

ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE EN UNA  
MOTOCICLETA TIPO ESCÚTER

CELESTIN PELLISSIER

ESTUDIANTE INTERCAMBIO DE INGENIERIA MECANICA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PEREIRA

2016

ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE EN UNA  
MOTOCICLETA TIPO ESCÚTER

CELESTIN PELLISSIER  
ESTUDIANTE INTERCAMBIO DE INGENIERIA MECANICA

Proyecto de grado

Director:

Ph.D. Juan Esteban Tibaquirá Giraldo

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PEREIRA

2016

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Pereira, Junio de 2016

## **DEDICATORIA**

A mes parents, pour leur soutien, leur aide, leurs conseils et plus que tout, leur amour. Pour m'avoir permis d'être celui que je suis et où je suis aujourd'hui.

A mon pépé Michel, qui nous a quittés cette année, et à qui je dois tellement.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero dar un sincero agradecimiento al señor decano de la Facultad de Ingeniera Mecánica, Dr. Juan Esteban Tibaquirá por haberme dado la oportunidad de trabajar en esta investigación, correspondiente a mis intereses personales y por su constante acompañamiento en su realización.

También quiero agradecer a todas las personas que han hecho parte de este proyecto en el Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices de la Universidad Tecnológica de Pereira – UTP, Sebastián, Luis Felipe, Adrián, Juan Pablo y María, por sus aportes y hacer muy amena la realización de este trabajo.

Gracias.

## CONTENIDO

LISTA DE LAS ILUSTRACIONES.....	9
LISTA DE TABLAS.....	10
INTRODUCCIÓN.....	11
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1. OBJETIVOS.....	13
1.1 Objetivo general .....	13
1.2 Objetivos específicos.....	13
2. MARCO TEORICO.....	14
2.1 Hidrógeno como fuente de energia.....	14
2.2 Producción del hidrógeno.....	15
2.3 Almacenamiento del hidrógeno.....	15
2.3.1 Almacenamiento físico.....	16
2.3.2 Almacenamiento en materiales avanzados .....	18
2.4 Distribución del hidrógeno .....	21
2.5 CELDAS DE COMBUSTIBLE.....	21
2.6 MOTOCICLETA TIPO Escúter.....	23
2.7 Almacenamiento secundario de energía.....	24
3. ANÁLISIS DEL MERCADO DE LOS ESCÚTER A CELDA DE COMBUSTIBLE Y REVISION BIBLIOGRAFICA .....	25
3.1 Suzuki Burgman FC .....	25
3.2 Asia Pacific Fuel Cell Technologies (APFCT) ZES IV.6 .....	25
3.3 Revisión bibliográfica .....	26
4. ANÁLISIS DEL MERCADO COLOMBIANO Y SELECCIÓN DEL ESCÚTER.....	31
4.1 Primer semestre del año 2015.....	31
4.2 Año 2014, 2013 y 2012 .....	31
4.3 Año 2011 .....	33
4.4 Histórico de las ventas desde 1977 hasta 2010.....	33
4.5 Conclusión de los objetivos 1 y 2.....	34
5. MODELO MATEMATICO DE LA POTENCIA Y CICLO DE MANEJO .....	35

5.1	Modelo matemático .....	35
5.2	Ciclo de manejo.....	36
5.3	Conclusión del objetivo 3.....	37
6.	DISEÑO DEL SISTEMA DE CELDA DE COMBUSTIBLE .....	38
6.1	Modo de funcionamiento (load-leveled o load-following).....	38
6.2	Potencia requerida a la salida de la celda .....	38
6.3	Análisis del mercado .....	39
6.3.1	Ballard .....	39
6.3.2	Horizon FuelCell .....	40
6.3.3	PowerCell.....	40
6.3.4	Intelligent Energy .....	40
6.4	Selección de la celda de combustible .....	41
6.5	Conclusión del objetivo 4.....	41
7.	DISEÑO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO .....	43
7.1	Comparación de los métodos: Relación de peso del material almacenador/peso de hidrógeno almacenado, volumen, precio .....	43
7.1.1	Almacenamiento en tanque sobre presión.....	45
7.1.2	Almacenamiento por adsorción para los sistemas “HexCell” and “MATI” (MOF) .....	47
7.1.3	Canisters de hidruros metálicos.....	48
7.2	Comparación de los métodos: Consideraciones de seguridad.....	48
7.3	Comparación de los métodos: Conclusión .....	49
7.4	Estudio de normas aplicadas al almacenamiento del hidrógeno .....	49
7.5	Calculó de la capacidad de hidrógeno necesaria .....	53
7.5.1	Numero de litros de hidrógeno a condiciones ambiente:.....	53
7.5.2	Hidrógeno a presión: Cálculo del volumen equivalente.....	54
7.6	Escogencia del sistema de almacenamiento de hidrógeno .....	54
7.6.1	Presentación y aplicación de la herramienta Tabla Multi-criterios .....	55
7.6.2	Selección del modelo de tanque a presión y del sistema de regulación .....	58
8.	IMPLEMENTACIÓN PREVIA DE LOS COMPONENTES ELEGIDOS .....	61

9.	CONCLUSIONES.....	63
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	64
11.	ANEXOS.....	68



## LISTA DE LAS ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Toyota Mirai.....	14
Ilustración 2: Hyundai Tucson .....	15
Ilustración 3: Métodos de almacenamiento de hidrógeno .....	16
Ilustración 4: Tanque de la Toyota Mirai .....	17
Ilustración 5: Almacenamiento a la superficie .....	18
Ilustración 6: Disco de hidruro MgH <sub>2</sub> , empresa McPhy .....	19
Ilustración 7: Almacenamiento a dentro de la estructura (intersticial).....	19
Ilustración 8: « Metal hydride storage canister » .....	20
Ilustración 9: Hidruro químico .....	20
Ilustración 10: Hidruro complejo .....	20
Ilustración 11: Estación de hidrógeno Shell en Newport Beach, California .....	21
Ilustración 12: Principio de funcionamiento de la celda de combustible .....	22
Ilustración 13: "Fuel cell stack" .....	23
Ilustración 14: Foto de un escúter, aquí Yamaha Zuma 125 .....	23
Ilustración 15: Esquema de la ubicación de los componentes del Suzuki Burgman modelo hidrógeno25	
Ilustración 16: Canister solo y con sistema de calentamiento .....	28
Ilustración 17: Infraestructura de distribución del hidrógeno .....	28
Ilustración 18: Ventas año 2011 .....	33
Ilustración 19: Ciclo de manejo, con velocidad (azul) y potencia (morado) en función del tiempo .....	37
Ilustración 20: Factor de compresibilidad Z en función de la presión (y de la temperatura) .....	46
Ilustración 21: precio/kWh, por 500000 unidades producidas/año .....	47
Ilustración 22: Plano del tanque 700 bares.....	59
Ilustración 23: Válvula OCV 700 y otras válvulas disponibles.....	60
Ilustración 24: Sistema de regulación Quantum.....	60
Ilustración 25: Ubicación del tanque y de la celda HFC H-1000 entre chasis y carrocería, y espacio para motor (rojo) y baterías (azul).....	62
Ilustración 26: Ubicación del tanque y de la celda HFC H-1000 entre chasis y carrocería, y espacio para las baterías (azul).....	62

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Densidad de energía másica de los combustibles.....	14
Tabla 2: Ciclo de manejo utilizado por el APFCT.....	26
Tabla 3: Comparación del impacto ambiental de los medios de producción de hidrógeno .....	29
Tabla 4: Ventas del primer semestre 2015 .....	31
Tabla 5: Ventas del año 2014 .....	30
Tabla 6: Ventas del año 2013 .....	30
Tabla 7: Ventas año 2012.....	33
Tabla 8: Tabla resumen de las ventas de escúter.....	34
Tabla 9: Valores de parámetros de interés .....	35
Tabla 10: Tecnologías de almacenamiento y relaciones de peso, temperaturas y energías de desorción .....	43
Tabla 11: Estado actual de varios criterios para almacenamiento en tanque sobre presión .....	44
Tabla 12: Estado actual de varios criterios para almacenamiento en componentes .....	45
Tabla 13: Current Standards Compliance for 25-(MegaPascal) MPa, 35-MPa, and 70-MPa Pressure Vessels.....	51
Tabla 14: Pressure Tests to Ensure Tank Manufacturing Quality .....	51
Tabla 15: Factores de compresibilidad y volúmenes de hidrógeno a varias presiones .....	54
Tabla 16: Tabla comparativa de las soluciones de almacenamiento (del mercado).....	56
Tabla 17: Tabla multi-criterios de selección del sistema de almacenamiento.....	57
Tabla 18: Tanques 700bares de marca Faber .....	58

## INTRODUCCIÓN

Este proyecto de investigación hace parte de un proyecto global, que tiene por propósito diseñar una solución viable para reducir los impactos negativos sobre la salud pública y el medio ambiente generados por las emisiones de gases contaminantes emitidos por las motocicletas, las cuales tienen una gran representatividad en el parque automotor colombiano (“RUNT 2012 Universidad Tecnológica de Pereira,” n.d.).

Para alcanzar este objetivo se propone realizar un desarrollo tecnológico basado en el diseño de la implementación de una celda de combustible de hidrógeno como planta motriz para una motocicleta tipo escúter del mercado colombiano. El proyecto se focaliza en el análisis de la implementación de la celda de combustible como solución a las problemáticas ambientales y económicas.

Dentro del proyecto global se realizará el diseño y/o selección de:

- Sistema de almacenamiento del hidrógeno.
- Celda de combustible.
- Motor eléctrico.
- Baterías.
- Sistemas de control.
- Modificación del escúter.
- Interface entre los componentes.
- Ensamble de los sistemas al chasis del escúter.

Sin embargo, el alcance del presente proyecto de diseño, el cual es parte del objetivo global, abarca el análisis de las condiciones de mercado del sector ciclomotor, así como el diseño de los subsistemas de almacenamiento, selección de las celdas de combustible para su posterior implementación.

Para tal fin se utilizan los recursos físicos del Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices (LPDA) de la Facultad de Ingeniería Mecánica, además de la asesoría y ayuda del personal de dicho laboratorio. La implementación del sistema de almacenamiento y de la celda de combustible también necesitan el acceso a un escúter (del modelo elegido en el estudio) para tomar medidas y luego hacer el diseño 3D. Este escúter se va a alquilar por un periodo determinado y un taller contratado va a desmontarlo para permitir la toma de medidas precisas.

Este trabajo se realiza en el marco del proyecto “Estudio de la implementación de una celda de combustible en una motocicleta tipo escúter”, con código 8-16-2, apoyado por la Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión de la UTP.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En el mundo actual, el desarrollo de una sociedad, o de un país, implica una necesidad de transporte individual para sus habitantes, por tener estos: ocupaciones, horarios y lugares de trabajo diferentes.

Cada uno elige el medio de transporte más adecuado de acuerdo a su necesidad, en función de su costo de compra, de mantenimiento y rendimiento de combustible. La motocicleta cumple con muchos aspectos positivos en cuanto a los niveles de costo y facilidad de manejo se refiere, pero su masificación con el tipo de motorización empleada actualmente, contribuye a los problemas de contaminación ambiental y salud pública asociados al uso de combustibles fósiles.

El artículo “The motorcycle Kuznets Curve” (Nishitaten, Burke, 2014), publicado en el Journal Transport Geography, indica que esta tendencia de escogencia de la motocicleta como medio de transporte prevalece particularmente en países en vía de desarrollo como aquellos de Latinoamérica, Asia o Africa. Para ilustrar este punto, el reporte menciona que la Federación Internacional de Carreteras, en 2012, estableció que las motocicletas conforman más de tres cuartos de la flota de vehículos en países como Burkina Faso, la República Central Africana, India, Indonesia, Laos, las Maldivas, Myanmar, y Vietnam (Nishitaten, Burke, 2014).

En Colombia, para el año 2012, existían matriculadas en el sistema de información RUNT (“RUNT 2012 Universidad Tecnologica de Pereira,” n.d.) alrededor de 4.500.000 motocicletas. Lo cual correspondía, en ese momento, al 50% del total de vehículos matriculados en el parque automotor colombiano.

Este número creciente de motocicletas conlleva un grave problema de emisión de gases. De hecho, los escúter de motores 2 tiempos emiten 100 a 1000 veces más gases contaminantes que los otros vehículos a motores 4T, incluyendo carros etc. (Berezow 2016). Los escúter de motores 4 tiempos emiten menos gases contaminantes y a efecto invernadero, pero su número creciente y la utilización de lubricantes nocivos en esos motores tampoco hacen de esos modelos la solución a la problemática ambiental.

En vista de la creciente crisis ambiental debida al uso de combustibles fósiles en los medios de transporte (debido al funcionamiento de los motores de combustión interna), hay un creciente interés a nivel mundial para invertir en la investigación y desarrollo de nuevos métodos de generación de potencia utilizando fuentes de energía limpias.

# **1. OBJETIVOS**

## **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Analizar la implementación de una celda de combustible en una motocicleta tipo escúter

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Realizar un estudio de las marcas y modelos de escúter vendidos en Colombia.
2. Seleccionar el escúter donde se implementará la celda de combustible
3. Analizar el ciclo de conducción ECE-15, para obtener la potencia y la velocidad media del escúter.
4. Seleccionar la celda de combustible.
5. Seleccionar el sistema de almacenamiento de hidrógeno para el escúter.
6. Ubicar los componentes seleccionados en el modelo 3D del escúter seleccionado.

## 2. MARCO TEORICO

### 2.1 HIDRÓGENO COMO FUENTE DE ENERGIA

El hidrógeno es el elemento el más sencillo que existe, un átomo de hidrógeno está formado por un protón y un electrón. También es el elemento el más abundante del universo, aunque no se encuentra en la Tierra como un gas puro sino mezclado con otros elementos (por ejemplo el agua que es una combinación de hidrógeno y oxígeno). Tiene una densidad energética muy alta de 120MJ/kg de hidrógeno puro, más alta que la mayoría de los combustibles comunes (Thomas 2000) :

Tabla 1: Densidad de energía másica de los combustibles

Combustible	Fracción de hidrógeno	Estado físico	Densidad energética (MJ/kg)
Hidrógeno	1	Gas	120
Metano	0,25	Gas	50 (43) <sup>2</sup>
Etano	0,2	Gas	47,5
Propano	0,18	Gas (liquido) <sup>1</sup>	46,4
Gasolina	0,16	Liquido	44,4
Etanol	0,13	Liquido	26,8
Metanol	0,12	Liquido	19,9

Fuente : (Thomas 2000)

Por esta y otras razones, el hidrógeno ha sido utilizado por la NASA desde 1970 para propulsar sus transbordadores espaciales en órbita (“Hydrogen Energy and Fuel Cell Technology” 2016). Los vehículos basados en celda de combustible utilizando el hidrógeno como fuente primaria de energía han sido desarrollados desde hace varios años, como se puede ver con la Honda FCX Clarity, certificada y utilizada desde 2002 en Los Angeles (“Honda Environmental Reports | Vehicle Report | Honda” 2016). Sin embargo, los vehículos realmente viables es decir con una buena autonomía, un costo accesible, etc. han hecho su aparición durante últimos dos años, con la Toyota Mirai (2015) y la Hyundai ix35 FCEV Tucson (2015). Esos dos modelos pasaron la etapa de prototipos y ya son comercializados en varios países.

Ilustración 1: Toyota Mirai



Fuente : (www.toyota.com)

Ilustración 2: Hyundai Tucson



Fuente : (www.hyundai.com)

Audi, BMW, Lexus y otros fabricantes también desarrollan vehículos a celda de combustible, pero siguen al estado de conceptos (“Hydrogen Cars Fuel Cell Vehicles and Infrastructure” 2016).

## 2.2 PRODUCCIÓN DEL HIDRÓGENO

Existen varios métodos para producir hidrógeno, como ya se mencionó, este no se encuentra naturalmente en forma de gas puro, pero es posible encontrarlo en muchos componentes orgánicos como los hidrocarburos. Se puede separar el hidrógeno de estos componentes utilizando el proceso de conversión/reforma de una mezcla de vapor y metano (“*steam-methane reforming*” en inglés). En este proceso, el metano reacciona con el vapor de agua a una presión de 3 a 25 bares en presencia de un catalizador para producir hidrógeno y dióxido de carbono (Ecuación 1), este proceso tiene la desventaja de producir gases de efecto invernadero. También se puede utilizar el proceso de electrólisis, que consiste en separar los componentes del agua (hidrógeno y oxígeno) aplicando un corriente eléctrica al agua. Este proceso es exactamente el proceso inverso que se produce en una celda de combustible. Es importante notar que la fuente de electricidad debe ser limpia para que el hidrógeno realmente produzca cero gases a efecto invernaderos (“Hydrogen Energy and Fuel Cell Technology” 2016). Existen más procesos para producir hidrógeno pero esos dos son los más utilizados actualmente.



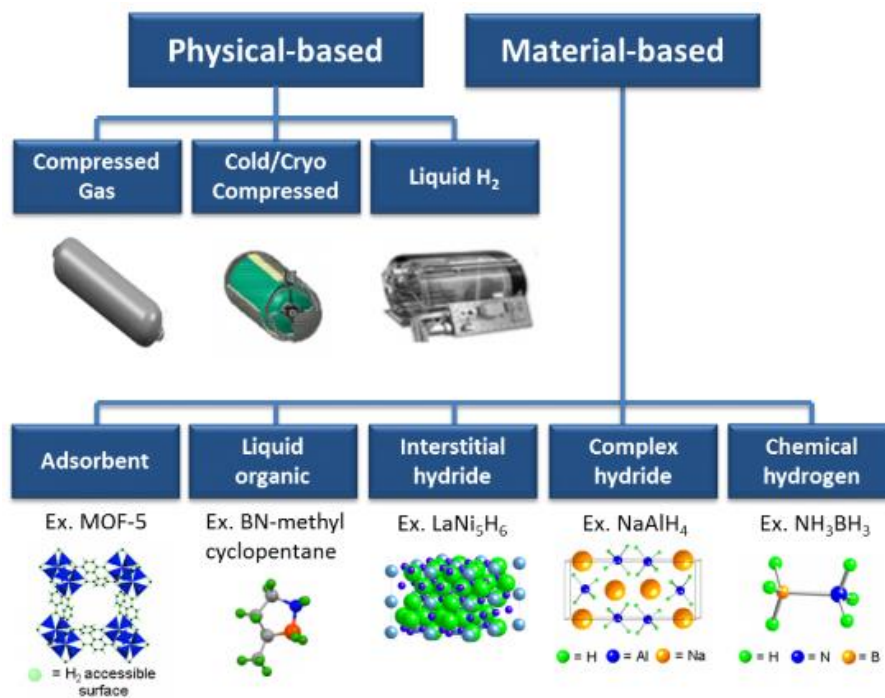
## 2.3 ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO

El hidrógeno, siendo un gas muy explosivo y volátil se dispersa 3,8 veces más rápidamente que el gas natural (The Pollet PEM Fuel Cell Group 2014), por tal razón, su almacenamiento implica la solución de problemas importantes. Varias tecnologías existen en este sentido, ya sea comprimirlo a 350 o 700

bares, enfriarlo (-258,2°C), o bien fijarlo en hidruros solidos o “nanotubos” (Pourcelly 2013). Cada tecnología ha tenido avances en su normativa que especifican las pruebas que se deben hacer sobre los productos durante su fabricación, y también define las reglas de “buen uso” del producto. Una norma aplicada a la tecnología de tanque sobre presión es la ISO TC 58: “Hidrógeno comprimido en tanques: 10 estándares muy específicos sobre tanques, válvulas de regulación de presión”, y una norma aplicada al almacenamiento en hidruros metálicos es la ISO 16111:2008: “Hidrógeno almacenado en hidruros metálicos”. Los fabricantes de vehículos tienen un interés creciente por la tecnología del hidrógeno, y esta demanda impulsa la investigación sobre seguridad en el almacenamiento de hidrógeno a bajo costo. Con base con el artículo (Energy 2011) se estudiarán tres tipos de almacenamiento de hidrógeno:

- En tanque, comprimiendo hidrógeno
- En tanque, con hidrógeno criogenizado
- En materiales avanzados, sobre forma sólida, que sea hidruro metálicos o nanotubos, o chimeca

Ilustración 3: Métodos de almacenamiento de hidrógeno



Fuente : (“Hydrogen Storage | Department of Energy” 2016)

Se iniciará por un corto estado del arte de esas tecnologías, y más tarde en este documento se hará una comparación y selección del sistema considerando el uso final.

### 2.3.1 Almacenamiento físico

#### 2.3.1.1 Hidrógeno comprimido

El hidrógeno puede ser almacenado en tanques a presión. Existe una clasificación de los tanques según la presión de almacenamiento que pueden soportar.



Para la aplicación del presente proyecto, el hidrógeno debe ser comprimido a 300, 350 o 700 bares, condicionando el volumen futuro del tanque. Los tanques que se aplican son de tipo III y IV. Esos tipos tienen 3 partes (Moysan 2005) : la primera, el “*liner*” (recubrimiento interno, en inglés), esta impermeable para evitar las fugas de hidrógeno. La segunda está hecha de fibra, de vidrio o carbono para reforzar la estructura, y la última sirve para juntar las partes (Moysan 2005):

- Tipo III: tanque con *liner* en aluminio o acero, reforzado con fibra de vidrio o, ahora, fibra de carbono
- Tipo IV: tanque con *liner* en polímero hecho por rotomoldeo, reforzado con fibra de vidrio o, ahora, fibra de carbono

Los tipos I y II son enteramente metálicos y son 25 a 75% más pesado (para el mismo volumen) que los de tipo III y IV. De la misma manera, el *liner* plástico del tipo IV alivia de 4% el peso final del tanque en comparación con el tipo IV (Moysan 2005).

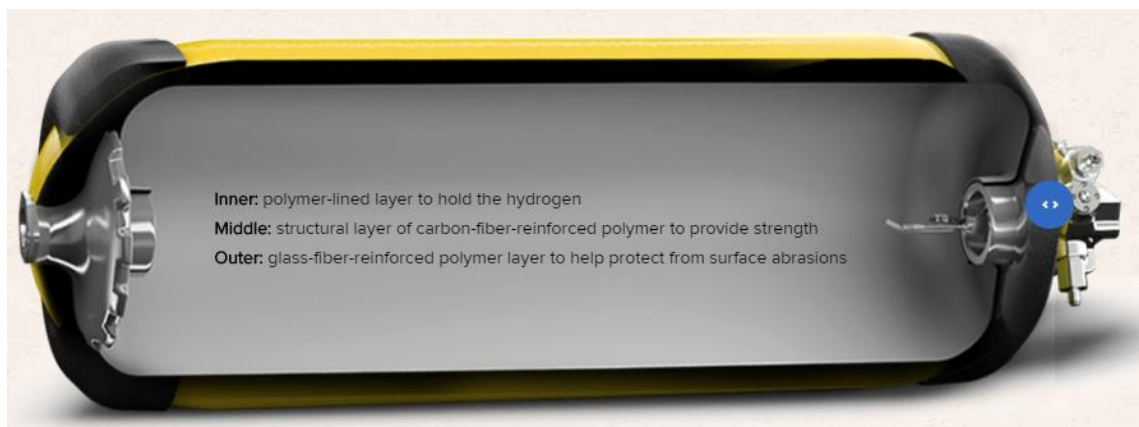
Esas altas presiones de uso requieren que los tanques sean muy resistentes y que tengan una concepción particular y bastante compleja (Francescato et al. 2012). Los tanques denominados “*Pressure Vessel*” en inglés, deben incluir un sistema de regulación de presión.

Las investigaciones actuales, llevadas por fabricantes de automóviles, en Estados Unidos se concentran en los tanques 700 bares en fibra de carbono y trabajan con *Ford*, *Hexagon* y *PNNL* para reducir el precio de producción de este material, el cual es obviamente más costoso que el acero (Long et al. 2015). También se investigan y comercializan tanques en fibra de vidrio o fibra de kevlar, pero es menos común.

La tecnología del hidrógeno comprimido es la más desarrollada en el mundo y por su masificación la más barata, y de ésta se encuentran aplicaciones en varios productos comercializados o en vía de comercialización:

- Toyota Mirai (tanque almacenando hidrógeno a 700 bares) (“Toyota Mirai – The Turning Point” 2016)

Ilustración 4: Tanque de la Toyota Mirai



Fuente : ([www.toyota.com](http://www.toyota.com))

- Suzuki Burgman Hydrogen : Tanque a 700 bares almacenando 0,5kg de hidrógeno  
(*Compendium of Hydrogen Energy: Hydrogen Use, Safety and the Hydrogen Economy* 2015)

- Hyundai Tucson : Tanque de 140L a 10000psi (700bares), almacenando 5,63kg de hidrógeno  
("Tucson Fuel Cell | A Hydrogen Fuel Cell Car | HyundaiUSA" 2016)

Esta tecnología se encuentra sujeta a muchas normas de seguridad, el almacenamiento se logra a presiones muy altas, produciendo un incremento del riesgo en caso de accidente, pues el factor de alta presión se suma al riesgo propio debido a la flamabilidad del material.

### 2.3.1.2 Hidrógeno líquido

Para volverse líquido, se debe alcanzar una temperatura extremadamente baja de  $-252.8^{\circ}\text{C}$  a presión ambiente, en tanques muy bien aislados. Se puede facilitar este proceso usando una temperatura más alta, mediante una tecnología híbrida que es la **crio-compresión** (Energy 2011), es decir comprimir el hidrógeno a alta presión y bajar la temperatura hasta  $-120/-196^{\circ}\text{C}$ , permitiendo la utilización de tanques menos voluminosos y costosos.

Este medio de almacenamiento se hace sin embargo más peligroso que los otros y es actualmente reservado para aplicación aeroespacial.

### 2.3.2 Almacenamiento en materiales avanzados

El desarrollo de esta tecnología es más reciente que las previas, aunque ya se encuentra utilizada como se evidencia en el artículo (Bruce, 1999).

#### 2.3.2.1 Almacenamiento físico en materiales

El hidrógeno puede ser almacenado con materiales tales como los **hidruros metálicos o iónicos**, o también materiales porosos como los **MOFs** (*Metal-Organic frameworks*, que son un tipo de materiales sintéticos porosos que almacenen el hidrógeno al nivel molecular), en esos procesos el hidrógeno llena los intersticios de la estructura.

Existen dos maneras distintas de almacenamiento en sólidos (Energy 2011):

Sobre la superficie del sólido, proceso llamado **fisisorción**, o también **adsorción física** (Hirscher and Borgschulte 2009): el hidrógeno se aferra a la superficie sobre forma de molécula ( $\text{H}_2$ ) o de átomo (H). Se necesitan materiales porosos con grandes superficies específicas, por ejemplo los *MOFs*, y las investigaciones esperan lograrlo con nanotecnologías, como nanotubos de carbono.

*Ilustración 5: Almacenamiento a la superficie*



Fuente : (Energy 2011)

**Nota:** El artículo (Long et al. 2015) trata de los procesos de almacenamiento por adsorción “HexCell” and “MATP”, desarrollados por el HSECOE: *Hydrogen Storage Engineering Center of Excellence*. En esos procesos el hidrógeno es almacenado utilizando el MOF-5 (*Metal-Organic Frameworks*) que es formado del componente  $Zn_4O(BDC)_3$ , (BDC : benzenedicarboxylate) (Tim, et al., 2005).

El artículo (Pourcelly 2013) habla de un proceso desarrollado por la empresa “McPhy” (“McPhy - La Solution McPhy” 2016), utilizando el hidruro iónico  $MgH_2$ , que presenta muchas ventajas según sus investigaciones tales como reversibilidad total del almacenamiento a presión de 10bares o 2bares según que sea adsorción/desorción, sin necesidad de compresión suplementaria.

*Ilustración 6: Disco de hidruro  $MgH_2$ , empresa McPhy*

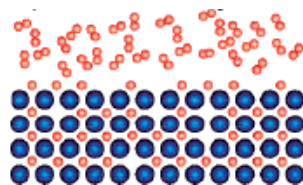


*Fuente :* (“McPhy - La Solution McPhy”)

A dentro del sólido (de manera intersticial), se llama por **absorción**, las moléculas de hidrógeno se separan en átomos de hidrógeno (H) que van a integrarse a dentro de la estructura (“lattice framework”) del sólido. Los materiales empleados son los hidruros, “*Metal Hydrides*” en inglés. Esos hidruros pueden ser iónicos, covalentes o metálicos (Hirscher and Borgschulte 2009).

De esta manera se puede almacenar en un bajo volumen más hidrógeno que con la tecnología previa, a condiciones ambientales. Los hidruros pueden ser  $Mg_2$ ,  $FeH_6$ ,  $LaNi_5$ ,  $ZrV_2$ ,  $Mg_2N$ ... cada uno teniendo sus propias temperaturas y presiones de equilibrio necesarias al almacenamiento de hidrógeno.

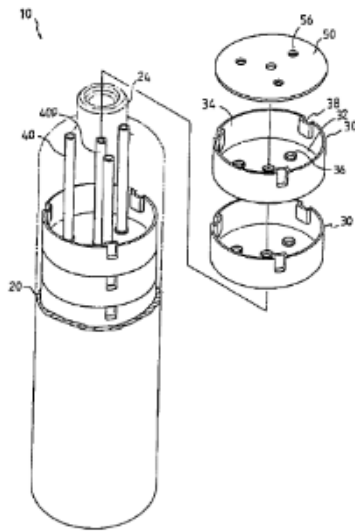
*Ilustración 7: Almacenamiento a dentro de la estructura (intersticial)*



*Fuente :* (Energy 2011)

**Nota:** En el artículo (Hwang 2012), que trata de la implementación de celda de combustible en un escúter, los ingenieros almacenan hidrógeno mediante el hidruro metálico  $LaNi_5$  ( $AB_5$ ) en forma de polvo, en un *canister* patentado (Doyle et al. 2012).

Ilustración 8: « Metal hydride storage canister »



Fuente : (Doyle et al. 2012)

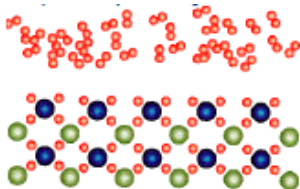
La patente da una muy buena idea de la manera de almacenar hidrógeno con hidruros metálicos, y los parámetros de diseño que hay que tomar en cuenta (por ejemplo: expansión de 5 a 20% del hidruro cuando está cargado en hidrógeno, evacuación y absorción necesaria de calor según el proceso de carga o descarga, necesidad de un tubo poroso para guiar el hidrógeno liberado a la descarga...).

**Nota:** La aleación que contiene el hidrógeno (o sea el hidruro metálico) necesita recibir calor para suministrar hidrógeno a flujo constante, la reacción de descarga siendo endotérmica. Eso entrena consideraciones de diseño por nada sencillas y varias experiencias para lograr a un flujo constante.

### 2.3.3 Almacenamiento químico

El hidrógeno puede ser almacenado de manera química, es decir que el hidrógeno es ligado a dentro de las estructuras moleculares de componentes químicos mediante una reacción química. Los hidruros complejos son, por ejemplo,  $\text{LiBH}_4$ ,  $\text{NaBH}_4$ ,  $\text{LiAlH}_4$ ... (Orimo et al. 2007)

Ilustración 10: Hidruro complejo



Fuente : (Energy 2011)

Ilustración 9: Hidruro químico



Fuente : (Energy 2011)

**Nota:** Los únicos artículos que se pueden encontrar en bases de datos sobre este tipo de almacenamiento son muy teóricos y se puede concluir que la tecnología aún no está lista para la comercialización, así que no será más estudiada en este documento.

## 2.4 DISTRIBUCIÓN DEL HIDRÓGENO

Los principales vehículos funcionado actualmente con hidrógeno (Toyota Mirai, Hyundai Tucson FCEV, Suzuki Burgman, y hasta los conceptos como el GM Hydrogen 3, Audi Quattron (“Hydrogen Cars Fuel Cell Vehicles and Infrastructure” 2016)) utilizan la tecnología de almacenamiento por compresión. Para llenar esos tanques, se necesitan instalaciones especiales, es decir estaciones de carga a alta presión, muy costosas. Los constructores de vehículos a celda de combustible se encargan generalmente de desarrollar una red de estaciones en los países donde venden sus vehículos (ahora principalmente en Japón, Alemania y Estados Unidos), el problema es muy sencillo: sin estación de carga, no hay posibilidad de utilizar un vehículo a celda de combustible. Sin embargo se pueden ver empresas del sector petróleo que se interesan en este mercado y desarrollan una red de “*hydrogen filling station*”, como por ejemplo SHELL en Alemania, con Total, Air Liquide y otras empresas (“Shell to Install Nationwide Network of Hydrogen Vehicle Fuelling Pumps in Germany | Shell Global” 2016), pero también en Estados Unidos, como se puede ver en la Ilustración 11.

*Ilustración 11: Estación de hidrógeno Shell en Newport Beach, California*

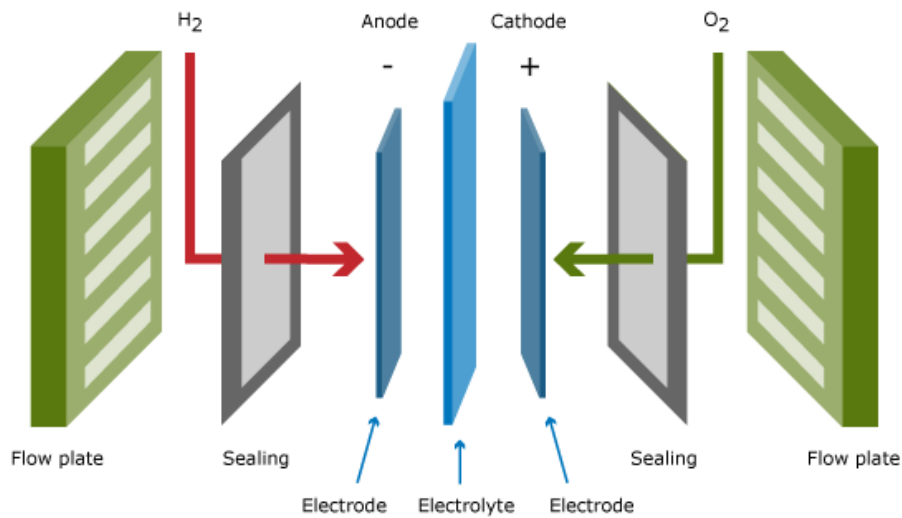


*Fuente : (www.hydrogencarnow.com)*

## 2.5 CELDAS DE COMBUSTIBLE

Una celda de combustible es un dispositivo que convierte reactivos electroquímicamente. El hidrógeno y el oxígeno son convertidos en electricidad, calor y agua. Una celda de combustible está compuesta por dos electrodos, un ánodo y un cátodo separado por un medio iónico conductor llamado electrolito. La figura 1 muestra el principio de funcionamiento básico de la celda.

Ilustración 12: Principio de funcionamiento de la celda de combustible



Fuente : (“Fuel Cell Setup” 2016)

El combustible hidrógeno llega por el lado del ánodo, y el electrolito deja pasar solamente los iones apropiados entre el ánodo y el cátodo. Si el electrolito dejara pasar los electrones libres o gases, se daría lugar a una reacción de combustible y oxidante sin producir corriente eléctrica, reduciendo la eficiencia de la celda de combustible. La corriente producida por el desplazamiento de los electrones pasa por los electrodos. Las celdas más comunes son de membrana de electrolito polimérico (PEM). En el ánodo del PEM de la celda de combustible, el hidrógeno se divide en protones y electrones en la capa del catalizador. Los electrones pasan a través de esta capa y son recogidos por un colector de corriente; y después pasan a través de un circuito eléctrico externo para conducir una impedancia eléctrica. Por otro lado, los protones migran a través del electrolito y se mezclan con el oxígeno en la capa del catalizador del cátodo para formar agua. Generalmente, el platino es usado como un material catalizador, pero existen múltiples opciones disponibles, siendo este un material muy efectivo pero a su vez muy costoso. (Moseley 2001).

Basado en el tipo de electrolito, existen seis tipos principales de celdas de combustible: celda de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC), celda de combustible de óxido sólido (SOFC), celdas de combustible de ácido fosfórico (PAFC), celdas de combustible alcalinas (AFC), celdas de combustible de carbonato fundido (MCFC), y celdas de combustible alcalino. (“Fuel Cells 2000 - Types Of Fuel Cells” 2016).

Con respecto al mercado actual de las celdas de combustible, se puede afirmar que modelo más usado y comercializado **celda de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC)**.

Las reacciones que toman lugar en la celda son:

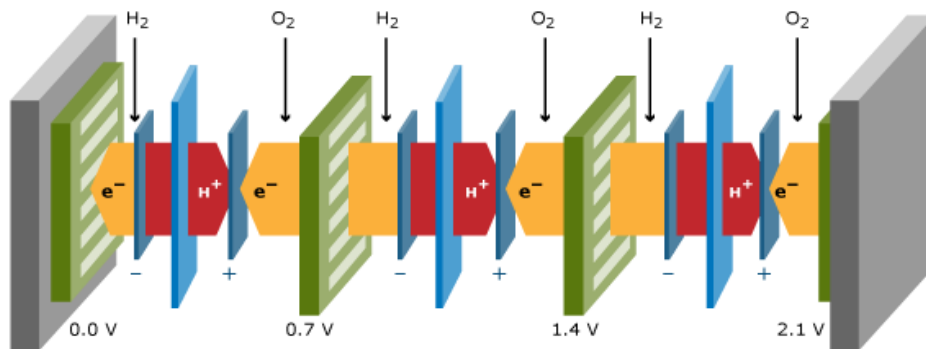
Reacción en el ánodo:  $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$  Ecuación 2

Reacción en el cátodo:  $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$  Ecuación 3

Reacción general:  $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$  Ecuación 4

Nota: El voltaje máximo de salida de la celda unitaria varía de 0,6 a 0,7 V y este voltaje no es viable o práctico para la mayoría de aplicaciones, es común entonces juntar celdas, y el grupo creado se denomina “fuel cell stack” en inglés. Las celdas de combustible que sirven son de este tipo.

Ilustración 13: "Fuel cell stack"



Fuente : (“Fuel Cell Setup” 2016)

## 2.6 MOTOCICLETA TIPO ESCÚTER

Un escúter se define como un vehículo abierto liviano que transporta una o dos personas, de dos ruedas en el cual el conductor está sentado sobre el motor cerrado, con ambas piernas juntas y los pies apoyados en una plataforma que hace parte del vehículo. Este tipo de vehículo funciona con un motor de combustión interna, que contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero, dado que su bajo costo y su popularidad en los países en vía de desarrollo económico no permiten incluir un sistema de filtración eficaz de los gases producidos.

Ilustración 14: Foto de un escúter, aquí Yamaha Zuma 125



Fuente: <http://bestmotorcycles-pics.blogspot.com>

## **2.7 ALMACENAMIENTO SECUNDARIO DE ENERGÍA**

Además de un sistema de almacenamiento de hidrógeno, se necesita un sistema secundario de almacenamiento de energía, que entrega electricidad al motor eléctrico cuando se necesita más potencia eléctrica que lo que la celda puede entregar sin dañarse. Puede ser un conjunto de baterías o supercapacitores, cada uno teniendo sus ventajas y desventajas, por eso se tomará como base un estudio muy completo llevado a cabo por una universidad de Tailandia, la *Chulalongkorn University* (Sripakagorn and Limwuthigrajirat 2009).



### 3. ANALISIS DEL MERCADO DE LOS ESCÚTER A CELDA DE COMBUSTIBLE Y REVISION BIBLIOGRAFICA

Al día de hoy, son pocos los escúter comercializados que operan con celda de combustible, principalmente por falta de estaciones de recarga, pero existen varios prototipos, unos más adelantados que otros, y en particular dos escúter ya listos para ser distribuidos: el Suzuki Burgman FC y el APFCT ZES IV.6.

#### 3.1 SUZUKI BURGMAN FC

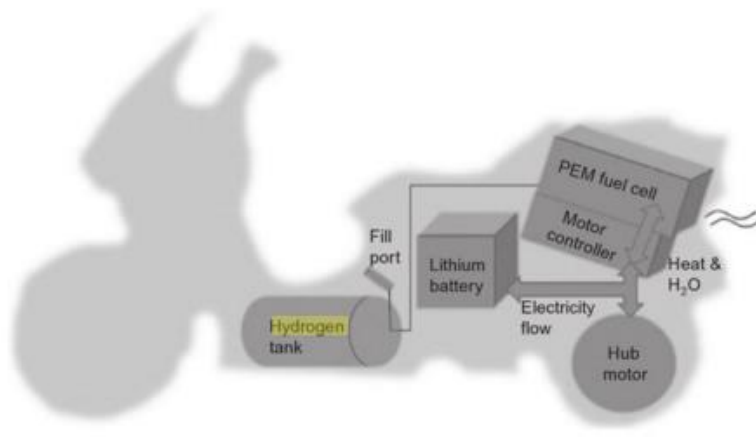
En 2011, Suzuki es el primer fabricante de motocicleta en recibir el “European Whole Vehicle Type Approval” para empezar la fabricación de su modelo de escúter híbrido (celda de combustible y baterías), sobre la base de un escúter existente Suzuki Burgman 125 (*Compendium of Hydrogen Energy: Hydrogen Use, Safety and the Hydrogen Economy* 2015).

Este escúter pesa 170kg (10 kilogramos más que el modelo a motor de combustión interna 125cm<sup>3</sup>) y lleva los siguientes componentes de interés:

- Celda de combustible de potencia máxima 4kW (marca Intelligent Energy), que puede suministrar continuamente 2,5kW (potencia a rendimiento máximo)
- Grupo de baterías de ion de litio que puede suministrar 5,8kW
- Tanque a alta presión (700 bares) almacenando aproximadamente 0,5kg de hidrógeno

Su autonomía es de 354km, dada por una velocidad media de 48,3km/h.

*Ilustración 15: Esquema de la ubicación de los componentes del Suzuki Burgman modelo hidrógeno*



*Fuente: (Compendium of Hydrogen Energy: Hydrogen Use, Safety and the Hydrogen Economy 2015)*

#### 3.2 ASIA PACIFIC FUEL CELL TECHNOLOGIES (APFCT) ZES IV.6

El escúter ZES tiene una historia bastante larga con varios prototipos seguidos, y al día de hoy, se encuentra la versión ZES IV.6 (“Asia Pacific Fuel Cell Technologies, Ltd. --Fuel Cell Systems and Fuel Cell Powered Vehicles” 2016).

Una diferencia mayor entre el escúter de APFCT y el de Suzuki, es que el ZES utiliza tanques (canisters) a baja presión, tanques que no necesitan infraestructuras especializadas y costosas para ser llenados. En efecto, APFCT ha desarrollado con la empresa Acta SpA (Italia) una mini-estación permitiendo con la energía del sol la reacción de electrólisis que genera hidrógeno. (“Hydrogen in Transport: Scooting around the Islands – CleanTech Magazine | Acta S.p.a.” 2016). Otra solución para seguir manejando el escúter, es intercambiar los canisters usados con unos nuevos, disponibles (idealmente) en tiendas en todos los países.

El escúter ZES tuvo que pasar varias pruebas de uso en situaciones reales, es decir manejo en la ciudad, en calles a mayores velocidades, en montañas, etc. con el objetivo de totalizar 120000km. Este objetivo fue alcanzado en 2012, y con este logro obtuvo las autorizaciones para su comercialización dadas por el gobierno de Taiwán.

El escúter pesa 105kg y lleva los siguientes componentes de interés:

- Celda de combustible de potencia máxima 2,1kW y que puede suministrar continuamente 1,3kW (potencia a rendimiento máximo). Consumo de hidrógeno de la celda: 1.2 g de hidrógeno por kilómetro, a 30km/h.
- Grupo de baterías ion de litio: No
- Dos tanque de hidruros metálicos

Su autonomía es de 80km a velocidad constante de 30km/h, o 50km con el ciclo de manejo siguiente:

Tabla 2: Ciclo de manejo utilizado por el APFCT

Autonomía (2)	<p>50km en ciudad*</p> <p>* Ciclo de prueba simulando el manejo en condiciones urbanas</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Inactivo</li> <li>2. Aceleración hasta velocidad max. durante xxx segundos</li> <li>3. Desaceleración hasta parar, luego inactivo durante 5segundos.</li> <li>4. Repetir etapas hasta 4.</li> </ol>
Tiempo de recarga en combustible	<30 segundos

Fuente: (“Asia Pacific Fuel Cell Technologies, Ltd. --Fuel Cell Systems and Fuel Cell Powered Vehicles” 2016)

Se dice también que el escúter puede subir pendientes de 10 grados a una velocidad de 10km/h.

### 3.3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Además de los previos escúter presentados de gran producción, diseñados por fabricantes históricos, se encuentran en las bases de datos muchos documentos científicos que tratan de prototipos diseñados a

nivel universitario de escúter basados en celda de combustible, proyectos que tienen como objetivo demostrar la viabilidad y el estado actual de esta tecnología.

**“Experimental assessment of fuel cell/supercapacitor hybrid system for escúter”** (Sripakagorn and Limwuthigraijirat 2009) trata de la pruebas realizadas sobre un sistema de celda de combustible (hidrógeno) destinado a ser montado en un escúter híbrido, es decir llevando celda de combustible y baterías o supercapacitores.

Este sistema es formado por una celda de combustible de 1,2kW tipo PEM, un almacenamiento de hidrógeno, un almacenamiento secundario de energía y una carga “virtual” que representa el motor y que se puede comandar por computador. Las pruebas se hacen para determinar si el mejor medio de almacenamiento secundario de electricidad es un rack de baterías o de supercapacitores, y cómo comandar la celda de combustible de manera óptima (existen dos maneras, la primera se llama “load-leveled strategy” y la segunda “load-following strategy”), para esto, se mide el consumo de hidrógeno y la habilidad de la celda, asociada a las baterías o supercapacitores, a seguir la potencia requerida por el motor (utilizando ciclos de manejos ECE-15, FTP-75 modificado y NYCC).

El artículo describe la selección de la celda de hidrógeno y su integración en el sistema: suministro en hidrógeno y en aire de exterior, con un compresor que toma el aire ambiente y lo suministra de manera proporcional al corriente que suministra la celda, ya también la purga de hidrógeno (menos de 1% del volumen). El sistema de almacenamiento secundario de energía se diseña de manera tal que pueda suministrar la energía necesaria durante los picos de potencia requerida.

Se integra en el sistema un convertidor DC/DC que permite a las varias fuentes de energía funcionar juntas, haciendo corresponder los voltajes de cada una, una vez conectadas en paralelo.

Al final del estudio se concluye que la estrategia de comanda de la celda “load-leveled” es preferible porque permite una carga más regular de las baterías, con la otra estrategia la esperanza de vida de las baterías puede caer. Además, los supercapacitores tienen ventajas sobre las baterías en varios puntos: costo, volumen y peso, densidad de potencia, voltaje del bus y flexibilidad en términos de capacidad, aunque la tendencia del mercado hace que el costo de las baterías decrezca y que su tecnología se mejore.

**“Review on development and demonstration of hydrogen fuel cell escúter”** (Hwang 2012) presenta el desarrollo y las pruebas de los escúter a celda de combustible en ciudades como Taiwán, Taipen y Tainan, con varios climas y condiciones de circulación. Los escúter de celda de combustible muestran una emisión de gases de efecto invernadero mucho más bajo que los de motores a combustión interna. El estudio muestra las tecnologías utilizadas, el comportamiento del escúter (ventajas y desventajas) así como la contribución a la reducción de gases a efecto invernadero. El artículo detalla la configuración del sistema, es decir los varios voltajes y corrientes dentro de los componentes, las potencias de cada uno y el calor liberado durante la utilización (además da soluciones para utilizar este calor por la descarga del hidrógeno contenido en el tanque).

Ilustración 16: Canister solo y con sistema de calentamiento



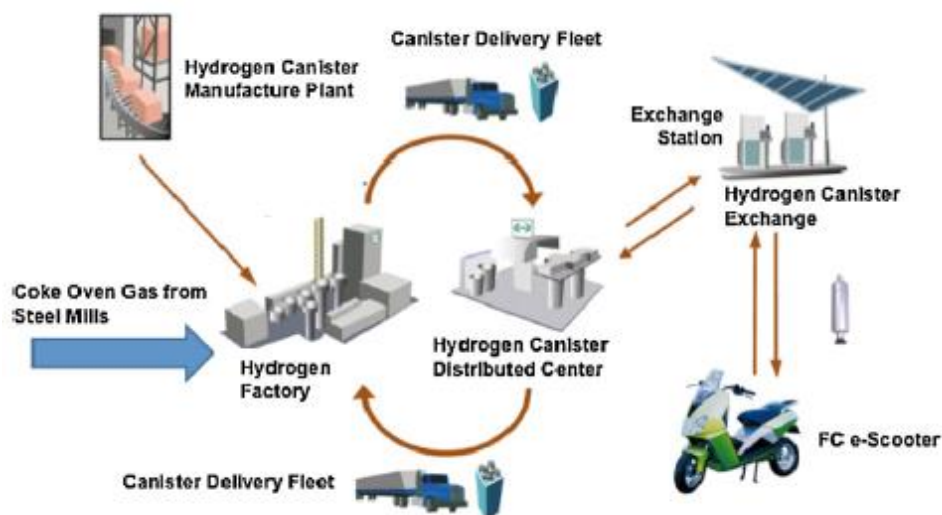
Fuente: (Hwang 2012)

También indica las ventajas de cada medio de almacenamiento de hidrógeno, y elige la solución de almacenamiento en hidruros metálicos.

Al contrario de los otros artículos estudiados, aquí se utiliza una caja de dos velocidades que permite aumentar el par torsor a baja velocidad sin sacrificar la velocidad máxima, cuando un par torsor menor se necesita.

El documento propone una forma de solucionar el problema de distribución de hidrógeno para en los escúter, este es el punto de mayor importancia para el desarrollo global de los escúter híbridos, de hecho, si no hay una infraestructura correcta que suministre el combustible, los clientes potenciales no van a comprar estos escúter, de la misma manera, si no hay una flota de escúter a celda de combustible, los fabricantes no van a querer hacer una inversión importante en la infraestructura.

Ilustración 17: Infraestructura de distribución del hidrógeno



Fuente: (Hwang 2012)

“**Hydrogen fuel cell hybrid escúter (HFCHS) with plug-in**” (Shang and Pollet 2010) presenta un escúter híbrido a celda de combustible (hidrógeno) asociado a un sistema secundario de almacenamiento

de energía (rack de baterías), desarrollado en 2010 por el Grupo de investigación en celda de combustible de la Universidad de Birmingham, Inglaterra.

El documento da una buena idea de la manera de obtener la potencia requerida por el escúter, utilizando una modelización matemática y luego se seleccionan la celda de combustible y el sistema de baterías que permite tener esta potencia y una autonomía correcta.

El artículo concluye con una comparación de los impactos ambientales de los escúter de combustión interna, de los escúter a baterías eléctricas y los escúter híbridos (celda de combustible y baterías), y adelanta que la ventaja del hidrógeno sobre las baterías depende del medio de producción de este hidrógeno.

Tabla 3: Comparación del impacto ambiental de los medios de producción de hidrógeno

Método de producción	g CO <sub>2</sub> /kgH <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> Consumido/g	Total CO <sub>2</sub> producido/g	Rango/km	Emisión total de carbono gCO <sub>2</sub> /km
Metano reformado con vapor (SMR)	11374,9	0,054	614,2	15	40,95
Energía solar	3804	0,054	205,42	15	13,69
Energía eólica	2604	0,054	140,62	15	9,37
Energía hidráulica	3324	0,054	179,5	15	11,97
Biomasa	4284	0,054	231,34	15	15,42

Fuente: (Shang and Pollet 2010)

“**Conceptual design and modeling of a fuel cell escúter for urban Asia**” (Lin 2000) (Lin, 2000), tiene la particularidad de comparar varias configuraciones de escúter a celda de combustible. Primeramente se dedica al estudio de un escúter que solamente tiene una celda de combustible de hidrógeno, luego estudia un escúter con celda de combustible de medio tamaño asociada a baterías y al final un escúter con celda de combustible más pequeña y baterías.

El objetivo del estudio es determinar cuál de esas 3 configuraciones logra a suministrar la potencia requerida durante el mayor tiempo, al mejor costo.

Como el tercer artículo, utiliza un modelo matemático para obtener la ecuación de la potencia requerida por el escúter, y utiliza esta ecuación con ciclo de manejo para conocer la potencia media y máxima del escúter. Del anterior análisis se encuentra que se necesita una potencia máxima de 5,6kW.

Se dimensiona la celda de combustible principal (para el caso de una celda sin baterías anexas) a 5,9kW, para alcanzar los 5,6kW más 300W de pérdidas eléctricas parasíticas. Se selecciona la celda con número de celdas y área activa por celda, y se halla el voltaje y corriente medios. En paralelo se estudian dos opciones de hibridación por el escúter: una versión con celda de combustible de 3,2kW y baterías que logra a suministrar la potencia con buena autonomía, y una versión más pequeña con celda de 1,1kW y baterías.

Se diseñan también los sistemas auxiliares (ventiladores etc.) en función del calor a disipar y del consumo en aire de la celda de combustible.

Se concluye que al periodo del estudio (1999), el modelo con celda de combustible de 1,1kW es el más adecuado con las necesidades del mercado, tomando en cuenta el costo de material, el peso total del sistema y el consumo de hidrógeno.

Actualmente (2016), la solución de elegir una pequeña celda de combustible que va a generar una potencia baja, pero a mejor eficiencia, sigue siendo el sistema preferible por consideraciones de costo y tecnología empleada.

## 4. ANÁLISIS DEL MERCADO COLOMBIANO Y SELECCIÓN DEL ESCÚTER

Este análisis tiene por objetivo encontrar las motocicletas tipo escúter de mayor presencia en el mercado colombiano, eso con el fin de selección del modelo más adecuado para la implementación de una celda de combustible. Se necesita un modelo “popular” del mercado colombiano para una posible implementación amplia del sistema de celda de combustible.

### 4.1 PRIMER SEMESTRE DEL AÑO 2015

Para empezar, la revista Publimotos (“PubliMotos | Revista de Motos - Inicio” 2016), arroja el histórico de producción y ventas en el primer semestre de 2015 (“Producción Y Venta de Motocicletas En Colombia Primer Semestre de 2015 (PIN)” 2016). El sitio indica las mejores ventas del semestre y las marcas líderes en el mercado.

Los resultados son generales para las motocicletas, por lo cual fue necesario clasificar y filtrar los modelos escúter de la lista de ventas:

*Tabla 4: Ventas del primer semestre 2015*

<b>Semestre 1 2015</b>	<b>Número de ventas</b>
Yamaha YW125X	19269
Suzuki FW110 D	3083
Suzuki FW110 SC	4120
Suzuki FD125	4234
Yamaha T115	6582
Yamaha YW125	3600
AUTECO Unik	6287
AUTECO Fly	5207
AUTECO Agility	5428
AUTECO Agility Digital	6459

*Fuente:* (“Producción Y Venta de Motocicletas En Colombia Primer Semestre de 2015 (PIN)” 2016)

### 4.2 AÑO 2014, 2013 Y 2012

En la página “Publimotos.com” se encuentran los datos de venta en Colombia para esos años, directamente en forma de tablas:

Tabla 5: Ventas año 2014

MARCA	UNIDADES VENDIDAS
Yamaha YW125X (BWS)	36466
Kymco AGILITY 125	16031
Yamaha YW125 (BWS)	11954
Kymco FLY 125	10296
AK 125 SC – DYNAMIC	8958
Kymco AGILITY Digital	4735
AK 150 AD15W – JET5	3794
Honda Elite +	1745
Yamaha FINO	694
Honda ELITE 125	602
Kymco Track	458
Honda Click 125	361
Kymco Fly 150	163
AK 125 AD12W – JET4	99
Kymco LIKE 125	81
Ayco AY125T-6	15
Kymco AGILITY 150	11
<b>TOTALES</b>	<b>96,463</b>

Fuente: (“PubliMotos | Revista de Motos - Inicio” 2016)

Tabla 6: Ventas año 2013

MARCA	UNIDADES VENDIDAS
Yamaha YW125 (BWS)	22789
Kymco AGILITY 125	22248
Yamaha YW125X (BWS)	18238
Kymco FLY 125	11447
AK 125 SC – DYNAMIC	6806
Honda ELITE 125	2220
AK 125 AD12W – JET4-R	2131
AK 150 AD15W – JET5	816
Kymco AGILITY 150	297
AK 125 AD12W – JET4	123
Kymco LIKE 125	117
Ayco AY125T-6	51
Yamaha FINO	11
<b>TOTALES</b>	<b>87294</b>

Fuente: (“PubliMotos | Revista de Motos - Inicio” 2016)



Tabla 7: Ventas año 2012

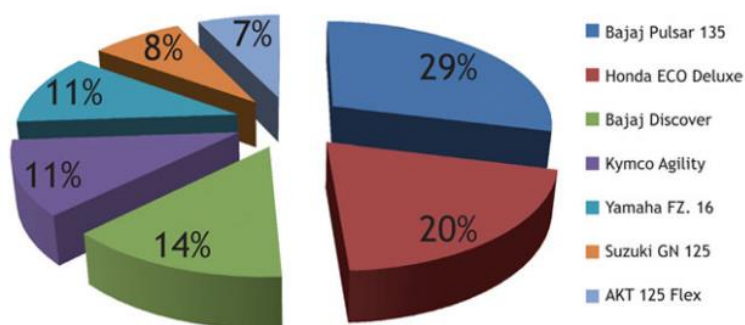
Posición en ventas	Línea	Número de ventas
1	AUTECOBoxer	56232
2	AUTECO Pulsar	35751
3	HONDA Eco Deluxe	28680
4	Yamaha BWS 125	28673
5	Kymco Agility	28481
6	Honda CB 110	22411

Fuente: (“PubliMotos | Revista de Motos - Inicio” 2016)

### 4.3 AÑO 2011

Publimotos solo arroja porcentajes para este año pero es posible con la cifra total conocer el número de ventas. El único escúter que sobresale es el Kymco Agility, con 11% de ventas es decir 16934 unidades vendidas.

Ilustración 18: Ventas año 2011



Fuente:(“PubliMotos | Revista de Motos - Inicio” 2016)

### 4.4 HISTÓRICO DE LAS VENTAS DESDE 1977 HASTA 2010

Se buscó otra fuente de información y se encontró (en el sitio Publimotos.com) el histórico de las ventas de motocicletas desde 1977 hasta 2010 (“PRODUCCION DE MOTOCICLETAS POR ENSAMBLADORA Y MODELOS 1977-2010” 2016). Este documento detalla el número de ventas de cada modelo por cada año.

Sin embargo este documento también trata de todos los tipos de motocicletas, es decir escúter y también motocicletas con caja de velocidades, por lo cual se hizo una filtración de los modelos que son de interés para el proyecto. (Ver Anexo 1).

#### 4.5 CONCLUSIÓN DE LOS OBJETIVOS 1 Y 2

Utilizando el documento previo (1977/2010), se seleccionan las líneas más vendidas por cada marca sobre el periodo total, tomando también en cuenta las producciones de esos modelos en los años posteriores (2013/2014/2015), puntos previos de este informe. Las tablas de resultados completas se encuentran disponibles en el Anexo 2.

El resumen de este análisis se encuentra en la Tabla 8: Tabla resumen de las ventas de escúter:

*Tabla 8: Tabla resumen de las ventas de escúter*

MODELO	VENTAS DESDE 1977
YAMAHA BWS + BWS X	175991
HONDA ELITE	4567
KYMCO AGILITY + AGILITY DIGITAL	92096

La motocicleta escogida para la implementación de la celda de combustible es la **Yamaha BWS 125**, la cual no solo presenta ventajas por su alto porcentaje de participación en el parque automotor colombiano sino también por su disponibilidad de espacio, además es una de las motocicletas que tiene mayor demanda no solo en Colombia sino también en países europeos (comercializada en Europa como Yamaha Zuma 125) lo cual hace la implementación propuesta más atractiva también en mercados internacionales.

## 5. MODELO MATEMATICO DE LA POTENCIA Y CICLO DE MANEJO

Para determinar la potencia requerida por el motor eléctrico en todas las situaciones de uso del escúter, se tiene que construir un modelo matemático y aplicarlo a un ciclo de manejo que toma en cuenta las aceleraciones y desaceleraciones debidas a un manejo urbano etc.

### 5.1 MODELO MATEMÁTICO

El artículo (Lin 2000) da una modelización de la potencia mecánica requerida a la rueda del escúter, que se encuentra en varios otros documentos (y en clases de mecánica ...). La Ecuación 5 muestra la potencia mecánica requerida a la rueda:

$$P_{rueda} = (mav) + (mgv \sin \vartheta) + (mgv C_{RR} \cos \vartheta) + \left(\frac{1}{2} \rho_{aire} C_D A_F v^3\right) \quad \text{Ecuación 5}$$

Con:

$m$ : peso total del escúter y pasajero.

$\theta$ : ángulo de la pendiente.

$a$ : aceleración instantánea del escúter.

$v$ : velocidad instantánea del vehículo.

$C_{RR}$ : coeficiente de "rolling resistance".

$\rho_{aire}$ : densidad del aire, aproximadamente  $1,23 \text{ kg/m}^3$ .

$C_D$ : "drag coefficient".

$A_f$ : Area frontal del escúter.

Este artículo también da el valor de la mayoría de esos parámetros para varios vehículos, use utilizara los de la línea "electric escúter".

Tabla 9: Valores de parámetros de interés

Vehículo	$C_{RR}$	$C_D$	$A_F \text{ (m}^2\text{)}$	Peso (kg)	Potencia de auxiliares (W)
Escúter eléctrico	0,014	0,9	0,6	130	60
Moto tipo roadster	0,008	1,2	0,5	100	0
Motocicleta tipo turismo	---	0,6	0,8	300	---
Ford AIV Sable	0,0092	0,33	2,13	1291	500
PNGV Vehiculo	0,007	0,2	2,0	920	400

Fuente:(Lin 2000)

El peso del sistema “Escúter + Pasajeros (2) + Carga adicional” puede ser estimado con los datos siguientes:

- Peso del escúter (chasis, celda, motor, tanque, baterías) : 120kg
- Peso de un pasajero (promedio colombiano): 70kg. Si se toma el caso de dos pasajeros, entonces son 140kg.
- Se agrega una carga adicional de 20kg

**Peso total : 280kg**

Para conocer la potencia requerida por el motor, se tiene que incluir el rendimiento del motor (suponiendo que no hay pérdidas en la transmisión, o que el motor es “in-wheel” es decir de transmisión directa a la rueda). La Ecuación 6 muestra esta relación.

$$P_{motor} = \frac{P_{rueda}}{\eta_{motor}} \quad \text{Ecuación 7}$$

Con  $\eta_{motor} \approx 80\%$ , aproximación tomada de la documentación Heinzmann disponible en Anexo 3 (Notes 2013), fabricante de motores *brushless* (rendimientos entre 80% y 90%, entonces se toma el caso más desfavorable).

A partir de esta modelización, se pueden estudiar varios casos de uso, es decir con solo un pasajero o con dos, a velocidad constante o incluyendo una aceleración, en una subida o sobre una ruta plana, etc. Esos cálculos son llamados “*steady-state tests*” pruebas en estado estable, es decir que no incluyen variaciones durante la misma prueba.

## 5.2 CICLO DE MANEJO

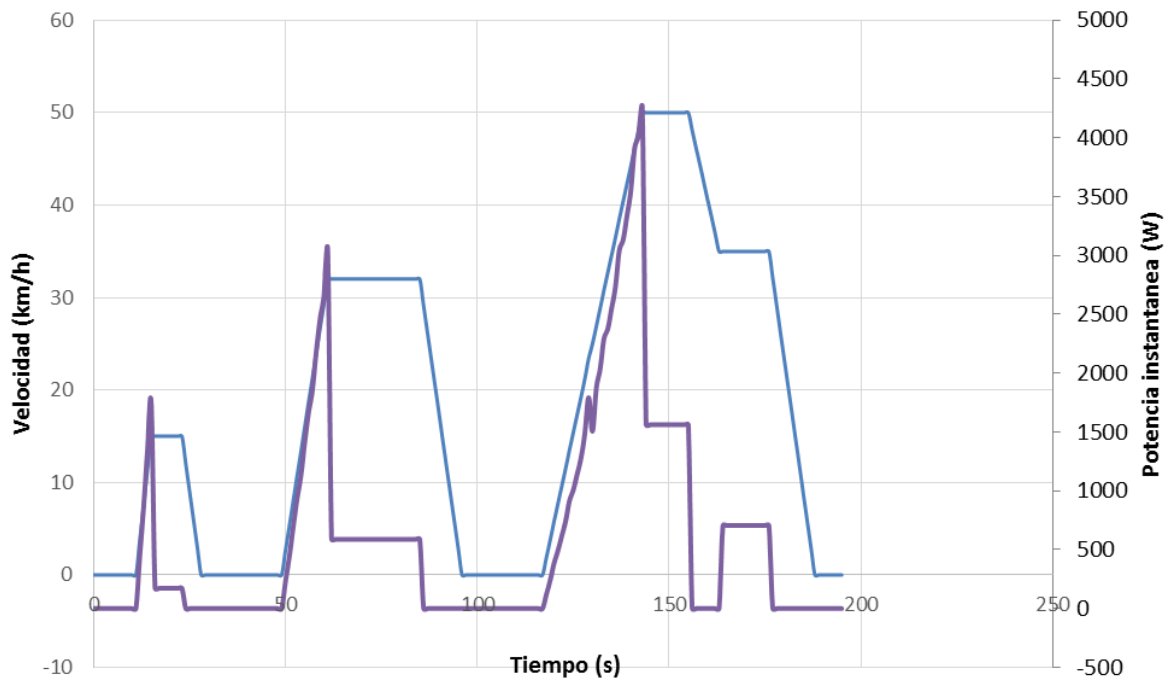
Para obtener una potencia que corresponda con un uso real, se tiene que utilizar un ciclo de manejo que de la velocidad  $v$  en función del tiempo  $t$ . De este ciclo se puede sacar la aceleración  $a$ , y con esas dos variables se puede calcular la potencia en cualquier momento del ciclo (asumiendo pendiente cero).

Existen varios ciclos estándar, entre los cuales sobresalen: el ECE-15 (Europa), el FTP-75 (Estados-Unidos), el JAMA (Japan), y cada uno tiene sus variantes.

Se utilizará para este estudio el ciclo de manejo ECE-15 que reproduce un manejo en una ciudad de Europa, a defecto de tener el ciclo de manejo de Pereira que no se pudo encontrar. Se hará todo el estudio siguiente con el ECE-15, y en el futuro se podrá adaptar la hoja de cálculo Excel al ciclo de Pereira, si se encuentra.

Se construye una hoja de cálculo en Excel con los 196 puntos del ciclo (Anexo 4, hoja de cálculo 1), cada uno con la información  $[t_i; v_i]$ . Se calcula cada término de potencia separado para que la explotación de los resultados sea más fácil, y luego se suman los términos. También se incluye el rendimiento del motor.

Ilustración 19: Ciclo de manejo, con velocidad (azul) y potencia (morado) en función del tiempo



### 5.3 CONCLUSIÓN DEL OBJETIVO 3

Con esas 196 potencias requeridas, se puede sacar la potencia media del motor, y la velocidad media del escúter por el ciclo de manejo ECE-15:

$$P_{motor\_media} = 598,8W \approx 600W$$

$$V_{scooter\_media} = 18,26km/h$$

Se tiene que notar que esta potencia se encuentra con condiciones de cálculo ideales. Además, ya que el ciclo de manejo ECE-15 fue desarrollado con base en un manejo en ciudades europeas, se tendrá que aumentar la potencia de la celda, por precaución.

## 6. DISEÑO DEL SISTEMA DE CELDA DE COMBUSTIBLE

De acuerdo al mercado (sitios de fabricantes, vehículos a celda de combustible comercializados, artículos científicos), se puede ver que el único tipo de celda de combustible actualmente comercializado a escala industrial son las **celdas de membrana de intercambio de protones (PEMFC)**. Con esta consideración del mercado, no se hará más investigación sobre las otras tecnologías de celda de combustible (ningún modelo comercializado, artículos científicos complejos...).

Es necesario entender que el diseño de una celda de combustible es bastante complejo y debe respetar muchas normas, por eso no se va a diseñar sino a seleccionar una celda vendida por un fabricante que tiene experiencia en este sector.

### 6.1 MODO DE FUNCIONAMIENTO (LOAD-LEVELLED O LOAD-FOLLOWING)

De acuerdo con un artículo de la Chulalongkorn University (Sripakagorn and Limwuthigraijirat 2009), existen dos modos de funcionamiento para la celda de combustible, el modo “*load-levelled*”, en cual la carga de la celda está fijada de manera a que la celda suministre esta potencia a su rendimiento máximo, y el modo “*load-following*”, donde la celda suministra en cualquier momento la potencia requerida por el motor, incluyendo durante los picos de potencia.

El estudio concluye que el modo **load-levelled** es el más adecuado en una configuración híbrida (celda de combustible + baterías), las baterías suministrando la energía necesaria durante los picos de potencia y la celda de combustible siendo encargada de suministrar una potencia constante calculada para ser la potencia media requerida por el escúter. Cuando esta potencia es mayor a la demanda, esta energía puede cargar las baterías, además, la celda trabajaría a rendimiento máximo, hay menos riesgos físicos para la celda por su menor variación además que no se necesitaría un control tan complejo de la celda y un consumo menor de combustible.

### 6.2 POTENCIA REQUERIDA A LA SALIDA DE LA CELDA

**En este punto se va a detallar el cálculo de la potencia que debe realmente producir la celda para que se logre obtener al nivel del motor 600W.**

La potencia media requerida por el motor es de 600W. Entre la celda y el motor, interviene solamente un convertor DC/DC llamado “*boost converter*” en inglés, que va a aumentar el voltaje suministrado por la celda al motor. Se tiene que incluir el rendimiento de este convertor (superior a 90% (Hwang 2012)) del motor, y las pérdidas por auxiliares, es decir ventiladores (“*blowers*”) que suministran aire a la celda y al mismo tiempo la enfrían, controlador de la celda, luces del escúter, microcontrolador de los varios sensores ... típicamente 5% de la potencia de la celda.

El rendimiento del convertor será considerado de 90%. Se considera además una potencia de los auxiliares de 100W por precaución.

La Ecuación 7 muestra el cálculo de la potencia requerida de la celda, a, para que el motor disponga de 600W y que los sistemas auxiliares funcionen:

$$P_{\text{constante\_celda}} = \frac{P_{\text{motor}} + P_{\text{auxiliares}}}{\eta_{\text{convertor DC/DC}}} = \frac{700W}{0,90} = 778W \quad \text{Ecuación 8}$$

Ya que el ciclo de manejo fue hecho para una aplicación en ciudad europea y los cálculos a condiciones ideales, se va a tomar una potencia mayor para disponer de un margen de error suficiente. Entonces, se tomará la potencia requerida nominal:  $P_{\text{constante\_celda}} = 1000W$

### 6.3 ANÁLISIS DEL MERCADO

El documento “Commercially Available Fuel Cell Products” hace un exhaustivo análisis de los fabricantes de celda de combustible (Ssl 2008).

Una búsqueda en los artículos científicos que tratan de la concepción de un escúter a celda de combustible también arroja referencias útiles de celdas de combustible. Al final, los fabricantes que proponen modelos de celdas de combustible adaptados para un uso en vehículos livianos tipo escúter (Potencia < 10kW) son:

- Ballard
- Horizon FuelCell
- PowerCell
- Intelligent Energy
- Nedstack y PlugPower, pero las dimensiones y peso de la celda no son interesantes comparativamente con las demás marcas.

Los demás fabricantes mencionados en el documento diseñan celdas de mayor potencia para aplicaciones estacionarias, de “backup” o vehículos tipo buses etc. (potencia de 30, 60, 100kW...).

#### 6.3.1 Ballard

Ballard propone el modelo de celda **FCgen®-1020ACS** (Anexos 5 y 6), con un rango de potencia de 400W a 3,3kW.

Del manual de utilización Ballard (Specification 2011), sale que las celdas internas tienen una potencia nominal de 43W. Esta potencia se logra a un amperaje de ~65A/celda\_int y un corriente 660mW/celda\_int.

Para obtener el número de celdas unitarias necesarias, se tiene que dividir la potencia requerida total por la  $P_{\text{unitaria/celda}}$ .

También se puede obtener el flujo de hidrógeno requerido por la celda, con la Ecuación 8, dada por PragmaIndustries (“Réservoirs D’hydrogène – Fuel Cells Hydrogen Energy – Pragma Industries” 2016):

$$\text{Flujo (L/min)} = 0,0072 \times \#_{\text{celdas\_unit}} \times I_{\text{celda\_unitaria}} \quad \text{Ecuación 9}$$

Se hace una hoja de cálculo Excel para facilitar el cálculo de esos parámetros (Anexo 4, hoja de cálculo 2).

Potencia: Para una potencia requerida (con margen de error) de 1000W, el modelo Ballard estándar tiene 28 celdas internas, es el **FCgen®-1020ACS 28 cells**. Entrega una potencia nominal de  $28 \times 43W = 1204W = \text{"Rated power"}$ . Las dimensiones dadas por el fabricante no incluyen los ventiladores (*blowers*), entonces se tiene que agregar ~3cm a la anchura de la Ballard para esos ventiladores.

Dimensiones: L x H x W = 209,4 x (103 + 30) x 351mm, 6,58kg

### 6.3.2 Horizon FuelCell

Horizon FuelCell (HFC) propone el modelo de celda **H-Series**, con un rango de potencia de 10W a 5kW. La documentación del fabricante no dice si la potencia indicada es la nominal, máxima o a rendimiento máximo.

Potencia: En este caso el modelo **H-1000 FCS-C1000** (Anexo 7), que suministra una potencia nominal de 1kW está bien dimensionado (potencia requerida de 1kW). Esta potencia nominal se logra con 48 celdas, a 28,8V y 35A. Se comparan también las características del modelo superior, que entrega una potencia de 2kW.

Dimensiones: **H-1000 FCS-C1000:** 268 x 233 x 122,5mm, 4kg + 400g (controlador)

**H-2000 FCS-C2000:** 350 x 183 x 303mm, 10kg + 2,5kg (controlador)

### 6.3.3 PowerCell

PowerCell propone el modelo de celda **S1 Fuel Cell (Anexo 8)**, con un rango de potencia de 1kW a 6kW (potencias “pico”).

Potencia: Misma situación que para la celda de Horizon Fuel Cell. El modelo **S1-10C**, que suministra una potencia nominal de 1kW está bien dimensionado (potencia requerida de 1kW). Sin embargo el fabricante solo da en su catálogo las características (curva de potencia, dimensiones, peso...) del modelo superior “**S1-20C**”, que puede entregar 2kW de potencia nominal. El problema con una potencia de esta potencia nominal será que generando 1kW, la celda operará a rendimiento muy bajo.

Dimensiones: **S1-10C:** información no disponible en la documentación del sitio

**S2-20C:** 187 x 191 x 240 mm, 11,3kg

### 6.3.4 Intelligent Energy

Intelligent Energy desarrolló en acuerdo con Suzuki la celda de combustible que equipa el Suzuki Burgman modelo hidrógeno. Esta celda tiene una potencia máxima de 4kW, pero es difícil encontrar más informaciones sobre esta celda, siendo un producto asociado al Burgman, escúter que aún no ha sido comercializado.



## 6.4 SELECCIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE

Se calculará la densidad de potencia [W/kg] de cada celda y luego la relación potencia/volumen, criterio importante para una implantación facilitada en el escúter (espacio disponible mucho menos que para una aplicación en carro, por ejemplo). Se tomará el peso de las celdas, despreciando en principio el peso del controlador que es mucho menor.

- Ballard FCgen®-1020ACS 28 cells : 1204W para 6,58kg => 183W/kg (no incluye los ventiladores)
- HFC H-1000 FCS-C1000: 1000W para 4kg => 250W/kg
- PowerCell : 2000W para 11,3kg => 177W/kg (pero modelo sobredimensionado)

La celda con la densidad de potencia más alta es la celda HFC H-1000, seguida por la Ballard 28cells. Luego viene el criterio de las dimensiones:

- Ballard 28cells sin ventiladores: 1204W para 209,4 x 103 x 351mm = 75704,38 cm<sup>3</sup> => 0,0159W/cm<sup>3</sup>
- Ballard 28cells con ventiladores: 1204W para 209,4 x (103 + 30) x 351mm = 97754,202 cm<sup>3</sup> => 0,0123W/cm<sup>3</sup>
- HFC H-1000 FCS-C1000: 1000W para 219 x 268 x 123mm = 72191,16cm<sup>3</sup> => 0,0139W/cm<sup>3</sup>
- PowerCell S1-20C : 2000W para 187 x 191 x 240 mm = 85720 cm<sup>3</sup> => 0,0233W/cm<sup>3</sup>

Sobre este criterio la PowerCell es la más “eficiente”, debido a su alta potencia en un volumen bastante compacto.

Pero a potencia equivalente al uso requerido (1000W):

Si se agregan 3cm a las dimensiones de la Ballard, el resultado cambia y la HFC se vuelve más eficiente sobre este criterio. Sin embargo esos 3cm son una suposición, así que se puede concluir que las dos celdas se valen sobre este criterio.

## 6.5 CONCLUSIÓN DEL OBJETIVO 4

Cuando se considera una potencia nominal cercana de la requerida, la celda **HFC H-1000** ofrece la mejor relación entre peso, volumen y potencia. La Ballard tiene buenas características pero está más voluminosa, ofreciendo un poco más de potencia.

Otra solución también puede ser la PowerCell S1-20C o una celda Ballard con mayor número de celdas internas (y mayor potencia nominal), esas celdas de combustible teniendo dimensiones casi similares a los modelos de potencia menor. Pero son sinónimos de mayor peso y consumación de hidrógeno.

Las celdas de combustible vienen con ventiladores llamados “*blower*” que suministran aire de manera uniforme a la celda de combustible, proporcionalmente a la potencia requerida (Hwang 2012).

Se nota también que las celdas Ballard, HFC y PowerCell están diseñadas para funcionar con hidrógeno seco, así que no se necesita un proceso de humidificación del aire.

**Nota:** Para hacer funcionar la celda de combustible y el sistema secundario de energía en el mismo sistema, para alimentar el motor (motor funcionado generalmente a 24, 48 o 72V) se va a necesitar un convertidor DC/DC que permite ajustar el voltaje de las fuentes de energía con el voltaje requerido por el motor.

## 7. DISEÑO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO

### 7.1 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS: RELACIÓN DE PESO DEL MATERIAL ALMACENADOR/PESO DE HIDRÓGENO ALMACENADO, VOLUMEN, PRECIO

Es necesario tomar en cuenta varios criterios antes de seleccionar alguna solución tecnológica para la aplicación del proyecto. Dentro de estos criterios, cabe resaltar: el volumen del sistema, su peso y la relación peso del material almacenador/peso de hidrógeno almacenado, el costo de compra pero también el costo en el tiempo, disposición final de los elementos y la seguridad del almacenamiento.

- El estudio « *Stockage de l'hydrogène, Piles à combustible* » (Pourcelly 2013), llevado por el centro de investigación nacional francés en 2013, da información sobre la relación peso del material almacenador/peso de hidrógeno que se almacena, por cada tipo de almacenamiento.

Tabla 10: Tecnologías de almacenamiento y relaciones de peso, temperaturas y energías de desorción

	H <sub>2</sub> Líquido	Crio-adsorbentes	Hidruros metálicos	H <sub>2</sub> comprimido	Alanates	Hidruros iónicos	Borohidruros
Materiales de almacenamiento		Carbono, MOFs	LaNi <sub>5</sub> , TiFe <sub>2</sub> , (V,Ti)		NaAlH <sub>4</sub>	MgH <sub>2</sub>	LiBH <sub>4</sub>
% masa de H <sub>2</sub> /material	100	< 8	< 3	100	5	7,6	18,5
Energía de extracción H <sub>2</sub> (kJ/mol)		5	25-40		40-50	75	> 80
Temperatura de extracción	-253° C	-200°C	-40/50°C	25°C	150°C	300°C	> 400°C

Fuente : (Pourcelly 2013)

Resulta que cada tecnología tiene su ventaja y desventaja:

- Los hidruros metálicos tienen una temperatura de descarga (desorción) “ambiente” pero una relación de peso muy mala
- Los hidruros iónicos una relación de peso doble pero una temperatura de descarga muy alta
- El hidrógeno comprimido tiene una relación de peso de 100% pero eso no incluye el peso del tanque.

- El DOE (*Department of Energy of the USA*) también da mucha información su página web (“Hydrogen Storage | Department of Energy” 2016): el estado actual de varios criterios de selección como la densidad de almacenamiento (en términos de peso y volumen) y el precio/kWh, pero también el objetivo que se quiere alcanzar por esos criterios, como se ve en las figuras siguientes:

Tabla 11: Estado actual de varios criterios para almacenamiento en tanque sobre presión

<b>Objetivos del sistema de almacenamiento</b>	<b>Densidad Gravimétrica</b> kWh/kg sistema (kg H <sub>2</sub> /kg sistema)	<b>Densidad Volumétrica</b> kWh/L sistema (kg H <sub>2</sub> /L sistema)	<b>Costo</b> \$/kWh (\$/kg H <sub>2</sub> )
2020	1.8 (0.055)	1.3 (0.040)	\$10 (\$333)
Ultimo (deseado)	2.5 (0.075)	2.3 (0.070)	\$8 (\$266)
<b>Estado actual</b> (Laboratorio Nacional de Argonne)	<b>Densidad Gravimétrica</b> kWh/kg sistema (kg H <sub>2</sub> /kg sistema)	<b>Densidad Volumétrica</b> kWh/L sistema (kg H <sub>2</sub> /L sistema)	<b>Costo<sup>b</sup></b> \$/kWh (\$/kg H <sub>2</sub> )
Comprimido a 700 bar (tanque Tipo IV)	1.5 (0.044)	0.8 (0.024)	\$17 <sup>c</sup> (\$566)
Comprimido a 350 bar (Tanque Tipo IV)	1.8 (0.054)	0.6 (0.017)	\$13 <sup>c</sup> (\$433)
<sup>a</sup> Considerando una capacidad de almacenamiento de 5,6kg de hidrógeno. <sup>b</sup> Previsiones de costo estimadas para 500,000 unidades por año y reportadas de 2007\$. <sup>c</sup> Previsiones de costo del Análisis Estratégico (January 2013).			

Fuente: (“Hydrogen Storage | Department of Energy” 2016)

Tabla 12: Estado actual de varios criterios para almacenamiento en componentes

<b>Objetivos del sistema de almacenamiento</b>	<b>Densidad Gravimétrica</b> kWh/kg sistema (kg H <sub>2</sub> /kg sistema)	<b>Densidad Volumétrica</b> kWh/L sistema (kg H <sub>2</sub> /L sistema)	<b>Costo</b> \$/kWh (\$/kg H <sub>2</sub> )
2020	1.8 (0.055)	1.3 (0.040)	\$10 (\$333)
Ultimo (deseado)	2.5 (0.075)	2.3 (0.070)	\$8 (\$266)
<b>Estado actual (del HSECoE)</b>	<b>Densidad Gravimétrica</b> kWh/kg sistema (kg H <sub>2</sub> /kg sistema)	<b>Densidad Volumétrica</b> kWh/L sistema (kg H <sub>2</sub> /L sistema)	<b>Costo<sup>b</sup></b> \$/kWh (\$/kg H <sub>2</sub> )
Hidruro metálico (MH): NaAlH <sub>4</sub>	0.4 (0.012)	0.4 (0.012)	\$43 (\$1,430)
Adsorción: MOF-5, 100 bar, 80 K	1.3 (0.038)	0.7 (0.021)	\$15 (\$490)
Almacenamiento químico (CH): “Off-Board Regenerable” (AB)	1.5 (0.046)	1.3 (0.040)	\$17 (\$550)

Fuente: (“Hydrogen Storage | Department of Energy” 2016)

## 7.1.1 Almacenamiento en tanque sobre presión

### 7.1.1.1 Relación volumen/peso del almacenamiento

Se va a considerar un caso del mercado, la Hyundai Tucson. Tiene un tanque de 140L a 700bares, almacenando 5,63kg de hidrógeno (“Tucson Fuel Cell | A Hydrogen Fuel Cell Car | HyundaiUSA” 2016).

A condiciones ambientes (P=1,013bar y T=25°C), el volumen específico del hidrógeno 11,983 m<sup>3</sup>/kg (“Hydrogen, H<sub>2</sub>, Physical Properties, Safety, MSDS, Enthalpy, Material Compatibility, Gas Liquid Equilibrium, Density, Viscosity, Flammability, Transport Properties” 2016).

Entonces a condiciones ambientes, 5,63kg de hidrógeno ocupan un volumen de  $5,63 \times 11,983 = 67,46429 \text{ m}^3 = 67464,29L$ .

Si el hidrógeno era un gas ideal, se podría utilizar la relación de los gases ideales. La Ecuación 10 muestra la aplicación de esta relación y su resultado.

$$P_{atm} \times V_{atm} = n \times R \times T = P_{700bares} \times V_{700bares} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\Leftrightarrow V_{700bares} = \frac{P_{atm} \times V_{atm}}{P_{700bares}} = \frac{1,013 \times 67464,29}{700} = 97,63L$$

El volumen comprimido a 700bares sería de 97,63L, sin embargo el tanque del Hyundai es de 140L para esta misma cantidad de hidrógeno, entonces el hidrógeno no se puede asimilar a un gas ideal.

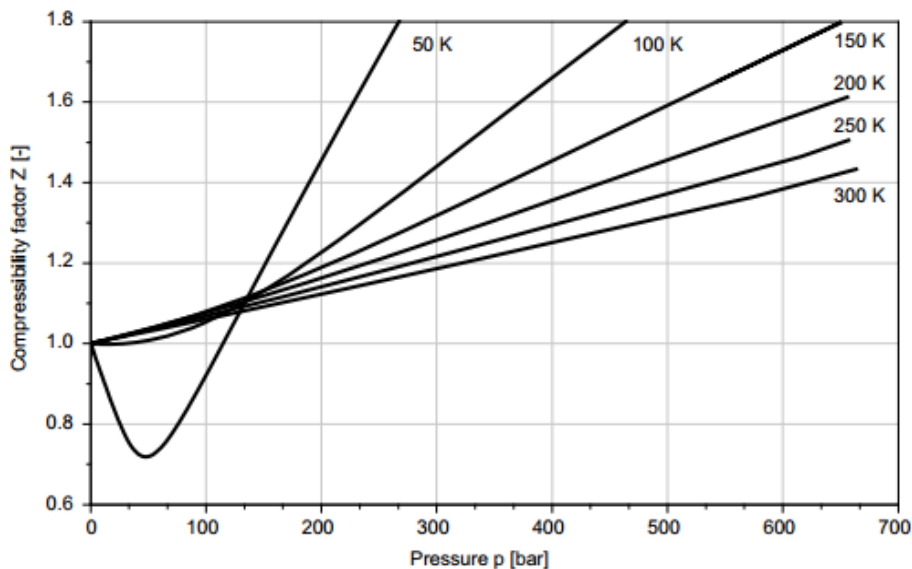
Se tiene que tomar en cuenta un factor de compresibilidad para calcular el volumen equivalente del hidrógeno comprimido bajo presión.

La Ecuación 12 permite el cálculo de este factor en el caso del hidrógeno a 700 bares.

$$\text{Factor de compresibilidad} = \frac{V_{real}}{V_{ideal}} = \frac{140}{97,63} = 1,434 \quad \text{Ecuación 13}$$

Este factor cambia según la presión y la temperatura de uso, y se puede calcular con la gráfica dada en el artículo “Handbook of Hydrogen Storage” (Hirscher and Borgschulte 2009).

Ilustración 20: Factor de compresibilidad Z en función de la presión (y de la temperatura)



Fuente: (Hirscher and Borgschulte 2009)

Se va a parametrizar la curva del factor de compresibilidad para la temperatura 300K (equivalente a la temperatura ambiente). La curva puede ser asimilable a una recta, y viene fácilmente el coeficiente director de esta recta:

$$\text{Coef. director} = \frac{1,434-1}{700-0} = 6,1997 \times 10^{-4} \quad \text{Ecuación 14}$$

La curva del factor de compresibilidad a 300K tiene como ecuación (Ecuación 15):

$$Z = (6,1997 \times 10^{-4}) \times P + 1 \quad \text{Ecuación 16}$$

Luego, con un análisis del mercado se encuentra en sitios de fabricantes los datos de peso, volumen y capacidades de almacenamiento, a varias presiones, aunque no se pudo encontrar un catálogo detallado de los productos:

- Hexagon Lincoln (“TUFFSHELL® - Hexagon Lincoln” 2016): (Estados Unidos)

Presiones estándares: 350 bares, 400 bares, 500 bares, 700 bares, 950 bares

Volumen: 29L hasta 539L // Dimensiones: hasta 3000mm de largo y 560mm de diámetro

- Worthington (“High-Pressure Composite Cylinders - Worthington Industries” 2016): (Estados Unidos)

300 bares, 1kg y 1,1L de hidrógeno almacenado, hasta 400 bares, 120kg y 82L almacenados.

- Ullit (“THE DIFFERENT TECHNOLOGY OF CYLINDERS” 2016): (Francia)

Tanques hecho al pedido

- Faber (“Faber Cylinders” 2016): (Italia)

Presión de almacenamiento 350, 500 y 700 bares, volúmenes: de 38L a 58L

- CTS Energy (Faidutti, n.d.): (Italia)

Presión de almacenamiento 300 bares, volumen de los tanques de 2L a 9L (comprimidos), capacidades adecuadas a la demanda.

- Luxfer Cylinder (“G-Stor™ H2 Hydrogen-Storage Cylinders” 2016): (Estados Unidos)

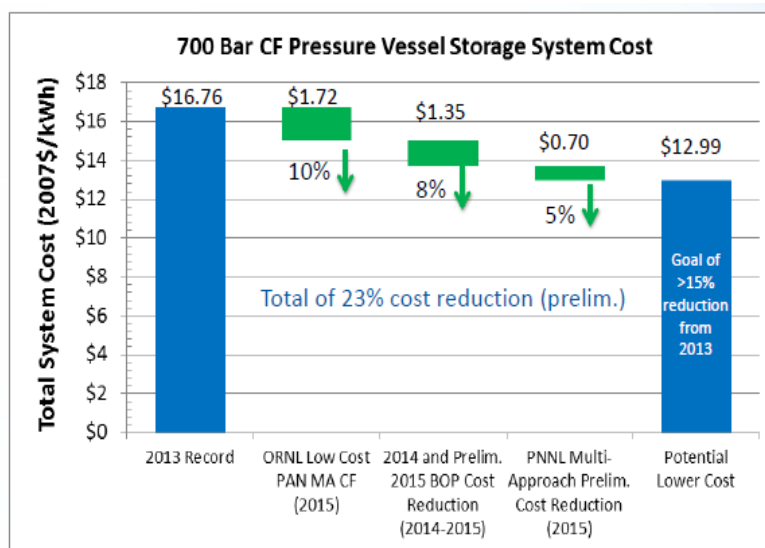
Presión de almacenamiento 350 bares, volumen de los tanques de 68L a 205L, tanques diseñados para aplicaciones más potente que un escúter, pero se puede hacer un tanque al pedido.

Ninguno de los sitios a parte del de CTS Energy entrega un catálogo detallado de los productos y el único fabricante que contestó a las preguntas fue Worthington, proponiendo un tanque de volumen = 29,9L de hidrógeno comprimido a 300 bares.

### 7.1.1.2 Precio del almacenamiento

El documento “2015 DOE Hydrogen and Fuel Cells Programs Review” (Long et al. 2015) da el precio por kWh del almacenamiento en tanque a 700bares.

Ilustración 21: precio/kWh, por 500000 unidades producidas/año



Fuente: (Long et al. 2015)

Se puede confirmar eso con las informaciones de costo disponibles en la Tabla 11, que da el precio/kWh de la tecnología de almacenamiento en tanques sobre presión: **17\$/kWh a 700 bares y 13\$/kWh a 350 bares.**

## 7.1.2 Almacenamiento por adsorción para los sistemas “HexCell” and “MATI” (MOF)

### 7.1.2.1 Relación volumen/peso del almacenamiento

El artículo del DOE trata de cantidades de hidrógeno almacenado mucho más grandes que lo que se necesita para el escúter, pero se puede extrapolar. El tanque necesario para almacenar 6,22kg de hidrógeno puro con proceso MATI tiene un peso total de 61kg, y el con el proceso HexCell pesa 64kg (Brian D., 2015), con las cantidades de aleación siguiente:

- MATI : 32kg

- HexCell : 41kg

#### 7.1.2.2 Precio del almacenamiento

Se puede considerar la información de costo disponible en la Tabla 12, que nos da el precio/kWh de la tecnología de almacenamiento en MOF: **15\$/kWh**.

#### 7.1.3 Canisters de hidruros metálicos

##### 7.1.3.1 Volumen, peso

Varios fabricantes proponen reservorios conteniendo hidruros metálicos en forma de polvo.

Proponen varios reservorios, según el número de litros equivalente de hidrógeno que se necesita. Se precisa el flujo de hidrógeno a la descarga, a temperatura ambiente, y el peso del reservorio.

- SOLID-H™ (“Metal Hydrides” 2016):

Reservorios de 20L (329g) hasta 910L (6.7 kg), utilizando el hidruro metálico AB5.

- PRAGMA INDUSTRIES (“Réservoirs D’hydrogène – Fuel Cells Hydrogen Energy – Pragma Industries” 2016):

Reservorios de 10L (112g) hasta 600L (6,5kg) (realmente hasta 10000 litros pero no es para una utilización portable)

##### 7.1.3.2 Precio

- SOLID-H™ (“Metal Hydrides” 2016):

Reservorios de 20L (329g) hasta 910L (6.7 kg): **de 470\$ hasta 2,480\$**

- PRAGMA INDUSTRIES (“Réservoirs D’hydrogène – Fuel Cells Hydrogen Energy – Pragma Industries” 2016):

Reservorios de 10L (112g) hasta 600L (6,5kg): información de precio no disponible

Se puede considerar también la información de costo disponible en la Tabla 12, que da el precio/kWh de la tecnología de almacenamiento en hidruro metálico: **43\$/kWh**.

## 7.2 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS: CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD

El hidrógeno es un gas muy inflamable y altamente volátil, así que se deben tomar muchas precauciones para su almacenamiento, y evitar su propagación al aire libre en caso de falla o al menos controlar perfectamente esta propagación. Además, el hidrógeno en sí mismo y las llamas producidas por su combustión son invisibles así que se necesitan detectores sensibles (The Pollet PEM Fuel Cell Group 2014).

Por eso, los medios de almacenamiento físico “hidrógeno comprimido” y “hidrógeno líquido” exigen la toma de más precauciones debido a que el hidrógeno se escapa directamente en caso de falla del tanque, y puede inflamarse muy fácilmente. El hidrógeno líquido más que todo presenta riesgos por la temperatura Y presión a las cuales está sometido.



Si una solución de tipo “hidrógeno comprimido” es elegida, se debe asegurar la difusión rápida del hidrógeno en el aire en proporciones tales que no presenten ningún riesgo de explosión etc. Por el contrario, una vez almacenado en/sobre hidruros o MOF, el hidrógeno es capturado por las estructuras y no presenta una flamabilidad tan alta, como lo muestra el video comercial de la tecnología *McPhy* (“McPhy - La Solution McPhy” 2016).

### 7.3 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS: CONCLUSIÓN

En este documento fueron presentadas las varias tecnologías de almacenamiento de hidrógeno, con sus respectivas ventajas y desventajas.

Al salir del estudio, dos tecnologías parecen más adecuadas para la aplicación: el **almacenamiento en tanque de alta presión**, porque la tecnología ya está ampliamente desarrollada y extendida, eso implicando un conocimiento de los riesgos y un costo más bajo, y el **almacenamiento en hidruros metálicos**, tecnología más reciente y costosa pero cuya seguridad es más alta.

Luego en el estudio se compararán esas dos opciones para elegir una.

### 7.4 ESTUDIO DE NORMAS APLICADAS AL ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO

La tecnología del hidrógeno no es nueva, pero su utilización en aplicaciones móviles y/o que tienen alto contacto con las personas se desarrolló rápidamente en esos últimos años, implicando la necesidad de normas técnicas internacionales sobre todos los procesos y aspectos de su producción, almacenamiento, suministro en vehículos, etc.

Varios comités divididos en grupos de trabajo se han dedicado a la normalización de los procesos.

El primer comité hace parte de la organización **ISO**, “**the International Organization for Standardization**”, que es una organización mundial dedicada a publicar normas y estándares sobre tecnologías, procesos, entre otros.

El comité se llama el “ISO/TC 197”, iniciado en 1990 y contando con 20 países participantes. Su enfoque es la “Estandarización de los sistemas y componentes para la producción, el almacenamiento, el transporte, la medida y el uso del hidrógeno” (“*Standardization in the field of systems and devices for the production, storage, transport, measurement and use of hydrogen*”).

Al día de hoy, ha publicado 17 estándares ISO sobre esos temas. Esos estándares se pueden comprar en el sitio oficial de ISO ([www.iso.org](http://www.iso.org)), y solo está en acceso público breves descripciones de esos estándares.

También se cuenta con el comité “ISO/TC 58”, que se dedicó a la investigación y los estándares sobre tanques de hidrógeno comprimido, y ha publicado 10 estándares sobre este tema.

Un otro comité implicado en este tema hace parte de la comisión **IEC**, “**International Electrotechnical Commission**”. El comité se llama “TC 105”, iniciado en 1996 y contando con 14 países implicados en las investigaciones ([www.iec.ch](http://www.iec.ch)). Su enfoque es: “Preparar estándares internacionales a propósito de las tecnologías

de celdas de combustible, para todas las aplicaciones de esas celdas como los sistemas de celdas de combustible estacionarios, las celdas de combustibles dedicadas a aplicaciones móviles (propulsión o sistema de potencia auxiliar), celdas portables y micro celdas”.

Ha publicado 9 trabajos sobre este tema.

El “European Integrated Hydrogen Project” (EIHP) publicó un estado del arte sobre los sistemas de hidrógeno.

Una excelente fuente de información sobre este tema es el **DOE** (*Department of Energy of the United States*), que hace muchos congresos sobre el tema del hidrógeno, y publicó entre otros el libro/manual: *Sourcebook for Hydrogen Applications*, dedicado a reunir las informaciones sobre tecnologías, procesos y normas relativas al hidrógeno.

Este informe se enfocará sobre las normas relativas al almacenamiento de hidrógeno, que sea líquido, comprimido o almacenado en hidruros.

Unos estándares correspondientes son:

- ISO 13985:2006 - Hidrógeno líquido para tanques de vehículos
- ISO 16111:2008 - Hidrógeno almacenado en hidruros metálicos
- ISO TC 58 - Hidrógeno comprimido en tanques: 10 estándares muy específicos sobre tanques, válvulas de regulación de presión...
- ISO/TS 15869 – Hidrógeno comprimido en tanque: especificación de los tanques de tipo I, II, III y IV.
- EC 79/2009

Dado que esos estándares no son de acceso público y que se debe pagar una suma relativamente alta (desde \$ US 60 hasta \$US200) para obtenerlos, no se podrá detallar esos estándares. Entonces solo se va a escribir el enfoque de cada estándar como se puede encontrar en el sitio, y algunos términos particulares a esos estándares.

**Nota:** Para el almacenamiento en tanques bajo presión siendo una tecnología desarrollada (y utilizada) desde más tiempo que las otras, se encuentra más normas en relación a esta tecnología. Así, se puede encontrar en el sitio del DOE la tabla que resume los estándares relativos a esas tecnologías (“High-Pressure Hydrogen Tank Testing | Department of Energy” 2016), estándares que se encuentran también en el documento “*Hydrogen Composite Tank Program (DOE-QUANTUM)*” (Investigator, Sirosh, and Storage 2002), estudio llevado por el DOE y QUANTUM, fabricante estadounidense de tanques alta presión. Esos estándares no son únicamente publicados por la organización ISO, como se puede ver en las tablas siguientes:

Tabla 13: Current Standards Compliance for 25-(MegaPascal) MPa, 35-MPa, and 70-MPa Pressure Vessels

Presión de almacenamiento	Estandares
25 MPa (3.6 ksi)	NGV2-2000 (modificado) DOT FMVSS 304 (modificado)
35 MPa (5 ksi)	E.I.H.P. / Rev 12B <b>ISO 15869</b> derivada de EU 97/23/EG NGV2-2000 (modificado) FMVSS 304 (modificado) Reijikijyun Betten 9
70 MPa (10 ksi)	E.I.H.P. / Rev 12B <b>ISO 15869</b> derivada de EU 97/23/EG FMVSS 304 (modificado) Betten 9 (modificado)

Fuente: (“High-Pressure Hydrogen Tank Testing | Department of Energy” 2016)

También da información sobre las pruebas realizadas sobre los tanques antes de su comercialización:

Tabla 14: Pressure Tests to Ensure Tank Manufacturing Quality

Validation Tests	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presión hidrostática</li> <li>• Ciclo temperatura extrema</li> <li>• Ciclo presión extrema</li> <li>• Corrosión química</li> <li>• Resistencia al fuego</li> <li>• Penetración balística</li> <li>• Tolerancia a las grietas</li> <li>• Esfuerzos acelerados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prueba de caída libre</li> <li>• Permeabilidad</li> <li>• Ciclo de carga de hidrógeno</li> <li>• Temperatura de reblandecimiento</li> <li>• Propiedades de tensión</li> <li>• Corte de la resina</li> <li>• Compatibilidad con el hidrógeno</li> <li>• Varias pruebas internas</li> </ul>

Fuente: (“High-Pressure Hydrogen Tank Testing | Department of Energy” 2016)

Los tanques son sometidos a 500000 ciclos de presurización y despresurización (a presión máxima de uso), que es por seguridad una cifra mucho más alta que la cantidad de ciclos de trabajo en su uso real. Son además sometidos a presiones mayores a la admitida, a bajas presiones, son disparados con balas, expuestos a ácido y otros casos extremos para probar que son seguros en condiciones normales de trabajo.

### **ISO 13985:2006 - Hidrógeno líquido para tanques de vehículos**

*“ISO 13985:2006 especifica los requerimientos de construcción para tanques recargables de hidrógeno líquido utilizados en vehículos terrestres así como las pruebas requeridas para asegurar un nivel aceptable de protección contra pérdidas de vida y material en caso de fuego o explosión.*

*Se aplica a tanques de combustible permanentemente montados en los vehículos.”*

El documento completo se trata de las normas de diseño de los tanques, de las pruebas de calidad y verificaciones sobre el producto, de las condiciones máxima de uso (temperatura, presión...).

### **ISO 16111:2008 - Hidrógeno almacenado en hidruros metálicos**

*“ISO 16111:2008 especifica los requerimientos aplicables al material, diseño, construcción y prueba de los sistemas de almacenamiento de hidrógeno transportables, denominados “hidruros metálicos ensamblajes” (MH), los cuales utilizan cubiertas con un volumen interno menor a 150 litros y aceptando una presión máxima de 25MPa (250bar).*

*Solo aplica a los ensamblajes de almacenamiento en hidruros metálicos en los cuales el hidrógeno es el único componente transferido. Los ensamblajes de almacenamiento en hidruros metálicos dedicados a ser fijos en los vehículos son excluidos.”*

Este estándar detalla las condiciones máximas de uso de un reservorio almacenando hidrógeno en hidruros metálicos (el reservorio es llamado “fuel cell cartridge” o “canister”), las pruebas que son realizadas para verificar su funcionamiento (“burst test”, que es una prueba a alta presión interna, test con fuego...), la cantidad de hidrógeno que se almacene a dentro del hidruro, etc.

### **ISO TC 58 - Hidrógeno comprimido en tanques**

*“Estandarización de los cilindros de gas, sus dimensiones y características relacionadas a su manufactura y uso.”*

Esto no es un estándar sino un comité, que publico 10 estándares sobre el diseño, la producción y las pruebas realizadas sobre los reservorios alta presión de hidrógeno comprimido.

### **ISO/TS 15869**

*“ISO 15869:2009 especifica los requerimientos para tanques recargables de almacenamiento de combustible, dedicado al almacenamiento de hidrógeno a alta presión o de hidrógeno licuado en vehículos:*

*ISO 15869:2009 se aplica a tanques de acero, acero inoxidable, aluminio o material no metálico de construcción, utilizando cualquier diseño o método de manufactura adecuado para sus condiciones de servicio.*

*ISO 15869:2009 se aplica a los siguientes tipos de tanques:*

- *Tipo 1: tanques de metal;*
- *Tipo 2: tanques de anillos envolventes con un liner de metal;*
- *Tipo 3: tanques totalmente recubiertos de fibra compuesta con liner de metal;*
- *Tipo 4: tanques totalmente recubiertos de fibra compuesta con liner de polímero”*

Este estándar también especifica los requerimientos de diseño con cuales deben cumplir los fabricantes de tanques y las pruebas que se deben realizar sobre esos tanques.

## EC 79/2009

“Regulación (EC) No 79/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo del 14 de Enero 2009 sobre la homologación de los vehículos funcionando con hidrógeno, y rectificando la Directiva 2007/46/EC.”  
Regulación que se aplica sobre varios componentes de los vehículos a celda de combustible.

Ahora que se conocen las organizaciones encargadas de publicar estándares sobre los temas que conciernen a este proyecto, se podrá, en caso de necesidad, comprar un estándar para el proyecto. Sin embargo, son los fabricantes de productos que deben aplicar esas normas al momento de la producción y de las pruebas, y los productos salen con la mención “Certificado ISO...”.

Es eso que se deberá verificar antes de comprar un tanque o cualquier otro material, guardando en memoria que esos estándares existen y que tienen una breve descripción en los sitios dedicados.

## 7.5 CALCULO DE LA CAPACIDAD DE HIDRÓGENO NECESARIA

Del trabajo con el ciclo de manejo se obtuvo la potencia media requerida por el motor eléctrico, que es de 600 W. Luego se eligió una celda de combustible, que va a suministrar una potencia constante incluyendo rendimiento y pérdidas por auxiliares, sumando **1000W** en total.

### 7.5.1 Numero de litros de hidrógeno a condiciones ambiente:

- La Ecuación 17 muestra la relación entre la cantidad de litros de hidrógeno necesarios y la energía a almacenar.

$$\# \text{ de litros de hidrogeno } [L] = \frac{\text{Energía a almacenar } [Wh]}{\text{Energía almacenada en 1L de hidrogeno puro } [Wh/L]} \quad \text{Ecuación 18}$$

- Igualmente, la energía requerida depende de la potencia requerida y del número de horas de uso (Ecuación 19):

$$\text{Energía a almacenar } [Wh] = \text{Potencia de la celda } [W] \times \text{Tiempo de uso } [h] \quad \text{Ecuación 20}$$

- El tiempo de uso puede ser calculado en función de la autonomía deseada del escúter y de la velocidad media (Ecuación 21):

$$\text{Tiempo de uso } [h] = \frac{\text{Autonomía deseada } [km]}{\text{Velocidad media } [km/h]} \quad \text{Ecuación 22}$$

El número de litros necesarios se puede escribir de la manera siguiente (Ecuación 23):

$$\# \text{ de litros de hidrogeno } [L] = \frac{\text{Potencia de la celda } [W] \times \frac{\text{Autonomía deseada } [km]}{\text{Velocidad media } [km/h]}}{\text{Energía almacenada en 1L de hidrogeno puro } [Wh/L]} \quad \text{Ecuación 24}$$

Con: La energía almacenada en 1L de hidrógeno a condiciones ambientes (300K, 1 atm) varía según las fuentes, es de 10,7kJ/L = 2,97Wh/L (Thomas 2000) o 2,78Wh/L (“Hydrogen, H2, Physical Properties,

Safety, MSDS, Enthalpy, Material Compatibility, Gas Liquid Equilibrium, Density, Viscosity, Flammability, Transport Properties” 2016). Se tomara el caso más desfavorable de 2,78Wh/L, por precaución.

El resultado viene en la Ecuación 25:

$$\text{Litros de hidrogeno a cond. ambientes} = \frac{1000W \times \frac{170 \text{ km}}{18,26 \text{ km/h}}}{2,78 \text{ Wh/L}} = \frac{9310 \text{ Wh}}{2,78 \text{ Wh/L}} \approx \mathbf{3347L} \quad \text{Ecuación 26}$$

- Peso del hidrógeno almacenado:

$$9310 \text{ Wh} = 335152 \text{ kJ} = 33,515 \text{ MJ}.$$

Además, la densidad energética del hidrógeno es de 120 MJ/kg (Thomas 2000).

Se puede con estas informaciones calcular el peso de hidrógeno contenido en 3347L (Ecuación 27):

$$\text{Peso de } H_2 = \frac{33,515 \text{ [MJ]}}{120 \text{ [MJ/kg]}} = 0,279 \text{ kg} \quad \text{Ecuación 28}$$

### 7.5.2 Hidrógeno a presión: Cálculo del volumen equivalente

Se va a calcular el volumen equivalente cuando el hidrógeno se comprime a presión, a 700 bares, 350 bares y 300 bares, incluyendo el factor de compresibilidad Z que se encuentra con la Ecuación 10.

El volumen equivalente bajo presión se calcula mediante la Ecuación 19:

$$V_{\text{real a presión}} = V_{\text{ideal a presión}} \times Z = \left( \frac{3347L}{\text{Presión}} \right) \times Z \quad \text{Ecuación 29}$$

Se hace una hoja de cálculo (Anexo 4, hoja de cálculo 3) para encontrar todos los factores de compresibilidad y volúmenes equivalentes:

Tabla 15: Factores de compresibilidad y volúmenes de hidrógeno a varias presiones

Variable	Valor	Unidades
Litros de H2 requeridos (a condiciones ambientes)	3347	L
kg de H2 almacenado	0,2793115	kg
Factor de compresibilidad Z para 700bares a 300K	1,43397865	
Factor de compresibilidad Z para 350bares a 300K	1,21698933	
Factor de compresibilidad Z para 300bares a 300K	1,18599085	
Volumen bajo 700 bares	6,85651399	L
Volumen bajo 350 bares	11,6379757	L
Volumen bajo 300 bares	13,2317963	L

## 7.6 ESCOGENCIA DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO

Fueron presentados los varios métodos existentes de almacenamiento de hidrógeno, el avance de esas tecnologías, sus respectivas perspectivas desarrollo al igual que sus ventajas y desventajas. Se destacan dos tecnologías, el almacenamiento en tanque a alta presión y el almacenamiento en hidruros metálicos, eso permite analizar el mercado y elegir la solución más adecuada para el proyecto. tabla

Se construirá una tabla comparativa entre esas dos soluciones técnicas, tomando en cuenta todas las consideraciones de diseño, para una cantidad de hidrógeno a almacenar de 3347 litros de hidrógeno a condiciones ambiente, equivalentes a 9310Wh.

Luego, se utilizará para esta selección la herramienta “Tabla multi-criterios”, que utiliza la ponderación de los criterios de diseño y una calificación de los mismos para lograr clasificar las soluciones

### **7.6.1 Presentación y aplicación de la herramienta Tabla Multi-criterios**

Se construye una tabla cuyas columnas contienen los criterios de diseño que influyen en la selección (max. 6 criterios) y en las filas, las soluciones elegidas (máximo 4). A esos criterios se atribuye una ponderación, sobre una escala de rango a elegir.

Una vez construida la tabla, se va a atribuir una nota a cada solución sobre cada criterio, por al menos 2 participantes para que esta notación y el resultado sean menos subjetivo. Los participantes deben ser averiguados de los datos del estudio para notar. Cada nota en cada casilla se ve ponderada por la ponderación respectiva de cada criterio correspondiente, y al final se suman las casillas de cada columna. La solución que tiene la suma la más alta será entonces la más adecuada, pero se necesita un análisis suplementario para verificar este punto.

#### Precio (2013):

Ver sección 7: la solución la menos cara es el almacenamiento sobre 350 bares (13 US\$/kWh), seguido por el a 700 bares (13 US\$/kWh) y finalmente el almacenamiento en los MOF (43 US\$/kWh).

Eso da una idea general del precio de los tanques pero no se pudo obtener el precio real de las soluciones vendidas por constructores en el plazo necesitado.

#### Volumen y peso de las soluciones:

- Tanques a presión tipo IV, 300 bares (CTS Energy Tanques) :

Para almacenar 3347L a 300 bares, se necesita un tanque de 13,23L de hidrógeno bajo presión. Se necesita un tanque estándar de 9L del fabricante *CTS Energy Tanques*, equivalente a 2277L de hidrógeno a condiciones ambiente, más uno de 6L equivalente a 1517L por un total de 4544L.

- Tanques a presión tipo III, 350 bares (Worthington):

Para almacenar 3347L a 350 bares, se necesita un tanque de ~11,64L de hidrógeno comprimido. Este fabricante solo propone una solución de 29,9L de hidrógeno, equivalente a 8600L de hidrógeno a condiciones ambiente (“Worthington High Pressure Vessel - 29,9L” 2016).

- Tanques a presión tipo III o IV (idealmente tipo IV, peso menor) , 700 bares (prototipo) :

Para almacenar 3347L a 700 bares, se necesita un tanque de 6,85L de hidrógeno comprimido.

No se encontraron tanques de almacenamiento a 700bares del mercado para una cantidad equivalente, pero se va a poner como ejemplo un tanque de marca Faber, que almacena 38L (equivalente a 18550L.

- Tanques de hidruros metálicos (PragmaIndustries):

Para almacenar esta cantidad en hidruros metálicos, se necesitan 2 tanques estándares de Pragmaindustries (no existe la capacidad estándar de 3000L), con capacidades respectivas de 2000L y 1500L, aquel de 2000L con dimensiones: Ø180 x L480 mm y pesa 25kg, y el 500L de Ø145 x L284mm y pesa 12kg (“Réservoirs D’hydrogène – Fuel Cells Hydrogen Energy – Pragma Industries” 2016).

Se puede construir la tabla comparativa (conteniendo solo soluciones estándares del mercado, el tanque 700 bares será un prototipo):

Tabla 16: Tabla comparativa de las soluciones de almacenamiento (del mercado)

Soluciones Criterios	Tanques de hidruros metálicos (PragmaIndustries)	Tanque alta presión type III, 350 bares (Worthington)	Tanque alta presión type IV, 300 bares (CTS Energy Tanques)	Tanque alta presión type IV, 700bares (Faber)
Capacidad de almacenamiento equivalente	3500L	8600L	4544L	18550L
Peso_tanque	25kg + 12kg = 37kg	18,8kg (con muy alta capacidad)	4,5kg + 3,3kg = 7,8kg	28kg
Volumen_tanque	Ø180 x L480 mm + Ø145 x L2840 mm	Ø305x L700 mm	Ø180x L538 mm + Ø158x L465 mm	Ø246 x L...
Precio del tanque (calculado)	\$43 x #kWh	~\$13 x #kWh	\$13 x #kWh	\$17 x #kWh

### Condiciones de utilización y seguridad

#### - Tanques de hidruros metálicos

Como se ha visto previamente, los tanques de hidruros metálicos son de tecnología bastante nueva. De las aleaciones utilizadas dependen la relación de peso de H2 almacenado/kg de aleación, la temperatura de uso etc.

↑ Los tanques de hidruros metálicos son mucho menos susceptibles de explotar o de inflamarse, el hidrógeno siendo almacenado a presión ambiente y capturado en la estructura del hidruro.

Igualmente la temperatura de uso puede ser ambiente (Pregassame, Barral, and Letellier 2006).

↑ La recarga de esos tanques no necesita herramientas muy caras, la presión de carga siendo de una atmosfera.



↓ La reacción de descarga del hidrógeno es endotérmica por este tipo de hidrógeno. La aleación donde está almacenado el hidrógeno (o sea el hidruro metálico) necesita recibir calor para descargar el hidrógeno a flujo constante, eso implica calentar el tanque utilizando por ejemplo el calor de la celda de combustible (Hwang 2012), pero es bastante complejo saber el calor generado a cualquier momento, y suministrar exactamente el calor requerido.

- **Tanques a alta presión**

↑ Los tanques a presión no presentan restricción por la descarga del hidrógeno, la descarga no produce calor ni pide calor. Solo se necesita un regulador de presión (válvula...)

↓ El hidrógeno siendo almacenado alta presión, la carga de esos tanques necesita una instalación muy costosa (Melaina and Penev 2013). La instalación de esas estaciones beneficia del apoyo de los constructores automóbiles como Toyota, Hyundai etc. que buscan la democratización de esta tecnología (para vender sus carros).

↓ La alta presión de este medio de almacenamiento causa problemas y riesgos en caso de accidente donde el tanque viene a romperse. El hidrógeno, además sobre presión, tiene una alta inflamabilidad y puede provocar explosiones. Por eso las pruebas que deben pasar esos tanques son muy estrictas.

Construcción de la tabla:

Tabla 17: Tabla multi-criterios de selección del sistema de almacenamiento

<b>Soluciones</b> <b>Criterios</b>	<b>Tanques de hidruros metálicos</b>	<b>Tanques sobre presión</b>
Peso_tanque/H2 almacenado Ponderación : 3	(1)*3	(3)*3
Volumen_tanque/H2 almac. Ponderación : 3	(2)*3	(3)*3
Precio del tanque Ponderación : 3	(1)*3	(3)*3
Seguridad de almac. Ponderación : 3	(3)*3	(2)*3
Condiciones de uso (Temperatura, P...) Ponderación : 2	(2)*2	(2)*2
<b><u>Total :</u></b>	<b>25</b>	<b>37</b>

= (Nota)\*Ponderación

Con esas consideraciones y a conocimiento del documento 3.1, que nos da las ventajas y desventajas de cada solución, se escoge el **almacenamiento a presión**. Aunque el punto de la seguridad y de la carga de esos tanques sea una debilidad para esta tecnología, las normas técnicas de seguridad muy estrictas que se aplican y el actual desarrollo al nivel mundial de esta tecnología en los carros (Toyota, Hyundai...) deja pensar que es la solución más viable a la fecha de hoy.

Además para esta misma solución se tienen varias posibilidades, es decir varias presiones diferentes de almacenamiento (300, 350, 700 bares) que implican cambios en el tamaño, peso, capacidad de almacenamiento, seguridad, precio etc. del tanque. La escogencia de la presión de almacenamiento se hará con consideraciones del mercado existente, según los precios, y modelos estándares correspondiendo a la necesidad de almacenamiento.

## 7.6.2 Selección del modelo de tanque a presión y del sistema de regulación

### 7.6.2.1 Selección del tanque

Se necesitan 3347L de hidrógeno a condiciones ambientes.

Se puede ver con la Tabla 15 y la Tabla 16 que la solución más compacta es obviamente el almacenamiento bajo 700 bares. Sin embargo, no se pudo encontrar tanques del mercado con un número de litros adecuado a la necesidad (~6,85L). Se va a suponer que se puede hacer un tanque al pedido (tipo III o IV), y se modelará este tanque en SolidWorks para tener una idea previa del volumen que ocupa. El tanque debe tener un volumen de 6,85L.

El diseño de esos tanques alta presión siendo un proceso muy complejo, y dado que se utiliza fibra de carbono para reforzar los tanques, es necesario tomar en cuenta las dimensiones (diámetro) de los tanques del mercado, para conocer los límites etc. de esta tecnología.

Los tanques 700 bares del mercado son diseñados para uso en carro, así que tienen volúmenes de 38L, 48L... sin embargo, se puede tomar el diámetro de esos tanques como el diámetro límite aceptable con esta tecnología, el diámetro siendo la dimensión que condiciona la resistencia.

Tabla 18: Tanques 700bares de marca Faber

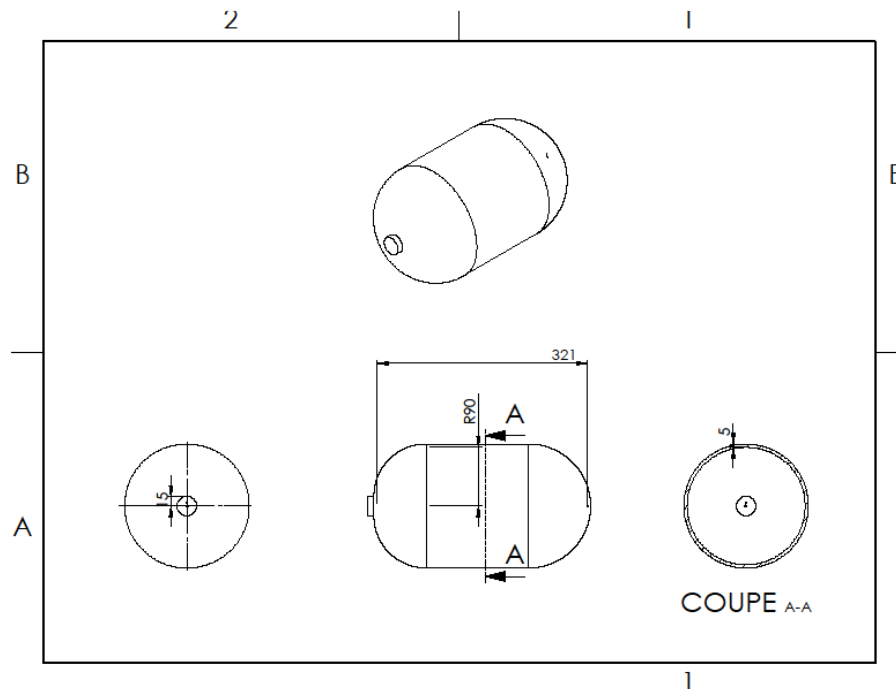
Capacidad de agua (litros)	Diámetro Nominal (mm)	Estandar / Regulaciones	Presión (bar)	Tipo
38	246	EC 79/2009	700	Tipo 3 ( Fibro de carbono)
39	346	EC 79/2009	700	Tipo 3 ( Fibro de carbono)

Fuente: ("Faber Cylinders" 2016)

Los diámetros de los tanques Faber pueden ser considerados como el máximo para esta tecnología, por precaución.

Luego, se hizo en Solidworks un tanque con las dimensiones adecuadas para este volumen (6,85L), con objetivo tener una idea del volumen ocupado y de la ubicación posible del tanque en el escúter (plano en Anexo 9):

Ilustración 22: Plano del tanque 700 bares



### 7.6.2.2 Sistemas de regulación

El tanque a presión debe ser acoplado a un sistema de regulación del flujo que va a suministrar así como de la presión del tanque.

Es difícil encontrar información sobre esos componentes bastante específicos, la solución más eficiente sería pedir al fabricante del tanque elegido cuales son las válvulas más adecuadas (pedido a realizar con un proyecto más adelantado, los fabricantes casi no contestan si no tienen compra segura).

- El fabricante OMB (“Hydrogen Valves - OMB Saleri S.p.A.” 2016) propone una gama de productos adaptados a presiones de 700 bares tal que válvula de tanque (OTV, que integra reguladores de presión, válvula anti-retorno y conexiones alta presión), válvula anti-retorno (HCR) y válvula de seguridad térmica (PRD).

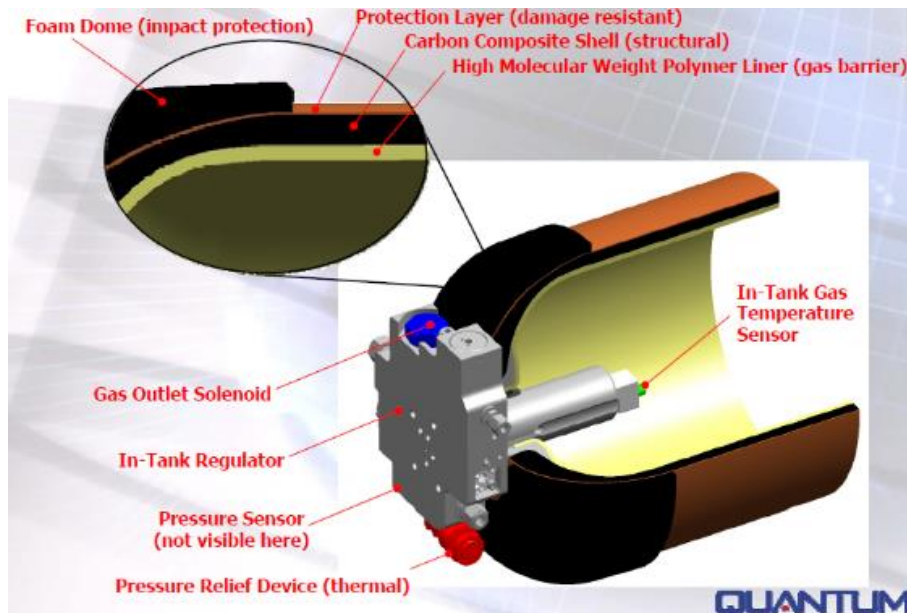
*Ilustración 23: Válvula OCV 700 y otras válvulas disponibles*



*Fuente :* (“Hydrogen Valves - OMB Saleri S.p.A.” 2016)

- El fabricante de tanques alta presión (700 bares) QUANTUM (Fuel and Technologies 2004) propone tanques que vienen con válvula integrada, con las mismas características que OMB :

*Ilustración 24: Sistema de regulación Quantum*



*Fuente :* (Fuel and Technologies 2004)

## 8. IMPLEMENTACIÓN PREVIA DE LOS COMPONENTES ELEGIDOS

En los capítulos precedentes fueron elegidas la celda de combustible y el tanque de almacenamiento. Con las dimensiones dadas en los catálogos de los fabricantes, se pueden modelar en SolidWorks, y ubicarlos en el modelo 3D del escúter.

- El modelo 3D fue obtenido por modificación del modelo de otro escúter, utilizando el software Blender para la edición de la malla y posteriormente exportado a SolidWorks mediante formato DXF. Se logra obtener un modelo bastante similar al del BWS 125.
- El chasis del BWS 125 fue modelado en SolidWorks con medidas tomadas directamente del chasis original del BWS 125. Con esas medidas, obtenidas por triangulación, es decir midiendo sobre los 3 ejes, definiendo puntos de tres distancias a otros ya conocidos, se hizo la mitad del chasis para aprovechar la simetría del mismo, incluyendo los puntos de la suspensión trasera y del brazo oscilante.
- Los componentes celda de combustible y tanque fueron modelados con respeto a las dimensiones dadas en los catálogos de fabricantes. Se buscó la ubicación óptima de esos componentes en el modelo, considerando que :
  - El tanque debe ser ubicado a dentro de la estructura del chasis, para beneficiar de la protección de los tubos principales en caso de accidente.
  - Tanque y celda van a ser conectados
  - El diseño de la celda tiene que incluir los ventiladores/"blowers" que suministran aire a la celda y al mismo tiempo la enfrían necesarios. En la celda HFC las dimensiones de fabricante incluyen esos ventiladores pero no es el caso de la Ballard. Entonces, se tiene que agregar ~3cm a la anchura de la Ballard para esos ventiladores.
  - Se tiene que dejar un espacio consecuente para las batería

El tanque se puede ubicar de manera óptima debajo de la parte del chasis que sostiene el asiento, para aprovechar de la protección de los tubos principales. Esta ubicación tiene la ventaja de dejar un espacio consecuente para la celda de combustible, en lugar de la bodega. En este espacio, la celda dispone de una buena alimentación en aire y está protegida. También puede ser conectada fácilmente con el tanque, y queda espacio para el controlador, el conversor DC/DC etc.

**Nota:** En este diseño previo no figuran los componentes tales como la válvula reguladora, las conexiones entre tanque y celda de combustible así como las fijaciones al chasis:

Ilustración 25: Ubicación del tanque y de la celda HFC H-1000 entre chasis y carrocería, y espacio para motor (rojo) y baterías (azul)

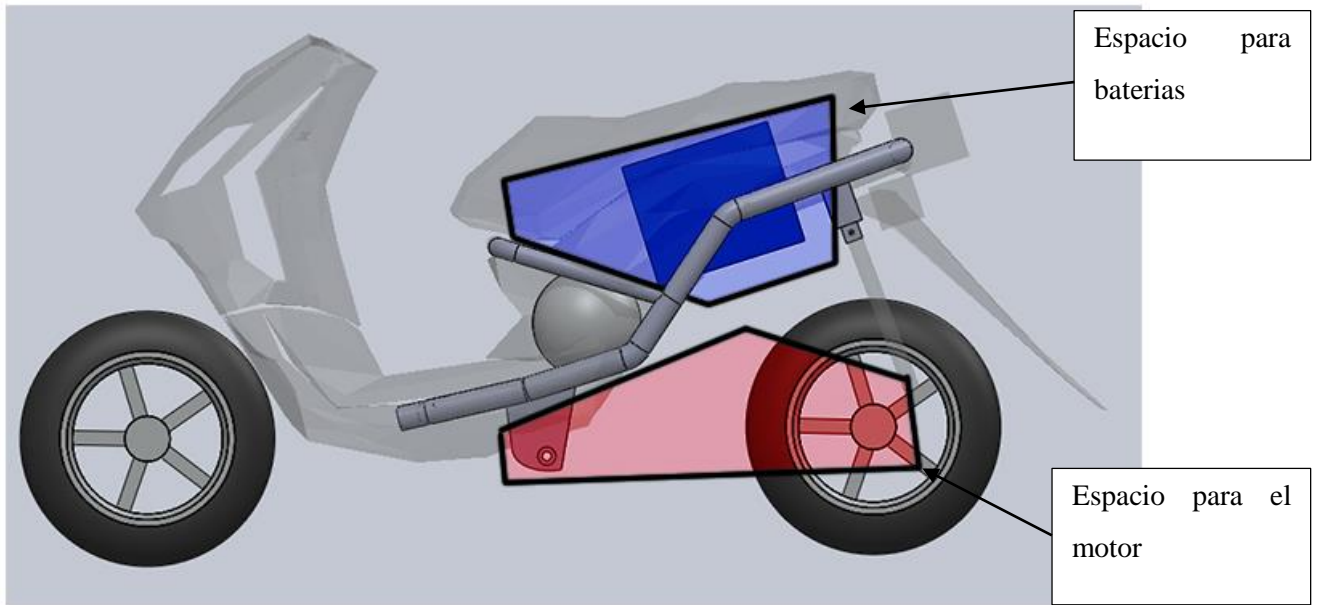
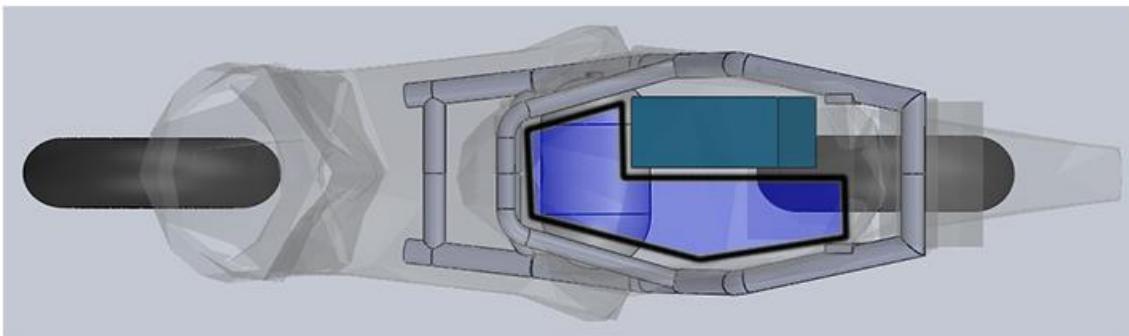


Ilustración 26: Ubicación del tanque y de la celda HFC H-1000 entre chasis y carrocería, y espacio para las baterías (azul)



## 9. CONCLUSIONES

En el marco del proyecto “Estudio de la implementación de una celda de combustible en una motocicleta tipo escúter” con código 8-16-2, apoyado por la Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión de la UTP, se logró realizar un análisis preliminar de la implementación de los sub-sistemas de celda de combustible y almacenamiento de hidrogeno para el escúter elegido, llegando a las siguientes conclusiones:

- La motocicleta escogida para la implementación de la celda de combustible es la **Yamaha BWS 125**, la cual no solo presenta ventajas por su alto porcentaje de participación en el parque automotor colombiano sino también por su disponibilidad de espacio, además, es una de las motocicletas que tiene mayor demanda no solo en Colombia sino también en países europeos (comercializada en Europa como Yamaha Zuma 125) lo cual hace la implementación propuesta más atractiva también en mercados internacionales.
- Con la modelización de la potencia requerida y el ciclo de manejo ECE-15, fue posible calcular los requerimientos de potencia y velocidad, cuyos resultados permitieron escoger una celda de combustible con mayor potencia para condiciones más exigentes.
- Se requiere 1kW de potencia a la salida de la celda de combustible. Cuando se considera una potencia nominal cercana de la requerida, la **HFC H-1000** ofrece la mejor relación entre peso, volumen y potencia.
- Resulta del estudio que se necesitan **3347L** de hidrógeno a condiciones ambientes. El método de almacenamiento más adecuado al uso (relación peso/volumen, peso/capacidad) es el almacenamiento a alta presión (700 bares). Tomando en cuenta el factor de compresibilidad del hidrógeno, se encuentra un volumen requerido del tanque de 6,85L, para una autonomía de 170km.
- Se hizo el ensamblaje preliminar de componentes en SolidWorks, de manera que se pueda analizar y aprovechar al máximo el espacio disponible. Con el diseño propuesto, se logra almacenar la cantidad de hidrógeno requerida dentro de los límites del chasis para contar con un alto nivel de protección al mismo, de igual manera la ubicación de la celda permite la implementación futura de los otros componentes (motor y baterías) en el espacio adyacente.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- “Asia Pacific Fuel Cell Technologies, Ltd. --Fuel Cell Systems and Fuel Cell Powered Vehicles.” 2016. Accessed April 16. [http://www.apfct.com/goods\\_cat.php?act=view&no=31](http://www.apfct.com/goods_cat.php?act=view&no=31).
- Berezow, Alex. 2016. “Scooters: Europe’s Pollution Machines - Forbes.” Accessed May 18. <http://www.forbes.com/sites/alexberezow/2014/05/14/scooters-europes-pollution-machines/#6cfd39cd69fb>.
- *Compendium of Hydrogen Energy: Hydrogen Use, Safety and the Hydrogen Economy*. 2015. Elsevier Science. <https://books.google.com/books?id=vhCpBAAAQBAJ&pgis=1>.
- Doyle, Inventors Michael P, Glenn Dale, Hojae Choi, and B City. 2012. “(12) UnIted States Patent” 2 (12).
- Energy, Us Department of. 2011. “Hydrogen Storage.” *Fuel Cell Technologies Program*, 2. [http://www.afdc.energy.gov/pdfs/doe\\_h2\\_storage.pdf](http://www.afdc.energy.gov/pdfs/doe_h2_storage.pdf).
- “Faber Cylinders.” 2016. Accessed May 26. [http://www.faber-italy.com/list/hydrogen\\_1.asp](http://www.faber-italy.com/list/hydrogen_1.asp).
- Faidutti, Via Monsignor. n.d. “CTS Energy Srl,” 2–3.
- Francescato, P., A. Gillet, D. Leh, and P. Saffr?? 2012. “Comparison of Optimal Design Methods for Type 3 High-Pressure Storage Tanks.” *Composite Structures* 94 (6). Elsevier Ltd: 2087–96. doi:10.1016/j.compstruct.2012.01.018.
- “Fuel Cell Setup.” 2016. Accessed April 12. <http://www.nedstack.com/technology/fuel-cell-setup>.
- “Fuel Cells 2000 - Types Of Fuel Cells.” 2016. Accessed April 12. [http://www.fuelcells.org/base.cgim?template=types\\_of\\_fuel\\_cells](http://www.fuelcells.org/base.cgim?template=types_of_fuel_cells).
- Fuel, Quantum, and Systems Technologies. 2004. “High-Pressure Hydrogen Storage Systems.”
- “G-Stor™ H2 Hydrogen-Storage Cylinders.” 2016. Accessed April 8. <http://www.luxfercylinders.com/products/alternative-fuel/dynecell>.
- “High-Pressure Composite Cylinders - Worthington Industries.” 2016. Accessed March 17. <http://worthingtonindustries.com/Products/Industrial-Products/Industrial-Gas/High-Pressure-Composite>.
- “High-Pressure Hydrogen Tank Testing | Department of Energy.” 2016. Accessed April 14. <http://energy.gov/eere/fuelcells/high-pressure-hydrogen-tank-testing>.
- Hirscher, Michael, and a Borgschulte. 2009. *Handbook of Hydrogen Storage. Ceramic*. doi:10.1002/9783527629800.
- “Honda Environmental Reports | Vehicle Report | Honda.” 2016. Accessed May 18. [http://www.honda.com/environment/our-environmental-reports?id=fuel\\_cells\\_fcx](http://www.honda.com/environment/our-environmental-reports?id=fuel_cells_fcx).
- Hwang, Jenn Jiang. 2012. “Review on Development and Demonstration of Hydrogen Fuel Cell Scooters.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (6). Elsevier Ltd: 3802–15. doi:10.1016/j.rser.2012.03.036.



- “Hydrogen Cars Fuel Cell Vehicles and Infrastructure.” 2016. Accessed May 26. <http://www.hydrogencarsnow.com/>.
- “Hydrogen Energy and Fuel Cell Technology.” 2016. Accessed April 12. <http://www.renewableenergyworld.com/hydrogen/tech.html>.
- “Hydrogen in Transport: Scooting around the Islands – CleanTech Magazine | Acta S.p.a.” 2016. Accessed April 16. <http://www.actaspa.com/hydrogen-in-transport-scooting-around-the-islands-cleantech-magazine/>.
- “Hydrogen Storage | Department of Energy.” 2016. Accessed April 12. <http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>.
- “Hydrogen Valves - OMB Saleri S.p.A.” 2016. Accessed May 11. <http://www.omb-saleri.it/eng/automotive-hydrogen.php>.
- “Hydrogen, H<sub>2</sub>, Physical Properties, Safety, MSDS, Enthalpy, Material Compatibility, Gas Liquid Equilibrium, Density, Viscosity, Flammability, Transport Properties.” 2016. Accessed May 19. <http://encyclopedia.airliquide.com/Encyclopedia.asp?GasID=36#GeneralData>.
- Investigator, Principal, Neel Sirosh, and Fuel Storage. 2002. “Hydrogen Composite Tank Program.” *Review Literature And Arts Of The Americas* 2000: 1–7.
- Lin, Bruce. 2000. “Conceptual Design and Modeling of a Fuel Cell Scooter for Urban Asia.” *Journal of Power Sources* 86 (1): 202–13. doi:10.1016/S0378-7753(99)00480-2.
- Long, P I Jeffrey, Lawrence Berkeley, Nat Inst, and General Motors Co. 2015. “2015 DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Review Hydrogen Storage in Metal-Organic Frameworks,” no. June.
- “McPhy - La Solution McPhy.” 2016. Accessed March 17. <http://www.mcphy.com/fr/technologies/stockage-hydrogene-solide/solution-mcphy/>.
- Melaina, M, and M Penev. 2013. “Hydrogen Station Cost Estimates,” no. September.
- “Metal Hydrides.” 2016. Accessed March 17. <http://fuelcellsetc.com/store/fuel-cells-and-accessories/Metal-Hydrides>.
- Moseley, P.T. 2001. “Fuel Cell Systems Explained.” *Journal of Power Sources* 93 (1-2): 285. doi:10.1016/S0378-7753(00)00571-1.
- Moysan, Isabelle. 2005. “Le Stockage Embarqué de L ’ Hydrogène.” *Clefs CEA* 50/51: 56–60.
- Notes, Electric Drives. 2013. “Electric Drives,” 122–36. doi:10.1007/978-1-84882-425-6.
- Orimo, Shin-Ichi, Yuko Nakamori, Jennifer R Eliseo, Andreas Züttel, and Craig M Jensen. 2007. “Complex Hydrides for Hydrogen Storage.” *Chemical Reviews* 107 (10): 4111–32. doi:10.1021/cr0501846.
- Pourcelly, Gérald. 2013. “Stockage de L’hydrogène , Piles À Combustible.” [http://www2.cnrs.fr/sites/communiqu/fichier/gp\\_presentation.pdf](http://www2.cnrs.fr/sites/communiqu/fichier/gp_presentation.pdf).
- Pregassame, Sitra, Katia Barral, and Jean-yves Letellier. 2006. “Modeling of the Charging Step

of Metal Hydrides Tanks for Hydrogen Storage.” *Proceedings of the 16th World Hydrogen Energy Conference, 13-16 June 2006, Lyon (France)*, no. June: 1–8.

- “PRODUCCION DE MOTOCICLETAS POR ENSAMBLADORA Y MODELOS 1977-2010.” 2016. Accessed May 3. <http://www.publimotos.com/es/images/archivos/Produccion-de-motocicletas-por-ensambladora-y-modelos-motos-desde-el-1977-hasta-el-2010.pdf>.
- “Producción Y Venta de Motocicletas En Colombia Primer Semestre de 2015 (PIN).” 2016. Accessed May 3. <http://www.publimotos.com/es/index.php/noticias/reportajes/128-produccion-y-venta-de-motocicletas-en-colombia-primer-semester-de-2015-pin>.
- “PubliMotos | Revista de Motos - Inicio.” 2016. Accessed May 16. <http://www.publimotos.com/es/>.
- “Réservoirs D’hydrogène – Fuel Cells Hydrogen Energy – Pragma Industries.” 2016. Accessed March 17. <http://www.pragma-industries.com/fr/products/hydrogen-storage/>.
- “RUNT 2012 Universidad Tecnologica de Pereira.” n.d.
- Shang, Jin Lei, and Bruno G. Pollet. 2010. “Hydrogen Fuel Cell Hybrid Scooter (HFCHS) with Plug-in Features on Birmingham Campus.” *International Journal of Hydrogen Energy* 35 (23). Elsevier Ltd: 12709–15. doi:10.1016/j.ijhydene.2010.08.075.
- “Shell to Install Nationwide Network of Hydrogen Vehicle Fuelling Pumps in Germany | Shell Global.” 2016. Accessed April 16. <http://www.shell.com/media/news-and-media-releases/2015/shell-to-install-nationwide-network-hydrogen-vehicle-fuelling-pumps-germany.html>.
- Specification, Product. 2011. “1020ACS Fuel Cell Stack 1020ACS Fuel Cell Stack Product Specification.”
- Sripakagorn, Angkee, and Nartnarong Limwuthigrajirrat. 2009. “Experimental Assessment of Fuel Cell/supercapacitor Hybrid System for Scooters.” *International Journal of Hydrogen Energy* 34 (15). Elsevier Ltd: 6036–44. doi:10.1016/j.ijhydene.2009.04.059.
- Ssl, Mark. 2008. “Commercially Available Fuel Cell Products Commercially Available Fuel Cell Products,” 1–3.
- “THE DIFFERENT TECHNOLOGY OF CYLINDERS.” 2016. Accessed April 7. [http://www.ullit.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=49&Itemid=49&lang=en](http://www.ullit.com/index.php?option=com_content&view=article&id=49&Itemid=49&lang=en).
- The Pollet PEM Fuel Cell Group. 2014. “Hydrogen Data” C (October): 6–7. [http://www.brunopolletresearch.com/Energy\\_Data.pdf](http://www.brunopolletresearch.com/Energy_Data.pdf).
- Thomas, George. 2000. “Overview of Storage Development DOE Hydrogen Program: Safe, Efficient and Cost-Effective Storage Is a Key Element in the Development of Hydrogen as an Energy Carrier,” 1–14.
- “Toyota Mirai – The Turning Point.” 2016. Accessed April 7.

<https://ssl.toyota.com/mirai/fcv.html>.

- “Tucson Fuel Cell | A Hydrogen Fuel Cell Car | HyundaiUSA.” 2016. Accessed April 7.  
<https://www.hyundaiusa.com/tucsonfuelcell/index.aspx>.
- “TUFFSHELL® - Hexagon Lincoln.” 2016. Accessed March 17.  
<http://www.hexagonlincoln.com/product-lines/tuffshell#tuffshellhydrogen>.
- “Worthington High Pressure Vessel - 29,9L.” 2016 1: 319732.

## 11. ANEXOS

### ANEXO 1: Producción de motocicletas por ensambladora y modelos motos desde el 1977 hasta el 2010 (Hoja Excel)

#### ANEXO 2: ANALISIS DE MERCADO: Tablas por marca

##### INCOLMOTO (Yamaha):

Modelo	1977-2010	2012	2013	2014	Semestre 1 2015	TOTAL
T110 EDR	49990 Unidades	X	X	X	X	49990
YW 100	82841 Unidades	X	X	X	X	82841
YW 125 (BWS)	35002 Unidades	28673	22789	11954	3600	102018
YW 125X	X	X	18238	36466	19269	73973

##### SUZUKI:

Modelo	1977-2010	2013	Semestre 1 2015
FD115 (BEST)	107070 Unidades	X	X
FD125 (BEST)	80236 Unidades	X	X
FR80 (fin prod. 1996)	87125 Unidades	X	X

##### AUTECO (Kymco):

Modelo	1977-2010		2012	2013	2014	Semestre 1 2015	TOTAL
ACTIV	33504 Unidades	X	X	X	X	X	33504
AGILITY + AGILITY DIGITAL	23943 Unidades	16934	28481	10851	16031 + 4735(modelo digital)=	5428+6459 (modelo digital)= 11887	92096
XCD	22789 Unidades	X	X	X	X	X	22789
FLY		X		X	10296	11447	21743

**HONDA:**

<b>Modelo</b>	<b>1977-2010</b>	<b>2013</b>	<b>Semestre 1 2015</b>
C70	50830 Unidades	X	X
C90	47317 Unidades	X	X
ELITE			
Click			

**AKT:**

<b>Modelo</b>	<b>1977-2010</b>	<b>2013</b>	<b>Semestre 1 2015</b>
AK100	37850 Unidades	X	X
AK110S	64966 Unidades	X	X

**ANEXO 3:** Documentación Heinzmann Motors (.pdf)

**ANEXO 4:** Ciclo de manejo ECE-15 y explotación del modelo matemático (Hoja de cálculo 1) (.xls)

**ANEXO 5:** Documentación Ballard FCgen-1020ACS (.pdf)

**ANEXO 6:** Documentación detallada Ballard FCgen-1020ACS (.pdf)

**ANEXO 7:** Documentación Horizon FCS-C1000 (.pdf)

**ANEXO 8:** Documentación Powercell S1 (.pdf)

**ANEXO 9:** Plano tanque 700bares 6,86L (.pdf)