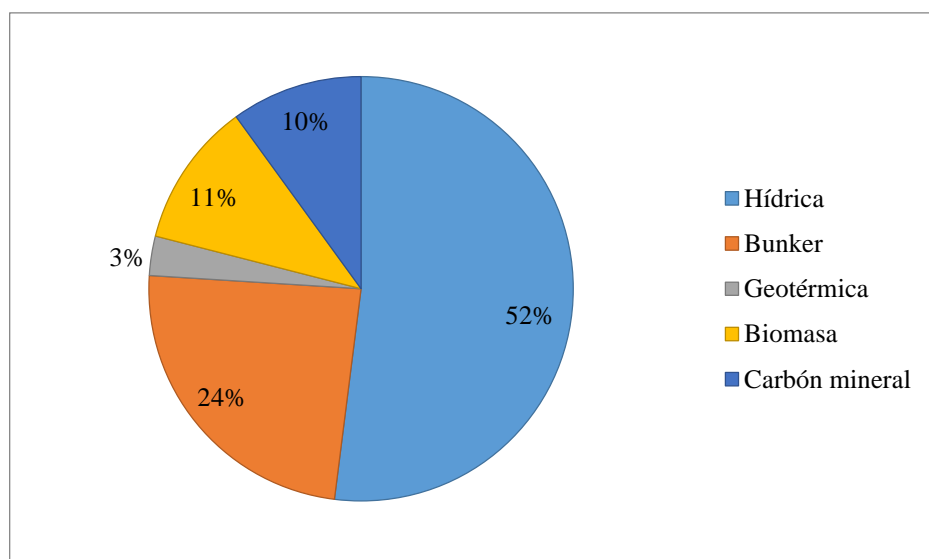
Cuadro 3. Emisión de dióxido de carbono por distintas fuentes de energía convencional

Combustible	Emisión de CO ₂ (kg/KWh)
Gas natural	0.68
Biomasa	0.82
Carbón	1.00

(García, 2013)

2. **Energía renovable.** Con base en la tendencia de mercado de reducir el impacto ambiental tanto de las personas como de las empresas, industrias y todo lo asociado, se genera la nueva forma de energía no convencional o energía renovable, la cual no produce ningún contaminante o efecto en el ambiente. Según Helena García en su trabajo *Análisis de costo beneficio de energías no convencionales en Colombia*, se le llama energía renovable por la fuente natural de donde proviene; es decir, proviene de fuentes inagotables o fuentes cuyo ritmo de producción es mayor al ritmo de uso. Actualmente la generación de energía está sufriendo cambios importantes en donde uno de ellos es reducir el impacto hacia el ambiente; por ende, la generación de energía renovable es de suma importancia para el desarrollo de nuevas formas de energía (Sarmiento, 2007). La siguiente figura muestra las fuentes más comunes de energía en Guatemala:

Figura 7. Fuentes de energía más utilizadas en Guatemala



(Cámara de la Construcción de Guatemala, 2013)

Una de las energías renovables muy comúnmente usada es la energía solar a través de paneles solares. El proceso es simple mediante el cual los paneles concentran la luz solar que reciben y la transforman en

energía eléctrica; las ventajas de ella es que es una energía inagotable y no contamina; sin embargo, es una energía intermitente dado que la luz del sol no está disponible las 24 horas del día (Sarmiento, 2007).

Según la Asociación de generadores con energía renovable en su reporte Energía renovable en Guatemala, una de las principales desventajas de la energía renovable es que su disponibilidad está sujeta a la geografía; es decir, la energía eólica no puede producirse en cualquier parte dado que depende mucho de las corrientes de aire que se generen en los distintos lugares, lo mismo ocurre para las demás energías renovables como al solar o hidráulica. Asimismo, este tipo de energía presenta mucha variabilidad entre hora y hora; la energía solar solo puede producirse durante el día, la energía hidráulica tiene picos en ciertos puntos específicos cuando la marea se encuentra alta. Otra de las desventajas de este tipo de energía es el transporte. A diferencia de los combustibles fósiles, estos recursos deben ser utilizados y transformados en el lugar donde se obtienen.

CC. Generación de energía por medio de la orina

El proceso de generación de energía por medio de la orina se realiza mediante una electrólisis. Según la Enciclopedia Británica, la palabra *electrólisis* proviene del *electro* que significa energía y *lisis* que significa rotura. Este proceso se refiere a la separación de moléculas por medio de la electricidad. Para que funcione adecuadamente, se aplica una corriente eléctrica mediante electrodos conectados a una fuente de energía y sumergidos en una solución de agua para que los iones tengan libertad de movimiento; hay dos electrodos “ánodo” y “cátodo” en donde el primero se conecta al polo positivo y el segundo al polo negativo. Cada electrodo atrae a iones de signo opuesto; es decir, los iones de carga positiva se desplazan hacia el cátodo y los iones de signo negativo se desplazan hacia el ánodo. La energía necesaria para separar los iones es proporcionada por una fuente eléctrica externa (Boggs, 2009).

La orina está compuesta por un 95% de agua, 2% de sales minerales y 3% de elementos orgánicos (Ibacache, 2010). Entre los compuestos orgánicos se encuentra la urea – $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ – dicho elemento junto con el amonio son los principales para la posible generación de energía.

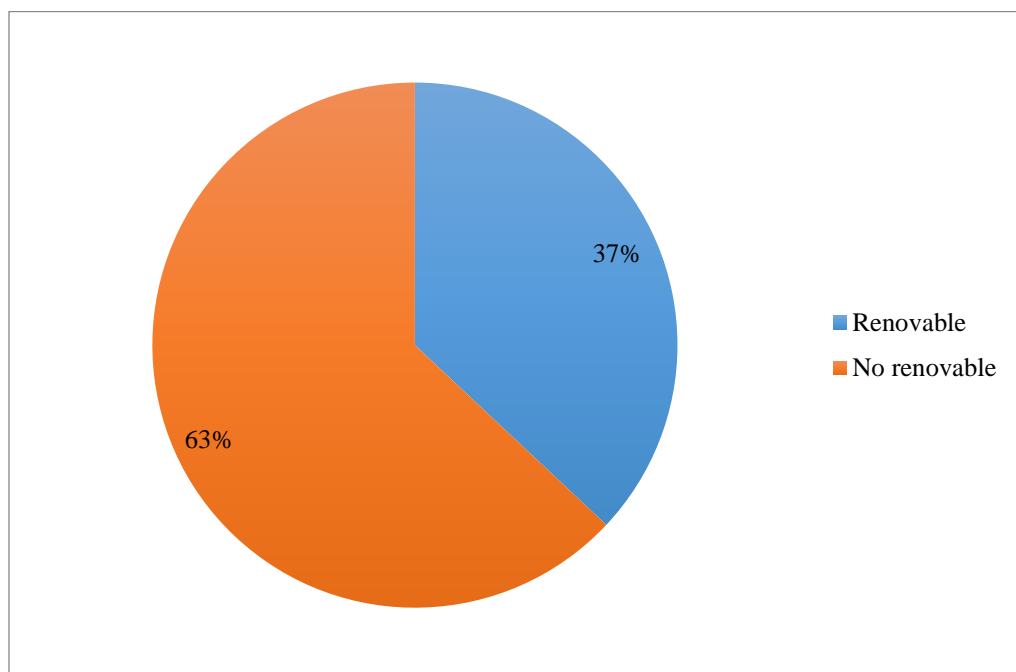
El estudio se llevó a cabo en la Universidad de Ohio por la profesora Gerardine Botte en donde se sostiene que es posible convertir la orina en combustible de hidrógeno. En una publicación para la revista *Conservation Magazine* se sostiene que el proceso funciona muy similar a la electrólisis de agua en donde se le aplica corriente a los electrodos para lograr una separación de moléculas; sin embargo, la urea y el amonio mantienen los átomos de hidrógeno menos fuerte que el agua lo que provoca que se necesite menos energía para separarlos. El producto de la esta electrólisis es agua, nitrógeno e hidrógeno (Prevish, 2011). La profesora, Gerardine Botte, logró calcular que un edificio con 200 – 300 empleados logrará producir 2 kilowatts de potencia; en un futuro este tipo de energía podría servir para alimentar lugares donde grandes cantidades de personas se mantengan como edificios, estadios, centros comerciales, entre otros (Machol, 2011).

DD. Tendencias en el mercado de la electricidad

Actualmente, la energía es un recurso vital para el día a día de una persona; la demanda de la misma aumenta año con año causa del crecimiento demográfico mundial. La electricidad es un elemento indispensable para las personas que ha permitido que la calidad de vida mejore. El crecimiento de la población, desarrollo de la sociedad, urbanización y la accesibilidad a la tecnología ha producido que la demanda de energía eléctrica presente una tendencia creciente. Se han registrado incrementos relevantes en el consumo de energía mundial; se pronostica que para el 2030 el consumo energético aumente del 46% al 58% (Sarmiento, 2007). Además de la importancia de contar con electricidad y el aumento del consumo de esta, también es importante tomar en cuenta que el uso de la anterior produce efectos secundarios o consecuencias que repercuten en la contaminación ambiental.

La mayor parte de la energía consumida es generada a partir de fuentes no renovables como el carbón, petróleo y gas; los también conocidos como combustibles fósiles. Alrededor de un 13% de la energía consumida mundialmente es generada por medio de fuentes no renovables o convencionales. Guatemala, como lo muestra la siguiente gráfica obtenida de la Asociación Bancaria de Guatemala, cuenta con un 63% de energía no renovable y un 37% de energía renovable, de la cual un 50% de ella proviene de la energía hidráulica. Dicha energía es la que se aprovecha de la energía cinética y potencial del movimiento del agua.

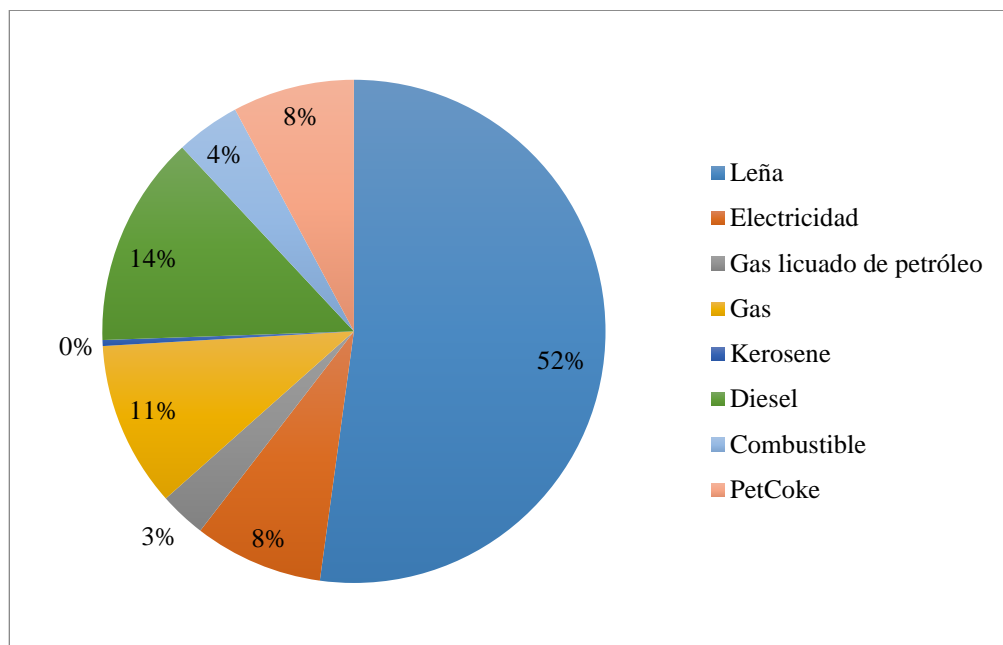
Figura 8. Distribución de la energía en Guatemala



(Asociación Bancaria de Guatemala, 2015)

En Guatemala, la leña obtiene el primer lugar en el consumo energético con un 52%, en segundo y tercer lugar se encuentra el diesel y la gasolina para el transporte con 14% y 11% respectivamente y en cuarto lugar la electricidad con 8%. El 52% que viene representando el consumo energético mediante la leña en Guatemala establece que se utiliza para la cocción de alimentos, dado que la mayor parte de la población vive en el área rural y en su mayoría son de escasos recursos, lo que provoca que las personas utilizando este método respiren gases tóxicos que causa cáncer en los pulmones y según estadísticas de la ONU, este cáncer llega a matar a alrededor 2 billones de personas anualmente alrededor del mundo.

Figura 9. Consumo energético en Guatemala



(Ministerio de Energía y Minas, 2014)

Así como se mencionó anteriormente el desarrollo de la sociedad, urbanización y el aumento del acceso a electricidad ha hecho que la demanda o el consumo energético tengan una tendencia creciente. Con el objetivo de mejorar la eficiencia energética y aumentar la participación de la energía renovable en la matriz energética mundial la ONU designó en el año 2012, el año de las energías renovables. La eficiencia energética es la relación entre la cantidad de energía consumida y los resultados obtenidos. Esta es importante porque es el consumo inteligente de los recursos disponibles; todo este tipo de recursos es finito entre ellas, la energía. Con la eficiencia energética se es capaz de reducir el valor de la factura eléctrica a corto plazo. Asimismo, ser eficientemente energético no significa reducir la calidad de vida de las personas; simplemente, es administrar los recursos de una mejor manera para poder sacar el mayor provecho de ellos.

EE. Sectores de consumo eléctrico

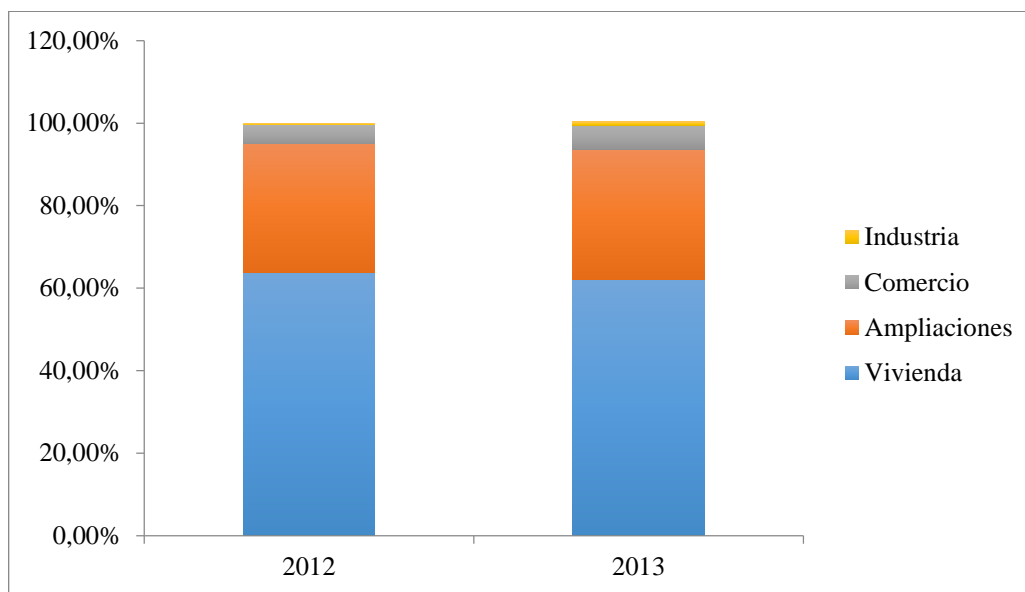
De acuerdo a Kotler en su libro *Fundamentos del Marketing*, desde el punto de vista de mercadeo, el mercado está formado por todos los consumidores o compradores potenciales de un producto. Todos los integrantes de un mercado deben de poseer las siguientes tres características: deseo, renta y posibilidad de acceder al producto. Existen diversos mercados en los que se puede incursionar para la aplicación del sistema de generación de energía a partir de la orina. Entre los más atractivos se encuentran los centros comerciales, escuelas y los edificios por la concentración de personas con la que cuentan estas instituciones.

Por ejemplo, actualmente según el ministerio de educación hay 495 escuelas públicas en toda Guatemala. Según la IEA (International Energy Agency) por sus siglas en inglés, los edificios son consumidores más grandes de energía en el mundo y asimismo, se vuelven un sector relevante en la producción de CO₂. Los anteriores requieren del 40% del consumo total de energía en el mundo y son productores del 24% de CO₂. Se espera que exista un incremento en la población mundial para el 2050 de 2.5 billones de personas y con las mejoras tecnológicas que se viven día a día se espera que el consumo energético en los edificios aumente (IEA, 2013).

Si no se toma ninguna acción para mejorar la eficiencia energética en los edificios, se espera que el consumo de energía suba un 50% para 2050 (IEA, 2013). La forma de mejorar dicha eficiencia puede ser utilizando productos con un mayor rendimiento como por ejemplo: ventanas de alto rendimiento, calentadores y paneles solares, estufas eficientes, entre otros.

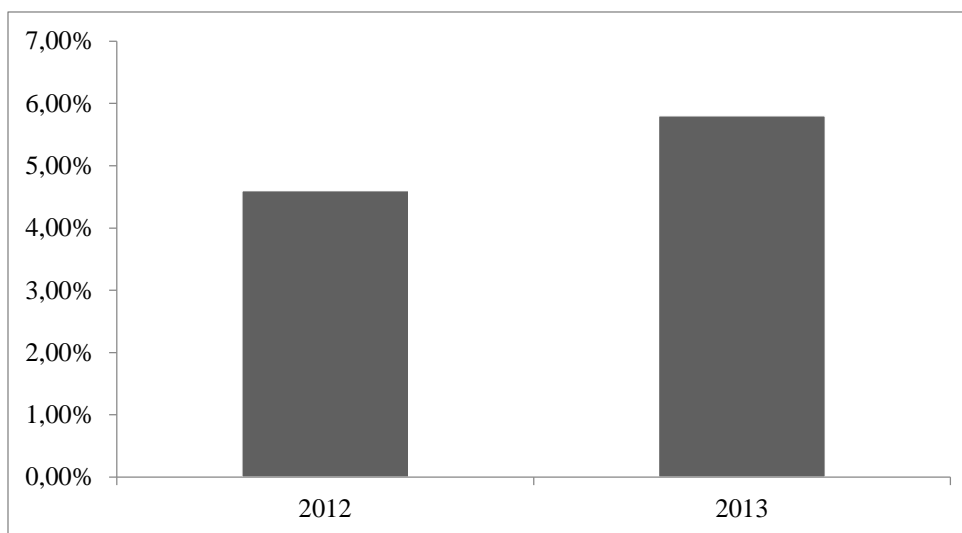
En cuanto a edificios en Guatemala, según la Asociación Bancaria de Guatemala, durante los primeros tres meses del año 2013 se autorizaron 1977 licencias de construcción. Del total de licencias de construcción del año 2012 el 63.9% correspondió a vivienda, 31.1% ampliaciones, 4.6% comercio y 0.3% a la industria. Para el año 2013, el 62% corresponde a vivienda, 31.70% ampliaciones, 5.8% comercio y 0.5% a la industria. La siguiente gráfica muestra los porcentajes establecidos, en donde se puede ver claramente que el área de vivienda es la que más porcentaje ocupa; esto se debe a que en el área urbana del país de Guatemala cada día es más reducido por lo que la tendencia de vivir en apartamentos aumenta.

Figura 10. Construcciones por sector de la industria



(Gráfica elaborada a partir de datos de la Asociación Bancaria de Guatemala)

Figura 11. Construcciones en el sector de comercio en Guatemala



(Gráfica elaborada a partir de datos de la Asociación Bancaria de Guatemala)

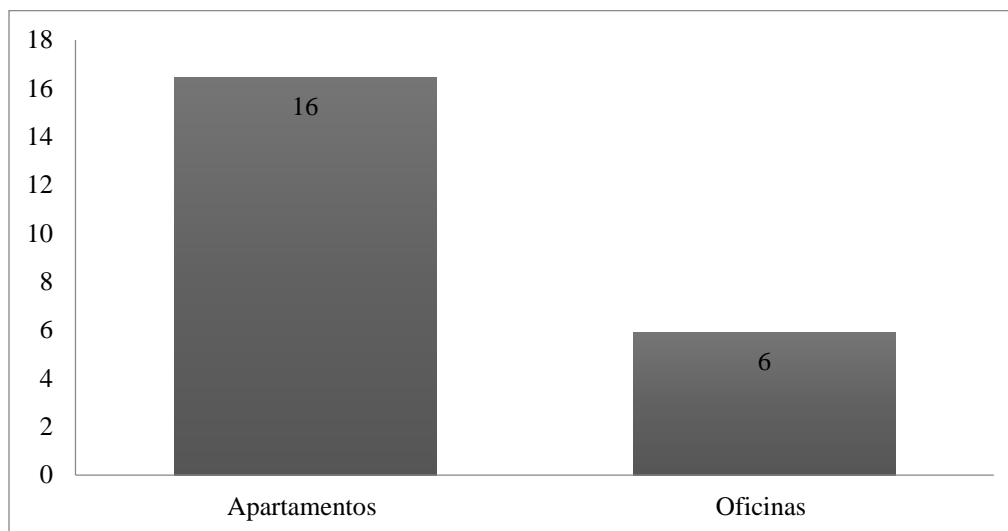
La Figura 11 muestra un alza en la tendencia de construcciones del comercio en Guatemala; del 2012 – 2013 las construcciones en el comercio aumentaron del 4.60% a 5.80% específicamente. Por lo tanto tomar en cuenta la industria del comercio como un cliente es viable dado que muestra crecimiento.

La tendencia de construcción de edificios nuevos viene siendo como lo establece el siguiente cuadro:

Cuadro 4. . Oferta de edificios de apartamentos y oficinas por mes en la ciudad de Guatemala

	Apartamentos	Oficinas
Enero 2015	21	7
Febrero 2015	14	8
Marzo 2015	23	5
Abril 2015	14	7
Mayo 2015	22	5
Junio 2015	11	3
Julio 2015	13	5
Agosto 2015	15	7
Septiembre 2015	15	6

Figura 1. Promedio de oferta de edificios de apartamentos y oficinas en la ciudad de Guatemala



No existe un retroceso en el desarrollo en el sector de construcción puesto que cada vez hay más habitantes lo que provoca que se necesiten más viviendas e infraestructura dentro de la ciudad. Según la Asociación Bancaria de Guatemala los proyectos de edificios comerciales y residenciales están tomando mucho auge en donde se les da importancia a temas como la energía, recursos naturales, transporte, comunicación, tecnología, entre otros. Según la Asociación Bancaria de Guatemala, en 1950 la población

urbana era de 0.9 millones de habitantes, lo que hacía un 33% de la población rural; para el 2011 la población tanto rural como urbana era aproximadamente 7.4 millones de habitantes y para el 2020 se espera que la población urbana rebase a la población rural llegando a 9.9 millones contra 8.4 millones de habitantes en lo rural. En las gráficas anteriores se puede observar la tendencia confirmada de que la población en el área urbana ha ido aumentando dado que la oferta de edificios de apartamentos es mayor a la de los edificios de oficinas. Asimismo, muy levemente, se puede observar en los últimos meses la tendencia de aumento de la oferta de edificios de apartamentos.

FF. Clasificación de costos

Como primer punto, se debe definir qué son los costos. Los costos son el valor de los recursos materiales, financieros y humanos empleados en la producción de un elemento (González, 2008). Existen los llamados costos fijos y variables. Los fijos son aquellos que son independientes de la producción como lo salarios, renta, depreciación; por otro lado, los costos variables son aquellos que dependen del tamaño de la producción como los materiales utilizados para la elaboración de la unidad. En este trabajo se estará analizando los costos de investigación y desarrollo como los costos de producción.

1. **Costos de investigación y desarrollo.** Las funciones de investigación y desarrollo son investigar y explorar en el ambiente científico para la identificación de nuevos productos, técnicas, procesos o mejoras con el objetivo de mejorar la posición económica de una empresa u organización (Rubén, 2012). Es de suma importancia poner la debida atención a los costos de Investigación y Desarrollo dado que en algunas organizaciones representan un porcentaje mayor al de otros departamentos como la producción, comercialización, entre otros; por eso mismo existen las llamadas patentes cuyo objetivo es darle tiempo a una organización para que recupere la inversión que se realizó en la investigación y desarrollo del producto.

Las actividades de investigación son creativas e innovadoras con el fin de poderlas aplicar en algún producto o servicio y volverlo más innovador y tecnológico. Por otro lado, las actividades de desarrollo son el siguiente paso luego de la investigación. Con las actividades de desarrollo se aplica todo lo investigado a nuevos productos, servicios, procesos, tecnologías o bien, mejoras de los mismos. Se pretende materializar los resultados de la investigación a diseño, planos, prototipos, modelos, entre otros (Rubén, 2012).

Dentro de los costos de investigación y desarrollo, existen los llamados costos por naturaleza que incluye el costo de personal, materiales y servicios consumidos, depreciaciones, costos de soporte y otros. Dentro del primer rubro se puede incluir los sueldos y todo aquel costo involucrado con el personal; en el siguiente, todo aquel material o servicio mediante el cual se hizo outsourcing; seguido de las depreciaciones respectivas de todos los materiales utilizados; los costos de soporte involucra todo lo que se utiliza externo a la empresa es decir, instalaciones alquiladas, tareas administrativas, entre otros; por

último, se encuentran todos aquellos costos que ayudarán a proteger y comercializar el producto como patentes y registro del mismo.

2. **Costos de producción.** Los costos de producción o también conocidos como los costos de operación son el conjunto de bienes y esfuerzos que se combinan para obtener un producto o dar un servicio y entregarlo al sector comercial; un incremento en ellos implica, generalmente, una disminución en los beneficios. Es sumamente importante analizar este tipo de costos para poder eliminar o disminuir en cantidad el monto de estos para poder aumentar el margen de ganancia. Dentro de los costos mas importantes se encuentran los: fijos, variables y marginales.

Los costos fijos y variables ya se han explicado anteriormente sin embargo, los costos marginales son aquellos necesarios para producir una unidad más. En este trabajo, no se clasificarán los costos solo se analizarán para la producción de un sistema de generación de energía por medio de orina dado que se deben tener los costos ya concretos para saber realmente cuales son los fijos, variables y determinar un análisis profundo de los mismos por lo que esos costos quedan a un futuro análisis.

GG. Evaluación financiera

Para una evaluación financiera, se utilizó el sistema de análisis de costo – beneficio. El análisis de costo – beneficio es una herramienta que relaciona los costos de un proyecto con los beneficios del mismo. Su objetivo es ver si el flujo de beneficios que va a producir un proyecto supera significativamente los costos que el mismo va a producir; estos costos y beneficios generalmente están cuantificados en la misma unidad y siempre es la unidad monetaria. Sin embargo, que los beneficios estén cuantificados en una unidad monetaria no significa que ellos vayan a representar un flujo visible de efectivo. Es decir, generalmente los beneficios pueden ser en cuanto a seguridad, reducción de pobreza, aumento en la calidad de vida, entre otros pero ellos no van a producir una cantidad monetaria o no van a producir un ahorro, pero dichos beneficios deben ser costeados para lograr una comparación efectiva entre el costo y los anteriores.

Una forma de expresar el análisis de costo beneficio, así como lo expresa Guillem López en su artículo El análisis de coste beneficio y la toma de decisiones publicado en el 2013, es el siguiente: a mayor potencia, mayor exigencia.

En un análisis de costo – beneficio es importante tomar en cuenta los siguientes dos aspectos:

Costos: todos aquellos gastos en los que se va a incurrir por construcción, operación o mantenimiento del proyecto

Beneficios: ventajas experimentadas por los usuarios

Para calcular el ratio de este análisis se utiliza la siguiente ecuación:

$$B/C = \frac{\textit{beneficios}}{\textit{costos}}$$

Ecuación 11

Es importante que para poder realizar el análisis de costo – beneficio correctamente, se deben expresar todos los términos en la misma medida; en este caso, una unidad monetaria. La idea básica del análisis de costo – beneficio es que nunca importa que tan buena o eficiente sea el proyecto, estos nunca son gratis.

Los resultados de este análisis indican que si la solución al problema es más cara que el costo del problema, la solución no debe ser implementada porque no sería rentable.

V. ANTECEDENTES

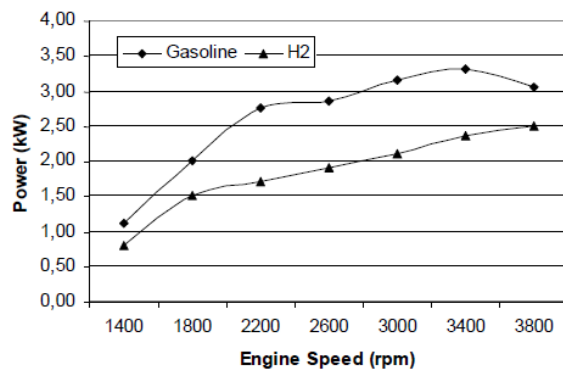
Se han realizado distintos estudios relacionados a motores de combustión utilizando hidrógeno como combustible. A continuación se mencionan algunos de los más relevantes y sus principales hallazgos. Kosar, *et al.* utilizaron un motor Datsu LT200 con las siguientes especificaciones:

Cuadro 5. Especificaciones del motor de prueba utilizado por Kosar *et al.*, 2011

Especificación	DATSU LT 200
Tipo de motor	Cuatro tiempos
Calibre (mm)	68
Carrera (mm)	54
Radio de compresión	8.5:1
Sistema de combustible	Carburado
Sistema de enfriamiento	Aire

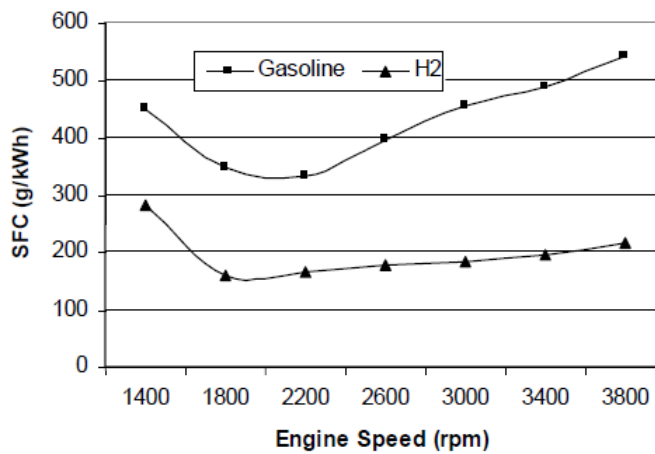
Dentro de las modificaciones realizadas al motor, adaptaron una tubería de cobre al manifold de entrada como se muestra en la Figura 14. De esta forma el gas se alimenta directamente al puerto de entrada, y no tiene tiempo para propagarse hacia atrás y provocar retorno de llama. También se utilizó un ventilador externo para mantener la temperatura alrededor de 90°C. Al realizar pruebas, tanto con gasolina como con hidrógeno, se obtuvieron resultados para la potencia, el consumo específico de combustible (57% menos que para gasolina) y las emisiones generadas. Los resultados se muestran en la Figura 12 y 13. Se probaron varias relaciones de exceso de aire, encontrando los mejores resultados con un exceso de 1.5 a 2200 rpm. Bajo estas condiciones no se observó retorno de llama ni golpeteo. El problema del retorno de llama se resolvió al utilizar una mezcla pobre en combustible y alimentarla detrás de la válvula de alimentación (Kosar *et al.*, 2011).

Figura 12. Potencia obtenida versus velocidad del motor para el motor DATSU LT 2000



(Kosar *et al.*, 2011)

Figura 13. Consumo específico de combustible para gasolina e hidrógeno versus velocidad del motor DATSU LT 2000



(Kosar *et al.*, 2011)

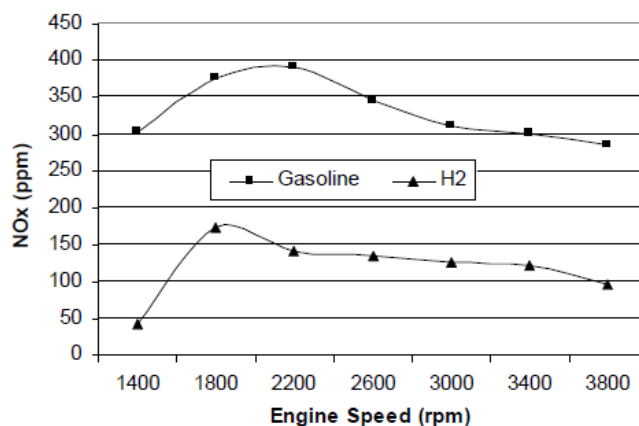
Figura 14. Modificación para ingreso de hidrógeno al motor



(Kosar *et al.*, 2011)

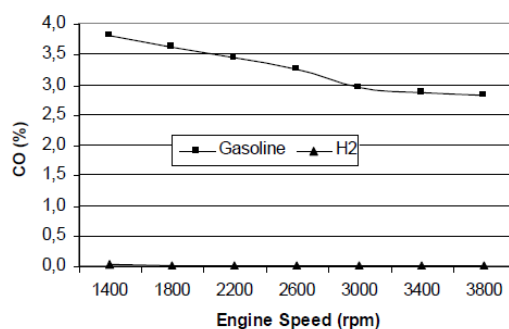
Se encontró que la potencia obtenida mientras el motor opera con hidrógeno es un 24% menor a la obtenida con gasolina. También, se observó que el consumo específico es menor para el hidrógeno que para la gasolina (Kosar *et al.*, 2011).

También se estudiaron las emisiones, comparando los resultados de usar gasolina o hidrógeno como combustible. Los resultados para los NO_x se muestran en la Figura 15. Se encontró que al utilizar hidrógeno se producen un 66% de estas emisiones en comparación con gasolina. Respecto a las emisiones de CO y CO_2 , son casi nulas al usar hidrógeno como se muestra en la Figura 16 y 17. Estas pequeñas concentraciones provienen de la pequeña capa de aceite lubricante que se forma en las paredes del cilindro. Para las emisiones de hidrocarburos, se encontró un comportamiento similar al anterior como se aprecia en la Figura 18. En este caso la pequeña concentración de emisiones proviene del aceite lubricante que se evapora y pasa a la cámara de combustión (Kosar *et al.*, 2011).

Figura 15. Efecto de usar gasolina o hidrógeno sobre las emisiones de NO_x del motor DATSU LT 2000

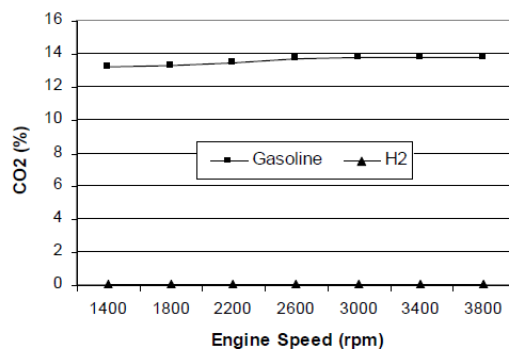
(Kosar *et al.*, 2011)

Figura 16. Efecto de usar gasolina o hidrógeno sobre las emisiones de CO del motor DATSU LT 2000



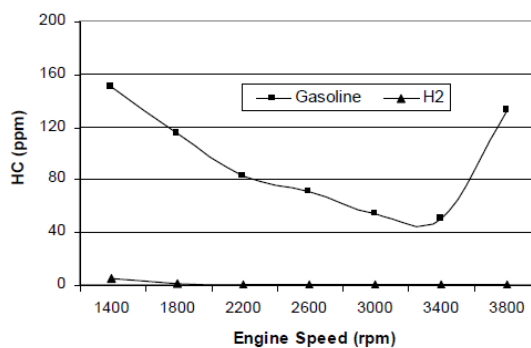
(Kosar *et al.*, 2011)

Figura 17. Efecto de usar gasolina o hidrógeno sobre las emisiones de CO₂ del motor DATSU LT 2000



(Kosar *et al.*, 2011)

Figura 18. Efecto de usar gasolina o hidrógeno sobre las emisiones de hidrocarburos del motor DATSU LT 2000



(Kosar *et al.*, 2011)

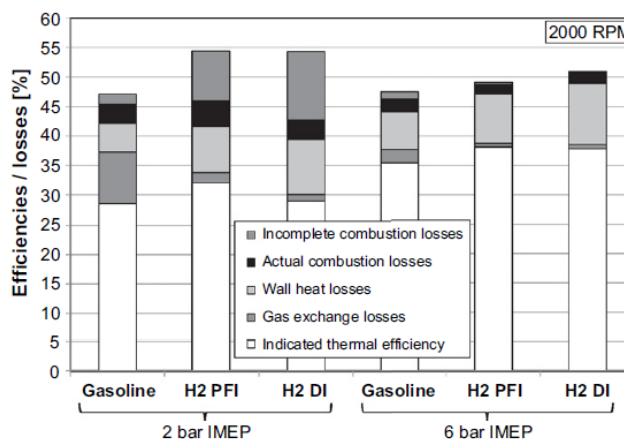
Yvon y Lorenzoni adaptaron el motor de una cortadora de grama de 80cm³ para poder utilizar hidrógeno como combustible. Estudiaron su funcionamiento a lo largo de 14 años, utilizando tanques de hidruros en estado sólido como reservorio de hidrógeno. A la salida de los mismos colocaron una válvula

de aguja que permite regular el flujo de gas. Cuantificaron los gases de combustión, obteniendo concentraciones de 0.3 ppm de NO y 1.6 ppm de NO₂. Reportaron una disminución en la emisión de ruido en comparación a la operación utilizando gasolina. Establecen que ocurre retorno de llama bajo ciertas circunstancias como humedad en el aire o cantidad insuficiente del mismo. Ajustaron la válvula que regula la entrada de aire al máximo. La presión de hidrógeno utilizada se encuentra en un rango de 2-3 bar para un correcto funcionamiento. Estimaron la pérdida de potencia en 20% (Yvon & Lorenzoni, 2006).

White *et al.* realizaron una revisión de los estudios más recientes relacionados con el tema. Dentro de los motores que funcionan con hidrógeno gaseoso, presentan dos alternativas. La primera es aumentar la presión de aire que ingresa para aumentar la potencia. Esto se logra pues al aumentar la presión de la mezcla, se alcanzan mayores relaciones de potencia / densidad, comparables a la operación del motor cuando se utiliza gasolina. La segunda alternativa presentada es la inyección directa de hidrógeno, en la que el gas se inyecta luego de que la válvula de admisión se cierra. La ventaja de esta es su alta eficiencia volumétrica y que se evita la pre ignición. La dificultad de esta propuesta se encuentra en que el tiempo para que se forme la mezcla aire – hidrógeno es muy reducido (White *et al.*, 2006).

Verhelst y Wallner publicaron una recopilación de varios avances realizados respecto a la utilización de hidrógeno como combustible. En la Figura 19 se muestra una comparación de las pérdidas en relación a la eficiencia teórica cuando se utiliza gasolina, en comparación a hidrógeno cuando es inyectado en puerto o directamente (PFI o DI, respectivamente). Esta fue obtenida de un motor de prueba de un solo cilindro, operando a 2000 rpm a dos distintas presiones medias efectivas (IMEP por sus siglas en inglés).

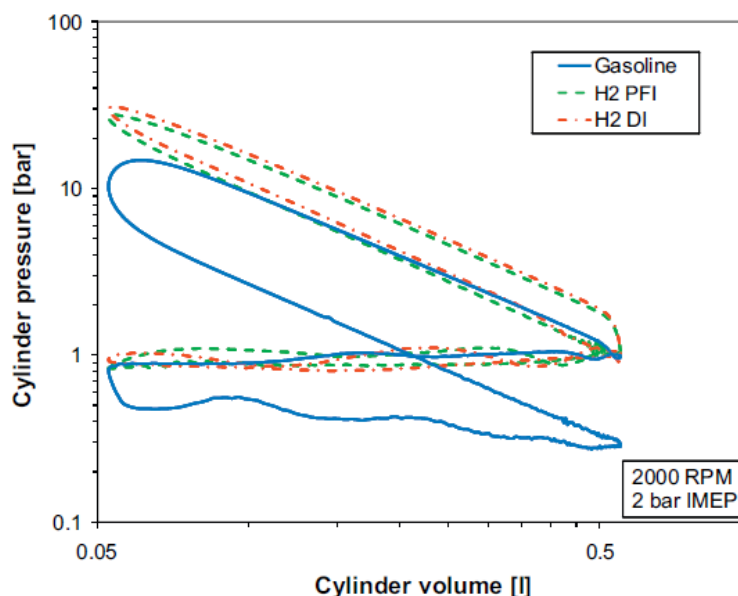
Figura 19 .Análisis de pérdidas en comparación al ciclo teórico: gasolina vrs. hidrógeno



(Verhelst & Wallner, 2009)

Adicionalmente, reportan el comportamiento de la presión dentro del cilindro en función del volumen, como se muestra en la Figura 20.

Figura 20. Presión versus volumen para IMEP de 2 bar para gasolina, hidrógeno PFI y DI



(Verhelst & Wallner, 2009)

Bhaskar *et al.* establecen que el desarrollo de los motores de combustión de hidrógeno ha tenido cuatro generaciones. A continuación se describen las principales características en cada una de ellas (Bhaskar *et al.*, 2013).

A. Primera generación

Se utilizaron motores carburados en los que la mezcla combustible se encuentra en el manifold de entrada. De esta forma, el retorno de llama se evita utilizando mezclas de combustibles pobres ($\lambda \geq 2$), lo cual conlleva una menor potencia entregada (Bhaskar *et al.*, 2013).

B. Segunda generación

Los motores de segunda generación utilizan inyección secuencial en varios puntos y control electrónico del motor. De esta forma se inyecta el hidrógeno después de que el aire ya ha entrado y enfriado la cámara de combustión. Incluso con este sistema no es posible utilizar mezclas estequiométricas y también hay una disminución en la potencia entregada (Bhaskar *et al.*, 2013).

C. Tercera generación

Para los motores de tercera generación, se utilizan mezclas estequiométricas y altas cargas. Para evitar el retorno de llama se recirculan los gases de combustión. También se puede usar un catalizador para

disminuir las emisiones de NO_x . Utilizando turbo y enfriamiento se logra obtener la misma potencia que al utilizar gasolina (Bhaskar *et al.*, 2013).

D. Cuarta generación.

Los motores de cuarta generación se encuentran actualmente bajo investigación, utilizando inyección directa de hidrógeno (Bhaskar *et al.*, 2013).

VI. METODOLOGÍA

Se construyó un banco de pruebas en el que se adaptó el motor Honda GX-120 para utilizar una mezcla de hidrógeno y aire como combustible. La configuración inicial del sistema se muestra en la Figura 21. Posteriormente se modificó esta configuración hasta obtener pruebas exitosas, eliminando la línea de ingreso de aire como se muestra en la Figura 22. Las especificaciones de los componentes se encuentran en los Cuadros 6, 7 y 8.

Figura 21. Diseño del banco de pruebas utilizado para la obtención de resultados experimentales

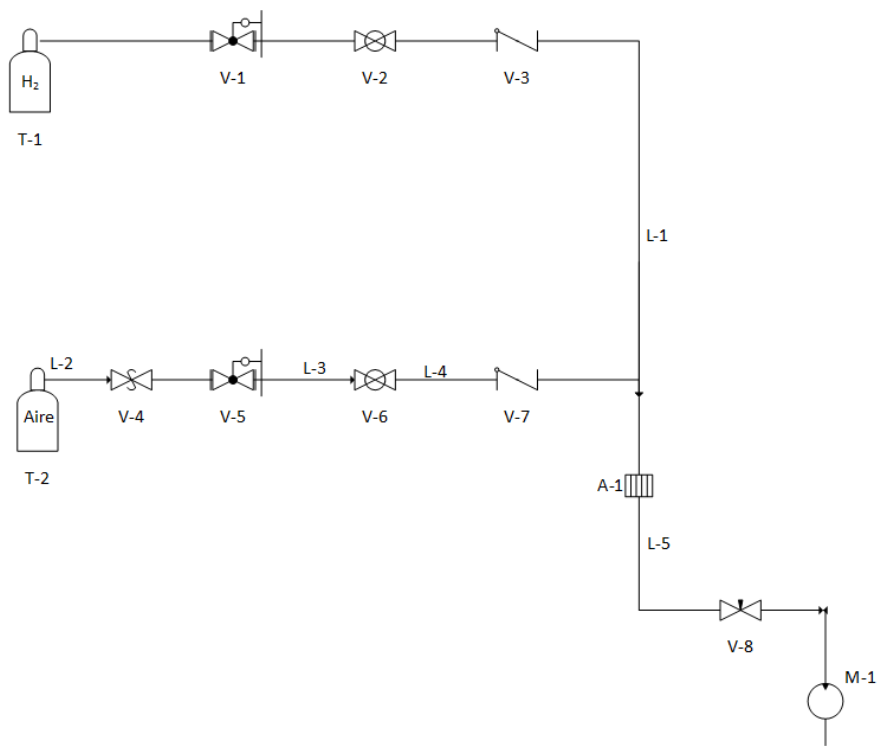
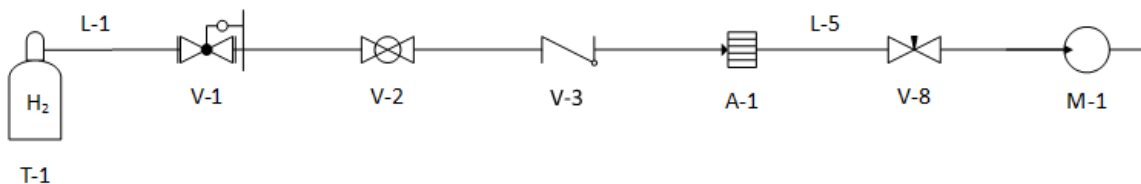


Figura 22. Diseño del banco de pruebas utilizado para la obtención de resultados experimentales exitosos.



Cuadro 6. Especificaciones de las líneas de flujo utilizadas en el banco de pruebas.

Código	Descripción	Tamaño	Marca	Especificaciones
L-1	Línea de hidrógeno	1/4"	BOSTON - FLEX	7192250-300 X 300 psi
L-2	Línea de aire 1	1/8"	S/M	S/E
L-3	Línea de aire 2	1/4"	S/M	PVC Type 28/H27504 1D 2SP X 250 psi
L-4	Línea de aire 3	1/4"	S/M	IC PVC NSF - 51 KTM 140909
L-5	Línea de mezcla	3/8"	S/M	KTM130222

Cuadro 7. Especificaciones de los equipos utilizados en el banco de pruebas.

Código	Descripción	Marca	Especificaciones
T-1	Tanque de almacenaje de hidrógeno	HIGHLAND	Metal Hydride Tank NO. MH300-1-SS-1113
	Tanque principal de hidrógeno	Productos del aire	Hidrógeno UHP 5, 96.8 L a 2,000 psi
T-2	Botella 2L	Coca Cola	S/E
A-1	Arrestador de flama	WITT	F100-17N-ES 17 bar
M-1	Motor de combustión interna	HONDA	GX-120

Cuadro 8. Especificaciones de las válvulas utilizadas en el banco de pruebas.

Código	Descripción	Tamaño	Marca	Material	Especificaciones
V-1	Válvula reguladora de presión	1/4"	HONGYE	Bronce	Entrada 0-230 psi, salida 0-23 psi
V-2	Válvula de bola	3/8"	SENA	Acero inoxidable	DN 10, PN 30
V-3	Válvula de cheque	1/4"	TOYO	Bronce	125-2, 200 WOG
V-4	Válvula de alivio	1/4"	TOOLCRAFT	Bronce	Rango de 0-100 psi
V-5	Válvula reguladora de presión	1/4"	S/M	Bronce	Rango 0-200 psi, 1 paso
V-6	Válvula de bola	3/8"	TOYO	Bronce	5044A
V-7	Válvula de cheque	1/4"	APOLLO	Acero inoxidable	J M 125-S, 400-CWP
V-8	Válvula de aguja	1/4"	PN32	Bronce	Crane D-71

Los datos de los principales instrumentos de medición utilizados se muestran en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Especificaciones de los instrumentos de medición utilizados.

Descripción	Marca	Modelo	Rango
Termómetro láser	OAKTON	Mini infraPro 4	-18 – 400 °C
Tacómetro láser	EXTECH	461920	2 – 99,999 rpm
Cámara termográfica	FLUKE	Ti10	-25 – 125 °C

Las consideraciones a tomar en cuenta para lograr el arranque del motor Honda GX-120 se muestran en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Consideraciones de operación para lograr el arranque del motor Honda GX-120

Consideraciones
<p>Verificar que no haya hidrógeno residual sin reaccionar dentro de la cámara de combustión</p> <p>Abrir la válvula del acelerador al máximo</p> <p>Abrir la válvula de entrada de aire al máximo</p> <p>Abrir la válvula de aguja dos vueltas</p> <p>Al alimentar el hidrógeno, aumentar la presión de ingreso por un instante y posteriormente reducirla a un valor alrededor de 5psi simulando el efecto de la aceleración</p>

El proceso de diseño inició con la elaboración del diagrama de bloques de entradas y salidas, luego los diagramas de bloques de procesos y operaciones unitarias que facilitaron la preparación de un balance de masa y energía. Finalmente se establece el proceso y equipos necesarios en el diagrama de flujo de proceso.

El balance de masa y energía se planteó apoyado en una base de cálculo de tiempo de operación deseado y un flujo de hidrógeno de 0.315 g/h, estimado requerido para que el motor de combustión interna opere a su potencia y revoluciones nominales.

Con este flujo de hidrógeno quemándose en el motor se generan 1.8 kW de potencia mecánica en el eje al que se le acoplan tres pares de fajas y poleas. Se determinó en el módulo encargado de la electromecánica que esta operación haría posible que el generador entregue 1.2 kW de potencia y dos alternadores entreguen 1.62 kW de energía cada uno.

Para elaborar los cálculos y diseños de equipo se utilizó la producción de 0.315 g/h de hidrógeno para calcular la cantidad de orina requerida, masa de electrolito a utilizar, demanda de potencia eléctrica de la celda electrolítica y productos de reacciones.

La distribución de equipo se desarrolló a partir del orden presentado en el diagrama de flujo de proceso acomodando los componentes de la unidad para la operación accionada por gravedad.

Los requerimientos técnicos de la unidad de generación de energía se recopilaron por módulo o área de proyecto; solo se recopilaron de tres áreas: celda electrolítica, motor y la automatización del sistema. Esto se debe a que las otras tres áreas no presentaban requerimientos técnicos. El área que involucraba el estudio de la urea se concentró en determinar el tiempo de vida de ella y otras características que no establecían requerimientos para la unidad. Tanto el área de diseño como el área administrativa del proyecto no aportaron a los requerimientos de la unidad pero si los utilizaron para llevar a cabo sus resultados.

Para la recopilación de estos requerimientos se establecieron reuniones con cada encargado de las distintas áreas del megaproyecto y se enumeraron los requerimientos técnicos correspondientes. Asimismo, se estableció el porqué de cada uno de los requerimientos.

Para identificar los motivadores de compra de los clientes potenciales primero, se determinó que tipos de clientes eran los más atractivos para la unidad de generación de energía. El siguiente Cuadro muestra los tres tipos de clientes que se identificaron:

Cuadro 11. Descripción de clientes seleccionados

Cliente	Descripción	Tipo
Desarrolladores de proyectos de construcción	Desarrollan proyectos de edificios, casas, centros comerciales, condominios, etc. Básicamente desarrolladores de proyectos donde vaya a haber gran concentración de personas	<i>Plataformas múltiples</i> porque me interesa que los desarrolladores de proyectos entiendan los beneficios y por qué implementarlo al igual que el comprador del edificio, dueño y usuario.
Casas particulares	Personas individuales que sientan compromiso con el ambiente y la sociedad	<i>Mercado masivo</i> porque es poca la diferencia que existe entre las personas que van a querer mi producto; básicamente la unidad va a tener la mismas medidas y capacidad, varía muy poco.
Sector público	Específicamente escuelas en la ciudad de Guatemala	<i>Segmentado</i> porque no todas las escuelas son iguales, algunas tienen mayor capacidad y otras menor. Las instalaciones de las escuelas no son las adecuadas o las mejores para implementar el sistema; sin embargo, las variaciones entre escuelas se espera sean pocas.

Los desarrolladores de proyectos de construcción se refieren a todos aquellos negocios que se encargan de generar la idea del proyecto de construcción; específicamente se concentró en aquellos que desarrollan edificios por la concentración de personas. El sector público hace referencia a las escuelas públicas en la ciudad de Guatemala. Los anteriores se tomaron en cuenta como clientes potenciales por la concentración de personas que se maneja en dichos lugares. Por último las casas particulares fueron atractivas por el compromiso que las personas estarían sintiendo al estar utilizando este tipo de energía.

Luego de identificar los clientes potenciales y atractivos para la unidad, se realizó una encuesta para establecer los motivadores de compra de los mismos. Se listaron distintos motivadores de compra para que el encuestado enumerara en orden ascendente la importancia de cada uno de ellos. Luego se tabularon los datos para poder recopilar los resultados y analizar sobre ellos.

El análisis de costos consistió en la recolección de costos de cada área del megaproyecto para las distintas fases: la primera siendo investigación y desarrollo y la fase de producción. Durante la recolección de costos se fue clasificando los materiales que usaban y la cantidad de ellos. Para la fase de producción, se tomó en cuenta todos los materiales necesarios para la producción de la unidad de generación de energía.

Al igual que en la fase de requerimientos técnicos, para la recopilación de costos se realizaron reuniones con cada encargado de las distintas áreas del megaproyecto y se listaron los materiales utilizados para asignarles un costo. Asimismo, para todos aquellos materiales que se debían adquirir se utilizaron las facturas para trasladar esos costos a la plantilla. Por último, los costos del producto final fueron establecidos por cada área del megaproyecto, los materiales que estarían en la unidad final y esos fueron trasladados a la plantilla final.

La evaluación financiera consistió en la elaboración de un análisis de costo – beneficio. En dicho análisis se tomó en cuenta el costo de producción de la unidad y el ahorro generado por la misma. El costo fue tomado del objetivo anterior mientras que el ahorro generado fue recaudado de los otros módulos del megaproyecto. Posteriormente se realizó un análisis para los 3 tipos de clientes seleccionados.

Para realizar el análisis se tomó en cuenta la cantidad de energía que se gasta en cada establecimiento, la cantidad de energía que cada uno de ellos podría producir con la unidad de generación de energía, la orina necesaria, el costo del equipo, el costo de kWh y el ahorro que se estarían produciendo; con dichos resultados se pudo obtener el ratio de beneficios/costos para obtener un resultado. Para que este fuera rentable se espera un valor mayor o igual a 1. El análisis se hizo anualmente; se realizaron dos análisis, el primero fue el actual y el segundo fue el caso ideal para no incurrir en pérdidas.

VII. RESULTADOS

Cuadro 12. Listado de modificaciones realizadas al motor Honda GX -120 para su funcionamiento con hidrógeno

Modificaciones
Adaptación de línea de admisión de combustible en estado gaseoso
Adaptación de línea de admisión de aire eliminando el filtro
Relación aire / combustible
Apertura válvula acelerador al máximo
Apertura válvula de aire al máximo

Figura 23. Parte del carburador del motor Honda GX-120 utilizada para la combustión con hidrógeno



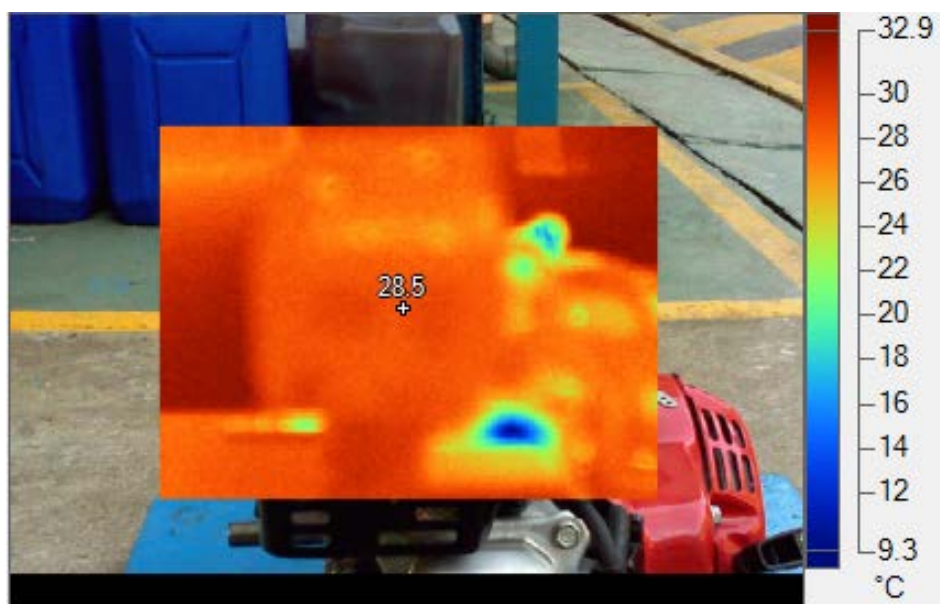
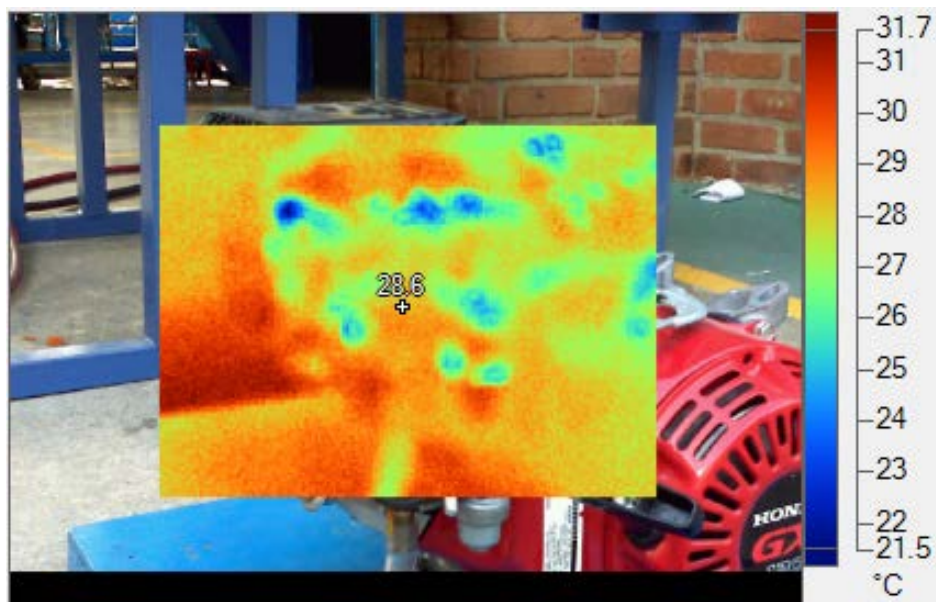
Figura 24. Vista en elevación de la línea de ingreso de mezcla combustible al carburador



Figura 25. Vista lateral de la línea de ingreso de mezcla combustible al carburador



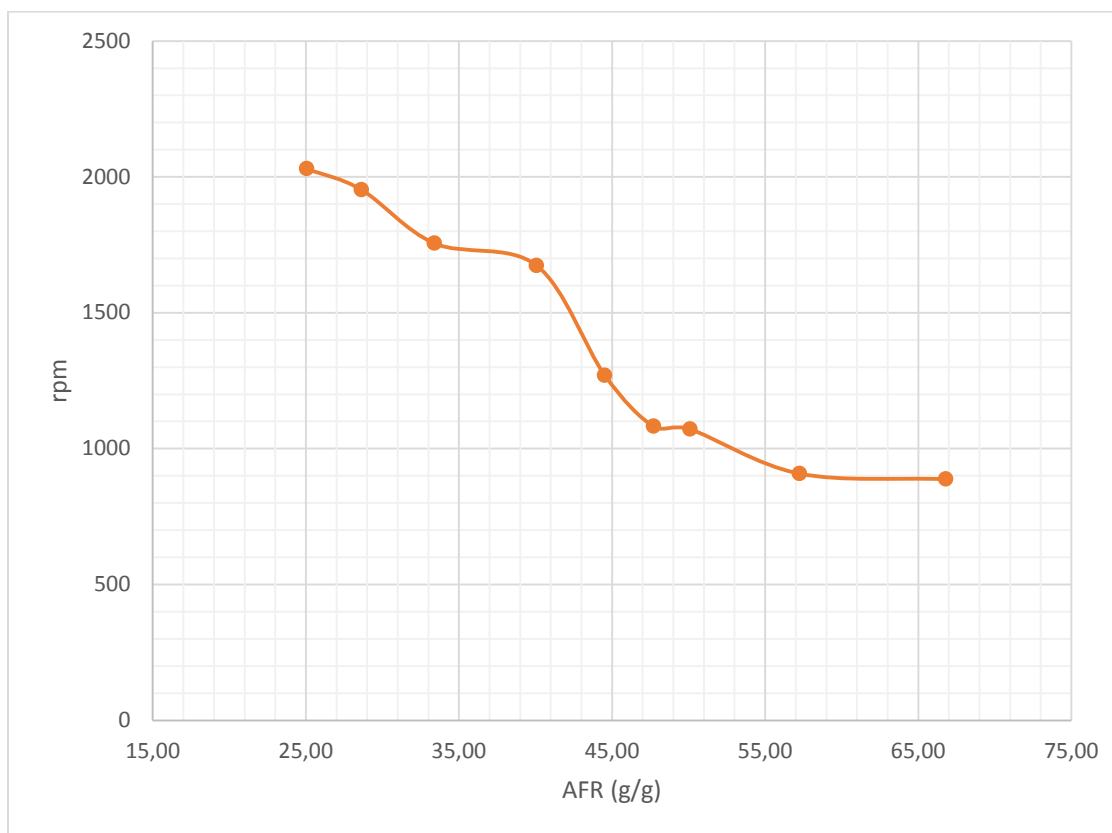
Figura 26. Imágenes termográficas del motor GX – 120 en funcionamiento utilizando hidrógeno como combustible



Cuadro 13. Velocidad del motor Honda GX-120 a diferentes relaciones aire / combustible (AFR). El hidrógeno es alimentado desde el tanque de hidruros marca Highland modelo Metal Hydride Tank NO. MH300-1-SS-1113.

AFR (g/g)	λ (g/g)	rpm
66.79	1.960	888
57.25	1.680	908
50.09	1.470	1072
47.71	1.400	1082
44.52	1.307	1270
40.07	1.176	1674
33.39	0.980	1756
28.62	0.840	1953
25.05	0.735	2030

Figura 27. Comportamiento en la velocidad del motor Honda GX-120 a diferentes relaciones aire / combustible (AFR). El hidrógeno es alimentado desde el tanque de hidruros marca Highland modelo Metal Hydride Tank NO. MH300-1-SS-1113.



Cuadro 14. Velocidad del motor Honda GX-120 a diferentes relaciones aire / combustible (AFR). El hidrógeno es alimentado desde el cilindro principal de gas a alta presión.

AFR (g/g)	λ (g/g)	Rpm
40.07	1.176	1389
33.39	0.980	1742
28.62	0.840	1968
25.05	0.735	2307
23.57	0.692	2478
22.26	0.653	2693
21.09	0.619	2855

Figura 28. Comportamiento en la velocidad del motor Honda GX-120 a diferentes relaciones aire / combustible (AFR). El hidrógeno es alimentado desde el cilindro principal de gas a alta presión.

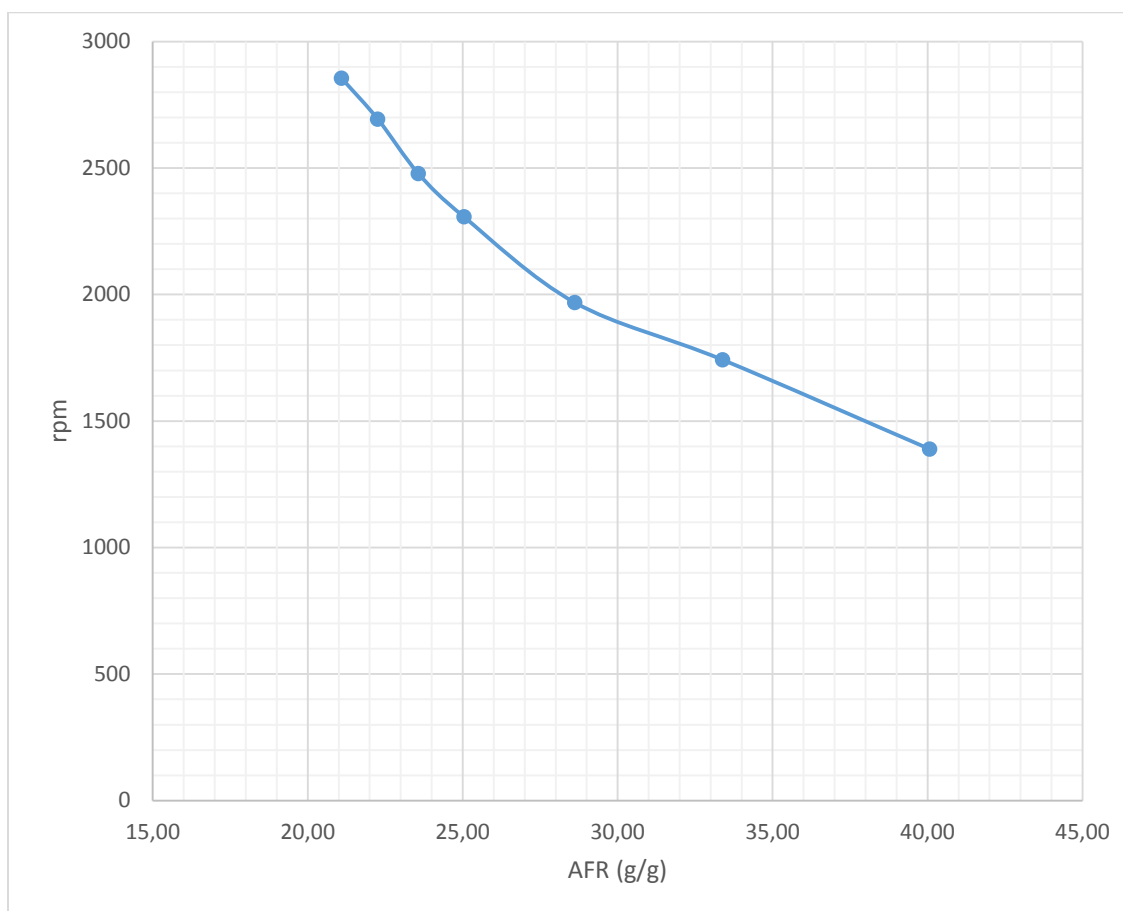
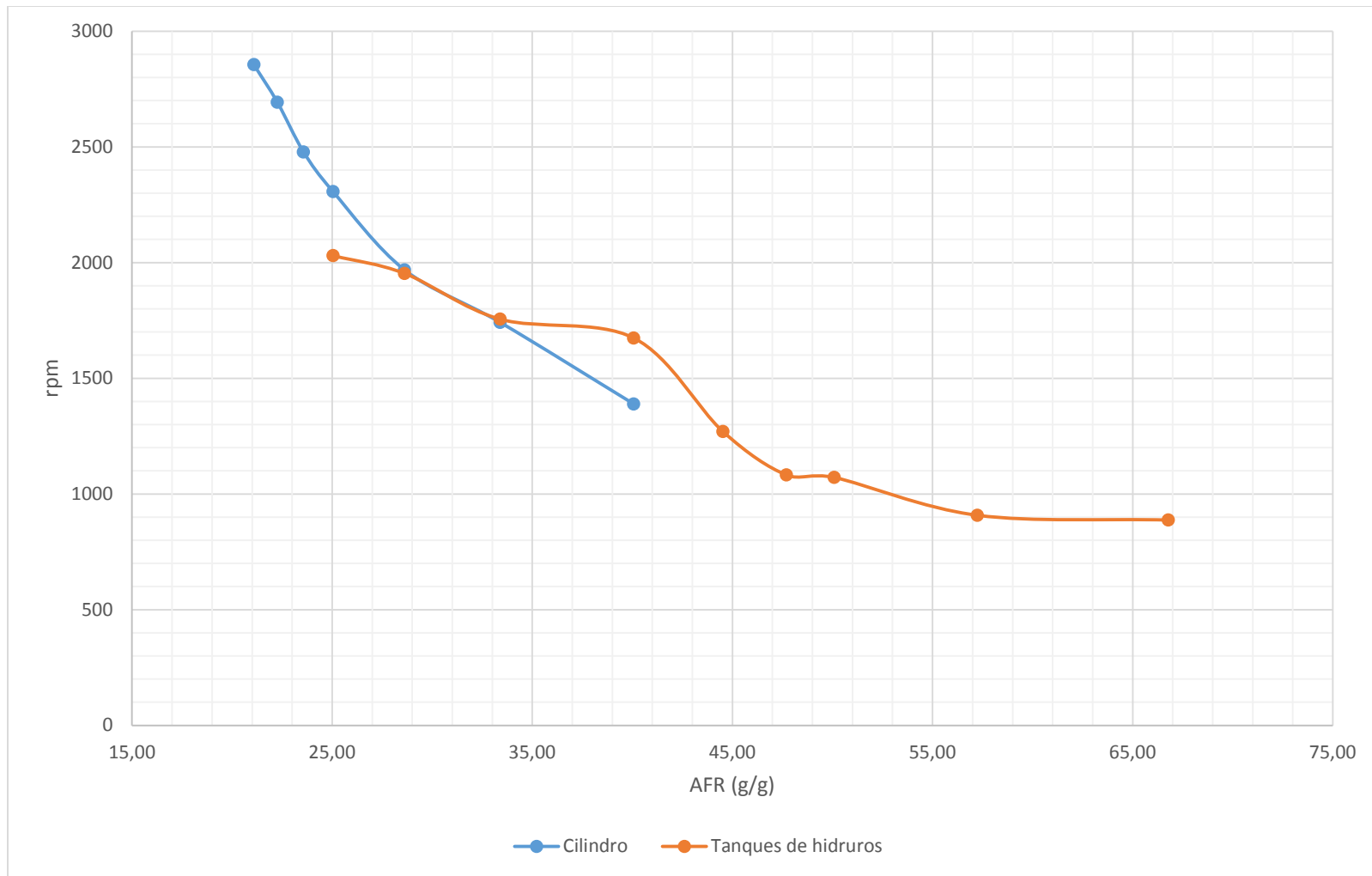


Figura 29. Comparación del comportamiento en la velocidad del motor Honda GX-120 a diferentes relaciones aire / combustible (AFR) al alimentar el hidrógeno desde el cilindro principal de gas a alta presión y al utilizar el tanque de hidruros marca Highland modelo



Cuadro 15. Condiciones del operación requeridas por el motor GX-120 utilizando hidrógeno como combustible.

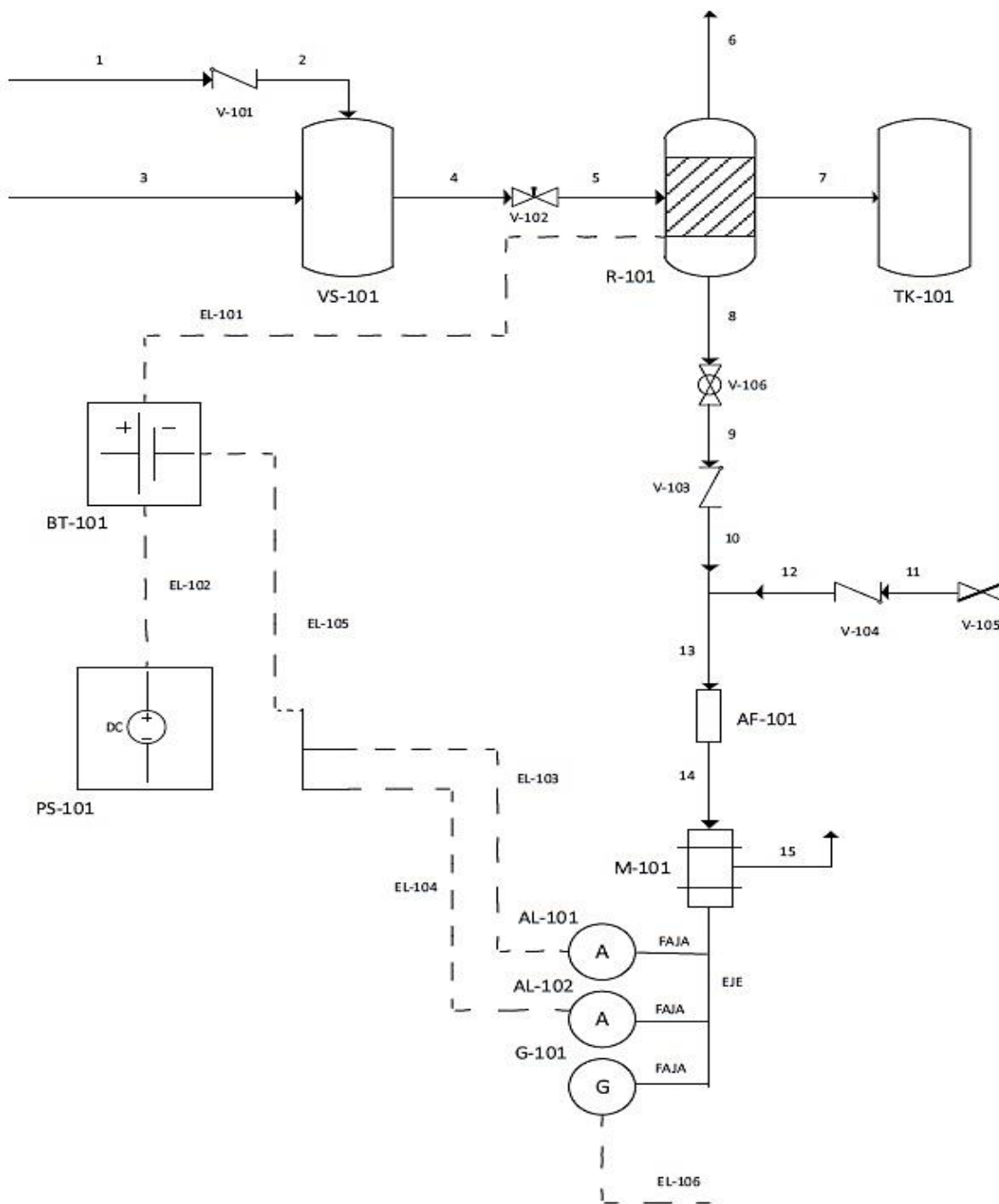
Variable	Valor
Relación AFR (g/g) a utilizar	23.00
λ (g/g) a utilizar	0.6750
Presión de hidrógeno	8.711 psi
Presión de aire	Ambiental (14 psi)
Flujo másico de hidrógeno	233.44 g/h

Cuadro 16. Datos termodinámicos del ciclo de combustión

Variable	Valor
Eficiencia térmica máxima a la relación de compresión utilizada	57.15%
Temperatura final	428.63 °C
Relación de compresión máxima permitida	14.05:1

La Figura 30 muestra el diagrama de flujo de proceso de la unidad que hace posible la generación de energía eléctrica a partir de la combustión del hidrógeno producido en la electrólisis de la urea en orina humana.

Figura 30. Diagrama de flujo de proceso de unidad



Los balances de masa y energía asociados al proceso presentado se encuentran detallados en los Cuadros 17 y 18 que siguen, ordenados por el número que les identifica en el diagrama de flujo de proceso.

Cuadro 17. Resumen de flujos de materia

Número	Temperatura (°C)	Presión (bar)	Flujo másico (kg/s)	Flujo molar (kmol/s)	Fracción másica urea	Fracción molar hidrógeno	Fracción molar oxígeno	Fracción molar de agua	Observación
1	35	1.01325	0.002063	6.80989E-05	0.29217	-	-	-	Ingreso de orina a sistema
2	35	1.01325	0.002063	6.80989E-05	0.29217	-	-	-	Ingreso de orina a sistema
3	35	1.01325	0.013892	0.000248	-	-	-	-	Ingreso de KOH a sistema
4	40	1.01325	0.063413	0.001882	0.00951	-	-	-	Ingreso de solución electrolítica a válvula reguladora de flujo
5	40	1.01325	0.063413	0.001882	0.00951	-	-	-	Ingreso de solución electrolítica a la celda electrolítica
6	25	1.01325	0.000405	0.000011	-	-	-	-	Salida de nitrógeno y dióxido de carbono de ánodo
7	25	1.01325	0.062920	0.001882	-	-	-	-	Salida de residuos líquidos de la celda
8	25	1.70301	0.000088	4.34054E-05	-	1	-	-	Salida de hidrógeno del cátodo
9	25	1.70301	0.000088	4.34054E-05	-	1	-	-	Salida de hidrógeno de válvula de bola de seguridad
10	25	1.70301	0.000088	4.34054E-05	-	1	-	-	Salida de hidrógeno de válvula de cheque
11	25	1.01325	0.009363	0.000323	-	0	0.21	-	Ingreso de aire por válvula de mariposa
12	25	1.01325	0.009363	0.000323	-	0	0.21	-	Salida de aire por válvula de cheque
13	25	1.70301	0.009450	0.000366	-	0.118513	0.185112	-	Salida de punto de mezcla H ₂ /Aire
14	25	1.70301	0.009450	0.000366	-	0.118513	0.185112	-	Salida de mezcla H ₂ /Aire del arrestador de flama
15	225	1.01325	0.009450	0.000520	-	-	-	1	Salida gases de combustión del motor

Cuadro 18. Resumen de flujos de energía

Número	Potencia (kW)	Voltaje (V)	Amperaje (A)
EL-101	27.98	6	4.66
EL-102	24.96	36.7	8.78
EL-103	1.62	13.5	120
EL-104	1.62	13.5	120
EL-105	3.24	13.5	220
EL-106	1.20	120	10

Un balance global de la operación de la unidad durante una hora se muestra en el Cuadro 19.

Cuadro 19. Balance global de masa y energía para una hora de operación

Flujo	Valor
Orina	178.27 kg/h
Hidróxido de Potasio	50.01 kg/h
Aire	33.71 kg/h
Potencia requerida en celda	27.98 kW
Residuos de solución electrolítica	226.51 kg/h
Gases residuales de electrólisis	1.46 kg/h
Gases de combustión	34.02 kg/h
Potencia eléctrica entregada por generador	1.2 kW

El equipo seleccionado para llevar a cabo el proceso apegado al balance de masa y energía presentado se encuentra en los Cuadros 20 al 27. Estas son las hojas de selección de equipo y muestran para cada componente del proceso sus especificaciones y condiciones de operación.

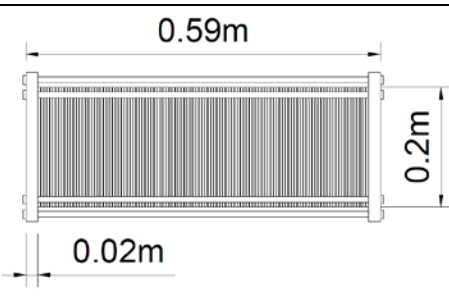
Cuadro 20. Hoja de selección de vasos

Hoja de datos de proceso de vasos								
Identificación:	VS-101							
Alto	0.5	m	Unidades requeridas:	1		Aperturas	Diámetro	
Largo	1.05	m				Alimentaciones	0.05	m
Ancho	0.57	m				Drenaje	0.0254	m
Espesor de pared	0.005	m				Agitador	0.05	m
			Agitador					
Orientación	Horizontal		Largo desde parte superior	0.223	m			
			Diámetro	0.025	m			
Presión	1.0325	bar	Diámetro paletas	0.243	m			
Temperatura	55	°C	Alto paletas	0.049	m			
Parte	Material			Observaciones:				
Caparazón	Polietileno			<p>Vaso almacena la orina recibida en la unidad. Permite agregar el hidróxido de sodio directamente al recipiente para formar la solución electrolítica. La mezcla se realiza manualmente en el vaso y es luego alimentada a la celda electrolítica.</p>				
Agitador	PVC							
Densidad del contenido	1000	kg/m ³						
Masa vacío	13	kg						
Masa lleno	241	kg						
¿Sujeto a vibración mecánica?	Sí							
Aislamiento	No							

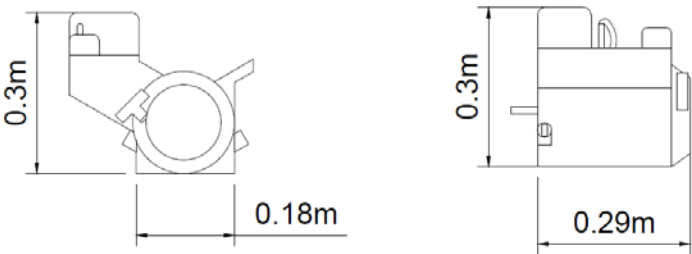
Cuadro 21. Hoja de selección de tanques

Hoja de datos de proceso de tanques							
Identificación:	TK-101						
Alto	0.5	m	Unidades requeridas:	1	Aperturas	Diámetro	
Largo	1.05	m			Alimentación	0.1	m
Ancho	0.57	m			Drenaje	0.0254	m
Espesor de pared	0.005	m					
Orientación	Horizontal						
Presión	1.0325	bar					
Temperatura	25	°C					
Parte	Material			Observaciones:			
Caparazón	Polietileno			Tanque almacena residuos del reactor, consisten principalmente en agua, solutos orgánicos y tienen una concentración de hidróxido de potasio de 5 mol/L. Los contenidos son drenados cada hora para su neutralización y descarte.			
Densidad del contenido	1000	kg/m ³					
Masa vacío	13	kg					
Masa lleno	241	kg					
¿Sujeto a vibración mecánica?	Sí						
Aislamiento	No						

Cuadro 22. Hoja de selección de reactores

Hoja de datos de proceso de reactores							
Identificación:	R-101						
							
Alto	0.25	m	Unidades requeridas:	1	Aperturas	Diámetro	
Largo	0.59	m	Placas	110	Alimentación	0.0254	m
Ancho	0.25	m			Drenaje	0.0254	m
Alto placas	0.2	m					
Largo placas	0.2	m					
Espesor de placas	0.001	m			Perforaciones	0.0127	m
					Salida gases	0.00635	m
Orientación	Horizontal						
Presión	1.70300505	bar					
Temperatura	25	°C					
Parte	Material			Observaciones:			
Caras	Hierro			<p>Reactor hace pasar corriente a través de las placas de hierro para la electrólisis de la solución electrolítica de orina a 5 mol/L de hidróxido de potasio. Su flujo es continuo y libera gases a 1.7 bar. Las perforaciones entre placas se encuentran en la parte superior de cada placa, en lados opuestos entre cada una para asegurar que se llenen las placas. El paso de la solución sucede por gravedad y los efectos de la presión estática de fluidos.</p>			
Placas	Hierro						
Tornillos	Hierro						
Empaques	Teflón						
Densidad del contenido	1000	kg/m ³					
¿Sujeto a vibración mecánica?	Sí						
Aislamiento	No						

Cuadro 23. Hoja de selección de motores

Hoja de Datos de proceso de motores de combustión interna							
Identificación:	M-101						
							
Alto	0.30	m	Unidades requeridas:	1		Combustible	Hidrógeno
Largo	0.35	m				Comburente	Aire
Ancho	0.34	m				Escape	Agua, Aire
Diámetro de eje	0.0136	m				Arranque	Manual
Orientación	Horizontal		Frecuencia	2600	RPM		
			Torque	7	Nm		
Presión	1.70300505	bar	Potencia	1800	W		
Temperatura	50	°C					
						Observaciones:	
Masa	13	kg				Motor de cuatro tiempos que recibe una mezcla de hidrógeno y aire para su combustión. Es arrancado por cuerda.	
¿Sujeto a vibración mecánica?	Sí						
Aislamiento	No						

Cuadro 24. Hoja de selección de generadores eléctricos

Hoja de datos de proceso de generadores eléctricos								
Identificación:	G-101							
Alto	0.19	m	Unidades requeridas:	1		Conexión	Faja	
Largo	0.2	m				Diámetro Polea	0.18	m
Ancho	0.19	m						
						Voltaje	120	V
						Corriente	10	A
Orientación	Horizontal		Frecuencia	2300	RPM	Frecuencia	60	H z
			Potencia	1200	W			
Presión	1.0325	bar						
Temperatura	25	°C						
						Observaciones:		
						<p>Generador eléctrico inductivo con eje accionado por conexión de faja y poleas al motor. Genera corriente alterna para usos como iluminación, conexión de aparatos eléctricos, etc.</p>		
Masa	5.4	kg						
¿Sujeto a vibración mecánica?	Sí							
Aislamiento	No							

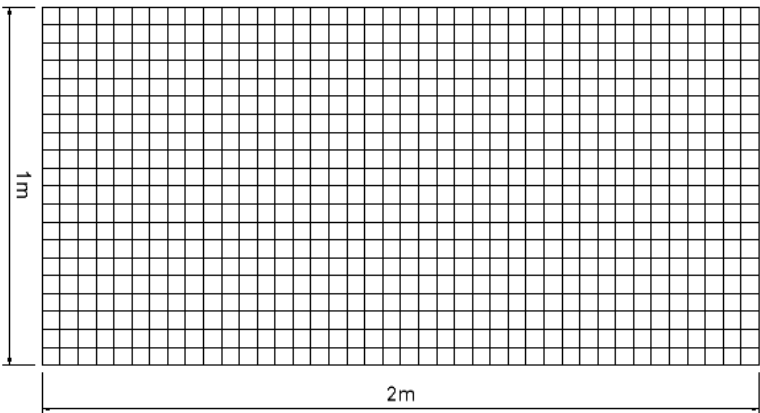
Cuadro 25. Hoja de selección de alternadores

Hoja de datos de proceso de alternadores								
Identificación:	AL-101 y AL-102							
Alto	0.214	m	Unidades requeridas:	1		Conexión	Faja	
Largo	0.23	m				Diámetro Polea	0.17	m
Ancho	0.18	m						
						Voltaje	13.6	V
						Corriente	110	A
Orientación	Horizontal		Frecuencia	2600	RPM			
			Potencia	1496	W			
Presión	1.0325	bar						
Temperatura	25	°C						
						Observaciones:		
						<p>Alternador inductivo con eje accionado por conexión de faja y poleas al motor. Genera corriente directa a 12V por medio de un rectificador y alimenta parcialmente el banco de baterías.</p>		
Masa	5.4	kg						
¿Sujeto a vibración mecánica?	Sí							
Aislamiento	No							

Cuadro 26. Hoja de selección de baterías

Hoja de datos de proceso de baterías						
Identificación:	B-101 a B-107					
Alto	0.19	m	Unidades requeridas:	7		
Largo	0.24	m				
Ancho	0.18	m				
					Voltaje	12 V
					Corriente	750 A
Orientación	Horizontal				Potencia	9000 W
Presión	1.0325	bar				
Temperatura	25	°C				
					Observaciones:	
					Batería de litio de alta capacidad. Se instalan siete en arreglo paralelo que mantiene voltaje y acumula corriente. Suministran toda la energía necesaria para la electrólisis y se recargan por medio de alternadores y paneles solares.	
Masa	6	kg				
¿Sujeto a vibración mecánica?	Sí					
Aislamiento	No					

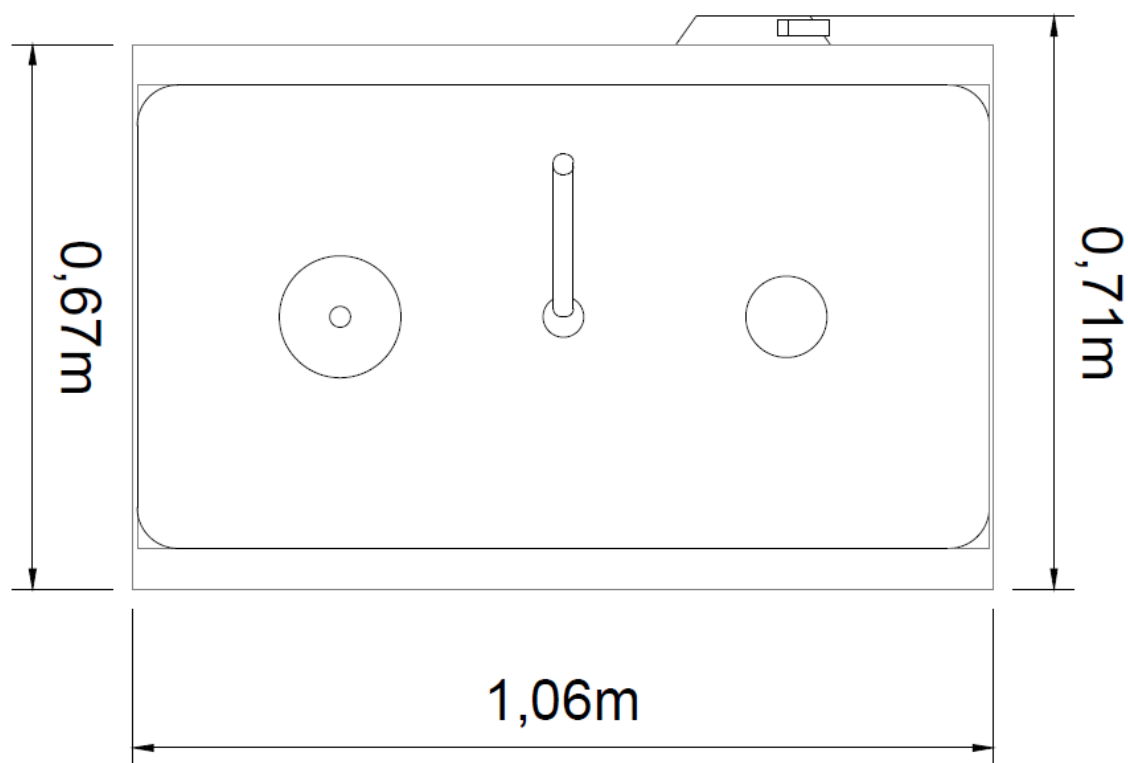
Cuadro 27. Hoja de selección de paneles solares

Hoja de Datos de proceso de paneles solares										
Identificación:	PS-101 a PS-178									
										
Alto	2	m	Unidades requeridas:	78						
Largo	1	m								
Ancho	0.0033	m								
Área efectiva	1.99	m ²				Voltaje	36.7	V		
						Corriente	8.78	A		
Orientación	Horizontal					Potencia	320	W		
Presión	1.0325	bar								
Temperatura	46	°C								
						Observaciones:				
Masa	21.6	kg				Páneles para suministrar energía de recarga al arreglo de baterías, se colocan 78 en paralelo.				
¿Sujeto a vibración mecánica?	No									
Aislamiento	No									

Las distribuciones de la unidad propuesta, elaboradas bajo la suposición que las limitaciones de la celda electrolítica y el motor de combustión interna han sido resueltas, se muestran en las Figuras 31 a la 34 a continuación.

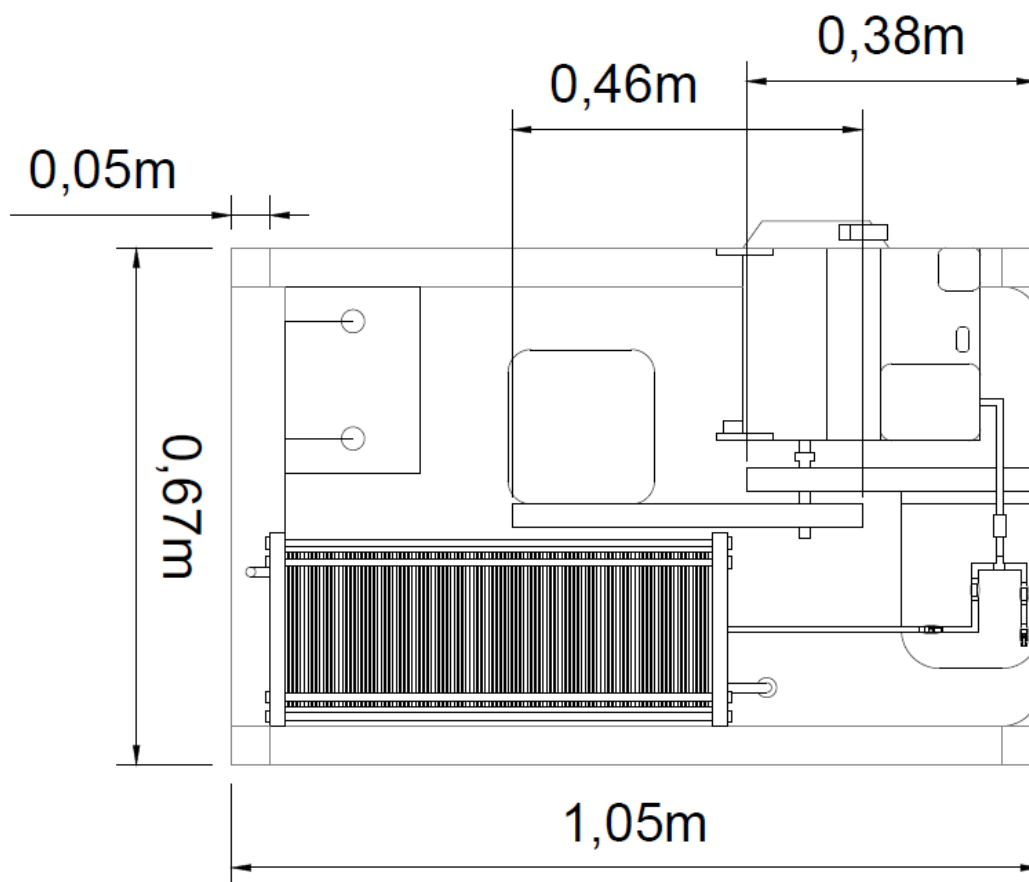
La Figura 31 muestra una vista de planta de la unidad propuesta. Se observa el vaso de recolección de orina y mezcla de solución electrolítica. En la parte central se ubica el eje del agitador. A su izquierda se ubica el embudo de recepción de orina y a su derecha la boquilla de adición de hidróxido de sodio.

Figura 31. Distribución en planta de la unidad propuesta



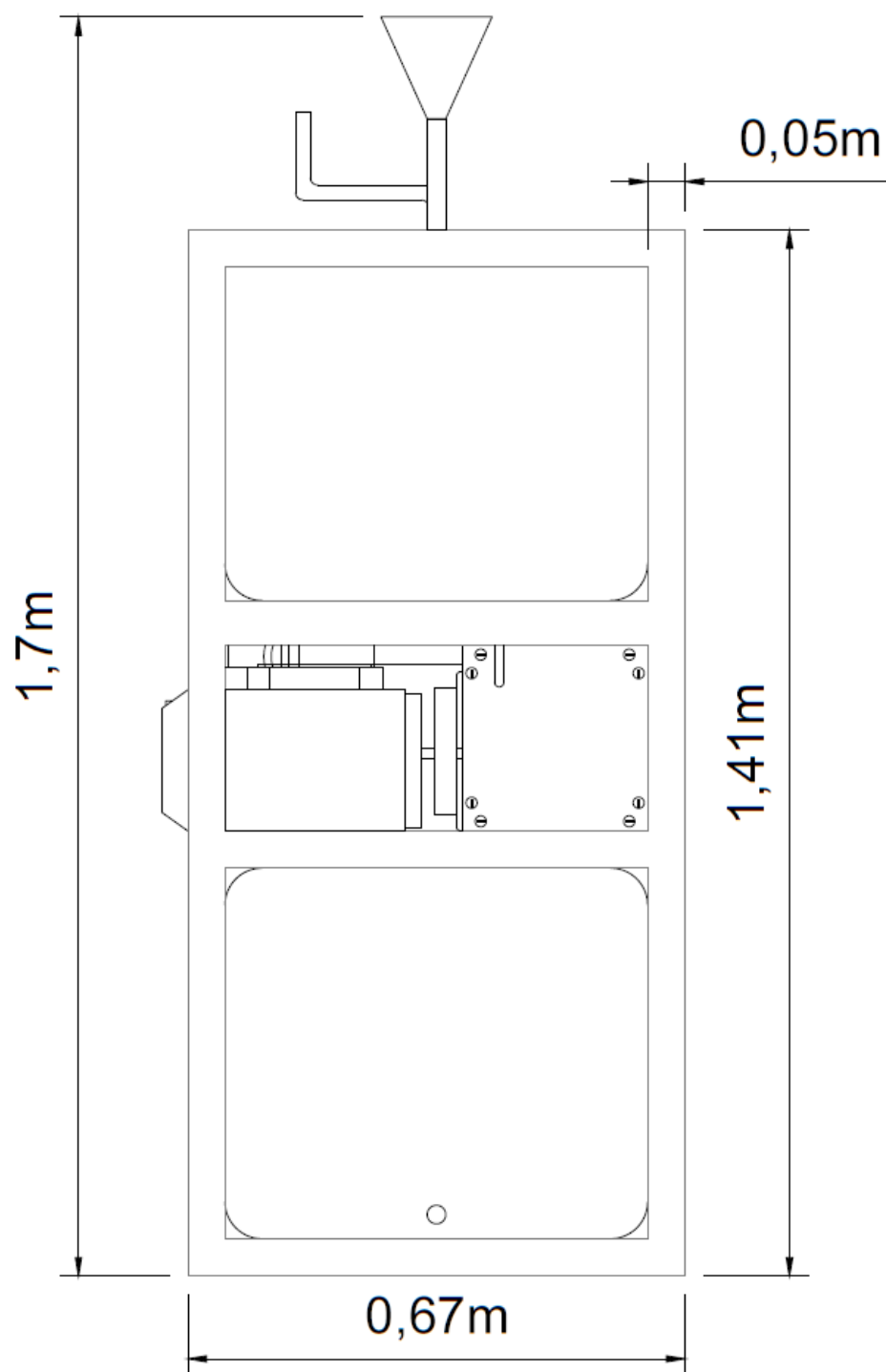
La Figura 32 muestra nuevamente la vista en planta, pero efectuando un corte que remueve el vaso para poder apreciar el equipo dispuesto bajo el mismo. Se pueden apreciar: la celda electrolítica, batería, motor, generador, alternador, conexiones de gases, conexiones eléctricas, tanque de residuos y soporte estructural.

Figura 32. Distribución en planta de un corte que remueve el vaso de almacenamiento y mezcla de solución electrolítica.



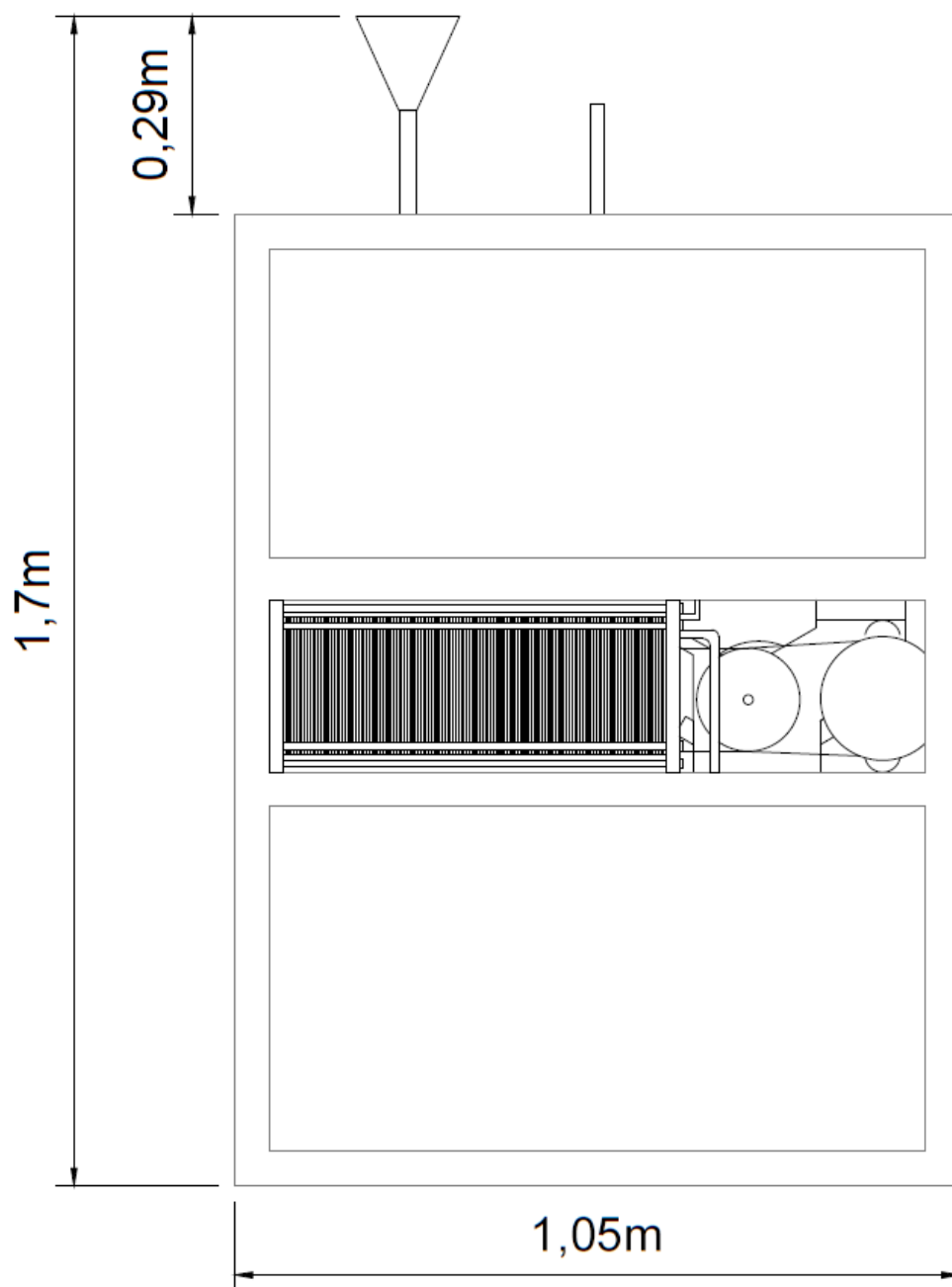
Las Figuras 33 y 34 muestran dos vistas de elevación de la distribución de equipo en la unidad. En la figura cuatro se aprecia el cono de recepción de orina, eje de agitador y se alcanza a observar el soporte estructural alrededor del vaso y tanque de residuos. En el centro de la unidad se observa la celda electrolítica, batería y partes de las poleas y el motor.

Figura 33. Distribución de elevación frontal de la unidad propuesta



La Figura 34 ofrece otra perspectiva de las fajas y poleas en el centro de la unidad, así como las descargas en la celda electrolítica, tanto gaseosas como líquidas. En esta vista puede apreciarse más el motor y el alternador.

Figura 34. Distribución en elevación lateral de la unidad propuesta



El siguiente Cuadro muestra los requerimientos técnicos de la unidad de generación de energía para el funcionamiento correcto. Los requerimientos fueron recolectados de las distintas áreas del megaproyecto mediante la consulta del encargado de cada área.

Cuadro 28. Requerimientos técnicos de la unidad

	Requerimientos técnicos	Observaciones	
MOTOR	Flujo continuo de hidrógeno	315	g/h
	Arrestador de flama previo a la entrada del motor por seguridad		
	Pre mezcla de aire con hidrógeno para asegurar que se tenga una mezcla aire/combustible pobre		
	Válvulas de cheque antes del punto de pre mezcla		
	Válvula de bola para cerrar rápidamente el suministro de hidrógeno por seguridad		
	Válvula de aguja en la entrada del motor para regular el flujo requerido		
	Aire con la menor humedad posible (la humedad produce backfire)		
	Presión de hidrógeno aproximada a un mínimo de 10 psi		
CELDA	Flujo de H ₂	306.25	g/h
	Flujo de orina	173.322	L/h
	Área total	44000.58	cm ²
	Corriente total	4534.06	A

Continuación Cuadro 28. Requerimientos de la unidad

		Requerimientos técnicos	Observaciones	
CELDA		Área de cada electrodo	20	cm ²
		Número de celdas	110	
		Espacio tiempo	7	min
		Volumen total	20.24	L
		Volumen por celda	184	ml
		Solución electrolítica	KOH	
		Concentración de solución electrolítica	5M	
		Material de electrodo	Hierro	
		Material placa exterior	Acero	
		Material de empaque	Teflón	
AUTOMA- TIZACIÓN	Generador	Que el eje gire a 2,300 rpm		
		Entregue 1.61 hp (1.2kW)		
	Alternador	Eje debe girar a 3,000rpm y entregar 120 A		
	Baterías	Colocación de 8 baterías en paralelo para entregar 12V @ 6,000A		
		Deben entregar constantemente 28 kW a la celda.		
	Paneles solares	Entrega de 320 W		
	Automatización	Sensores digitales		
		Entrega continua del voltaje y amperaje que necesitan para funcionar.		
		Que haya transmisión continua entre transmisor y receptor e interfaz de análisis.		
	Compresor	Que se le suministren 12V @35A.		

Para identificar los clientes potenciales se tomó en cuenta que se necesita un gran flujo de personas para que el sistema tenga un funcionamiento continuo. Asimismo, en base a lo investigado sobre el crecimiento de las tendencias verdes se logró identificar a casas particulares como otro tipo de cliente dado que serán motivados por el compromiso con el medio ambiente.

Se realizó el principio de análisis CANVAS para entender a los distintos clientes que se seleccionaron: desarrolladores de proyectos de construcción, casas particulares y el sector público en donde nos concentraremos en las escuelas. En los siguientes cuadros se pueden visualizar los resultados; los datos originales se encuentran en los anexos.

Cuadro 29. Resultados del análisis CANVAS

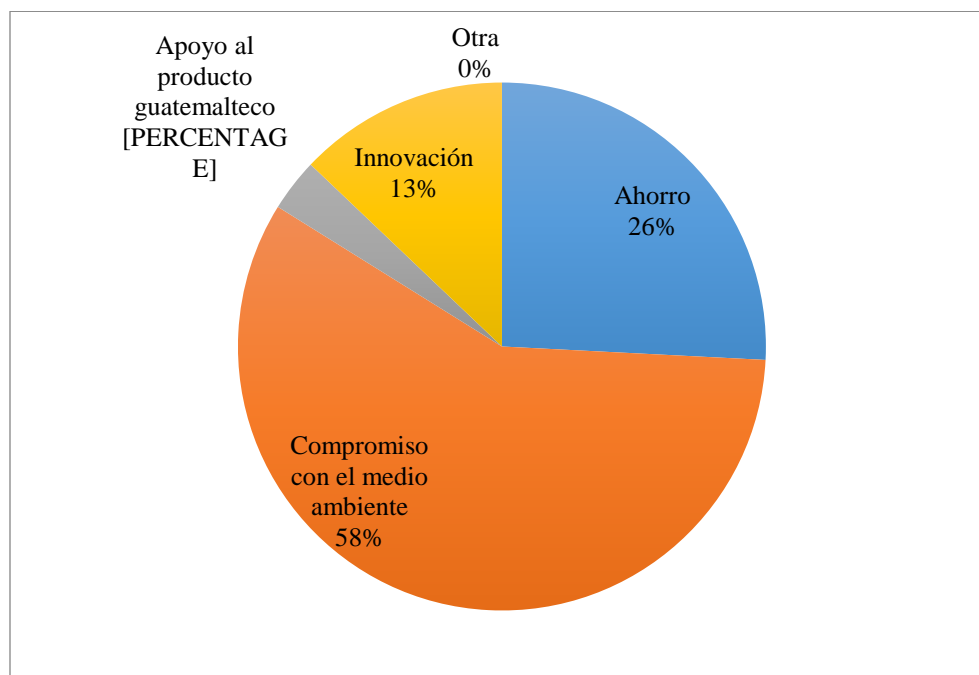
Cliente	Beneficios esperados	Beneficios obtenidos
Desarrolladores de proyectos de construcción	Ahorro en energía y por ende costos; margen de la empresa o proyecto	Ahorro en energía; imagen positiva hacia el público; venta de proyectos más caros por estar a la vanguardia
Casas particulares	Ahorro; satisfacción personal; implementación de un estilo de vida verde	Producción de energía que conlleva un ahorro
Sector público	Imagen, ahorro, confianza, generación de energía; apoyo internacional	Ahorro

Para identificar los motivadores de compra de los clientes se realizó una encuesta en donde la primera pregunta establecía lo siguiente: ¿Qué lo motiva a usted comprar esta unidad? Las opciones de esta pregunta se decidieron en base al tipo de proyecto que se está desarrollando y lo investigado acerca de las crecientes tendencias del cuidado del medio ambiente. El ahorro se eligió porque es uno de los factores más importantes del sistema; la producción de energía que encamina hacia un ahorro en gastos eléctricos. Los resultados se muestran a continuación.

Cuadro 30. Motivadores de compra para clientes

Motivación	Punteo
Ahorro	25.81%
Compromiso con el medio ambiente	58.06%
Apoyo al producto guatemalteco	3.23%
Innovación	12.90%
Otra	0%

Figura 35. Resultados de motivadores de compra de los consumidores



En la figura anterior se puede visualizar que el compromiso con el medio ambiente es la motivación más grande para los consumidores, seguido del ahorro, innovación y por último el apoyo a ser producto guatemalteco.

La siguiente pregunta, ¿por qué eligió la pregunta anterior? Se realizó con el fin de proporcionar evidencia del por qué le interesa más el factor que se eligió en la primera pregunta. Algunos de los comentarios más relevantes se muestran a continuación:

Cuadro 31. Comentarios acerca de motivación de compra

No.	Comentario
1	Necesitamos innovación verde, que no afecte el ecosistema.
2	Porque son necesarios nuevos métodos para crear energía "verde" y de esta manera poder ayudar a los necesitados.
3	No creo que las personas les guste la idea de guardar su orina o desechos.
4	El cuidado al medio ambiente es el presente y futuro del ser humano.
5	Se están agotando las fuentes de energía actualmente y me parece algo innovador y comprometido al medio ambiente.
6	Siempre estoy viendo la mejor manera de ahorrar.
7	Ya que me gustaría contribuir con la generación de energía aprovechando una necesidad natural que el ser humano posee.
8	Porque a pesar que me gusta ayudar al medio ambiente, la inversión debe verse reflejada en ahorro.
9	Considero que es urgente dejar las comodidades e invertir en el cuidado del medio ambiente.
10	Porque me parece algo totalmente innovador, incluso la utilidad que puede ser para la gente en el país con escasos recursos.

La última pregunta de la encuesta establecía lo siguiente: ¿Qué tan importantes son los siguientes factores? (siendo 1 el más importante). Los factores que se evaluaron se decidieron en base a los posibles efectos secundarios que puede provocar la unidad; los mismos fueron evaluados con todo el equipo del proyecto. El siguiente cuadro muestra los resultados de qué atributo ocupa qué lugar de importancia para el consumidor; es decir, generación de malos olores con un 50% de votos obtuvo el primer lugar, generación de ruido con un 35% el segundo y así sucesivamente.

Cuadro 32. Importancia de distintos factores para el cliente

Factores evaluados/punteo	1	2	3	4	5	6	7
Generación de ruido	6.49%	35.00%	31.12%	10.00%	3.00%	5.39%	9.00%
Generación de malos olores	50.00%	11.00%	4.00%	12.00%	8.00%	4.00%	11.00%
Precio de la unidad	11.00%	23.91%	36.09%	5.00%	15.00%	5.00%	4.00%
Ahorro; capacidad de energía que va a desarrollar	20.83%	10.50%	9.50%	29.00%	9.33%	4.17%	16.67%
Espacio que ocuparía la unidad	3.70%	6.33%	4.47%	18.83%	27.00%	21.00%	18.67%
Vida útil de la unidad	2.70%	9.00%	6.62%	9.81%	21.43%	33.63%	16.81%
Comodidad y estética	5.28%	4.26%	8.20%	15.36%	16.24%	26.81%	23.85%

Figura 36. Generación de malos olores como el requisito más importante para el cliente

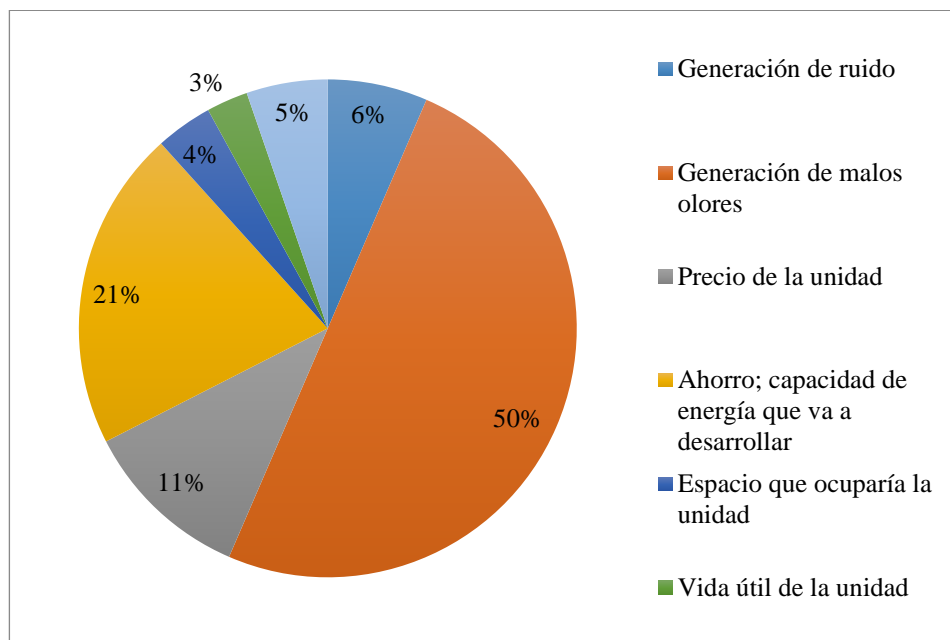


Figura 37. Generación de ruido como segundo requisito más importante para el cliente

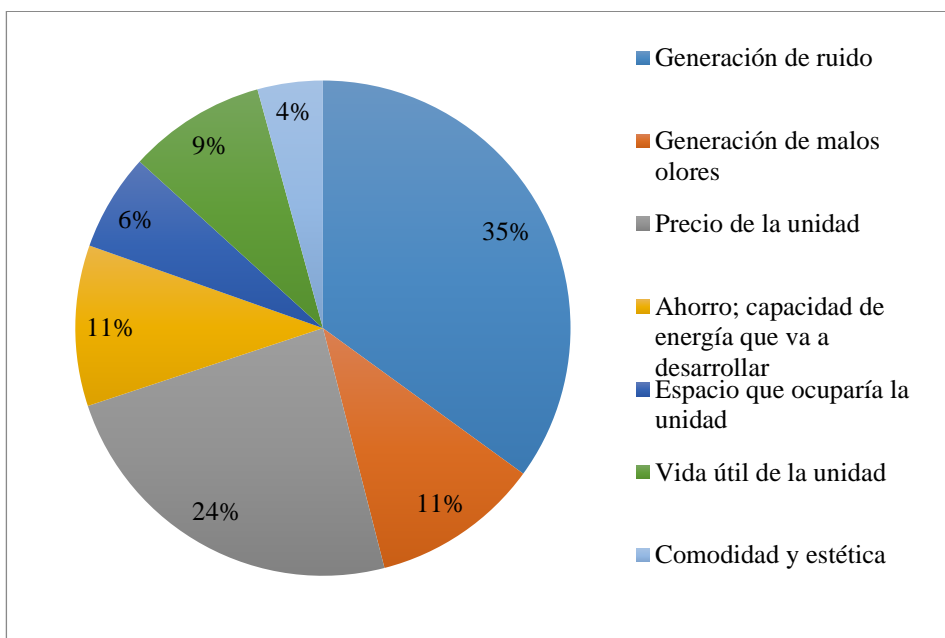


Figura 38. Precio de la unidad siendo el tercer requisito más importante para el cliente

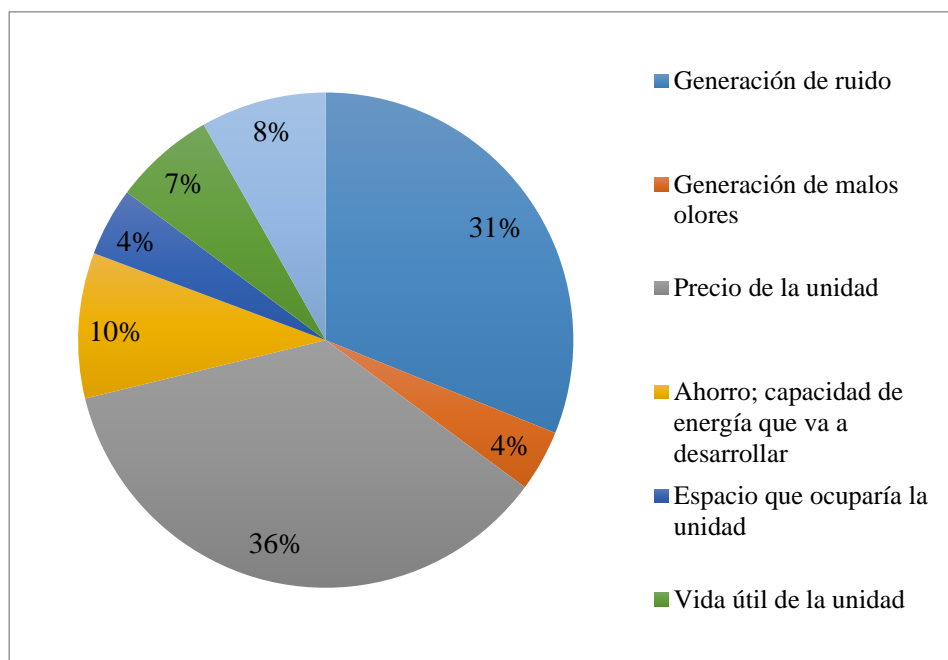


Figura 39. Ahorro generado por la unidad como el cuarto requisito más importante para el cliente

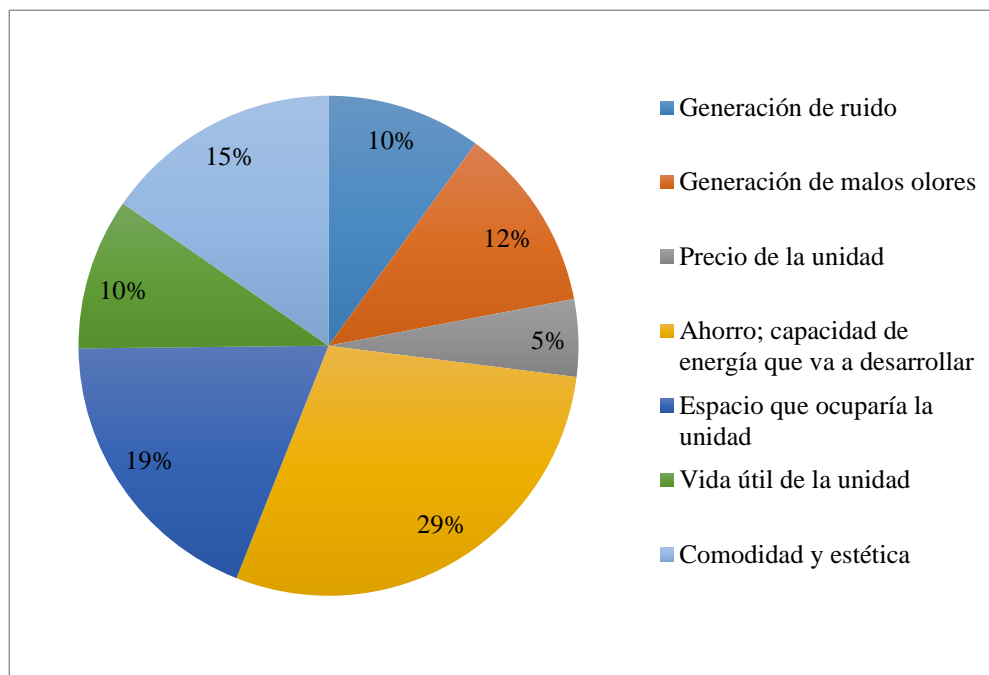


Figura 40. Espacio que ocuparía la unidad como el quinto requisito más importante para el cliente

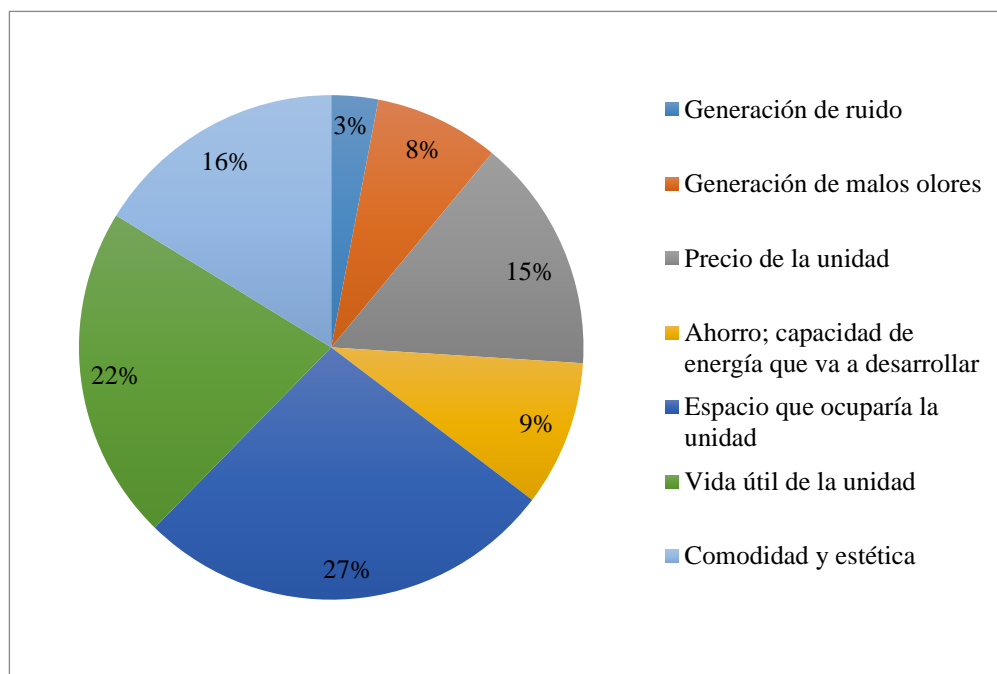


Figura 41. Vida útil de la unidad como el sexto requisito de importancia para el cliente

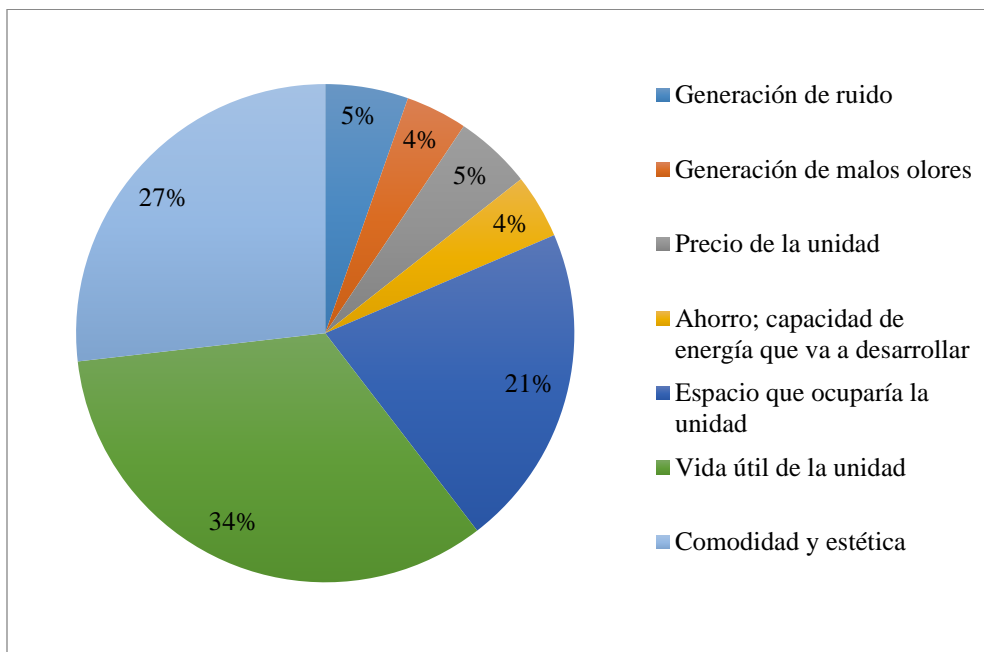
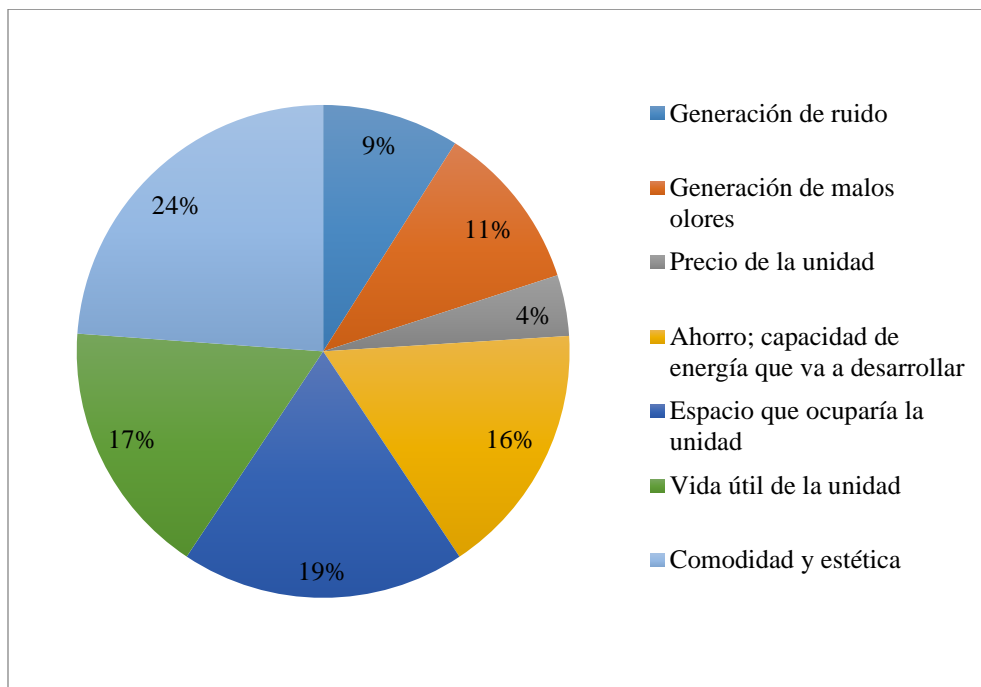


Figura 42. Comodidad y estética como el requisito con menos importancia para el cliente



Cuadro 33. Orden de importancia de los factores o requisitos del cliente

Importancia	Factor
1	Generación de malos olores
2	Generación de ruido
3	Precio de la unidad
4	Ahorro; capacidad de energía que va a desarrollar
5	Espacio que ocuparía la unidad
6	Vida útil de la unidad
7	Comodidad y estética

Se realizó un análisis del sistema de costos; esto se refiere a la recolección de costos de la etapa de investigación y desarrollo y posteriormente la recolección de costos para la fase de producción; se debe tomar en cuenta que los costos de producción solo se cuantificaron sin embargo, la producción del sistema no se llevó a cabo. Esto se realizó mediante la observación del uso de materiales respectivos, cotizaciones y reuniones con el equipo para identificar materiales utilizados y el costo respectivo.

El Cuadro 34 muestra cada área del megaproyecto y el monto invertido en investigación y desarrollo. Se puede observar que el área más cara del proyecto fue Recursos Humanos seguido del área que involucraba el motor. El total de la investigación que se llevó a cabo suma un Q63,037.79.

Cuadro 34. Costos en el área de investigación y desarrollo

Módulo	Monto (Q)
Administración	6,250.00
Automatización	4,166.67
Celda	9,047.13
Diseño	6,250.00
Microbiología	14,761.96
Motor	22,562.04
	63,037.79

Cuadro 35. Costos específicos del producto final

Operación	Equipo(s)	Costo	%
Recolección de orina	Embudo	10.00	0.00%
Almacenamiento de orina	Tanque	1,153.50	0.02%
	Sensor ultrasónico doppler	2,400.00	0.04%
Alimentación de KOH	Abertura en tanque de almacenamiento	-	0.00%
	Sensor de nivel para tanques	6,750.00	0.12%
Mezcla electrolítica	Agitador manual	3,076.00	0.05%
	compresor	225.00	0.00%
Electrólisis	Celda electrolítica	24,495.47	0.43%
	Placas hierro	632.80	0.01%
	Hidróxido de Potasio	1,331.89	0.02%
Almacenamiento de residuos	Tanque	1,153.50	0.02%
Mezcla aire	Arrestador de flama	633.00	0.01%
	Válvula cheque	390.00	0.01%
	Válvula de bola	320.00	0.01%
	Válvula de aguja	290.00	0.01%
Combustión	Motor de combustión interna	2,520.82	0.04%
	Polea motor	180.00	0.00%
	Banda en V A42	90.00	0.00%
	Banda en V A33	82.50	0.00%
Generación eléctrica	Generador eléctrico	1,042.50	0.02%
	Polea generador	150.00	0.00%
	Alternador	5,250.00	0.09%
	Polea alternador	75.00	0.00%
	Paneles solares	5,327,010.00	93.74%
	Eje con acople para extensión	300.00	0.01%
Almacenamiento de energía	Arreglo de 7 Baterías Duncan Navigator	5,810.18	0.10%
Transporte orina y residuos	Tubería	28.20	0.00%
	Válvula de aguja	290.00	0.01%
Transporte de gases	Mangueras	161.00	0.00%

Continuación Cuadro 35. Costos específicos del producto final

Operación	Equipo(s)	Costo	%
Cableado eléctrico	Cables cobre a celda	138.73	0.00%
	Cables cobre a baterías	96.13	0.00%
	Cables cobre a paneles	296,708.50	5.22%
Total (Q)		5,682,794.70	100%

Para la evaluación financiera se tomó en cuenta datos provenientes de los distintos módulos de este megaproyecto y con ciertos cálculos se logró descifrar otra cantidad de datos. Con los costos obtenidos del objetivo anterior se logró realizar un análisis de costo – beneficio en general y para tres distintos escenarios. Los resultados se muestran en los siguientes cuadros.

Cuadro 36. Datos de producción de energía de la unidad

	Datos	
Producción de energía	1.2	kW
Orina necesaria para la producción de 1.2kW	178.27	kg
Promedio de orina diaria por persona	1.5	kg
Asumiendo que solo se tiene el 30% de la orina de una persona disponible	0.45	kg
Cantidad de personas necesarias para producir 1.2kW asumiendo que solo se tiene el 30% de la orina disponible	396	

El Cuadro anterior muestra datos recolectados de los otros módulos del megaproyecto; la cantidad de orina promedio diaria por persona fue obtenida de la Enciclopedia Medline Plus. El siguiente Cuadro muestra datos obtenidos de los objetivos anteriores; el costo de kWh se obtuvo de la factura de energía eléctrica por parte de EEGSA.

Cuadro 37. Costos del equipo

	Q
Costo del equipo	5,682,794.70
Costo de kWh	1.14
Ahorro de la producción de 1.2kW	1.37

Cuadro 38. Costo beneficio general, ahorro generado por la unidad y ahorro ideal

Costo beneficio	Actual	Ideal	Ahorro actual	Ahorro ideal
1 año	0.0021	0.33	11,983.68	1,894,264.90
2 años	0.0042	0.67	23,967.36	3,788,529.80
3 años	0.0063	1.00	35,951.04	5,682,794.70

El Cuadro 38 muestra el análisis costo – beneficio general es decir, no aplicado a ningún escenario en específico.

Los Cuadros 39 y 40 muestran datos para Oakland Mall; los datos fueron obtenidos por medio del contacto de la gerente general del centro comercial. En el Apéndice H se pueden observar más a detalle todos los datos y cálculos realizados para el análisis de costo – beneficio.

Cuadro 39. Datos para Oakland Mall

Descripción	Valor
Energía demandada por hora	182.75 kWh
Energía producida por hora	1.62 kWh
Energía demandada por hora en dinero (Q)	208.33
Energía producida por hora en dinero (Q)	1.84

Cuadro 40. Costo beneficio para Oakland Mall

Costo beneficio	Actual	Ideal	Ahorro actual	Ahorro ideal	Rendimiento de la unidad (%)
1 año	0.0028	0.33	6,722.04	1,894,264.90	0.28
2 años	0.0057	0.67	13,444.08	3,788,529.80	0.57
3 años	0.0085	1.00	20,166.13	5,682,794.70	0.85

Los Cuadros 41 – 43 muestran los datos recolectados tanto para las escuelas como para las casas particulares. El proceso que se llevó a cabo para determinar el análisis de costo – beneficio fue el mismo que el utilizado para el cc. Oakland Mall; los cálculos a detalle se pueden visualizar en el apéndice H.

Cuadro 41. Datos para escuelas

Descripción	Valor
Energía demandada	6.76 kWh
Energía demandada en dinero (Q)	7.71
Oferta de energía por hora	0.06 kWh
Oferta de energía por hora en dinero (Q)	0.07
Ahorro en un año (Q)	97.81

Cuadro 42. Costo beneficio para escuelas

Costo beneficio	Actual	Ideal	Ahorro actual	Ahorro ideal	Rendimiento de la unidad (%)
1 año	0.0000172	0.33	97.81	1,894,264.90	0.0017
2 años	0.0000344	0.67	195.62	3,788,529.80	0.0034
3 años	0.0000516	1.00	293.43	5,682,794.70	0.0052

Cuadro 43. Costo beneficio para el escenario de una casa particular

Descripción	Valor
Consumo kWh anual por persona	557.15 kWh
Personas promedio en un hogar	5.00
Asumiendo que el 50% lo gastan en casa	1,392.88 kWh
Costo (Q)	1,587.88

En el Cuadro 43 se puede ver datos como el consumo anual de kWh por persona; dichos datos fueron obtenidos del Banco Mundial.

VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La selección del motor a utilizar para la unidad se realizó tomando en cuenta la potencia requerida y un flujo de hidrógeno razonable a ser proporcionado por una celda electrolítica. Es así como se seleccionó el motor Honda GX – 120 cuyas especificaciones fueron mencionadas anteriormente. El mismo está diseñado y fabricado para utilizar gasolina como combustible de trabajo, por lo que se requiere realizar ciertas modificaciones para lograr adaptarlo a utilizar hidrógeno como combustible.

El hidrógeno es un combustible considerado como renovable que ha tenido auge recientemente. Dentro de sus ventajas principales se encuentran las bajas emisiones que genera su combustión y que puede ser obtenido de varias fuentes. Comúnmente se ha obtenido a partir de la electrólisis de agua. En la unidad generadora que se plantea en este estudio, se obtiene a partir de electrólisis de orina.

Se han realizado varios estudios relacionados a las modificaciones requeridas para el correcto funcionamiento de motores de combustión interna con hidrógeno. Varias alternativas se han propuesto para lograr este objetivo. Principalmente, se han orientado a evitar problemas de combustión anormal como el pre encendido y el retorno de llama. De todas las propiedades mencionadas, las que contribuyen a utilizar hidrógeno como combustible son la amplia gama de inflamabilidad, baja energía de ignición, pequeña distancia de apagado, temperatura de autoignición elevada, alta velocidad de llama, elevada difusividad y baja densidad. Sin embargo, son estas mismas propiedades las que contribuyen a los problemas de combustión anormal. Es así como surge la necesidad de realizar modificaciones a los motores de combustión interna convencionales para lograr una correcta combustión con este gas. Estas modificaciones van orientadas en dos grandes ramas. La primera de ellas se refiere a cambios en las condiciones propias de la operación y la segunda a adaptaciones, reposiciones o modificaciones físicas a componentes del motor.

Una de las modificaciones de operación recurrente en la literatura es la utilización de diferentes mezclas aire / combustible para evitar problemas de combustión anormal. También se ha encontrado que es sumamente relevante la forma de ingresar el hidrógeno al motor para lograr una combustión adecuada. Es así como se determinó como variable principal a modificar la relación aire / combustible para lograr una combustión estable en el motor Honda GX - 120. Adicionalmente, se adaptó una línea de hidrógeno – aire y se removió una parte del carburador para ingresar los gases a la cámara de combustión de la manera más directa posible. La configuración utilizada se muestra en la Figura 21 y Figura 22.

A pesar que en la literatura existen muchas otras modificaciones al motor de combustión que se han probado, se eligió la relación aire / combustible como variable principal de operación a modificar por varias razones. La principal de ellas, es que a través de un control y ajuste adecuado de la misma, se puede lograr una combustión estable. Adicionalmente, esta variable no implica realizar modificaciones físicas

sofisticadas y no requiere de equipos especializados y complicados para operar, lo cual beneficia el costo, mantenimiento y operación general de la unidad generadora de energía. Esta variable se modificó y monitoreó a través de la variación en la presión del hidrógeno y el aire a ingresar al motor. Para esta finalidad se adaptó un reservorio de aire a presión en una línea independiente a la de alimentación de hidrógeno. Cada una de las líneas cuenta con sus propios reguladores y medidores de presión, así como válvulas principales de apertura y válvulas de cheque para evitar el retorno de los gases a las líneas. Adicionalmente se colocó un arrestador de llama previo a la entrada del combustible al motor por seguridad. En caso que suceda retorno de llama desde el motor, el dispositivo evita que la misma llegue hacia la línea de hidrógeno e incluso al reservorio del gas lo cual causaría una explosión severa. Posteriormente se colocó una válvula de aguja para poder graduar el flujo de mezcla gaseosa que ingresa al motor.

Como diseño experimental se utilizó una regresión de un factor. Dado que la variable a estudiar es la relación aire / combustible y la cantidad de aire se mantuvo fija, únicamente se modifica la presión de hidrógeno bajo la que opera. Inicialmente se graduaron las presiones de ambos gases. Sin embargo, esta configuración fue descartada y se influenció únicamente la presión de hidrógeno como se explica más adelante.

El principal reto en los ensayos experimentales fue la combustión anormal, coincidente a lo reportado en la literatura. En varias ocasiones ocurrió pre ignición y retorno de llama sin lograr el arranque del motor. En busca de evitar esto se utilizaron presiones bajas de hidrógeno y se experimentó limpiar la cámara de combustión y el carburador con aire comprimido previo al arranque. Sin embargo, aún se registraron ocasiones en los que se dio pre ignición, incluso bajo condiciones de operación que previamente no habían presentado este inconveniente. Esto se debe a que este es un evento estocástico y no se ha logrado determinar con exactitud porqué se da tal como reportan Verhelst & Wallner, (2009).

Sin embargo, a pesar de ser un evento estadístico, a lo largo de la experimentación se mostraron ciertas tendencias a su ocurrencia. En los ensayos en los que se utilizaron presiones bajas de hidrógeno (alrededor de 2 psi) se observaron problemas severos de combustión anormal y en muchos de estos ensayos no se logró el arranque. Esto se debe a que la presión no es suficiente para alimentar la cámara de combustión con la cantidad requerida de hidrógeno, por lo que el mismo se va acumulando a lo largo de la línea de entrada hasta alcanzar una cantidad suficiente para que se de pre ignición. Se determinó que los problemas en el arranque disminuyen cuando se aumenta la presión de ingreso de hidrógeno por un instante, y posteriormente se regresa a un valor alrededor de 5 psi, simulando el efecto que tendría acelerar el motor si el mismo estuviese trabajando bajo sus condiciones de diseño utilizando gasolina como combustible. Esto le da un impulso al hidrógeno en forma similar a un pulso, obligándolo a ingresar a la cámara de combustión sin que tenga el tiempo suficiente para que suceda pre ignición o retorno de llama.

Adicionalmente se estudiaron posibles puntos calientes a través de capturas termográficas que se muestran en el área de resultados. El estudio termográfico se realizó pues dependiendo de su ubicación, se

plantearían estrategias para su reducción e incluso eliminación. A través de la evaluación con la cámara termográfica no se encontraron ubicaciones puntuales a alta temperatura como se muestra en la Figura 26.

Se debe tomar en consideración que estas imágenes proveen una idea de la situación a nivel superficial pero no permiten conocer precisamente las temperaturas internas en la cámara de combustión y en el sistema de ingreso de hidrógeno al motor, donde probablemente si existen puntos con temperaturas suficientemente elevadas para causar combustión anormal.

En las pruebas iniciales se utilizó el tanque de almacenamiento de hidrógeno por hidruros especificado en el Cuadro 7, como reservorio de hidrógeno. Bajo esta operación se registraron pre igniciones y retornos de llama severos, logrando el arranque del motor en muy pocos ensayos. Posteriormente se optó por alimentar el motor directamente del cilindro de hidrógeno principal y se presentó una mejora significativa.

Al utilizar los tanques de hidruros se observa un comportamiento irregular en la combustión que se refleja en la gráfica de velocidad del motor a diferentes relaciones aire / combustible (Figura 27). Esto se debe a que el flujo proporcionado por este sistema de almacenamiento está sujeto a la reacción de desorción que sucede en los hidruros. La velocidad de esta reacción depende de la temperatura a la que sucede y a medida que disminuye la presión del gas dentro de los tanques, el flujo también decrece. Adicionalmente, no es posible alcanzar presiones superiores a 5 psi por tiempos prolongados, lo cual limita el rango de relaciones aire / combustible a experimentar. En comparación, al utilizar el cilindro principal de hidrógeno se obtiene una operación más estable como se muestra en la Figura 28. También la pre ignición previa a lograr un arranque es más significativa al utilizar los tanques de almacenamiento por hidruros. Esto se redujo considerablemente al momento de alimentar el motor directamente del cilindro principal de hidrógeno. Es así como se determinó la importancia de mantener un flujo continuo, estable e ininterrumpido del gas para la correcta operación y estabilidad en la combustión.

La necesidad de un flujo continuo y estable de hidrógeno debe ser considerado para el diseño de la celda electrolítica que provee el hidrógeno y su adaptación al motor en el diseño global de la unidad productora de energía. Es necesario que la celda electrolítica de orina mantenga una operación continua y provea un flujo estable. De lo contrario, es necesario que el diseño de la unidad global contemple un tanque de almacenamiento de hidrógeno con capacidad suficiente para asegurar el flujo requerido en todo momento. Sin embargo, en la unidad global se buscó evitar el almacenamiento de hidrógeno pues esto implica utilizar altas presiones o tecnologías sofisticadas para lograr capturar el gas, lo cual impacta directamente en la eficiencia energética y el costo del sistema. También es importante considerar la línea de alimentación del hidrógeno hacia el motor, buscando que sea ininterrumpida y cuente con la menor cantidad de accesorios y obstáculos posible ya que estos aumentan la caída de presión. Como se mencionó anteriormente, si la presión de alimentación del gas no es suficiente, se producen problemas de combustión anormal, lo cual limitaría el desempeño y estabilidad de la unidad global.

Inicialmente se diseñó el banco de pruebas con una línea de aire comprimido que se pre mezcla con hidrógeno antes de ingresar al motor. Sin embargo, se determinó a través de los ensayos experimentales

que es posible alcanzar una operación adecuada con hidrógeno sin necesidad de esta línea de aire, únicamente eliminando el filtro de aire y abriendo por completo la válvula de ingreso del mismo al carburador. Es así como se decidió eliminar la línea de aire comprimido de la configuración. Esto favorece el diseño global de la unidad, pues el aire comprimido representaría un costo de operación y diseño adicional. También debe considerarse que al eliminarlo, se favorece la eficiencia energética global de la unidad, pues comprimir el aire representa un consumo energético que reduce directamente la cantidad de energía entregada por el sistema.

Otra razón para eliminar la línea de aire comprimido es que en la configuración propuesta para la pre mezcla, tomando en cuenta que la presión del aire siempre será mayor a la del hidrógeno para mantener una mezcla pobre, el primero desplaza al gas combustible dificultando su entrada al motor. Se probó con una relación aire / combustible de 104.95 (g/g) mientras el motor ya se encontraba en operación causando que el mismo se apagara. Esto se debe a que al tener el aire una presión mucho mayor a la del hidrógeno (5 veces mayor), el hidrógeno no puede fluir libremente, pues debe vencer la fuerza ejercida por el aire, y probablemente comenzaría a acumularse previo al dispositivo de pre mezcla aire – combustible, llegando a causar una sobre presión lo cual podría conllevar incluso pre ignición en la línea de alimentación.

A través del banco de pruebas se determinó el comportamiento de la velocidad del motor a distintas relaciones aire / combustible como se muestra en la Figura 28. Tomando en cuenta que la unidad requiere que el motor gire a una velocidad de 2,600 rpm, se determinó que la relación aire / combustible necesaria es de 23.00 g/g, lo cual equivale a una relación estequiométrica (λ) de 0.6750 g/g. Este valor de λ , al ser menor a 1, es considerado como una mezcla rica en combustible. Dado que se utilizará aire a presión atmosférica, la presión de hidrógeno requerida es entonces de 8.711 psi.

Es de suma importancia para el diseño de la unidad la cuantificación del flujo de hidrógeno requerido por el motor, pues de este parámetro depende el diseño de la celda y otros componentes de la unidad. Para esto, se partió inicialmente de una aproximación tomando como referencia el motor utilizado por (Kosar et al., 2011) dando un flujo estimado de 315 g/h bajo el cual se diseñaron otros componentes de la unidad. Este valor fue tomado como base para los cálculos, pues el motor utilizado en este estudio presenta características muy similares (ver Cuadro 2 y Cuadro 5). Posteriormente se midió experimentalmente a la relación aire / combustible requerida para obtener las rpm de funcionamiento de la unidad, encontrando un flujo de 233.44 g/h el cual es cercano al estimado inicialmente pero menor. Esto es beneficioso pues indica que al momento de construir la unidad real se tendrá un aumento en la eficiencia en comparación a la contemplada para el diseño. A partir de este flujo másico, junto a la presión requerida, deben diseñarse la celda electrolítica y los ductos de transporte de hidrógeno.

Diferentes fuentes bibliográficas, como se menciona en el estudio de (Kosar et al., 2011), reportan pérdidas en la potencia al utilizar hidrógeno como combustible, en comparación al funcionamiento del motor cuando se utiliza gasolina. Esto se debe a que al usar hidrógeno, una cantidad másica menor ingresa al cilindro en comparación a la gasolina, debido a la baja densidad de los gases. Esto debe considerarse

para el generador eléctrico u otro dispositivo que decida acoplarse al motor en la unidad. Dependiendo del equipo que se acople, posiblemente será necesario aumentar la velocidad del motor para alcanzar la potencia requerida. Esto puede conllevar un aumento en la presión de hidrógeno requerida y por consiguiente el flujo del mismo.

Se debe controlar la temperatura en la cámara de combustión y en los gases del escape pues los componentes del motor y principalmente los escapes, están diseñados para soportar temperaturas máximas cercanas a los 100°C. Se registraron temperaturas cercanas a esta a lo largo de la operación, lo cual refleja la necesidad de un sistema de ventilación adecuado para no comprometer la integridad de los componentes.

Partiendo de fundamentos termodinámicos se realizó el cálculo de la eficiencia térmica máxima, la temperatura final de la combustión y la relación de compresión máxima posible. Los resultados se muestran en el Cuadro 16. Para calcular la eficiencia térmica máxima, se tomó en cuenta la relación de compresión ofrecida por el motor Honda GX-120. Claramente, al aumentar la relación de compresión, es posible alcanzar mayores eficiencias. Sin embargo, este parámetro no puede aumentarse indefinidamente pues está limitado por la temperatura final de la combustión, la cual debe ser menor a la temperatura de auto encendido del combustible (585°C en este caso). Para la relación de compresión utilizada, se obtiene una temperatura menor a la de auto encendido (423.63°C). Con el fin de conocer la relación de compresión máxima, se calculó su valor tomando la temperatura de auto encendido como temperatura final, obteniendo un resultado de 14.05:1, en comparación al valor de 8.5:1 que ofrece el motor. Esto indica que es posible aumentar la relación de compresión en el motor con el fin de aumentar la eficiencia en la combustión.

Se diseñó un proceso que va de la orina a la energía eléctrica por medio de la electrólisis de la orina humana. El proceso global de la unidad se describe en el diagrama de entradas y salidas en la Figura 43 en el área de Anexos. Este describe un proceso que a partir de orina, hidróxido de sodio, aire y energía eléctrica produce energía eléctrica (parte de la cual se retorna para realimentar el proceso electrolítico), residuos de orina de la electrólisis, gases provenientes de la electrólisis y gases de combustión.

Se elaboraron diagramas de bloques de procesos y operaciones unitarias con el fin de identificar todas las etapas necesarias para el funcionamiento de la unidad. El resultado final de este proceso de diseño es el diagrama de flujo de proceso, en la Figura 30 de este trabajo.

Asociado a este diagrama de flujo se encuentran los resúmenes de flujos de materia, energía y los equipos utilizados que sirven de referencia para comprender el diagrama. Los cuadros de resumen de los balances del diagrama se encuentran en los Cuadros 17 y 18. Un balance global para una hora de operación de la unidad puede encontrarse en el Cuadro 19. El equipo del diagrama de flujo puede observarse a detalle en las hojas de selección de equipo en los Cuadros 20 al 27. Además se presenta un resumen condensado de los equipos con características de operación en los Cuadros 50 y 51 en el área de Anexos. Se hace la salvedad que por efectos prácticos en el resumen de baterías y paneles solares, dada la elevada cantidad de unidades y sus idénticas características, se omite listar todas y únicamente se deja indicado de la primera a la última instancia de estos equipos.

El proceso se calcula a manera de obtener una operación de generación de una hora. La unidad arranca una vez contiene suficiente orina para operar durante una hora y se detiene cuando esta se agota. Se considera que la unidad opera de forma global opera por lotes, pero los circuitos de flujo dentro de la unidad son continuos una vez arranca el proceso.

Del balance de masa presentado en el Cuadro 19 resalta la cantidad de orina necesaria para obtener una hora de operación continua: 178.27 kg, equivalentes según gravedades específicas comunes en la literatura a 178.27L. La masa de orina se calcula con la menor gravedad específica reportada en literatura, puesto que esta representa el mayor volumen por unidad de masa que puede esperarse. Se aclara que la masa requerida se calcula en función de la cantidad estequiométrica de urea consumida por mol de hidrógeno producido y la concentración molar promedio determinada en las muestras de este trabajo: 0.2922 mol/L. Dado que no se estudió el grado de conversión en la celda, puede esperarse que este valor en la realidad aumenta. Es muy ambicioso declarar que la celda en su estado actual es capaz de aprovechar el 100% de la urea.

Se determinó que a lo largo de una semana el descenso en la concentración de urea en la orina almacenada es despreciable, pero más allá de este valor pueden existir descensos de hasta 12% diario. Si se desea operar durante una hora continua es necesario que la acumulación de los 178.27L de orina se logre antes de la semana para garantizar la disponibilidad total de la urea. En función de la producción diaria de orina per cápita que se reporta en la literatura se presenta el Cuadro 48 que muestra la cantidad de días necesarios para obtener el volumen de orina deseado a partir de la población disponible para alimentar la unidad.

De estos resultados se determinó que poblaciones menores a 20 no son favorables para la unidad pues el tiempo de llenado supera el plazo de conservación de la urea. Exactamente 19 personas serían capaces de suministrar el volumen requerido por debajo de la semana. No es recomendable operar con valores límite ya que variaciones estadísticas son de esperarse en poblaciones reducidas; el volumen producido puede aumentar o disminuir, así como la urea descomponerse más o menos rápido en el tiempo. La componente de uso en masa de la unidad en complejos residenciales o comunidades le permite asegurar que la cantidad de productores de orina puede encontrarse más cercana a 100, cantidad de personas capaz de llenar el tanque en 1.27 días. Esta cantidad de productores desestima variaciones estadísticas tanto en producción como descomposición pues son una población mayor que podría amortiguar los efectos de cualquier variación individual.

Del balance de energía presentado en el Cuadro 18 resalta la conexión de las baterías a la celda (EL-101) con una potencia de 27.98 kW. Esta es la potencia requerida para operar una celda a condiciones experimentales capaz de producir un flujo de hidrógeno de 0.315 g/h. Este es el flujo estimado necesario para operar de forma continua el motor de combustión interna, Honda GX-120, a 2600 RPM durante una hora. Se agrega a esto que el hidrógeno que se quema en el motor libera 12.41 kW de energía. Este consumo de energía tiene como resultado la salida de energía eléctrica de la unidad (EL-106) a una potencia de 1.20 kW de corriente alterna. Según la energía que se consume y en la unidad y la que se

obtiene al final del proceso de generación se tiene una eficiencia energética global del 3%. Este número es la principal consideración a mejorar para hacer la unidad técnica y económicamente viable.

La alimentación de orina a la unidad se realiza directamente a un vaso (VS-101) por medio de tubería. Esta etapa no tiene mayores consideraciones críticas más allá de una válvula de cheque (V-101) que evita el retorno de la orina y solución electrolítica del tanque a la tubería. Se propone utilizar un cono de un material como PVC (uno de los materiales más recomendados para el manejo de orina) con un diámetro de 0.15 m para efectuar la recepción de orina de la persona. Sin embargo, condiciones específicas de la instalación y usuarios de la unidad pueden modificar esta parte y se le considera completamente flexible e indiferente para efectos técnicos.

El vaso VS-101 presentado en el Cuadro 20 fue diseñado para almacenar la orina y ser el punto de mezcla de la solución electrolítica. Se seleccionó polietileno por su transparencia, que permite tener un nivel visual en el tanque para determinar el punto en el que ya es posible la operación por un tiempo designado. Se seleccionó un tanque de 200 L de polietileno para este fin, puesto que se encuentra disponible comercialmente. A manera de no agregar otro equipo se decidió acondicionar este vaso de almacenamiento para la preparación de la solución electrolítica de KOH 5M. Según el volumen de 178.27 L de orina se requieren 50.01 kg de KOH para alcanzar esta concentración. Aunque la disolución no afecta considerablemente el volumen por expansión ya que se tiene espacio de cabeza libre en el vaso, sí afecta drásticamente la temperatura ya que es una reacción altamente exotérmica. Para determinar la idoneidad del material y tanque seleccionado se calculó la máxima temperatura que podría alcanzar la mezcla a partir de la entalpia de reacción de la disolución del KOH y la capacidad calorífica del agua como aproximación. El resultado de formar la solución electrolítica en el vaso es un ascenso máximo de temperatura de 35 °C (temperatura a la que saldría la orina del cuerpo humano y la máxima posible esperada de la orina almacenada si no se perdiera calor al ambiente) hasta 104 °C. Esto podría llevar a ebullición la orina presente y es una temperatura suficientemente elevada para afectar la integridad del polietileno. En ese caso se consideró disolver un cuarto del KOH total necesario, lo cual provocaría un ascenso de temperatura de 35 °C hasta 52 °C. Todo esto sin considerar pérdidas de calor al ambiente, las cuales seguramente disminuirán la temperatura de la mezcla desde el proceso de mezclado. Todos los materiales seleccionados para manejar la orina y solución electrolítica, en particular el PE y el PVC para las tuberías, válvulas y accesorios, son capaces de soportar soluciones alcalinas concentradas a esta temperatura de operación.

Para agregar un siguiente cuarto del total de KOH necesario habría que esperar a que el contenido se enfríe nuevamente a 35 °C o alternativamente agregar el resto de la base a manera de mantener la temperatura constantemente en un valor cercano a los 52 °C. En la primera opción se modeló la transferencia de calor de la superficie del vaso al ambiente asumiendo que el ambiente se encuentra a 25 °C. Dependiente de la velocidad del aire puede enfriarse el contenido del tanque en 4.5 horas si está estancado o en 2 horas si viaja a 2 m/s. El tiempo de enfriamiento dependerá fuertemente de las condiciones ambientales y se prolonga cuando se toma en cuenta que el sistema no es estacionario, las

variaciones de la temperatura con el tiempo disminuyen la fuerza motriz de la transferencia de calor y aumentan el tiempo de enfriamiento requerido por encima de estos valores reportados. Incluso descartando la variación del calor disipado al ambiente con el enfriamiento de los contenidos, en el mejor de los casos estudiados podría completarse la preparación de la solución electrolítica en seis horas, pero si el aire no se desplaza a una velocidad apreciable podría tomar hasta 16 horas. La segunda opción, sin embargo, permitiría mantener el diferencial de temperatura constante al menos hasta la adición final de KOH. Sería válido en su totalidad modelarlo como un sistema estacionario. No obstante al momento en el cual ya no se agrega más base a la solución se recae en el mismo problema de disminución de temperatura y la fuerza motriz de la transferencia. Modelar la transferencia de calor en estos sistemas en estado no estacionario con exactitud sobrepasa el alcance de este trabajo. Se concluye que además de elevados tiempos de llenado según la población disponible, la preparación de la solución electrolítica representa aún más tiempo de holgura en el proceso.

Para efectuar la mezcla se agrega al vaso un agitador de dos paletas accionado mecánicamente por el usuario. Se determinaron las dimensiones según proporciones recomendadas por McCabe, *et al.* y se calculó un tiempo de mezcla esperado para la homogenización de la solución. El agitador y sus dimensiones pueden observarse en la hoja del vaso VS-101 en el Cuadro 20. Asumiendo una velocidad de agitación de 60 RPM, factible para un ser humano haciendo girar el agitador, es posible homogenizar la mezcla de la solución electrolítica en un minuto. Se estima que una persona podría girar aún más rápido el agitador, pero se seleccionó una velocidad de rotación moderada para asegurar un tiempo de mezcla y evitar problemas de concentraciones inadecuadas de electrolito para la operación.

Para iniciar la operación se le coloca una válvula de aguja (V-102) que se ajusta para el flujo de alimentación continua a la celda. Esta permite tener capacidad de regulación del flujo de alimentación a la celda ante contingencias como desaceleración en la reacción de electrólisis, pero el flujo es regulado por el fenómeno de transferencia de movimiento. Específicamente se regula físicamente por el tamaño de tubería y la presión a vencer en la celda, por lo que la operación normal permite que se abra la válvula a totalidad.

El diámetro de tubería, presentado entre el resumen de equipo de los módulos en el Cuadro 53 en el área de Anexos, se seleccionó para obtener condiciones favorables de altura del vaso VS-101 en relación a la celda electrolítica R-101 para que el flujo sea por gravedad. Las dos consideraciones para ello son la presión a vencer en la celda y la fricción resultante del trayecto de tubería y accesorios necesarios. Para simplificar el diseño se coloca una tubería vertical con la válvula de aguja y un codo de 90° a la entrada de la celda. La presión interna de la celda debe ser 9 psig para que el motor reciba el hidrógeno suficientemente presurizado para su combustión. Un comparativo de la altura de la descarga del vaso relativa a la alimentación necesaria según diámetros de tubería se presenta en el Cuadro 49 en el área de Anexos.

En dicho Cuadro 49 se evidencia el efecto pronunciado de la fricción con la longitud y disminuido diámetro en la altura necesaria para alimentar la celda. Los tres tamaños de tubería deben vencer la presión de la celda, pero a menor diámetro de tubería (1/2 in) la altura aumenta considerablemente por efecto de una mayor fricción debido al largo de la tubería. Este efecto es aún más pronunciado por el hecho que a menor diámetro es más veloz el flujo y la fricción se expresa en términos de cabeza de velocidad, por lo que los diámetros mayores no solo disminuyen la distancia en la que el flujo está sujeto el fluido a fricción, sino además, el efecto global de la fricción debido a la velocidad. Se toma como opción favorable el uso de tubería de 1 in de diámetro. En la unidad compacta que se habría de proponer se preveía una altura de 0.15 m de la celda a la descarga del vaso, lo cual querría decir que el motor habría de demandar apenas 0.17 psig para su correcta combustión. Este valor se encuentra muy por debajo del que se reporta como requerido, aunque no se descarta la posibilidad de disminuir la presión demandada en futuros estudios para hacer posible una reducción en la altura requerida.

La celda electrolítica (R-101), presentada en el Cuadro 22, es la etapa del proceso más problemática debido a su alto consumo energético como se mencionó anteriormente. La celda propuesta se modela a partir de resultados experimentales a 6V en electrodos de hierro con densidad de corriente de 0.1851 A/cm². Los 6V requeridos son por mucho superiores al potencial que se reporta en la literatura de 0.37V. Este sobre potencial puede ser efecto de la resistencia eléctrica del metal y solución electrolítica seleccionada y requiere trabajo investigativo posterior para determinar si puede descender a valores más cercanos al teórico. La celda debe consumir 4664 A para obtener el flujo de hidrógeno deseado, lo que equivale a utilizar 110 placas de hierro con 400 cm² de área superficial efectiva. El alto consumo de potencia de esta etapa hace imposible la consideración de la unidad porque el abastecimiento de esta potencia a la celda, 27.98 kW, con el fin de producir 1.2 kW de energía eléctrica por la combustión es inaceptable. Los equipos continúan dimensionándose en función de este valor, por ser el único dato certero disponible para los balances, sin embargo, por revisiones en literatura, se propone la posibilidad de mejora de la eficiencia energética de la celda modificando ciertos parámetros de su diseño.

En el diseño propuesto se utilizan electrodos de hierro ya que en etapas experimentales iniciales se desestimó una diferencia en la capacidad productiva de hidrógeno entre este material y níquel. Estas pruebas no consideraban el control de la densidad de corriente y, por lo tanto, no se controlaron las condiciones hasta valores límite de esta propiedad en los que se podría evidenciar la razón por la que el electrodo que se ha confirmado en repetidas ocasiones en la literatura es el de níquel. Se plantea la hipótesis que la densidad de corriente, es decir, la cantidad de corriente por unidad de volumen que puede viajar en el material, es el factor determinante para una elevada eficiencia energética de la electrólisis. La misma se ha confirmado en la literatura puesto que suelen recomendarse electrodos de oro, platino y níquel por su alta conductividad eléctrica, pero el níquel es económicamente más favorable que los otros dos. Appleby *et al.* confirman que en soluciones alcalinas de KOH el níquel resultaba ser el electrodo más favorable. (Appleby *et al.*, 1979) En el diseño propuesto la celda utiliza placas de hierro de 20x20 cm, las cuales fueron modificadas a placas del mismo tamaño de níquel. Posteriormente se consideró la limitante de la densidad

de corriente y se encontró que Lee *et al.* reportan capacidades en el níquel de $0.4 - 0.5 \text{ A/cm}^2$. (Lee *et al.*, 2013) Modificando el área efectiva del electrodo a utilizar, y aumentando la densidad de corriente a 0.23 A/cm^2 , podría reducirse el consumo de corriente a 89.95 A a un mismo sobrepotencial de 6V. Todo esto debe confirmarse de nuevo en el laboratorio y verificar la posibilidad de alcanzar estas condiciones de operación. La propuesta, de confirmarse, resultaría sumamente favorable ya que permitiría consumir 0.539 kW en la celda con 92 electrodos, una reducción en la demanda del 98.4%. Esta potencia es fácilmente proporcionada por una batería de vehículo común (12V, 45A, 540W). Modificando esta potencia tentativa podría alcanzarse una nueva eficiencia global de 9.3%. Naturalmente el uso de níquel aumenta costos frente al hierro, pero la reducción en el suministro de la energía para alimentar la celda podría justificar este costo adicional. El resto de pérdidas se ubican en el proceso de combustión del hidrógeno.

La celda electrolítica requiere un tiempo de residencia de 7 minutos para completar la reacción y se ha diseñado con un espacio entre placas de 5 mm, por lo que cada unidad tiene un volumen de 200 cm^3 . Con el flujo de orina estimado la celda se llenaría en 444 s frente a los 420 s requeridos. Esto quiere decir que el flujo por gravedad de orina tomará más tiempo en llenar la celda y ser descargada al tanque de residuos que lo que se necesita para que reaccione. Este resultado es favorable, ya que asegura que la unidad puede funcionar sin necesidad de regular el flujo de descarga de la celda.

Los gases generados en la electrólisis son hidrógeno, nitrógeno y dióxido de carbono. El dióxido de carbono no escapa de la celda pues se neutraliza con el medio básico y forma carbonato de potasio a un ritmo que no fue determinado experimentalmente por la investigación de la celda. El hidrógeno y nitrógeno sí escapan de la celda de forma conjunta para introducirse al motor. En un mismo compartimiento de celda están el ánodo y cátodo. Esto aumenta la cantidad de N_2 disponible para que en la combustión se transforme en algún óxido de nitrógeno y consuma parte del oxígeno disponible y el calor liberado en la combustión. Por esta razón podría resultar favorable un rediseño de la celda para separar ánodo y cátodo, efectivamente segregando hidrógeno y nitrógeno para obtener una alimentación pura de combustible al motor. La descarga de los gases por la parte superior de la celda debe ser regulada por un sistema de válvula de alivio, que permita la salida cuando se alcance la presión de 9 psig requerida por el motor. Adicionalmente, ante eventos de sobrepresión, debe existir un sistema adicional de liberación de presión independiente de la descarga al motor. Habrá de colocarse una segunda válvula que descargue al ambiente en caso de elevarse por encima de los 10 psig la presión. Una acumulación de hidrógeno presurizado no forma parte del comportamiento deseado de la unidad y representaría un riesgo adicional.

De la celda electrolítica pasa la solución electrolítica agotada de urea al tanque de almacenamiento de residuos TK-101, mostrado en el Cuadro 21. Este también se ha seleccionado de polietileno con una capacidad de 200 L como VS-101. La consideración adicional que tiene este tanque es que debe descargarse y previo a descartarse la solución debe neutralizarse con ácido sulfúrico. Se opta por el ácido sulfúrico por reportarse en literatura como la opción más económica y sin peligro de generación de vapores en ausencia de CO_2 disponible para la neutralización. Ya que la neutralización se ejecuta sobre los 50.01 kg

de KOH agregados se calculó que son necesarios 23.76 L de H_2SO_4 al 100% para completar la neutralización y descartar residuos neutros. Esto, junto con el prolongado tiempo de preparación de la solución electrolítica debido al aumento de temperatura, hace considerable la posibilidad de utilizar un líquido iónico como el 1-butil-3-metil-imidazolio-tetrafluoroborato, que eliminaría la necesidad de realizar una neutralización tan agresiva. Esto naturalmente debe evaluarse según disponibilidad y costos, puesto que ya se reporta en la literatura que su uso provee eficiencias superiores frente a electrolitos ácidos o alcalinos. Este material es irritante a ojos, piel y tracto respiratorio; mas no se cuenta con información respecto a su ecotoxicidad o comportamiento ambiental. Esto quiere decir que habrá de evaluarse si el método adecuado de desecho del electrolito propuesto es más favorable que el del KOH. (Sigma-Aldrich, 2015)

Previo al ingreso al motor se han ubicado válvulas, uniones y un arrestador de flama como parte del diseño del circuito de alimentación al motor. Los detalles de las válvulas seleccionadas por el módulo encargado de la combustión se encuentran en el Cuadro 52, mientras que el resumen de los identificadores de válvulas en el diagrama de flujo de proceso se ubica en el Cuadro 50. La válvula V-106 es una válvula de bola encargada de cerrar la alimentación de hidrógeno ante emergencias. Posteriormente se ubica una válvula de cheque V-103, que evita el retorno de hidrógeno a la celda. La Válvula V-105 es una válvula de mariposa que puede regular la cantidad de aire que ingresa al circuito según la razón de mezcla que se requiera. La razón aire/combustible recomendada fue de 107 g/g y se regula por esta vía. También se coloca una válvula de cheque V-104 en la línea del aire posterior a la válvula de mariposa para evitar el retorno de aire o mezcla de hidrógeno. Finalmente ingresa la mezcla a un arrestador de flama que tiene como objetivo detener la llama ante un evento de explosión descontrolada en el motor y que esta no recorra toda la línea hasta eventualmente hacer estallar el hidrógeno presurizado en la celda.

El motor utilizado experimentalmente y el seleccionado para efectos de este diseño, el Honda GX-120, tiene una velocidad de rotación nominal de 2600 rpm y es la velocidad que debe poder mantenerse una hora con un flujo de alimentación de 0.315 g/h de H_2 . La hoja de selección para este equipo se encuentra en el Cuadro 23. Para lograr la combustión requerida de forma estable, según resultados experimentales, es necesario que la mezcla ingrese a 9 psig, presión que se debe suministrar desde la celda ya que comprimir hidrógeno en un compresor no es un proceso recomendable por el riesgo de explosión. Se estudió la combustión del hidrógeno dentro del motor en base al valor de calor de combustión de -286 kJ/mol. (Green & Perry, 2007)

Se determinó que el flujo de hidrógeno alimentado tiene como resultado la liberación de 12.41 kW de potencia, de los cuales se obtienen 1.8 kW de potencia mecánica en el eje del motor. Esto quiere decir que de toda la energía liberada se recupera el 14.5% para su uso. Mucho del poder de combustión del hidrógeno no es aprovechado en el motor y este es el otro punto de mejora para la unidad. En especial se considera la alta presión demandada que limita el tamaño de la unidad para su funcionamiento por gravedad. Adicionalmente el ingreso de 107 veces más aire que hidrógeno, en términos másicos, quiere decir que se pierde energía calentando y haciendo reaccionar el nitrógeno presente en abundancia en la mezcla, aunque

se estima los efectos expansivos de la combustión se mantendrían similares. Las pruebas al motor fueron realizadas con hidrógeno comercial y con modificaciones mínimas al motor. No se tiene certeza en este punto respecto al comportamiento del motor siendo alimentado por el flujo proveniente directamente de la celda, aunque ya se ha reportado en la literatura que el hidrógeno proveniente de celdas electrolíticas no necesita posterior purificación. Una posibilidad de mejorar la eficiencia del motor, tanto en demanda de presión como demanda de hidrógeno podría obtenerse a través del acondicionamiento mecánico del motor para el uso de este combustible.

A partir de este punto se convierte en una operación electromecánica, puesto que al eje se le acoplan dos alternadores de alta capacidad (AL-101 y AL-102) presentados en el Cuadro 25 y un generador (G-101), detallado en el Cuadro 23 y seleccionado acorde al motor. La unión entre el motor y estos equipos se realiza por medio de tres pares de poleas y fajas. Del generador se extraen los 1.2 kW de potencia eléctrica útil y se le considera la etapa final del proceso. De los alternadores se obtienen 3.24 kW (EL-103 y EL-104) que sirven para recargar parcialmente el arreglo de baterías que alimentan la celda electrolítica (B-101 a B-107). No se acoplan más alternadores debido a que aumentar el número de poleas podría disminuir el torque del eje del motor al punto en que le sea imposible girar según recomendaciones el módulo encargado.

Las siete baterías son necesarias para suministrar la alta demanda de corriente eléctrica de la celda, 4664 A. Su conexión es en paralelo, de tal forma que se conserva el voltaje de 12V de cada una, pero se suman las corrientes de 700 A que posee cada una. El potencial demandado por la celda electrolítica será de 6V, pero como la determinante es la corriente demandada se requieren baterías de alta capacidad de corriente. Por esta razón se seleccionaron baterías de 12V y 700 Ah ya que se encuentran disponibles en el mercado.

Como las baterías suministran los 27.98 kW necesarios y los alternadores únicamente recuperan 3.24 kW es necesario que se suministren 24.96 kW por medio de 78 paneles solares. Esto debido a que es una fuente renovable de energía, pero también es el punto en que el proyecto de la unidad se hace técnica y económicamente desfavorable. A raíz de la alta cantidad de energía y los paneles necesarios, surge la interrogante de por qué no utilizar directamente la potencia de los paneles en lugar de utilizarla para generar 1.2 kW de potencia en la unidad.

El alto consumo energético, su asociada baja eficiencia y el equipo necesario para hacer funcionar el proceso no representan condiciones favorables para el diseño de un prototipo que pueda construirse. Este trabajo ha presentado una cantidad de puntos de posible mejora para disminuir los factores adversos y alcanzar el objetivo de una unidad compacta. Los detalles de los equipos aquí discutidos pueden encontrarse en el área de Anexos Cuadros 52 y 53, donde se encuentra un resumen de lo necesario para que funcione una unidad a condiciones acorde a los resultados de los módulos.

El diseño de la unidad de dimensiones deseadas se planteó en distribuciones de planta y elevación, las cuales se encuentran en las Figuras 31 a la 34 en los resultados. Según lo discutido anteriormente, las

limitantes en cada etapa de la unidad no hacen posible proponer una solución viable a escala deseada. Sin embargo, la distribución se elaboró siguiendo principios de diseño como: apearse al orden lógico del proceso que se tiene en el diagrama de flujo de proceso y la disminución de la longitud de los elementos de transporte de sólidos y fluidos, puesto que esto también disminuye la necesidad de extenso soporte para ello (Toghraer, 2015). La distribución propuesta hace uso de ambas recomendaciones para disponer los equipos en el espacio de forma que los procesos siguen prácticamente dos líneas en el espacio: una vertical y una horizontal. Ambas líneas tienen una disposición de equipo aproximadamente radial respecto al punto medio del proceso que en este caso es la generación eléctrica. Los extremos verticales de la unidad son el vaso VS-101 y el tanque TK-101, este último además funciona como soporte para el equipo electromecánico y la celda electrolítica que se colocan en medio. Esta disposición tiene sentido según el diagrama de flujo ya que la solución electrolítica fluye por gravedad hacia la celda y de esta hacia el tanque. Esta es la línea de proceso vertical en la unidad y es apreciable en las Figuras 33 y 34. La línea horizontal tiene lugar entre el vaso y el tanque e involucra las operaciones de electrólisis, transporte de gases y la generación eléctrica. Esta línea puede observarse a detalle en la Figura 32, en la que el corte realizado permite observar la disposición del equipo ubicado en la parte central de la unidad y que se soporta en la superficie del tanque de residuos. El transporte de gases utiliza de soporte el alternador y el motor alimenta un alternador y un generador a través de su eje acoplado a un sistema de poleas y fajas aprovechando el espacio que hay disponible al lado de la celda electrolítica. La batería se coloca junto a la celda electrolítica para alimentarle directamente.

Para alcanzar estas dimensiones a condiciones favorables de operación aún se requieren una serie de avances en cada etapa antes que esta propuesta sea realizable. Ya que aún se desconoce gran parte de los detalles finales de una potencial unidad a esta escala, se presentan las distribuciones que combinan las etapas requeridas y se ensamblan en torno a una estructura metálica sin inclusión de una carcasa externa. Se decidió no ahondar en este proceso ya que se desconocen las dimensiones y condiciones reales a las que se diseñaría esta unidad de menor tamaño. Las dimensiones utilizadas concuerdan en su mayoría con el equipo seleccionado para el proceso que ya se ha descrito, pero se estima puede reducirse aún más el tamaño del equipo con mejoras futuras.

En el Cuadro 28 se pueden observar los requerimientos técnicos de la unidad; en la misma se contemplan los requerimientos del motor, celda y automatización del sistema. El motor requiere un flujo continuo de hidrógeno de 233 g/h y una presión de 10 psi; esto para que el motor pueda operar continuamente sin interrupciones. Asimismo, se necesitan válvulas de cheque, bola y aguja por seguridad dado que el motor funciona a base de un gas volátil.

La celda requiere un flujo de orina de 173 L/h, lo que representa 173 kg de orina o la orina de 119 personas por un día completo, para poder producir 306 g/h de hidrógeno. Asimismo, requiere una corriente total de 4534.06 Amperios los cuales serán suministrados por las baterías y paneles solares. El área total de

44,000 cm² es necesaria para que exista mayor área de contacto entre la orina y las celdas electrolíticas y estas puedan hacer la separación de moléculas.

Por último, la conexión de todas las partes y la automatización del sistema que involucra el generador, alternador, compresor, baterías y paneles solares requiere que el generador gire a 2300 revoluciones por minuto para que este logre suministrar los 1.2kW de energía que produce la unidad.

Dichos requerimientos son esenciales para la instalación de la unidad en distintos lugares como edificios ya sea de apartamentos u oficinas o ya sea en otros lugares como centros comerciales, casas particulares o escuelas.

Para entender a los clientes seleccionados se realizó el principio de un análisis Canvas en donde se identificaban los trabajos que tenía cada cliente, las complicaciones que se generaban al querer realizar dichos trabajos y los beneficios que esperaban de la unidad de generación de energía. En los Cuadro 29 y 30 se puede visualizar los clientes identificados junto con la descripción de ellos y los resultados en cuanto a los beneficios esperados y los que la unidad les estaría entregando. Si se desea ver el análisis completo, el cuadro original se encuentra en el Apéndice.

Los desarrolladores de proyectos de construcción fueron elegidos en base a que ellos seleccionan proyectos de edificios, centros comerciales y condominios; estos proyectos eran atractivos dado a la gran concentración de personas que manejan estos lugares, lo que significa que mayor flujo o materia prima provocando que mayor ahorro se pueda generar. Asimismo, se vió un incremento en las tendencias de construcción en el área urbana de Guatemala. Según la Asociación Bancaria de Guatemala, durante los primeros tres meses del año 2013 se autorizaron 1977 licencias de construcción. Del total de licencias de construcción del año 2012 el 63.9% correspondió a vivienda, 31.1% ampliaciones, 4.6% comercio y 0.3% a la industria. Para el año 2013, el 62% corresponde a vivienda, 31.70% ampliaciones, 5.8% comercio y 0.5% a la industria

Las casas particulares se eligieron en base a que pueden diseñarse sistemas más pequeños y producir menor cantidad de ahorro, pero es atractivo para las personas dado que las tendencias verdes han ido tomando auge actualmente (justificación en el marco teórico). Las escuelas del sector público son atractivas porque, al igual que los desarrolladores de proyectos de construcción, existe una concentración grande de personas lo que implica que el flujo de materia prima será más grande ocasionando la producción de mayor energía. Hay 495 escuelas en la ciudad de Guatemala.

Se identificó que el beneficio primordial esperado para cada uno de los clientes es el ahorro y que estos reflejen algo significativo en cuanto al precio del producto y asimismo, es el principal beneficio que estaríamos ofreciendo. Posteriormente, es importante para los desarrolladores de proyectos de construcción tanto el ahorro como la imagen que este proyecto les daría externamente; es importante siempre cuidar la imagen para cuidar lo que el cliente percibe de ellos (la empresa). Por otro lado, las casas particulares les importa mucho la satisfacción personal y saber que ellas están contribuyendo al medio ambiente de alguna

manera; en este caso, utilizando menos energía convencional. Por último, el sector público específicamente las escuelas, les importa tanto el ahorro como la imagen que ellas pueden tener enfrente de la población. Es decir, la imagen y confianza que llega a generar el gobierno en la población y también en el área internacional; esto podrían conllevar a la ayuda y participación de entidades internacionales de ayuda social como ONG's.

Para llevar a cabo este objetivo se impartió una encuesta a posibles compradores de la unidad. En dicha encuesta se encontraban tres preguntas donde la primera tenía por objetivo identificar cual era la motivación de compra del cliente; las opciones que tenía el encuestado fueron las siguientes: ahorro, compromiso con el medio ambiente, apoyo al ser producto Guatemalteco, innovación u otra. En el Cuadro 30 puede observar que el motivador más importante para el cliente fue el compromiso con el medio ambiente (58.06%) seguido del ahorro (25.81%). Este resultado cuadra con las crecientes tendencias verdes que hay actualmente. Las personas cada día se preocupan más por el cuidado del medio ambiente y las organizaciones como la ONU también empiezan a preocuparse por el mismo y por ende, promueven el movimiento de las tendencias verdes como un estilo de vida nuevo. Por ejemplo, la ONU denominó el año 2012 como el año oficial de las energías renovables y se inició la iniciativa Energía Sostenible para Todos, Se4All (por sus siglas en inglés Sustainable Energy for All) el cual tiene por objetivo proporcionar energía sostenible para todos la cual involucra energía que sea accesible, limpia y eficiente.

El ahorro fue el siguiente factor más importante para las personas encuestadas; generalmente las tendencias verdes siempre llevan consigo una disminución en costos y es por esta una de las razones por la cual dichas tendencias han ido tomando auge. Asimismo, es importante que el ahorro que se produzca con esta unidad sea significativo dado que al ser una nueva tecnología el precio debe ser alto; sin embargo, el precio no puede llegar a ser alto si el ahorro no va a ser significativo para el usuario.

La siguiente pregunta, ¿por qué eligió la pregunta anterior?, tuvo por objetivo fortalecer la primera pregunta. En los comentarios más relevantes, que se muestran en el Cuadro 31, destacaron aquellos que hablaban sobre las tendencias verdes, cuidar el medio ambiente, crear nueva tecnología que ayude al mismo utilizando desechos humanos (algo que actualmente no es aprovechado). Asimismo, se mostró en los comentarios que a pesar que la innovación y cuidar el medio ambiente es importante, debía de mostrarse reflejado en números el ahorro que produce la unidad y este debería de ser significativo. Realmente, es de total coherencia dichos comentarios porque no se estaría realizando una contribución al medio ambiente si la unidad requiere más energía de la que produce (se requiere energía cuando se realiza la electrólisis); es decir, la unidad debe convertirse eficiente para poder generar un ahorro significativo y que este contribuya a la creación de energía renovable.

La última pregunta de la encuesta establecía lo siguiente: En una escala de 1 – 7, ¿qué tan importantes son los siguientes factores? Los factores que se evaluaron se pueden visualizar en el Cuadro 32. El orden de importancia de los factores se puede visualizar en el Cuadro 33. Para el cliente es sumamente importante que la unidad no genere malos olores ni ruido ya que obtuvieron el primero y segundo lugar

respectivamente. El precio y la unidad fueron los siguientes factores con mayor importancia para el cliente; por lo tanto, el precio de la unidad debe ser significativo en cuanto al ahorro que produce. Es decir, seguramente el precio de este sistema será alto dado que es una nueva tecnología (algo innovador) y al mismo tiempo es una forma de energía verde; esto significa que se debe lograr recuperar todo lo invertido en investigación y desarrollo cuando esta salga al mercado asimismo, el precio podrá ser alto por ser una forma de energía verde y estar dentro de las tendencias que se encuentran de moda o en auge. Sin embargo, también se debe poner atención a la eficiencia del sistema es decir, la relación de consumo de energía vs. Producción de la misma. No se puede establecer un precio alto si el ahorro que va a generar no va a ser significativo para las personas que lo compren. Por otro lado, para poder disminuir el precio de venta se deben disminuir los costos de producción; este análisis será tomado en cuenta más adelante, pero vale la pena mencionar que sin la disminución de costos no es posible disminuir el precio o aumentar el margen de ganancia.

Los últimos factores con menos importancia para el cliente fueron: espacio que ocuparía la unidad, vida útil de la misma y comodidad y estética. Esta última marca algo relevante en la decisión de compra de los clientes; dado que la comodidad y estética viene después de todo lo anterior es posible enfocarse en mejorar la eficiencia del sistema, disminuir costos y transmitir la nueva forma de energía renovable dejando a un lado que la estética del sistema sea lo mejor posible. Esto permitiría que los costos disminuyan ya que no hay que agregarle tantos atributos al sistema, si el ahorro es grande.

En el Cuadro 34 se puede observar el monto invertido en investigación y desarrollo (Q63,037.39). De igual manera, en la misma tabla se puede observar que los módulos de administración, automatización y diseño no presentan ningún valor en dicha área. Esto se debe a que los materiales utilizados para la investigación en dichas áreas no fueron compradas particularmente para la investigación. Por ejemplo, las tres áreas utilizaron la computadora para elaborar los resultados sin embargo, dicha computadora llevaba el fin de utilizarla en los estudio de cada uno de los estudiantes por ende, no se tomaron en cuenta dichos costos.

El monto de recursos humanos suma Q36,250.00; para sacar este cálculo se tomó en cuenta el salario promedio de un ingeniero recién graduado el cual fue de Q10,000.00. El monto anterior fue dividido entre las horas de trabajo en un mes (8 horas durante 5 días) y se obtuvo un salario de Q41.67 por hora; este se multiplicó por las horas que cada estudiante invirtió en la investigación y así se logró obtener el total de recursos humanos.

En el Cuadro 35 se puede observar los costos específicos de la unidad así como el costo total de la misma, la cual suma Q5,682,794.70. Se puede observar que el 93.74% de los costos son representados por los 76 paneles solares con los cuales se alimenta a la celda para que esta pueda realizar la electrólisis de urea. Por lo tanto, para bajar costos es necesario aumentar la eficiencia de la celda para que esta consuma menos energía y lograr disminuir la cantidad de paneles requeridos para alimentar a la misma. Si no se lograra disminuir la cantidad de energía que esta consume, sería una mejor alternativa comprar solo los

paneles ahorrándose todos los demás costos. Es muy importante lograr disminuir los costos dado que con base en las encuestas el precio de la unidad se encontraba en el tercer requisito más importante para el cliente; por lo tanto, si no se logra disminuir los costos esta unidad no será atractiva para los posibles compradores.

El sistema logra producir 1.2kW de energía con 178.27kg de orina. Una persona orina un promedio de 1.5kg diarios. Para poder producir esos 1.2kW de energía son necesarias 119 personas; sin embargo, se asumió que solo se tiene disponible el 30% de la orina de una persona diaria. Esto se debe a que generalmente las personas no pasan todo el día en un solo lugar, se mantienen constantemente en movimiento. Al contemplar lo anterior, se obtuvo que eran necesarias 396 personas para producir 1.2kW de energía.

Con la producción de 1.2kW se logra obtener un ahorro de Q1.37 tomando en cuenta que el costo del kWh es de Q1.14. Dicho ahorro, en un año, representa Q11,983.68 lo cual es significativo. Sin embargo, al compararlo al costo del equipo de aproximadamente 5 millones el ahorro que produce la unidad no se vuelve considerable y la unidad deja de ser rentable; para lograr recuperar la inversión se necesitarían 474 años. Para cambiar este punto de vista y la unidad no produzca pérdidas (para recuperarla inversión en tres años) se realizó un análisis en donde el ahorro ideal en un año representa Q1,894,264.90 (dato que se puede ver en el Cuadro 38; ese ahorro requiere que la unidad produzca 1,661,635.88 kW al año lo que representa 189.68 kWh. Esto significa que la eficiencia de la unidad debe aumentar en un 158%.

En el Cuadro 38, se puede observar el costo beneficio actual del sistema. Los valores para el primer año, segundo y tercero son: 0.0021, 0.0042, 0.0063 respectivamente. Esto significa que por cada Q1.00 invertido se recuperan Q0.0021. Por lo tanto, se estableció otro tipo de escenario “ideal” para lograr recuperar la inversión, en ahorro, en un lapso de tres años. Para ello el costo beneficio aumentó a 0.33, 0.66 y 1 para el primer, segundo y tercer año respectivamente. Es decir, por cada Q1.00 invertido la unidad debe generar en ahorro Q0.33.

Los tres distintos tipos de clientes que se identificaron fueron: centros comerciales, casas particulares y escuelas. Esencialmente, se eligieron los centros comerciales y escuelas por ser lugares donde hay mucha concentración de personas lo que indicaría que se pueda producir más energía; asimismo, podemos indicar que los edificios de oficinas tienen un comportamiento similar a los centros comerciales por el flujo de personas y asimismo los edificios de apartamentos tienen un comportamiento similar a las escuelas por el tiempo que permanecen las personas en esos lugares. Las casas particulares fueron atractivas dado que el producto que se está investigando puede ser lanzado al mercado como un producto innovador de producción de energía verde y con las crecientes tendencias de cuidado del medio ambiente, se planteó la hipótesis que sería un producto atractivo para las personas particulares que desean ahorrar y cuidar el medio ambiente. Por lo tanto, se analizó la implementación de la unidad en el centro comercial Oakland Mall. Con un consumo de luz de Q150,000.00 mensual y alrededor de 640,000 visitas al mes se obtuvo que la energía que demandan por mes y hora es: 131,578.95 kW y 182.75 kWh respectivamente. Al asumir que

el 60% de las personas utilizaban los servicios sanitarios del centro comercial se obtuvo que la unidad lograba producir 1,163.15 kW por mes y 1.62 kWh. En términos de dinero, el centro comercial demanda aproximadamente Q208.33 por hora de energía y la unidad puede surtirle Q1.84 por hora; esto es tan solo un 0.88% de lo que demanda el mismo. En otras palabras, el beneficio que se estaría proporcionando es muy bajo comparado con el costo de 5 millones de la unidad. El rendimiento de la unidad en un año es del 0.28% que es bajo sin embargo, cabe mencionar que la unidad tiene posibilidad de mejora es decir, esta tiene oportunidad de crecimiento mientras se mejore la eficiencia de la misma.

Para realizar el análisis en las escuelas se tomó en cuenta una normativa salvadoreña la cual establecía que en los salones de clase la iluminación debe ser de mínimo 5 watts por metro cuadrado y la cantidad máxima de estudiantes por aula es de 40. Con base en datos del ministerio de educación de Guatemala se obtuvo, de una muestra, que la escuela más grande contenía 1082 estudiantes; esto provoca que se requieran 27 aulas en dicha escuela. En base a los datos anteriores se obtuvo que la escuela demanda 6762.50 W o 6.76 kWh, si se asume que se utilizan todos los salones de clase. Esto representa Q7.71 de gasto en energía por hora. Con base en la cantidad de estudiantes que tiene la escuela y asumiendo que 60% de los niños utilizan los sanitarios por lo menos una vez al día (30% de la orina) se obtiene que la unidad surte 0.06 kWh lo que representa Q0.07 de ahorro. En un año, el ahorro equivale a Q97.81. Este valor es bajo dado que se asumió que en la escuela permanecen 7 horas los niños, 20 días al mes y 10 meses al año.

Por último se encuentra el análisis de costo beneficio en las casas particulares. Para este caso, no se realizó un análisis de costo beneficio. Con base en la Asociación Bancaria Mundial, el consumo en kWh anual por persona en Guatemala es de 557kWh. Tomando en cuenta que hay cinco personas promedio en un hogar y el 50% de la energía que gastan al año lo consumen en sus casas, el gasto anual por hogar promedio en Guatemala es de 1,392.88 kWh. Al suponer que el 60% de la orina la desechan en casa, se obtienen 4.50kg de orina diaria y 135kg de orina al mes. Al tomar en cuenta que la unidad necesita 178kg de orina para la producción de 1.2kW la unidad no es rentable para casas particulares. Esto se debe a que no se produce la cantidad suficiente de orina al mes como para producir 1.2kW y asimismo, al tener guardada la orina esta primero perdería periodo de utilización.

Actualmente, la unidad no es rentable para ningún tipo de clientes seleccionados en este trabajo. Sin embargo, si se logra mejorar la eficiencia del sistema (que este consuma menos energía de la que produce) entonces la unidad si sería viable especialmente para los centros comerciales.

IX. CONCLUSIONES

- A. Se diseñó un proceso que permite la producción de energía eléctrica a partir de la combustión de hidrógeno proveniente de la electrólisis de urea en orina humana, determinando los parámetros de operación.
- B. Las variables a modificar para que el motor Honda GX-120 funcione adecuadamente con hidrógeno como combustible son la alimentación del gas, la relación aire / combustible, la apertura de la válvula del acelerador y la válvula de aire. La principal modificación física realizada es la adaptación de una línea de hidrógeno, sustituyendo parcialmente el carburador.
- C. La relación aire / combustible requerida para que el motor Honda GX-120 trabaje a 2,600 rpm es de 23.00 (g/g), la cual equivale a una presión de hidrógeno de 8.711 psi al utilizar aire a presión atmosférica (14 psi). Bajo estas condiciones, el flujo requerido de hidrógeno es de 233.44 g/h.
- D. El principal requerimiento del motor Honda GX-120 en la unidad generadora de energía es que debe asegurarse que el flujo de alimentación de hidrógeno al motor sea constante, ininterrumpido y estable para evitar problemas de combustión anormal.
- E. La eficiencia térmica máxima del motor Honda GX-120 con hidrógeno es de 57.15% a la relación de compresión de 8.5:1, siendo posible su aumento hasta un valor máximo de 14.05:1, tomando en cuenta la temperatura de auto encendido de hidrógeno.
- F. Las condiciones de operación alcanzadas por los otros módulos, no permiten el diseño de un prototipo sin antes aplicarse una serie de mejoras a parámetros del proceso como: reducción de la demanda de potencia de la celda, modificación de la solución electrolítica, capacidad de realizar la electrólisis del agua en la orina y reducir la demanda de volumen elevado de orina, acondicionamiento del motor para combustión de hidrógeno para elevar su eficiencia y la disminución de la presión de la mezcla combustible del motor.
- G. Debido a limitaciones técnicas, no se presentan planos de una unidad prototipo compacta, en su lugar se proporciona la distribución recomendada de los equipos en el caso que las limitaciones de la celda electrolítica y el motor de combustión interna sean resueltas.

- H. Es importante el precio y el ahorro generado por la unidad sin embargo, el motivador de compra de la unidad de generación de energía más importante para el cliente fue el compromiso con el medio ambiente con un punteo de 58%.
- I. El costo total de la investigación de la unidad de generación de energía a partir de la orina fue de Q63,037.39 en donde los módulos de administración, automatización y diseño no representaron ningún monto más que el de recursos humanos. Por otro lado, el costo total de la unidad suma Q5,682,794.70 en donde los paneles solares que son utilizados para alimentar la unidad al momento donde se realiza la electrólisis representan un 93% de los costos.
- J. El ahorro actual que representa la unidad es de Q11,983.68 en un año que al compararlo con el costo de Q5,682,794.70 de la unidad no se vuelve significativo, indicando que la unidad no es rentable; para que la unidad se vuelva rentable y se recupere la inversión en tres años se debe producir un ahorro de Q1,894,264.90 anual lo que representa 1,661,635.88kWh de energía. Esto significa que la eficiencia de la unidad debe aumentar en un 158%.

X. RECOMENDACIONES

- A. Modificar la línea de alimentación de combustible al motor para inyectar el hidrógeno de forma más directa a la cámara de combustión removiendo por completo el carburador. Para esto se requiere construir un acople sólido que permita fijar la manguera que transporta el hidrógeno desde donde es producido hasta la cámara de combustión.
- B. Investigar más a fondo otras alternativas de formación de la pre mezcla aire – combustible. Se puede evaluar utilizar gases que no sean combustible, como por ejemplo los gases del escape.
- C. Cambiar componentes del motor para una combustión más estable con hidrógeno. Principalmente, deben considerarse bujías de bajas temperaturas (idealmente con punta de alambre fino de iridio) y un sistema de ventilación que asegure que la temperatura de operación no superará lo establecido para el correcto funcionamiento e integridad de los empaques del motor.
- D. Realizar una medición de gases de combustión a diferentes relaciones aire / combustible. Deben cuantificarse los siguientes gases: CO, CO₂, hidrocarburos y principalmente NO_x. Esto también podría ser tomado en cuenta para seleccionar una relación aire / combustible de operación. Adicionalmente, sería valioso realizar el estudio de gases de combustión tanto con hidrógeno, como con gasolina para evaluar si realmente las emisiones disminuyen al utilizar el primero como combustible.
- E. Integrar un sensor de flujo másico en la entrada de hidrógeno para cuantificar con mayor exactitud el consumo del motor a diferentes velocidades y relaciones aire / combustible.
- F. Medir la potencia y el torque entregados por el motor a diferentes relaciones aire / combustible y su comparación con los resultados obtenidos al utilizar gasolina.
- G. El sistema trabaja con un potencial mayor al requerido para la electrólisis del agua, por lo que se recomienda estudiar el proceso de lisis del agua restante luego de agotar la urea en la orina. Esto reduciría la cantidad de orina necesaria para el funcionamiento de la unidad.

- H. Evaluar la potencia demandada por la celda electrolítica operando con placas de níquel similares a las sugeridas en este trabajo y mejorar el diseño de los electrodos para tener elevada área superficial.
- I. Se recomienda rediseñar la celda electrolítica para que sea posible la separación de los gases producidos en ánodo y cátodo para no introducir más nitrógeno a la combustión si se opera únicamente con la electrólisis de urea.
- J. Si se realiza electrólisis del agua se sugiere que todos los gases de la celda sean dirigidos al motor ya que así será alimentado con el oxígeno puro producto de la separación electroquímica.
- K. Investigar e implementar alternativas para la solución electrolítica para eliminar los problemas de enfriamiento y neutralización.
- L. Aplicar las modificaciones mecánicas de acondicionamiento de motores de combustión interna de gasolina para la quema de hidrógeno y evaluar un posible aumento en la eficiencia.
- M. La demanda de presión de hidrógeno que presenta el motor de combustión interna es otro parámetro que necesita refinarse si espera operarse la unidad sin la necesidad de bombas o compresores que consuman energía adicional.
- N. Implementar las mejoras posibles con futuros avances en los módulos del proyecto que permitan la creación de una unidad que sea técnica y económicamente viable para procesar el desperdicio humano
- O. Se recomienda tomar en cuenta los requerimientos técnicos establecidos de la unidad para evitar problemas de operación.
- P. Para continuar con el megaproyecto sería interesante lograr identificar el mejor modelo de negocios para la unidad y crear una red eficiente; asimismo, lograr realizar parte de la responsabilidad social con la que debe cumplir cada empresa.
- Q. Se recomienda seguir cuantificando los costos de investigación y desarrollo para saber el costo de la misma; de esta manera, se puede realizar en un futuro un análisis de recuperación de los recursos invertidos en investigación y desarrollo mediante la comercialización del producto.

- R. Para mejorar el proyecto presentado en este trabajo de investigación es muy importante lograr reducir el costo de los paneles solares ya que estos elevan fuertemente el costo de la unidad y provocan que la unidad no sea rentable. Posteriormente, se recomienda evaluar detalladamente al sector de centros comerciales dado que en base a los resultados de este estudio dicho sector fue el más atractivo para la unidad.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- Anónimo. 2013. *El gran caudal de energía renovable; una opción para Guatemala*. Revista de la Cámara de la Construcción de Guatemala. L1: 6 – 10.
- Appleby, A. J., Crepy, G., & Jacquelin, J. (1978). *High efficiency water electrolysis in alkaline solution*. International Journal of Hydrogen Energy, 3(1), 21–37. [http://doi.org/10.1016/0360-3199\(78\)90054-X](http://doi.org/10.1016/0360-3199(78)90054-X)
- Asociación Bancaria de Guatemala. 2013. *Sector Construcción*. <http://abg.org.gt/pdfs/marzo2013/SECTOR%204%20CONSTRUCCIÓN%20MARZO%202013.pdf>. [consultado el 16 de Junio del 2015].
- Asociación Bancaria de Guatemala. 2015. *Sector Energía*. <http://abg.org.gt/web2014/wp-content/uploads/2015/05/SECTOR-8-ELECTRICO-MARZO-2015.pdf> [consultado el 16 de Junio del 2015].
- Asociación de generadores con energía renovable. 2015. *Energía renovable en Guatemala*. <http://www.ager.org.gt/energia-renovable-en-guatemala/>. [consultado el 13 de agosto del 2015].
- Bakshi, U.A. y M.V.Bakshi. (2009). *Synchronous Machines*. Technical Publications.
- Banco Centroamericano de Integración Económica. 2014. *Análisis de Mercado Guatemalteco de energía renovable*. <http://www.bcie.org/uploaded/content/category/1075503721.pdf>. [consultado el 13 de agosto el 2015].
- Bauer, H. (2003). *Técnica de los gases de escape para motores de gasolina*. Reverte.
- Bhaskar, V., Hari Prakash, R., & Prasad, B. D. (2013). *Hydrogen Fuelled IC Engine - An Overview, I(I)*.
- Boggs, B. K., King, R. L., & Botte, G. G. (2009). *Urea electrolysis: direct hydrogen production from urine*. Chemical Communications, (32), 4859–4861. <http://doi.org/10.1039/B905974A>
- Boggs, B., R. King y G. Botte. 2009. *Urea electrolysis: direct hydrogen production from urine*. The Royal Society of Chemistry. Inglaterra. 32. Pp. 4859-4861.
- Boxwell, M. (2012). *Solar Electricity Handbook: A Simple, Practical Guide to Solar Energy: how to Design and Install Photovoltaic Solar Electric Systems*. Greenstream Publishing.
- College of the Desert. (2001). *Hydrogen Use in Internal Combustion Engines*. Extraído de <https://www.scribd.com/doc/176933340/College-of-the-Desert-Hydrogen-Use-in-Internal-Combustion-Engines>

- Encyclopedia Britannica. 2014. *Electrolysis, Chemical Reaction*. <http://www.britannica.com/science/electrolysis>. [consultado el 1 de septiembre del 2014].
- Entrepreneurial Insights. 2015. *Business model generation, business modelo canvas: Creating a value proposition*. <http://www.entrepreneurial-insights.com/business-model-canvas-creating-value-proposition/>. [consultado el 13 de agosto del 2015].
- Fàbrega Ramos, M. (2009). *Hidrógeno: Aplicación en motores de combustión interna*. Extraído de <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/6533>
- García, Helena; Corredor, Alejandra; Calderón, Laura; et.al. 2013. *Análisis costo beneficio de energía renovables no convencionales en Colombia*. FEDESARROLLO, centro de investigación económica y social. http://www.fedesarrollo.org.co/wp-content/uploads/2011/08/WWF_Analisis-costo-beneficio-energias-renovables-no-convencionales-en-Colombia.pdf. [consultado el 2 de septiembre del 2014].
- Gonzalez García, Zerpa Cruz. (2008). *Generalidades de la contabilidad y sistemas de costos [ONLINE]*. LA HABANA: <http://www.gerencie.com/generalidades-de-la-contabilidad-y-sistemas-de-costos.html>.
- Green, D., & Perry, R. (2007). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, Eighth Edition. McGraw Hill Professional.
- Grupo del Banco mundial. 2015. *Indicadores del desarrollo mundial para Guatemala*. <http://datos.bancomundial.org/pais/guatemala>. [consultado el 1 de octubre del 2015].
- Hauch, A., Ebbesen, S. D., Jensen, S. H., & Mogensen, M. (2008). *Highly efficient high temperature electrolysis*. Journal of Materials Chemistry, 18(20), 2331–2340. <http://doi.org/10.1039/B718822F>
- Honda. (2014). *Engine model details GX 120 - Honda Engines*. Extraído Octubre 11, 2015, de http://www.honda-engines-eu.com/web/eec-public-site/engine-model-details?p_p_id=enginedetail_WAR_enginedetail&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-4&p_p_col_count=1&enginedetail_WAR_enginedetail_display=power-curve&e=13
- Ibacache, Jimena; Espinoza, Gretchen; Ortega, Macarena; et.al. 2010. *Sistemas Biológicos*. <http://udlasistemabiologico.blogspot.com>. [consultado el 28 de mayo del 2015].
- Instituto Nacional de Estadística. 2014. *Caracterización de la República de Guatemala*. <http://www.ine.gob.gt/sistema/uploads/2014/02/26/L5pNHMXzxy5FFWmk9NHCrK9x7E5Qqvvy.pdf>. [consultado el 15 de agosto del 2015].
- International Energy Agency. 2013. 28/10/2015 *Transition to Sustainable Buildings*. Revista de la IEA. LI: 5-7
- Joaquim Corominas, Josep Puig. 1990. *La Ruta de la Energía*. Barcelona, España. Editorial Anthropos. 475 pags.

- Kahmaran, E. (2015). *Analysis of a hydrogen fueled internal combustion engine*. İzmir Institute of Technology.
- Kosar, M., Ozdalyan, B. and Celik, M. 2010. *The Usage of Hydrogen for Improving Emissions and Fuel Consumption in a Small Gasoline Engine*. Turkey. Journal of Thermal Science and Technology. Vol 31, Núm 2, Pp. 101-108
- Kosar, M., Ozdalyan, B., & Celik, M. B. (2011). *The Usage of Hydrogen for Improving Emissions and Fuel Consumption in a Small Gasoline Engine*, 101–108.
- Kotler, Philip; Armstrong, Gary. 2008. *Fundamentos del Marketing*. Pearson Educación. México. 8va ed.
- Lee, C.-Y., Wu, M.-W., Nguyen, V. C., & Chuang, H.-W. (2013). *Current Density Effect on Nickel Electroplating Using Post Supercritical CO₂ Mixed Watts Electrolyte*. International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, 7(7), 488–493.
- Leroy, R. L., Bowen, C. T., & Leroy, D. J. (1980). *The thermodynamics of aqueous water electrolysis*. Journal of the Electrochemical Society, 127, 1954–1962.
- Liu, F. (2004). *CFD Study on Hydrogen Engine Mixture Formation and Combustion*. Cuvillier Verlag.
- López C, Guillem; Vegara, Josep María. 2013. *El análisis de coste beneficio y la toma de decisiones*. Instituto de Estudios Fiscales. http://www.upf.edu/pdi/cres/lopez_casasnovas/pdf/glc_vegara_pg69_2012.pdf [consultado en Septiembre del 2015].
- Machol, Katie. 2011. *Harnessing the power of pee: Researchers develop technology to turn urine into hydrogen fuel*. <http://www.techgrowthohio.com/docs/Harnessing%20the%20power%20of%20pee.pdf>. [consultado el 28 de mayo del 2015].
- McAllister, S., Chen, J.-Y., & Fernandez-Pello, A. C. (2011). *Thermodynamics of Combustion*. In S. McAllister, J.-Y. Chen, & A. C. Fernandez-Pello, *Fundamentals of Combustion Processes* (pp. 15–47). New York, NY: Springer New York. Extraído de http://link.springer.com/10.1007/978-1-4419-7943-8_2
- Medline Plus. 2013. *Volumen urinario en 24 horas*. <https://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/article/003425.htm>. [Consultado el 1 de octubre del 2015].
- Ministerio de Energía y Minas. 2014. *Balance Energético de Guatemala*. <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2012/06/INFORME-BALANCE-ENERGETICO-2014.pdf> [consultado el: 28 de Agosto del 2015].
- Peacock, A. (2000). *Handbook of Polyethylene: Structures: Properties, and Applications*. CRC Press.
- Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., & West, R. E. (2004). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. McGraw-Hill.

- Previs, Val. 2011. *Turning “pee” into power is the mission of E3 Technologies.* http://www.hivelocitymedia.com/innovationnews/Peepower3_10_11.aspx. [consultado el 28 de mayo del 2015].
- Rose, C. et al. 2015. *The characterization of feces and urine: A review of the literature to inform advanced treatment technology.* Critical Reviews in Environmental Science and Technology. Inglaterra. Vol 45, Núm 17. Pp. 1827-1879.
- Rubén Smolje, Alejandro. 2012. *La gestión de los costos de investigación y desarrollo.* Universidad de Buenos Aires. Argentina. 20 págs.
- Sarmiento, Pedro. 2007. *Energía Solar en Arquitectura y Construcción.* Santiago, Chile. 347 pags.
- Schönning, C., T. S. (2004). Guidelines on the Safe Use of Urine and Faeces in Ecological Sanitation Systems. EcoSanRes Programme. 44pp.
- Sinnot, R. 2009. *Chemical Engineering Design.* Butterworth-Heinemann. Estados Unidos. 1054pp.
- Smith, J. M., Van Ness, H. C., Abbott, M. M., & Alatorre Miguel, E. (2007). *Introducción a la termodinámica en ingeniería química.* México: McGraw-Hill.
- Stojić, D. L., Marčeta, M. P., Sovilj, S. P., & Miljanić, Š. S. (2003). *Hydrogen generation from water electrolysis—possibilities of energy saving.* Journal of Power Sources, 118(1–2), 315–319. [http://doi.org/10.1016/S0378-7753\(03\)00077-6](http://doi.org/10.1016/S0378-7753(03)00077-6)
- Subramanian, K. S., Meranger, J. C., & Connor, J. (1985). *Effect of container material, storage time and temperature on determinations of cadmium levels in human urine.* Talanta, 32(5), 435–438.
- Titow, M. V. (2012). *PVC Technology.* Springer Science & Business Media.
- Toghraer, M. (2015). *Plot Plan Design: Process Requirements.* Chemical Engineering, 52–57.
- U.S. Energy Information Administration,. (2013). *EIA projects world energy consumption will increase 56% by 2040.* Extraído June 25, 2015, de <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=12251>
- University of Utah. (2015). *Urinalysis.* University of Utah. Extraído de <http://library.med.utah.edu/WebPath/TUTORIAL/URINE/URINE.html>
- Verhelst, S., & Wallner, T. (2009). *Hydrogen-fueled internal combustion engines.* Progress in Energy and Combustion Science, 35(6), 490–527. <http://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.08.001>
- White, C. M., Steeper, R. R., & Lutz, A. E. (2006). *The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review.* International Journal of Hydrogen Energy, 31(10), 1292–1305. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.12.001>
- World Bank. (2012). *Fossil fuel energy consumption.* Extraído Junio 23, 2015, de: <http://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.COMM.FO.ZS>

- World Health Organization. (2010). *Standards for materials used in plumbing systems*. WHO. 11pp.
- Yvon, K., & Lorenzoni, J.-L. (2006). Hydrogen-powered lawn mower: 14 years of operation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(12), 1763–1767. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.12.012>
- Zeng, K., & Zhang, D. (2010). *Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications*. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 307–326. <http://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.002>.

XII. ANEXOS

A. Datos experimentales obtenidos

Cuadro 44. Revoluciones por minuto obtenidas a diferentes relaciones aire / combustible alimentando el motor a partir de tanques auxiliares de hidrógeno. El aire se encuentra a presión ambiental (14 psi).

Presión de H₂ (± 0.5 psi)	Revoluciones (± 1 rpm)
3.0	930
3.0	845
3.5	908
4.0	1060
4.0	1083
4.2	1082
4.5	1270
5.0	1674
6.0	1675
6.0	1836
6.0	se apagó
7.0	1953
8.0	2030

Cuadro 45. Revoluciones por minuto obtenidas a diferentes relaciones aire / combustible alimentando el motor directamente del cilindro de hidrógeno. El aire se encuentra a presión ambiental (14 psi).

Presión de H₂ (± 0.5 psi)	Revoluciones (± 1 rpm)
5.0	1389
6.0	1739
6.0	1838
6.0	1648
7.0	1984
7.0	1950
7.0	1970
8.0	2323
8.0	2294
8.0	2303
8.5	2478
9.0	2665
9.0	2673
9.0	2643
9.0	2633
9.0	2723
9.0	2738
9.0	2777
9.5	2855

Cuadro 46. Parámetros de operación para cuantificación de flujo de hidrógeno.

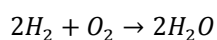
Parámetro	Valor
Temperatura del cilindro de gas	(22.6 \pm 0.1) $^{\circ}$ C
Presión inicial del cilindro de gas	(1475 \pm 50)psi
Presión final del cilindro de gas	(1420 \pm 50)psi
Tiempo de operación	(7.73 \pm 0.01)min

Cuadro 47. Medición de temperaturas en diferentes puntos del motor en operación.

Ubicación	Temperatura ($\pm 0.1^\circ\text{C}$)
Cámara de combustión	53.0
Escape exterior	68.0
Gases en el escape	100.0
Acelerador	24.4
Válvulas de escape	74.0

B. Cálculos realizados

1. Relación aire / combustible (AFR) estequiométrica. Partiendo de la reacción que describe la combustión de hidrógeno (Ecuación 5)



La cantidad de aire requerida estequiométricamente por cada mol de H_2 se calcula de la siguiente manera. Se considera que el aire está compuesto en un 21% (v/v) por O_2 y 79% (v/v) por N_2 :

$$1 \text{ mol } H_2 \times \frac{1 \text{ mol } O_2}{2 \text{ mol } H_2} \times \frac{100 \text{ mol aire}}{21 \text{ mol } O_2} = 2.38 \frac{\text{mol aire}}{\text{mol } H_2}$$

$$1 \text{ mol } H_2 \times \frac{1 \text{ mol } O_2}{2 \text{ mol } H_2} \times \frac{100 \text{ mol aire}}{21 \text{ mol } O_2} \times \frac{28.85 \text{ g aire}}{1 \text{ mol aire}} \times \frac{1 \text{ mol } H_2}{2.02 \text{ g } H_2} = 34.08 \frac{\text{g aire}}{\text{g } H_2}$$

2. Relación aire / combustible (AFR) real. Tomando en cuenta la presión del hidrógeno y del aire, la relación aire / combustible (AFR) se calcula de la siguiente manera. Para el ejemplo se utiliza una presión de hidrógeno de 5.0 psi y de aire de 14 psi. Para realizar la equivalencia de presiones a masa se toma en cuenta que, bajo las mismas condiciones ambientales para ambos gases, la relación entre las presiones es equivalente a la relación molar

$$\frac{14 \text{ psi}}{5.0 \text{ psi}} = 2.80 \frac{\text{mol aire}}{\text{mol } H_2}$$

$$AFR = \frac{2.80 \text{ mol aire} \times \frac{28.85 \text{ g aire}}{1 \text{ mol aire}}}{1 \text{ mol } H_2 \times \frac{2.02 \text{ g } H_2}{1 \text{ mol } H_2}} = 40.07 \frac{\text{g aire}}{\text{g } H_2}$$

3. Relación de equivalencia real. Partiendo de la definición de la relación de equivalencia (Ecuación 3)

$$\phi = \frac{m_{as}}{m_a}$$

Se utiliza la relación AFR real y estequiométrica calculadas previamente, para obtener el valor de ϕ como se muestra a continuación

$$\phi = \frac{m_{as}}{m_a} = \frac{34.08 \frac{g \text{ aire}}{g H_2}}{40.07 \frac{g \text{ aire}}{g H_2}} = \mathbf{0.8503}$$

4. Relación estequiométrica real. Partiendo de la definición de la relación de equivalencia (Ecuación 4)

$$\lambda = \frac{1}{\phi} = \frac{m_a}{m_{as}}$$

Se utiliza se utiliza el valor de ϕ calculado previamente como se muestra a continuación

$$\lambda = \frac{1}{\phi} = \frac{1}{0.8503} = \mathbf{1.176}$$

5. Eficiencia térmica teórica. Para este cálculo se utiliza la Ecuación 6

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}}$$

donde η_t es el rendimiento termodinámico teórico, V_1/V_2 representa la relación de compresión y γ la relación de calores específicos. Tomando en cuenta el valor de $\gamma = 1.4$ (Fàbrega Ramos, 2009) y la relación de compresión $(V_1/V_2) = 8.5$ (Honda, 2014) se realiza el siguiente cálculo:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{(8.5)^{1.4-1}} = 0.5715 = \mathbf{57.15\%}$$

6. Relación de compresión máxima. La relación de compresión máxima está limitada por la temperatura de auto ignición del hidrógeno. Estos parámetros están relacionados a través de la Ecuación 1

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}$$

donde V_1/V_2 representa la relación de compresión, T_1 la temperatura inicial absoluta y T_2 la temperatura final absoluta. Tomando en cuenta que la temperatura de auto encendido del hidrógeno es de 585°C

(Fàbrega Ramos, 2009), y una temperatura inicial 25°C (ambiental), la máxima relación de compresión se puede despejar de la siguiente manera

$$\left(\frac{V_1}{V_2}\right) = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$$

$$\left(\frac{V_1}{V_2}\right) = \left[\frac{(585 + 273.15)K}{(25 + 273.15)K}\right]^{\frac{1}{1.4-1}} = \mathbf{14.05}$$

7. **Temperatura final.** Conociendo la relación de compresión de operación, según las especificaciones del motor, es posible conocer la temperatura final alcanzada en el ciclo de combustión de Otto. Para calcularla se utiliza la Ecuación 1 como se muestra a continuación

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}$$

$$T_2 = (25 + 273.15)K(8.5)^{1.4-1} = 701.78K$$

$$t_2 = 701.78 - 273.15 = \mathbf{428.63\text{ }^\circ\text{C}}$$

8. **Flujo de combustible requerido estimado teóricamente.** Como aproximación inicial para el diseño de la unidad y del banco de pruebas se estimó el flujo de hidrógeno requerido a partir del estudio de (Kosar *et al.*, 2011). En la Figura 12 se muestra el comportamiento de la potencia respecto a la velocidad del motor y en la Figura 13 el consumo específico de combustible (SFC por sus siglas en inglés). Es así, como a 2,600 rpm, se obtiene un consumo específico de combustible de 175 g/kWh y una potencia nominal de 1.8 kW. Con estos datos, es posible calcular el flujo másico de la siguiente forma:

$$\dot{m} = SFC \times P$$

Ecuación 12

donde \dot{m} representa el flujo másico, SFC el consumo específico de combustible y P la potencia. El resultado obtenido con los datos anteriormente mencionados es:

$$\dot{m} = 175 \frac{g}{kWh} \times 1.8 kW = \mathbf{315 \frac{g}{h}}$$

9. **Flujo de combustible requerido.** Para calcular el consumo de hidrógeno del motor, se midió la presión inicial y final en el cilindro del gas en cierto período de tiempo. También se midieron las condiciones de operación: temperatura y volumen de gas en el cilindro. Se utilizó la ecuación de los gases ideales:

$$pV = nRT$$

Ecuación 13

donde p representa la presión, V el volumen, n la cantidad de moles, T la temperatura absoluta y R la constante universal de los gases. Despejando los moles de la ecuación anterior, se obtiene el siguiente resultado para los moles iniciales:

$$n_0 = \frac{p_0 V}{RT} = \frac{(1475 \text{ psi})(96.8 \text{ L})}{(22.6 + 273.15)K \left(1.20591 \frac{\text{psi L}}{\text{mol K}}\right)} = 400.34 \text{ mol}$$

De la misma forma se calcularon los moles finales en el cilindro, obteniendo un resultado de 385.41 mol. Tomando en cuenta el tiempo de operación se calcula el flujo del gas:

$$\dot{n} = \frac{n_f - n_0}{t} = \frac{(400.34 - 385.41) \text{ mol}}{7.73 \text{ min}} = 1.93 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$\dot{m} = 1.93 \frac{\text{mol}}{\text{min}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \times \frac{2.01588 \text{ g}}{1 \text{ mol}} = 233.44 \frac{\text{g}}{\text{h}}$$

C. Diagramas de diseño

Figura 43. Diagrama de bloques de entradas y salidas

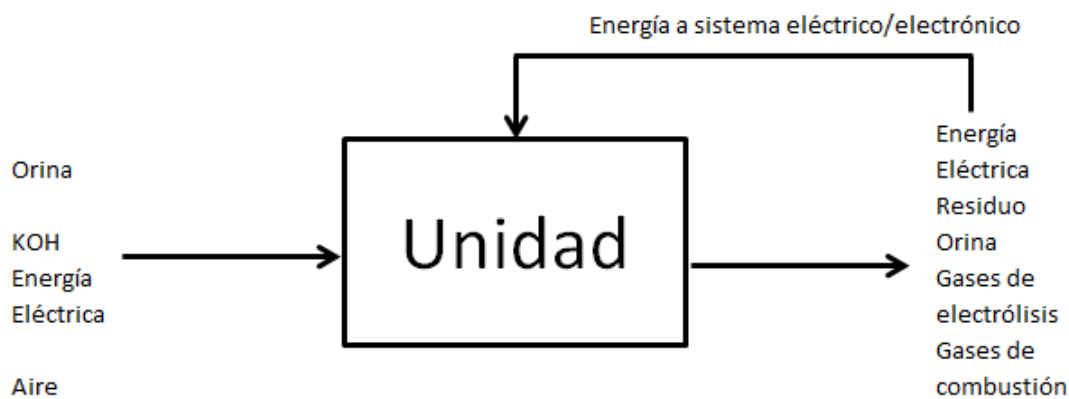
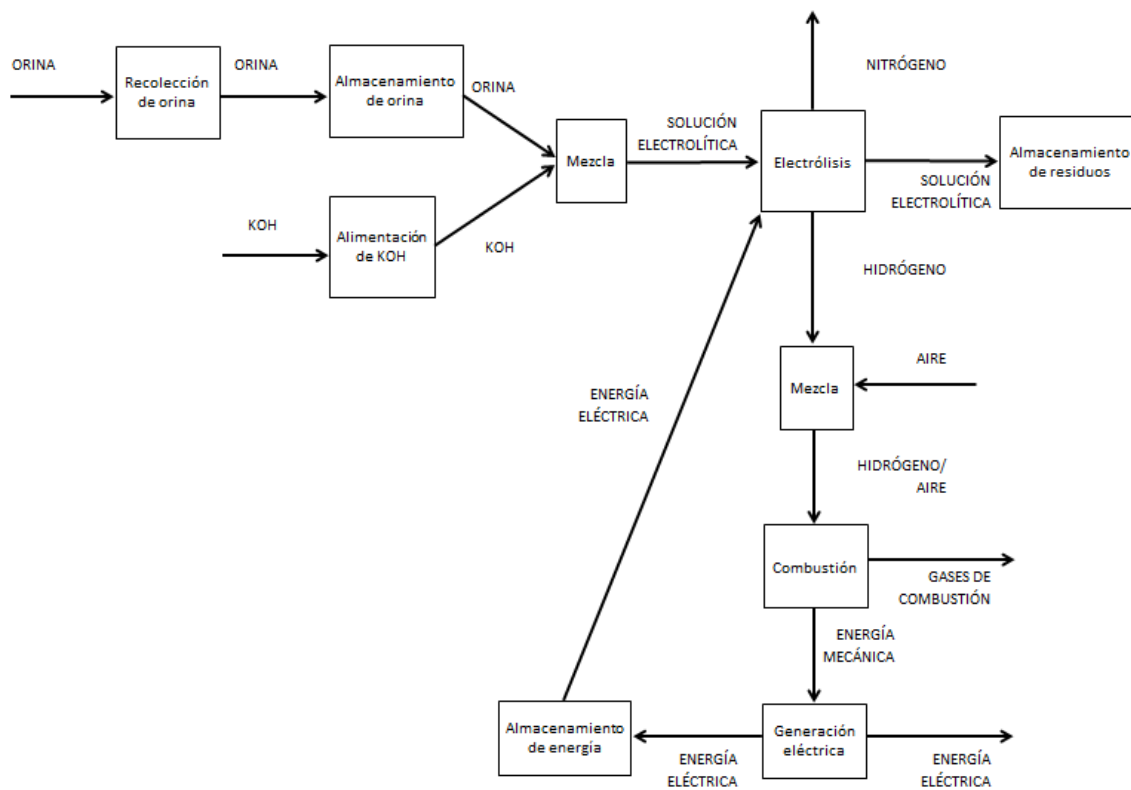


Figura 44. Diagrama de bloques de operaciones unitarias



D. Cálculos de diseño

La cantidad de orina requerida para la hora de funcionamiento se obtiene por relación estequiométrica como se muestra en el Cálculo 1.

Cálculo 1. Cantidad de orina necesaria para suplir la demanda productiva de hidrógeno

$$0.315 \frac{kg}{h} H_2 (1 h) \left(\frac{1 kmol H_2}{2.01588 kg H_2} \right) \left(\frac{1000 kmol Urea}{3 kmol H_2} \right) \left(\frac{1 L Orina}{0.29217 mol Urea} \right) \left(\frac{1 kg Orina}{1 L Orina} \right) = 178.27 kg Orina$$

Para que la celda funcione requiere potencia eléctrica, la misma viene determinada por características del sistema como el flujo de hidrógeno producido, el área del electrodo y su densidad de corriente. Todo esto se obtiene de los resultados experimentales del módulo de la celda. De tal forma que el área total requerida, a 6V en condiciones de la celda estudiada es de:

Cálculo 2. Área superficial necesaria en la celda

$$A = \frac{N_{H_2} n F}{J} = \frac{0.0422 \frac{mol}{s} * 2 * 96485 \frac{C}{mol}}{0.1851 \frac{A}{cm^2}} = 45258 cm^2$$

A: Área superficial en cm^2

N_{H_2} : Flujo molar de hidrógeno producido en mol/s

n: Cantidad de moles transferidos en electrólisis

F: Constante de Faraday en C/mol

J: Densidad de corriente en A/cm^2

(Mazloomi, Sulaiman, & Moayedi, 2012)

La corriente que dicha celda consume se determina como sigue por relación directa de la corriente y áreas de la celda propuesta y la experimental, ya que se mantiene constante la densidad de corriente:

Cálculo 3. Corriente necesaria en la celda

$$45258 cm^2 \left(\frac{0.988 A}{9.588 cm^2} \right) = 4664 A$$

El consumo de potencia de la celda se obtiene a partir del voltaje y corriente como sigue:

Cálculo 4. Potencia eléctrica demandada en la celda

$$P = VI = 6V * 4664A = 27982 W$$

P: Potencia en W

V: Voltaje en V

I: Corriente en A

(Leroy, Bowen, & Leroy, 1980)

Los mismos cálculos fueron realizados para el estimado del consumo de una celda de níquel con mayor densidad de corriente y área de electrodo.

Para el funcionamiento de la celda según condiciones experimentales es necesario que la solución electrolítica tenga una concentración de KOH 5M. A partir de la cantidad de orina necesaria se calcula la cantidad a agregar de KOH:

Cálculo 5. Cantidad de KOH requerido en solución electrolítica

$$178.27 \text{ kg Orina} \left(\frac{1000 \text{ L}}{1000 \text{ kg}} \right) \left(\frac{5 \text{ mol KOH}}{1 \text{ L Orina}} \right) \left(\frac{56.1056 \text{ kg KOH}}{1000 \text{ mol KOH}} \right) = 50.01 \text{ kg KOH}$$

Según la estequiometría de la electrólisis, la producción de 0.315 kg/h de H₂ tendrá como resultado el siguiente flujo másico de Nitrógeno proveniente del ánodo (el CO₂ que se produce no escapa como gas, se neutraliza en la solución):

Cálculo 6. Flujo de Nitrógeno producido en la celda

$$0.315 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ H}_2 \left(\frac{1 \text{ kmol}}{2.0159 \text{ kg}} \right) \left(\frac{1 \text{ kmol N}_2}{3 \text{ kmol H}_2} \right) \left(\frac{28.013 \text{ kg N}_2}{1 \text{ kmol N}_2} \right) = 1.459 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ N}_2$$

El balance de masa con base en una hora de operación en la celda electrolítica se obtiene a partir de la cantidad de orina y KOH que ingresa menos la cantidad de H₂ y N₂ que se liberan, obteniéndose la masa de los residuos:

Cálculo 7. Masa de residuos de celda electrolítica

$$178.27 \text{ kg Orina} + 50.01 \text{ kg KOH} - 0.315 \text{ kg H}_2 - 1.459 \text{ kg N}_2 = 226.51 \text{ kg Residuos}$$

Para la combustión del hidrógeno en el motor se requiere una relación másica aire/combustible de 107:1 según el módulo encargado, por lo que la cantidad de aire necesaria para la combustión es de:

Cálculo 8. Flujo de aire requerido para combustión

$$0.315 \frac{kg}{h} H_2 \left(\frac{107 kg Aire}{1 kg H_2} \right) = 33.705 \frac{kg}{h} Aire$$

La cantidad de mezcla de combustible que ingresa al motor es la suma de las corrientes de hidrógeno y aire, que es también la cantidad de gases de combustión resultante:

Cálculo 9. Flujos de gases de mezcla combustible y gases de combustión

$$0.315 \frac{kg}{h} H_2 + 33.705 \frac{kg}{h} Aire = 34.020 \frac{kg}{h} Gases$$

La potencia que regresa al arreglo de baterías es la resultante de la suma de potencia en los dos alternadores (1.62 kW cada uno) y los 78 paneles solares (0.32 kW cada uno):

Cálculo 10. Potencia generada para recarga de arreglo de baterías

$$2 * 1.62 kW + 78 * 0.32 kW = 28.2 kW$$

De la cuales se reabastece por completo la potencia utilizada en la celda, el excedente es energía no aprovechable que si el circuito no la demanda no se proporciona.

Con estos cálculos se completó el balance de masa y energía del diagrama de flujo de proceso. Por ser esta la base se muestran los flujos másicos por hora de operación, sin embargo, al presentar el proceso continuo se muestran por segundo. Para realizar la conversión se realizó un cálculo adicional a cada flujo:

Cálculo 11. Conversión de flujos másicos por hora a segundo

$$0.315 \frac{kg}{h} H_2 \left(\frac{1 h}{3600 s} \right) = 8.75 * 10^{-5} \frac{kg}{s} H_2$$

Tras los balances se realizaron cálculos para equipo y detalles del proceso. El volumen necesario de orina a almacenar viene dado por la masa y la densidad reportada en literatura:

Cálculo 12. Volumen de orina a almacenar

$$178.27 \text{ kg Orina} \left(\frac{1000 \text{ L}}{1000 \text{ kg}} \right) = 178.27 \text{ L Orina}$$

El recipiente seleccionado fue de 200L según disponibilidad comercial, teniendo un margen de excedente de capacidad del 12%. Este es un recipiente rectangular diseñado para aplicaciones de aguas residuales. Sus dimensiones son: altura de 0.5 m, largo de 1.05 m y ancho de 0.57 m con un espesor de pared 0.005 m.

El tiempo para obtener esa cantidad de orina de fuentes humanas se calcula a partir de la producción promedio per cápita de orina. Se muestra el cálculo para el caso de una población de 100 personas:

Cálculo 13. Tiempo requerido para abastecer la orina con 100 personas

$$178.27 \text{ L Orina} \left(\frac{1 \frac{\text{Día}}{\text{Persona}}}{1.4 \text{ L}} \right) 100 \text{ Personas} = 1.27 \text{ Días}$$

Cuadro 48. Tiempo promedio necesario para proporcionar el volumen de orina a la unidad según tamaño de población

Población	Tiempo en llenar (días)
1	127.34
5	25.47
10	12.73
20	6.37
100	1.27

A este recipiente de le agrega un agitador de turbina para mezclar el hidróxido de sodio. Se utilizan las relaciones de dimensiones dadas por McCabe *et al.* a partir del diámetro equivalente del recipiente para determinar el tamaño del agitador:

Cálculo 14. Diámetro equivalente del recipiente

$$D_t = 4 \frac{A}{P} = 4 * \frac{1.05m * 0.57m}{2(1.05m + 0.57m)} = 0.728 \text{ m}$$

D_t : Diámetro del tanque (equivalente) en m

A: Área de sección transversal en m^2

P: Perímetro de sección transversal en contacto con el líquido en m

El diámetro del agitador viene dado por la siguiente relación:

Cálculo 15. Diámetro del agitador

$$D_a = \frac{1}{3} D_t = \frac{1}{3} * 0.728 \text{ m} = 0.243 \text{ m}$$

D_a : Diámetro del agitador en m

D_t : Diámetro del tanque en m

La altura de posición del agitador respecto al fondo del tanque se determina por la siguiente relación:

Cálculo 16. Altura de posición del agitador

$$E = \frac{1}{3} D_t = \frac{1}{3} * 0.728 \text{ m} = 0.243 \text{ m}$$

E: Altura del agitador respecto al fondo del tanque en m

D_t : Diámetro del tanque en m

La altura de las turbinas se obtiene de la siguiente relación:

Cálculo 17. Altura del agitador

$$H = \frac{1}{5} D_a = \frac{1}{5} * 0.243 \text{ m} = 0.049 \text{ m}$$

H: Altura del agitador en m

D_a : Diámetro del tanque en m

El largo de las aspas de la turbina se determina como sigue:

Cálculo 18. Largo del aspa

$$L = \frac{1}{4} D_a = \frac{1}{4} * 0.243 \text{ m} = 0.061 \text{ m}$$

L: Largo del aspa en m

D_a : Diámetro del tanque en m

El tiempo de mezcla para la homogenización de la solución electrolítica en el recipiente se obtiene de las ecuaciones presentadas por McCabe, et al. Se asume una velocidad de agitación manual de 60 RPM. Las características del fluido se asumen similares al agua y la viscosidad se extrae de la misma fuente.

Cálculo 19. Número de Reynolds para la agitación

$$Re = \frac{n D_a^2 \rho}{\mu} = \frac{1 \text{ s}^{-1} * 0.243^2 \text{ m}^2 * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0.00089 \text{ Pas}} = 66165$$

Re: Número de Reynolds, adimensional

n: Frecuencia de agitación

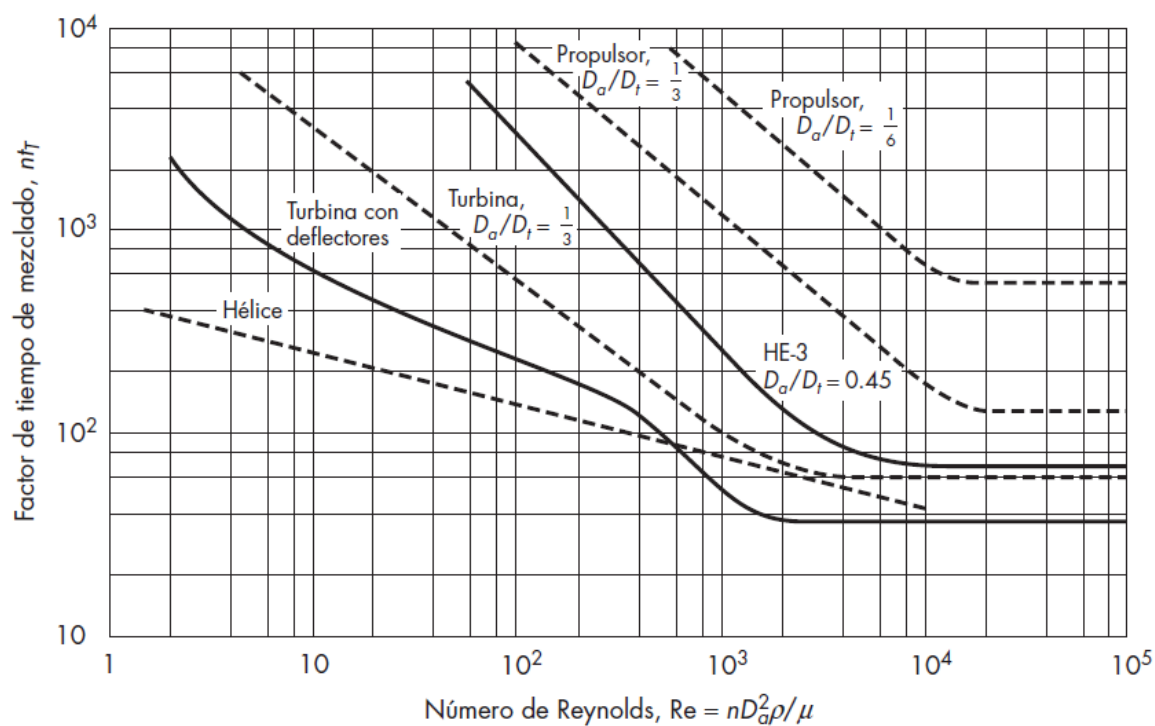
D_a : Diámetro del agitador

ρ : Densidad del fluido en kg/m^3

μ : Viscosidad del fluido en Pas

De la Figura 45 se obtiene el factor de tiempo de mezcla para una turbina operando en el régimen de flujo que indica el número de Reynolds. El resultado es $nt_T = 60$.

Figura 45. Tiempos de mezclado en tanques agitados.



(McCabe, Smith, & Harriott, 2005)

El tiempo de agitación viene dado por la relación:

Cálculo 20. Tiempo de agitación

$$t = \frac{nt_T}{n} = \frac{60}{1s^{-1}} = 60 s$$

La disolución del hidróxido de sodio es un proceso exotérmico con un calor de solución de -57.61 kJ/mol. (Green & Perry, 2007). Para calcular la temperatura final del volumen de orina al disolver una masa dada de KOH se asume que la orina tiene la misma capacidad calorífica que el agua y que la temperatura inicial de la mezcla es 35 °C. Se realiza un balance de energía para obtener la temperatura final por medio de los siguientes cálculos:

Cálculo 21. Energía liberada por disolución de una masa de KOH

$$50.01 \text{ kg KOH} \left(\frac{1000 \text{ mol KOH}}{56.11 \text{ kg KOH}} \right) \left(\frac{-57.61 \text{ kJ}}{1 \text{ mol KOH}} \right) = -51352 \text{ kJ}$$

Cálculo 22. Balance de energía en proceso de disolución de KOH

$$\Delta H = nR \int_{T_1}^{T_2} \frac{Cp}{R} dT$$

$$51352 \text{ kJ} = 9774 \text{ mol Orina} * 8.314 \frac{\text{J}}{\text{molK}} \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1000 \text{ J}} \right) \int_{308.15\text{K}}^{T_2} 8.712 + 1.25 * 10^{-6}T - 1.8 * 10^{-14}T^2 dT$$

ΔH : Cambio de entalpía en kJ

n: Cantidad de materia a que se transfiere energía en mol

R: Constante universal de los gases ideales en J/molK

T1: Temperatura inicial de la mezcla

T2: Temperatura final de la mezcla

Cp: Calor específico de la mezcla

De la cual por métodos numéricos de bisección se obtiene una T2 de 377.82K ó 104.67 °C. De forma similar se efectúa el mismo cálculo con una masa de KOH de 12.50 kg, que eleva la temperatura de la mezcla a un valor admisible de 52.47 °C con la transferencia de 12837 kJ de energía.

El tiempo de enfriamiento se obtiene de modelar la transferencia de calor por convección natural del recipiente al ambiente. Se utiliza toda el área superficial del recipiente como área efectiva de transferencia de calor. No se toma en cuenta convección en la parte interna por la agitación, conducción en las paredes ya que son muy delgadas, una velocidad del aire circundante de 2 m/s y se asume una temperatura del ambiente de 25 °C. El tiempo menor necesario para enfriar la solución a 52.47 °C se obtiene de:

Cálculo 23. Correlación empírica del coeficiente de convección del aire en función de su velocidad

$$h_c = 10.45 - v + 10v^{0.5} = 10.45 - 2 \frac{m}{s} + 10 \left(\frac{2m}{s} \right)^{0.5} = 22.59 \frac{W}{m^2K}$$

(Green & Perry, 2007)

h_c : Coeficiente de transferencia de calor por convección en W/m²K

v: Velocidad del aire en m/s

Cálculo 24. Flujo de transferencia de calor por convección

$$Q = h_c A (T_{\text{recipiente}} - T_{\text{ambiente}}) = 22.59 \frac{W}{m^2 K} * 2.817 m^2 * (52.47^\circ C - 25^\circ C) = 1748 W$$

(McCabe *et al.*, 2005)

h_c : Coeficiente de transferencia de calor por convección en $W/m^2 K$

A: Área de transferencia de calor en m^2

$T_{\text{recipiente}}$: Temperatura que alcanza la solución en la disolución en $^\circ C$ (K)

T_{ambiente} : Temperatura del ambiente en $^\circ C$ (K)

Cálculo 25. Tiempo necesario para transferir el calor de la reacción exotérmica

$$t = 12837 kJ \left(\frac{1000 J}{1 kJ} \right) \left(\frac{1 s}{1748 J} \right) \left(\frac{1 h}{3600 s} \right) = 2.04 h$$

Para aproximar el volumen de ácido sulfúrico necesario para neutralizar la masa de hidróxido de sodio agregada para la solución electrolítica se utiliza una relación estequiométrica y se obtiene un volumen de ácido puro a utilizar. Los datos fisicoquímicos se obtienen de Perry *et al.*

Cálculo 26. Volumen de H_2SO_4 necesario para neutralizar una masa de KOH

$$50.01 kg KOH \left(\frac{1 kmol KOH}{56.11 kg KOH} \right) \left(\frac{1 kmol H_2SO_4}{2 kmol KOH} \right) \left(\frac{98.08 kg H_2SO_4}{1 kmol H_2SO_4} \right) \left(\frac{1 L H_2SO_4}{1.84 kg H_2SO_4} \right) \\ = 23.76 L H_2SO_4$$

La determinación de diámetro, altura y longitud de tubería para transportar la solución electrolítica a la celda se realiza simultáneamente por método iterativo a través de la ecuación de Bernoulli. Se toma en cuenta la fricción en la tubería y accesorios (un codo de 90° y una válvula de aguja abierta), la presión interna de la celda y velocidad de flujo. Se muestra el cálculo a partir de un diámetro de 1 in.

Cálculo 27. Velocidad de flujo de orina

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{4.95 * 10^{-5} \frac{m^3}{s}}{5.07 * 10^{-4} m^2} = 0.098 \frac{m}{s}$$

V: Velocidad en m/s

Q: Caudal en m^3/s

A: Área en m^2

Cálculo 28. Número de Reynolds

$$Re = \frac{VD^2\rho}{\mu} = \frac{0.098 \frac{m}{s} * 0.0254 m * 1000 \frac{kg}{m^3}}{0.00089 Pas} = 2789$$

Re: Número de Reynolds, adimensional

V: Velocidad del fluido en m/s

D: Diámetro de la tubería en m

ρ : Densidad del fluido en kg/m³

μ : Viscosidad del fluido en Pas

Cálculo 29. Factor de fricción de Fanning para flujos laminares

$$f = \frac{16}{Re} = \frac{16}{2789} = 0.006$$

f: Factor de fricción de Fanning, adimensional

Re: Número de Reynolds, adimensional

Cálculo 30. Ecuación de Bernoulli para determinación de altura requerida

$$\frac{P_a - P_b}{\rho} + g(Z_a - Z_b) - \left(4f \frac{L}{D} + K_{codo} + K_{válvula}\right) \frac{V^2}{2} = 0$$

$$\frac{(101325 - 163361)Pa}{1000 kg/m^3} + 9.81 \frac{m}{s^2} (Z_a - 0)m - \left(4 * 0.006 * \frac{L}{0.0254} + 0.75 + 4.5\right) \frac{0.098^2 \frac{m^2}{s^2}}{2} = 0$$

En la que los subíndices indican el punto de referencia: 'a' es la descarga del vaso de solución electrolítica y el punto 'b' es la alimentación de la celda. No aparecen las cabezas de velocidad en la ecuación ya que son idénticas y se cancelan los términos.

P: Presión en Pa

ρ : Densidad del fluido en kg/m^3

g: Aceleración debido a la gravedad en m/s^2

Z: Altura en m

f: Factor de fricción de Fanning, adimensional

L: Longitud de tubería en m

D: Diámetro de tubería en m

K_{codo} : Factor de fricción de codo de 90° , adimensional

$K_{\text{válvula}}$: Factor de fricción de válvula de aguja abierta

Las ecuaciones y valores de factores de fricción se obtuvieron de McCabe, et al. La resolución por métodos iterativos resulta en una altura de la alimentación $Z_a = 6.34$ m y una longitud de tubería $L = 6.39$ m. Los 0.05 m de tubería adicional a la altura son debido a que del codo se agrega un corto trayecto de tubería antes de alimentar la celda. El cálculo se repite desde el inicio modificando el diámetro de tubería.

Cuadro 49. Altura de descarga de VS-101 relativa a la alimentación de R-101 por diámetro de tubería

Díametro (in)	Altura (m)	Longitud de tubería (m)
1/2	14.35	14.40
1	6.34	6.39
1 1/2	6.34	6.39

La celda presenta un tiempo de residencia para la reacción de 7 minutos (420 s), según el caudal dado y las dimensiones de los espacios libres de la celda se calcula el tiempo que toma recorrer todo su volumen. Según especificaciones del módulo de la celda, se tienen 110 celdas equivalentes dentro del equipo con volúmenes de 200mL:

Cálculo 31. Tiempo de residencia en celda según caudal

$$100 \text{ Celdas} \left(\frac{200 \text{ mL}}{1 \text{ Celda}} \right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1 * 10^6 \text{ mL}} \right) \left(\frac{1 \text{ s}}{4.95 * 10^{-5} \text{ m}^3} \right) = 444 \text{ s}$$

El cálculo de la eficiencia energética de la celda se realiza con el cociente de la potencia eléctrica de salida y la energía alimentada a la celda y la liberada en la combustión. Con la base de una hora, los cálculos son como sigue:

Cálculo 32. Potencia liberada en combustión del hidrógeno

$$0.315 \frac{kg}{h} H_2 \left(\frac{1 h}{3600 s} \right) \left(\frac{1000 mol H_2}{2.016 kg H_2} \right) \left(\frac{-286 kJ}{1 mol H_2} \right) = 12.41 kW$$

Cálculo 33. Eficiencia energética del proceso de generación

$$\eta = \frac{1.2 kW}{12.41 kW + 28 kW} = 3.0 \%$$

Este cálculo se repite con el estimado de potencia consumida por una celda con las mejoras propuestas con el resultado de 9.3% de conversión de la energía.

E. Resumen y especificación del equipo

Cuadro 50. Resumen de tanques, vasos, reactores y válvulas

Tanques						
Número	Capacidad (m3)	Temperatura (°C)	Presión (bar)	Orientación	Material	Contenido
TK-101	0.2	25	1.01325	Horizontal	Polietileno	Residuos de celda, básicos
Vasos						
Número	Capacidad (m3)	Temperatura (°C)	Presión (bar)	Orientación	Material	Contenido
VS-101	0.2	40	1.01325	Horizontal	Polietileno	Solución electrolítica
Reactores						
Número	Capacidad (m3)	Temperatura (°C)	Presión (bar)	Consumo (kW)	Orientación	Material
R-101	0.022	25	1.70300505	27.982	Horizontal	Acero, Placas de hierro, Empaque de teflón
Válvulas						
Número	Tipo	Tamaño (in)	Material	Uso		
V-101	Cheque	1/2	PVC	No permitir retorno de orina		
V-102	Aguja	1/2	PVC	Regular flujo de solución electrolítica		
V-103	Bola	1/4	Cobre	Llave de paso de hidrógeno		
V-104	Cheque	1/4	Cobre	No permitir retorno de hidrógeno o mezcla		
V-105	Mariposa	1/4	Cobre	Regular cantidad de aire que puede ingresar		
V-106	Cheque	1/4	Cobre	No permitir retorno de aire o mezcla		

Cuadro 51. Resumen de equipo electromecánico

Arrestador de flama				
Número	Temperatura (°C)	Presión (bar)		
AF-101	25	1.70300505		
Motores				
Número	Cilindraje (cm3)	RPM	Torque (Nm)	Potencia (kW)
AF-101	118	2600	7	1.8
Alternadores				
Número	RPM	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Potencia (kW)
AL-101	2600	13.5	120	1.62
AL-102	2600	13.5	120	1.62
Generador				
Número	RPM	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Potencia (kW)
G-101	2300	120	10	1.2
Baterías				
Número	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Potencia (kW)	
B-101...	12	700	8.4	
B-107	12	700	8.4	
Paneles Solares				
Número	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Potencia (kW)	Área (m2)
PS-101...	36.7	8.78	0.32	2
PS-178	36.7	8.78	0.32	2

Cuadro 52. Resumen de selección de equipo del Megaproyecto (1)

Operación	Equipo(s)	Comentario	Cantidad	Especificaciones
Recolección de orina	Embudo	Recolección directa de orina	1	15cm diámetro, Polietileno
Almacenamiento de orina	Tanque	Material resistente al medio básico, traslúcido para tener nivel visual	1	Polietileno, 200L
Alimentación de KOH	Abertura en tanque de almacenamiento	Material se ingresa por completo	1	Boquilla 5cm diámetro, con tapa roscada
Mezcla electrolítica	Agitador manual	Reducción de consumo de energía	1	Eje con hélice, accionado desde afuera de tanque de almacenamiento
Electrólisis	Celda electrolítica	Celda de placas para compactar área en relación a volumen	1	Dos placas externas de acero inoxidable, empaque de teflón
	Placas de hierro	Cada una es un reactor	110	Hierro, 20x20cm ²
Almacenamiento de residuos	Tanque	Material resistente al medio básico, traslúcido para tener nivel visual	1	Polietileno, 200L
Mezcla aire	Arrestador de flama	Evita el paso accidental de la flama hacia la fuente de combustible	1	Witt, F100-17N-ES 17 bar. Tamaño de 1/4in
	Válvula cheque	Evita el retorno de las corrientes gaseosas	1	1/4in, cobre
	Válvula de bola	Regulación de paso de flujo de hidrógeno, para cierre de emergencia	1	1/4in, cobre
	Válvula de mariposa	Regulación de flujo de aire para mezcla	1	1/4in, cobre
	Válvula de aguja	Regulación de flujo de alimentación de mezcla a motor	1	1/4in, cobre
Combustión	Motor de combustión interna	Unidad disponible para prototipo	1	Honda GX120

Cuadro 53. Resumen de selección de equipo del Megaproyecto (2)

Operación	Equipo(s)	Comentario	Cantidad	Especificaciones
Generación eléctrica	Generador eléctrico	Generador diseñado para acoplarse al motor disponible	1	Powerland PD2000
	Alternador	Alternador industrial de alto amperaje	1	Denso Heavy Duty, Agregar rectificador a 12V DC
	Paneles solares	Fuente renovable de energía	78	SW320 XL Silver Mono Pallet (29).
Almacenamiento de energía	Arreglo de 7 baterías	Baterías de alta potencia para suplir alta demanda energética	7	Duncan Navigator 12V 700A
Transporte orina y residuos	Tubería	Material resistente al medio básico, alta disponibilidad	-	1 in, PVC
	Válvula de aguja	Regulación de flujo de alimentación a celda	-	1 in, PVC
Transporte de gases	Mangueras	Flexibles, transporte de gases fríos y a baja presión no necesita mayor soporte estructural	-	1/4in, PVC
Cableado eléctrico	Cables cobre a celda	Suficientes cables para soportar carga de corriente dividida, minimiza el área necesaria y hay que separar la corriente para cada celda	120	Calibre CSA 6mm ² , AWG 9, 39A máxima carga
	Cables cobre a baterías	Cables de alta corriente para alimentar arreglo de baterías	2	De alternadores: Calibre CSA 25mm ² , AWG 3, 140A máxima carga
			78	De paneles: Calibre CSA 16mm ² , AWG 5, 73A máxima carga

F. Costos e inversión del proyecto

Cuadro 54. Costos del proyecto

Módulo	Material	Costo en moneda adquirida	Tipo de Cambio	Costo en (Q)	Cantidad	Costo total (Q)
Microbiología	Kit de Urea Calorimétrica	Q 225.80	N/A	225.80	6	1,354.80
	Urinales	Q 5.00	N/A	5.00	25	125.00
Microbiología	Caja de guantes	Q 106.27	N/A	106.27	2	212.54
	Urea	Q 408.52	N/A	408.52	1	408.52
	Envases PET	Q 21.00	N/A	21.00	9	21.00
	Puntas para pipeta automática	Q 79.24	N/A	79.24	500	79.24
	HCl	Q 191.80	N/A	191.80	66.5 mL	34.67
	NaOH	Q 168.00	N/A	168.00	8 g	4.76
	NH ₄ Cl	Q 437.64	N/A	437.64	0.05 g	0.01
	KOH	Q 277.20	N/A	277.20	23 g	6.38

Continuación Cuadro 54. Costos del proyecto

Módulo	Material	Costo en moneda adquirida		Tipo de Cambio	Costo en (Q)	Cantidad	Costo total (Q)
		Q					
	Cloro 10%	Q	60.00	N/A	60.00	400 mL	0.03
	Jabón blanco	Q	102.00	N/A	102.00	300 mL	0.01
	Agua desmineralizada	Q	15.00	N/A	15.00	1	15.00
	Total (Q)						2,261.96
Motor	Motor GX-120	\$	329.95	7.50	2,474.63	1	2,474.63
	Regulador de presión	\$	290.75	7.50	2,180.63	1	2,180.63
	Tuerca Hexagonal 5/16	Q	0.73	-	2.92	4	11.68
	Válvula de cheque	Q	390.00	-	390.00	1	390.00
	Tuerca Hexagonal rosca ordinaria 8	Q	1.80	-	7.20	4	28.80
	Tornillo Hexagonal 5/16	Q	2.17	-	8.68	4	34.72
	Union vástago en Y	Q	20.00	-	20.00	1	20.00
	Válvula de aguja Br 14.0-bar/198C 32 bar	Q	290.00	-	290.00	1	290.00
	Mangueras de alta presión	Q	5.00	-	5.00	10	50.00

Continuación Cuadro 54. Costos del proyecto

Módulo	Material	Costo en moneda adquirida		Tipo de Cambio	Costo en (Q)	Cantidad	Costo total (Q)
	Mangueras de baja presión	Q	4.00	-	4.00	10	40.00
	Reducidor de 1/4 a 1/8"	Q	25.00	-	25.00	1	25.00
	Tanque de Hidrógeno	\$	1,700.00	7.50	12,750.00	1	12,750.00
	Tacómetro láser	\$	179.99	7.50	1,349.93	1	1,349.93
	Total (Q)						
Celda	Nickel Sheet, .125" (3.18mm), 6x2" Plate	\$	74.22	7.50	556.65	3	1,669.95
	Tuerca Bronce	Q	3.00	-	3.00	2	6.00
	Abrazadera presión, 1/2"	Q	1.75	-	1.75	4	7.00
	Manguera Vinyl	Q	5.00	-	5.00	2	10.00
	Adaptador manguera de plástico, 1/4 x 3/8	Q	11.00	-	11.00	2	22.00
	Empaque o ring	Q	1.00	-	1.00	4	4.00
	Empaque hule, #12	Q	3.00	-	3.00	4	12.00
	Cinta de aislar 3/4" x 30'	Q	5.00	-	5.00	1	5.00
	Adaptador macho 1/2"	Q	11.00	-	11.00	2	22.00
	Adaptador hembra, 1/2"	Q	1.50	-	1.50	2	3.00
	Pegamento tangit	Q	15.99	-	15.99	1	15.99
	Empaque o ring 3/4 x 1 x 1/8	Q	4.00	-	4.00	1	4.00
	tubo, puc, 315psi, 1/2"	Q	4.32	-	4.32	1	4.32
Herméticos redondos con rosca	Q	3.75	-	3.75	6	22.50	

Continuación Cuadro 54. Costos del proyecto

Módulo	Material	Costo en moneda adquirida		Tipo de Cambio	Costo en (Q)	Cantidad	Costo total (Q)	
		Q						
	Tazón click clack redondos	Q	13.75	-	13.75	2	27.50	
	Cilindro rosca, 2 tazas	Q	7.50	-	7.50	2	15.00	
	Abrazadera, presión 1"	Q	1.05	-	1.05	4	4.20	
	Mangueras, vinyl, trans 3/8	Q	6.00	-	6.00	2	12.00	
	Adaptador manguera plástica 3/8 x 1/4"	Q	11.00	-	11.00	2	22.00	
	Turca Hexagonal 9/16"	Q	5.00	-	5.00	2	10.00	
	Roldana de Acero, 1/2	Q	0.70	-	0.70	2	1.40	
	Placa de Hierro	Q						
	Placa de Cobre	Q	68.35		68.35	1	68.35	
	Hidróxido de Sodio grado Industrial	Q					-	
	Hidróxido de Potasio grado industrial	Q						
	Beaker 400ml	Q	36.25		36.25	1	36.25	
	Probeta 100ml	Q	56.00		56.00	2	112.00	
	Multímetro	Q	995.00		995.00	1	995.00	
	Fuente de Poder	Q	1,750.00		1,750.00	1	1,750.00	
	Banana Lagarto	Q	19.00		19.00	1	19.00	
	Total (Q)							4,880.46

Continuación Cuadro 54. Costos del proyecto

Módulo	Material	Costo en moneda adquirida		Tipo de Cambio	Costo en (Q)	Cantidad	Costo total (Q)
RRHH	Diego Figueroa		-	-	41.67	100	4,166.67
	Margarita Flores		-	-	41.67	70	2,916.67
RRHH	Lof Lau		-	-	41.67	150	6,250.00
	Sofía Pallais		-	-	41.67	300	12,500.00
	Eduard Peters		-	-	41.67	150	6,250.00
	Raúl Rivera		-	-	41.67	100	4,166.67
	Total (Q)						
Total general (Q)							63,037.79

Cuadro 55. Costos finales de la unidad

Operación	Equipo(s)	Argumentación general	Especificaciones	Costo	%
Recolección de orina	Embudo	Recolección directa de orina	15cm diámetro	10.00	0.00%
Almacenamiento de orina	Tanque	Material resistente al medio básico, traslúcido para tener nivel visual	Polietileno, 200L	1,153.50	0.02%
	Sensor ultrasónico doppler	sensor utilizado debido a la presencia de elementos solidos		2,400.00	0.04%

Continuación Cuadro 55. Costos finales de la unidad

Operación	Equipo(s)	Argumentación general	Especificaciones	Costo	%
Alimentación de KOH	Abertura en tanque de almacenamiento	Material se ingresa por completo	Boquilla 5cm diámetro, con tapa roscada	-	0.00%
	Sensor de nivel para tanques	sensor para medir el nivel de la orina, KOH y celda	3 sensores	6,750.00	0.12%
Mezcla Electrolítica	Agitador manual	Reducción de consumo de energía	Eje con hélice, accionado desde afuera de tanque de almacenamiento	3,076.00	0.05%
	compresor	utilizado para que tenga la presión necesaria para la mezcla		225.00	0.00%
Electrólisis	Celda electrolítica	Celda de placas para compactar área en volumen	Dos placas externas de acero inoxidable, empaque de teflón	24,495.47	0.43%
	Placas Hierro	Cada una es un reactor	Hierro, 20x20cm ²	632.80	0.01%
	Hidróxido de Potasio			1,331.89	0.02%
Almacenamiento de residuos	Tanque	Material resistente al medio básico, traslúcido para tener nivel visual	Polietileno, 200L	1,153.50	0.02%
Mezcla Aire	Arrestador de flama	Evita el paso accidental de la flama hacia la fuente de combustible	Witt, F100-17N-ES 17 bar. Tamaño de 1/4in	633.00	0.01%
	Válvula Cheque	Evita el retorno de las corrientes gaseosas	1/4in, cobre	390.00	0.01%
	Válvula de bola	Regulación de paso de flujo de hidrógeno, para cierre de emergencia	1/4in, cobre	320.00	0.01%
	Válvula de aguja	Regulación de flujo de alimentación de mezcla a motor	1/4in, cobre	290.00	0.01%

Continuación Cuadro 55. Costos finales de la unidad

Operación	Equipo(s)	Argumentación general	Especificaciones	Costo	%
Combustión	Motor de combustión interna	Unidad disponible para prototipo	Honda GX120	2,520.82	0.04%
	Polea motor	poleas que salen del motor a los dispositivos	2 poleas	180.00	0.00%
	Banda en V A42	banda en V que conecta motor con generador		90.00	0.00%
	Banda en V A33	banda en V que conecta motor con alternador		82.50	0.00%
Generación Eléctrica	Generador eléctrico	Generador diseñado para acoplarse al motor disponible	Powerland PD2000	1,042.50	0.02%
	Polea generador	polea que transmite potencia al generador	7"	150.00	0.00%
	Alternador	Alternador industrial de alto amperaje	Denso Heavy Duty, Agregar rectificador a 12V DC	5,250.00	0.09%
	Polea alternador	Transmite potencia al alternador	5"	75.00	0.00%
	Páneles solares	Fuente renovable de energía	76 Unidades. SW320 XL Silver Mono Pallet (29).	5,327,010.00	93.74%
	Eje con acople para extension	Extensión de eje para poder colocar las poleas		300.00	0.01%
Almacenamiento de Energía	Arreglo de 7 Baterías Duncan Navigator	Baterías de alta potencia para suplir alta demanda energética	12V x 700A.	5,810.18	0.10%

Cuadro 55. Costos finales de la unidad

Operación	Equipo(s)	Argumentación general	Especificaciones	Costo	%
Transporte Orina y Residuos	Tubería	Material resistente al medio básico, alta disponibilidad	1in, PVC	28.20	0.00%
	Válvula de aguja	Regulación de flujo de alimentación a celda	1/2in, PVC	290.00	0.01%
Transporte de gases	Mangueras	Flexibles, transporte de gases fríos y a baja presión no necesita mayor soporte estructural	1/4in, PVC	161.00	0.00%
Cableado eléctrico	Cables cobre a celda	Suficientes cables para soportar carga de corriente dividida, minimiza el área necesaria y hay que separar la corriente para cada celda	120x Calibre CSA 6mm ² , 39A máxima carga	138.73	0.00%
	Cables cobre a baterías	Cables de alta corriente para alimentar arreglo de baterías	De alternadores: 2x CSA 25mm ² , 140A máxima carga	96.13	0.00%
			De paneles: 76x Calibre CSA 16mm ² , 73A máxima carga	296,708.50	5.22%
Total Q				5,682,794.70	100%

Cuadro 56. CANVAS

I – Desarrolladores de proyectos de construcción (Cliente)		
Trabajos	Complicaciones	Beneficios esperados
Conseguir proyectos innovadores, eficientes, llamativos.	Terminar a tiempo; de lo contrario existen penalizaciones con las personas designadas en el contrato.	Ahorro en energía y por ende costos.
Terminar el proyecto a tiempo y con menor o igual cantidad a los recursos disponibles.	Vencimiento de la licencia de construcción.	Incentivos por parte del gobierno. El decreto número 52 – 2003, Ley de Incentivos para el Desarrollo de
Estudios preliminares para la aprobación de la construcción. Diseños, planos del proyecto.	Suficientes recursos de tiempo, humanos y monetarios así como la eficiencia de los mismos.	Proyectos de Energía Renovable en el artículo 5 indica la exención de derecho
Aprobación del gobierno: estudio impacto ambiental, obtener licencia de construcción, solicitud de conexión de aguas residuales, etc.	Costo de oportunidad de espacio Se estaría perdiendo anualmente en un edificio de oficinas o centros comerciales: Q18,250.00 anuales si entran 5 carros al parqueo diariamente. Y se cobra Q10.00 por carro.	arancelarios para las importaciones incluyendo el IVA, exención del pago de ISR.
Satisfacer la demanda creciente de las vivienda de las personas en la ciudad así como el entretenimiento de las mismas personas – la tasa de crecimiento poblacional en Guatemala es de 2.4%; donde el 48.5% se concentra en el área urbana. Alza en las construcciones en el sector de Guatemala específicamente en el área de comercio de un 4.8% a un 5.80%; incremento en las licencias de construcción.	Posible ruido producido por la unidad, espacio y el mantenimiento en el que se deberá incurrir.	Imagen del proyecto y la empresa
Satisfacer la demanda creciente de tendencias verdes – <i>datos de interés por tendencias verdes</i>	Aumento de la inversión o costos lo que afecta en el precio de venta. Invertir en nuevos diseños de sistema de tuberías. Recursos adicionales para la unidad Aumento del 5% en costos de acuerdo a la entrevista realizada en la cámara de la construcción	

Cuadro 57. Análisis desarrolladores de proyectos de construcción

I – Desarrolladores de proyectos de construcción (producto)		
Productos y servicios	Reductores de las complicaciones	Beneficios obtenidos
Implementación de una unidad de generación de energía a partir de la orina como un proyecto innovador, eficiente y llamativo.	Aumento de inversión pero retorno mayor por tener un <i>plus</i> al vender el proyecto por ser verde	Ahorro de energía por ende costos Imagen
	Satisfacción personas a la contribución del medio ambiente	Venta de proyectos más caros y atractivos; lanzando a un sector más alto.

Cuadro 58. Análisis casas particulares

II – Casas particulares (cliente)		
Trabajos	Complicaciones	Beneficios esperados
Tener servicios básicos como luz y agua	Pagar cuentas de los servicios básicos	Ahorro en costos de energía mediante la producción de energía renovable
El déficit de vivienda es muy elevado alrededor del 40.5% sin embargo, se estima que es más pronunciado en cuanto a calidad (61%) que en cuanto a cantidad (39%). En cuanto a servicios básicos: 76.3% de los hogares cuenta con agua por tubería, 81.8% con alumbrado eléctrico y 40.3% con sistema de eliminación de excretas.	Invertir en mejorar infraestructura del hogar; buscando la comodidad del mismo.	Satisfacción personal por contribución con el medio ambiente

Cuadro 59. Análisis casas particulares

II – Casas particulares (cliente)		
Trabajos	Complicaciones	Beneficios esperados
Ahorrar, disminuir costos	Tener un lugar específico para orinar sería incómodo.	Implementación de un nuevo estilo de vida, un estilo de vida verde.
Mejorar constantemente el hogar haciendo remodelaciones, adquiriendo nuevos muebles o decoraciones		
Comodidad		

Cuadro 60. Análisis escuelas

Productos y Servicios	Reductores de las complicaciones	Beneficios obtenidos
Implementación de una unidad de generación de energía a partir de la orina como un proyecto innovador, eficiente y llamativo	Disminución de la factura de electricidad	Producción de energía que conlleva a la disminución de costos de la misma.

Cuadro 61. Beneficios no esperados desarrolladores de proyectos de construcción

Trabajos	Complicaciones	Beneficios esperados
Tener servicios básicos como luz y agua	Crecimiento de población, demanda de servicios básicos.	Imagen, ahorro, confianza, generación de energía
Disminuir costos, ahorrar	2.4% tasa de crecimiento anual según el INE; 48.5% se concentra en el área urbana.	Atracción de inversionistas; apoyo social (ONG's, otros gobiernos, organizaciones)

Cuadro 62. Beneficios no esperados desarrolladores de proyectos de construcción

Trabajos	Complicaciones	Beneficios esperados
	<p>La educación pública se concentra en el sector primario; cerca del 83% de los niños estudian en escuelas públicas en el sector ya mencionado; esto significa que sería más relevante poner este tipo de sistema en escuelas primarias dado que hay más niños que asisten a ellas.</p> <p>El crecimiento de tendencias verdes</p>	

Cuadro 63. Análisis para el sector público

Productos y Servicios	Reductores de las complicaciones	Beneficios obtenidos
<p>Implementación de una unidad de generación de energía a partir de la orina como un proyecto innovador, eficiente y llamativo</p>	Fuente alterna de energía	Disminución de la factura de energía; ahorro.

H. Análisis cuantitativo

Cuadro 64. Cálculos realizados para cc. Oakland Mall

Detalle	Monto	
Consumo mensual de luz (Q)	150,000.00	
Visitantes por mes	640,000.00	
Energía que demandan por mes	131,578.95	kW

Cuadro 62. Cálculos realizados para cc. Oakland Mall

Suponiendo que 60% de las personas van al baño	384,000.00	
Producción de energía por mes por la unidad	1,163.15	kW
Producción de energía por hora por la unidad	1.62	kWh
Representación de 1.62kWh en dinero (Q)	1.84	
Energía demandada por hora	182.75	kWh
Energía producida por hora	1.62	kWh
Energía demandada por hora en dinero (Q)	208.33	
Energía producida por hora en dinero (Q)	1.84	

Años para recueprar inversión = 217

Cuadro 65. Cálculos realizados para las escuelas

Descripción	Resultados
Cantidad máxima de estudiantes	1082
Orina diaria en escuela (asumiendo que el 60% de los niños van al baño y 30% de la orina de cada uno de ellos)	341 kg

Cuadro 63. Cálculos realizados para las escuelas

Consumo de energía por escuela	60,283.63 kW
Consumo de energía por hora	6.88 kW
Producción de energía diaria	1.64 kW
Producción de energía anual	598.13 kW
Producción de energía por hora	0.06 kWh
Producción de energía por hora en dinero	Q0.07
Watts mínimos por clase por metro cuadrado	5W
Alumnos máximos por clase	40
Área por alumno	1.25 m ²
Salones de clase	27
Área de un salón de clase	50 m ²
Energía demandada	6,762.50W / 6.76 kWh
Energía demandada en dinero	Q7.71
Oferta de energía por hora	0.06 kWh
Ahorro en un año	97.81