

UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UTEC

Carrera de Ingeniería de la Energía



**SISTEMA DE RESPALDO ENERGÉTICO
BASADO EN PILAS DE COMBUSTIBLE PARA
HOSPITALES**

**ENERGY BACKUP SYSTEM BASED ON FUEL
CELLS FOR HOSPITALS**

Tesis para optar el título profesional de Ingeniero de la Energía

Pedro Luis Muñoz Córdova

Código 201210144

Asesor

José César Ramos Saravia

Lima – Perú

Noviembre 2017

La tesis

**SISTEMA DE RESPALDO ENERGÉTICO BASADO EN PILAS DE
COMBUSTIBLE PARA HOSPITALES**

Ha sido aprobada

[Nombres y apellidos del Presidente de Jurado]

[Nombres y apellidos del Asesor de la tesis]

[Nombres y apellidos del Tercer jurado]

Dedicatoria:

Para mis padres, quienes con su esfuerzo lograron inculcar en mí muchos valores, a mis hermanos y amigos que me apoyaron en todo momento alentándome siempre a ser un buen profesional.

Agradecimientos:

Al profesor José Ramos Saravia por su apoyo constante durante la elaboración de ésta tesis. Al director de la carrera de Ingeniería de la Energía Julien Noel por su apoyo incondicional a lo largo de la carrera. A mi familia por las muestras de afecto y comprensión.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	60
ABSTRACT	111
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	
1.1 Problemática	13
1.2 Antecedentes de instalaciones de respaldo energético de hospitales basados en pilas de combustible	14
1.3 Celdas de combustible	14
1.4 Gasificación de la biomasa	27
1.5 Contribución de la tesis.....	34
1.6 Objetivo general.....	35
1.7 Objetivos específicos	26
CAPÍTULO 2: SISTEMAS DE RESPALDO ENERGÉTICO PARA HOSPITALES	
2.1 Sistema energético de respaldo con tecnología convencional	37
2.1.1 Sistema de alimentación ininterrumpida (UPS)	37
2.1.2 Sistema de respaldo con grupo electrógeno	39
2.2. Propuesta de un novedoso sistema energético para el respaldo de hospitales	40
CAPÍTULO 3 SISTEMA INTEGRADO DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO Y ELECTRICIDAD	
3.1 Introducción	42
3.2 Proceso de producción de syngas	43
3.2.1 Acondicionamiento del bagazo de la caña de azúcar.....	43
3.2.2 Proceso de gasificación	44
3.3 Proceso de producción de hidrógeno	45

3.3.1 Acondicionamiento del syngas	45
3.4 Proceso de producción de electricidad	46

**CAPÍTULO 4: CASO DE ESTUDIO: DISEÑO DE UN SISTEMA DE RESPALDO
ENERGÉTICO CON PILAS DE COMBUSTIBLE PARA EL HOSPITAL DE
CHOCOPE (LA LIBERTAD)**

4.1 Bases de diseño.....	49
4.1.1 Demanda eléctrica del hospital de Chocope	49
4.1.2 Configuración de operación de la planta.....	50
4.1.3 Características técnicas de los equipos	52
4.2 Evaluación técnica de la producción de syngas, hidrógeno y electricidad.....	53
4.3 Evaluación económica de la producción de hidrógeno y electricidad.....	55
4.3.1 Costo de inversión de equipos	56
4.4 Análisis de resultados del caso de aplicación	61

CONCLUSIONES

REFERENCIAS

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características de las tecnologías de pilas de combustible.....	14
Tabla 2. Demanda eléctrica mensual del hospital de Chocope.....	49
Tabla 3. Características técnicas del gasificador	52
Tabla 4. Características técnicas de la pila de combustible	52
Tabla 5. Características técnicas de la membrana de separación.....	53
Tabla 6. Características del sistema de almacenamiento	53
Tabla 7. Ratios de consumo y producción de la planta	55
Tabla 8. Costos de inversión de la planta (caso 1).....	57
Tabla 9. Costos de inversión de la planta (caso 2).....	58
Tabla 10. Consideraciones para la evaluación económica de la producción de hidrógeno y electricidad (caso 1).....	58
Tabla 11. Resultados de la evaluación económica del microsistema energético para diferentes modos de operación	59
Tabla 12. Consideraciones para la evaluación económica de la producción de hidrógeno y electricidad (caso 2).....	60
Tabla 13. Resultados de la evaluación económica del microsistema energético para diferentes modos de operación (caso 2).....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Curva de densidad de tensión vs corriente	16
Figura 2. Esquema de funcionamiento de una celda de combustible	19
Figura 3. Esquema de una celda de combustible	19
Figura 4. Esquema de una batería de pila de combustible tipo PEM	20
Figura 5. Esquema de una batería de pila de combustible tipo AFC.....	22
Figura 6. Esquema de una batería de pila de combustible tipo PAFC.....	23
Figura 7. Esquema de una batería de pila de combustible tipo MCFC.....	25
Figura 8. Esquema de una batería de pila de combustible tipo SOFC.....	26
Figura 9. Funcionamiento de un gasificador de lecho fijo up draft	29
Figura 10. Esquema del gasificador down draft	30
Figura 11. Esquema del gasificador de lecho móvil.....	31
Figura 12. Esquema del gasificador de fluido burbujeante	32
Figura 13. Esquema del gasificador del lecho fluido circulante.....	33
Figura 14. Esquema del gasificador de lecho fluido dual.....	33
Figura 15. Esquema del gasificador de plasma.....	34
Figura 16. Producción integrada de hidrógeno y electricidad a partir de biomasa.....	42
Figura 17. Etapas del proceso de gasificación	44
Figura 18. Perfil de la demanda eléctrica mensual del Hospital de Chocope.....	50
Figura 19. Diagrama de flujo del sistema de producción de hidrógeno y electricidad con nueve gasificadores.	51
Figura 20. Diagrama de flujo del sistema de producción de hidrógeno y electricidad con un gasificador.....	54
Figura 21. Costo de fabricación de tanques de almacenamiento	57
Figura 22. Variación del payback según el incremento de potencia de pilas de combustible.....	65

RESUMEN

La electricidad es de vital importancia en el funcionamiento de los hospitales, del cual dependen los equipos y dispositivos empleados en las distintas especialidades e importantes áreas, como es el caso de las áreas de Quirófanos y Emergencia.

Por un lado, en la zona norte de nuestro país, el sistema de suministro eléctrico tiene deficiencias de calidad y seguridad energética, que finalmente perjudica a los hospitales. La mayoría de hospitales emplean grupos electrógenos como sistemas de respaldo energético que operan con combustibles fósiles, contaminando considerablemente el medio ambiente.

Por otro lado, en la zona norte de nuestro país (principalmente en los departamentos de La Libertad y Lambayeque) se concentra la mayor producción nacional de caña de azúcar, cuya industrialización genera importantes cantidades de bagazo (residuo). Anualmente, la industria azucarera peruana genera 2,91 millones de toneladas de bagazo [5].

En este proyecto de tesis se desarrolla la ingeniería conceptual de un sistema energético de respaldo eléctrico para un hospital. Este sistema energético emplea pilas de combustible accionados con hidrógeno procedente de la gasificación de bagazo de caña de azúcar. En el desarrollo de la ingeniería conceptual se introduce el concepto de integración energética.

Este trabajo incluye la valoración técnica y económica de un sistema energético integrado de producción de hidrógeno y electricidad para atender la demanda energética de un hospital.

Palabras Claves: *Respaldo energético, gasificación, pilas de combustible, bagazo, cogeneración, hidrógeno, integración.*

ABSTRACT

Electricity is very important for any hospital's performance, as this depends on equipment used in the different areas, such as Surgery and Emergency.

On the one hand, in northern part of our country, national electricity grid has quality and energy security deficiencies, thus prejudicing hospital's performance. Most hospitals employ internal combustion engines as an energy backup system, and they pollute the environment.

On the other hand, in northern region (provinces La Libertad and Lambayeque) of our country, there is the largest national production of sugar cane concentration; whose industrialization generates large quantities of bagasse (waste), this means that the sugar industry annually generates 2,91 million tons of bagasse [5].

In this thesis work, a conceptual engineering of a hydrogen backup system for a hospital is developed. This energy system employs fuel cells driven by hydrogen from sugarcane bagasse through gasification process. In the development of conceptual engineering, the philosophy of energy integration is presented.

This work includes the technical and economic assessment of an integrated energy system for the production of hydrogen and electricity to match the energy demand of a hospital and the availability of sugarcane bagasse.

Keywords: Backup power, gasification, fuel cells, bagasse, cogeneration, hydrogen, integration.

1 Introducción

1.1 Problemática

1.2 Antecedentes

1.3 Pilas de combustible: Estado del arte

1.4 Gasificación de la biomasa: Estado del arte

1.5 Contribución de la tesis

1.6 Objetivo general

1.7 Objetivos específicos

1.1 Problemática

La electricidad en el Perú se obtiene principalmente del agua y gas natural [1]. El Plan Energético Nacional 2014 – 2025 de Perú [1], planteó objetivos como la generación de energía con bajo impacto ambiental, concretar la seguridad y acceso universal del suministro energético, asimismo, el uso de recursos renovables para diversificar la matriz energética.

En la zona norte del país, el sistema de suministro eléctrico presenta deficiencias en la calidad y seguridad energética. En el año 2014 se registraron 20 interrupciones en el sistema de suministro eléctrico operado por Hidrandina [2]. Los hospitales son vulnerables ante estos hechos, pues la energía eléctrica en los establecimientos de salud es muy importante, ya que en caso de interrupciones en el fluido eléctrico perjudicaría la vida de las personas que dependen de algún equipo que requiere de electricidad, en especial, los quirófanos.

El Ministerio de Salud de Perú detalla que, de los 139 hospitales existentes en el país, sólo 90 cuentan con un sistema de respaldo energético convencional, y de éstos, sólo 50 establecimientos cuentan con equipos bien conservados y en operación [3].

En Perú, la caña de azúcar es un cultivo agroindustrial importante, cuya molienda total de este cultivo en el año 2015 registró 10,21 millones de toneladas, y como sub producto 2,91 millones de toneladas de bagazo [4, 5]. El bagazo de la caña de azúcar se emplea como materia prima para la fabricación de papel, como combustible de calderas de vapor los cuales son parte de una planta de generación térmica con turbinas a vapor en las propias empresas azucareras, y como materia prima en procesos de gasificación para la producción de hidrógeno [6 – 12].

De acuerdo a lo expuesto líneas arriba, ¿Es posible armonizar la demanda (consumo de energía eléctrica de un hospital) y la oferta (disponibilidad de bagazo de caña de azúcar) a través de un sistema de producción integrada de electricidad (con pilas de combustible) e hidrógeno?

1.2 Antecedentes de instalaciones de respaldo energético de hospitales basados en pilas de combustible

En Estados Unidos, el Hospital Santa Helena, ubicado en Napa Valley (California) especializado en el tratamiento de cáncer, dispone de un sistema de respaldo energético basado en cogeneración con pilas de combustible de 400 kW y accionadas con gas natural. Las pilas de combustible son de tecnología de ácido fosfórico. La operación de esta instalación energética aportó beneficios medioambientales como reducción de emisiones de CO₂ y otros gases contaminantes, así como el ahorro de agua [13].

Otros hospitales que emplean pilas de combustible como sistema de respaldo energético son:

- St. Francis Hospital. Este hospital dispone de un sistema de pilas de combustible de 400 kW, esta planta energética opera desde el 2012 [14, 15].
- Hartford Hospital. Este establecimiento tiene 1,4 MW de potencia instalada, atiende al 60 % de la demanda del hospital [14, 15, 16].
- Sutter Santa Rosa Hospital (California). Este nosocomio opera con un sistema de pilas de combustible de 375 kW de potencia instalada, el cual cubre el 70 % de la demanda anual del hospital. La planta permite evitar 758 TM/año de CO₂ [15, 17].

1.3 Celdas de combustible

Tabla 1 Características de las tecnologías de pilas de combustible [18].

Pila de combustible	Tipo de electrolito	Rendimiento	Temperatura de operación	Aplicaciones
Pilas de Membrana Polimérica (PEMFC)	Polímero sólido	60 %	70-90 °C	Vehículos, máquinas portátiles y generación estacionaria
Pilas de combustible Alcalinas (AFC)	Solución acuosa de hidróxido de potasio	60 %	90-100 °C	Militares y espaciales
Pilas de Ácido Fosfórico (PAFC)	Ácido fosfórico líquido	50-80 %	175-200 °C	Generación estacionaria y equipos portátiles
Pilas de Carbonato Fundido (MCFC)	Solución líquida de litio, potasio y sodio	60-90 %	600-1000 °C	Generación eléctrica estacionaria
Pilas de Óxido Sólido (SOFC)	Óxido de zirconio sólido	60-70 %	600-800 °C	Generación eléctrica estacionaria

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química de un combustible (y oxidante) en energía eléctrica. La diferencia esencial entre una celda de combustible y una batería es que en una pila de combustible el suministro de energía es externo a la pila de combustible y puede ser suministrado esencialmente de manera indefinida mediante el reabastecimiento del tanque externo. Una celda de combustible producirá energía eléctrica siempre que se suministre combustible y oxidante, y no se descomponga o requiera recarga. Las pilas de combustible usan generalmente combustibles gaseosos o líquidos, por ejemplo, hidrógeno, gas natural, metanol, y otros flujos de hidrocarburos tales como los residuos de procesos. El oxidante para una pila de combustible es generalmente oxígeno, ya sea del aire o purificado [18].

Los componentes importantes de la celda de combustible son:

El ánodo (electrodo de combustible). El ánodo debe proporcionar una interfaz común para el combustible y el electrolito, catalizar la reacción de oxidación del combustible y conducir electrones desde el sitio de reacción al circuito externo (o a un colector de corriente que, a su vez, conduce los electrones al circuito externo) [18].

El cátodo (electrodo de oxígeno). El cátodo debe proporcionar una interfaz común para el oxígeno y el electrolito, catalizar la reacción de reducción de oxígeno y conducir electrones desde el circuito externo al sitio de reacción del electrodo de oxígeno [18].

El electrolito debe transportar las especies iónicas involucradas en las reacciones de los electrodos de combustible y oxígeno mientras se evita la conducción de electrones (la conducción de electrones en el electrolito provoca un cortocircuito). Además, en las células prácticas, el papel de la separación de gas suele ser proporcionado por el sistema electrolítico. Esto se logra a menudo manteniendo el electrolito en los poros de una matriz (o papel secante inerte). Las fuerzas capilares del electrolito dentro de los poros permiten que la matriz separe los gases, incluso bajo algún diferencial de presión [18].

El rendimiento de una pila de combustible puede entenderse a partir de la curva de densidad de tensión versus corriente (o polarización).

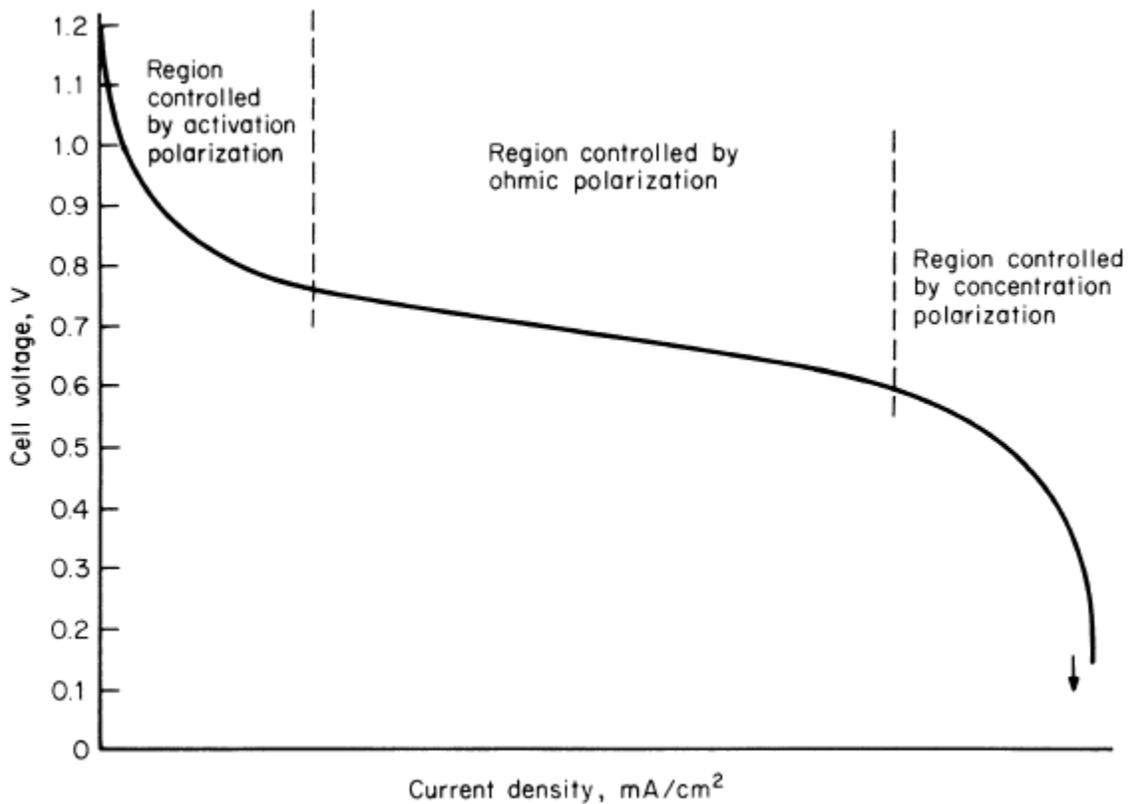


Figura 1 Curva de densidad de tensión vs. corriente [18].

Mientras que, idealmente, una sola pila de combustible H_2-O_2 podría producir 1,23 V en condiciones ambientales, en la práctica, las pilas de combustible producen salidas de voltaje útiles que son algo menores que las ideales y disminuyen con el aumento de la demanda de carga. Las pérdidas o reducciones de voltaje desde el ideal se denominan polarización. Estas pérdidas incluyen lo siguiente: (1) polarización de activación, que representa pérdidas de energía que están asociadas con la cinética de reacción del electrodo, (2) polarización óhmica, que representa la suma de todas las pérdidas óhmicas dentro de la célula, incluyendo impedancias electrónicas a través de electrodos, contactos y colectores de corriente e impedancia iónica a través del electrólito (estas pérdidas siguen la ley de Ohm), y (3) la polarización de concentración, que representa las pérdidas de energía asociadas con los efectos de transporte masivo. Por ejemplo, el rendimiento de una reacción de electrodo puede ser inhibido por la incapacidad de los reactivos para difundir o los productos a difundir lejos del sitio de reacción [18].

El resultado neto de estas polarizaciones es que las pilas de combustible prácticas producen entre 0,9 y 0,5 V a corrientes de 100 a 1500 mA / cm² de área de celda. El rendimiento de la pila de combustible se puede incrementar aumentando la presión parcial de los reactantes y en algunos casos aumentando la temperatura de la celda. Sin embargo, existe un inconveniente entre lograr un mayor rendimiento operando a una presión o temperatura más alta y enfrentarse a las exigencias de materiales y hardware impuestas en las condiciones más severas [18].

Las celdas son apiladas en serie o paralelo para satisfacer la demanda requerida, por ese motivo al conjunto de celdas de combustible se les conoce como **pila de combustible**.

Las pilas individuales se apilan en serie para producir la potencia de salida deseada y voltaje. Así, por ejemplo, 100 células, cada una generando 0,6 V, generan una tensión de pila total de 60 V. La corriente pasa de una célula a la siguiente a través de las placas separadoras bipolares conductoras electrónicamente entre células y se recoge en las placas terminales. Debido a que cada célula genera energía, los reactantes deben ser alimentados uniformemente a cada célula y uniformemente a través de la cara de cada célula. La distribución de reactivos a través de cada célula se logra mediante un campo de flujo que puede ser una estructura de canal formada en la placa separadora o un campo abierto creado por un material poroso. La distribución del reactivo entre las células es proporcionada por un colector externo con acceso a los bordes de todas las células o por un colector interno [18].

Una planta de energía de pila de combustible consta de al menos tres subsistemas básicos:

Un subsistema de combustible que gestiona el suministro de combustible a la sección de potencia. Este subsistema puede ir desde simples controles de flujo hasta una compleja instalación de procesamiento de combustible que convierte los hidrocarburos en hidrógeno purificado. Este subsistema procesa el combustible a la calidad (composición, temperatura, presión) requerida para su uso en la sección de potencia de la pila de combustible [18].

Una sección de potencia que consiste en una o más pilas de pilas de combustible con cada pila que contiene muchas pilas de combustible individuales conectadas normalmente en serie para producir una salida de pila que varía de unos pocos a varios cientos de voltios (corriente continua). Esta sección convierte el combustible procesado y el oxidante en corriente continua [18].

Un acondicionador de potencia que convierte la salida de la sección de potencia al tipo de potencia y calidad requerida por la aplicación. Este subsistema podría ir desde un simple control de voltaje hasta un sofisticado dispositivo que incluiría un convertidor de CC a CA.

Debido a que las celdas de combustible oxidan electroquímicamente el combustible en lugar de quemarlo, las temperaturas de funcionamiento son más bajas y las pérdidas de Carnot se evitan, por lo que la eficiencia es mayor que para los sistemas de combustión. Las estaciones generadoras basadas en pilas de combustible tienen típicamente eficiencias eléctricas que oscilan entre 40% y más del 60% [18].

En el proceso de generación de electricidad en una celda de combustible no interviene ningún proceso de combustión, por lo que no emiten contaminantes. Una de las principales ventajas de las pilas de combustible es su performance en la producción de electricidad. Esta característica puede incrementarse más aún si se aprovecha el calor que producen estos dispositivos. Su clasificación se basa en la temperatura de operación que puede llegar a 1000 °C en plantas de 10 MW donde se puede aplicar cogeneración y llegar hasta un 80% de eficiencia global [18,19].

Para ilustrar mejor lo que sucede en una pila de combustible se presentan las siguientes reacciones simples y las *figuras 2 y 3*.



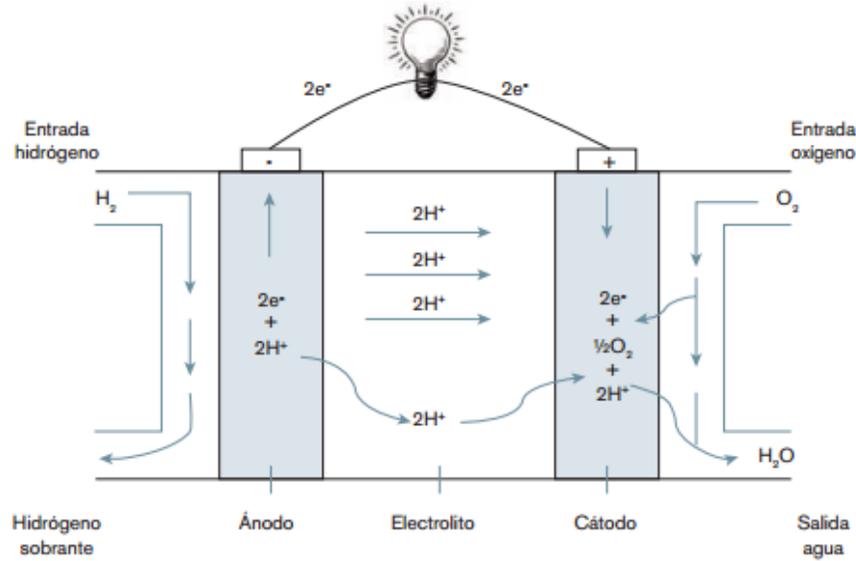


Figura 2 Esquema de una celda de combustible [19].

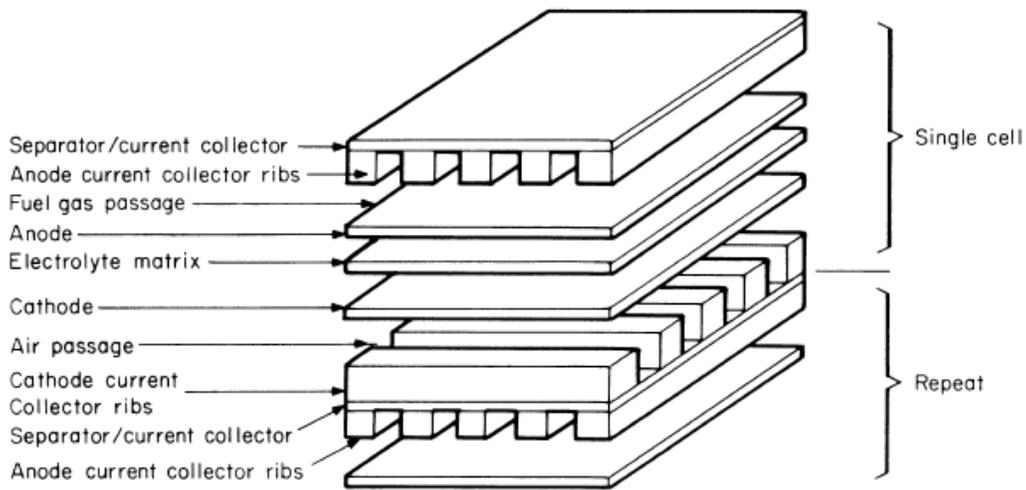


Figura 3 Esquema de una pila (conjunto de celdas) de combustible [18].

Existen diferentes tipos de pilas de combustible según el tipo de **electrolito** que usan, líquido o sólido. El electrolito les confiere distintas características como la temperatura de operación, gases reactantes y el área de aplicación. A continuación se describe las distintas

tecnologías de pilas de combustible que actualmente se encuentran en el mercado y en desarrollo [18].

- Pilas de Membrana Polimérica (PEMFC, por sus siglas en inglés). En este tipo de pilas de combustible, dos electrodos de carbono catalizados se depositan en una membrana de electrolito polimérico que también funciona como una barrera de gas. El combustible, en este caso hidrógeno, fluye a través de la superficie de un electrodo mientras que el oxidante, en este caso el oxígeno del aire ambiente, fluye a través del otro electrodo. Cuando los electrodos están conectados eléctricamente a través de una carga externa, se producen los siguientes eventos:

- El hidrógeno se disocia en la superficie catalítica del electrodo de combustible (ánodo), formando protones y electrones.
- Los protones migran a través del electrolito a la superficie catalítica del electrodo de oxígeno (cátodo).
- Simultáneamente, los electrones se mueven a través del circuito externo a la misma superficie catalítica.
- El oxígeno, protones y electrones se combinan en la superficie catalítica del electrodo de oxígeno para formar agua [18].

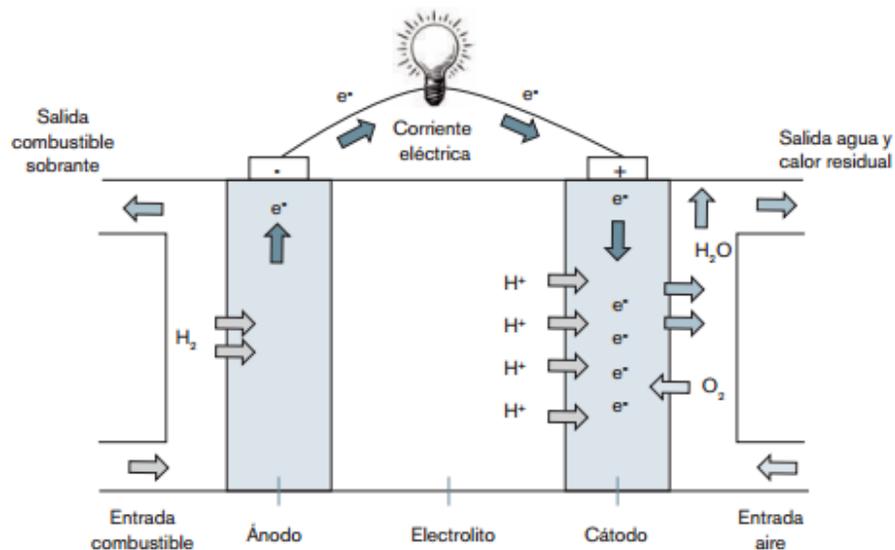


Figura 4 Esquema de funcionamiento de una celda de combustible tipo PEMFC [18, 19].

Las ventajas de las pilas tipo PEMFC son (1) el electrolito, siendo un sólido, no se mueve o se vaporiza del sistema; (2) la baja temperatura de funcionamiento permite una puesta en marcha y cierre rápidos, así como la carga siguiente; y (3) el electrolito sólido permite una optimización más fácil de la interfaz catalizador, electrolito y reactivo, lo que ha dado lugar a sistemas que pueden funcionar con cargas de catalizador sustancialmente más bajas que los sistemas electrolíticos líquidos. Cuando operan con hidrógeno puro, los sistemas PEMFC han logrado eficiencias eléctricas cercanas al 60% [18].

Este tipo de pilas generalmente se considera para niveles de potencia bajo (100 kW), operando en el rango de -40 a 90 ° C, sin embargo algunas aplicaciones más grandes se están considerando. La capacidad de arranque rápido hace que PEMFC sea más atractivo para aplicaciones tales como vehículos de servicio ligero que para celdas de combustible de alta temperatura. Las PEMFC han encontrado un éxito temprano en los mercados de energía de respaldo y manipulación de materiales. También se están considerando para el apoyo de la red de suministro eléctrico, se ha construido una planta de 1 MW [18].

- Pilas de combustible Alcalinas (AFC, por sus siglas en inglés). Las pilas de combustible alcalinas utilizan un conductor de iones hidróxido como electrolito. Aunque las primeras pilas de combustible alcalinas funcionaron a una temperatura relativamente alta (~ 250 ° C) con hidróxido de potasio concentrado (85% en peso), los sistemas desarrollados más recientemente operan a temperaturas mucho más bajas (<120°C) usando hidróxido de potasio menos concentrado (35 a 50%). La temperatura más baja permite el uso de matrices para retener el electrolito y aumenta la vida de otros componentes. Se puede utilizar una amplia gama de electrocatalizadores, entre los que se incluyen el níquel, la plata, los óxidos metálicos, las espinelas y los metales nobles, aunque los sistemas de alto rendimiento utilizan al menos pequeñas cantidades de metal noble. Los materiales de construcción incluyen carbono, níquel y acero inoxidable [18].

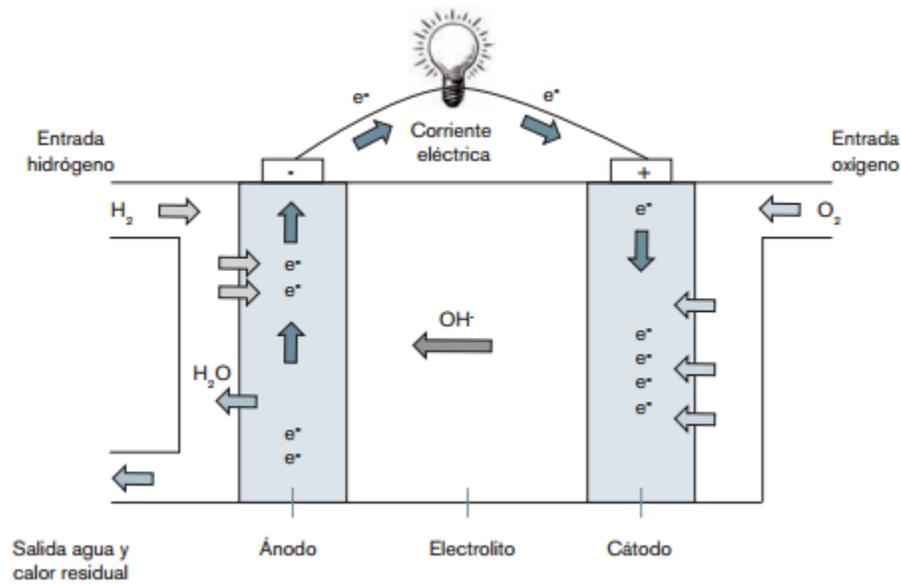


Figura 5 Esquema de funcionamiento de una pila de combustible tipo AFC [19].

La ventaja principal de las pilas de combustible alcalinas es que el rendimiento del cátodo es mucho mejor que en las pilas de combustible ácido, por lo que pueden usarse catalizadores no nobles, lo que reduce el coste del catalizador. La principal desventaja es que el electrolito de hidróxido reacciona con óxidos de carbono para formar carbonato de potasio. Esto limita severamente el rendimiento y la estabilidad de las células. Por lo tanto, las pilas de combustible alcalinas tienen una aplicación limitada cuando se usan combustibles carbonosos o aire como reactivos. Las aplicaciones importantes (espacio y submarino) utilizan hidrógeno puro y oxígeno [18].

- Pilas de Ácido Fosfórico (PAFC, por sus siglas en inglés). El sistema electrolítico de ácido fosfórico funciona a 150 hasta 220 °C. A temperaturas más bajas, el ácido fosfórico es un conductor iónico deficiente. A temperaturas más altas, la estabilidad del material (carbono y platino) se convierte en limitante [18].

La estructura básica de la pila de una combustible de ácido fosfórico (PAFC) consiste en:

- Una placa de colector de corriente de separación de carbono o de grafito que separa el hidrógeno del aire de la célula adyacente y también proporciona la conexión en serie eléctrica entre las células [18].
- Un ánodo que consiste en un sustrato grafitico poroso con la superficie adyacente al electrolito tratado con un catalizador de platino o aleación de platino [18].
- Una matriz electrolítica que retiene el ácido fosfórico concentrado [18].
- Un cátodo que es similar al ánodo, pero utiliza un catalizador de metal noble modificado y una carga incrementada de catalizador para mejorar la cinética de reducción de oxígeno [18].

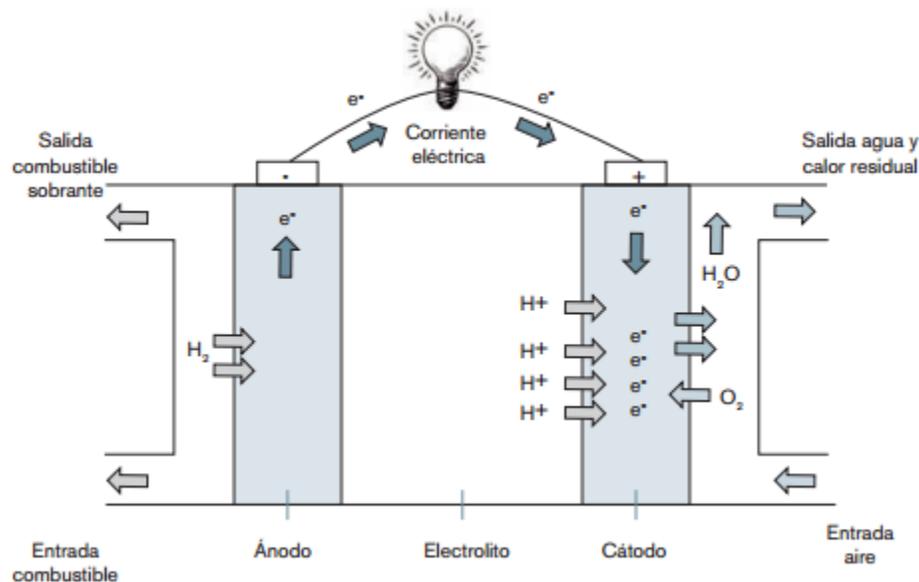


Figura 6 Esquema de funcionamiento de una pila de combustible tipo PAFC [19].

Las ventajas de las pilas de combustible de ácido fosfórico son el electrolito es muy estable y de 150 a 220 ° C y el rendimiento del ánodo es muy estable incluso en combustibles que contienen hasta 5% de monóxido de carbono. Esto resulta en un sistema simplificado de procesamiento de combustible comparado con el de un PEMFC. La eficiencia eléctrica es alta, alrededor del 41% cuando se trabaja con gas natural reformado. La temperatura de funcionamiento proporciona calor de alta calidad para calefacción y refrigeración en CHP y aplicaciones combinadas de calor, refrigeración y energía (CHCP); Se han demostrado eficiencias de CHP > 85%. Los sistemas PAFC han demostrado la mayor durabilidad para

sistemas comerciales de celdas de combustible con tiempos de vida de la pila de más de 80.000 horas en las unidades de 400 kW que se están desplegando [18].

- Pilas de Carbonato Fundido (MCFC, por sus siglas en inglés). Las pilas de combustible de carbonato fundido utilizan una mezcla de carbonatos de metal alcalino (Li, K, Na) como el electrolito. La conducción iónica a través de la célula es por el ion carbonato (CO_3^{2-}). Las células funcionan entre 600 y 700 ° C. El electrolito es retenido por una matriz de partículas de LiAl_2O_3 . Esta mezcla forma una pasta cuando se funde y se congela para formar una "teja" cuando se enfría. A 600 a 700 ° C, las reacciones de los electrodos continúan sin catalizadores de metales nobles, y los ánodos de níquel poroso y los cátodos de óxido de níquel funcionan bien. El ánodo Ni se estabiliza contra la sinterización por un óxido refractario y el cátodo NiO se "litia" (incremento de concentración de litio) durante el funcionamiento, proporcionando una mayor conductividad electrónica [18].

Se emplea una placa o separador bipolar y una estructura colectora de corriente para separar el gas combustible del aire de la célula adyacente en una pila de múltiples celdas, para dirigir los flujos de reactantes y para proporcionar la conexión eléctrica entre células. La placa o separador bipolar debe ser impermeable al hidrógeno gaseoso y al oxígeno, y ser un buen conductor electrónico. Para MCFC, la placa también debe ser estable a los ambientes de combustible y aire en presencia de sales de carbonato de 650 ° C. La placa está hecha generalmente de acero inoxidable recubierto de Ni de la serie 300 [18].

Las instalaciones de MCFC son principalmente unidades de cogeneración (electricidad y calor) que funcionan con gas digestor anaeróbico, gas natural o gas de vertedero. Las instalaciones están operando en cervecerías, plantas procesadoras agrícolas y plantas de tratamiento de aguas residuales [18].

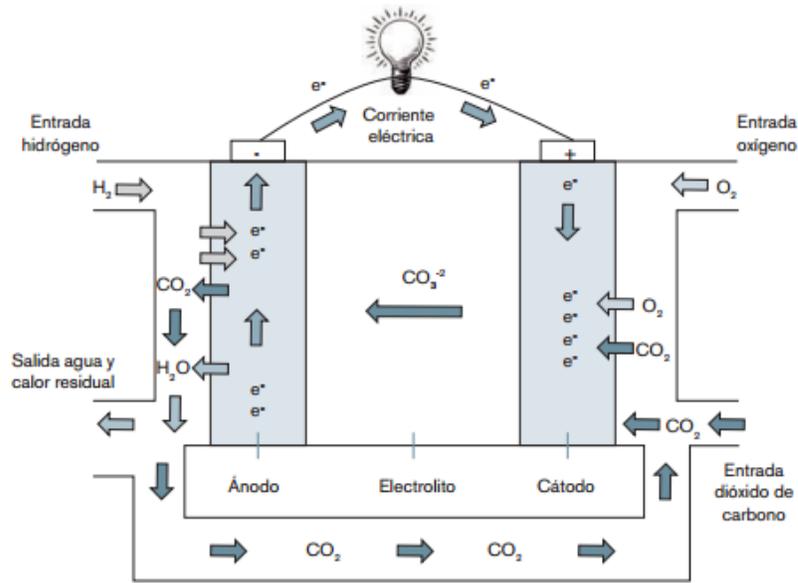


Figura 7 Esquema de funcionamiento de una pila de combustible tipo MCFC [19].

Las ventajas de las pilas de combustible de carbonato fundido son que (1) la polarización de activación es baja; (2) el monóxido de carbono en el combustible se convierte en hidrógeno en el ánodo a través de la reacción de desplazamiento de gas de agua ($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$) permitiendo el uso de gases combustibles altos en contenido de CO; y (3) el calor residual de la pila de combustible puede estar disponible a una temperatura relativamente alta ($> 500^\circ \text{C}$), permitiendo su uso en ciclos de fondo o de calentamiento industrial. Se han logrado tiempos de vida de 40.000 h con sistemas MCFC, con disponibilidad del 97% y eficiencia eléctrica neta cerca del 47% cuando operan con gas natural [18].

- Pilas de Óxido Sólido (SOFC, por sus siglas en inglés). Las pilas de combustible de óxido sólido emplean un electrolito de óxido metálico sólido, no poroso, tal como zirconia estabilizada con itria (YSZ) u otros óxidos de tierras raras, que permiten la migración de iones de óxido a través de la red cristalina. A temperaturas de operación de SOFC por encima de 700° , las reacciones de los electrodos continúan sin catalizadores de metales nobles. Los cátodos pueden emplear materiales tales como manganato de estroncio de

lantano o ferrato de cobalto de estroncio de lantano, y los ánodos pueden emplear cermetes de Ni tales como Ni o YSZ. A diferencia de las tecnologías de pilas de combustible discutidas anteriormente que normalmente se empaquetan en conjuntos de pilas de placa y marco, las celdas de combustible de óxido sólido también se configuran en pilas de celdas tubulares [18].

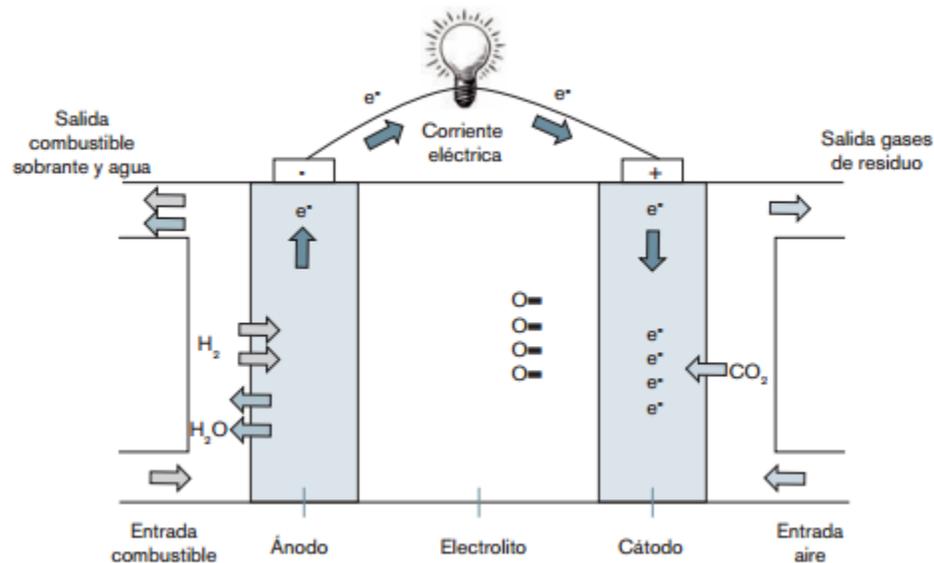


Figura 8 Esquema de funcionamiento de una pila de combustible tipo SOFC [19].

Las pilas de combustible de óxido sólido ofrecen ventajas similares a las de las células carbonatadas fundidas, es decir, un buen rendimiento de los combustibles que contienen hidrógeno o hidrógeno y monóxido de carbono, la eliminación de catalizadores de metales nobles y la disponibilidad de calor de alto grado. Las SOFC pueden tolerar mayores niveles de azufre que los otros tipos de pilas de combustible y no son envenenadas por CO o amoníaco, al igual que los sistemas PEMFC y PAFC. Los sistemas SOFC tienen eficiencias eléctricas en el rango del 50% al 60% (LHV) [18].

1.4 Gasificación de biomasa

La gasificación se produce a través de la descomposición térmica de la biomasa con la ayuda de un oxidante tal como oxígeno puro o aire enriquecido con oxígeno para producir un gas combustible tal como gas de síntesis rico en monóxido de carbono. El gas de síntesis

se somete a tratamiento posterior, mediante reformado con vapor de agua u oxidación parcial, para convertir los hidrocarburos producidos por gasificación en hidrógeno y monóxido de carbono [20].

En el proceso de gasificación, se introducen en el sistema uno o más reactivos, como oxígeno, vapor o hidrógeno. Estos reactivos químicos se combinan con el carbono sólido a las temperaturas de gasificación más altas, aumentando así el rendimiento de gas mientras se consume carbón. La cantidad de producto secundario de carbón que queda en la gasificación es, de hecho, esencialmente cero con materiales de biomasa, mientras que la pequeña cantidad de alquitranes y aceites desarrollados puede ser reciclada hasta su extinción. Los reactivos introducidos también entran en reacciones en fase gaseosa que, junto con el cambio de equilibrio y el cambio en las velocidades de reacción relativas a las temperaturas más altas, da como resultado un gas de calidad significativamente mejor que el obtenido por pirólisis. Distinciones importantes entre la pirólisis y la gasificación son por lo tanto el rendimiento de gas mejorado y la eliminación de sólidos y líquidos por productos [20].

Una ventaja importante con la gasificación es la amplia gama de recursos de biomasa disponibles, que van desde cultivos agrícolas y cultivos energéticos dedicados a residuos y desechos orgánicos. La materia prima puede tener una calidad muy diversa, pero aun así el gas producido es bastante estandarizado y produce un producto homogéneo. Esto hace posible elegir la materia prima que es el más disponible y económico en todo momento [20].

Tipos de gasificadores

Actualmente existen en el mercado diferentes tecnologías de gasificadores, como: lecho fijo (down-draft, up-draft), lecho móvil, lecho de fluido burbujeante, lecho de fluido circulante, plasma. Muchas de estas tecnologías son eficientes y otras aún están en fase de desarrollo. Cada una se diferencia por: (i) la forma en que la biomasa es introducida y los agentes externos para impulsar el movimiento de la biomasa dentro del gasificador; (ii) por

el agente oxidante que se utiliza: oxígeno, aire o vapor, además el uso de otros agentes químicos para mejorar la calidad del syngas, y para enriquecer el aire con oxígeno que se utilizará en el gasificador y (iii) la operación del equipo, ya sea de presión atmosférica, o bajo condiciones de alta presión (por encima de 25 hasta los 30 bar) que puede afectar la eficiencia del equipo [21].

A continuación se describen las diferentes tecnologías de gasificadores

- *Lecho fijo up - draft*. Consiste en un lecho fijo de combustible carbonoso (por ejemplo, carbón o biomasa) a través del cual fluye el agente de gasificación (vapor, oxígeno y/o aire) en configuración a contracorriente. La ceniza se elimina seca o como escoria. Los gasificadores de escoria requieren una relación más alta de vapor y oxígeno a carbono para alcanzar temperaturas más altas que la temperatura de fusión de cenizas. La naturaleza del gasificador significa que el combustible debe tener una resistencia mecánica elevada y debe ser no aglomerante de modo que formará un lecho permeable, aunque los desarrollos recientes han reducido estas restricciones hasta cierto punto. El caudal para este tipo de gasificador es relativamente bajo. La eficiencia térmica es alta ya que las temperaturas de salida del gas son relativamente bajas. Sin embargo, esto significa que la producción de alquitrán y metano es significativa a temperaturas de operación típicas, por lo que el gas producto debe limpiarse extensivamente antes de su uso o reciclado al reactor [21].

Las principales ventajas de este tipo de gasificador son su simplicidad, alto agotamiento de carbón, y el intercambio de calor interno que conduce a las bajas temperaturas de salida de gas y alta eficiencia de gasificación. De esta manera, también se pueden usar combustibles con alto contenido de humedad (hasta 50 por ciento en peso) [21].

Los inconvenientes principales son las altas cantidades de alquitrán y productos de pirólisis, porque el gas de pirólisis no es conducido a través de la zona de oxidación [21]. Esto es de menor importancia si el gas se utiliza para aplicaciones directas de calor, en las que los alquitranes son simplemente quemados. En el caso de que el gas se utilice

para motores, se requiere limpieza de gas, lo que provoca problemas de condensados que contienen alquitrán [21].

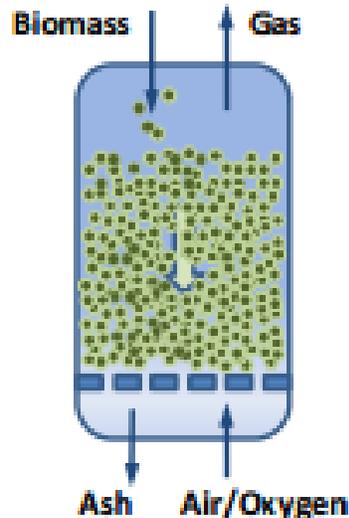


Figura 9 Funcionamiento de un gasificador de lecho fijo up draft [22].

- Lecho fijo *down – draft*. Es similar al tipo de contracorriente, pero el gas del agente de gasificación fluye en configuración concurrente con el combustible (hacia abajo, de ahí el nombre de gasificador de aire). El calor debe añadirse a la parte superior de la cama, ya sea por la combustión de pequeñas cantidades de combustible o de fuentes de calor externas. El gas producido sale del gasificador a una temperatura elevada, y la mayor parte de este calor se transfiere a menudo al agente de gasificación añadido en la parte superior del lecho, dando como resultado una eficiencia energética a nivel del tipo a contracorriente. Dado que todos los alisos deben pasar a través de una cama caliente de carbón en esta configuración, los niveles de alquitrán son mucho más bajos que el tipo de contracorriente [21].

Los inconvenientes del gasificador de corriente descendente son: (a) las altas cantidades de cenizas y partículas de polvo en el gas, (b) la inhabilidad de operar sobre una serie de combustibles no procesados, a menudo la granulación de la biomasa es necesaria (D) el contenido de humedad de la biomasa debe ser inferior al 25 por ciento para mantener la

alta temperatura y el contenido de minerales (rendimiento de cenizas) también debe ser baja y no nula, y) La alimentación debe tener un tamaño de partícula uniforme (Véase *figura 10*) [21].

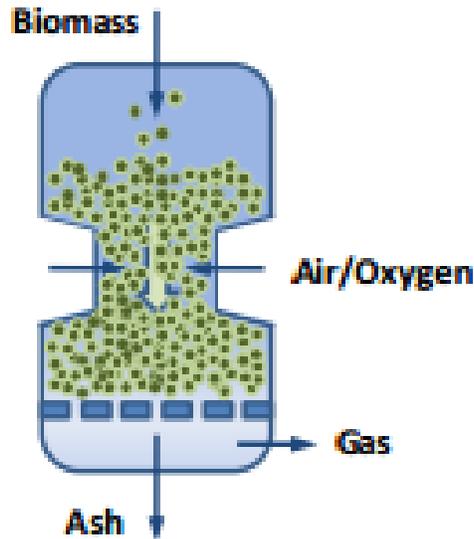


Figura 10 Esquema de un gasificador down draft [22].

- Lecho móvil. Biomasa pulverizada ingresa al gasificador con oxígeno y/o vapor presurizado. Una fuente de calor en la parte superior del gasificador quema parte del gasificador produciendo gran cantidad de calor a una temperatura alta para una conversión de la biomasa en una syngas de alta calidad. La ceniza es fundida en las paredes y es recolectada en el mismo estado por la parte inferior (véase *figura 11*) [21].

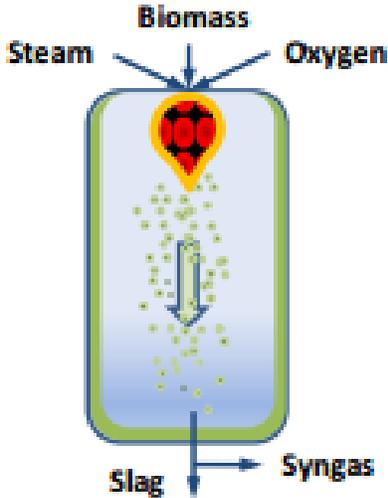


Figura 11 Esquema de un gasificador de lecho móvil [22].

- **Lecho fluido.** El combustible se fluidiza en oxígeno (o aire) y vapor. La ceniza se retira seca o como aglomerados pesados que defluidizan. Las temperaturas son relativamente bajas en gasificadores de ceniza seca, por lo que el combustible debe ser altamente reactivo; Los carbones de baja calidad son particularmente adecuados. Los reactores de lecho fluidizado presentan un mezclado extremadamente bueno con un buen calor y transferencia de masa. La gasificación es eficiente y típicamente excede el 90 por ciento de la materia prima, a menudo cae en un intervalo de 95 a 99 por ciento de carbono que se convierte. La ceniza se transporta con gas y se separa del gas en ciclones [21].

Los gasificadores aglomerantes tienen temperaturas ligeramente superiores, y son adecuados para carbones de alto rango. El caudal de combustible es mayor que para el lecho fijo, pero no tan alto como para el gasificador de flujo arrastrado. La eficiencia de conversión es bastante baja, por lo que es necesario reciclar o subsiguiente combustión de sólidos para aumentar la conversión. Los gasificadores de lecho fluidizado son más útiles para combustibles que forman ceniza altamente corrosiva que dañaría las paredes de gasificadores de escoria. La biomasa generalmente contiene altos niveles de componentes formadores de ceniza [21].

A su vez, los gasificadores de lecho fluido están clasificados en

- **Lecho fluido burbujeante.** Una capa fina de material inerte reposa en la parte baja del gasificador, con aire, oxígeno o vapor es soplado hacia arriba a través de la capa inerte para agitar dicho material. La biomasa ingresa por la parte lateral, y el syngas es extraído por la parte superior. El gasificador opera a temperaturas por debajo de 900 °C para evitar la fundición y pegado de la ceniza (véase *figura 12*) [22].

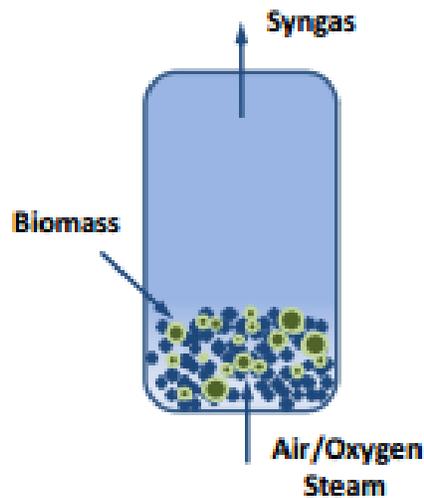


Figura 12 Esquema de un gasificador de fluido burbujeante [22].

- **Lecho fluido circulante.** Una capa fina de material inerte reposa en la parte baja del gasificador, con aire, oxígeno o vapor es soplado hacia arriba a través de la capa inerte para agitar dicho material. La biomasa ingresa por la parte lateral, y el syngas es extraído por la parte superior. El gasificador opera a temperaturas por debajo de 900 °C para evitar la fundición y pegado de la ceniza (véase *figura 13*) [22].

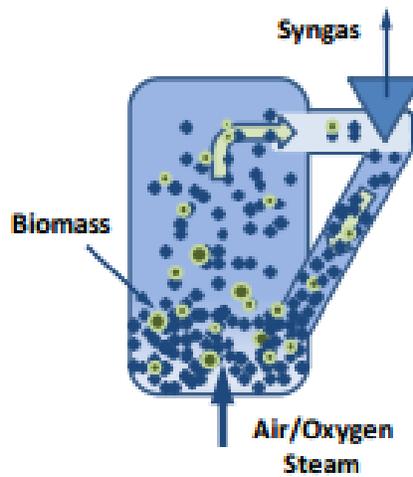


Figura 13 Esquema del gasificador del lecho fluido circulante [22].

- Lecho fluido dual.** Se tienen dos compartimientos, uno para el gasificador y otro para el combustor. La biomasa al gasificador, y es convertido en syngas libre de nitrógeno y carbón. El ciclón se encarga de remover cualquier molécula de syngas en el lecho fluido circulante. El gasificador opera a temperaturas por debajo de 900 °C para evitar la fundición y pegado de la ceniza (véase figura 14) [22].

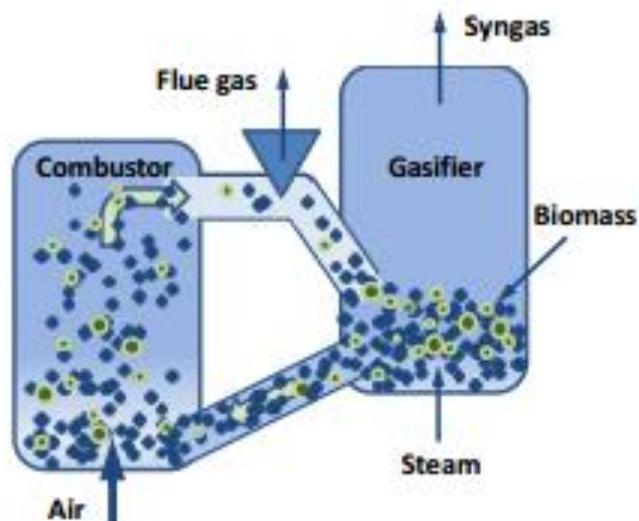


Figura 14 Esquema del gasificador de lecho fluido dual [22].

- **Gasificador por plasma.** La biomasa sin tratar es alimentada al gasificador y entra en contacto con un plasma generado por electricidad normalmente a presión atmosférica y temperatura de 1500 – 5000 °C. La materia orgánica es convertida en syngas de alta calidad, mientras que la materia inorgánica es vitrificada como escoria (véase *figura 15*) [22].

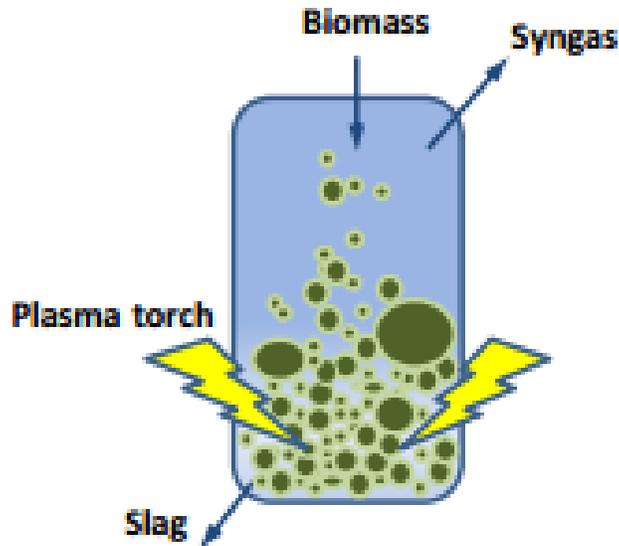


Figura 15 Esquema del gasificador de plasma [22].

1.5 Contribución de la tesis

La presente tesis desarrolla la Ingeniería Conceptual de un sistema energético integrado para la producción combinada de hidrógeno y electricidad a partir de bagazo de caña de azúcar. El concepto se aplica al diseño de un sistema de respaldo energético para un hospital en Chocope (La Libertad).

1.6 Objetivo general

- Desarrollar la ingeniería conceptual de un sistema de producción combinada de hidrógeno y electricidad.

1.7 Objetivos específicos

- Determinar la producción de syngas de una planta de gasificación.
- Determinar la producción de hidrógeno a partir de un proceso de gasificación.
- Determinar la producción de electricidad empleando pilas de combustible accionadas con hidrógeno.
- Determinar la configuración de los equipos de una planta de producción combinada de hidrógeno y electricidad.
- Determinar el tiempo del retorno de la inversión en una planta de producción integrada de hidrógeno y electricidad.

2 Sistemas de respaldo energético para hospitales

2.1 Sistema energético de respaldo con tecnología convencional

2.2 Propuesta de un novedoso sistema energético para el respaldo de hospitales

2.1 Sistema energético de respaldo con tecnología convencional

Un sistema de respaldo energético es aquel que suministra electricidad en casos de interrupción de fluido eléctrico, para asegurar la continuidad en la entrega de energía eléctrica y así garantizar el funcionamiento de equipos en un establecimiento. Además, puede operar en paralelo a la red eléctrica principal aportando una parte de la energía total demandada reduciendo así la dependencia de la red principal [23].

Entre las tecnologías más utilizadas se encuentran los sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS, Uninterruptible Power Supply) y los grupos electrógenos.

2.1.1 Sistema de alimentación ininterrumpida (UPS)

Un sistema UPS es un sistema de respaldo que entra en operación en caso de interrupción del suministro eléctrico. El equipo cuenta con una batería que almacena energía de la red principal. Su período de operación es limitado, por lo que no asegura un respaldo energético seguro a largo plazo [24, 25].

Principales componentes del sistema de alimentación ininterrumpida

- **Batería.** Es la que suministra energía eléctrica en caso ocurra una interrupción en la red principal y su unidad de medida está dado en Amperes hora, un UPS puede trabajar con un conjunto de baterías para incrementar su capacidad.
- **Rectificador.** Su función es rectificar la corriente que ingresa al equipo, el cual suministra corriente continua a la batería.
- **Inversor.** Se encarga de convertir la corriente continua a la salida de la batería en corriente alterna que alimentará a la carga.
- **Conmutador (bypass).** Es el intermediario entre la entrada y la salida del UPS [25].

Tipos de sistema de alimentación ininterrumpida:

- **Off-line o con conmutador paralelo a la línea principal,** entra en operación con un tiempo de conmutación en milisegundos cuando ocurre una interrupción en la red

principal, es perjudicial para equipos sensibles ya que pueden ser dañados al cambio de suministro eléctrico. Es el más usado para equipos de casa como computadoras, y es de menor precio a comparación de los otros tipos de UPS ya que cuenta con menos componentes. Su principal característica es el inversor (conmutador) ubicado fuera del circuito principal del fluido eléctrico, el conmutador conecta la entrada y la salida del UPS, además el conmutador está en stand-by hasta ocurrir el cambio de suministro. La principal desventaja de estos tipos de UPS es que no estabilizan la frecuencia de la corriente.

Al momento del corte del suministro eléctrico, la batería es quien toma acción y alimenta a la carga luego de un tiempo de conmutación con un aproximado de cinco milisegundos, el sistema será monofásico o trifásico dependiendo de la demanda [24, 25].

- **On-line o con conmutador en línea principal**, en este sistema no está presente el tiempo de conmutación, ya que está siempre en funcionamiento, es decir la batería suministra energía de manera constante a la carga y no el suministro de la red. Es de mayor costo que el off-line ya que otorga más protección a los equipos alimentados, en este caso no hay riesgo de daño sobre equipos sensibles.

El conmutador está conectado dentro del circuito principal y está conectado a la salida del inversor. Por el rectificador, el paso de la corriente es constante y permite cargar la batería y a la vez proveer energía al conmutador. Las baterías entran en operación al momento de una interrupción en la red principal sin alterar la salida del sistema, por lo que su nivel de protección está garantizado. Del mismo modo, el UPS off-line, en base a la demanda de la carga se definirá si el sistema será monofásico o trifásico [24, 25].

- **On-line modo bypass**, es una conexión en paralelo al circuito original del sistema que une la entrada y salida del UPS, su función es la de actuar en caso ocurra una falla en el circuito principal de sistema ya sea en el inversor por sobre calentamiento, sobrecarga, u otros problemas que se pueden presentar. Si ese es el caso el sistema

cambia a la conexión bypass hasta que se solucione el problema y vuelva a su estado inicial [24, 25].

2.1.2 Sistema de respaldo con grupo electrógenos

Los grupos electrógenos son utilizados como respaldo energético en caso de sobre demanda, como emergencia y cuando existan cortes de fluido eléctrico, por lo tanto, pueden operar en modo autónomo o en conjunto con la del suministro principal [25].

Componentes de un sistema de respaldo con grupo electrógeno

- **Motor.** Es el elemento donde se produce la combustión transformando la energía calorífica del combustible en energía mecánica para luego transferirla al alternador donde por último se genera energía eléctrica.

El tamaño del motor dependerá de la potencia que se requiera, y se adopta un margen para no presentar déficit en la operación normal de la planta. Los motores más comunes son los de gasolina y diésel.

- **Alternador.** Es el que genera energía eléctrica por impulso del motor, el cual transfiere energía mecánica a través del volante hacia el rotor. El tamaño del alternador dependerá de la demanda eléctrica de la carga.
- **Cuadro eléctrico de mando y control.** Es el componente encargado de controlar la operación del sistema, interviene en la puesta en marcha y modificación de los parámetros para su correcto desempeño.

El control en su mayoría es automático. Ya que permite accionar el sistema de forma autónoma al momento que sea necesario.

- **Sistema de escape de gases.** Los gases productos de la combustión en el motor son expulsados por un conducto hacia la atmósfera, estos gases son muy contaminantes y es la razón por la que algunas plantas poseen filtros, aunque no evitan del todo la contaminación [25].

2.2. Propuesta de un novedoso sistema energético para el respaldo de hospitales

El sistema energético propuesto en este trabajo se compone de tres subsistemas: (1) subsistema de producción de gas de síntesis (syngas), (2) subsistema de producción de hidrógeno, y (3) subsistema de producción de electricidad con pilas de combustible para brindar energía eléctrica a un hospital.

Lo novedoso de este sistema propuesto es la capacidad de producir simultáneamente hidrógeno y electricidad. El sistema puede operar de manera autónoma para atender la demanda de un hospital en horas punta y/o en horas fuera de punta.

3 Sistema integrado de producción de hidrógeno y electricidad

3.1 Introducción

3.2 Proceso de producción de syngas

3.3 Proceso de producción de hidrógeno

3.4 Proceso de producción de electricidad

3.1 Introducción

La producción combinada de hidrógeno y electricidad del sistema propuesto emplea tres procesos: (i) Proceso de producción de gas de síntesis mediante la gasificación del bagazo utilizando un gasificador down draft; (ii) Proceso de producción de hidrógeno por medio del acondicionamiento, limpieza y purificación del gas de síntesis con el uso de membranas de separación; y (iii) Proceso de producción de electricidad empleando pilas de combustible impulsados por el hidrógeno obtenido en la etapa previa.

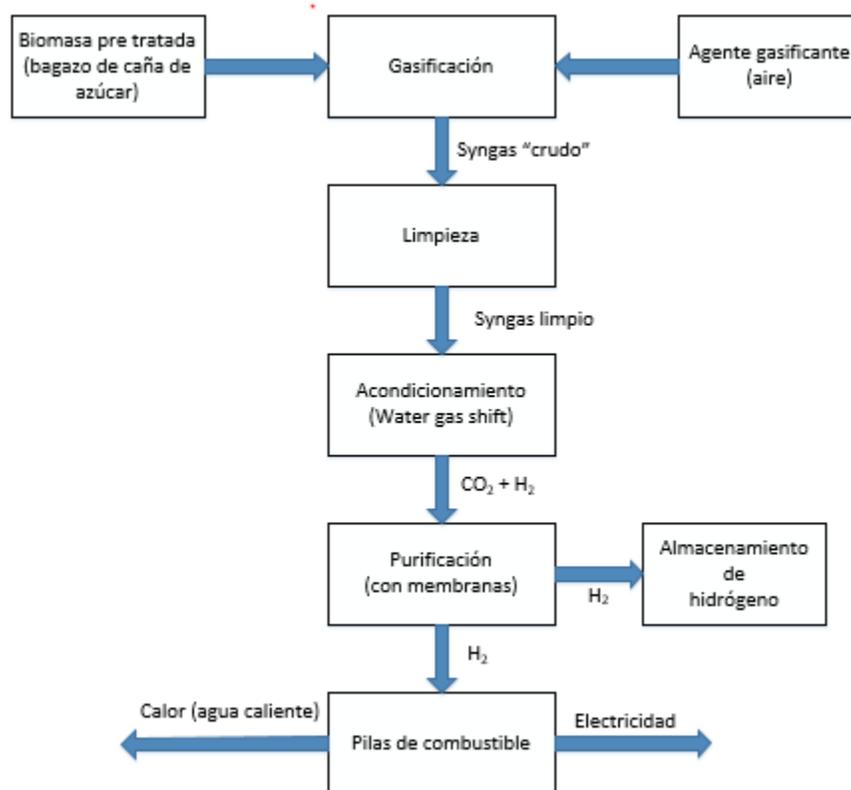


Figura 16 Producción integrada de hidrógeno y electricidad a partir de biomasa [26].

3.2 Proceso de producción de syngas

El proceso de producción de syngas se realiza a través de la gasificación de biomasa, el cual involucra un conjunto de reacciones termoquímicas donde la fuente de biomasa, en este caso el bagazo de la caña de azúcar, se combustiona en un ambiente bajo en oxígeno para producir el gas de síntesis, el cual contiene altos porcentajes de hidrógeno (H₂) y monóxido de carbono (CO), entre otros gases [27, 28]. Para el gasificador se presentan diversos parámetros de operación: dimensionamiento del equipo, temperatura de gasificación, tipos y propiedades de la biomasa (bagazo de caña de azúcar).

A continuación se describe las secuencias del proceso de obtención de syngas.

3.2.1 Acondicionamiento del bagazo de la caña de azúcar

Antes de iniciar la gasificación del bagazo de la caña de azúcar, se establecen ciertas condiciones para el bagazo, que involucran humedad, tamaño y agentes gasificadores, así como el tamaño adecuado, para lograr un proceso apropiado y evitar problemas en el interior de los equipos [29].

Reducción de tamaño del bagazo de la caña de azúcar

Conviene operar con partículas pequeñas ya que tienen superficies más grandes por unidad de masa y poros más grandes que permiten un mejor desempeño en la transferencia de calor y gasificación. Resultados de estudios demostraron incrementos en el porcentaje de hidrógeno y monóxido de carbono al realizar la gasificación con partículas más pequeñas, la reducción de tamaño con el cual se llevó a cabo el experimento fue de 1,2 mm a 0,075 mm [29].

Los equipos más usados para la reducción del tamaño de las partículas del bagazo de la caña de azúcar son el molino de martillos (*hammer mills*), el molino de cuchillos (*knife mills*) y la molienda de tubos (*tube grinds*).

Deshidratación del bagazo de caña de azúcar

El bagazo de la caña de azúcar contiene un alto porcentaje de humedad, por lo tanto, es necesario llevar a cabo un proceso de deshidratación antes de iniciar el proceso de gasificación, ya que al no disminuir la humedad del bagazo perjudicaría la calidad de los gases que se desean obtener como productos. La humedad del bagazo para el proceso de gasificación debe ser menor al 35 % [27]. Si bien, el proceso de secado disminuye la eficiencia global del sistema por el uso de energía térmica, se puede aprovechar el calor en forma de gases de escape del proceso de gasificación y así incrementar la eficiencia de la planta. Los equipos usados para este proceso son los secadores de tambores perforados, secadores de cinta transportadora y secadores rotatorios en cascada [29].

3.2.2 Proceso de gasificación

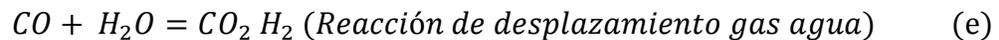
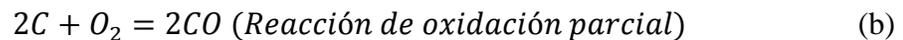
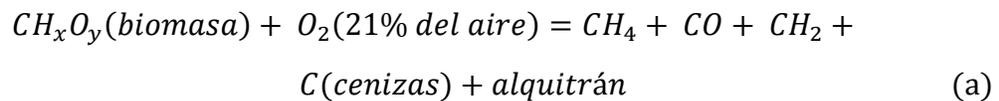
Luego de su acondicionamiento, la biomasa se envía al gasificador, donde a altas temperaturas y en presencia de un agente gasificante (aire, oxígeno, vapor, CO₂, o la mezcla de éstos) se realiza el proceso de gasificación (véase *figura 12*). En el gasificador toman lugar cuatro procesos: (1) el secado del bagazo y preparación de agentes gasificantes, (2) reacciones químicas, catálisis y pirolisis, (3) limpieza del syngas, y (4) reformado y obtención del syngas [30].

La temperatura es uno de los factores más influyente en el proceso de gasificación, por lo que se opera entre 600 – 1.000 °C. El objetivo de la gasificación es descomponer las moléculas grandes de biomasa en moléculas más ligeras mediante un proceso termoquímico y así dar origen a la producción del gas de síntesis, el cual es una mezcla de gases: monóxido de carbono, hidrógeno, metano y otros gases ligeros, además de cenizas, carbonizados y contaminantes en general [31].



Figura 17 Etapas del proceso de producción de syngas [30].

La reacción química general ocurre en el proceso de gasificación el cual muestra en la ecuación (a), y las reacciones específicas se dan en la gasificación se representan en las ecuaciones (b)-(f) [30, 31].



Todos los residuos (alquitrán, cenizas, carbonizados) obtenidos son depositados en un área determinada y serán tratados según la disposición de la planta, en caso de no contar con equipos pertinentes para el control de dichos residuos se gestionará con empresas externas la adecuada gestión de dichos residuos, en este trabajo no se profundizará en el tratamiento de residuos.

3.3 Proceso de producción de hidrógeno

Para la producción de hidrógeno el syngas debe someterse a un proceso de limpieza, ya que existe la presencia de alquitrán, compuestos alcalinos, nitrógeno y compuestos con

contenido de azufre. Para el uso del hidrógeno en las pilas de combustible es indispensable que el syngas contenga bajos niveles de alquitrán [31, 32].

3.3.1 Acondicionamiento del syngas

Las partículas grandes que contiene el syngas, como ceniza, carbón y material de lecho, llamados sedimentos de biomasa no reaccionan, la corriente de gas arrastra los arrastra y en consecuencia pueden causar problemas en los equipos y provocar deficiencias. Para la remoción de estas partículas (mayores a 5 μm de diámetro) se utilizan los separadores ciclónicos, equipos mecánicos formados por un cilindro vertical con fondo cónico, donde el syngas ingresa de forma tangencial y sale por la parte superior central.

Para la limpieza de partículas más pequeñas se usan depuradores húmedos, removiendo las partículas de alrededor de 1 μm de diámetro, y en mayor proporción, las partículas de alrededor de 2 μm . Los filtros de barrera y equipos de precipitación electrostática remueven partículas desde 0.5 hasta 100 μm [33].

Los componentes alcalinos se adhieren a la superficie metálica, ocasionando la corrosión. Además, retrasan el efecto de los catalizadores para el craqueo del alquitrán, reformado y la conversión de syngas en hidrocarburos. Por lo tanto, es importante la remoción de estos compuestos, que se puede hacer enfriando el syngas. Este proceso aún está en fase de experimentación [34].

Los componentes con contenido de nitrógeno deben ser removidos para evitar la formación de amoníaco y NO_x , el depurador húmedo puede remover estos compuestos. Mientras, los compuestos con contenido de azufre, el cual está presente en la biomasa en bajo contenido pueden ser convertidos en H_2S y SO_2 . Para la aplicación del hidrógeno en pilas de combustible es necesario remover esa pequeña cantidad de compuestos, mediante depuradores húmedos [34].

A continuación el *syngas* limpio se somete al proceso de separación del hidrógeno, existen diversas tecnologías para este fin, la membrana de separación es una tecnología donde la reacción y separación del hidrógeno se llevan a cabo. Entre las tecnologías de membranas

se encuentran: membranas poliméricas, membranas de metal densas, membranas conductoras de protón y membranas porosas [34].

3.4 Proceso de producción de electricidad

El uso de pilas de combustible para la producción de electricidad es una manera limpia de producir electricidad, ya que su operación desprende muy baja o nula polución y su eficiencia de conversión de energía es muy alta. El rendimiento eléctrico de las pilas de combustible alcanza hasta un 47%, y si se aprovecha el agua caliente que expulsa la celda se puede conseguir hasta un 90% de rendimiento [35].

En este proyecto de tesis se emplearán celdas de combustible con tecnología de membrana de intercambio polimérica (PEM, por sus siglas en inglés), con una eficiencia eléctrica de 60% y temperatura de operación de la pila de combustible de hidrógeno de 60 °C [35].

4 Caso de estudio: diseño de un sistema de respaldo energético con pilas de combustible para el hospital de Chocope (La Libertad)

4.1 Bases de diseño

4.2 Evaluación técnica de la producción de syngas, hidrógeno y electricidad

4.3 Evaluación económica de la planta producción de hidrógeno y electricidad

4.4 Análisis de resultados del caso de aplicación

Un sistema energético integrado de hidrógeno y electricidad incrementa la seguridad del suministro de electricidad, aporta oportunidades de desarrollo en las actividades económicas.

Lo expuesto se aplica en el diseño de un sistema de respaldo energético con pilas de combustible accionadas con hidrógeno procedente de la gasificación del bagazo de caña de azúcar en beneficio de la población que busca atención médica en el Hospital de Chocope, ubicado en el distrito de Chocope en el departamento de La Libertad, lugar donde el bagazo de caña de azúcar, el recurso energético necesario para la producción de hidrógeno. Se toman en cuenta dos alternativas de configuración de equipos para el sistema de gasificación: (i) con 9 gasificadores, (ii) con 1 gasificador.

4.1 Bases de diseño

4.1.1 Demanda eléctrica del hospital de Chocope

En la *tabla 2* se muestra la información del consumo de electricidad del Hospital de Chocope. En la *figura 18* se detalla el perfil de demanda eléctrica y de consumo de energía correspondiente al período Agosto 2015 – Agosto 2016, donde el consumo total de energía activa fue de 446 865 kWh/año y se facturó un total de S/. 201,522 soles equivalente a USD 59 271 para un tipo de cambio de S/. 3.4, del cual se puede obtener un precio promedio de compra de electricidad de S/. 0,45/kWh (133 USD/MWh) [36].

Tabla 2 Demanda eléctrica mensual del hospital de Chocope [36].

Mes	Horas punta (kW)	Horas fuera de punta (kW)
Agosto 2015	68,88	89,17
Septiembre 2015	65,80	77,49

Octubre 2015	68,26	87,33
Noviembre 2015	69,48	83,02
Diciembre 2015	73,18	85,48
Enero 2016	73,18	95,94
Febrero 2016	84,25	106,39
Marzo 2016	92,86	109,47
Abril 2016	89,79	112,54
Mayo 2016	84,25	100,24
Junio 2016	67	80,56
Julio 2016	67	87,94
Agosto-2016	78	84,25

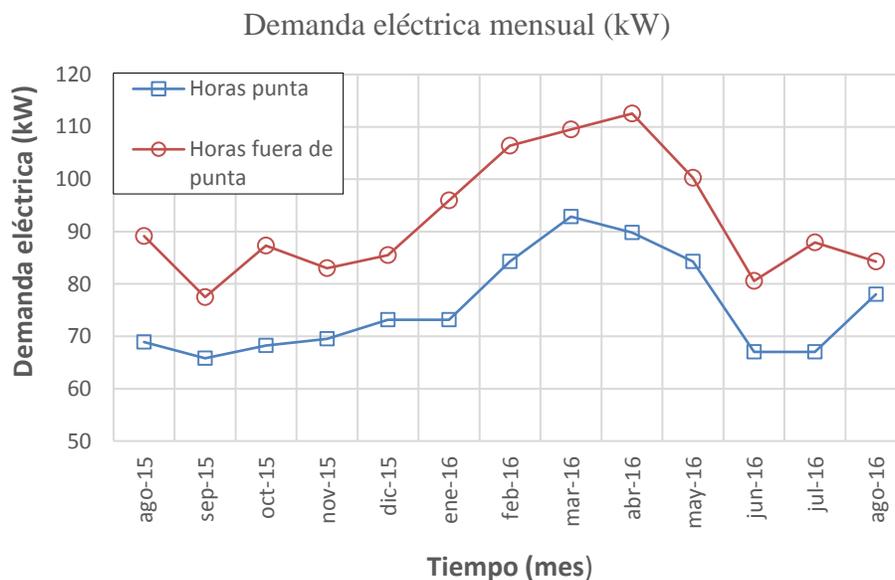


Figura 18 Perfil de la demanda eléctrica mensual del Hospital de Chocope (Elaboración propia) [36].

4.1.2 Características de operación de la planta de suministro energético

El diseño del sistema de respaldo energético debe cumplir las siguientes restricciones:

- La planta deberá operar con una autonomía de 48 horas ininterrumpidas.
- El sistema de almacenamiento estará distribuido en tanques presurizados de volumen equivalente tal como se muestra en la *figura 19*.
- El hidrógeno producido se almacenará en tanques presurizados.
- El almacenamiento de hidrógeno se realizará en 60 horas, empleando turnos de 12 h/día.

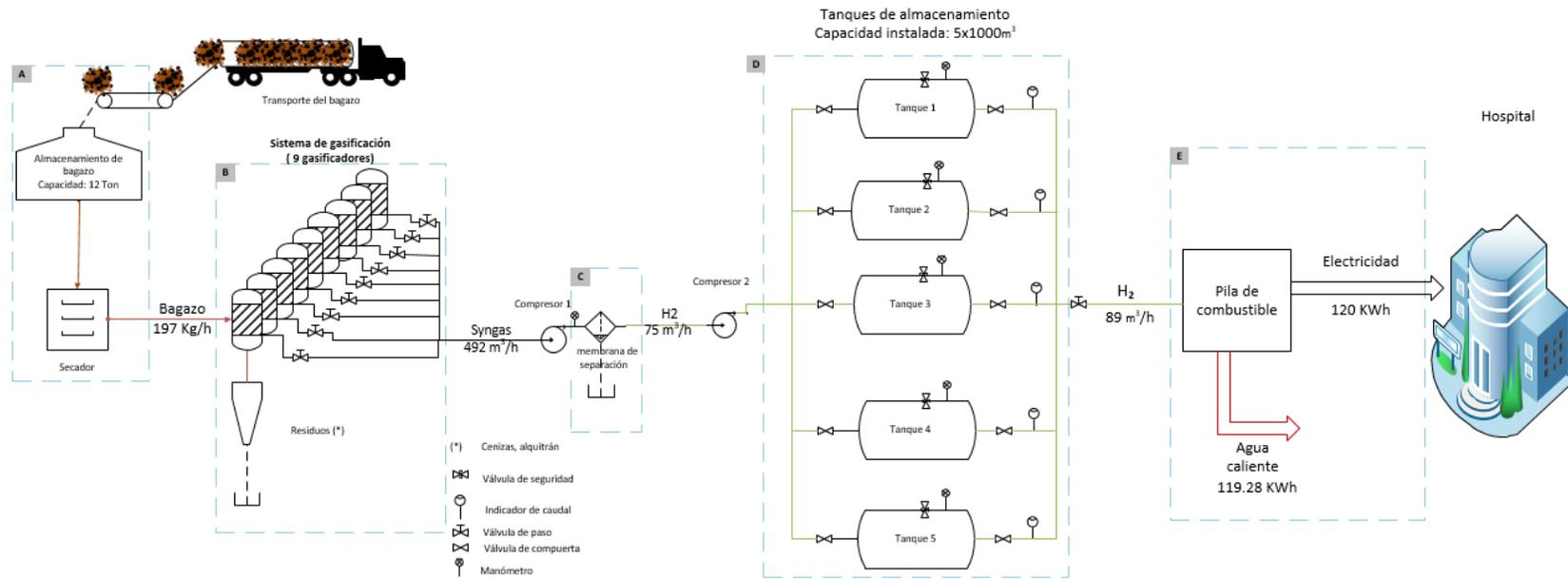


Figura 19 Configuración de equipos del sistema de producción de hidrógeno y electricidad con nueve gasificadores

Considerando estas restricciones, se propone un conjunto de procesos para el sistema mostrado en la *figura 19*. La planta deberá contar con un área para el almacenamiento de bagazo, cinco tanques idénticos bajo las mismas condiciones físicas para almacenar 5000 m³ de hidrógeno, nueve gasificadores de biomasa, un cartucho de membranas para la limpieza y separación del hidrógeno, un sistema de acondicionamiento y purificación del syngas, dos compresores (para el syngas y el hidrógeno), y una pila de combustible tipo PEM de 120 kW, así como instrumentos complementarios (manómetros, tuberías, etc.)

4.1.3 Características técnicas de los equipos

- Gasificador. Se empleará un gasificador de lecho fijo tipo downdraft [37]. Para atender la demanda del hospital, el sistema deberá producir 492 m³/h de syngas, según la alternativa 1 se utilizará nueve gasificadores iguales para producir la cantidad necesaria que demandan las pilas de combustible. La alternativa 2 propone trabajar con un gasificador. En la *tabla 3* se muestra un resumen de las características técnicas del gasificador de la alternativa 2.

Tabla 3 Características técnicas del gasificador [37].

Parámetros	Valores
Flujo de gas	500 Nm ³ /h
Consumo de biomasa	160 – 200 kg/h
Modelo de gasificador	WBG-200

- Pila de combustible. Se emplearán pilas de combustible de tecnología PEM (Membrana polimérica), cuyas características se muestran en la *tabla 4*.

Tabla 4 Características técnicas de la pila de combustible PEM [38].

Propiedad	Unidad	Valor
Dimensiones físicas por módulo	cm	106 x 76 x 213
Masa total (4 módulos)	Kg	549
Potencia eléctrica	kW	120
Máxima potencia	kW	132
Corriente de operación	A _{DC}	0-500
Voltaje de operación	V _{DC}	240-380

Máxima eficiencia eléctrica	%	50
-----------------------------	---	----

- Membrana de separación. En el proceso de separación se utilizan membranas fabricadas a partir de poli fibras sintéticas, las condiciones de operación se muestran en la *tabla 5* [39].

Tabla 5 Características técnicas de la membrana de separación.

Parámetros	Valores
Presión de alimentación	1800 psi
Recuperación de H ₂	85-95%
Recuperación de H ₂ puro	92-90%

- Tanque presurizado para el almacenamiento de hidrógeno. El almacenamiento del hidrógeno obtenido del proceso de separación será cubierta por 5 tanques de igual capacidad (1000 m³), las características son mostradas en la *tabla 6*.

Tabla 6 Características técnicas del sistema de almacenamiento.

Parámetros	Valores
Capacidad	1000 m ³ H _{2(g)}
Tiempo de llenado	12 horas

4.2 Evaluación técnica

La operación de la pila de combustible (PEM) de 120 kW requiere 89 m³/h de hidrógeno. Como el equipo debe operar en caso extremo durante 48 horas continuas, entonces se debe disponer de 3600 m³ hidrógeno (75 m³/h durante 48 horas continuas).

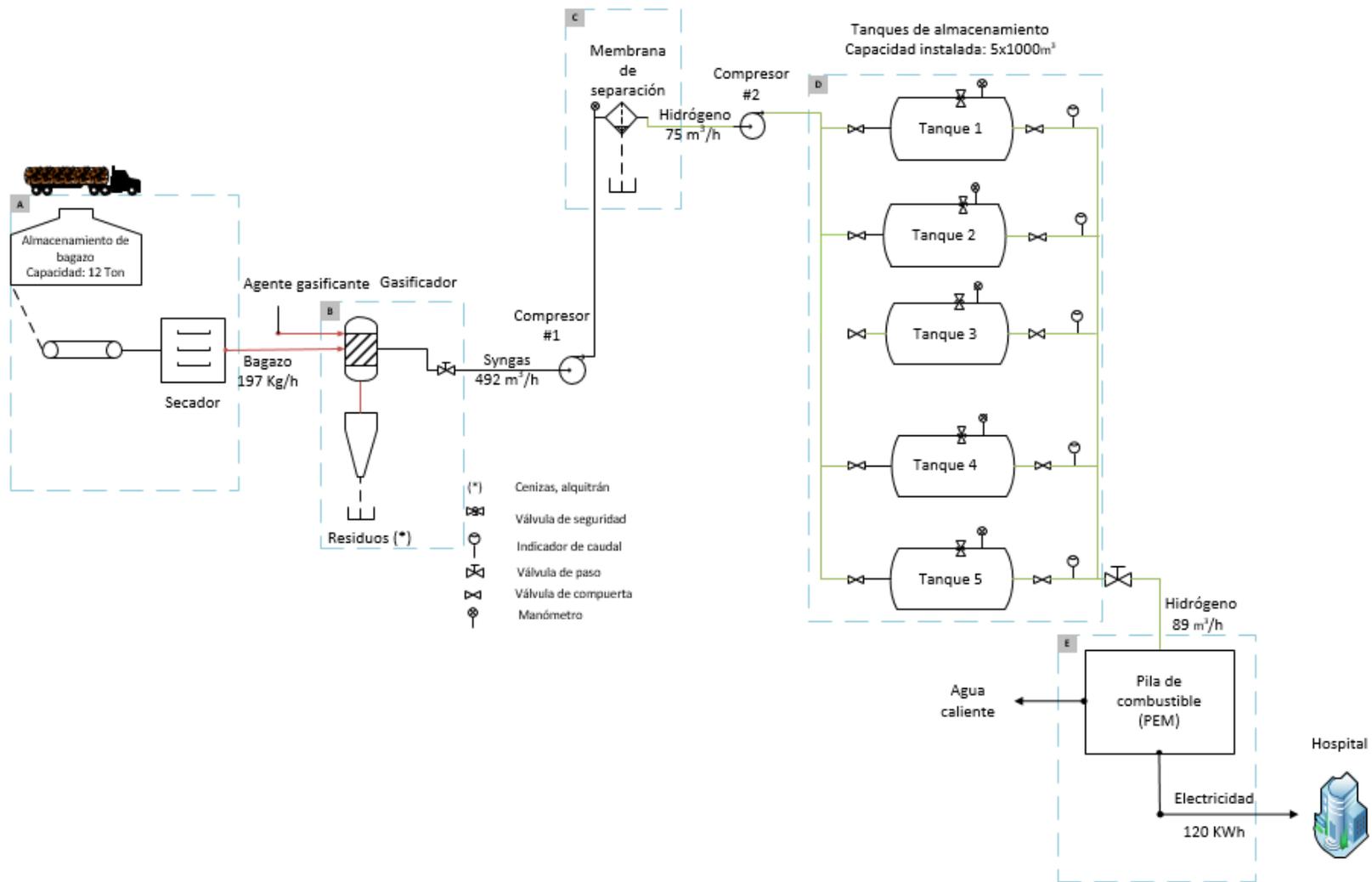


Figura 20 Diagrama de flujo del sistema de producción de hidrógeno y electricidad con un gasificador.

Tabla 7 Ratios de consumo y producción de la planta.

Proceso	Ratios
Consumo de bagazo	197 kg/h
Producción de syngas	492 m ³ /h
Producción de hidrógeno	75 m ³ /h
Consumo de hidrógeno por las pilas de combustible	89 m ³ /h

En el proceso de limpieza se emplean cartuchos de membrana de separación de poli fibras para la purificación del hidrógeno contenido en el syngas. En el proceso de producción de electricidad, la pila de combustible (PEM) consumirá 89 m³/h de hidrógeno para producir 120 kW.

4.3 Evaluación económica

4.3.1 Costo de inversión en equipos

Para el cálculo de los costos de inversión en equipos se emplearon las metodologías: (i) Método del factor de tamaño; y (ii) Método del índice de costo.

Método del factor de tamaño. Para estimar el costo de inversión en equipos, se emplea la ecuación 1, donde el exponente N es el factor de tamaño del equipo y varía desde 0.3 hasta 1 [40].

Donde:

$$C_B = C_A \left(\frac{S_B}{S_A} \right)^N \quad (1)$$

C_B: Costo aproximado del equipo de tamaño S_B (expresado en cfm, Hp, ft², u otras unidades)

C_A: Costo conocido del equipo de tamaño S_A (en las mismas unidades que S_B).

El ratio S_B/S_A se conoce como factor de tamaño.

Método de índices de costo. Si el costo de equipo referencial es de un año inferior al presente, se multiplica por un factor de índice actual para obtener un costo referencial actualizado. Y la *ecuación 2* muestra la relación matemática del índice de costo [40].

$$C = C_o \left(\frac{I}{I_o} \right) \quad (2)$$

C: costo actual

C_o: costo base

I: índice actual

I_o: índice base

El índice de costo más utilizado es el CEPCI (Chemical Engineering Plant Cost Index) [40].

Cálculo del costo de inversión del gasificador

El costo del gasificador se calculó a partir de la referencia obtenida de un proyecto realizado en La India. El gasificador es del fabricante Ankur Scientific Energy Technologies [41].

El costo base del gasificador es USD 44.707, por lo que se empleó la *ecuación 1* para calcular el precio estimado de un gasificador de tamaño acorde al proyecto, pero antes se calculó el costo actual del gasificador base aplicando la *ecuación 2*, los indicadores CEPCI del año 2010 y 2016 son 550,8 y 556,8 respectivamente.

$$C = (\text{USD } 44.707) \times \left(\frac{556,8}{550,8} \right)$$

$$C = \text{USD } 45.194$$

Luego se calcula el costo estimado del gasificador para el proyecto,

$$C_B = (\text{USD } 45.194) \left(\frac{500}{1125} \right)^{0,6}$$

$$C_B = \text{USD } 27.782,5$$

Costo de inversión del tanque para almacenamiento de hidrógeno

En promedio el índice de costo específico de un tanque de almacenamiento de hidrógeno es de 500 USD/kg H₂ (véase *figura 21*), la capacidad del sistema de almacenamiento es de 420,5 kg de H₂, con estos datos se calcula un costo de USD 210.250 para cinco tanques similares [42].

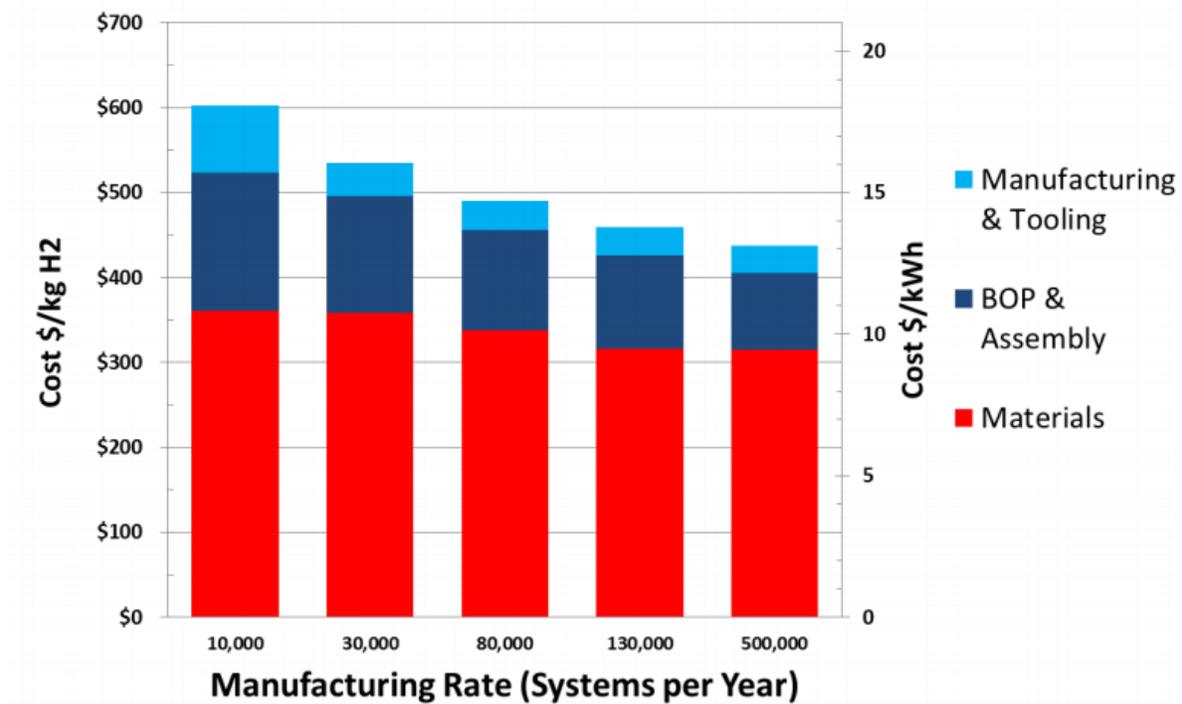


Figura 21 Costo de fabricación de tanques de almacenamiento [42].

Costo de inversión de la pila de combustible

El costo del sistema de pilas de combustible se obtuvo mediante una cotización con el fabricante Hydrogenics. El costo de la pila de combustible de intercambio protónico (PEM) es USD 318.000 [43].

Costo de inversión de la planta

Alternativa 1: con 9 gasificadores

Para la evaluación económica del sistema energético para el respaldo del hospital de Chocope se tomaron en cuenta los costos de la *tabla 8*.

Tabla 8 Costos de inversión de la planta (caso 1).

Equipo	Fabricante	Escenario 1	
		Cantidad	Costo (\$)
Gasificador	GEK	9	166.500
Pila de combustible	Hydrogenics Corporation	1	318.000
Membrana separadora	Air Products	1	7.000
Tanques	Bulk Storage Tank	5	210.250
Convertidor	Schaefer	1	20.200
Compresores	LX-Series hydropac	2	50.000
Instrumentación	Omega		28.500
Total			800.450

Alternativa 2: con 1 gasificador

Tabla 9 Costos de inversión de la planta (caso 2).

Equipo	Fabricante	Escenario 2	
		Cantidad	Costo (\$)
Gasificador	GEK	1	27.782
Pila de combustible	Hydrogenics Corporation	1	318.000
Membrana separadora	Air Products	1	7.000
Tanques	Bulk Storage Tank	5	210.250
Convertidor	Schaefer	1	20.200
Compresores	LX-Series hydropac	2	50.000
Instrumentación	Omega		28.500
Total			661.732

Evaluación económica de la operación de la planta de producción de hidrógeno y electricidad.

Alternativa 1: con 9 gasificadores

Para la evaluación económica de la planta (alternativa #1) se ha considerado los valores mostrados en la *tabla 9* para determinar la viabilidad de la planta, la lista contiene factores que se ajustan acorde al entorno económico actual, y montos obtenidos a partir de datos reales como la factura anual de electricidad, precios de equipos, biomasa y electricidad, así como ratios de consumo de la planta.

Tabla 10 Consideraciones para la evaluación económica de la producción de hidrógeno/electricidad (alternativa 1).

Ítem	Descripción	Valor
F _e	factura anual de electricidad	59.271 USD
I _n	costo de inversión en equipos	950.200 USD
F _a	factor de amortización de capital	0,15 año ⁻¹
P _b	precio del bagazo pre tratado	18,50 USD/ton
P _c	precio promedio de compra de electricidad	133,00 USD/MWh
P _{eb}	precio promedio venta electricidad de biomasa	77 USD/MWh
r ₁	ratio consumo-bagazo/producción-biohidrógeno	0,00263 ton/m ³
r ₂	ratio consumo-bagazo/producción-electricidad	1,64 ton/MWh
r ₃	ratio consumo-biohidrógeno/producción-electricidad	625 m ³ /MWh

La evaluación económica considera tres escenarios de operación de la planta:

- (1) Operación en horas punta (18:00 a 23:00 horas). Las horas punta es el rango tiempo del día en el que se registra la mayor demanda (1825 horas), la planta deberá producir electricidad durante todas las horas punta todos los días del año.
- (2) Operación ajustada a la demanda de electricidad del hospital. La planta producirá durante todo el año sin interrupciones para abastecer de electricidad la demanda del hospital sin presentar excedentes.

(3) Operación a plena carga. En este escenario aprovecha el máximo la capacidad de la planta de modo que se produce electricidad con excedentes y con oportunidades de ahorro a través de su venta a consumidores distintos al hospital.

Tabla 11 Resultados de la evaluación económica del microsistema energético para diferentes modos de operación (alternativa 1).

Ítem	Descripción	Modo de operación		
		Horas punta	Ajustado a la demanda	Plena carga (con excedentes)
t	tiempo de operación (h/año)	1825	8760	8760
E	consumo de electricidad del hospital (MWh/año)	82,70	446,90	446,90
P	producción de electricidad (MWh/año)	82,70	446,90	1051,2
W_x	excedentes de electricidad (MWh/año)	0	0	604
B	consumo de bagazo (ton/año)	161	871	2.050
H	producción de hidrógeno (m ³ /año)	61.349	331.327	779.407
C_B	facturación de consumo de bagazo (USD/año)	2.985	16.121	37.922
V_{EX}	Venta de excedentes de electricidad (USD/año)	0	0	46.534
S	Ahorro económico anual (USD/año)	0	0	105,805
P_{bk}	Payback (años)	-	-	9
$A^{(*)}$	Costo anual de explotación (USD/m ³)	145.515	156.651	180.452
C_{PH}	Costo de producción de hidrógeno (USD/m ³)	2,37	0,48	0,23
C_W	Costo de producción de electricidad (USD/MWh)	1759	355	172
Consideraciones: Vida útil de los equipos es de 20 años, tasa de interés anual de 10 %, costo de O&M representa el 3,25% del costo total de inversión. (**) $A=f_{AM} \cdot I + O$				

Alternativa 2: con 1 gasificador

Tabla 12 Consideraciones para la evaluación económica de la producción de hidrógeno y electricidad (alternativa 2).

Ítem	Descripción	Valor
F_e	factura anual de electricidad	59.271,00 USD
I_n	costo de inversión en equipos	811.282,50 USD
F_a	factor de amortización de capital	0,15 año ⁻¹
P_b	precio del bagazo pre tratado	18,5 USD/ton
P_c	precio promedio de compra de electricidad	133,00 USD/MWh
P_{eb}	precio promedio venta electricidad de biomasa	77 USD/MWh
r_1	ratio consumo-bagazo/producción-biohidrógeno	0,00263 ton/m ³
r_2	ratio consumo-bagazo/producción-electricidad	1,64 ton/MWh
r_3	ratio consumo-biohidrógeno/producción-electricidad	625 m ³ /MWh

La evaluación económica considera los mismos escenarios planteados en la *alternativa 1*:

Tabla 13 Resultados de la evaluación económica del microsistema energético para diferentes modos de operación (alternativa 2).

Ítem	Descripción	Modo de operación		
		Horas punta	Ajustado a la demanda	Plena carga (con excedentes)
t	tiempo de operación (h/año)	1825	8760	8760
E	consumo de electricidad del hospital (MWh/año)	82,70	446,86	446,86
P	producción de electricidad (MWh/año)	82,70	446,86	1051,2
W_x	excedentes de electricidad (MWh/año)	0	0	604
B	consumo de bagazo (ton/año)	161	871	2050
H	producción de hidrógeno (m ³ /año)	61.349	331.327	779.407
C_B	facturación de consumo de bagazo (USD/año)	2.985	16.121	37.922
V_{EX}	Venta de excedentes de electricidad (USD/año)	0	0	46.534
S	Ahorro económico anual (USD/año)	0	0	105,805
P_{bk}	Payback (años)	-	-	8
$A^{(*)}$	Costo anual de explotación (USD/m ³)	124.677	137.813	159.614
C_{PH}	Costo de producción de hidrógeno (USD/m ³)	2,03	0,42	0,20
C_W	Costo de producción de electricidad (USD/MWh)	1507	308	152
Consideraciones: Vida útil de los equipos es de 20 años, tasa de interés anual de 10 %, costo de O&M representa el 3,25% del costo total de inversión. (**) $A=f_{AM} \cdot I + O$				

4.4 Análisis de resultados

En el escenario de la alternativa 1 donde el sistema energético solo opera en horas punta, con una capacidad de 120 kWe, se produce electricidad a un precio de 1.759 USD/MWh, que resulta en una propuesta inviable. Pero, para un escenario de operación a plena carga durante 8.760 h/año, el sistema energético de 120 kWe genera excedentes de electricidad cuya venta provoca la disminución del costo de producción hasta 172 USD/MWh. En este caso, la inversión podría recuperarse en 9 años, que se acerca más a una propuesta viable. En cuanto a la alternativa 2, el costo de producción de electricidad es 1.507 USD/MWh para un escenario en horas punta. En el escenario a plena carga, el costo de producción es 152 USD/MWh, la inversión se recuperaría en 8 años.

Con el uso de pilas de combustible se logra reducir el impacto medioambiental, ya que la combustión del bagazo de la caña de azúcar produce 54.600 ton CO₂/TJ frente a 74.100 ton CO₂/TJ. Ante otras tecnologías que utilizan combustibles fósiles, las pilas de combustible

solo generan electricidad y agua, lo cual lo convierte en una alternativa potencial que solo requiere hidrógeno para su funcionamiento.

Conclusiones

1. Este proyecto de tesis es importante en la línea de resolver un problema de falta de energía, en especial el caso de los hospitales, que por la naturaleza de su servicio, es vital para la población mundial. Se busca revertir la vulnerabilidad de la infraestructura eléctrica que ante desastres naturales es inevitable la interrupción del suministro eléctrico. Asimismo, es importante la diversificación de la generación de electricidad y mejorar la seguridad del suministro energético, para un hospital.
2. Se cumple el objetivo principal de la tesis en base a el desarrollo de la ingeniería conceptual apoyado en ciertas restricciones y condiciones para facilitar el resultado de los objetivos específicos mostrados en el caso de estudio. Los diferentes ratios de producción mostrados en el desarrollo de la tesis demuestran cumplimiento de los objetivos específicos en base a valores reales de consumo de electricidad del hospital de Chocope.
3. La instalación resulta viable cuando la producción de electricidad se da en gran escala y permite la venta externa del excedente de electricidad. En un escenario donde el sistema solo opera en horas punta, con una capacidad de 120 kWe, se produce electricidad a razón de 1.229 USD/MWh, en consecuencia, se convierte en una propuesta inviable. Pero para un escenario de operación a plena carga durante 8.760 h/año, el sistema energético de 120 kWe genera excedentes de electricidad cuya venta provoca la disminución del costo de producción hasta 130 USD/MWh. En este caso, la inversión podría recuperarse en 6 años, que se acerca más a una propuesta viable.
4. Si se contemplan nuevas opciones energéticas (sistema de pilas de combustible con mayor potencia eléctrica instalada) se podría obtener un payback menor al de la propuesta, por lo que conviene una integración de demanda distinto al hospital. En escenarios con potencias de 250, 500, 750, 1.000, 1.250 o 1.500 kWe se estaría

obteniendo un tiempo de retorno de la inversión menor, lo cual haría viable el proyecto (véase *figura 22*).

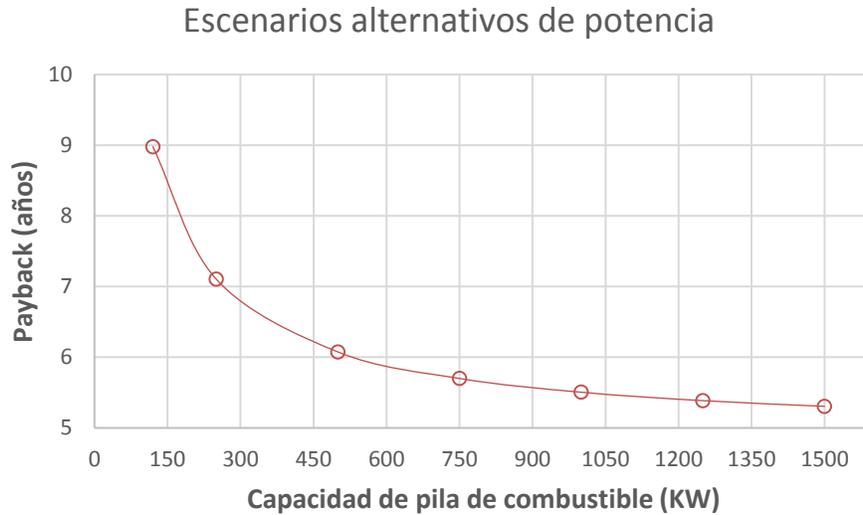


Figura 22 Variación del payback según el incremento de potencia de pilas de combustible.

5. La producción de hidrógeno de la planta en su máxima capacidad es de 779.407 m³/año donde el consumo de bagazo para tal volumen de hidrógeno es de 2.050 toneladas, y la producción de syngas es de 492 m³/año, la producción de electricidad en un año es de 1.051,2 MWh.

6. Ante otras tecnologías que utilizan combustibles fósiles, las pilas de combustible solo generan electricidad y agua, lo cual lo convierte en una alternativa potencial, debido a que solo requiere hidrógeno y oxígeno para su funcionamiento.

REFERENCIAS

- [1] Minem: Ministerio de Energía y Minas.
http://www.minem.gob.pe/_detalle.php?idSector=10&idTitular=6397 (acceso: 17.10.2016)
- [2] Osinergmin: Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería.
<http://www.osinergmin.gob.pe/> (acceso: 17.10.2016)
- [3] Minsa: Ministerio de Salud
<http://bvs.minsa.gob.pe/> (acceso: 17.10.2016)
- [4] INEI (2016) *Perú: Síntesis Estadística 2016/Perú: Statistical Overview 2016*.
http://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1391/libro.pdf (acceso: 17.4.2017)
- [5] MINAGRI (2016). *Boletín Estadístico de Producción Agroindustrial Alimentaria 2016*.
http://siea.minagri.gob.pe/siea/sites/default/files/boletin_estadistico_prod_agroindustrial_dic16_0.pdf (acceso: 17.04.2017)
- [6] Teixeira, S. R., Arenales, A., de Souza, A. E., Magalhães, R. D. S., Peña, A. F. V., Aquino, D., & Freire, R. (2015). *Sugarcane Bagasse: Applications for Energy Production and Ceramic Materials*. *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, 41(3), 229-238.
- [7] Patel, D. and Patel, V. (2015). *Application of Sugarcane Bagasse Fibres As Concrete Composites for Rigid Pavement*. *Paripex - Indian Journal Of Research*, Vol 4, Issue 4 (April 2015).
- [8] Chandel, A. K., da Silva, S. S., Carvalho, W., & Singh, O. V. (2012). *Sugarcane bagasse and leaves: foreseeable biomass of biofuel and bio-products*. *Journal of chemical technology and biotechnology*, 87(1), 11-20.
- [9] Hussain, A., & Qazi, J. I. (2016). *Application of sugarcane bagasse for passive anaerobic biotreatment of sulphate rich wastewaters*. *Applied Water Science*, 6(2), 205-211.
- [10] Waldheim, L., Monis, M., & Verde Leal, M. R. (2000). *Biomass power generation: Sugar cane bagasse and trash*. *Progress in thermochemical biomass conversion*, 509-523.

- [11] Pereira, S. C., Maehara, L., Machado, C. M. M., & Farinas, C. S. (2015). *2G ethanol from the whole sugarcane lignocellulosic biomass*. *Biotechnology for biofuels*, 8(1), 44.
- [12] Payne, J. H. (2012). *Cogeneration in the cane sugar industry*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- [13] Pacific CHP Technical Assistance Partnerships (2010). *St. Helena Hospital 400-kW Fuel Cell System*.
<http://www.pacificchptap.org/data/sites/2/projectprofiles/pdf/st-helena-hospital.pdf> (acceso: 17.10.2016)
- [14] Fuel Cell & Hydrogen Energy Association (2014). *Fuel Cells and Hospitals Applications*.
<https://static1.squarespace.com/static/53ab1fee4b0bef0179a1563/t/554d0390e4b0f616e677ee9b/1431110544979/Hospitals.pdf> (acceso: 17.10.2016)
- [15] The United States Department of Energy (2014). *The Business Case for Fuel Cells 2014: Powering the Bottom Line for Businesses and Communities*. http://energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/fcto_2014_business_case_fuel_cells.pdf (acceso: 06.12.2016)
- [16] Hartford Steam Company (2013). *In the loop/Hartford steam tap fuel cell benefits*. <http://www.hartfordsteam.com/news/intheloop.2nd.2013.pdf> (acceso: 06.12.2016)
- [17] Sutter Health – Sutter Santa Rosa Regional Hospital (2014). *Fuel Cell Technology at the Sutter Santa Rosa Hospital Campus*. <http://www.suttersantarosa.org/newhospital/about/fuelcelltechnology.html> (acceso: 06.12.2016)
- [18] H. Wayne Beaty; Donald G. Fink (2013) *Standard Handbook for Electrical Engineers, Sixteenth Edition*. FUEL CELLS, Chapter (McGraw-Hill Professional).
- [19] Martínez Reyes, Rocío (2016). *Pilas de combustible tipo PEM. Aplicación al suministro de energía eléctrica a una vivienda*. Departamento de Ingeniería Energética, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90822/fichero/Trabajo+Fin+de+Grado+RMR.pdf> (acceso: 18.02.2017)
- [20] James G. Speight (2008) *Synthetic Fuels Handbook: Properties, Process, and Performance*. FUELS FROM BIOMASS, Chapter (McGraw-Hill Professional)

- [21] James G. Speight (2008) *Synthetic Fuels Handbook: Properties, Process, and Performance*. FUELS FROM COAL, Chapter (McGraw-Hill Professional).
- [22] DECC (2009). *Review of Technologies for Gasification of Biomass and Wastes*, E4Tech & NNFFC.
- [23] SIDEI INGENIEROS (s.f.). *Equipos de respaldo de energía eléctrica UPS, SPS*. <http://www.sidei.cl/pdfs/UPS%20y%20SPS.pdf> (acceso: 18.10.2016)
- [24] Menacho Villa, A. (2013). *Sistemas de alimentación ininterrumpida. 1st ed. Madrid: Paraninfo*.
- [25] Fher, R. H. (Junio de 2010). *Análisis técnico-económico del sistema de respaldo de energía eléctrica de entidades bancarias*. Sartenejas, Venezuela: Universidad Simón Bolívar.
- [26] Ramos, J. *et al.* *Microsistema energético de respaldo para hospitales basado en pilas de combustible accionadas con biohidrógeno a partir de bagazo de caña de azúcar*. Congreso Interamericano de Ingeniería Química, Cusco – Perú, Octubre 2016.
- [27] Richardson, Y.; Drobek, M.; Julbe, A. and Pinta, F. (2015). *Biomass Gasification to Produce Syngas. Chapter in book Recent Advances in Thermo-Chemical Conversion of Biomass*, pp.213 – 245. Elsevier.
- [28] Hossain, M. and Charpentier, P. (2015). *Hydrogen production by gasification of biomass and opportunity fuels*. Chapter in book *Compendium of Hydrogen Energy. Hydrogen Production and Purification*, pp. 137–175. Woodhead Publishing, 2015.
- [29] Kumar, A., Jones, D. D., & Hanna, M. A. (2009). *Thermochemical biomass gasification: a review of the current status of the technology*. *Energies*, 2(3), 556-581.
- [30] Ruiz, E y Sánchez, J. (2014). *Purificación y acondicionamiento del gas de gasificación de biomasa*. Boletín del Grupo Español Carbón. Departamento de Energía, CIEMAT (Spain).
- [31] Bernardo, P. and Jansen, J. (2015). *Polymeric membranes for the purification of hydrogen*. Chapter in book *Compendium of Hydrogen Energy Hydrogen Production and Purification*, pp. 419-443.
- [32] Gallucci, F., Fernandez, E., Corengia, P., & van Sint Annaland, M. (2013). *Recent advances on membranes and membrane reactors for hydrogen production*. *Chemical Engineering Science*, 92, 40-66.

- [33] Ahmed, I. I., & Gupta, A. K. (2012). *Sugarcane bagasse gasification: global reaction mechanism of syngas evolution*. *Applied Energy*, 91(1), 75-81.
- [34] De Filippis, P., Borgianni, C., Paolucci, M., & Pochetti, F. (2004). *Gasification process of Cuban bagasse in a two-stage reactor*. *Biomass and Bioenergy*, 27(3), 247-252.
- [35] Fuel Cell Energy (2016). *Highly efficient fuel cells drive improved power generation economics*. <http://www.fuelcellenergy.com/why-fuelcell-energy/benefits/efficient/>(acceso: 21.11.2016)
- [36] Hidrandina / Distriluz: empresa de distribución y comercialización de energía eléctrica. *Data sobre consumo de electricidad del Hospital de Chocope*. <http://www.distriluz.com.pe/ConsultaRecibos/ConsultaRecibo.aspx?empres a=3> (acceso: 22.10.2016)
- [37] Ankur Scientific Energy Technologies Private Limited (2016). *Gasifier WBG series-* <http://www.indiamart.com/ankurscientific/gasifier-wbg-series.html> (acceso: 16.12.2016).
- [38] Hydrogenics Corporation (2016). *Fuel cell HyPM R120*. <http://www.hydrogenics.com/hydrogen-products-solutions/fuel-cell-power-systems/stationary-stand-by-power> (acceso: 20.10.2016).
- [39] Air Product Prism Membrane (2016). *Air Products Engineered Membrane Systems*. <http://www.airproducts.com/products/Gases/supply-options/prism-membranes/prism-membrane-engineered-systems.aspx> (acceso: 20.10.2016).
- [40] Randall W. Whitesides, P.E. (2012). *Process Equipment Cost Estimating by Ratio and Proportion*. <https://pdhonline.com/courses/g127/g127content.pdf> (acceso: 12.12.2016)
- [41] Bureau of Energy efficiency (2010). *Detailed project report on biomass gasifier by replacing coal furnace for galvanizing*, Galvanizing and Wire Drawing SME Cluster, Howrah, West Bengal - India.
- [42] Brian D. James (2012). *Hydrogen storage cost analysis, preliminary results*. Strategic Analysis, Inc. https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review12/st100_james_2012_o.pdf (acceso: 25.01.2017).

- [43] Hydrogenics. Cotización vía correo electrónico con Mark Kammerer (Business Development anager), Gladbeck, Alemania, (acceso: 31.08.2016).
- [44] IPCC (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. <http://www.ipcc.ch/> (acceso: 15.12.2016).