



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA Y  
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**INGENIERÍA DE ENERGÍAS**

**PROYECTO DE INGENIERÍA: ANÁLISIS DEL DIMENSIONAMIENTO DE UNA  
PLANTA PILOTO DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO**

**ANGEL AMBROCIO QUISPE**

Foz de Iguazú-PR

2016



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA Y  
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**INGENIERÍA DE ENERGÍAS**

**PROYECTO DE INGENIERÍA: ANÁLISIS DEL DIMENSIONAMIENTO DE UNA  
PLANTA PILOTO DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO**

**ANGEL AMBROCIO QUISPE**

Trabajo de Conclusión de Curso presentado al Instituto Latino-americano de Tecnología, Infraestructura y Territorio de la Universidad Federal de Integración Latinoamericana, como requisito a obtención de título de bachiller en Ingeniería de Energías.

Orientador: Prof. Dr. Luís Evelio Garcia Acevedo

Foz de Iguazú-PR

2016

ANGEL AMBROCIO QUISPE

**PROYECTO DE INGENIERÍA: ANÁLISIS DEL DIMENSIONAMIENTO DE UNA PLANTA PILOTO DE  
PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO**

Trabajo de Conclusión de Curso presentado al Instituto Latinoamericano de Tecnología, Infraestructura y Territorio de la Universidad Federal de Integración Latinoamericana, como requisito a obtención de título de bachiller en Ingeniería de Energías.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. Luís Evelio Garcia Acevedo

UNILA

---

Co-orientadora: Prof. Ma. Larissa Andreia Wagner Machado

UNILA

---

Prof. Dra. Andreia Cristina Furtado

UNILA

---

Prof. Dr. Ricardo José Ferracin

FPTI

Foz de Iguazú, 21 de julio de 2016.

A mis padres y hermanos, por el amor, apoyo e incentivo.

A mis amigos y colegas.

A mis profesores.

## **AGRADECIMIENTO**

Primeramente, agradezco Dios por haberme guiado todos los días, ayudándome a concluir una etapa importante en mi vida profesional.

A todos los colegas de aula, por los momentos de estudio, apoyo y diversión. En especial aquellos que participaron desde el inicio de esta jornada: Anthony J. Chumpitaz, Alexis Leonczuk, Diego Galeano, Jorge R. Galeano, Sergio Andrés y Víctor Rivarola por el incentivo a buscar nuevos conocimientos.

A los profesores del curso de Ingeniería de Energías que ayudaron de forma directa e indirecta a mi formación y conclusión del curso. Recordare con mucha alegría y satisfacción a cada uno de ellos.

Al grupo de personas del Núcleo de Investigación de Hidrógeno, en especial al Prof. Dr. Ricardo Ferracin y Prof. Dr. Reinaldo Cesar, por recibirme de una forma abierta y generosa intercambiando conocimientos, transmitiendo experiencia y posibilitando que este trabajo de conclusión de curso logre realizarse.

A mi orientador Prof. Dr. Luís Evelio García Acevedo, que me mostro los caminos a ser seguidos, por la confianza, mucha paciencia. Por la oportunidad de permitirme participar activamente en proyectos de investigación relacionados a la producción y utilización del hidrógeno energético.

Agradecimiento especial a mi familia, a mis padres Ananías y Constantina, hermanos Idolfo, Liusmila, Josefina, Ananías, Yelena y Zavel, sobrino Gabriel, enamorada Brenda por el apoyo y la fuerza de seguir al frente de cada reto de mi vida.

Para finalizar esta sección de agradecimientos, quería expresa mi inmensa gratitud de amistad a mis amigos Vilma, Dagner, Iván S., Iván Ch., Anthony, Jesús, Paul y Lisbet. Nueve peruanos que salimos de nuestro país por un sueño, que con entusiasmo, dedicación y voluntad logramos hacerlo realidad.

Hay hombres que luchan un día y son buenos. Hay otros que luchan un año, y son mejores. Hay quienes luchan muchos años y son muy buenos. Pero hay los que luchan toda la vida, esos son los imprescindibles.

**Bertolt Brecht**

QUISPE, A. Angel. Análisis del Dimensionamiento de una Planta Piloto de Producción de Hidrógeno. 72 páginas. Trabajo de conclusión de curso. Graduación del curso de Ingeniería de Energías – Universidad Federal de Integración Latinoamericana, Foz de Iguazú, 2016.

## RESUMEN

La creciente necesidad de procesos de transformación más eficiente de energía, debido a la escasez de reservas de combustibles fósiles a largo plazo, vienen estimulando el desarrollo a nivel industrial de métodos alternativos de generación energética. La generación de energía por procesos electroquímicos como planteado por la economía del hidrógeno no apenas atiende estos nuevos desafíos, sino que además presenta potencial de disminución de impactos ambientales asociados a este tipo de procesos. Desde esa perspectiva, el presente proyecto de ingeniería tiene como objetivo el análisis del dimensionamiento básico de una Planta de Producción de Hidrógeno (PPH) vía electrólisis del agua, con una capacidad de 10 Nm<sup>3</sup>/h. Para la proyección fue consolidada una metodología que utilizó como base una planta ya existente para identificar y analizar los subsistemas de producción, purificación, almacenamiento y refrigeración. Este trabajo contempló un estudio de caracterización, cálculos y selección de los principales equipos utilizados. Los resultados obtenidos por la planta, presento una eficiencia total superior a 50%. También evidenciaron que el cálculo y la selección de equipos están fuertemente condicionados a las variables operacionales de la planta y que esta tecnología es una alternativa que puede almacenar energía como potencial de aprovechamiento de fuentes de energías renovables. Finalmente, se espera que esta propuesta pueda contribuir con la investigación y desarrollo de la tecnología de uso energético del hidrógeno en toda Latinoamérica.

**Palabras-clave:** *Planta de hidrógeno; Proyecto de ingeniería; Energía renovable; Electrólisis.*

QUISPE, A. Angel. Análisis del Dimensionamiento de una Planta Piloto de Producción de Hidrógeno. 72 páginas. Trabajo de conclusión de curso. Graduación del curso de Ingeniería de Energías – Universidad Federal de Integración Latinoamericana, Foz de Iguazú, 2016.

## **ABSTRACT**

The growing need for more efficient energy conversion methods, due to the shortage of fossil fuel reserves in the long term, are stimulating at industrial-scale, alternative methods of power generation. Development of power generation by electrochemical processes as outlined by the hydrogen economy not only addresses these new challenges, but also presents a potential for reducing environmental impacts associated with this kind of processes. From that perspective, this engineering project aims to accomplish a analysis of basic sizing of an Hydrogen Production Plant (HPP) via electrolysis of water, with the production capacity of 10 Nm<sup>3</sup>/h. The project methodology was consolidated using as fundamentals an existing plant to identify and analyze production, purification, storage and cooling subsystems. This work contemplates the characterization, calculation and selection of the main equipments used. The results obtained by the plant, presented an overall efficiency greater than 50%. They show that the calculation and equipment selection are strongly determined by operational plant's parameters and that this technology is an alternative that can store energy as potential use of renewable energy sources. Finally, it is expected that this project will contribute to research and technology development of hydrogen energy use throughout Latin America.

**Key words:** Hydrogen Plant; Engineering project; Renewable energy; Electrolysis.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Esquema de las diferentes maneras de obtener hidrógeno. ....                       | 7  |
| Figura 2: Diagrama del proceso de electrólisis del agua. ....                                | 8  |
| Figura 3: Curvas de voltaje versus temperatura para la electrólisis de agua. ....            | 10 |
| Figura 4: Aplicaciones energéticas del hidrógeno. ....                                       | 13 |
| Figura 5: Subsistemas de la PPH. ....  | 14 |
| Figura 6: Diagrama esquemático del subsistema de producción. ....                            | 15 |
| Figura 7: Vista general del tanque de almacenamiento de agua. ....                           | 16 |
| Figura 8: Vista general de las dos bombas. ....  | 16 |
| Figura 9: Electrolizador alcalino tipo bipolar. ....   | 17 |
| Figura 10: Vista general del electrolizador bipolar alcalino de una PPH. ....                | 17 |
| Figura 11: Vista general del separador horizontal de gas. ....                               | 18 |
| Figura 12: Vista general del separador vertical de gas. ....                                 | 18 |
| Figura 13: Vista general de los tanques de alivio. ....                                      | 19 |
| Figura 14: Diagrama esquemático del subsistema de purificación. ....                         | 20 |
| Figura 15: Vista general del tanque de presión. ....   | 21 |
| Figura 16: Vista general del reactor de-oxidante. ....                                       | 21 |
| Figura 17: Vista general de filtro de hidrógeno. ....  | 22 |
| Figura 18: Vista general de los secadores. ....  | 22 |
| Figura 19: Vista general del tanque de presión de almacenamiento tipo buffer. ....           | 23 |
| Figura 20: Diagrama esquemático del subsistema de almacenamiento. ....                       | 24 |
| Figura 21: Vista general del compresor. ....   | 25 |
| Figura 22: Vista general de los tanques de alta presión. ....                                | 26 |
| Figura 23: Diagrama esquemático del subsistema de refrigeración. ....                        | 27 |
| Figura 24: Vista general de intercambiadores de calor de una PPH ya existente. ....          | 28 |
| Figura 25: Vista general de un chiller. ....   | 29 |
| Figura 26: Variables operacionales y de estado en la bomba WP. ....                          | 32 |
| Figura 27: Variables operacionales y de estado en la bomba EP. ....                          | 33 |
| Figura 28: Variables operacionales y de estado en el tanque de agua. ....                    | 34 |
| Figura 29: Variables operacionales y de estado en el separador horizontal. ....              | 35 |
| Figura 30: Variables operacionales y de estado en el separador vertical. ....                | 37 |
| Figura 31: Variables operacionales y de estado en el tanque de alivio. ....                  | 39 |
| Figura 32: Variables operacionales y de estado en el tanque de almacenamiento-buffer 1. .... | 40 |
| Figura 33: Variables operacionales y de estado en el reactor de-oxidante. ....               | 41 |
| Figura 34: Variables operacionales y de estado en el filtro de hidrógeno. ....               | 43 |
| Figura 35: Variables operacionales y de estado en los secadores. ....                        | 44 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 36: Variables operacionales y de estado en el tanque de almacenamiento. ....     | 45 |
| Figura 37: Variables operacionales y de estado en el compresor. ....                    | 46 |
| Figura 38: Variables de estado de los dos fluidos en el intercambiador de calor HE..... | 48 |
| Figura 39: Consumo de potencia real de la PPH-FPTI.....                                 | 51 |

## LISTA DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1: Propiedades y características del hidrógeno molecular.....                         | 6  |
| Tabla 2: Variación de eficiencia, tensión de operación y consumos de energía. ....          | 12 |
| Tabla 3: Células de electrólisis y sus características.....                                 | 12 |
| Tabla 4: Células de electrólisis y sus eficiencias.....                                     | 13 |
| Tabla 5: Variables de operacionales y de estado en equipos de la PPH-FPTI.....              | 30 |
| Tabla 6: Especificaciones técnicas del electrolizador alcalino.....                         | 31 |
| Tabla 7: Especificaciones técnicas de las bombas. ....                                      | 33 |
| Tabla 8: Especificaciones técnicas del tanque de almacenamiento de agua. ....               | 34 |
| Tabla 9: Especificaciones técnicas del separador horizontal.....                            | 36 |
| Tabla 10: Especificaciones técnicas del separador vertical.....                             | 38 |
| Tabla 11: Características técnicas del tanque de alivio.....                                | 39 |
| Tabla 12: Características técnicas del tanque de presión. ....                              | 41 |
| Tabla 13: Especificaciones técnicas del reactor de-oxidante. ....                           | 42 |
| Tabla 14: Características técnicas del filtro del hidrógeno. ....                           | 43 |
| Tabla 15: Especificaciones técnicas de los secadores.....                                   | 45 |
| Tabla 16: Características técnicas del tanque de presión de almacenamiento tipo buffer. ... | 46 |
| Tabla 17: Especificaciones técnicas del compresor. ....                                     | 47 |
| Tabla 18: Especificaciones técnicas del tanque de alta presión.....                         | 47 |
| Tabla 19: Especificaciones técnicas del chiller.....  | 49 |
| Tabla 20: Cuadro de cargas instaladas en la PPH.....  | 50 |
| Tabla 21: Costo de instalación de PPH.....  | 52 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                  |                                       |
|------------------|---------------------------------------|
| A                | Área (m <sup>2</sup> )                |
| C                | Consumo                               |
| D                | Diámetro (m)                          |
| E                | Energía (J)                           |
| E <sub>rev</sub> | Potencial reversible (V)              |
| E <sub>tr</sub>  | Potencial termoneutro (V)             |
| F                | Constante de Faraday (C/mol)          |
| G                | Energía libre de Gibbs (J/mol)        |
| H                | Entalpía (J/mol)                      |
| h                | Altura (m)                            |
| i                | Corriente (A)                         |
| K                | Constante de Souder Brown (m/s)       |
| m                | masa (gr)                             |
| ṁ               | Flujo másico (m/s)                    |
| n                | Número de moles (mol)                 |
| η                | Eficiencia                            |
| N                | Número de e <sup>-</sup> transferidos |
| P                | Potencia (W)                          |
| p                | Presión (Pa);                         |
| PM               | Peso molecular del producto (gr/mol)  |
| ρ                | Densidad (kg/m <sup>3</sup> )         |
| Q                | Cantidad de calor (J)                 |
| Q̇               | Flujo de calor (J/s)                  |
| r                | Resistencia (Ω)                       |
| R                | Constante de los gases                |
| S                | Entropía (J/°C mol)                   |
| T                | Temperatura (°C)                      |
| t                | Tiempo (s)                            |
| ṽ                | Flujo volumétrico (m <sup>3</sup> /s) |
| v                | Volumen (m <sup>3</sup> )             |
| v                | Velocidad (m/s)                       |
| V                | Tensión (V)                           |

# INDICE

|  |      |
|--|------|
| AGRADECIMIENTO .....                                   | v    |
| RESUMEN.....   | vii  |
| ABSTRACT .....   | viii |
| LISTA DE FIGURAS .....                                 | ix   |
| LISTA DE TABLAS .....                                  | xi   |
| LISTA DE SÍMBOLOS .....                                | xii  |
| INDICE .....   | xiii |
| CAPITULO I.....  | 1    |
| 1 INTRODUCCIÓN.....                                    | 1    |
| CAPITULO II.....                                       | 4    |
| 2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO .....                       | 4    |
| 2.1 NOMBRE.....  | 4    |
| 2.2 PROBLEMA.....                                      | 4    |
| 2.3 OBJETIVOS .....                                    | 4    |
| 2.3.1 Objetivo principal .....                         | 4    |
| 2.3.2 Objetivo específicos.....                        | 4    |
| 2.4 MOTIVACIÓN.....                                    | 4    |
| CAPITULO III.....                                      | 6    |
| 3 REFERENCIAL TEÓRICO .....                            | 6    |
| CAPITULO IV .....                                      | 14   |
| 4 METODOS Y MATERIALES.....                            | 14   |
| 4.1 DISTRIBUCIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LA PPH-FPTI .....   | 14   |
| 4.1.1 Subsistema de producción.....                    | 14   |
| 4.1.2 Subsistema de purificación.....                  | 19   |
| 4.1.3 Subsistema de almacenamiento.....                | 23   |
| 4.1.4 Subsistema de refrigeración .....                | 26   |
| 4.2 INSUMOS DE LA PPH .....                            | 29   |
| CAPITULO V .....                                       | 30   |
| 5 RESULTADOS .....                                     | 30   |
| 5.1 ANALISIS DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN HIDRÓGENO..... | 30   |
| 5.2 CÁLCULOS DE DIMENSIONAMIENTO .....                 | 31   |
| 5.2.1 Subsistema de producción.....                    | 31   |
| 5.2.2 Subsistema de purificación.....                  | 39   |
| 5.2.3 Subsistema de almacenamiento.....                | 46   |

|                                 |  |    |
|---------------------------------|--|----|
| 5.2.4                           | Subsistema de refrigeración .....            | 47 |
| 5.3                             | CALCULO DE INSUMOS DE LA PPH.....            | 50 |
| 5.3.1                           | Agua.....                                    | 50 |
| 5.3.2                           | Electrolito.....                             | 50 |
| 5.3.3                           | Energía eléctrica.....                       | 50 |
| 5.4                             | CALCULO DE RENDIMIENTO DE LA PPH.....        | 51 |
| CAPITULO VI .....               |  | 52 |
| 6                               | ASPECTO ECONÓMICOS Y SOCIO-AMBIENTALES ..... | 52 |
| 6.1                             | ECONÓMICOS.....                              | 52 |
| 6.2                             | SOCIO-AMBIENTAL.....                         | 52 |
| CAPITULO VII .....              |  | 54 |
| 7                               | CONCLUSIONES.....                            | 54 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... |  | 56 |

# CAPITULO I

## 1 INTRODUCCIÓN

Los cambios económicos, geopolíticos, ambientales y sociales, fortalecidos por los avances tecnológicos han configurado una nueva coyuntura de orden global, en la cual, la seguridad energética y la preservación ambiental se vuelven imprescindibles para mantener el actual ritmo del crecimiento y desenvolvimiento de la sociedad. Un nuevo paradigma está claro, la necesidad de nuevas prácticas, productos y servicios que sean ecológicamente adecuados, energéticamente eficientes y socialmente amplios (JANNUZZI, 2012; PARTNERSHIP, 2009). De esta forma, el uso de energías de fuentes renovables viene inserido en pautas principales de discusión mundial. Las energías de fuentes renovables han demostrado ventajas significativas cuando comparadas con la energía de fuentes fósiles, principalmente en criterios ambientales, pero su uso masivo todavía enfrenta serios desafíos entre los cuales se destaca el hecho de ser variables y fuertemente dependientes de las condiciones climáticas diarias, esto significa que no proveen energía de manera constante por lo que requiere de sistemas de conversión y almacenamiento (Sistemas Backup) (PARTHASARATHY e NARAYANAN, 2014).

Dispositivos de almacenamiento y conversión electroquímica demuestran potencial para solucionar esta barrera tecnológica. Entre estos se destaca la tecnología de baterías y uso energético del hidrógeno asociado a las células a combustibles<sup>1</sup>. En este sentido el hidrógeno como vector energético, es hoy una de las tecnologías promisoras para expandir sustancialmente la utilización de las energías renovables, permitiendo almacenar y transportar con mayor eficiencia y menor costo, la energía en comparación a otras tecnologías (MORAES, 2011).

El hidrógeno, es el elemento más abundante del universo, al no encontrarse libre en la naturaleza es necesario obtener su forma molecular estable a partir de sustancias hidrogenadas, principalmente agua e hidrocarburos. La disponibilidad y abundancia de las

---

<sup>1</sup> Dispositivos electroquímicos que transforman energía química de un combustible (hidrógeno) directamente en energía eléctrica.

fuentes, la diversidad de posibilidades para su obtención, así como la elevada eficiencia de conversión para energía eléctrica, le proporcionan gran potencial como alternativa energética (MARQUES, 2004). Cuando el hidrógeno es producido a partir de fuentes de energía renovable, como solar, eólica, hidráulica entre otras, aunado al hecho de que su uso energético genera como residuo apenas agua y calor, esto da grandes ventajas desde el punto de vista del medio ambiente. Estas y otras características han permitido las propuestas de infraestructuras alternativas al actual escenario económico energético basado en hidrocarbonatos, la denominada Economía de Hidrógeno (CARVAJAL-OSORIO, BABATIVA y ALONSO, 2010). Esta propuesta de economía de hidrógeno pretende responder a una visión de futuro donde el hidrógeno, generado de forma limpia y sostenible, servirá para alimentar las necesidades energéticas de la sociedad, en todos los campos de aplicación, desde transporte vehicular hasta la generación de electricidad por medio de células a combustible entre otras aplicaciones (LINARDI, 2010).

Históricamente el hidrógeno fue usado en refinerías, industrias químicas (síntesis de amonio y metanol), siderurgias (fabricación de acero) y también en la industria de alimentos (hidrogenación de aceites y grasas). Entre tanto, en la actual coyuntura de la crisis energética, una creciente aplicación de hidrógeno en las células a combustible, tienden a tornarse una tecnología clave en el escenario energético mundial debido a ventajas como: alta eficiencia y confiabilidad, estructuras modulares, bajas emisiones atmosféricas y acústicas, tornándose adecuadas a diversas aplicaciones (SOUZA, 2009; VIAN, 2006).

El hidrógeno en el mundo es producido a través de métodos convencionales como gasificación de carbón, reforma a vapor de hidrocarbonatos leves (nafta, gas natural, y gas licuado de petróleo), oxidación parcial de hidrocarbonatos pesados y electrólisis de agua (SOUZA, 2009). Dentro de estos, la electrólisis de agua presenta una tecnología económicamente viable, que evita mayores emisiones de gases y empleo de combustibles fósiles. En corto plazo compete con tecnologías ya existentes para generación de energía no renovables derivados de fuentes fósiles y nucleares (HOLLADAY, 2009; SECAS, 2012).

En Brasil, existen proyectos que utilizan el agua para producir hidrógeno vía electrólisis. Uno de ellos es la empresa de generación eléctrica AES Tietê en asociación con la Universidad Estatal de Campinas (Unicamp) y con los institutos Agua Génesis y Hytron (OLIVEIRA, 2012). Otro es el proyecto de Cemig (Compañía de Energía de Minas Gerais), en asociación con el Centro Nacional de Referencia en Energía de Hidrógeno (CENEH) (CARNIELETTO, 2011).

Internacionalmente las mayores plantas de producción de hidrógeno fueron colocadas cerca de hidroeléctricas, a fin de aprovechar con el suministro de electricidad durante horas de bajo pico de consumo (bajo precio). Las primeras grandes plantas instaladas

en 1960 por la Asea Brown (ABB) en Aswan (Egipto) con producción de 22 000 Nm<sup>3</sup>/h y otra en 1965 en la ciudad de Ryukan (Noriega) con una capacidad de cerca de 27 900 Nm<sup>3</sup>/h de la empresa Norsk Hydro (ahora incorporada a Statoil). Otras plantas de electrólisis fueron también instaladas en Trail en Canadá (1939), Cuzco en Perú (1958), Nangal en la India (1958), Alabama Estados Unidos (1971) y Pico Truncado Argentina (2006) (VIAN, 2006). Recientemente otras plantas fueron iniciadas en Reino Unido, Canadá, Alemania, Italia, Noruega, Finlandia, Japón y España (ULLEBERG, MAACK, *et al.*, 2007).

Una planta de producción de hidrógeno a partir de electrólisis de agua es un conjunto formado por máquinas, aparatos y otras instalaciones, cuya función es elaborar un producto con valor agregado. Para poder entender una planta industrial, es necesario desenvolver estudios, cálculos y caracterización de todos los equipamientos y materiales que conforma el sistema. Estas herramientas permiten que un ingeniero de energías, dimensione y decida cuál es la mejor opción de planificación de un proyecto de ingeniería.

La perspectiva de este trabajo de conclusión de curso, busca elaborar y dimensionar una Planta de Producción de Hidrógeno a partir del análisis de una planta existente, instalada en la Fundación Parque Tecnológico Itaipu (FPTI), caracterizando cada uno de los subsistemas y parámetros de operación. Esta propuesta contribuirá para la investigación y desarrollo de esta tecnología en toda Latinoamérica.

## CAPITULO II

### **2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

#### **2.1 NOMBRE**

“ANÁLISIS DEL DIMENSIONAMIENTO DE UNA PLANTA PILOTO DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO”

#### **2.2 PROBLEMA**

El problema se identifica en la ausencia de información en el proyecto de ingeniería para el diseño, distribución y construcción de plantas de producción de Hidrógeno.

#### **2.3 OBJETIVOS**

##### **2.3.1 Objetivo principal**

Analizar el dimensionamiento de una planta para producción de hidrógeno energético por medio de electrólisis del agua.

##### **2.3.2 Objetivo específicos**

- Analizar el conjunto de operaciones de una Planta de Producción de Hidrógeno (PPH);
- Identificar los equipos que conforman la planta, caracterizando sus funciones y parámetros de operación;
- Proponer una organización por subsistemas lógicos;
- Dimensionar los principales equipos del subsistema de producción, purificación, almacenamiento y refrigeración de la planta;
- Generar un documento técnico como proyecto básico para el análisis de una PPH;
- Discutir aspectos económicos y socio-ambiental.

#### **2.4 MOTIVACIÓN**

Existen diversos desafíos competitivos de organizaciones productivas industriales, que buscan soluciones óptimas para diferentes plantas de producción de energía, para entregar servicios con mejores condiciones de calidad, eficiencia y precio. Actualmente,

las plantas industriales son direccionadas a condiciones de un mercado exigente y selectivo, en el cual la eficiencia y el desempeño del proceso productivo son esenciales para su existencia (ARAGON, RUBIO, *et al.*, 2010). El éxito dependerá de la optimización de los costos de producción, velocidad, calidad, durabilidad del producto y flexibilización de los procesos.

La propuesta de una PPH no debe buscar solamente beneficios económicos, pues una distribución correcta de equipos y materiales, debe contemplar menor consumo de energía en la producción y manutención, que posibilitan generar un modelo energético sustentable, por medio de almacenamiento de grandes cantidades de hidrógeno energético.

La Planta de Producción de Hidrógeno de la Fundación Parque Tecnológico Itaipu (PPH-FPTI), es una oportunidad para analizar experimentalmente el ciclo de vida del hidrogeno envolviendo las etapas de producción, purificación, compresión, almacenamiento, controle de calidad, transporte y uso final del hidrogeno, que así facilite producir un documento técnico como guía de un proyecto básico.

Uno de los mayores desafíos está en el proceso de operación y tiempo de manutención de los equipos, que debido a la complejidad, ausencia de gran parte de piezas y materiales en el mercado latinoamericano perjudican su funcionamiento.

Desde esta perspectiva, se propone realizar un proyecto de ingeniería considerando todos los criterios de diseño, distribución, organización, caracterización y cálculo de cada equipo, llegando a una propuesta de proyecto básico.

## CAPITULO III

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Descubierto por el inglés Henry Cavendish, el hidrógeno es el más simple de los elementos químicos gaseosos y el átomo más abundante de todo el universo; entre tanto, en la atmosfera terrestre su concentración es de menor que de 0,1%, de esta forma el hidrógeno necesita ser extraído de otra sustancia (FERREIRA, 2003). El hidrógeno no puede ser considerado una fuente de energía primaria y sí un vector energético.

Considerando que es el elemento químico gaseoso más leve de la tabla periódica, en condiciones normales, el hidrógeno es un gas incoloro, inodoro y sin sabor, 15 veces más leve que el aire, combustible con una amplia gama de inflamabilidad, en el aire (de 4 a 75 en vol. %) y oxígeno (4 a 95 en vol. %), con un mayor contenido de energía por unidad de masa de 39,42 kWh/kg, que es, 2,5 a 3 veces más energético que el metano y la gasolina, y es 1100 veces mayor que una batería acida, respectivamente (RAJESHWAR, MC CONNELL y LICHT, 2008). A continuación, mediante la Tabla 1 se presenta un resumen de sus propiedades y características:

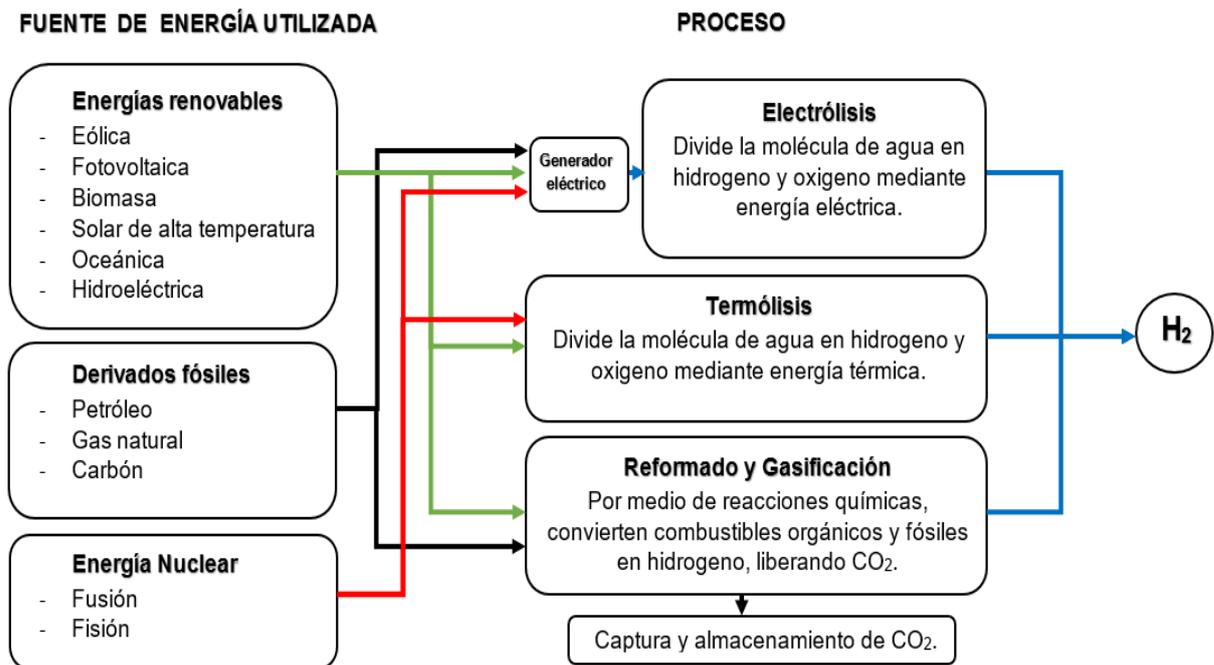
**Tabla 1:** Propiedades y características del hidrógeno molecular.

| INFORMACIÓN GENERAL DEL HIDRÓGENO MOLECULAR |  |
|---|--|
| Nombre, Símbolo, Número                     | Hidrógeno, H, 1                              |
| Estado ordinario                            | Gas  |
| Densidad                                    | 0,0899 kg/m <sup>3</sup>                     |
| Punto de fusión                             | 14,025 °K                                    |
| Punto de ebullición                         | 20,268 °K                                    |
| Punto de inflamabilidad                     | 255 °K                                       |
| Entalpia de vaporización                    | 0,44936 kJ/mol                               |
| Entalpia de fusión                          | 0,05868 kJ/mol                               |
| Presión de vapor                            | 209 Pa a 23 °K                               |
| Presión critica                             | 1,293x 10 <sup>6</sup> Pa                    |
| Volumen molar                               | 22,42 x 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /mol |
| Poder calorífico superior                   | 142 MJ/kg                                    |
| Calor específico                            | 1,4304 x 10 <sup>4</sup> J/°K kg             |

Fuente: Adaptado de ELEMENTOS.ORG, 2016.

Existen diversas tecnologías para la producción del hidrógeno. En la actualidad, alrededor de 95% de hidrógeno es producido a partir de derivados fósiles como: Gas de carbón gasificado, gas natural y reforma de petróleo. Sin embargo, el 5% restante es producido a partir de fuentes renovables como: electrólisis y la gasificación de biomasa, siendo alternativas sustentables (GOMES, 2005). La Figura 1 presenta las diferentes maneras para obtener hidrógeno.

**Figura 1:** Esquema de las diferentes maneras de obtener hidrógeno.

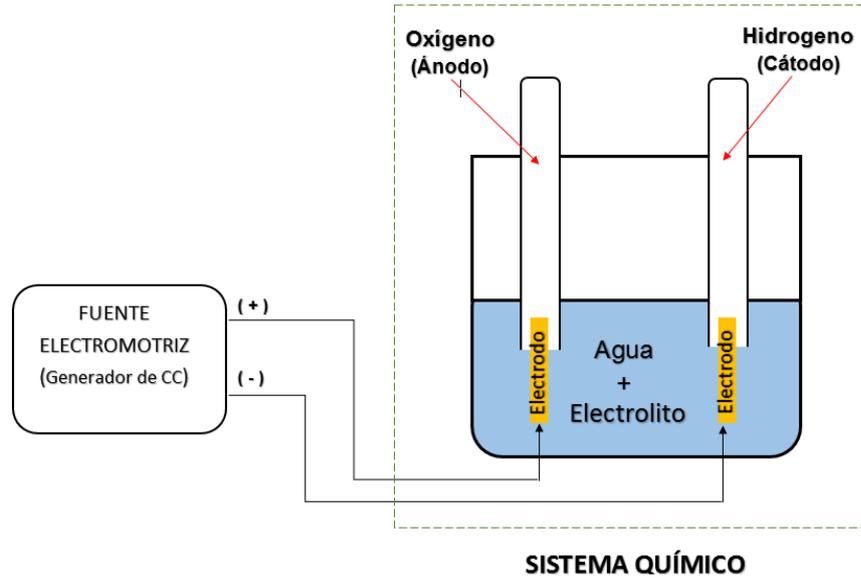


Fuente: Adaptado de SECAS, 2012.

La electrólisis del agua en la actualidad es una tecnología madura y comercial, con un camino promisor para la producción sustentable ya que no ofrece prácticamente ninguna polución o sub producto toxico si la corriente utilizada es generada por fuentes renovables (SILVA, 1991).

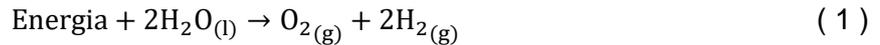
El proceso consiste en aplicar una fuente electromotriz (energía eléctrica) encima de un determinado potencial mínimo, donde hay un paso de corriente entre los electrodos, desencadenando las reacciones electroquímicas y así produciendo en el cátodo hidrógeno y en el ánodo oxígeno gaseoso (ULLMANN, 1989) (Figura 2).

**Figura 2:** Diagrama del proceso de electrólisis del agua.



Fuente: Adaptado de SILVA, 1991.

La reacción es representada en forma general por la Ecuación 1:



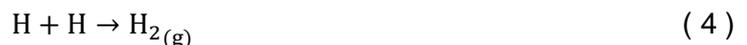
El cátodo recibe una tensión negativa que provoca el lanzamiento de los electrones ( $e^-$ ) para el medio, en cuanto que el ánodo ocurre lo inverso. Como el agua destilada es una mala conductora de la corriente eléctrica, en vez de la creación de cargas a lo largo de todo el circuito, las moléculas de agua que se sitúan junto del cátodo, son separados en protones y en iones hidróxidos conforme a la Ecuación 2.



En seguida los iones  $\text{H}^+$  capturan un electrón del cátodo, siendo reducidos, pasando para la forma de un átomo neutro conforme a la Ecuación 3.



Este átomo de hidrógeno se encuentra con otro átomo de hidrógeno y forma una molécula gaseosa estable de hidrógeno conforme a la Ecuación 4.



Los iones  $\text{OH}^-$  migran para el ánodo y ahí pierde el electrón capturado por el hidrógeno. La producción de oxígeno es de agua y es conseguida a través de cuatro iones de  $\text{OH}^-$  conforme a la siguiente Ecuación 5.



De esta forma obtenemos un circuito cerrado, donde en el proceso envuelve partículas negativamente cargadas de electrones e iones hidróxidos, donde se produce hidrógeno energético y puede ser almacenada (MARQUES, 2004).

El modelo teórico del balance energético de la electrólisis del agua puede ser considerado un proceso reversible (SILVA, 1991), esto quiere decir que la energía eléctrica cedida por la fuente electromotriz es igual a la variación de energía química del sistema, pudiendo ser descrita por medio de la Ecuación 6.

$$E_E = \Delta G = N * F * E_{rev} \quad (6)$$

Donde:

$E_E$ = Energía eléctrica necesaria (J/mol);

$\Delta G$ = Variación de energía libre de Gibbs (J/mol);

$N$ =Número de  $e^-$  transferidos en la evolución de una molécula de hidrógeno ( $N=2$ );

$F$ = Constante de Faraday (C/mol);

$E_{rev}$ =Potencial ideal de descomposición o potencial reversible de la electrólisis (V).

En condiciones estándar de temperatura y presión (25°C y 1 atm) se puede calcular el potencial reversible de la electrólisis considerando la energía libre de Gibbs, el número de electrones producido por el hidrógeno y por la constante de Faraday conforme la Ecuación 7.

$$E_{rev} = \frac{\Delta G}{NF} = 1,229 \text{ V} \quad (7)$$

A cada reacción, es asociada a una variación de entalpia. Para un proceso isotérmico a presión constante, la reacción de descomposición electroquímica del agua es representada por la Ecuación 6, que puede ser reescrita por la Ecuación 8 para procesos reversibles.

$$\Delta G = \Delta H - \Delta Q_r \quad (8)$$

Donde:

$\Delta H$ =Variación de entalpia (J/mol);

$\Delta Q_r$ =Cantidad de calor reversible (J/mol).

De la segunda ley de la termodinámica para un sistema cerrado  $\Delta Q_r$  es:

$$\Delta Q_r = T\Delta S \quad (9)$$

Donde:

$T$ = Temperatura (°K);

$\Delta S$ =Variación de entropía (J/°K mol).

Esta cantidad de calor intercambiada con el medio ambiente aparece si la reacción de la electrólisis sucede reversiblemente a temperatura y presión constante. Este valor de entalpia se muestra mayor que el valor representado para la energía de Gibbs, visto que esta grandeza incluye la entropía de variación del sistema, o sea, la cantidad adicional de energía direccionada al nuevo nivel organizacional de los productos envueltos. Esto hace con que la tensión aplicada en los electrodos (V) deben ser superior al valor de la reversibilidad

( $E_{rev}$ ). La diferencia ( $V - E_{rev}$ ) se pierde por el efecto Joule, siendo, de esta forma, disipada, en la forma de calor irreversible ( $\Delta Q_i$ ) tal como se representa en la Ecuación 10 (SOUZA, 1998).

$$V - E_{rev} = \frac{\Delta Q_i}{NF} \quad (10)$$

Donde:

$V$ = Tensión aplicada en los electrodos (V);

$N$ =Numero de  $e^-$  transferidos en la evolución de una molécula de hidrógeno ( $N=2$ );

$F$ = Constante de Faraday (C/mol);

$\Delta Q_i$ = Cantidad de calor irreversible (J/mol).

Remplazando la Ecuación 6 y 8 en la Ecuación 10 tenemos la Ecuación 11:

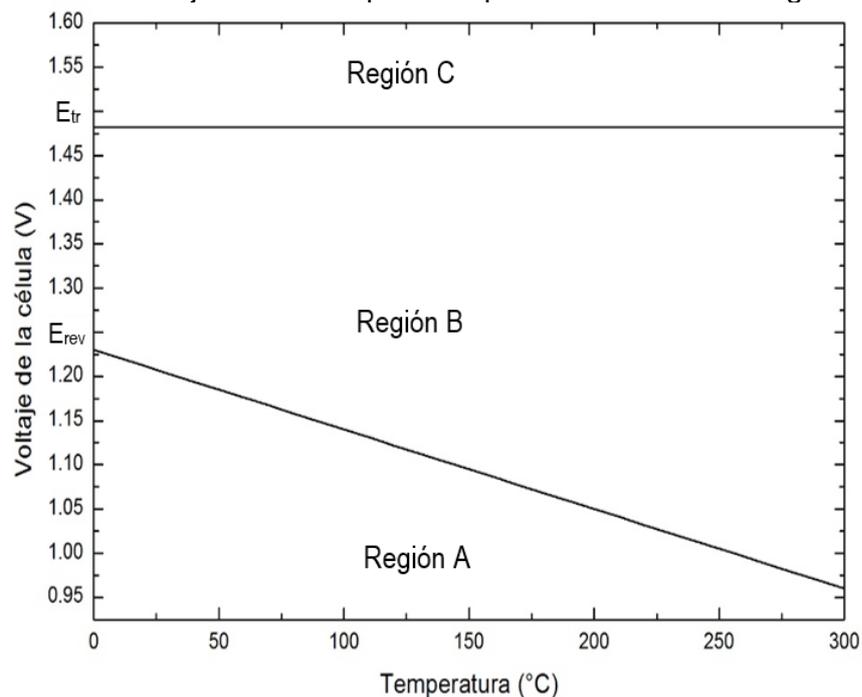
$$V = \frac{(\Delta H - \Delta Q_r + \Delta Q_i)}{NF} \quad (11)$$

Si la cantidad de calor reversible que debe ser cedida a la célula fuera neutralizada por la energía disipada del efecto Joule que es el calor irreversible, la tensión de la electrólisis queda entonces reducida a la Ecuación 12. En estas condiciones la célula opera en condiciones isotérmico, y la tensión de electrólisis es llamada de potencial termoneutro ( $E_{tr}$ ).

$$E_{tr} = \frac{\Delta H}{NF} = 1,482 \text{ V} \quad (12)$$

La Figura 3 muestra la variación del potencial reversible, termoneutro en función de la temperatura y así se llega a las siguientes observaciones:

**Figura 3:** Curvas de voltaje versus temperatura para la electrólisis de agua.



Fuente: Adaptado de SILVA, 1991.

- Para tensiones debajo de  $E_{rev}$  (Región A) la electrólisis no ocurre;
- Para tensiones entre  $E_{rev}$  y  $E_{tr}$  (Región B) la electrólisis ocurre desde que sea cedido calor al proceso (proceso endotérmico);
- Para tensiones encima de  $E_{tr}$  (Región C), ocurre la electrólisis y el calor es transferido al medio ambiente (proceso exotérmico).

En la práctica, los electrolizadores comerciales operan en la Región C, pues en esta región es posible obtener producción de hidrógeno apenas suministrando energía eléctrica, habiendo también la producción de calor debido a las irreversibilidades del proceso. Termodinámicamente la tensión termoneutra es establecida como la tensión mínima para la electrólisis, siendo la diferencia entre esta la tensión de operación de la célula electrolítica conocida como la sobretensión de la célula (SILVA, 1991).

La sobretensión es provocada por los siguientes factores: limitada conductividad del electrolito, tasa de reacción lenta en los electrodos y acumulación de gases junto a los electrodos. (SILVA, 1991).

Cuando consideramos factores de sobretensión, la ecuación de tensión de operación del electrolizador puede ser expresada como la Ecuación 13.

$$V_{op} = E + \eta_c + \eta_a + (i * r) \quad (13)$$

Donde:

$V_{op}$  = Tensión de operación (V);

$E$  = Sobretensión mínima teórica (V);

$\eta_c$  = Sobretension en el cátodo (V);

$\eta_a$  = Sobretencion en el ánodo (V);

$i$  = Corriente eléctrica (A);

$r$  = Resistencia óhmica de todos los componentes de la célula ( $\Omega$ ).

La eficiencia energética de un proceso de electrólisis es definida como la relación entre el poder calorífico superior del hidrógeno formado y la energía eléctrica prevista al sistema, de esta forma es representada por la Ecuación 14.

$$\eta_{elec} = \frac{V_{pcs}}{V_{op}} \quad (14)$$

Donde:

$\eta_{elec}$  = Eficiencia de proceso de electrólisis;

$V_{op}$  = Tensión de operación (V);

$V_{pcs}$  = Tensión correspondiente al poder calorífico superior del hidrógeno (V).

De esta forma la tensión correspondiente al poder calorífico aproximado es calculada por la Ecuación 15 (LEROY, 1983).

$$V_{pCS} = 1,4756 + 2,2552 * 10^{-4}T + 1,52 * 10^{-8}T^2 \quad (15)$$

Donde:

T=Temperatura de operación (°K).

En la Tabla 2 verificamos la variación de la eficiencia del proceso de electrólisis y consumo de energía del electrolizador con la tensión de operación en las condiciones padrón.

**Tabla 2:** Variación de eficiencia, tensión de operación y consumos de energía.

| EFICIENCIA (%) | TENSIÓN DE OPERACIÓN (V) | CONSUMO DE ENERGÍA (kWh/Nm <sup>3</sup> ) |
|----------------|--------------------------|---|
| 100            | 1,48                     | 3,5                                       |
| 96             | 1,54                     | 3,7                                       |
| 92             | 1,61                     | 3,8                                       |
| 88             | 1,68                     | 4,0                                       |
| 84             | 1,76                     | 4,2                                       |
| 80             | 1,84                     | 4,4                                       |
| 78             | 1,90                     | 4,5                                       |
| 76             | 1,95                     | 4,7                                       |
| 74             | 2,00                     | 4,8                                       |
| 72             | 2,06                     | 4,8                                       |
| 70             | 2,12                     | 5,1                                       |

Fuente: SOUZA, 1998.

En la actualidad existen diferentes tipos de células de electrólisis, diferenciando entre ellos, esencialmente a través del tipo de conductor iónico utilizado. La Tabla 3 se presentara un resumen de los principales tipos de células.

**Tabla 3:** Células de electrólisis y sus características.

| TIPO<br>Ítems    | ALCALINO                     | ACIDO                       | POLÍMERO<br>ELECTROLITO  | OXIDO<br>SOLIDO       |
|------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Portado de carga | OH <sup>-</sup>              | H <sup>+</sup>              | H <sup>+</sup>           | O <sup>2-</sup>       |
| Reactante        | Agua                         | Agua                        | Agua                     | Agua, CO <sub>2</sub> |
| Electrolito      | Hidróxido de sodio o potasio | Ácido sulfúrico o fosfórico | Polímero                 | Cerámico              |
| Los electrodos   | Níquel                       | Grafito con Pt, polímero    | Grafito con Pt, polímero | Níquel, cerámica      |
| Temperatura      | 80 °C                        | 150°C                       | 80°C                     | 850°C                 |

Fuente: Modificado de H. VENDT, 2008.

Entre los electrolizadores convencionales, modernos y avanzados, tenemos a los alcalinos que representan una tecnología estándar actual para la producción de hidrógeno a gran escala, el hecho de ser compactado proporciona alta eficiencia y menores costos de materiales de construcción. La madurez comercial y su durabilidad son las principales ventajas, con una razonable eficiencia en relación a las otras tecnologías emergentes (ZENG e ZHNAG, 2010) como es presentado en la Tabla 4.

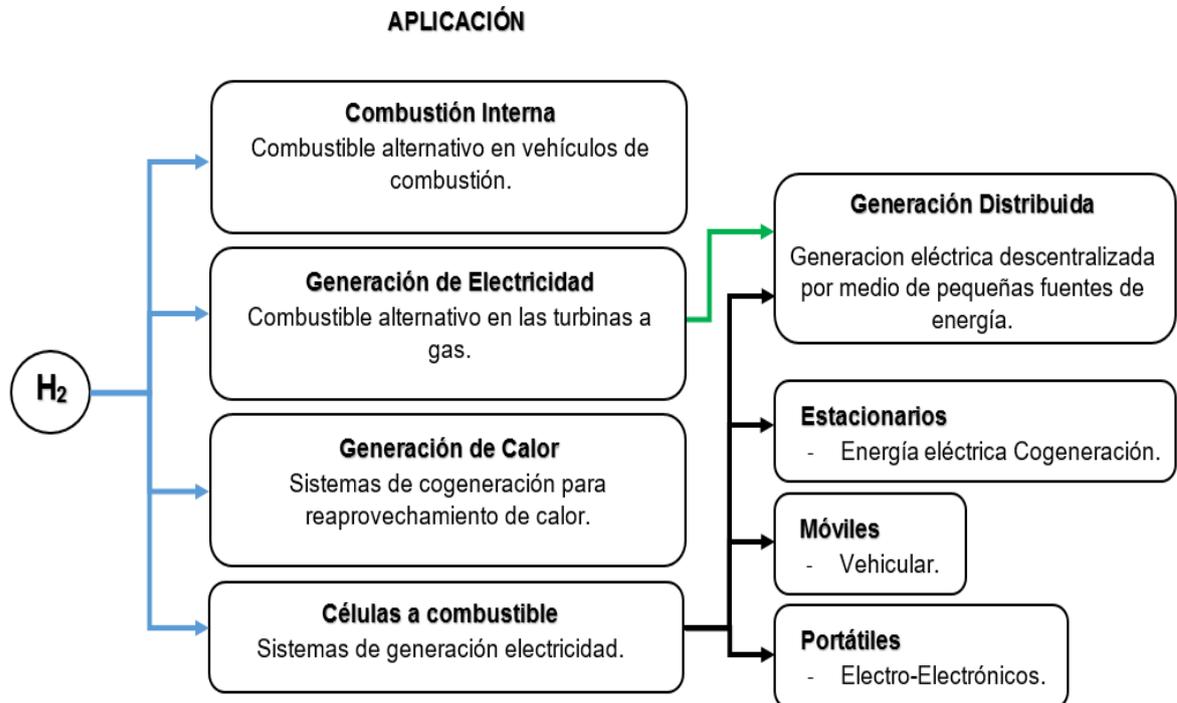
**Tabla 4:** Células de electrólisis y sus eficiencias.

| TECNOLOGÍA              | EFICIENCIA | TECNOLOGÍA  |
|-------------------------|------------|-------------|
| Electrolizador Alcalino | 50-60%     | Comercial   |
| Electrolizador PEM      | 55-70%     | Medio plazo |
| Oxido Solido            | 40-60%     | Medio plazo |
| Foto electrólisis       | 12,4%      | Largo plazo |

Fuente: Adaptado de HOLLADAY, 2009.

La utilización energética del hidrógeno, puede ocurrir en diversos sistemas y tecnologías. Existe actualmente un grande interés en las aplicaciones vehiculares, sistemas estacionarios (Sistema Backup) y generación distribuida de electricidad. La tecnología de células a combustible para uso vehicular, presenta una serie de ventajas, teniendo una de las mayores eficiencias de estos sistemas, alcanzadas por el conjunto de las células a combustible y motor eléctrico, así también contaminaciones locales prácticamente nulas (CGEE, 2010). Otra aplicación importante es en microturbinas y motores de combustión interna que son alternativas competitivas para la generación de electricidad y calor, pudiendo operar como ciclos combinados de células a combustible y turbinas a gas, viabilizando así la generación de energía eléctrica y trabajo mecánico (CGEE, 2010). Mediante la Figura 4 se representa un resumen de las principales aplicaciones energéticas del hidrógeno.

**Figura 4:** Aplicaciones energéticas del hidrógeno.



Fuente: Adaptado de CENEH, 2004.

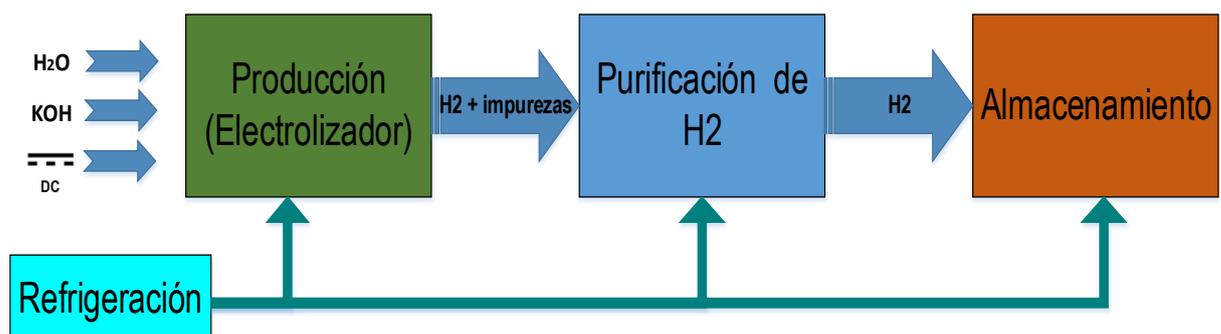
## CAPITULO IV

### 4 METODOS Y MATERIALES

#### 4.1 DISTRIBUCIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LA PPH-FPTI

La PPH-FPTI presenta en forma general los principales subsistemas energéticos, conforme mostrado en la Figura 5. El subsistema de producción, es la etapa donde es producido el hidrógeno, en ella los principales insumos para su funcionamiento son: el agua, electrolito y la energía eléctrica; el subsistema de purificación, es la segunda etapa donde el hidrógeno pasa por un proceso de limpieza que retira impurezas como agua, electrolito y oxígeno; el subsistema de almacenamiento, es la tercera etapa donde el hidrógeno es comprimido, almacenado y pronto para su uso; finalmente el subsistema de refrigeración, es la etapa que mantiene a una temperatura de operación constante todo el sistema, con fin de obtener un mejor desempeño de la planta.

**Figura 5:** Subsistemas de la PPH.

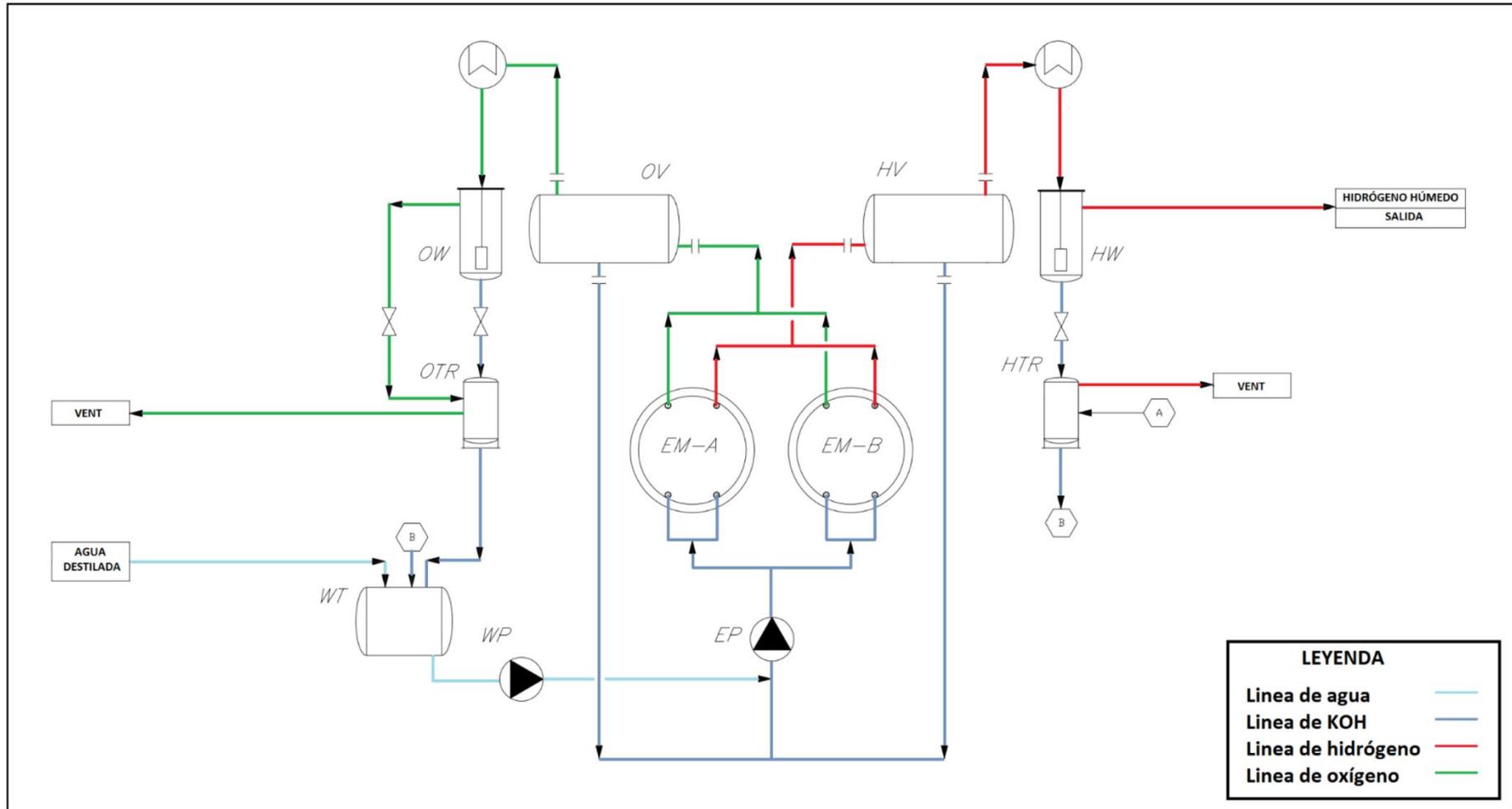


Fuente: Autoría propia.

##### 4.1.1 Subsistema de producción

El subsistema más importante de la PPH. Está representado en la Figura 6, y los equipos utilizados, son: tanque de almacenamiento de agua (WT); bombas de alimentación de agua y electrolito (WP, EP); electrolizador (EM-A, EM-B); separador horizontal de gas (OV, HV); separador vertical de gas (OW, HW); tanque de alivio (OTR, HTR).

Figura 6: Diagrama esquemático del subsistema de producción.

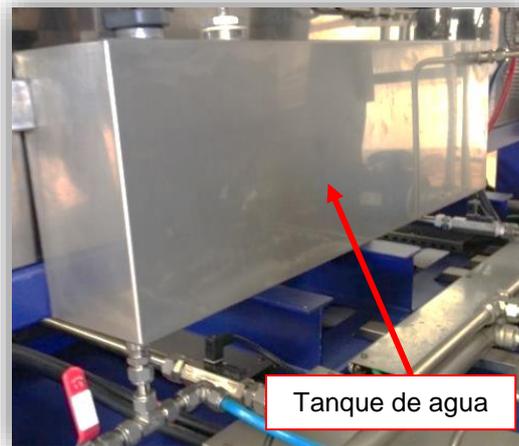


Fuente: NITIDOR, 2013

#### 4.1.1.1 Tanque de almacenamiento de agua

El tanque de agua (WT), localizado en el diagrama de la Figura 6, es el equipo que almacena agua residual de los procesos de tratamiento de gases y lo mezcla con el agua destilada de alimentación, para luego ser bombeado hacia los electrolizadores. La Figura 7, muestra una vista de un modelo tanque que es utilizado en una PPH ya existente.

**Figura 7:** Vista general del tanque de almacenamiento de agua.



Fuente: FPTI, 2014.

#### 4.1.1.2 Bomba de agua y electrolito

Las bombas (WP, EP) localizadas en el diagrama de la Figura 6, transportan agua y electrolito del tanque de almacenamiento hacia el electrolizador. Después del proceso de electrólisis, estos fluidos realizan una circulación de realimentación entre el electrolizador y el separador horizontal de gas. La Figura 8, muestra una vista de dos bombas que son utilizadas en una PPH ya existente.

**Figura 8:** Vista general de las dos bombas.

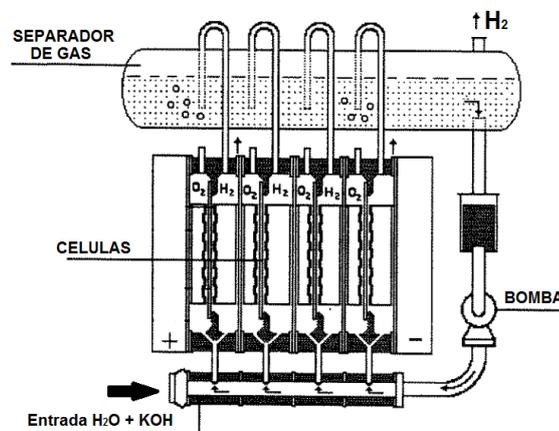


Fuente: FPTI, 2014.

### 4.1.1.3 Electrolizador

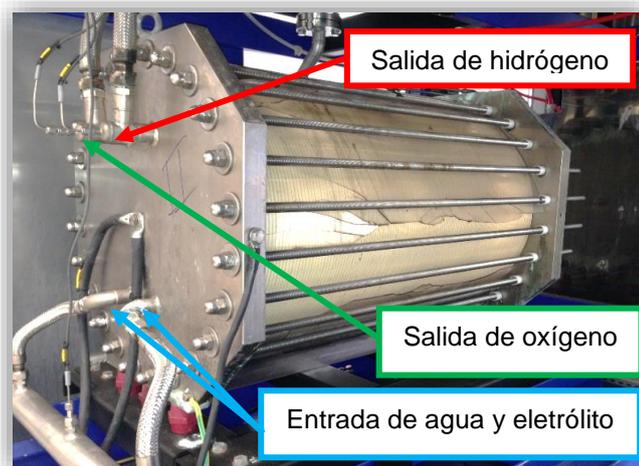
Los electrolizadores (EM-A, EM-B) localizados en el diagrama de la Figura 6, es de tipo bipolar alcalino. La Figura 9 muestra una vista general de este tipo de electrolizador, formado por un conjunto de células compactadas entre dos placas externas, las cuales uno es anódico y otro es catódico, alimentadas respectivamente con energía eléctrica. El funcionamiento es con una continua alimentación de agua destilada y electrolito en la entrada, los cuales al ingresar a las células producen el proceso de separación de la molécula del agua en oxígeno e hidrógeno. En la Figura 10 se puede observar un modelo de electrolizador tipo bipolar alcalino de una planta ya existente.

**Figura 9:** Electrolizador alcalino tipo bipolar.



Fuente: Adaptado de BOCKRIS, 1981

**Figura 10:** Vista general del electrolizador bipolar alcalino de una PPH.



Fuente: FPTI, 2014.

### 4.1.1.4 Separador horizontal de gas

Los separadores horizontales de gas (OV, HV), localizados en el diagrama de la Figura 6, están instalados en la salida del electrolizador con el fin de separar la fase gaseosa (hidrógeno y oxígeno) de la fase líquida (electrolito). Su funcionamiento, se basa en

un proceso cinético, en el cual es transportada una mezcla de gas y fluido al separador, choca con el deflector interno causando una separación inicial del líquido con el gas, dividiendo las burbujas mayores en menores que por presión y calor fluyen hasta el filtro del separador. La solución líquida de la burbuja mayor retorna para la parte inferior del separador y realimenta el electrolizador en un flujo continuo. Las burbujas menores pasan por el filtro, donde nuevamente es retenido una cantidad de fluido de la solución, pasando apenas gas saturado. La Figura 11, muestra una vista general del separador horizontal de una PPH ya existente.

**Figura 11:** Vista general del separador horizontal de gas.

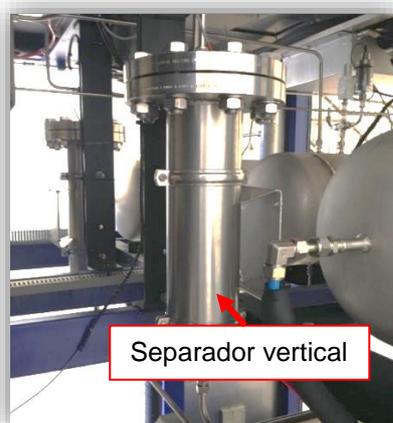


Fuente: FPTI, 2014.

#### 4.1.1.5 Separador vertical de gas

Los separadores verticales de gas (OW, HW), localizados en el diagrama de la Figura 6, están instalados a la salida de los separadores horizontales, con el fin de separar del gas, el líquido saturado restante. Su funcionamiento, es igual al proceso anterior, para así aumentar eficiencia de la separación. La Figura 12, muestra una vista general del separador vertical utilizado en una PPH ya existente.

**Figura 12:** Vista general del separador vertical de gas.

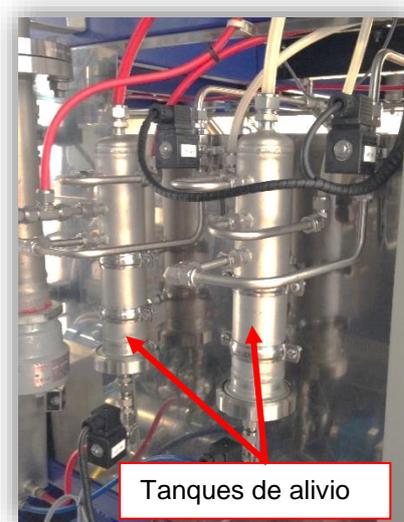


Fuente: FPTI, 2014.

#### 4.1.1.6 Tanque de alivio

Los tanques de alivio (OTR, HTR) localizados en el diagrama de la Figura 6, están instalados a la salida de los separadores verticales con la función de almacenar solución de agua en estado líquido y residuo de electrolito, para finalmente ser conectada al tanque de almacenamiento de agua (WT) y así realimentar el proceso. La Figura 13, muestra una vista general de los tanques de alivio utilizados en una PPH ya existente.

**Figura 13:** Vista general de los tanques de alivio.

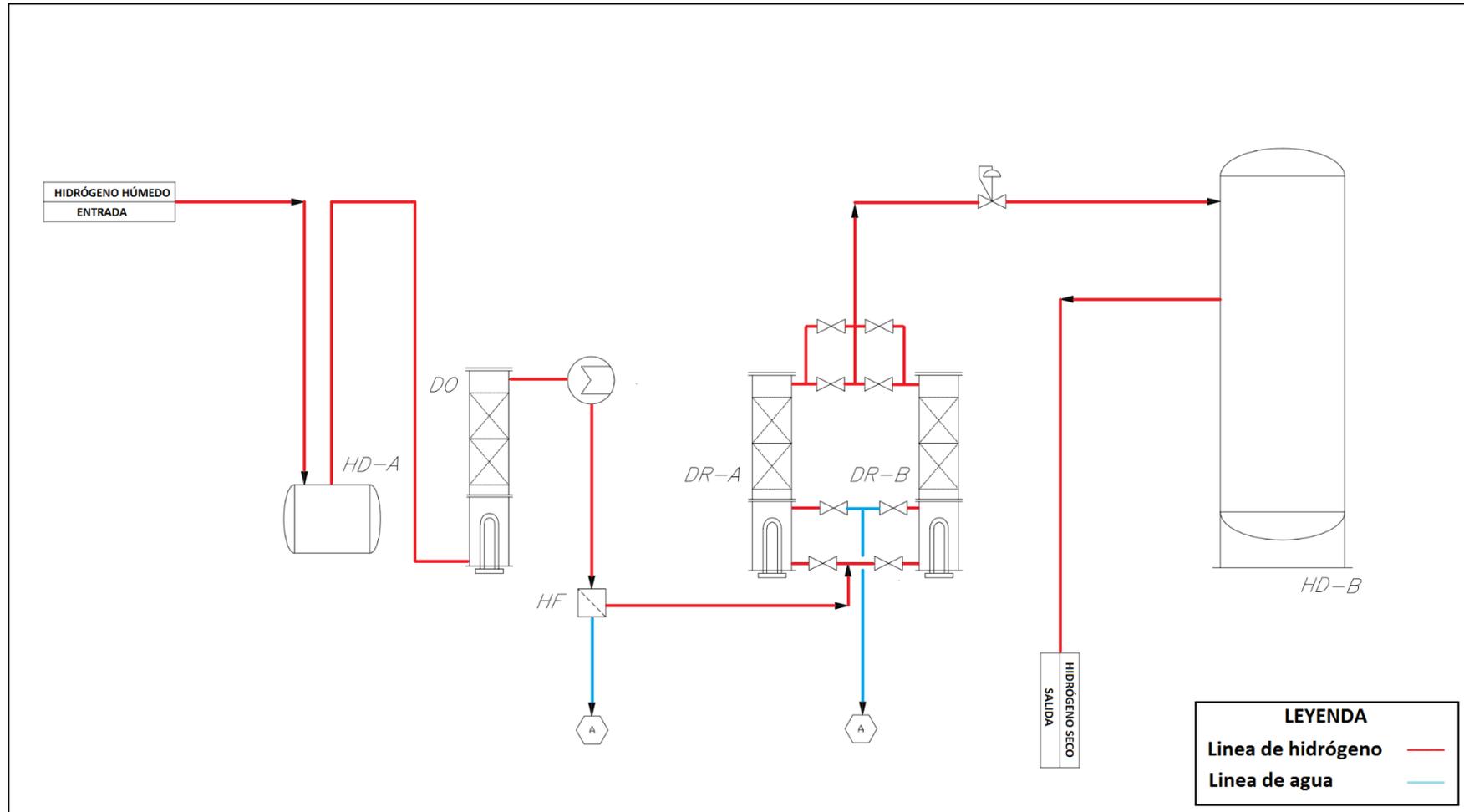


Fuente: FPTI, 2014.

#### 4.1.2 Subsistema de purificación

Para el uso comercial, el hidrógeno producido necesita una pureza de 99,95%. Esto significa que a la salida del subsistema de producción, el hidrógeno tiene que pasar por un proceso de limpieza, retirando todos los residuos de oxígeno y electrolito para alcanzar alta pureza. En esta fase una resistencia eléctrica es accionada para mantener el hidrógeno seco. Este subsistema de purificación es representado por la Figura 14, y los equipos utilizados son: tanque de presión (HD-A); reactor de-oxidante (DO); filtro de hidrógeno (HF); secadores (DR-A, DR-B); tanque de presión de almacenamiento de hidrógeno tipo buffer (HD-B).

Figura 14: Diagrama esquemático del subsistema de purificación.

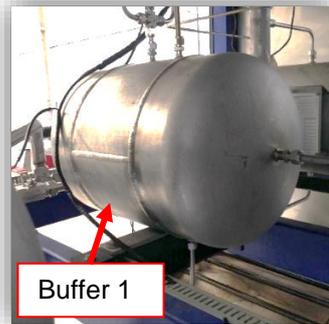


Fuente: NITIDOR, 2013.

#### 4.1.2.1 Tanque de presión

El tanque de presión (HD-A), localizado en el diagrama de la Figura 14, almacena hidrógeno con impurezas, para estabilizar la presión en la entrada del reactor de-oxidante. Este tanque se instaló a la salida del separador vertical (HW) de la Figura 6. La Figura 15, muestra una vista general del buffer utilizado en una PPH ya existente.

**Figura 15:** Vista general del tanque de presión.



Fuente: FPTI, 2014.

#### 4.1.2.2 Reactor de-oxidante

El reactor de-oxidante (DO), localizado en el diagrama de la Figura 14, elimina el oxígeno que acompaña al flujo de hidrógeno. En esta etapa ocurre el proceso de reacción de una pequeña fracción de oxígeno con una cantidad estequiométrica de hidrógeno, produciendo agua, para luego ser condensada y finalmente retirada por el filtro de hidrógeno. La Figura 16, se observa una vista general del reactor de-oxidante utilizado en una PPH ya existente.

**Figura 16:** Vista general del reactor de-oxidante.



Fuente: FPTI, 2014.

#### 4.1.2.3 Filtro de hidrógeno

El filtro de hidrógeno (HF), localizado en el diagrama de la Figura 14, retira la humedad del hidrógeno saturado por un proceso de adsorción (tipo de adsorbente: dióxido de silicio). La Figura 17, muestra una vista general del filtro de hidrógeno utilizado en una PPH ya existente.

**Figura 17:** Vista general de filtro de hidrógeno.



Fuente: FPTI, 2014.

#### 4.1.2.4 Secadores

Los secadores (DR-A, DR-B), localizado en el diagrama de la Figura 14, son equipos instalados en forma paralela a la salida del filtro de hidrógeno, con el fin de secar el hidrógeno por un proceso de absorción dinámica en un lecho granular de sílica. La Figura 18, se muestra una vista general de los dos secadores utilizados en una PPH ya existente.

**Figura 18:** Vista general de los secadores.



Fuente: FPTI, 2014.

#### 4.1.2.5 Tanque de presión de almacenamiento hidrógeno tipo buffer

El tanque de almacenamiento (HD-B), localizado en el diagrama de la Figura 14, almacena el hidrógeno seco, para estabiliza la presión entrada del compresor. La Figura 19, muestra una vista general del tanque de almacenamiento utilizado en una PPH ya existente.

**Figura 19:** Vista general del tanque de presión de almacenamiento tipo buffer.

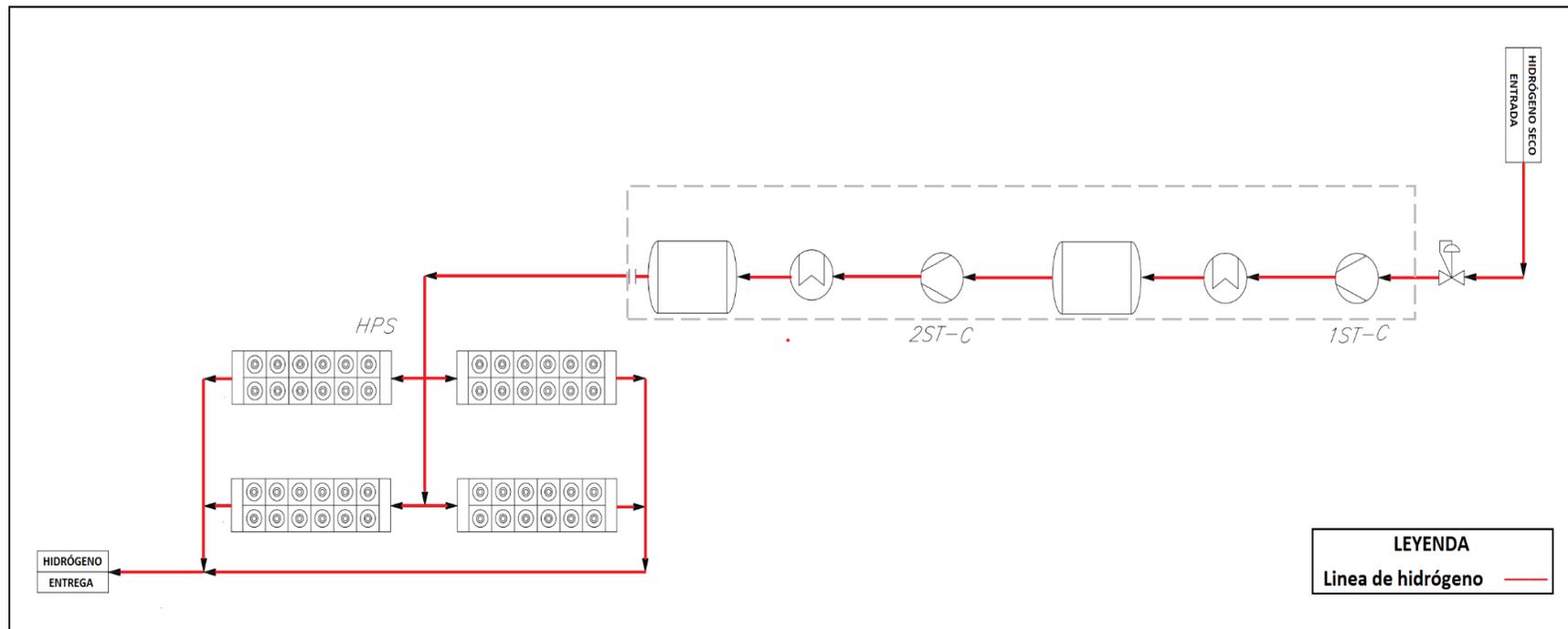


Fuente: FPTI, 2014.

#### 4.1.3 Subsistema de almacenamiento

Este subsistema (Figura 5), es donde el hidrógeno es comprimido, almacenando y listo para uso final. Está representada en la Figura 20 y sus equipos utilizados, son: compresor (2ST-C, 1ST-C); tanques de almacenamiento a alta presión (HPS).

**Figura 20:** Diagrama esquemático del subsistema de almacenamiento.



Fuente: NITIDOR, 2013.

#### 4.1.3.1 Compresor

El compresor (1ST-C, 2ST-C), localizado en el diagrama de la Figura 20, aumenta la presión del hidrógeno, de 20 bar a 350 bar, para almacenar en tanques de alta presión. Este proceso de compresión está dividido en dos etapas, la cual produce un aumento de temperatura en el gas comprimido, motivo por el cual es necesario un sistema de refrigeración. La Figura 21, muestra una vista general del compresor utilizado en una PPH ya existente.

**Figura 21:** Vista general del compresor.



Fuente: FPTI, 2014.

#### 4.1.3.2 Tanques de alta presión para almacenamiento

Los tanques de alta presión (HPS), localizados en el diagrama de la Figura 20, son los que almacenan hidrógeno puro a 350 bar. La Figura 22, muestra una vista general de los tanques utilizados en una PPH ya existente.

**Figura 22:** Vista general de los tanques de alta presión.

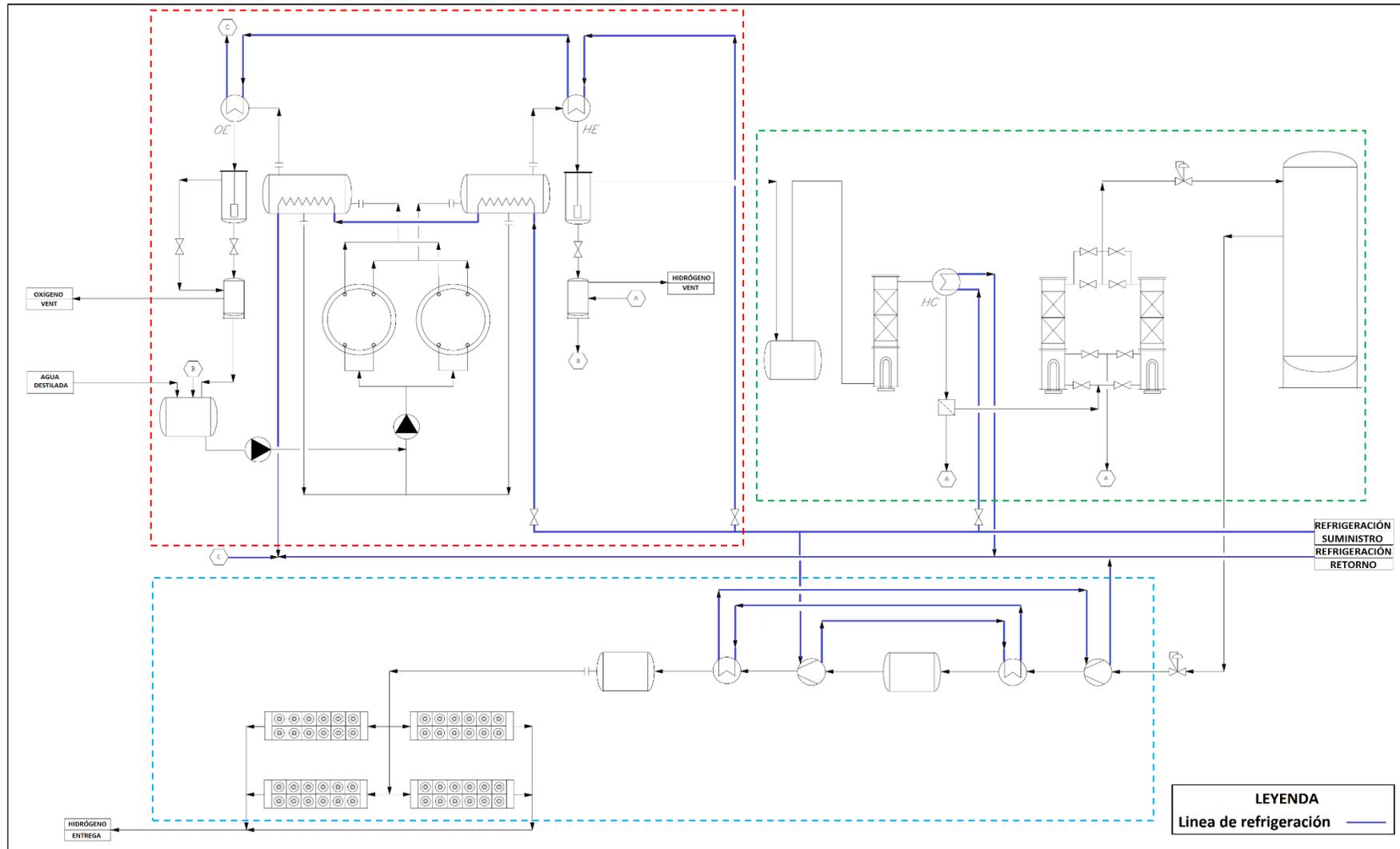


Fuente: FPTI, 2014.

#### **4.1.4 Subsistema de refrigeración**

Este último subsistema de la Figura 5, es instalado en etapas específicas de la planta, refrigerando desde el subsistema de producción, purificación y almacenamiento. Está representada en la Figura 23 y sus equipos utilizados son: intercambiadores de calor (OE, HE y HC) y chiller.

Figura 23: Diagrama esquemático del subsistema de refrigeración.

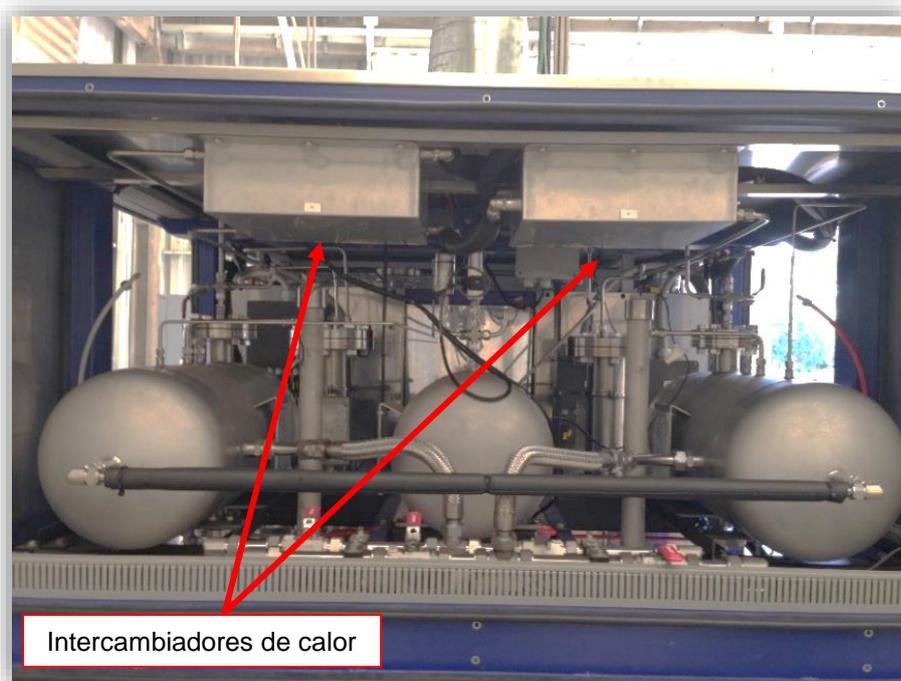


Fuente: NITIDOR, 2013.

#### 4.1.4.1 Intercambiadores de calor:

- El intercambiador de calor del separador horizontal, localizado en la Figura 23, reduce la temperatura del agua y del electrolito, para la realimentación del proceso. La circulación del fluido refrigerante es por medio de una serpentina que se encuentra instalado dentro de los separadores horizontales.
- Los intercambiadores de calor (HE, OE), localizado en la Figura 23, se encuentran instalados entre los separadores horizontales y verticales, con la función de reducir la temperatura de los gases.
- El intercambiador de calor (HC), localizado en la Figura 23, reduce la temperatura del gas de hidrógeno y el agua que sale del reactor de-oxidante.
- Finalmente su función en el subsistema de almacenamiento es refrigerar el compresor (Figura 23).

**Figura 24:** Vista general de intercambiadores de calor de una PPH ya existente.



Fuente: FPTI, 2014.

#### 4.1.4.2 Chiller

Es la unidad enfriadora del agua, capaz de enfriar un fluido usando ciclos de compresión de gas. Este tipo de equipo puede ser usado en rango de operaciones, dependiendo del flujo de agua de refrigeración requerido.

La Figura 25, muestra una vista general de un chiller utilizado en una PPH ya existente.

**Figura 25:** Vista general de un chiller.



Fuente: FPTI, 2014.

## 4.2 INSUMOS DE LA PPH

Los insumos son fundamentales para el funcionamiento de la planta, porque satisfacen las necesidades primarias para la producción del hidrógeno energético, entre las principales tenemos: el agua destilada, energía eléctrica y electrolito. El electrolito es el único insumo que tiene un tiempo de vida de un año, el cual después de ese tiempo tiene que ser retirado y colocar una nueva solución.

## CAPITULO V

### 5 RESULTADOS

#### 5.1 ANALISIS DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN HIDRÓGENO

La PPH-FPTI, posee una capacidad de producción de 10 Nm<sup>3</sup>/h y una capacidad de almacenamiento máximo de 800Nm<sup>3</sup>, consumiendo un aproximado de 10 L/h de agua destilada durante su proceso de operación (FPTI, 2014), así para el cálculo del dimensionamiento y selección de los equipos que conforman la planta, se parte desde análisis de los subsistemas, caracterizando las variables de operación y variables de estado del fluido (Tabla 5). En los próximos ítems se presenta los cálculos para los equipos que conforman la PPH, iniciando desde la etapa de producción y finalizando en la etapa de refrigeración.

**Tabla 5:** Variables de operacionales y de estado en equipos de la PPH-FPTI.

| PRODUCCIÓN                |                  |        |               |        |  |  |
|---------------------------|------------------|--------|---------------|--------|--|--|
| Equipamentos              | Temperatura (°C) |        | Presión (kPa) |        | Flujo Volumétrico (m <sup>3</sup> /h)                            |  |
|                           | Entrada          | Salida | Entrada       | Salida | Entrada  | Salida   |
| Bomba (WP)                | 25               | -      | 101,3         | 2000   |  | 8,3*10 <sup>-3</sup> <sub>(H2O)</sub>          |
| Bomba (EP)                | -                | -      | 2000          | 2110   | 0,34 <sub>(H2O+KOH)</sub> ; 8,3x10 <sup>-3</sup> <sub>(H2)</sub> | 0,35 <sub>(H2O+KOH)</sub>                      |
| Tanque de agua (WT)       | 25               | -      | 101,3         | 2000   |  | 8,3x10 <sup>-3</sup> <sub>(H2O)</sub>          |
| Separador horizontal (HV) | 35               | 80     | 2000          | 2000   | 0,34 <sub>(H2O+KOH)</sub> ; 10 <sub>(H2)</sub>                   | 0,34 <sub>(H2O+KOH)</sub> ; 10 <sub>(H2)</sub> |
| Separador vertical (HW)   | 80               | 80     | 2000          | 2000   | 10 <sub>(H2)</sub>   | 10 <sub>(H2)</sub>                             |
| Tanque de alivio (HTR)    | -                | -      | 101,3         | 101,3  | -  | -  |
| Electrolisador            | 35               | 80     | 2110          | 2000   | 0,35 <sub>(H2O+KHO)</sub>  | 0,34 <sub>(H2O+KHO)</sub> ; 10 <sub>(H2)</sub> |
| PURIFICACIÓN              |                  |        |               |        |  |  |
| Tanque de presión (HD-A)  | 35               | 35     | 2000          | 2000   | 10 <sub>(H2)</sub>   | 10 <sub>(H2)</sub>                             |
| Reactor deoxidante (DO)   | 35               | 50     | 2000          | 2000   | 10 <sub>(H2)</sub>   | 10 <sub>(H2)</sub>                             |
| Filtro de hidrógeno (HF)  | -                | -      | 2000          | 2000   | 10 <sub>(H2)</sub> ; 11,27x10 <sup>-3</sup> <sub>(H2O)</sub>     | 10 <sub>(H2)</sub>                             |
| Secadores (DR-A, DR-B)    | 35               | 85     | 2000          | 2000   | 10 <sub>(H2)</sub>   | 10 <sub>(H2)</sub>                             |
| Tanque de presión (HD-B)  | 85               | 85     | 2000          | 2000   | 10 <sub>(H2)</sub>   | -  |
| ALMACENAMIENTO            |                  |        |               |        |  |  |
| Compresor                 | 85               | 35     | 20            | 35000  | 10 <sub>(H2)</sub>   | -  |

H2O: Flujo volumétrico de agua;  
H2O+KHO: Flujo volumétrico de electrolito;  
H2: Flujo volumétrico de hidrogeno.  
Fuente: NITIDOR, 2013.

## 5.2 CÁLCULOS DE DIMENSIONAMIENTO

### 5.2.1 Subsistema de producción

#### 5.2.1.1 Selección del electrolizador

Para la demanda establecida de 10 Nm<sup>3</sup>/h, encontramos comercialmente electrolizador de distintos fabricantes, entre ellos tenemos: Avalence LCC, Proton Energy System, Hydrogen Technologies, Teledyne Energy systems Inc., Hydrogenics y Voltaina®. Para este caso en particular, el electrolizador seleccionado fue del fabricante, Voltaina®, que según especificaciones técnicas dos unidades atienden la necesidad, con un margen de seguridad adecuado. La Tabla 6 presenta las especificaciones técnicas del equipo.

**Tabla 6:** Especificaciones técnicas del electrolizador alcalino.

| ÍTEM                                    | PARÁMETROS             |
|---|------------------------|
| Fabricante                              | Empresa VOLTAINA®      |
| Tipo de célula                          | Bipolar Alcalino       |
| Presión de operación                    | 21 100 kPa             |
| Temperatura de operación                | 80°C                   |
| Tensión de operación                    | 160 VDC                |
| Corriente continua nominal              | 160 A                  |
| Potencia eléctrica, corriente alternada | 47 kW                  |
| Potencial termoneutro                   | 1,92 V                 |
| Consumo de energía                      | 4,7 kWh/m <sup>3</sup> |
| Cantidad de electrolito cargado         | 0,075 m <sup>3</sup>   |
| Circulación de agua & electrolito       | 0,35 m <sup>3</sup> /h |
| Producción de hidrógeno húmedo          | 5,5 Nm <sup>3</sup> /h |
| Producción de hidrógeno seco            | 5 Nm <sup>3</sup> /h   |
| Pureza del hidrógeno                    | 99,95 %                |
| Electrolito (concentración)             | KOH (25-30%)           |

Fuente: NITIDOR, 2013; DE NORA, 1992.

A partir de esta selección, se tiene una producción de hidrogeno media de 10 Nm<sup>3</sup>/h. Con ayuda de la relación estequiométrica de la Ecuación 1 se realiza el cálculo de consumo de agua. Si 10 Nm<sup>3</sup>/h es equivalente a 899 gr/h, entonces a partir de la siguiente relación, el número de moles de agua es:

$$899 \frac{\text{gr}_{\text{H}_2}}{\text{h}} * \frac{1 \text{mol}_{\text{H}_2}}{2 \text{gr}_{\text{H}_2}} * \frac{2 \text{mol}_{\text{H}_2\text{O}}}{2 \text{mol}_{\text{H}_2}} = 449,8 \frac{\text{mol}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{h}}$$

Ahora a partir de la Ecuación 16, se puede calcular la masa de agua necesaria:

$$n = \frac{m}{PM} \quad (16)$$

Donde:

n=Número de moles (mol);

m=masa (gr);

PM=Peso molecular del producto (gr/mol).

Se conoce que el peso molecular del agua es: 18 gr/mol, se reemplaza los datos en la Ecuación 16 y se tiene el flujo del consumo de agua.

$$\dot{m}_{H_2O} = 8,10 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 8,3 * 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

### 5.2.1.2 Cálculo de las bombas

Para realizar la selección de las bombas, se tiene que conocer la potencia real requerida para bombear un determinado flujo, esta se calcula a partir de la Ecuación 17 (MATAIX, 1986).

$$P_{\text{real}} = \frac{P_{\text{teórica}}}{\eta} \quad (17)$$

Donde:

$P_{\text{real}}$ =Potencia real (kW);

$P_{\text{teórica}}$ =Potencia teórica de la bomba (kW);

$\eta$ =Rendimiento de la bomba seleccionada.

La potencia teórica está dada por la Ecuación 18 (MATAIX, 1986).

$$P_{\text{teórica}} = \dot{V}_f * (p_2 - p_1) \quad (18)$$

Donde:

$\dot{V}_f$ = Flujo del fluido (agua + electrolito) ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

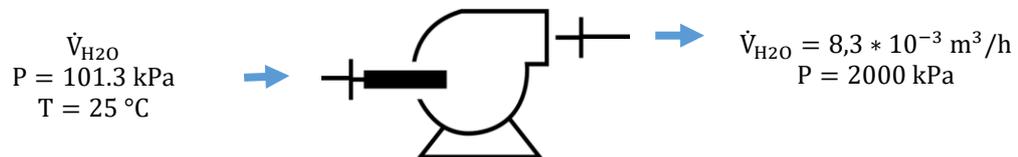
$p_2$ =Presión de salida (kPa);

$p_1$ =Presión de entrada (kPa).

Para este caso en particular, a partir de la Tabla 6, se considera las variables de estado de la sustancia en la entrada y salida de las bombas.

- **Para la bomba de WP:**

**Figura 26:** Variables operacionales y de estado en la bomba WP.



Fuente: Autoría propia.

Entonces se calcula:

$$\dot{V}_f = 8,3 * 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h};$$

$$p_2 = 2000 \text{ (kPa)};$$

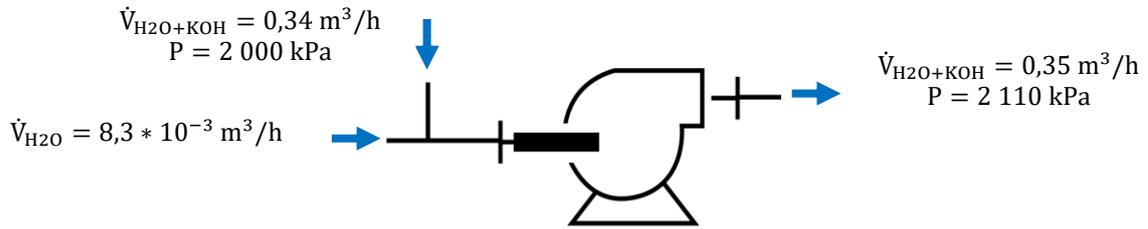
$$p_1 = 101,3 \text{ (kPa)}.$$

Utilizando la Ecuación 18:

$$P_{\text{teórica}} = 0,0043 \text{ kW}$$

- **Para la bomba EP:**

**Figura 27:** Variables operacionales y de estado en la bomba EP.



Fuente: Autoría propia.

Entonces se calcula:

$$\dot{V}_f = 0,35 \text{ m}^3/\text{h};$$

$$p_2 = 2\,110 \text{ (kPa)};$$

$$p_1 = 2\,000 \text{ (kPa)}.$$

Utilizando la Ecuación 18:

$$P_{\text{teórica}} = 0,010 \text{ kW}$$

A partir de la curva de rendimiento de una bomba comercial fueron seleccionadas dos bombas con las siguientes especificaciones técnicas (Tabla 7).

**Tabla 7:** Especificaciones técnicas de las bombas.

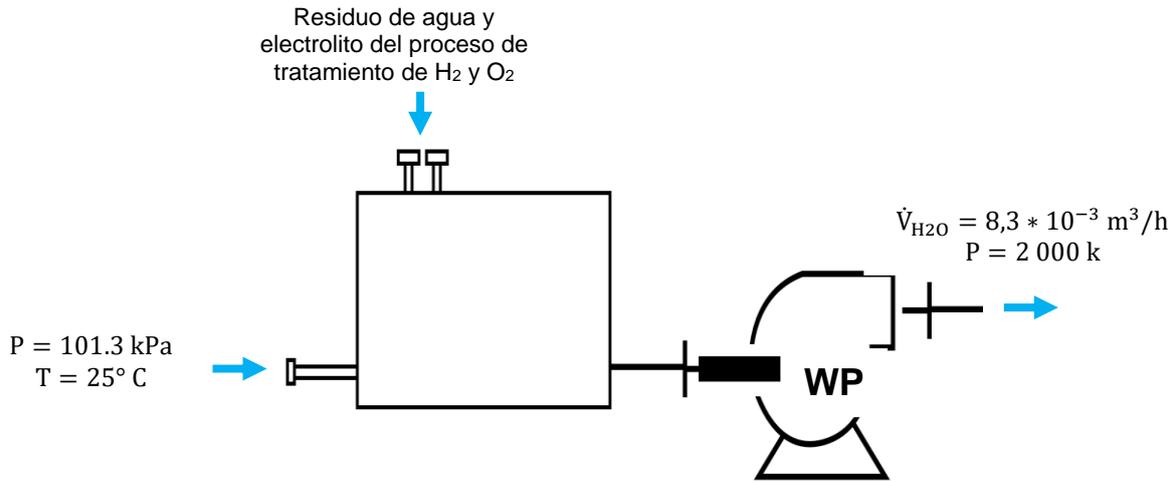
| ÍTEMS             | PARÁMETROS   |
|-------------------|--------------|
| Fabricante        | NU.ER.T.     |
| Modelo            | MAG- PRG8SXE |
| Potencia          | 0,75 kW      |
| Tensión           | 220 V        |
| Frecuencia        | 50           |
| Velocidad de giro | 1340         |
| Eficiencia        | 65%          |

Fuente: NU.ER.T, 2016.

### 5.2.1.3 Selección del tanque de almacenamiento de agua

Entonces, si el flujo de circulación a la salida de la bomba de agua es de  $8,3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$  (Figura 28), para este caso en particular, no es posible calcular el volumen de almacenamiento del tanque, pues depende directamente de la tasa de producción de hidrógeno con respecto al tiempo en el subsistema de producción. Los separadores horizontales por medio de un sensor tipo boya magnética será el que active una electroválvula que se encuentra a la entrada y así alimenta agua al tanque, esto quiere decir, que el flujo de entrada no es constante y si directamente relacionada al consumo de agua en el subsistema producción.

**Figura 28:** Variables operacionales y de estado en el tanque de agua.



Fuente: Autoría propia

Por lo cual, para la selección del tanque de almacenamiento de agua, se toma como referencia el volumen del tanque utilizado en la Planta de Producción de Hidrógeno del Fundación Parque Tecnológico Itaipu<sup>1</sup> (PPH-FPTI) que presenta las siguientes especificaciones técnicas que muestra la Tabla 8

**Tabla 8:** Especificaciones técnicas del tanque de almacenamiento de agua.

| ÍTEM             | PARÁMETROS                         |
|------------------|------------------------------------|
| Fabricante       | NITIDOR                            |
| Tipo de material | Acero inoxidable 316               |
| Tipo de fluido   | Agua y KOH                         |
| Capacidad        | 22*10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> |
| Temperatura      | 90°C                               |

Fuente: NITIDOR, 2013.

#### 5.2.1.4 Cálculo para el separador horizontal

Para la selección del separador horizontal, se tiene que calcular el diámetro (D) y la longitud (L) del equipo.

El cálculo del diámetro es a partir de la Ecuación 19 (MENDEZ, 2009):

$$D = \sqrt{\frac{4 * A_g}{\pi}} \quad (19)$$

Donde:

D=Diámetro del separador (m);

A<sub>g</sub>=Área de la sección transversal del flujo de salida del gas (m<sup>2</sup>).

<sup>1</sup> Planta de producción de hidrógeno, inaugurada en diciembre del 2014, con una capacidad de producción de 10 m<sup>3</sup>/h.

Para calcular la longitud del separador se utiliza la Ecuación 20 (MENDEZ, 2009).

$$L = \frac{V_{rc}}{A_L} \quad (20)$$

Donde:

$V_{rc}$ =Volumen de retención de carga ( $m^3$ );

$A_L$ =Área de la sección transversal del flujo de entrada del líquido ( $m^2$ ).

Y el volumen de retención de carga está dada por la Ecuación 21 (MENDEZ, 2009).

$$V_{rc} = t_r * \dot{V}_f \quad (21)$$

Donde:

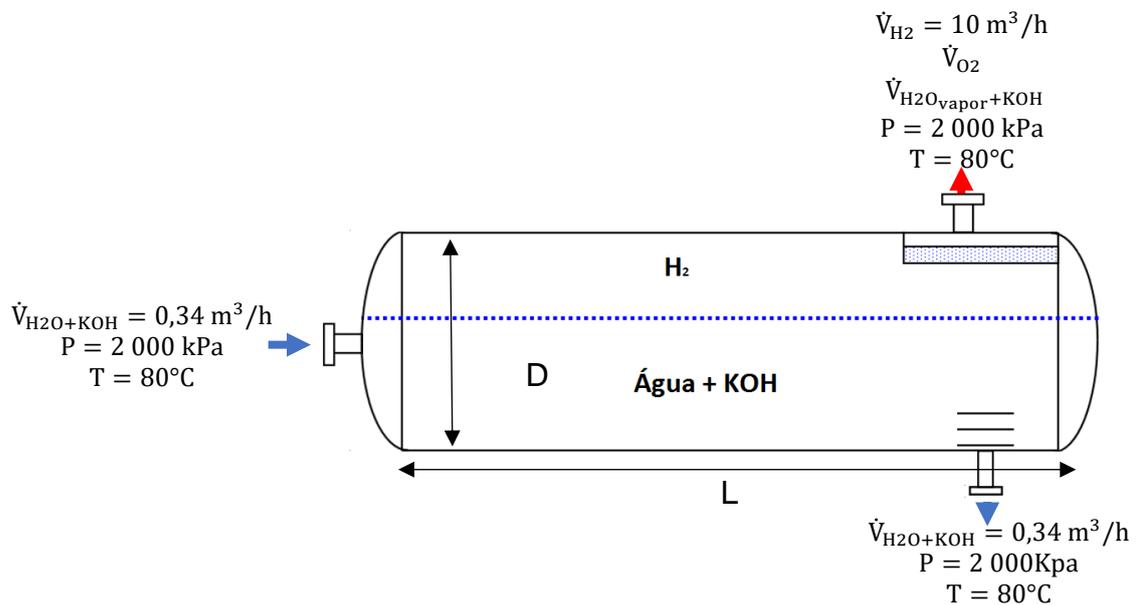
$V_{rc}$ =Volumen de retención ( $m^3$ );

$t_r$ =Tiempo de retención (s);

$\dot{V}_f$ =Flujo del fluido (agua + electrolito) ( $m^3/s$ ).

Aplicando para este caso en particular, se tiene las variables de operación e de estado en la entrada y salida del separador horizontal a partir de la Tabla 6 (Figura 29).

**Figura 29:** Variables operacionales y de estado en el separador horizontal.



Fuente: Autoría propia.

Entonces a partir de estos datos se calcula:

- **Calculo de diámetro:**

Si se tiene el área de transversal de la tubería:

$$A_g = 0,075 \text{ m}^2 \text{ (NITIDOR, 2013);}$$

Utilizando la Ecuación 19:

$$D = 0,309 \text{ m}$$

- **Calculo de longitud:**

$$\dot{V}_f = 94.44 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$t_r = 600 \text{ s (BERDUGO C. e ROJAS M., 2012; FPTI, 2014; NITIDOR, 2013).}$$

Utilizando la Ecuación 20:

$$V_{rc} = 0,057 \text{ m}^3$$

Entonces ahora se conoce

$$A_g = A_L = 0,075 \text{ m}^2;$$

Utilizando la Ecuación 21:

$$L = 0,755 \text{ m}$$

A partir de estos cálculos se selecciona el tanque que tenga la longitud de 0,755 m y un diámetro de 0,309 m. Para el proyecto se seleccionó el separador horizontal, que presentada las especificaciones técnicas que muestra la Tabla 9.

**Tabla 9:** Especificaciones técnicas del separador horizontal.

| ÍTEM                       | PARÁMETROS            |
|----------------------------|-----------------------|
| Fabricante                 | NITIDOR               |
| Tipo de material           | Acero inoxidable 316  |
| Tipo de separador          | Bifásico              |
| Tipo de fluido             | Gas + Agua y KOH      |
| Medidas Longitud /Diámetro | 0,85 m /0,33 m        |
| Capacidad                  | 0,0535 m <sup>3</sup> |
| Presión de operación       | 2 000 kPa             |
| Temperatura operación      | 80°C                  |

Fuente: NITIDOR, 2013.

Para el caso de la selección del separador horizontal del oxígeno, se realiza el mismo procedimiento, por lo tanto, considerando los datos de cálculo, se selecciona otro separador con las mismas características de la Tabla 9, haciendo un total de selección de dos separadores horizontales.

### 5.2.1.5 Calculo para el separador vertical

Para la selección del separador vertical, se tiene que calcular el diámetro (D) y la altura (h) del equipo.

Para el cálculo del diámetro se utiliza la Ecuación 19 y el cálculo de la altura es a partir de la Ecuación 22 (MENDEZ, 2009).

$$h = \frac{V_{rc}}{AF_g} \quad ( 22 )$$

Donde:

h=Altura (m);

$V_{rc}$ =Volumen de retención de carga (m<sup>3</sup>);

$AF_g$ = Área de la sección transversal del flujo de entrada del gas ( $m^2$ ).

Para calcular el volumen de retención se utiliza la Ecuación 21 y para el cálculo del área de la sección transversal del flujo de entrada del gas se calcula a partir de la Ecuación 23 (MENDEZ, 2009).

$$AF_g = \frac{\dot{V}_g}{v_c} \quad (23)$$

Donde:

$\dot{V}_g$ =Flujo del gas ( $m^3/s$ );

$v_c$ =Velocidad crítica ( $m/s$ ).

Entonces finalmente la velocidad crítica se calcula por la Ecuación 24 (BERDUGO C. e ROJAS M., 2012; MENDEZ, 2009).

$$v_c = K * \sqrt{\frac{\rho_l * \rho_g}{\rho_g}} \quad (24)$$

Donde:

$K$ = Constante de Souder Brown ( $m/s$ );

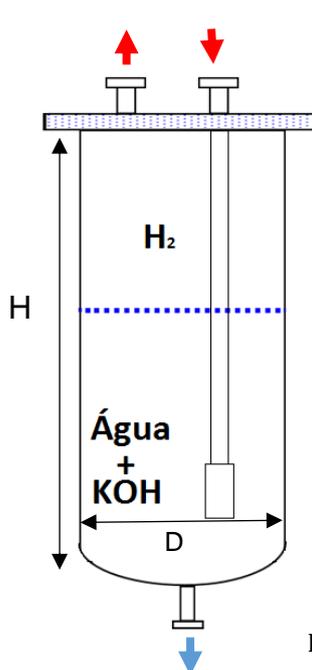
$\rho_l$ =Densidad del líquido ( $kg/m^3$ );

$\rho_g$ =Densidad del gas ( $kg/m^3$ ).

Aplicando para este caso en particular, se tiene las variables operacionales y de estado en la entrada y salida del separador vertical, a partir de la Tabla 6 y datos del proceso anterior ítem 5.2.1.4. (Figura 30).

**Figura 30:** Variables operacionales y de estado en el separador vertical.

$\dot{V}_{H_2} = 10 \text{ m}^3/\text{h}$   
 $\dot{V}_{O_2}$   
 $P = 2\,000 \text{ kPa}$   
 $T = 35^\circ\text{C}$



$\dot{V}_{H_2} = 10 \text{ m}^3/\text{h}$   
 $\dot{V}_{H_2O+KOH}$   
 $\dot{V}_{O_2}$   
 $P = 2\,000 \text{ kPa}$   
 $T = 35^\circ\text{C}$

$\dot{V}_{H_2O+KOH}$   
 $T = 35^\circ\text{C}$   
 $P = 101,3 \text{ kPa}$

Fuente: Autoría propia.

Entonces a partir de estos datos se calcula:

- **Calculo de diámetro:**

Si se tiene el área de transversal de la tubería:

$$A_g=0,031 \text{ m}^2 \text{ (NITIDOR, 2013);}$$

Utilizando la Ecuación 19:

$$D = 0,199 \text{ m}$$

- **Calculo de altura:**

$$\dot{V}_f=21,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s} \text{ (NITIDOR, 2013);}$$

$$t_r=600\text{s} \text{ (BERDUGO C. e ROJAS M., 2012).}$$

Utilizando la Ecuación 21:

$$V_{rc} = 126,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\rho_l = 697,1 \text{ kg/m}^3;$$

$$\rho_g = 0,0899 \text{ kg/m}^3;$$

$$K=0,101 \text{ m/s}$$

Utilizando la Ecuación 24:

$$V_c = 8,89 \text{ m/s}$$

$$\dot{V}_g=2,77 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s};$$

Utilizando la Ecuación 23:

$$AF_g = 311,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

Finalmente utilizando la Ecuación 22:

$$h = 0,40 \text{ m}$$

A partir de estos cálculos se selecciona el tanque que tenga diámetro de 0,199 m y la altura de 0,363 m. Para el proyecto se seleccionó el separador vertical que presenta las especificaciones técnicas que muestra la Tabla 10.

**Tabla 10:** Especificaciones técnicas del separador vertical.

| ÍTEM                     | PARÁMETROS                       |
|--------------------------|----------------------------------|
| Fabricante               | NITIDOR                          |
| Tipo de material         | Acero inoxidable 316             |
| Tipo de fluido           | Gas + Agua (restos de KOH)       |
| Medidas Diámetro/Altura  | 0,20 m/0,50 m                    |
| Capacidad                | $3,54 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ |
| Presión de operación     | 2 000 kPa                        |
| Temperatura de operación | 35°C                             |

Fuente: NITIDOR, 2013.

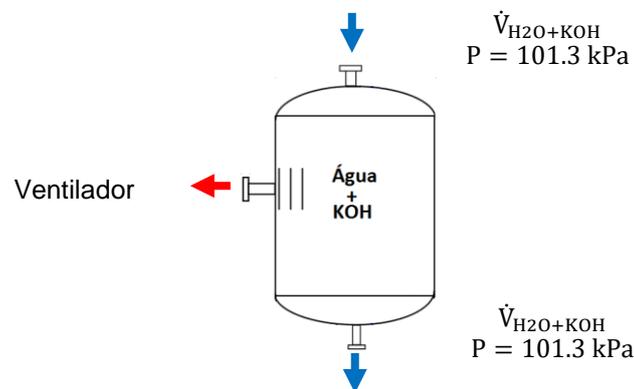
Para el caso de la selección del separador vertical del oxígeno, se realiza el mismo procedimiento, entonces considerando los datos de cálculo se selecciona otro

separador con las mismas características que la Tabla 10, haciendo un total de selección de dos separadores verticales.

### 5.2.1.6 Selección del tanque de alivio

Para la selección de tanque de alivio, se tiene que considerar el flujo de agua residual ( $\dot{V}_{H_2O+KOH}$ ) que sale de los separadores verticales (Figura 31). Este flujo puede calcularse, no en tanto, en este caso en particular no es posible, pues depende del tiempo que demora en descargar el agua residual, lo que implica la dependencia de información del sistema de control y sus fabricantes.

**Figura 31:** Variables operacionales y de estado en el tanque de alivio.



Fuente: Autoría propia.

Se toma como referencia el volumen del tanque utilizado en la PPH-FPTI que presenta las siguientes especificaciones técnicas que muestra la Tabla 11.

**Tabla 11:** Características técnicas del tanque de alivio

| ÍTEM                     | PARÁMETROS                      |
|--------------------------|---------------------------------|
| Fabricante               | NITIDOR                         |
| Tipo de material         | Acero inoxidable 316            |
| Tipo de fluido           | Gas + Agua (restos de KOH)      |
| Capacidad                | $700 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ |
| Presión de operación     | 101,3 kPa                       |
| Temperatura de operación | 20°C                            |

Fuente: NITIDOR, 2013.

Para el caso de la selección tanque de alivio del oxígeno, se realiza el mismo criterio, entonces se selecciona dos tanques con las misas características de la Tabla 11.

## 5.2.2 Subsistema de purificación

### 5.2.2.1 Calculo del tanque de presión

Para la selección del tanque de presión, se tiene que calcular el volumen del recipiente. Este cálculo, se puede aproximar por medio de la Ecuación 25 (VIAN, 2006).

$$\left( p + \frac{n^2 a}{V^2} \right) (V - nb) = nRT \quad (25)$$

Donde:

$p$ =Presión de operación (kPa);

$n$ =Número de moles (mol);

$a, b$ =Parametros determinados empíricamente el cada gas;

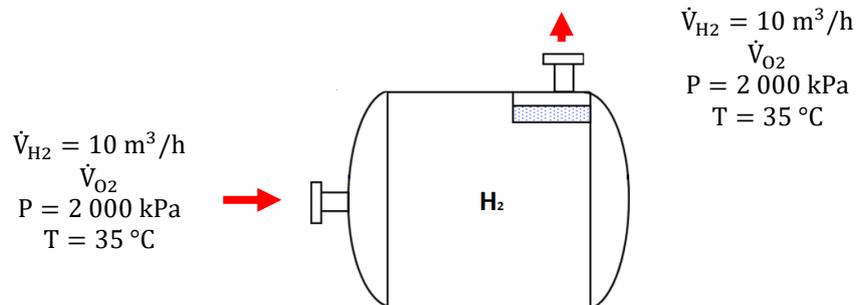
$R$ =Constante de los gases (0,082 atmL/°Kmol);

$T$ =Temperatura de operación °K;

$V$  =Volumen (m<sup>3</sup>).

Para obtener un el volumen promedio del buffer es necesario tener un tiempo de retención aproximado, con el fin de estabilizar la presión en la entrada del reactor. Considerando las variables de estado del hidrógeno húmedo en la entrada y salida del tanque, como se muestra en la Figura 32, procedemos a calcular.

**Figura 32:** Variables operacionales y de estado en el tanque de almacenamiento-buffer 1.



Fuente: Autoría propia.

Se tiene el flujo de masa del hidrógeno que es de 0,24 gr/s y por medio de la Ecuación 16 se tiene:

$$n = 0,24 \text{ mol}_{H_2}$$

Se remplaza los datos en la Ecuación 25 y se tiene el volumen:

$$V = 311,5 * 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

Finalmente, en ese caso se considera el tiempo retención promedio 60s (NITIDOR, 2013; FPTI, 2014), y el volumen de retención del buffer es:

$$V_{\text{tanq1}} = 0,019 \text{ m}^3$$

A partir de este valor se selecciona el tanque que presenta las siguientes especificaciones técnicas que muestra la Tabla 12.

**Tabla 12:** Características técnicas del tanque de presión.

| ÍTEM                     | PARÁMETROS                       |
|--------------------------|----------------------------------|
| Fabricante               | NITIDOR                          |
| Tipo de material         | Acero inoxidable 316             |
| Tipo de fluido           | hidrógeno                        |
| Capacidad                | $30,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ |
| Temperatura de operación | 35°C                             |
| Presión de operación     | 2 000 kPa                        |

Fuente: NITIDOR, 2013.

### 5.2.2.2 Cálculo del reactor de-oxidante

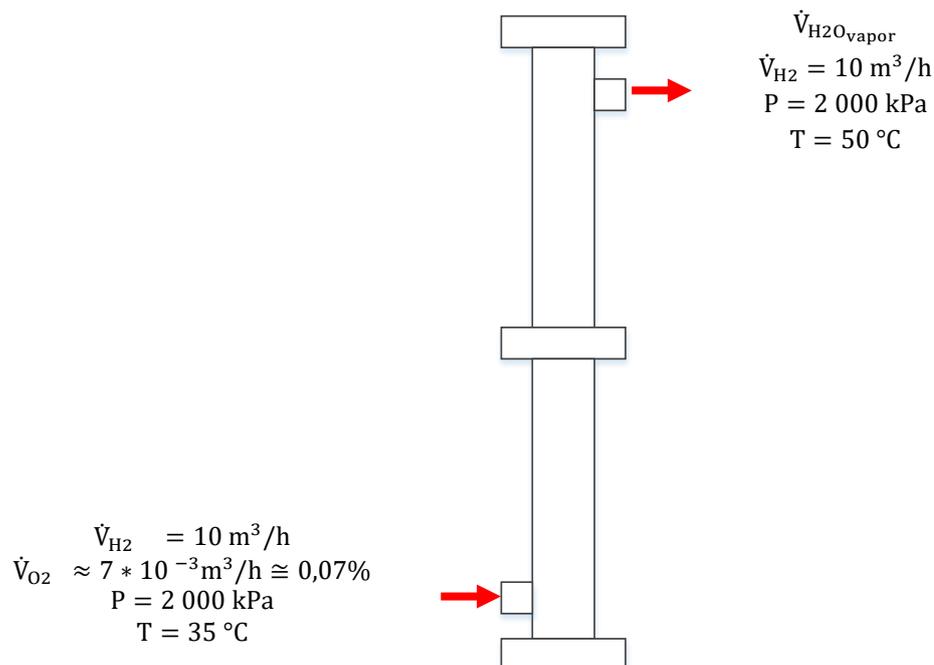
Para la selección de reactor de-oxidante es importante conocer el volumen necesario para la reacción catalítica, está se calculada a partir de relación estequiométrica de los reactivos que participan de la catálisis, en el caso de estudio es el hidrógeno con el oxígeno. Entonces se parte de la Ecuación 26.



Si se tiene como dato la masa del oxígeno que participa de la reacción, se puede calcular el número de moles de agua que se produce, después por medio de la Ecuación 16 se calcula la masa, finalmente para calcular el volumen promedio para la catálisis es necesario conocer el tiempo de retención que demora el proceso catalítico.

Para este caso en particular son considerados las variables de estado del gas húmedo (Figura 33), donde en la entrada el hidrógeno viene acompañado con un porcentaje 0,07 % de oxígeno (NITIDOR, 2013).

**Figura 33:** Variables operacionales y de estado en el reactor de-oxidante.



Fuente: FPTI, 2014

Si el flujo de masa del oxígeno que ingresa al reactor es  $2,78 \cdot 10^{-3}$  gr/s, entonces se utiliza la relación estequiometría de la Ecuación 26 y se tiene.

$$2,78 \cdot 10^{-3} \text{gr}_{\text{O}_2} * \frac{1 \text{mol}_{\text{O}_2}}{32 \text{gr}_{\text{O}_2}} * \frac{2 \text{mol}_{\text{H}_2\text{O}}}{1 \text{mol}_{\text{O}_2}} = 173,66 \cdot 10^{-6} \text{mol}_{\text{H}_2\text{O}}$$

Utilizando la Ecuación 27 se calcula la masa.

$$m = 3,13 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

Se conoce la densidad del agua ( $988,92 \text{ kg/m}^3$  a  $50^\circ\text{C}$ ) entonces se calcula el volumen de producción de agua en el reactor que es:

$$V_{\text{H}_2\text{O}_l} = 3,16 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

Considerando un tiempo de retención de 90 s (VALENZUELA, 2010) para el proceso, el volumen promedio para la catálisis es:

$$V_{\text{cat}} = 284,48 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

A partir de este valor se seleccionó el reactor de-oxidante que presenta las siguientes especificaciones técnicas que muestra la Tabla 13.

**Tabla 13:** Especificaciones técnicas del reactor de-oxidante.

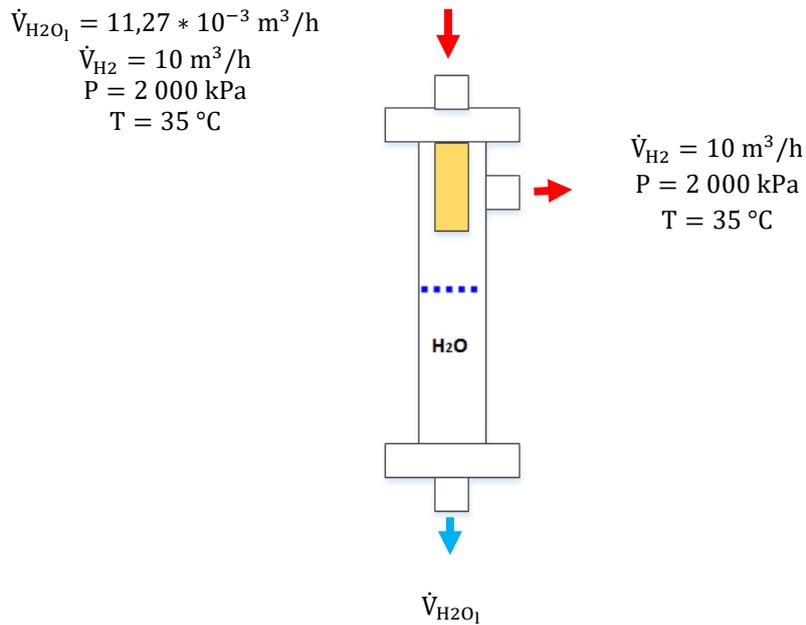
| ÍTEM                     | PARÁMETROS                       |
|--------------------------|----------------------------------|
| Fabricante               | UNICA C.E.                       |
| Tipo de catalizador      | paladio 5% sobre alúmina         |
| Tipo de material         | Acero inoxidable 316             |
| Tipo de fluido           | hidrógeno                        |
| Volumen de catálisis     | $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$  |
| Capacidad                | $2,84 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ |
| Temperatura de operación | $50^\circ\text{C}$               |
| Presión de operación     | 2 000 kPa                        |
| Corriente                | 2,2 A                            |
| Tensión                  | 230 V                            |
| Requerimiento de calor   | 0,094 kW                         |
| Potencia eléctrica       | 0,5 kW                           |

Fuente: NITIDOR, 2013.

### 5.2.2.3 Selección de filtro de hidrógeno

Para la selección del filtro de hidrógeno, se tiene que considerar el flujo de descarga (Figura 34). Este flujo puede calcularse, no en tanto en este caso en particular no es posible, pues depende de información del sistema de control y sus fabricantes

**Figura 34:** Variables operacionales y de estado en el filtro de hidrógeno.



Fuente: Autoría propia.

Se toma como referencia el filtro utilizado en la PPH-FPTI que presenta las siguientes especificaciones técnicas que muestra la Tabla 14.

**Tabla 14:** Características técnicas del filtro del hidrógeno.

| ÍTEM                     | PARÁMETROS                      |
|--------------------------|---------------------------------|
| Fabricante               | NITIDOR                         |
| Tipo de proceso          | Adsorción                       |
| Tipo de material         | Acero inoxidable 316            |
| Tipo de fluido           | hidrógeno                       |
| Capacidad                | $550 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ |
| Temperatura de operación | 35°C                            |
| Presión de operación     | 2 000 kPa                       |

Fuente: NITIDOR, 2013.

#### 5.2.2.4 Cálculo para los secadores

Para la selección de los secadores es importante calcular la potencia térmica necesaria, que suministra el secador para el gas de hidrógeno, está es calculada a partir del análisis del balance de masa, que es definida por la Ecuación 27 (CENGEL e BOLES, 2009).

$$\dot{m}_{\text{entrada}} = \dot{m}_{\text{salida}} \quad (27)$$

Donde:

$\dot{m}_{\text{entrada}}$  = Flujo de masa de entrada;

$\dot{m}_{\text{salida}}$  = Flujo de masa de salida.

Y también por el balance de energía que es definida por la Ecuación 28 (CENGEL e BOLES, 2009).

$$E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = \frac{dE_{\text{sistema}}}{dt} \quad (28)$$

Donde:

$E_{\text{entrada}}$  = Tasa de transferencia de energía neta, trabajo y masa de entrada;

$E_{\text{salida}}$  = Tasa de transferencia de energía neta, trabajo y masa de salida;

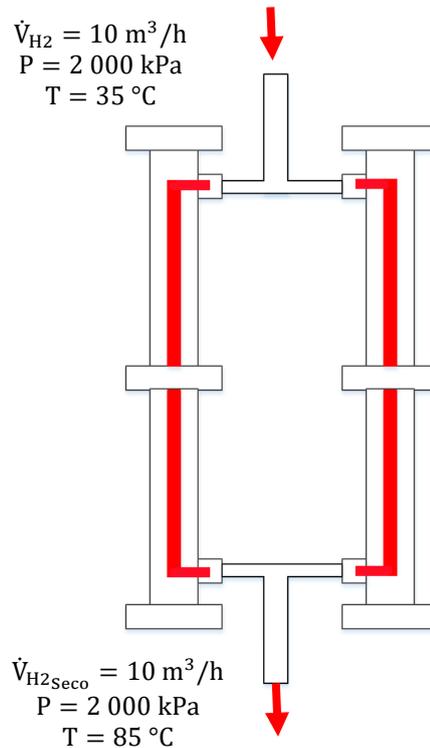
$\frac{dE_{\text{sistema}}}{dt}$  = Tasa de cambio de energía interna, cinética y potencial.

Si se considera la tasa de cambio de energía interna, cinética y potencial, estable se tiene que  $\frac{dE_{\text{sistema}}}{dt} = 0$ , entonces de la Ecuación 28 (CENGEL e BOLES, 2009) se tiene.

$$E_{\text{entrada}} = E_{\text{salida}} \quad (29)$$

Para este caso en particular se tiene que considerar las variables de estado del hidrógeno (Figura 35) que sale del proceso anterior y una temperatura media de 85°C en la salida (NITIDOR, 2013).

**Figura 35:** Variables operacionales y de estado en los secadores.



Fuente: Autoría propia.

A partir de los datos se calcula:

Estado 1:  $P=2\ 000\ \text{kPa}$ ,  $T=35^\circ\text{C}$ ,  $\dot{m}_{\text{H}_2}=0,899\ \text{kg/h}$ ;

Estado 2:  $P=2\ 000\ \text{kPa}$ ,  $T=85^\circ\text{C}$ ,  $\dot{m}_{\text{H}_2}=0,899\ \text{kg/h}$ ;

De la combinación de la Ecuación 27 y 29 da como resultado el flujo de calor necesario para que el hidrógeno puede llegar a la temperatura deseada de 85°C.

$$\dot{Q}_{\text{seca}} = \dot{m}_{\text{H}_2}(h_1 - h_2)$$

$$\dot{Q}_{\text{sec}} = 0.1800 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 0.1800\ \text{kW}$$

Considerando una eficiencia del secador de 85% (Tabla 15) la potencia es:

$$P_{\text{sec}} = 0.2112 \text{ kW}$$

A partir de este dato se selecciona el secador que presenta las siguientes especificaciones técnicas que muestra la Tabla 15.

**Tabla 15:** Especificaciones técnicas de los secadores.

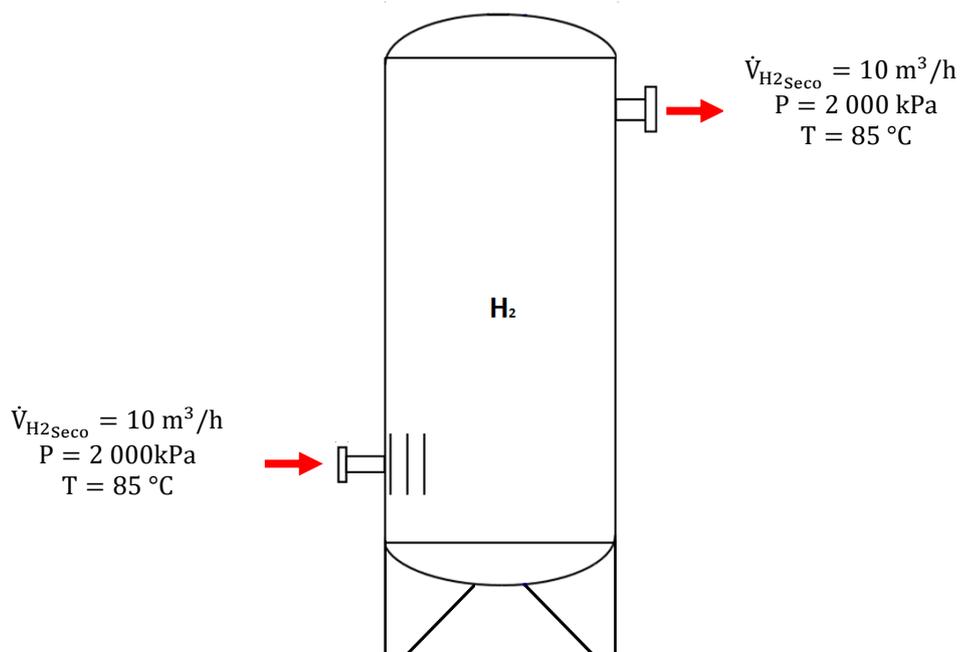
| ÍTEM                 | PARÁMETROS                       |
|----------------------|----------------------------------|
| Fabricante           | UNICA C.E.                       |
| Tipo de secador      | eléctrico                        |
| Tipo de material     | Acero inoxidable 316             |
| Tipo de fluido       | hidrógeno                        |
| Potencia eléctrica   | 0,5 kW                           |
| Tensión              | 230 VAC                          |
| Corriente            | 2,2 A                            |
| Capacidad            | $2,84 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ |
| Temperatura          | 85°C                             |
| Presión de operación | 2 000 kPa                        |
| Eficiencia           | 85%                              |

Fuente: NITIDOR, 2013.

#### 5.2.2.5 Cálculo del tanque de presión de almacenamiento tipo buffer

Para la selección del buffer se calcula el volumen del recipiente. Siguiendo el mismo procedimiento que el Ítem 5.2.2.1., se consideran las variables de estado como se muestra en la Figura 36.

**Figura 36:** Variables operacionales y de estado en el tanque de almacenamiento.



Fuente: Autoría propia.

Entonces, se tiene el flujo de masa del hidrógeno que es de 0,24 gr/s y por medio de la Ecuación 16 se calcula:

$$n = 0,24 \text{ mol}_{\text{H}_2}$$

Remplazando los datos en la Ecuación 26 se tiene que el volumen es:

$$V = 311,5 * 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

Finalmente, en este caso se considera el tiempo que demora en almacenar el compresor 6 tanques de alta presión que es 1200s (NITIDOR, 2013), entonces el volumen de retención del buffer es:

$$V_{\text{tanq2}} = 0,37 \text{ m}^3$$

A partir de este valor se selecciona el tanque que presenta las siguientes especificaciones técnicas que muestra la Tabla 16.

**Tabla 16:** Características técnicas del tanque de presión de almacenamiento tipo buffer.

| ÍTEM                     | PARÁMETROS         |
|--------------------------|--------------------|
| Fabricante               | NITIDOR            |
| Tipo de material         | CARBON STEEL       |
| Tipo de fluido           | hidrógeno          |
| Capacidad                | 0,7 m <sup>3</sup> |
| Temperatura de operación | 85°C               |
| Presión de operación     | 2 000 kPa          |

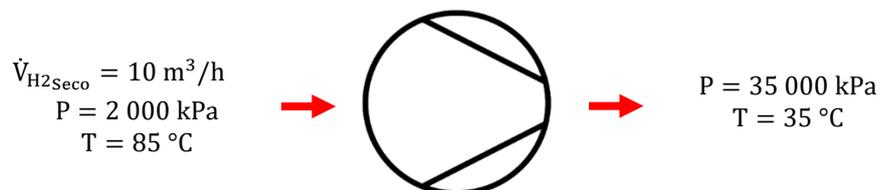
Fuente: NITIDOR, 2013.

## 5.2.3 Subsistema de almacenamiento

### 5.2.3.1 Selección del compresor

Para la selección del compresor se tiene que considerar el tipo de fluido y las presiones de trabajo. Entonces de acuerdo a la normativa estándar operacional de cilindros de gas para uso industrial la presión con la que debe ser almacenado el gas hidrógeno es 350 bar. (DOE, 2009) A continuación en la Figura 37 se presenta las variables de estado del gas que se considera en la selección del compresor.

**Figura 37:** Variables operacionales y de estado en el compresor.



Fuente: Autoría propia.

El hecho de comprimir un gas a 350 bar implica que el compresor deba tener un sistema de refrigeración interno para reducir la temperatura del gas, entonces a partir de esta información, encontramos comercialmente compresores de distintos fabricantes, entre

ellos tenemos: Vilter, Fenan, Schulz, Chiaparini y Sera. Para el proyecto, se selecciona del fabricante SERA, presentando las siguientes especificaciones técnicas que muestra la Tabla 17.

**Tabla 17:** Especificaciones técnicas del compresor.

| ÍTEM                             | PARÁMETROS                            |
|----------------------------------|---------------------------------------|
| Fabricante                       | SERA - Excellence in Fluid Technology |
| Tipo                             | MV 2278 IIK                           |
| Tensión                          | 380/400 V                             |
| Potencia máx. absorbida          | 7,5 kW                                |
| Temperatura ambiente             | 5°C a 40°C                            |
| Número de etapas                 | 2                                     |
| Presión máxima en el 1er. estado | 11 000 kPa                            |
| Presión máxima en el 2do. estado | 35 000 kPa                            |
| Tipo de gas                      | Hidrógeno                             |
| Temperatura de entrada           | 85°C                                  |
| Presión de entrada               | 2 000 kPa                             |
| Presión de salida                | 35 000 kPa                            |
| Salida nominal                   | 10 m <sup>3</sup> /h                  |
| Tipo de refrigeración            | Fluido                                |
| Circuito de refrigeración        | Lazo de cerrado                       |
| Medio de refrigeración           | Agua                                  |

Fuente: NITIDOR, 2013.

### 5.2.3.2 Selección de los tanques de alta presión

Para la selección del tanque de alta presión, se realiza bajo la normativa estándar operacional de cilindros de gas para uso industrial (NR-13, Resolución, ISO TC 197). El tanque que se seleccionó presenta las siguientes especificaciones técnicas que muestra la Tabla 18.

**Tabla 18:** Especificaciones técnicas del tanque de alta presión.

| ÍTEM                | PARÁMETROS          |
|---------------------|---------------------|
| Fabricante          | OLAER ITALIANA spa. |
| Cantidad            | 48 unid.            |
| Temperatura         | 90°C                |
| Presión             | 35 000 kPa          |
| Capacidad de tanque | 0,05 m <sup>3</sup> |
| Color del cilindro  | Rojo                |

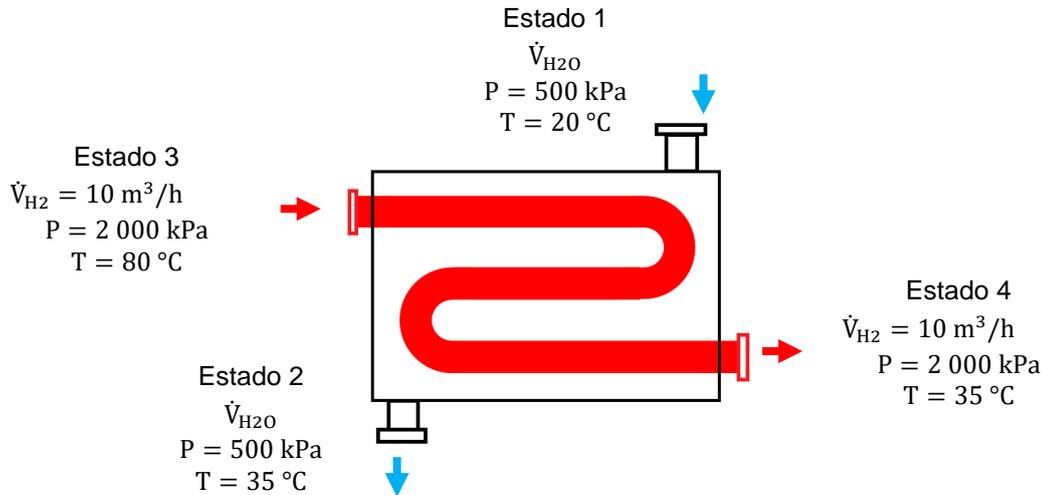
Fuente: NITIDOR, 2013.

### 5.2.4 Subsistema de refrigeración

Para la selección del equipo de refrigeración o chiller, es importante calcular el flujo de agua de refrigeración requerido por cada intercambiador de calor. En este caso en partículas se toma como referencia las condiciones de operación de los intercambiadores de calor de la PPH-FPTI, y de esta manera se calcula el flujo de agua de refrigeración requerido junto a la tasa de transferencia de calor.

- **Para intercambiador de calor HE.**

**Figura 38:** Variables de estado de los dos fluidos en el intercambiador de calor HE.



Fuente: Autoría propia.

Donde a partir de los datos:

Estado 1:  $P=500 \text{ kPa}$ ,  $T=20^\circ\text{C}$ .

Estado 2:  $P=500 \text{ kPa}$ ,  $T=35^\circ\text{C}$ .

Estado 3:  $P=2\,000 \text{ kPa}$ ,  $T=80^\circ\text{C}$ ,  $\dot{m}_{H_2}=0,899 \text{ kg/h}$ ;

Estado 4:  $P=2\,000 \text{ kPa}$ ,  $T=35^\circ\text{C}$ ,  $\dot{m}_{H_2}=0,899 \text{ kg/h}$ ;

Se calcula el flujo de agua de refrigeración requerido a partir de la combinación de la Ecuación 27 y 29.

$$\dot{m}_{H_2O}(h_1 - h_2) = \dot{m}_{H_2}(h_4 - h_3)$$

$$\dot{m}_{H_2O} = 8.94 \text{ kg/h}$$

Y finalmente la tasa de transferencia de calor del hidrógeno hacia el agua de resfriamiento es:

$$\dot{Q}_{H_2O} = \dot{m}_{H_2O}(h_2 - h_1)$$

$$\dot{Q}_{H_2O} = 0,15 \text{ kW}$$

- **Para intercambiador de calor HC:**

A partir de los datos:

Estado 1:  $P=500 \text{ kPa}$ ,  $T=20^\circ\text{C}$ .

Estado 2:  $P=500 \text{ kPa}$ ,  $T=35^\circ\text{C}$ .

Estado 3:  $P=2\,000 \text{ kPa}$ ,  $T=50^\circ\text{C}$ ,  $\dot{m}_{H_2}=0,899 \text{ kg/h}$ ;

Estado 4:  $P=2\,000 \text{ kPa}$ ,  $T=35^\circ\text{C}$ ,  $\dot{m}_{H_2}=0,899 \text{ kg/h}$ ;

Flujo de agua de refrigeración requerido es:

$$\dot{m}_{H_2O} = 2.98 \text{ kg/h}$$

Tasa de transferencia de calor del hidrógeno hacia el agua de resfriamiento

es:

$$\dot{Q}_{H_2O} = 0,052 \text{ kW}$$

- **Para intercambiador de calor del separador horizontal:**

A partir de los datos:

Estado 1: P=500 kPa, T=20°C.

Estado 2: P=500 kPa, T=35°C.

Estado 3: P=2 110 kPa, T=100°C,  $\dot{m}_{H_2+KOH}=0,899 \text{ kg/h}$ ;

Estado 4: P=2 000 kPa, T=80°C,  $\dot{m}_{H_2+KOH}=0,899 \text{ kg/h}$ ;

Flujo de agua de refrigeración requerido es:

$$\dot{m}_{H_2O} = 4.15 \text{ kg/h}$$

Tasa de transferencia de calor del hidrógeno hacia el agua de resfriamiento

es:

$$\dot{Q}_{H_2O} = 0.072 \text{ kW}$$

- **Para compresor:**

A partir de los datos:

Estado 1: P=500 kPa, T=20°C.

Estado 2: P=500 kPa, T=35°C.

Estado 3: P=35 000 kPa, T=577°C,  $\dot{m}_{H_2}=0,899 \text{ kg/h}$ ;

Estado 4: P=35 000 kPa, T=85°C,  $\dot{m}_{H_2}=0,899 \text{ kg/h}$ ;

Flujo de agua de refrigeración requerido es:

$$\dot{m}_{H_2O} = 99.8 \text{ kg/h}$$

Tasa de transferencia de calor del hidrógeno hacia el agua de resfriamiento

es:

$$\dot{Q}_{H_2O} = 1.74 \text{ kW}$$

Entonces, la sumatoria de los flujos de refrigeración hacen un total de 115.87 kg/h de agua que demanda el sistema, por lo tanto, a partir de este valor se seleccionó el chiller que presenta las siguientes especificaciones técnicas que muestra la Tabla 19.

**Tabla 19:** Especificaciones técnicas del chiller.

| ÍTEM                    | PARÁMETROS     |
|-------------------------|----------------|
| Fabricante              | SYSTEMAIR      |
| Modelo                  | AQL/ AQH 20-35 |
| Refrigerante            | R410A          |
| Carga del refrigerante  | 7,8 kg         |
| Temperatura (baja-alta) | -20-50 °C      |
| Presión                 | 500 kPa        |
| Flujo agua refrigerante | 500 kg/h       |
| Tensión                 | 380/400 V      |
| Potencia                | 5,5 kW         |

Fuente: SYSTEMAIR, 2016.

## 5.3 CALCULO DE INSUMOS DE LA PPH

### 5.3.1 Agua

A partir del cálculo del ítem 5.2.1.1., el consumo de agua para producir 10 Nm<sup>3</sup>/h es de:

$$\text{Consumo}_{\text{H}_2\text{O}} = 8,3 * 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

### 5.3.2 Electrolito

El consumo de electrolito está dado por la Tabla 6 y es de 0,075 m<sup>3</sup>, por cada electrolizador. Haciendo un total de las dos unidades seleccionadas de:

$$C_{\text{KOH}} = 0,15 \text{ m}^3$$

### 5.3.3 Energía eléctrica

Para realizar un cálculo de consumo de energía eléctrica, se realizó un levantamiento de cargas mediante las potencias nominales de los principales equipos instalados en la planta, presentadas en la Tabla 20:

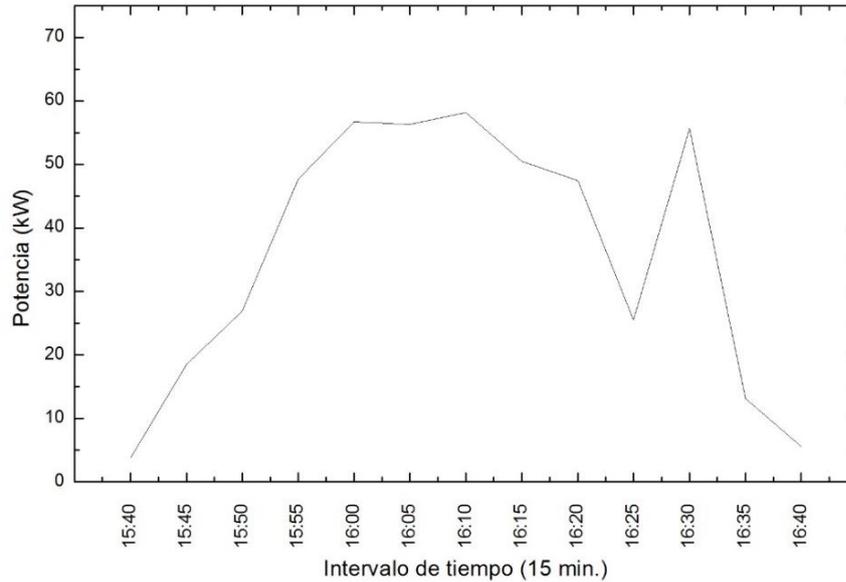
**Tabla 20:** Cuadro de cargas instaladas en la PPH.

| ÍTEM                             | EQUIPOS              | VOLTAJE (V) | POTENCIA (kW)  |
|----------------------------------|----------------------|-------------|----------------|
| 1                                | Electrolizador       | 160 VDC     | 47,0           |
| 2                                | Bomba de agua        | 220 V       | 0,55           |
| 3                                | Bomba de electrolito | 220 V       | 0,55           |
| 4                                | Reactor-oxidante     | 230 V       | 0,5            |
| 5                                | Secadores            | 230 V       | 1,0            |
| 6                                | Compresor            | 380/400 V   | 7,5            |
| 7                                | Chiller              | 380/400 V   | 5,5            |
| 8                                | Sistema de control   | 220 V       | 2              |
| <b>POTENCIA TOTAL DE CONSUMO</b> |                      |             | <b>61,1 kW</b> |

Fuente: SYSTEMAIR, 2016; NITIDOR, 2013; NU.ER.T, 2016.

Para analizar el consumo de energía, a continuación, mediante la Figura 39 se presenta una curva de carga real de la PPH-FPTI del día 12/02/2015, en un intervalo de tiempo de 1 hora de funcionamiento, en donde se demuestra que los valores nominales se aproximan a la operación real.

**Figura 39:** Consumo de potencia real de la PPH-FPTI.



Fuente: Basado en datos reales de la PPH-FPTI.

#### 5.4 CALCULO DE RENDIMIENTO DE LA PPH

La eficiencia el proceso global de la PPH es determinado por la energía del producto de salida dividida por la energía de entrada (PENCHINI, CINTI, *et al.*, 2014) y está representada por la Ecuación 30.

$$\eta_{PPH} = \frac{PCS * \dot{m}_{H_2}}{P_{con}} * 100\% \quad (30)$$

Donde:

PCS=Poder calorífico superior (kJ/kg);

$\dot{m}_{H_2}$ = Flujo másico de producción de hidrógeno (kg/s);

$P_{con}$ =Potencia de consumo de la PPH (kW).

Entonces se sabe que el poder calorífico superior del hidrógeno es 142 MJ/kg, el flujo de producción del hidrógeno es  $249,73 * 10^{-6}$  kg/s (ítem 5.2.1.1.) y finalmente la potencia total de consumo es 61,1 KW. Entonces reemplazando los datos en la Ecuación 30:

$$\eta_{PPH} = \frac{142000 * 249,73 * 10^{-6}}{61,1} * 100\%$$

$$\eta_{PPH} = 58,04 \%$$

## CAPITULO VI

### 6 ASPECTO ECONÓMICOS Y SOCIO-AMBIENTALES

#### 6.1 ECONÓMICOS

La implantación de un proyecto de esta magnitud, posee altas inversiones iniciales, especialmente en los equipos, construcción y puesta en marcha, una estimativa de las inversiones envueltas esta mostrada en la Tabla 21.

**Tabla 21:** Costo de instalación de PPH

| DESCRIPCIÓN                                 | COSTO (\$)        | PARTICIPACIÓN (%) |
|---|-------------------|-------------------|
| Costo asociado al sistema de electrólisis   | 552,151.26        | 56,40             |
| Costo asociado al sistema de almacenamiento | 11,747.90         | 1,20              |
| Costo asociado a la infraestructura civil   | 103,773.11        | 10,60             |
| Costo asociado a los gastos de construcción | 97,899.11         | 10,00             |
| Costo asociado al sistema de compresión     | 11,747.90         | 1,20              |
| Costo de ingeniera y supervisión            | 115,521.01        | 11,80             |
| Costo asociado a las contingencias          | 86,151.26         | 8,80              |
| <b>TOTAL</b>                                | <b>978,991.60</b> | <b>100,00</b>     |

Fuente: FPTI, 2014; GODOY, 2008; GAMBETTA, 2010.

#### 6.2 SOCIO-AMBIENTAL

Una PPH posibilita consecuencias trascendentales para la sociedad, tiene un potencial de poner fin a la dependencia que el mundo tiene del petróleo importado y sus trágicas consecuencias. El solo hecho de producir hidrógeno genera una alternativa donde la sociedad dispondría de energía de una manera democrática y descentralizada, esto significaría que cada país podría convertirse en un productor y consumidor de su propia energía. Por otro lado la PPH, va asociada a una reducción drástica de impacto ambiental frente a la producción convencional. Lo que le convierte en una tecnología nula en contaminación y cero en producción de gases de efecto invernadero, contrariamente a lo que ocurre con las fuentes no renovables (ZENG e ZHNAG, 2010). Esta tecnología posibilitara la creación de nuevos sectores productivos para los trabajadores y así garantizará un desenvolvimiento socioeconómico y ambiental que beneficiará la humanidad.

Una PPH que funciona a partir de fuentes renovables es una de las grandes alternativas que está adquiriendo cada vez más protagonismo. Ya que dentro de este campo, el hidrógeno producido con energía solar alcanza una eficiencia de 24,4% (NAKAMURA, OTA, *et al.*, 2015). Con eso se consigue subsanar uno de los principales obstáculos que es la fuente de alimentación de energía eléctrica de la planta.

## CAPITULO VII

### 7 CONCLUSIONES

Los proyectos de una PPH por electrólisis de agua, presentan una elevada confiabilidad en países desarrollados. Sin embargo, están en fase de desenvolvimiento en países latinoamericanos.

Para el dimensionamiento, es necesario el conocimiento del principio de funcionamiento de la planta y así realizar un estudio de caracterización de todos los equipos que la conforman. Con el fin de permitir al ingeniero de energías, decidir cuál es la mejor opción de planificación del proyecto, viabilidad técnica y comercial.

Los resultados obtenidos, evidenciaron que el cálculo y la selección de equipos están fuertemente condicionados a las variables operacionales de la planta, características termodinámicas del fluido que son necesarias para satisfacer la demanda.

La electrólisis del agua alcalina presenta ventajas en relación a otras tecnologías, ya que reside en el hecho de ser una tecnología madura y robusta en escala industrial. Los cálculos realizados demostraron que la eficiencia global de la PPH es de 58,4 %.

El consumo de energía eléctrica nominal de la planta fue de 61,1 kW y fue comparado con una curva de carga de producción real que llega a picos de 58,2 kW, de la misma capacidad, lo cual demuestra que los valores nominales se aproximan a una operación real.

Conforme a la tabla 21 de costos de instalación, se puede verificar que el principal responsable por la mayor inversión financiera en una PPH, es el costo de los electrolizadores importados. Por ese motivo, es necesario el desenvolvimiento de un parque industrial capaz de producir estos equipos y de esta manera reducir drásticamente el costo por medio de la nacionalización.

Otro aspecto relevante debido a los procesos de patentes y secretos industriales es la ausencia de manuales con mayor detalle del funcionamiento y caracterización de los equipos usados en una planta. De este modo, este trabajo busca

contribuir al desarrollo del conocimiento proponiendo un método para el dimensionamiento de unidades productoras de hidrógeno.

Finalmente, una sugerencia para trabajos futuros es realizar un análisis de ciclo de vida y viabilidad económica de una planta con una mayor capacidad de producción.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAGON, S. A. et al. **Estrategia y Competitividad Empresarial - Un estudio en la MiPyMES**, Abril 2010.
- BERDUGO C., O.; ROJAS M., J. R. **Diseño de un separador movil trifasico horizontal agua, gas y aceite para el campo escuela colorado Universidad de Santander**, Trabajo de grado para optar título de Ingeniero Mecanico, Bucaramanga, p. 205, 2012.
- BOCKRIS, J. **Comprehensive Treatise of Electrochemistry**. [S.I.]: Plenum Press, v. 2, 1981. Pag. 1-104 p.
- CARNIELETTO, R. **Aproveitamento de Energia Vertica Turbinável para Produção de Hidrogênio e Geração Distribuída.**, Dissertação de Mestrado, 2011.
- CARVAJAL-OSORIO, H.; BABATIVA, H. J.; ALONSO, J. A. **Estudio de producción de Hidrogeno con hidroelectricidad para una economia de hidrogeno en Colombia**, Ingenieria y Competividad, p. 31, 2010.
- CENEH. **Apresentação sobre la experiência da Unicamp e do Brasil em tecnologia do hidrogênio**. Campinas: Unicamp, 2004.
- CENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinámica**. [S.I.]: Mcgraw-Hill/Interamericana Editores S.A. De C.V., v. Séptima Edicion, 2009.
- CGEE. **Hidrogênio energetico no Brasil-Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025/Centro de Gestão e Estudos Energeticos**, Hidrogênio energetico no Brasil, p. 72, 2010.
- DE NORA, P. **Water electrolyzers for hydrogen production** , Catalogo, 1992.
- DOE. **DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record** , Energy requirements for hydrogen gas compression, 2009.
- ELEMENTOS.ORG. **Elementos**, 2016. Disponível em: <<http://elementos.org.es>>. Acesso em: 15 maio 2016.
- FERREIRA, P. F. P. **Análise da Viabilidade de Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica na Forma de Hidrogênio Utilizando Células a Combustível**, Dissertação de mestrador, Campinas, 2003.
- FPTI. **Fundação do Parque Tecnológico de Itaipu**, 2014. Disponível em: <<http://www.pti.org.br/projeto-hidrogenio>>. Acesso em: 15 jun. 2016.
- GAMBETTA, F. **Análise Técnica e Econômica de Retificadores de Corrente para Produção de hidrogênio Eletrolítico: Estudo de Caso Aproveitando a EVT da UHE Itaipu.**, Dissertação de Mestrado, 2010.
- GODOY, G. A. R. **Aproveitamento de Energia Vertida Turbinável da UHE Itaipu para Uso em Ônibus a Hidrogênio: Estudo de Caso em Foz do Iguaçu**, Dissertação Mestrado, p. 105 pag., 2008.

- GOMES, E. H. **Hidrogênio, Evoluir Sem Poluir-A Era do Hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível.** Curitiba: [s.n.], 2005. 240 p.
- H. VENDT, E. **Electrochemical Hydrogen Technologies.** [S.l.]: [s.n.], 2008. 195 p.
- HOLLADAY, J. D. **An Overview of Hydrogen Production Technologies Catalysis Today.** [S.l.]: [s.n.], v. 139, 2009.
- JANNUZZI, G. D. M. **Além de Grandes Hidrelétricas-Políticas para Fontes Renováveis de energia Eletrica no Brasil. Sumario para Tomadores de Decisão-WWF,** 2012.
- LEROY, R. L. **An analysis of hidrogen production from renewable electricity source-preprint** , International Journal of Hydrogen Energy, p. p. 401- 417, 1983.
- LINARDI, M. **Introdução à Ciência e Tecnologia de Células a Combustível.** São Paulo-SP-Brasil: Artibler, 2010. 151 p.
- MARQUES, A. R. **O Hidrogênio como Vector Energetico nos Transportes.** Lisboa: [s.n.], 2004.
- MATAIX, C. **Mecanica de fluidos y maquinas hidraulicas.** Segunda. ed. Madrid: Ediciones del Castillo S.A., 1986. 345 p.
- MENDEZ, A. **Diseño de un Separador Bifasico (Gas-Petroleo) Tipo Horizontal.,** 2009.
- M-FIELD. **Eco-conscious alternative-Fuel Cell Technology,** 2016. Disponível em: <<http://www.m-field.com.tw/>>. Acesso em: 05 jun. 2016.
- MORAES, N. P. **Estudo de Implantação de Célula a Combustível em Sistemas Híbridos para Produção de Energia Elétrica,** Tese (Mestrado), 2011.
- NAKAMURA, A. et al. **A 24.4% solar to hidrogen energy conversion efficiency by combining concentrator photovoltaic modules and electrocheical - IP Science,** p. 5, 2015.
- NITIDOR, H. **Installation use and maintenance manual-Pressurized water electrolyser,** 24 set. 2013.
- NU.ER.T. **Rotary Vane Pumps / Volumetric Rotary Vane Pumps Production,** 2016. Disponível em: <<http://www.nuert.com/pump-motors.php>>. Acesso em: 06/06/2016.
- OLIVEIRA, J. J. **Tietê adpta Hidrogênio em novo processo de geração** , Jornal Econômico, 2012.
- PARTHASARATHY, P.; NARAYANAN, K. S. **Hydrogen Production from Steam Gasification of Biomass - Influence of process parameters on hydrogen yield - A Review Renewable.** [S.l.]: [s.n.], v. Vol. 66, 2014.
- PARTNERSHIP, F. A. F. **Hydrogen Production – Overview of Technology Options.** [S.l.]: [s.n.], 2009.

- **PENCHINI, D. et al. Theoretical study and performance evaluation of hydrogen production by 200 W solid oxide electrolyzer stack**, Italy, p. 10, 2014.
- **RAJESHWAR, K.; MC CONNELL, R.; LICHT, S. Solar Hydrogen Generation Toward A Renewable Energy Future**. New York.: Springer-Verlag., 2008.
- **ROSEN, M. A. Energy and exergy analyses of electrolytic hydrogen production**, 1994.
- **SECAS, H. H. Estudio, Diseño y Contrucción de un Generado de Hidrogeno por Electrólisis** Estudio, Diseño y Contrucción de un Generado de Hidrogeno por Electrólisis, Ingeniería Técnica Naval en Propulsión y Servicios del Buque, 2012.
- **SILVA, E. P. Introdução a Tecnologia e Economia do Hidrogênio**. Campinas: Unicamp, 1991. 204 p.
- **SOUZA, M. Tecnologia do Hidrogênio**. Rio de Janeiro: Synergia, 2009. 132 p.
- **SOUZA, S. N. Aproveitamento de energía hiddreléctrica secundária para produção de hidrogênio eletrolítico.**, p. 192, 1998.
- **SYSTEMAIR. AQL/AQH 20-75-Enfriadores de Agua y Bomba de Calor Condensadas con Aire**, 2016.
- **ULLEBERG, O. et al. Hydrogen demostration project evaluations**. [S.l.]: [s.n.], v. task. 18, 2007.
- **ULLMANN'S. Hydrogen, Encyclopedia of Industrial Chemistry**. Federal Republic of Germany: [s.n.], 1989. p.297-443 p.
- **VALENZUELA, L. M. Fisico Quimica II-Catalisis**, Catalisis, 2010.
- **VIAN, O. . Quimica Industrial**. España: Reverte S.A., 2006.
- **ZENG, K.; ZHNAG, D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications**. Australia: The university of westem, 2010.