

**DIMENSIONADO DE UNA FUENTE HÍBRIDA COMPUESTA DE PILAS A
COMBUSTIBLE TIPO PEM Y SUPERCONDENSADORES CON CONEXIÓN
DIRECTA**

ANDRÉS MAURICIO JÁCOME GARCIA



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
MAGÍSTER EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
BUCARAMANGA
2018**

**DIMENSIONADO DE UNA FUENTE HÍBRIDA COMPUESTA DE PILAS A
COMBUSTIBLE TIPO PEM Y SUPERCONDENSADORES CON CONEXIÓN
DIRECTA**

ANDRÉS MAURICIO JÁCOME GARCIA

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería Eléctrica

Director:

JAVIER ENRIQUE SOLANO MARTÍNEZ

Ph.D en Ingeniería Eléctrica

Codirectores:

LOÏC BOULON

Ph.D en Ingeniería Eléctrica

CLÉMENT DÉPATURE

Ph.D en Ingeniería Eléctrica

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2018**

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander (UIS) por la oportunidad brindada y apoyo económico para la realización de esta maestría. Además, me gustaría agradecer de manera especial al Pr. Javier Solano por la orientación que he recibido tanto personal como profesional durante el desarrollo de este trabajo de investigación. Ha sido un enorme privilegio haber trabajado nuevamente con él.

Debo también agradecer al Pr. Loïc Boulon y al Dr. Clément Dépature de la Universidad de Quebec en Trois-Rivières (UQTR), quienes también aportaron de manera significativa en este trabajo de investigación durante mi estancia en Canadá.

Gracias a mis compañeros del grupo de investigación GISEL de la UIS por el apoyo, consejos y palabras de ánimo que fueron fundamentales para culminar con este trabajo.

DEDICATORIA

Primero a Dios, mi mamá, mi papá y mi hermano.

Segundo a mello y a mi novia.

Andrés Mauricio Jácome García

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. OBJETIVOS	17
1.1. OBJETIVOS GENERALES	17
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2. MODELADO DE UNA FUENTE FC/SC CON CONEXIÓN DIRECTA.....	18
2.1 MODELADO DE LA FC.	18
2.2. MODELADO DEL SC.....	22
2.3. MODELADO DE LA CARGA.....	24
2.4. MODELADO DE LA CONEXIÓN ENTRE LAS FUENTES.....	26
2.5. FUNCIÓN COSTO DE HIDRÓGENO CONSUMIDO	26
2.6. FUNCIÓN COSTO DE DEGRADACIÓN	27
2.7. FUNCIÓN COSTO DE RECARGA ADICIONAL AL FINAL DEL CICLO	28
2.8. INTEGRACION DEL MODELO DE SIMULACIÓN.....	28
3. METODOLOGÍA DE DIMENSIONADO DE UNA FUENTE HÍBRIDA CON CONEXIÓN DIRECTA.	31
3.1 METODOS DE REPARTO DE POTENCIA	31
3.2 METODOLOGIA DE DIMENSIONADO PROPUESTA	33

4. CASO DE ESTUDIO DE LA METODOLOGÍA DE DIMENSIONADO.	35
4.1 DIMENSIONADO DEL BANCO DE SUPERCONDENSADORES	36
4.1.1 Evaluación de las posibles soluciones.....	39
4.1.1.1 Configuración 1. SC 8F.....	39
4.1.1.2 Configuración 2. SC 29F.....	40
4.1.1.3 Configuración 3. SC 58F.....	40
4.1.2 Costo de hidrógeno consumido	42
4.1.3 Costo de degradación.....	42
4.1.4 Costo de recarga al finalizar el ciclo	42
4.1.5 Función costo total.....	43
4.2 EVALUACIÓN DE LA FUENTE HÍBRIDA.....	43
4.2.1 Simulación de la fuente híbrida directa FC/SC.	44
4.2.2 simulación de la fuente híbrida fc/sc directa alimentando la carga	45
4.2.3 Implementación de la solución.....	47
5. CONCLUSIONES.....	50
6. RECOMENDACIONES.	51
BIBLIOGRAFÍA.....	52
ANEXOS.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pila a combustible tipo PEM	21
Figura 2. Supercondensador.....	23
Figura 3. Circuito eléctrico equivalente del supercondensador.....	24
Figura 4. NEMO	25
Figura 5. Estructura del vehículo eléctrico FC/SC	25
Figura 6. REM del sistema híbrido estudiado FC/SC con conexión directa.....	30
Figura 7. Modelo de simulación de la fuente híbrida.....	30
Figura 8. Método de reparto de potencia frecuencial.....	32
Figura 9. Método de reparto de potencia de banda	33
Figura 10. Método de reparto de potencia de pendiente	33
Figura 11. Perfil de potencia de NEMO	35
Figura 12. Configuraciones de SCs utilizadas	37
Figura 13. Resultado de la configuración 1.....	39
Figura 14. Resultado de la configuración 2.....	40
Figura 15. Resultado de la configuración 3.....	41
Figura 16. Conexión directa de la fuente híbrida FC/SC.....	45
Figura 17. Fuente híbrida con conexión directa alimentando una carga (TS).....	46
Figura 18. Distribución de potencia de la fuente híbrida	46
Figura 19. Diseño eléctrico del banco experimental	47
Figura 20. Banco experimental	48
Figura 21. Resultado experimental - Distribución de potencia (p.u.).....	49

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Modelo de la FC.....	21
Tabla 2. Lista de símbolos	22
Tabla 3. Pictogramas de la REM	29
Tabla 4. Parámetros del modelo de simulación	38
Tabla 5. Costo de H2 consumido.....	42
Tabla 6. Costo de degradación	42
Tabla 7. Costo de recarga adicional	43
Tabla 8. Resultados función de costo	43

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. CAP. 3 MODELO DE SIMULACIÓN EN MATLAB/SIMULINK DE LA FUENTE HÍBRIDA FC/SC CON CONEXIÓN DIRECTA.....	56
---	----

RESUMEN

TITULO: DIMENSIONADO DE UNA FUENTE HÍBRIDA COMPUESTA DE PILAS A COMBUSTIBLE TIPO PEM Y SUPERCONDENSADORES CON CONEXIÓN DIRECTA*.

AUTOR: ANDRÉS MAURICIO JÁCOME GARCIA, **

PALABRAS CLAVES: Dimensionado de una fuente híbrida, pila a combustible, supercondensadores, conexión directa

DESCRIPCIÓN: El objetivo principal de este trabajo es proponer una metodología de dimensionado para una fuente híbrida compuesta por una pila a combustible (FC) tipo membrana de intercambio protónico (PEM) y supercondensadores (SCs) con conexión directa.

La metodología utiliza como insumos un perfil de potencia de referencia y hojas de datos de FC y SCs disponibles comercialmente. Se simulan todas las posibles combinaciones FC-SC suministrando la potencia de referencia. Las combinaciones son evaluadas teniendo en cuenta tres criterios: la FC no es reversible y tiene límites en la magnitud de la potencia, la dinámica de potencia suministrada por la FC no puede ser mayor a la definida y la tensión del SC nunca debe exceder la nominal por razones de seguridad. Las soluciones que no cumplan los tres criterios son descartadas. Las soluciones admisibles son comparadas mediante una función objetivo que considera el costo del hidrógeno consumido, el costo de degradación y el costo de recarga adicional de los SCs al finalizar el ciclo. La solución con el menor costo es la seleccionada.

Como caso de estudio, se utiliza la metodología para dimensionar un banco de supercondensadores a ser conectado directamente con una PEMFC de 500W marca Horizon existente en el laboratorio de tracción eléctrica de la Universidad de Quebec en Trois-Rivières (UQTR), Canadá. Como perfil de referencia se utiliza un perfil a escala medido en un vehículo eléctrico híbrido real. Se considera el catálogo de supercondensadores Maxwell. Como resultado de la metodología se selecciona un banco de supercondensadores compuesto por dos módulos conectados en serie de 16V y 58F.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T). Director: Javier Enrique Solano Martínez. Profesor planta de la E3T

ABSTRACT

TITTLE: SIZING OF A HYBRID SOURCE COMPOSED OF A PEM FUEL CELL AND ULTRACAPACITORS WITH DIRECT CONNECTION*.

AUTHOR : ANDRÉS MAURICIO JÁCOME GARCIA,**

KEYWORDS: Sizing of a hybrid source, PEM fuel cell, ultracapacitors, direct connection

DESCRIPTION: The aim of this research work is to propose a sizing methodology for a hybrid source composed of a PEM fuel cell (PEMFC) and ultracapacitors (UCs) with direct connection.

The sizing methodology uses as inputs a reference power profile and datasheets from commercial FC and UCs. All FC-UC configurations supplying the reference power are simulated. These configurations are evaluated considering three criteria: FC is not reversible and has limits on the power magnitude, the dynamic FC power supplied cannot be higher than the defined maximal value and the UC voltage can never exceed its maximal voltage because of security reasons. Potential solutions are rejected if they do not respect the criteria. The accepted solutions performance is evaluated through an objective function. The objective function considers the hydrogen cost, the degradation cost and the additional hydrogen recharging cost at the end of the cycle. The lowest cost solution is selected.

The methodology is used to size a small-scale test bench of UCs to be directly connected to a Horizon 500W PEMFC. The power profile is obtained from collected measures using a real electric vehicle. Datasheets from Maxwell UCs are considered. The selected UCs corresponds to two modules connected in series of 16V, 58F, *i.e.*, the equivalent UC nominal value is 32V 29F.

* Research work

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T). Director: Javier Enrique Solano Martínez. Profesor planta de la E3T

INTRODUCCIÓN

La hibridación de fuentes de energía, e.g., pila a combustible (FC) con fuentes de potencia, e.g., supercondensadores (SCs) se realiza con el fin de aprovechar las ventajas de cada una, tales como: alta densidad de energía, alta densidad de potencia, capacidad de almacenamiento de energía, capacidad de recuperar energía (reversibilidad). Estas fuentes pueden conectarse en configuración indirecta/activa o directa/pasiva. En la configuración activa se conectan las fuentes empleando convertidores de potencia DC/DC. Esto permite diseñar y ejecutar un control asociado a una estrategia de gestión de energía. Sin embargo, los convertidores incrementan las pérdidas de energía, el volumen, el peso y el costo de la fuente híbrida. La configuración pasiva conecta de manera directa y en paralelo las fuentes, *i.e.*, sin el uso de la electrónica de potencia, por lo tanto, las fuentes comparten la misma tensión. Esta configuración posee la ventaja de ser una solución económica y menos compleja de implementar. Sin embargo, al no contar con convertidores no es posible definir la distribución de energía entre las fuentes. Por lo tanto, una metodología de dimensionado de las fuentes es necesaria para lograr una adecuada distribución de potencia.

Trabajos recientes han estudiado la conexión directa entre la FC y SCs. Garcia et al¹ analizan las características de la FC y SCs para obtener una distribución de potencia adecuada, basado en una distribución de frecuencia de la potencia entre la FC y los SCs. Silva et al² estudian la conexión directa FC/SCs mediante simulaciones e implementan un banco experimental para el estudio del efecto de

¹ GARCIA ARREGUI, Marcos. Theoretical study of a power generation unit based on the hybridization of a fuel cell stack and ultracapacitors. PhD thesis. Université de Toulouse. 2007.

² SILVA, Rosa. Contribution au pronostic de durée de vie des systèmes pile à combustible de type PEMFC. PhD thesis. Université du Québec à Trois-Rivières. 2013.

las altas corrientes sobre la degradación de la FC. Morin et al³ estudian las propiedades estáticas y dinámicas de la conexión directa FC/SCs a escala de cada celda del “stack” o apilamiento de la FC. Zhao et al⁴ comparan la conexión directa e indirecta para la aplicación a un vehículo. Los resultados de simulación muestran que la conexión directa permite aumentar la eficiencia global del sistema debido a la eliminación de los convertidores. Se puede observar que son pocos los trabajos relacionados al dimensionado de la fuente híbrida FC/SCs con conexión directa.

Este trabajo propone una metodología de dimensionado para una fuente híbrida FC/SCs con conexión directa. La metodología utiliza como insumos un perfil de potencia de referencia y hojas de datos de FC y SCs disponibles comercialmente. Se simulan todas las posibles combinaciones FC-SC suministrando la potencia de referencia. Las combinaciones son evaluadas teniendo en cuenta tres criterios: 1) $0 < P_{fc(t)} < P_{fc-max}$, *i.e.*, la potencia de la FC ($P_{fc(t)}$) debe ser positiva y no debe sobrepasar su potencia nominal (P_{fc-max}), 2) $\frac{dP_{fc(t)}}{dt} < dP_{fc-max}$, *i.e.*, la dinámica de la FC no debe ser mayor a la definida como valor máximo y 3) $u_{sc}(t) < u_{sc-max}$, *i.e.*, la tensión del SC ($u_{sc}(t)$) nunca debe exceder la nominal (u_{sc-max}) por cuestiones de seguridad. Las soluciones admisibles son comparadas mediante una función objetivo, la cual incluye el consumo de hidrógeno, la degradación de las fuentes y el costo de recarga de los SCs. La solución con el menor costo es la seleccionada.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: En el capítulo 1 se presenta los objetivos de este trabajo de investigación en el capítulo 2 se presenta el modelado de una fuente híbrida FC/SC con conexión directa, en el capítulo 3 se presenta la metodología de dimensionado para la fuente híbrida, en el capítulo 4 se evalúa la metodología de dimensionado para el diseño de un banco experimental a

³ MORIN, Benoît. Hybridation d'une pile a combustible par des supercondensateurs: vers une solution passive et directe. PhD thesis. Université de Toulouse. 2013.

⁴ ZHAO, Hengbing; BURKE, Andrew. Fuel cell powered vehicles using supercapacitors-device characteristics, control strategies, and simulation results. Fuel cell journal. [Online] Sept 2010. Vol. 10. [Cited: 19 Jan 2016] pp. 879-896. Available from Wiley online library.

ser implementado en la Universidad de Quebec en Trois-Rivières (UQTR), Canadá. En el capítulo 5 se presenta las conclusiones del trabajo y en el capítulo 6 se presentan algunas recomendaciones.

1. OBJETIVOS.

1.1. OBJETIVOS GENERALES

Proponer una metodología para dimensionar una fuente híbrida compuesta por pilas de combustible de membrana protónico (PEMFC) y supercondensadores (SC) con interconexión directa (sin el uso de la electrónica de potencia).

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar modelos de simulación para pilas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC) y supercondensadores (SC) con el fin de realizar una adecuada selección de los modelos.
- Simular una fuente híbrida conformada por una PEMFC y SC con interconexión directa (sin electrónica de potencia), esto permite estudiar el transitorio eléctrico cuando estas fuentes son conectadas directamente.
- Simular esta fuente híbrida alimentando una carga DC a través de un convertidor de potencia de tipo ideal para conocer la distribución de potencia entre las fuentes. La carga DC a utilizar será un perfil de potencia dinámico adquirido usando el laboratorio móvil (NEMO) del Instituto de Investigación sobre el Hidrógeno IRH en un ciclo alrededor del campus⁵.
- Evaluar el efecto de dimensionar SC sobre la distribución de potencia de la fuente híbrida.
- Proponer una metodología para dimensionar la fuente híbrida que consiste en variar el tamaño del SC usando un sistema de PEMFC constante con el fin de comparar y seleccionar el de menor costo de operación.
- Calcular la degradación de la PEMFC a partir de la función presentada en Dépature et al⁶.

⁵ MARX, Neigel. *Et al.* Degraded mode operation of multi-stack fuel cell systems. Vehicular Power and Propulsion Conference. [Online] Oct 2014. Vol. 6. [Cited: 16 Jan 2016] pp. 3-11. Available from IEEE Xplore. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

⁶ DEPATURE, Clément. *Et al.* IEEE VTS Motor vehicles challenges 2017 – Energy management of a fuel cell/battery vehicle. Vehicle Power and Propulsion Conference. [Online] Oct 2016. [Cited: 21 Jan 2016]. Available from IEEE Xplore. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

2. MODELADO DE UNA FUENTE FC/SC CON CONEXIÓN DIRECTA.

En este capítulo se presenta el modelado de una fuente pila a combustible (FC)/ supercondensadores (SCs) con conexión directa. Para ello, se presenta en la sección 2.1 el modelado de la FC, en la sección 2.2 se presenta el modelado de los SCs, en la sección 2.3 el modelado de la carga, en la sección 2.4 se presenta el modelado de la conexión entre las fuentes, en la sección 2.5 se presenta la función para estimar el costo de hidrógeno consumido por la FC, en la sección 2.6 se presenta la función para estimar el costo de degradación, en la sección 2.7 se presenta la función para estimar el costo de recarga adicional a los SCs y en la sección 2.8 se presenta la integración de los modelos.

2.1 MODELADO DE LA FC.

La pila a combustible (FC) es una fuente de conversión de energía, *i.e.*, realiza una conversión electroquímica para transformar la energía almacenada en el hidrógeno en electricidad. La FC de membrana de intercambio protónico (PEM) se caracteriza por su alta densidad de energía, alta eficiencia y cero emisiones de gases de efecto invernadero (Figura 1). Sin embargo, esta fuente de energía presenta dos limitaciones: 1) La PEMFC carece de capacidad para responder inmediatamente a cambios rápidos de carga, *i.e.*, respuesta dinámica lenta 2) Las PEMFCs no son fuentes reversibles, *i.e.*, no son capaces de recuperar y almacenar energía.

El modelo de la FC propuesto por Boulon *et al.*⁷ basado en ecuaciones diferenciales ofrece una descripción muy fina del fenómeno físico interno. Esto permite implementar reglas de control, estudiar las interacciones entre los componentes que conforman el sistema o realizar tareas de dimensionado. Este modelo se divide en tres partes: la parte electroquímica, la parte térmica y la parte de fluidos (suministro de aire e hidrógeno). El modelo normalizado es presentado en la Tabla 1. La nomenclatura correspondiente a las ecuaciones diferenciales del modelo FC se presenta en la Tabla 2.

La parte electroquímica representa a las reacciones que ocurren dentro de la pila. E^0 es una constante teórica y corresponde a la potencia química suministrada a la FC por el hidrógeno dividido por la corriente de la FC (i_{fc}). La constante E^{00} se denomina “tensión reversible de la celda” y está relacionada al concepto de energía libre de Gibbs bajo condición estándar de presión y temperatura (ecuación 1). Este valor de tensión esta alrededor de 1.23V y representa a la potencia necesaria consumida por la FC con el fin de obtener una tensión en los bornes. La tensión de Nerst E_N se encuentra cerca de la tensión de circuito abierto (OCV) de la FC en condiciones reales. La diferencia entre E^{00} y E_N es dividido en dos partes, la primera representa a una corrección de E^{00} a nivel de presiones ΔE_p (ecuación 2) y la segunda representa a una corrección de E^{00} a nivel de temperatura ΔE_T (ecuación 3).

El cálculo de la caída de tensión en la celda ΔV tiene en cuenta tres factores: (i) las pérdidas por activación, que están relacionadas al desencadenamiento de reacciones electroquímicas. Estas activaciones conducen a pérdidas de energía y reducción del potencial de Nerst (ecuación 5). (ii) las pérdidas por concentración o pérdidas por transporte de masa son causadas por una variación de concentración

⁷ BOULON, Loïc. Et al. A macroscopic PEM Fuel model including water phenomena for vehicle simulation. Elsevier: An International Journal, Renewable Energy. [Online] Oct 2012. Vol. 46. [Cited: 23 Feb 2016] pp. 81-91. Available from Science direct. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

de reactivos (ecuación 6). (iii) las pérdidas óhmicas que son principalmente causadas por la resistencia protónica de la membrana, la resistencia electrónica de las placas colectoras y las conexiones (ecuación 7). Dentro del “stack” o apilamiento, las celdas son conectadas en serie, por ende, la tensión de la FC (u_{fc}) es igual al producto entre la tensión de la celda y el número de celdas dentro del “stack” (N) (ecuación 9). De manera general, el comportamiento de una FC es capacitivo. Este fenómeno llamado “doble capa eléctrica”, es debido a la capa de carga en la interfaz electrodo-electrolito, que almacena carga eléctrica y se comporta como un capacitor (C_{dl}), por ende, la ecuación 9 modela el comportamiento de los efectos capacitivos en la FC.

La parte térmica esta constituida por los fenómenos relacionados al potencial termodinámico de la FC. $\Delta S q_{EC}$ es el flujo de entropía debido a la reacción electroquímica exotérmica (ecuación 11). $\Delta S q_{H_2}$ y $\Delta S q_{O_2}$ corresponde al flujo de energía que circula entre el gas y la FC (ecuación 12). La temperatura T_{fc} constituye una entrada (ecuación 14). La variable de reacción corresponde al flujo de entropía $\Delta S q$ (ecuación 13). El flujo de entropía es definido como el producto de una variación de entropía y un flujo molar.

La parte de fluidos, modelado por una analogía eléctrica, esta compuesta por dos líneas, la primera para la alimentación de hidrógeno y la segunda para la alimentación de aire. Las presiones son impuestas por los circuitos de alimentación, sobre la entrada de aire, la presión es impuesta por la atmosfera, en la salida, la presión es impuesta por la FC. Las resistencias R_{dx1} y R_{dx2} modelan las caídas de presión en el lado del suministro y en el lado del exosto, ecuación 15 y 16 respectivamente. La ecuación 16 indica que los intercambios de energía térmica entre el gas y la FC son ignorados. Un capacitor hidráulico C_h se tiene en cuenta con el fin de modelar la acumulación de gas en el circuito (ecuación 17).

Figura 1. Pila a combustible tipo PEM



Tabla 1. Modelo de la FC

Modelo electroquímico	
$E^{00} = \frac{-\Delta \bar{G}_f}{2F} = 1.23V$	(1)
$\Delta E_P = A_{cd} \ln \frac{P_{scH_2}}{P^0} + B_{cd} \ln \frac{P_{scO_2}}{P^0}$	(2)
$\Delta E_T = \alpha + \beta T_{fc} + \gamma T_{fc}^2 + \delta T_{fc}^3 + v T_{fc} \ln T_{fc}$	(3)
$E_N = E^{TP} = E^{00} - \Delta E_P - \Delta E_T$	(4)
$\Delta V_{act} = AT_{fc} \ln \left(\frac{i_{fc} + I_n}{I_0} \right)$	(5)
$\Delta V_{conc} = BT_{fc} \ln \left(1 - \frac{i_{fc}}{I_1} \right)$	(6)
$\Delta V_{ohm} = R_m i_{fc}$	(7)
$V_m = E_N - (\Delta V_{act} + \Delta V_{conc} + \Delta V_{ohm})$	(8)
$u_{fc} = NV_m$ con $i_{fc}(t) = C_{dl} \frac{dV_c(t)}{dt} + \frac{V_c(t)}{R_t}$	(9)
Modelo térmico	
$E^0 = \frac{\Delta h}{2F} = 1.48V$	(10)
$\Delta Sq_{EC} = \frac{N(E^0 - V_m)i_{fc}}{T_{fc}}$	(11)
$\Delta Sq_{H_2} = 0$ and $\Delta Sq_{O_2} = 0$	(12)
$\sum \Delta Sq = \Delta Sq_{EC} + \Delta Sq_{H_2} + \Delta Sq_{O_2}$	(13)
$T_{fc} = \frac{1}{C_{th}} \int (\sum \Delta Sq - \Delta Sq_{cw})$	(14)
Modelo de fluidos	
$P_x = P_{scx} + R_{dx1} q_x$	(15)
$q_{out} = \frac{(P_{scx} - P_{sx})}{R_{dx2}}$	(16)
$\frac{dP_{scx}}{dt} = \frac{1}{C_h} (q_x - q_{cx} - q_{xout})$	(17)

Tabla 2. Lista de símbolos

$\Delta \bar{G}_f$	Energía liberada libre de Gibbs
F	Constante de Faraday
A_{cd}, B_{cd}	Coeficientes de potencial de Nerst
$\alpha, \beta, \gamma, \delta, v$	Coeficientes empíricos
A, B	Coeficientes de sobretensión
I_n	Corriente interna /A
I_1	Corriente límite /A
I_0	Corriente de intercambio /A
V_c	Parte dinámica de la tensión de la celda /V
$\Delta S q_{EC}$	Flujo de entropía debido a la reacción electroquímica exotérmica /W K ⁻¹
$\Delta S q_{H_2}, \Delta S q_{O_2}$	Flujos de entropía entre el “stack” y el gas
C_{th}	Capacidad térmica del “stack”/ WsK ⁻²

2.2. MODELADO DEL SC.

Los supercondensadores (SCs) son fuentes electroquímicas almacenadoras de energía eléctrica (Figura 2). Esta fuente posee habilidades de carga y descarga en poco tiempo (1-10 segundos), alta densidad de potencia, respuesta dinámica rápida y reversibilidad, *i.e.*, pueden recuperar energía. Sin embargo, esta fuente tiene la desventaja de poseer una baja densidad de energía, es decir, no pueden acumular mucha energía. Los SCs son utilizados en aplicaciones de transporte debido a sus características de alta densidad de potencia y alta eficiencia.

Los SCs son modelados empleando el circuito eléctrico equivalente de Zubieta y Bonert⁸, el cual se presenta en la Figura 3. El circuito eléctrico está conformado por

⁸ ZUBIETA, Luis; BONERT, Richard Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. IEEE Transactions on Industry Applications. [Online] Feb 2000. Vol. 36. [Cited: 23 Feb 2016] pp. 199-205. Available from IEEE Xplore. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

una rama principal y una rama secundaria RC. La rama principal representa la resistencia interna (R_i) y la acumulación de energía considerando un condensador constante (C_{i0}) y un condensador no lineal ($C_{i1}V_{eq}$), la rama secundaria RC modela la redistribución de carga considerando un condensador constante (C_2) y el fenómeno de la autodescarga mediante una resistencia (R_2).

El estado de carga (SOC) del SC se determina a partir de su tensión u_{sc} ⁹:

$$SOC = \frac{u_{sc}}{u_{sc-nom}} \quad (18)$$

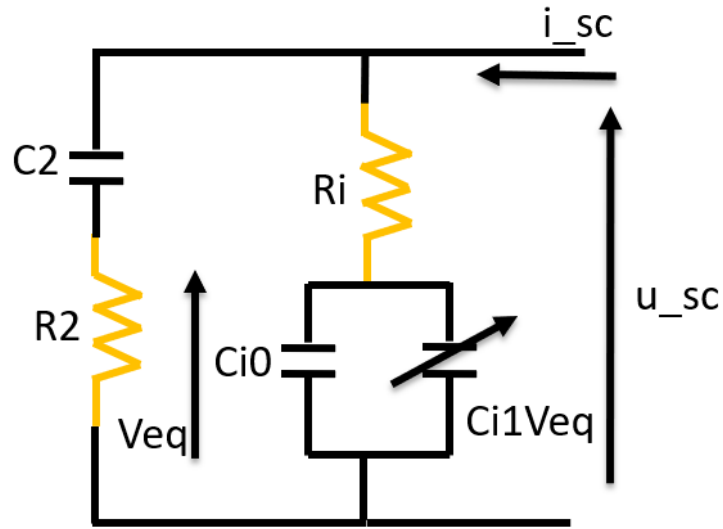
Donde u_{sc-nom} corresponde a la tensión nominal del SC.

Figura 2. Supercondensador



⁹ ALLEGRE, A. L. Et al. Influence of control strategies on battery/supercapacitor hybrid Energy Storage Systems for traction applications. Vehicle Power and Propulsion Conference. [Online] Oct 2009. [Cited: 25 Feb 2016]. Available from IEEE Xplore. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

Figura 3. Circuito eléctrico equivalente del supercondensador



2.3. MODELADO DE LA CARGA.

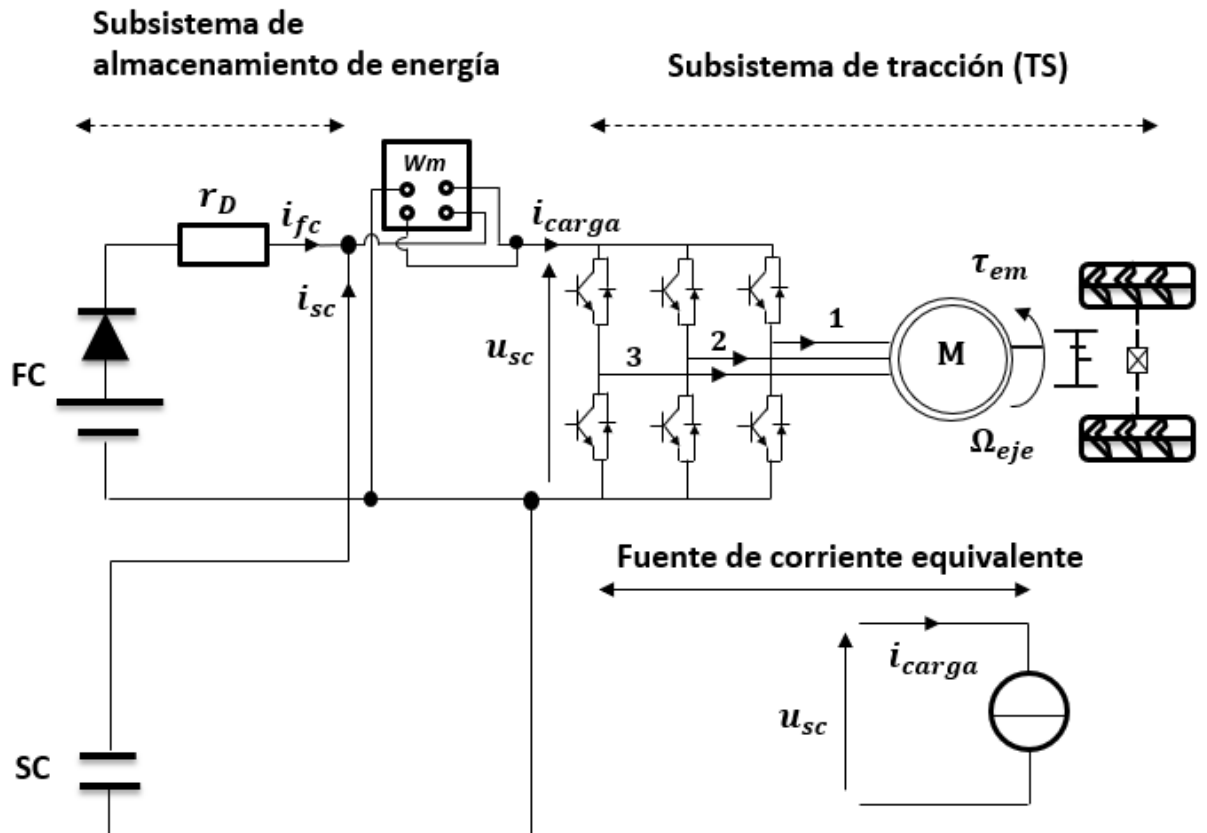
El subsistema de tracción de un vehículo eléctrico híbrido de baja velocidad (NEMO) (Figura 4) que incluye un convertidor de potencia, una máquina de inducción trifásica, la caja de cambios, el diferencial mecánico y las dos ruedas es modelado mediante una fuente de corriente equivalente como se muestra en la Figura 5. Esta fuente de corriente o perfil de potencia de operación corresponde a datos medidos por el wattmetro que se encuentra ubicado antes de la electrónica de potencia¹⁰ y es utilizado como la carga (TS) en este trabajo.

¹⁰ MARX, Neigel. *Et al.* Op. Cit.

Figura 4. NEMO



Figura 5. Estructura del vehículo eléctrico FC/SC



2.4. MODELADO DE LA CONEXIÓN ENTRE LAS FUENTES.

En la conexión directa al no contar con convertidores de potencia DC-DC que conectan la FC y SCs, la corriente impuesta a la FC (i_{FC}) depende de la diferencia de potencial entre la FC (u_{FC}) y los SCs (u_{SC}), además, de las pérdidas o resistencia del diodo (r_D) (ecuación 19).

$$\frac{(u_{FC}-u_{SC})}{r_D} = i_{FC} \quad (19)$$

Las fuentes de energía y la carga son acopladas vía un bus de tensión DC. Las corrientes de la FC (i_{FC}) y del SC (i_{SC}) se suman para generar la corriente de carga (i_{carga}). Esto se modela mediante la ley de corrientes de Kirchhoff (ecuación 20). Los SCs imponen su tensión al bus mientras que el subsistema FC/diodo funciona como una fuente de corriente.

$$i_{FC} + i_{SC} = i_{carga} \quad (20)$$

2.5. FUNCIÓN COSTO DE HIDRÓGENO CONSUMIDO

El flujo de masa de hidrógeno depende de la corriente de la pila a combustible (FC). El costo de operación o consumo de hidrógeno se puede estimar a partir de la siguiente ecuación^{11 12 13} :

$$C_{H_2} = \int_0^t \dot{m}_{H_2} dt H_{2_{costo}} \quad (21)$$

$$\dot{m}_{H_2} = i_{fc} \frac{NM_{H_2}}{2F\lambda} + \dot{m}_{H_2-init} \quad (22)$$

Donde $\dot{m}_{H_2}$ representa el flujo de masa de hidrógeno, i_{fc} corresponde a la corriente de la FC, N representa al número de celdas conectadas en serie dentro del “stack”

¹¹ DEPATURE, Clément. *Et al.* Op. Cit.

¹² DEPATURE, Clément. *Commandes par inversion d'un véhicule à pile à combustible et supercondensateurs.* Ph.D thesis. Université du Québec à Trois-Rivières. 2017

¹³ CHEN, Huicui; PUCHENG, Pei and MANCUN, Song. Lifetime prediction and the economic lifetime of Proton Exchange Membrane fuel cells. *Applied Energy*. [Online] Mar 2015. Vol. 142. [Cited: 28 Feb 2016] pp. 154-163. Available from ScienceDirect. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

o apilamiento de la FC, M_{H_2} es la masa molar del hidrógeno [g/mol], F es la constante de Faraday [As/mol], λ eficiencia de generación de la FC, $\dot{m}_{H_2-init}$ es el flujo de masa de H₂ inicial [g] y $H2_{costo}$ es el costo de hidrógeno [US\$/gH₂].

2.6. FUNCIÓN COSTO DE DEGRADACIÓN

En este caso para la estimación de la degradación de la FC se considera una sola variable; la potencia de la FC. La variable correspondiente a la degradación por encendido/apagado se considera despreciable debido a que la FC solo se enciende una vez para el inicio de la fuente ($N_{switch} = 1$) y esta no vuelve a ser apagada ($\Delta_{switch} = 0$). A continuación, se presenta la siguiente función para el cálculo de la degradación^{14 15}:

$$\Delta_{FC}(t) = \int_0^t \delta(t)dt + N_{switch}\Delta_{switch} \quad (23)$$

$$\delta(t) = \frac{\delta_0}{3600} \left(1 + \frac{\alpha}{P_{FC-nom}^2} (P_{FC}(t) - P_{FC-nom})^2\right) \quad (24)$$

Donde N_{switch} es el número de inicios de la FC, Δ_{switch} coeficiente de degradación por inicio/parada, δ_0 y α son coeficientes de carga y P_{FC-nom} corresponde a la potencia nominal de la FC. La función de degradación Δ_{FC} es expresada entre 0 y 1, donde el valor 0 corresponde al inicio de la vida útil y el valor 1 corresponde al fin de la vida útil de la FC.

En este trabajo se considera que la vida útil de los SCs finaliza cuando la vida útil de la FC termina. Lo anterior, debido a que los SCs poseen una degradación menor a la pila¹⁶ y los SCs no serán nuevamente utilizados. Por lo tanto, el costo de las fuentes depende de la degradación de la FC. La función costo de degradación (C_{Deg}) de las fuentes se presenta a continuación:

¹⁴ DEPATURE, Clément. *Et al.* Op. Cit.

¹⁵ MARX, Neigel. *Gestion énergétique et dimensionnement des systèmes hybrides multi-piles à combustible et batteries pour application au transport automobile.* PhD thesis. Université du Québec à Trois-Rivières. 2017.

¹⁶ MORIN, Benoît. Op. Cit.

$$C_{Deg} = \Delta_{FC}(t) * (FC_{Costo} + SC_{Costo}) \quad (25)$$

Donde FC_{Costo} representa al precio del sistema FC y SC_{Costo} representa al precio de los SCs.

2.7. FUNCIÓN COSTO DE RECARGA ADICIONAL AL FINAL DEL CICLO

La cantidad de energía adicional (Δe_{sc}) a recargar o descargar los SCs depende de la diferencia entre la cantidad de energía final (u_{sc-fin}) y la cantidad de energía inicial (u_{sc-ini}) almacenada de un ciclo.

$$\Delta e_{sc} = \frac{1}{2} * C * (u_{sc-fin}^2 - u_{sc-ini}^2) [J] \quad (26)$$

Donde C es el valor de capacitancia del SC. Sí el valor de la cantidad de energía adicional es positivo, esto significa que hay una ganancia, por ende, el valor es restado al costo total. Sin embargo, sí el valor es negativo, esto significa que los SCs deben ser cargados, por lo tanto, se adiciona un costo de recarga adicional al costo total de la solución.

La recarga de los SCs se realiza con la FC. Por lo tanto, el costo de la energía utilizando la FC (C_{e-fc}) se puede estimar empleando las ecuaciones 21 y 22. En este caso tomamos como hipótesis de simplificación que la recarga se realiza a potencia constante máximo rendimiento de la pila.

Luego, el costo de recarga adicional (C_{Rec-SC}) se puede determinar mediante la siguiente función:

$$C_{Rec-SC} = \Delta e_{sc} * C_{e-fc} \quad (27)$$

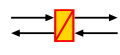
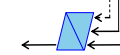
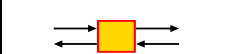
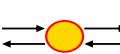
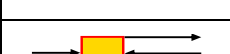
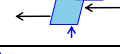
2.8. INTEGRACION DEL MODELO DE SIMULACIÓN

La representación energética macroscópica (REM) es una herramienta gráfica para el análisis sistemático de las interacciones entre subsistemas en sistemas

multifísicos. Los pictogramas, que se presentan en la Tabla 3, se utilizan para representar los elementos, que se conectan de acuerdo con el principio de acción-reacción y respetando el principio de causalidad. Los pictogramas de la REM se presentan en la Tabla 3. La REM ha sido utilizada para estudiar sistemas de fuentes multifísicos^{17 18}, sistemas de generación fotovoltaicos¹⁹ o vehículos eléctricos híbridos²⁰.

La REM permite integrar todos los modelos. Por lo tanto, la REM del sistema estudiado de la Figura 6 se deduce a partir de las relaciones presentadas en la sección anterior. La FC, los SCs y el TS son consideradas como fuentes eléctricas (óvalos de color verde). La conexión paralela entre la FC, los SCs y el TS es representada mediante un elemento de distribución mono dominio (cuadrados traslapados color naranja). La resistencia del diodo es un bloque de conversión mono-dominio, representada por un pictograma cuadrado de color naranja.

Tabla 3. Pictogramas de la REM

	Fuente de energía (ej. batería)		Acumulación de energía (ej. inercia)		Control de lazo cerrado
	Convertidor mono-dominio (ej. Caja de cambios)		Convertidor multi-dominio (ej. bomba)		Control de lazo abierto
	Distribución de energía (mismo dominio)		Distribución de energía (varios dominios)		Inversión de acoplamiento con criterio de distribución
	Variables de acción- reacción		Sensor		Gestión de energía global

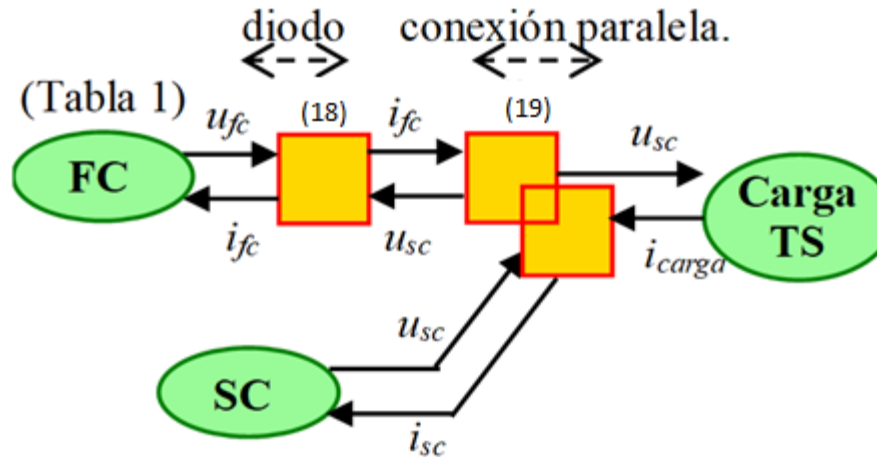
¹⁷ AGBIL, K.S. *Et al.* Multiphysics simulation of a PEM electrolyser: Energetic Macroscopic Representation approach. International Journal of Hydrogen Energy. [Online] Jan 2011. Vol. 36. [Cited: 2 Mar 2016] pp. 1382-1398. Available from ScienceDirect. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

¹⁸ BOUSCAYROL, Alan. *Et al.* Simulation of a Wind Energy Conversion System using Energetic Macroscopic Representation. Power Electronics and Motion Control Conference. [Online] Jan 2013. [Cited: 6 Mar 2016]. Available from IEEE Xplore. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

¹⁹ LHOMME, Walter. *Et al.* Simulation of a photovoltaic conversion system using Energetic Macroscopic Representation. Power Electronics and Motion Control Conference. [Online] Jan 2013. [Cited: 6 Mar 2016]. Available from IEEE Xplore. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

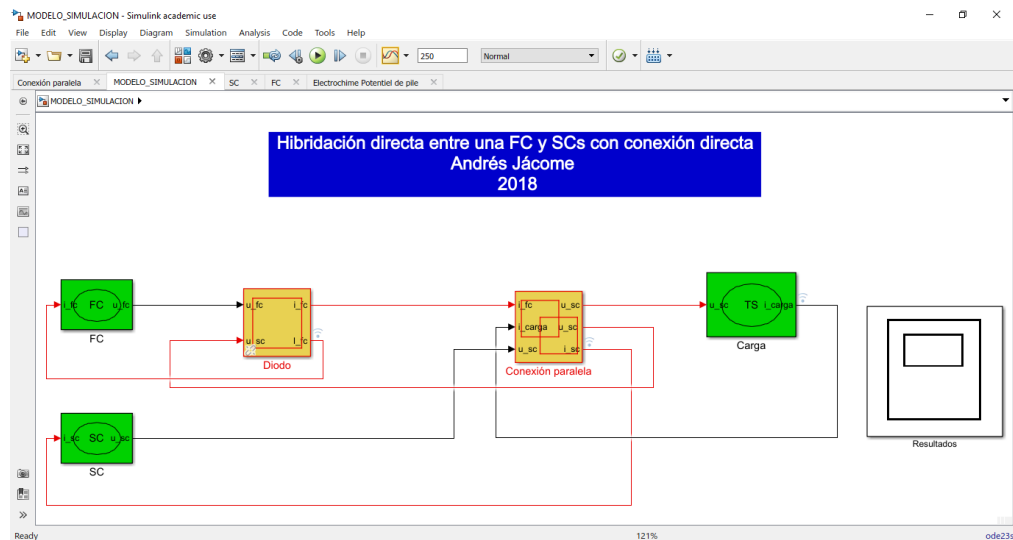
²⁰ BIENAIMÉ, D. *Et al.* Energetic Macroscopic Representation as an efficient tool for energy management in a hybrid electrical system embedded in a helicopter. Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion. [Online] Dec 2012. [Cited: 6 Mar 2016]. Available from IEEE Xplore. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

Figura 6. REM del sistema híbrido estudiado FC/SC con conexión directa



El modelo de simulación de la fuente híbrida FC/SC con conexión directa es implementado en Matlab/Simulink utilizando el formalismo REM²¹ [16] como se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Modelo de simulación de la fuente híbrida en Matlab/Simulink usando la REM



²¹ EMR Website. Energetic Macroscopic Representation. [Accesed:13 Mar 2018]. Available from internet <http://www.emrwebsite.org>

3. METODOLOGÍA DE DIMENSIONADO DE UNA FUENTE HÍBRIDA CON CONEXIÓN DIRECTA.

En este capítulo se presenta la metodología de dimensionado para una fuente híbrida FC/SC con conexión directa. En la sección 3.1 se presentan métodos de reparto de potencia existentes en la literatura. La sección 3.2 presenta la metodología de dimensionado propuesta.

3.1 METODOS DE REPARTO DE POTENCIA

Una fuente híbrida pila a combustible (FC) / supercondensadores (SCs) con conexión directa requiere el dimensionado de las fuentes con el fin de lograr una distribución de potencia adecuada entre los elementos. Este requerimiento se debe a que en la configuración directa no se cuenta con convertidores de potencia DC/DC que permitan desarrollar una estrategia de gestión de energía. En la literatura se presentan diferentes métodos de reparto de potencia para la fuente híbrida con conexión directa^{22 23 24}. En²⁵ se presenta el método de reparto de potencia frecuencial (Figura 8), este método consiste en dividir el perfil de potencia objetivo en frecuencias altas y bajas, las frecuencias altas corresponden para los SCs, mientras que las bajas frecuencias son para la FC. Sin embargo, la dificultad de este

²² CHAPOULIE, P. and ASTIER, Stéphan. Modelling of an electric vehicle including ultracapacitors with SABER. Electric Vehicle Conference EVS. [Online] Sept 1998. [Cited: 16 Mar 2016]. Available from IEEE Xplore. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

²³ BÜCHI, Felix. *Et al.* Electrical Drivetrain Concept with Fuel Cell System and Supercapacitor Results of the "HY-LIGHT®"-vehicle. Conference: 5. VDI Tagung Innovative Fahrzeugantriebe. [Online] Nov 2006. [Cited: 6 Apr 2016]. Available from ResearchGate

²⁴ SOLANO, Javier. Modélisation et supervision des flux énergétiques à bord d'un véhicule hybride lourd: approche par logique floue de type-2. PhD thesis. Université de Franche-Comté. 2012.

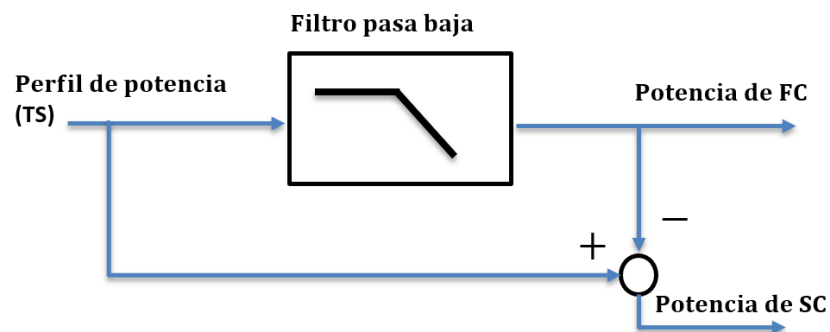
²⁵ CHAPOULIE, P. and ASTIER, Stéphan. Op. Cit.

método radica en la complejidad de determinar un punto de corte de frecuencia para dividir el perfil de potencia objetivo en frecuencia altas y bajas.

Otro método de reparto de potencia se presenta en la Figura 9, el método de banda²⁶ considera la potencia máxima y mínima que puede entregar la FC; si la potencia demandada por la carga (TS) se encuentra por fuera del rango de funcionamiento de la FC será suplida por los SCs. La desventaja de este método radica en determinar el punto mínimo de operación de la FC ($P_{\min-fc}$). Este valor es el grado de libertad que permite obtener un dispositivo de almacenamiento cuya potencia media sea igual a cero.

En²⁷ se presenta el método de reparto de potencia de pendiente, el cual es presentado en la Figura 10. Este método utiliza el parámetro de la dinámica máxima de la FC ($\frac{di}{dt} \max$ o $\frac{dp}{dt} \max$) con el fin de que la fuente no entregue valores altos de potencia de manera instantánea. Un desafío para la implementación de este método consiste en determinar el valor máximo de la dinámica en la FC. Lo anterior, debido a que este parámetro no se encuentra siempre disponible en las hojas de datos proporcionadas por los fabricantes.

Figura 8. Método de reparto de potencia frecuencial



²⁶ BÜCHI, Felix. *Et al.* Op. Cit.

²⁷ SOLANO, Javier. Op. Cit.

Figura 9. Método de reparto de potencia de banda

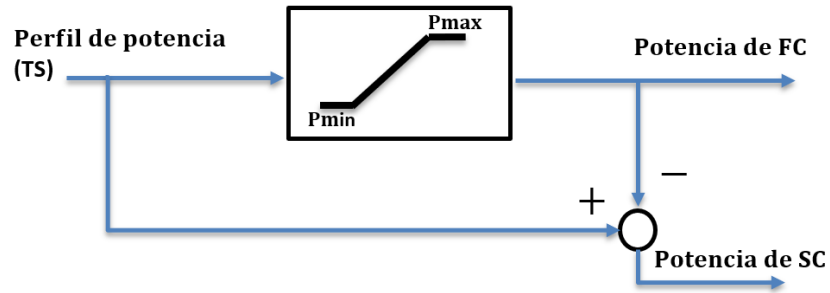
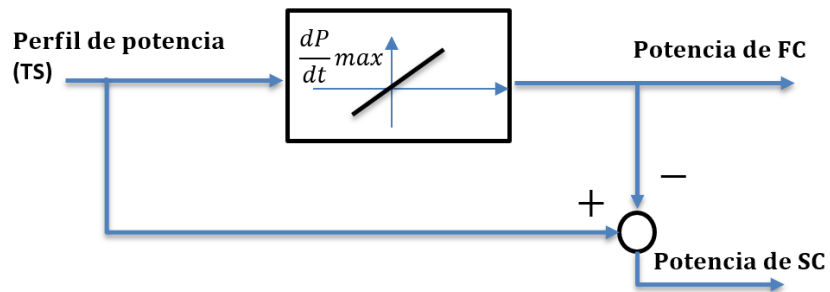


Figura 10. Método de reparto de potencia de pendiente



3.2 METODOLOGIA DE DIMENSIONADO PROPUESTA

La metodología de dimensionado propuesta se inspira en el método de reparto de potencia de pendiente. Esta metodología utiliza como insumos un perfil de potencia como referencia y hojas de datos de FC y SCs. Se simulan todas las posibles combinaciones FC-SC y se evalúan los siguientes criterios:

- 1) $0 < P_{fc(t)} < P_{fc-max}$
- 2) $\frac{di_{fc(t)}}{dt} < di_{fc-max}$
- 3) $u_{sc}(t) < u_{sc-max}$

La primera restricción indica que la FC no es reversible y que tiene límites en la magnitud de la potencia. La segunda indica que la tasa de cambio (dinámica) de la corriente es limitada por una pendiente y la tercera restricción define que la tensión de los SCs nunca debe ser superior a la nominal.

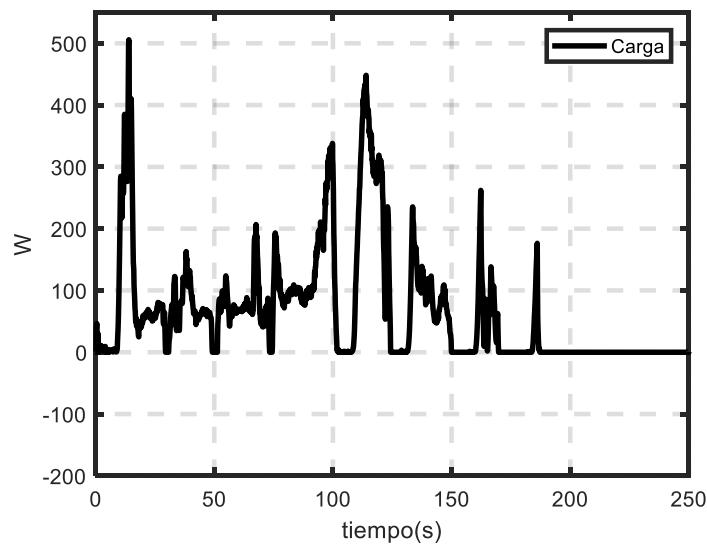
La metodología descarta las combinaciones FC/SC que no cumplan con estas restricciones. Luego, se comparan todas las soluciones admisibles mediante una función objetivo que se presenta en la ecuación 28. Esta función contempla, el costo de hidrógeno consumido (ecuación 21), el costo de degradación de la FC y los SCs (ecuación 25) y el costo de recarga adicional (ecuación 27) de los SCs. Finalmente, la solución con el menor costo es la seleccionada.

$$F_{Costo} = C_{H2} + C_{Deg} + C_{Rec-SC} \text{ [\$US]} \quad (28)$$

4. CASO DE ESTUDIO DE LA METODOLOGÍA DE DIMENSIONADO.

La metodología se utiliza para el diseño de un laboratorio de tracción eléctrica a escala reducida a ser implementado en la Universidad de Quebec en Trois-Rivières (UQTR). Se cuenta con una pila de 500W y se busca dimensionar el banco de supercondensadores de la fuente híbrida. El perfil de potencia medido en un vehículo eléctrico híbrido de baja velocidad (NEMO)²⁸ es utilizado como referencia, sin embargo, por cuestiones de diseño del laboratorio, el perfil de potencia, que se muestra en la Figura 11, es escalado a 500W (1/36 de la potencia original de NEMO) y no considera la aplicación del frenado regenerativo, *i.e.*, no contiene valores negativos de potencia. En la sección 3.1 se presenta el dimensionado del banco de supercondensadores empleando la metodología propuesta y en la sección 3.2 se presenta la evaluación del comportamiento de la fuente híbrida seleccionada durante la conexión directa y en operación.

Figura 11. Perfil de potencia de NEMO



²⁸ MARX, Neigel. *Et al.* Op. Cit.

4.1 DIMENSIONADO DEL BANCO DE SUPERCONDENSADORES

Para el diseño del laboratorio de tracción eléctrica se cuenta con una PEMFC marca Horizon de 500W (P_{fc-max}), 36 celdas conectadas en serie, tensión de circuito abierto de 31.4V, corriente nominal de 30A²⁹ y una dinámica máxima en corriente (di_{fc-max}) de 2 A/s^{30 31}. Además, se considera el perfil de potencia medido de NEMO³² para evaluar los criterios de la metodología.

De acuerdo con la tensión máxima o tensión de circuito abierto (OCV) de la FC es posible tener una referencia para seleccionar los SCs. Por lo tanto, los SCs comerciales marca MAXWELL³³ que se tienen en cuenta son: 8F (dos módulos de 16F conectados en serie), 29F (dos módulos de 58F conectados en serie), y 58F (cuatro módulos de 58F, dos pares de módulos conectados en serie (cada pareja de 29F) y luego estos conectados en paralelo). Todos con una tensión nominal de 32V (u_{sc-max}). En la Figura 12 se muestra un esquema de como son creados los bancos de SCs.

²⁹ Ibid.

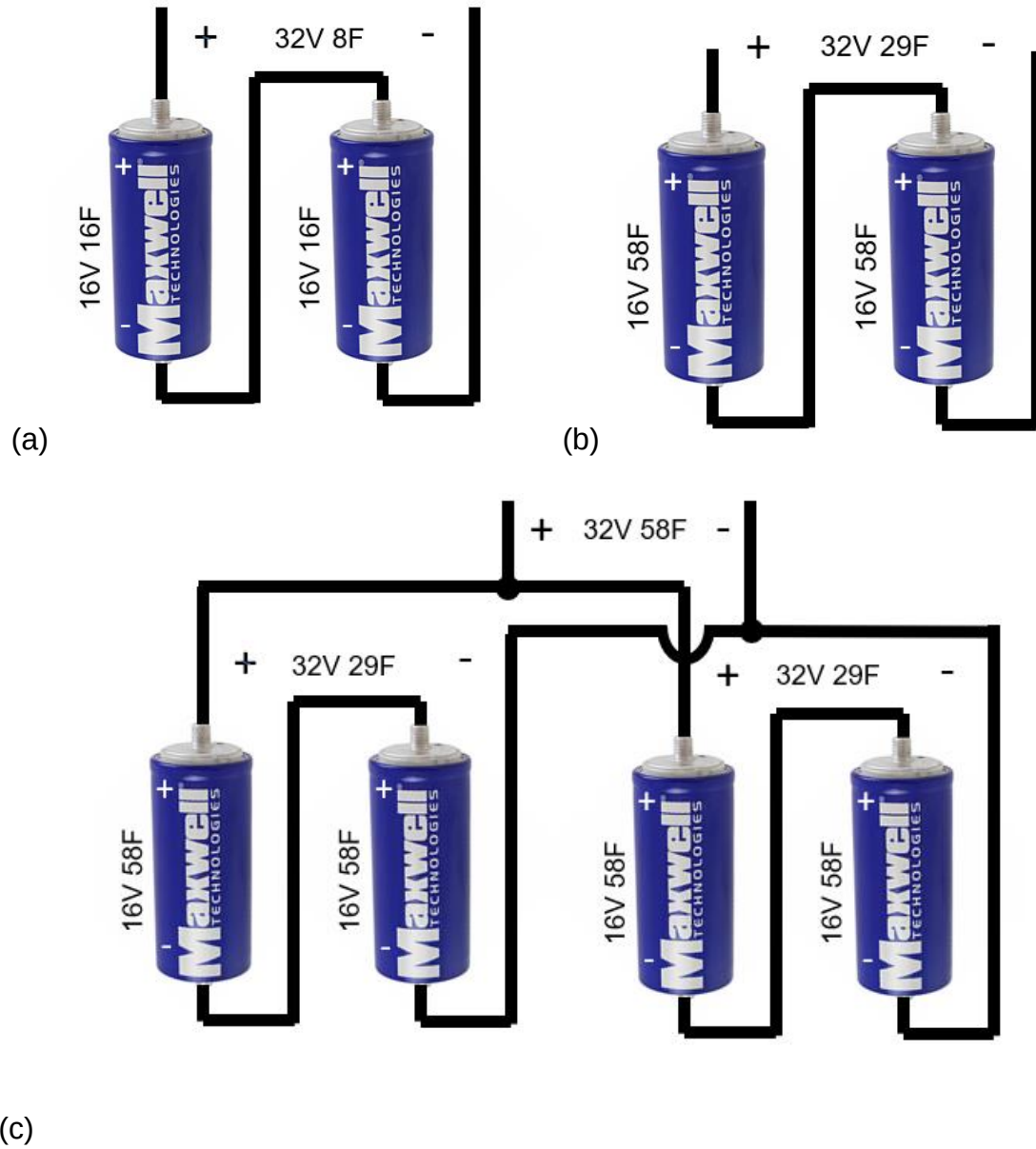
³⁰ THOUNTHONG, Phatiphat. *Et al.* Comparative study of fuel-cell vehicle hybridization with battery or supercapacitor storage device. IEEE Transactions on Vehicular Technology. [Online] Jul 2009. Vol. 58. [Cited: 17 Apr 2016] pp. 3892-3904. Available from IEEE Xplore. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

³¹ THOUNTHONG, Phatiphat. *Et al.* Energy management of a fuel cell/solar cell/supercapacitor hybrid power source. Journal of Power Sources. [Online] Jan 2011. Vol. 196. [Cited: 17 Apr 2016] pp. 313-324. Available from ScienceDirect. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

³² MARX, Neigel. *Et al.* Op. Cit.

³³ MAXWELL Ultracapacitors. Product matrix. [Accesed:13 Jan 2018]. Available from internet http://www.maxwell.com/images/documents/ProductMatrix_3000489_3.pdf

Figura 12. Configuraciones de SCs utilizadas (a) 8F 32V, (b) 29F 32V, (c) 58F 32V



El modelo de simulación presentado en la sección 1.8 es utilizado para simular las combinaciones FC-SC alimentando el perfil de potencia de referencia durante un ciclo de 250s. En este trabajo se asume que los SCs son previamente cargados y poseen una tensión inicial de 30V ($u_{SC-ini} = 93.75\%$). Los parámetros del modelo de simulación se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros del modelo de simulación

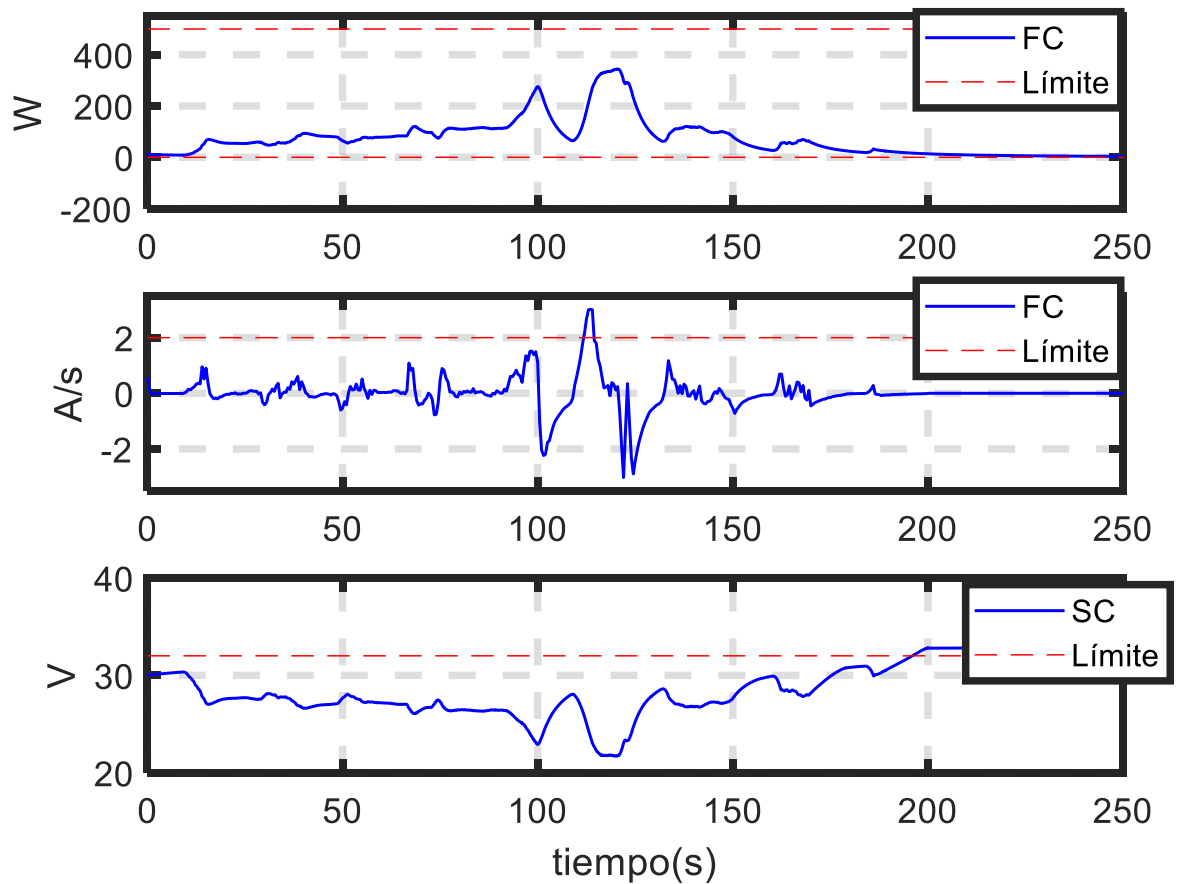
Pila a combustible (*)	500W, 15-32V, OCV=31.4V $FC_{Costo}=600US\$$
Supercondensador	Valores equivalentes: SC₁= 29F 32V $SC_{Costo}=241.28US\$$ $u_{sc-init}=30V$ $C2=2.5192 F$ $Ci1Veq=0.4821 F/V$ $Ci0=19.6415 F$ $R2=1.8933 \Omega$ $Ri=0.0088 \Omega$ SC₂=58F 32V $SC_{Costo}=482.56US\$$ $u_{sc-init}=30V$ $C2=4.35 F$ $Ci1Veq=1.3579 F/V$ $Ci0=32.9676 F$ $R2=0.7738 \Omega$ $Ri=0.0047 \Omega$ SC₃=8F 32V $SC_{Costo}=150.96US\$$ $u_{sc-init}=30V$ $C2=1.0436 F$ $Ci1Veq=0.1105 F/V$ $Ci0=5.4047 F$ $R2=4.3965 \Omega$ $Ri=0.0428 \Omega$
Resistencia del diodo	2m Ω
Potencia máxima de la carga	500W
Función costo de operación	N=36 celdas $M_{H_2}=2 [g/mol]$ $F=96485.3399 [As/mol]$ $\lambda=0.4$ $\dot{m}_{H_2-init}=0$ $H2_{costo} = 0.0035 US\$/gH_2$
Función costo de degradación de la FC	$N_{switch}=1$ $\Delta_{switch}=0$ $\delta_0=5*10^{-5}$ $\alpha=4$ $P_{FC-nom}=500W$ $FC_{Costo}=600 US\$$
Función costo de recarga adicional	$C_1=29F$ $C_2=58F$ $C_2=8F$

(*) Los parámetros de los modelos electroquímico, térmico y de fluidos de la FC se presentan en el Anexo A

4.1.1. Evaluación de las posibles soluciones. En esta subsección se muestran los resultados de potencia, dinámica y tensión de la fuente híbrida alimentando la potencia de referencia para cada una de las configuraciones de SC.

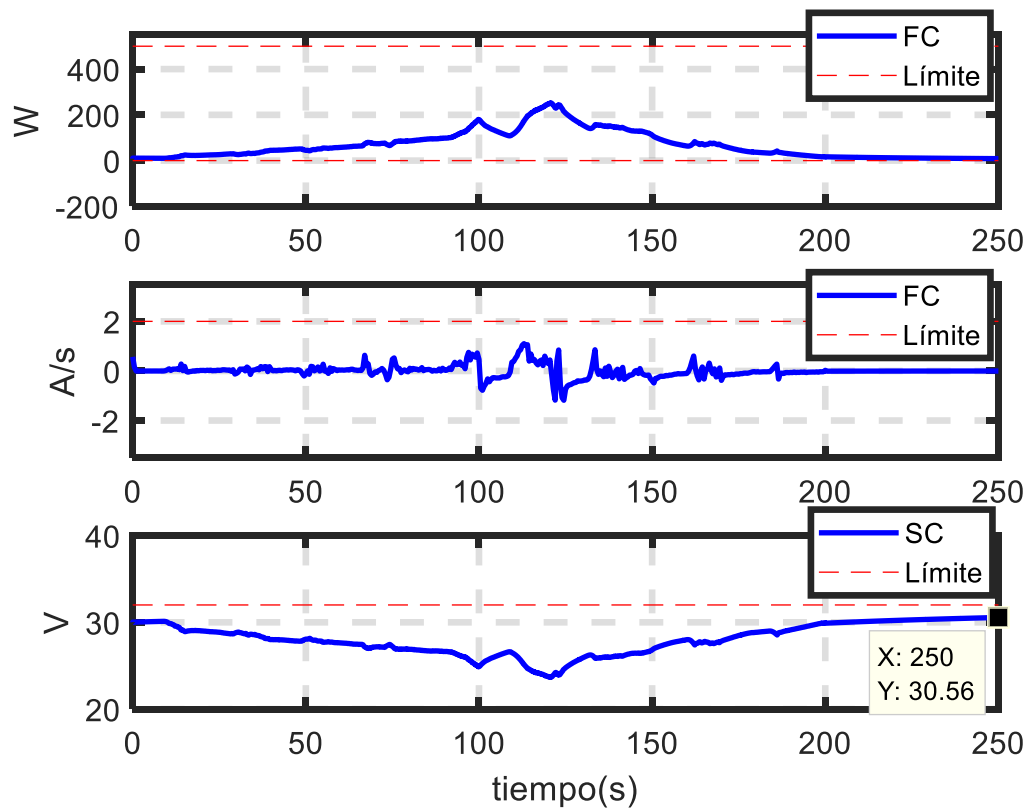
4.1.1.1. Configuración 1. SC 8F. La Figura 13 muestra los resultados para esta configuración. Se puede observar en esta figura que la potencia se mantiene entre los límites. Sin embargo, la dinámica y la tensión sobrepasan los valores máximos esperados. Por ende, esta solución es descartada.

Figura 13. Resultado de la configuración 1. (a) Potencia, (b) Dinámica en la corriente, (c) Tensión



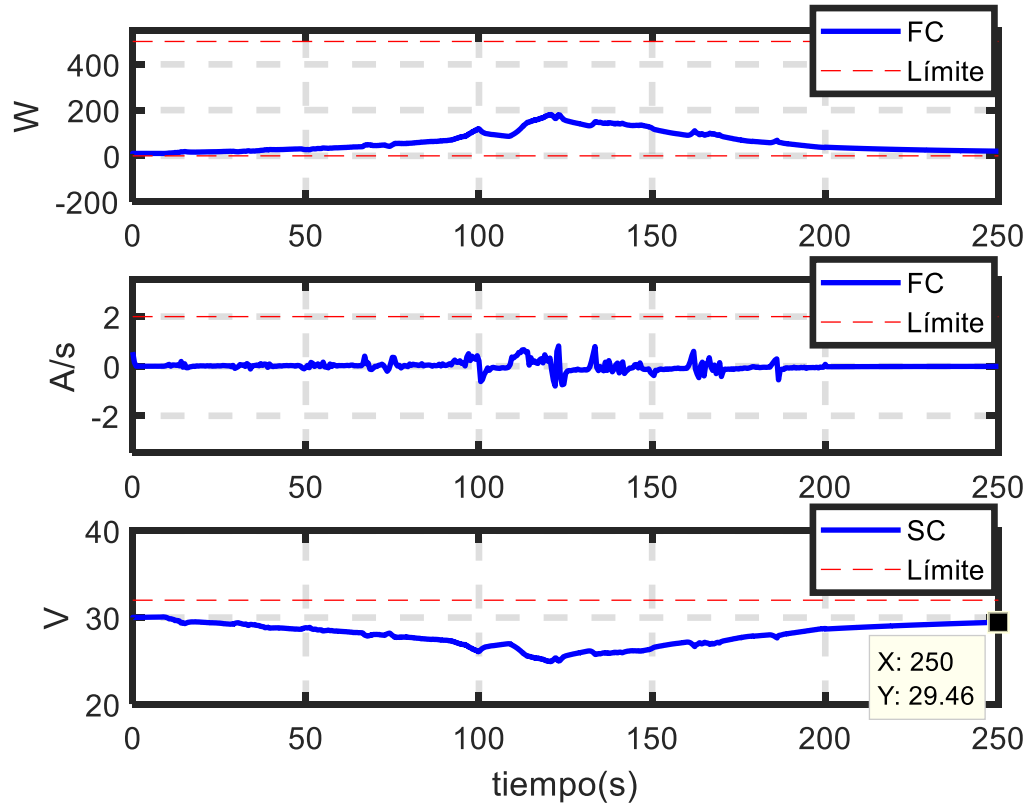
4.1.1.2. Configuración 2. SC 29F. La Figura 14 ilustra los resultados para esta configuración. Se puede observar en esta figura que la potencia, la dinámica y la tensión respetan los límites máximos establecidos. Por lo tanto, esta solución es admisible.

Figura 14. Resultado de la configuración 2. (a) Potencia, (b) Dinámica en la corriente, (c) Tensión



4.1.1.3. Configuración 3. SC 58F. La Figura 15 presenta los resultados para esta configuración. Se puede observar que la potencia, la dinámica y la tensión se encuentran dentro de los límites máximos. Luego, esta solución es admisible.

Figura 15. Resultado de la configuración 3. (a) Potencia, (b) Dinámica en la corriente, (c) Tensión



En esta subsección se evaluó la potencia, la dinámica y la tensión para cada una de las configuraciones. Los resultados muestran que a medida que se aumenta el valor de capacitancia del SC, la dinámica en la corriente de la FC disminuye, tal y como se presenta en SILVA³⁴.

Los resultados muestran que la configuración 2 y 3 cumplen las especificaciones, por ende, son soluciones admisibles. La configuración 1 presenta una tensión por encima a la nominal al finalizar el ciclo. Además, esta configuración presenta una dinámica superior a la máxima. Por lo anterior, esta solución es descartada.

³⁴ SILVA, Rosa. Op. Cit.

4.1.2. Costo de hidrógeno consumido. En esta subsección los resultados del costo de hidrógeno consumido por la FC por ciclo utilizando la ecuación 21 son mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5. Costo de H2 consumido

Capacitancia (F)	$\dot{m}_{H_2}$ (g)	C_{H_2} (US\$)
29	0.594	$2.08 \cdot 10^{-3}$
58	0.533	$1.867 \cdot 10^{-3}$

Se puede observar en esta tabla que el H2 consumido ($\dot{m}_{H_2}$) por la FC aumenta a medida que se disminuye el valor de capacitancia del SC, es decir, cuando la FC entregue mayor corriente.

4.1.3. Costo de degradación. En la Tabla 6 se muestran los resultados del costo de degradación (Δ_{FC}) de la FC y los SCs por ciclo utilizando la ecuación 25.

Tabla 6. Costo de degradación

Capacitancia (F)	Δ_{FC} (-)	C_{Deg} (US\$)
29	0.000005701	0.00410836
58	0.0000056235	0.00608777

Se puede observar en esta tabla que la FC se degrada menos cuando es conectada con un banco de SCs de valor equivalente a 29F.

4.1.4. Costo de recarga al finalizar el ciclo. La recarga de los SCs se realiza con la FC a máxima eficiencia (500W). El costo de la energía (C_{e-fc}) en US\$/W*h utilizando la FC a potencia nominal es $705 \cdot 10^{-6}$ US\$/W*h.

El costo de recarga adicional (C_{Rec-SC}) al finalizar el ciclo para los SCs de 29F y 58 se calculan a partir de la ecuación 27. Los resultados son presentados en la Tabla 7.

Tabla 7. Costo de recarga adicional

C (F)	Δe_{sc} (W*h)	C_{Rec-SC} (US\$)
29	0.1218403	0.000085897
58	-0.258651	-0.000182348

4.1.5. Función costo total. En esta subsección se presenta los resultados de la función costo (ecuación 28) por ciclo que permite comparar las soluciones admitidas. Los resultados de la función costo se presenta en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados función de costo

C (F)	C_{H2}	C_{Deg}	C_{Rec_SC}	C_{total} (US\$/ciclo)
29	0.00208	0.00410836	-0.00008589	0.00610247
58	0.001867	0.00608777	0.000182348	0.008181

Partiendo de esta tabla, la solución seleccionada que conecta la FC en consideración corresponde al SC de 29F ya que representa el menor costo total.

4.2. EVALUACIÓN DE LA FUENTE HÍBRIDA

En esta sección se evalúa mediante simulaciones el comportamiento de la fuente híbrida FC/SC seleccionada durante la conexión y en operación. En la subsección 3.2.1 se analiza la conexión directa de la fuente híbrida, luego en la subsección 3.2.2 se presenta la distribución de potencia de la fuente híbrida alimentado el perfil de

potencia escalado de NEMO y en la subsección 3.2.3 la implementación de la solución.

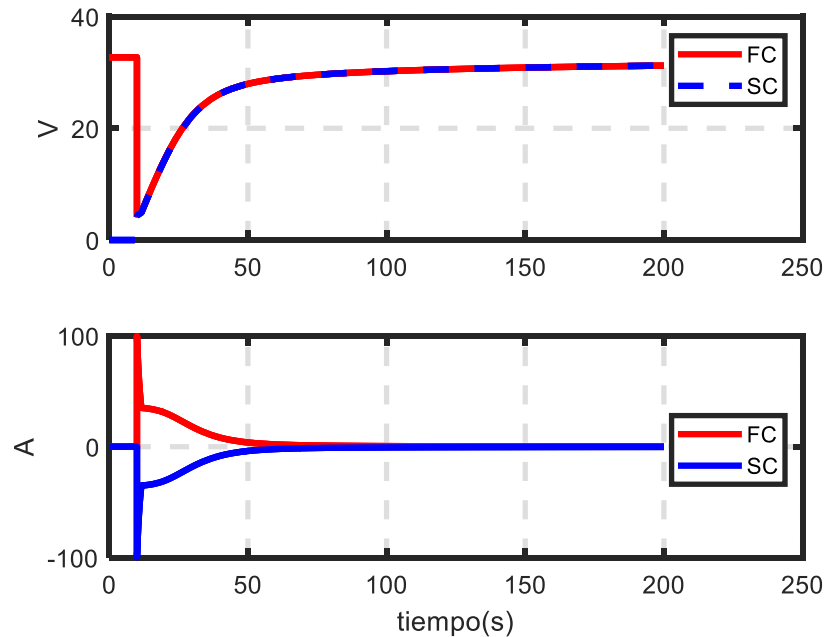
4.2.1. Simulación de la fuente híbrida directa FC/SC. En esta subsección se presenta el comportamiento eléctrico al momento de conectar directamente la FC con los SCs. En la Figura 16 se presenta la conexión directa de la fuente híbrida con un estado de carga (SOC) de los SCs de 0%.

En la Figura 16 se presenta el compartimiento de tensión entre las fuentes, se puede observar que los SCs comienzan a ser cargados en un tiempo de 50s. Después de la fase de carga de los SCs, las fuentes comparten la misma tensión.

En la Figura 16b se puede observar una corriente transitoria de la FC de más de tres veces la nominal (100) que ocurre en la conexión con los SCs. Esta situación se presenta debido a que la FC está directamente conectada en paralelo con SCs sin carga inicial, es decir, se presenta el caso de una FC en cortocircuito (ecuación 19). Luego de cargar los SCs, la corriente de la fuente híbrida es igual a cero debido a que la fuente comparte la misma tensión.

Figura 16. Conexión directa de la fuente híbrida FC/SC con un $SOC_{sc-ini}=0\%$.

(a) Tensión (b) Corriente



4.2.2. Simulación de la fuente híbrida FC/SC directa alimentando la carga. En la Figura 17 se muestran los resultados de operación de la fuente híbrida FC/SC con conexión directa. Para ello, se considera el perfil de potencia de operación real escalado ($1/36$) que corresponde a los datos medidos del subsistema de tracción (TS) de NEMO³⁵.

En la Figura 17a se puede observar que las fuentes comparten la misma tensión durante todo el ciclo de operación de la fuente sin importar las variaciones de potencia presentada por la tracción del vehículo (TS). En la Figura 17c se puede observar la distribución de potencia de fuente. Los SCs actúan durante el arranque y cuando se presentan cambios bruscos de potencia, mientras que la FC se encarga de entregar la potencia media de TS. Además, se puede observar el momento en que los SCs son cargados cuando la potencia de la FC supera la potencia de la carga durante el rango de tiempo entre $t=102s$ y $t=108s$ (Figura 18).

³⁵ MARX, Neigel. Op. Cit.

Figura 17. Fuente híbrida con conexión directa alimentando una carga (TS) (a) Tensión (b) Corriente (c) Potencia

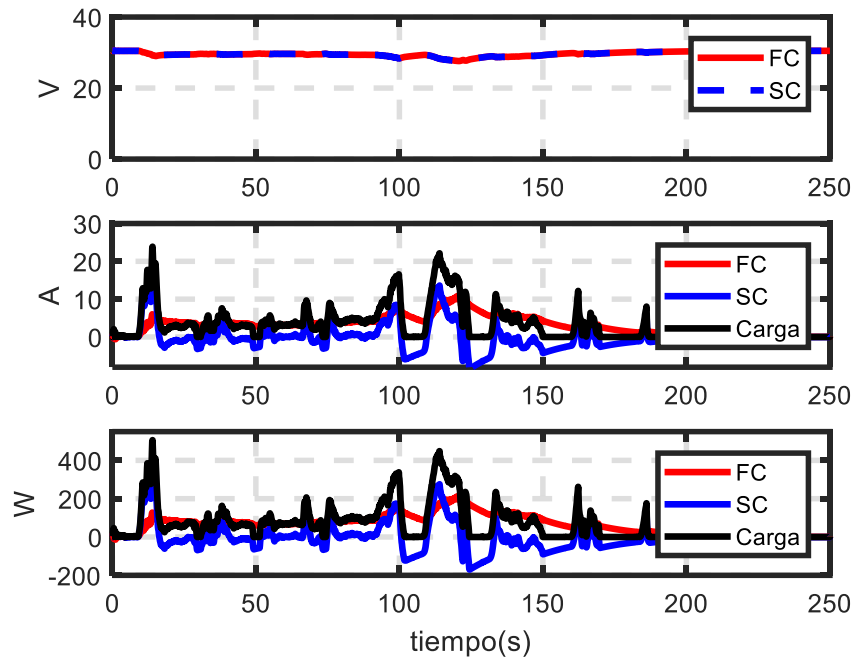
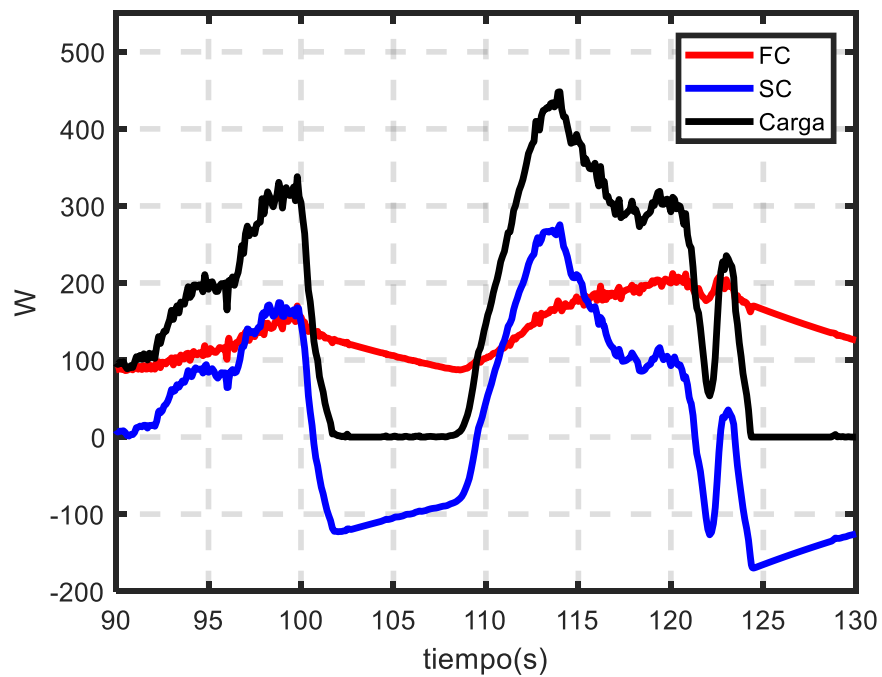


Figura 18. Distribución de potencia de la fuente híbrida



4.2.3. Implementación de la solución. En esta sección se presenta el diseño e implementación de un banco experimental en el laboratorio de tracción eléctrica de la UQTR. Esta parte de la maestría fue realizada en la UQTR gracias al apoyo del Gobierno de Canadá y su programa de becas ELAP.

En la Figura 19 se ilustra el diseño del banco experimental que incluye el subsistema de almacenamiento de energía (FC y SCs), el subsistema de tracción (carga electrónica programable), el sistema de protección (diodo, fusibles e interruptores), los medidores de tensión/corriente, el controlador NI-6229 (dispositivo de adquisición de datos) y una resistencia de precarga. La implementación del diseño se presenta en la Figura 20.

Figura 19. Diseño eléctrico del banco experimental

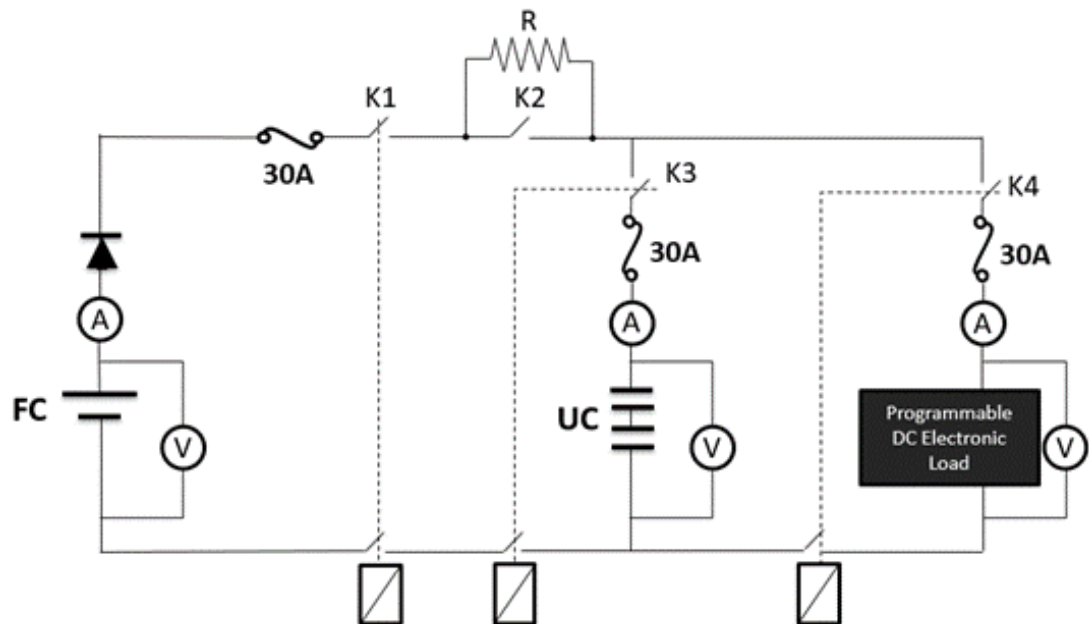
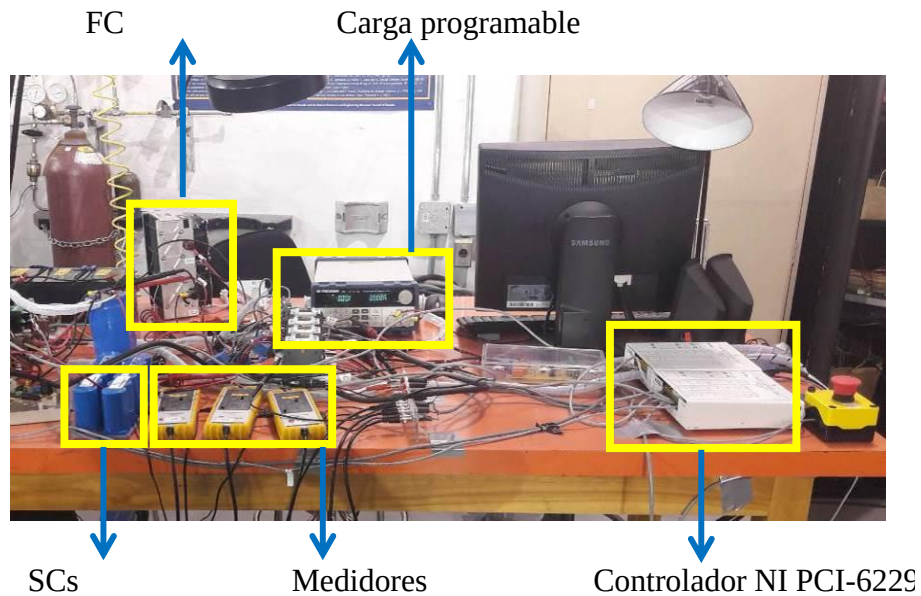
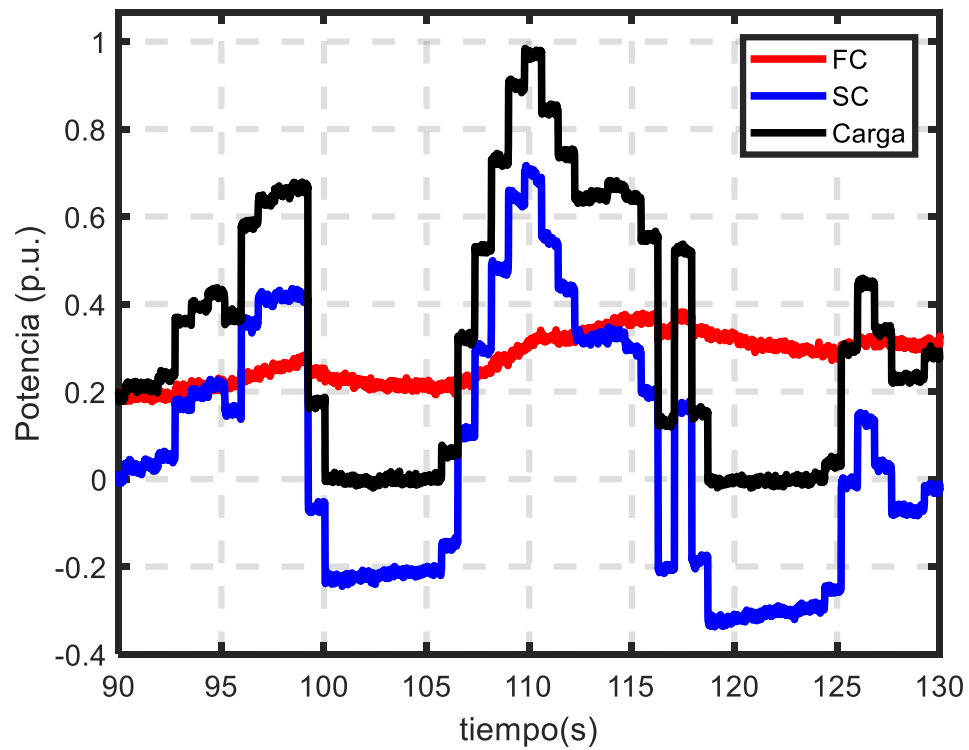


Figura 20. Banco experimental



Este banco de pruebas ha sido utilizado para la realización de experimentos de conexión y control de fuentes híbridas con conexión directa FC-SC. La Figura 21 muestra un extracto de un experimento que tiene como objetivo estudiar la distribución de potencia entre las fuentes.

Figura 21. Resultado experimental - Distribución de potencia (p.u.)



Se puede observar en esta figura que la distribución de potencia de la fuente híbrida obtenido de manera experimental se asemeja al logrado por simulación. La FC entrega la potencia media del perfil y los SCs responden cuando se presentan variaciones de carga. Además, se puede observar la energía aprovechada por los SCs para ser cargados cuando la potencia de la FC es mayor a la carga durante los tiempos $t=100s$ y $t=105s$.

5. CONCLUSIONES.

Este trabajo contribuye con una metodología de dimensionado para una fuente híbrida pila a combustible (FC) / supercondensadores (SCs) con conexión directa. Esta consiste en considerar un perfil de potencia como referencia y hojas de datos de la FC y SCs. Se simula en Matlab/Simulink todas las posibles combinaciones FC-SC alimentando la potencia de referencia. Los resultados de simulación son evaluados con tres criterios. La FC no es reversible y posee una limitación en la magnitud y en la dinámica de la corriente. Además, los SCs nunca deben exceder la tensión nominal. Las soluciones admisibles son comparadas mediante una función objetivo que contempla, el costo de operación de la FC, el costo de degradación y el costo de recarga adicional de los SCs. La solución elegida corresponde al valor de SC que represente el menor costo total.

En este trabajo la metodología es utilizada para el dimensionado de un banco de supercondensadores para un laboratorio de tracción eléctrica en la UQTR. El laboratorio cuenta con un perfil de potencia medido en un vehículo eléctrico real (NEMO) y una FC tipo PEM marca Horizon de 500W. Los resultados de la metodología sugieren conectar la FC con dos módulos de SCs conectados en serie de 16V y 58F, es decir, un valor de capacitancia equivalente a 32V y 29F.

Durante la conexión de la FC con SCs de manera directa se presenta una corriente transitoria de alto valor (tres veces la corriente nominal de la FC). Este pico de corriente naturalmente depende de la tensión inicial del SC ($SOC_{SC-init}$). Este problema de la fuente híbrida durante la conexión o arranque es objeto de estudio en otro trabajo. Con respecto a la distribución de potencia, se puede observar que la FC entrega el valor medio de la potencia de referencia, mientras que los SCs responden de manera instantánea antes las variaciones de potencia. Además, los SCs son cargados cuando la potencia de la FC es superior a la carga.

6. RECOMENDACIONES.

Como recomendación se debe tener en cuenta que la metodología de dimensionado propuesta depende del perfil de potencia seleccionado como referencia, por lo tanto, sí la referencia se cambia, se debe realizar nuevamente el dimensionado de la fuente híbrida para el nuevo perfil de potencia. Con respecto a la configuración directa, esta solución funciona desde el punto de vista teórico o ideal, es decir, cuando el perfil de potencia no cambia. Sin embargo, en situaciones reales donde se presentan imprevistos que pueden alterar el perfil de carga, la configuración directa parece no ser la mejor solución para conectar la FC y los SCs. La solución a esta problemática puede ser la implementación de al menos un convertidor de potencia entre la FC y el SC que permita adicionar control sobre la fuente híbrida.

BIBLIOGRAFÍA

AGBIL, K.S. *Et al.* Multiphysics simulation of a PEM electrolyser: Energetic Macroscopic Representation approach. International Journal of Hydrogen Energy. [Online] Jan 2011. Vol. 36. [Cited: 2 Mar 2016] pp. 1382-1398. Available from ScienceDirect. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

ALLEGRE, A. L. *Et al.* Influence of control strategies on battery/supercapacitor hybrid Energy Storage Systems for traction applications. Vehicle Power and Propulsion Conference. [Online] Oct 2009. [Cited: 25 Feb 2016]. Available from IEEE Xplore. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

BAUMAN, Jenniffer and MEHRDAD, Kazerani. A Comparative Study of Fuel-Cell–Battery, Fuel-Cell–Ultracapacitor, and Fuel-Cell–Battery–Ultracapacitor Vehicles. IEEE Transactions on Vehicular Technology. [Online] Mar 2008. [Cited: 24 Feb 2016]. Available from IEEE Xplore. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

BIENAIMÉ, D. *Et al.* Energetic Macroscopic Representation as an efficient tool for energy management in a hybrid electrical system embedded in a helicopter. Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion. [Online] Dec 2012. [Cited: 6 Mar 2016]. Available from IEEE Xplore. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

BOULON, Loïc. *Et al.* A macroscopic PEM Fuel model including water phenomena for vehicle simulation. Elsevier: An International Journal, Renewable Energy. [Online] Oct 2012. Vol. 46. [Cited: 23 Feb 2016] pp. 81-91. Available from Science direct. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

BOUSCAYROL, Alan. *Et al.* Simulation of a Wind Energy Conversion System using Energetic Macroscopic Representation. Power Electronics and Motion Control Conference. [Online] Jan 2013. [Cited: 6 Mar 2016]. Available from IEEE Xplore. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

BÜCHI, Felix. *Et al.* Electrical Drivetrain Concept with Fuel Cell System and Supercapacitor Results of the “HY-LIGHT®”-vehicle. Conference: 5. VDI Tagung Innovative Fahrzeugantriebe. [Online] Nov 2006. [Cited: 6 Apr 2016]. Available from ResearchGate

CHAPOULIE, P. and ASTIER, Stéphan. Modelling of an electric vehicle including ultracapacitors with SABER. Electric Vehicle Conference EVS. [Online] Sept 1998. [Cited: 16 Mar 2016]. Available from IEEE Xplore. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

CHEN, Huicui; PUCHENG, Pei and MANCUN, Song. Lifetime prediction and the economic lifetime of Proton Exchange Membrane fuel cells. Applied Energy. [Online] Mar 2015. Vol. 142. [Cited: 28 Feb 2016] pp. 154-163. Available from ScienceDirect. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

DEPATURE, Clément. *Et al.* IEEE VTS Motor vehicles challenges 2017 – Energy management of a fuel cell/battery vehicle. Vehicle Power and Propulsion Conference. [Online] Oct 2016. [Cited: 21 Jan 2016]. Available from IEEE Xplore. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

DEPATURE, Clément. Commandes par inversion d'un véhicule à pile à combustible et supercondensateurs. Ph.D thesis. Université du Québec à Trois-Rivières. 2017.

EMR Website. Energetic Macroscopic Representation. [Accesed:13 Mar 2018]. Available from internet <http://www.emrwebsite.org>

GARCIA ARREGUI, Marcos. Theoretical study of a power generation unit based on the hybridization of a fuel cell stack and ultracapacitors. PhD thesis. Université de Toulouse. 2007.

HINAJE, M. *Et al.* An innovating application of PEM fuel cell: Current source controlled by hydrogen supply. International Journal of Hydrogen Energy. [Online] Sep 2012. [Cited: 21 May 2017]. Available from ScienceDirect. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

LHOMME, Walter. *Et al.* Simulation of a photovoltaic conversion system using Energetic Macroscopic Representation. Power Electronics and Motion Control Conference. [Online] Jan 2013. [Cited: 6 Mar 2016]. Available from IEEE Xplore. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

MARX, Neigel. *Et al.* Degraded mode operation of multi-stack fuel cell systems. Vehicular Power and Propulsion Conference. [Online] Oct 2014. Vol. 6. [Cited: 16 Jan 2016] pp. 3-11. Available from IEEE Xplore. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

MARX, Neigel. Gestion énergétique et dimensionnement des systèmes hybrides multi-piles à combustible et batteries pour application au transport automobile. PhD thesis. Université du Québec à Trois-Rivières. 2017.

MAXWELL Ultracapacitors. Product matrix. [Accesed:13 Jan 2018]. Available from internet http://www.maxwell.com/images/documents/ProductMatrix_3000489_3.pdf

MAXWELL Ultracapacitors. UC Reference: BMOD0058 E016 B02. [Accesed:13 Jan 2018]. Available from internet <http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/16v-small-modules/documents>

MORIN, Benoît. Hybridation d'une pile a combustible par des supercondensateurs: vers une solution passive et directe. PhD thesis. Université de Toulouse. 2013.

SILVA, Rosa. Contribution au pronostic de durée de vie des systèmes pile à combustible de type PEMFC. PhD thesis. Université du Québec à Trois-Rivières. 2013.

SOLANO, Javier. Modélisation et supervision des flux énergétiques à bord d'un véhicule hybride lourd: approche par logique floue de type-2. PhD thesis. Université de Franche-Compté. 2012.

THOUNTHONG, Phatiphat. *Et al.* Comparative study of fuel-cell vehicle hybridization with battery or supercapacitor storage device. IEEE Transactions on Vehicular Technology. [Online] Jul 2009. Vol. 58. [Cited: 17 Apr 2016] pp. 3892-3904. Available from IEEE Xplore. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

THOUNTHONG, Phatiphat. *Et al.* Energy management of a fuel cell/solar cell/supercapacitor hybrid power source. Journal of Power Sources. [Online] Jan 2011. Vol. 196. [Cited: 17 Apr 2016] pp. 313-324. Available from ScienceDirect. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

WU, Billy. *Et al.* Design and testing of a 9.5 kWe proton exchange membrane fuel cell-supercapacitor passive hybrid system. International Journal of Hydrogen Energy. [Online] May 2014. Vol. 39. [Cited: 17 Jun 2017] pp. 7885-7896. Available from ScienceDirect. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

ZHAO, Hengbing; BURKE, Andrew. Fuel cell powered vehicles using supercapacitors-device characteristics, control strategies, and simulation results. Fuel cell journal. [Online] Sept 2010. Vol. 10. [Cited: 19 Jan 2016] pp. 879-896. Available from Wiley online library.

ZUBIETA, Luis; BONERT, Richard Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. IEEE Transactions on Industry Applications. [Online] Feb 2000. Vol. 36. [Cited: 23 Feb 2016] pp. 199-205. Available from IEEE Xplore. [Biblioteca Universidad Industrial de Santander]

ANEXOS

ANEXO A. CAP. 2 MODELO DE SIMULACIÓN EN MATLAB/SIMULINK DE LA FUENTE HÍBRIDA FC/SC CON CONEXIÓN DIRECTA.