



**Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Manresa**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

***TRABAJO FINAL DE GRADO: Caracterización y
adquisición del comportamiento de una celda de
combustible para la valoración de la eficiencia
energética en un motor eléctrico a escala.***

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Autor: Alejandro Bielsa Hernández

Director: J.J. de Felipe

Curso 2016/17, 2º Cuatrimestre

Data de entrega: 26/06/2017



ÍNDICE DE LA TESIS

RESUMEN Y PLANTEAMIENTO DE LA TESIS.....	i
MATERIAL DEL PROYECTO.....	iii
ESTRUCTURACIÓN DE LA TESIS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	ix
1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA, TECNOLÓGICA Y ANÁLISIS DEL CONSUMO DE LAS FUENTES DE ENERGIA	1
1.1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA TECNOLOGÍA Y SUS FUENTES DE ENERGÍA	1
1.2. ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO MUNDIAL EN LA ACTUALIDAD.....	5
1.3. IMPORTANCIA Y SITUACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES.....	11
2. PILA DE COMBUSTIBLE COMO FUENTE GENERADORA DE HIDRÓGENO	12
2.1. LA PILA DE COMBUSTIBLE	12
2.1.1. LA PILA DE COMBUSTIBLE COMO HERRAMIENTA DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO Y ELECTRICIDAD.....	12
2.1.2. TIPOS DE PILAS Y SUS CARACTERÍSTICAS	14
2.1.2.1. Pila de combustible de membrana de intercambio protónico (PEM)	14
2.1.2.2. Pila de combustible de metanol (DMFC)	15
2.1.2.3. Celdas de combustible alcalinas (AFC).....	15
2.1.2.4. Pila de combustible de Ácido Fosfórico (PAFC).....	15
2.1.2.5. Pila de combustible de Carbonato Fundido (MCFC)	16
2.1.2.6. Pila de combustible de óxido Sólido (SOFC).....	16
2.2. MÉTODOS DE OBTENCIÓN DEL HIDRÓGENO.....	16
2.2.1. ELECTRÓLISIS.....	16
2.2.2. REFORMADO	17
2.2.3. BIOMASA CELULÓSICA	18
2.2.4. CICLOS TÉRMICOS	18
2.2.5. FOTOQUÍMICOS	19
2.3. ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO EN FUNCIÓN DE SU ESTADO	19
2.3.1. ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO A PRESIÓN COMO GAS COMPRIMIDO ...	20
2.3.2. ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO LICUADO.....	21
2.3.3. ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO EN HIDRUROS METÁLICOS.....	22
2.3.4. OTROS MÉTODOS DE ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO	23
2.3.4.1. Almacenamiento por adsorción en carbón o crioadsorción.....	23
2.3.4.2. Almacenamiento en microesferas de vidrio y zeolitas	24
2.3.4.3. Almacenamiento en hidruros líquidos.....	24
3. PROCESOS TEÓRICOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA CELDA.....	25



3.1. COMPORTAMIENTO DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE.....	25
3.1.1. FUNCIONAMIENTO ELECTROQUÍMICO DEL SISTEMA (PILA PEM).....	25
3.1.2. FUNCIÓN DE GIBBS Y EL POTENCIAL DE NERNST.....	28
3.1.3. VARIABLES QUE AFECTAN AL FUNCIONAMIENTO DE LA PILA.....	30
3.1.4. EFICIENCIA DE LA PILA.....	32
3.1.5. LA LEY DE COULOMB Y DE FARADAY PARA EL FLUJO MÁSSICO DEL SISTEMA.....	33
3.1.6. FÓRMULAS Y PRINCIPIOS MECÁNICOS PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL VEHÍCULO.....	35
3.2. CÁLCULOS APLICADOS PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TEÓRICO.....	38
3.2.1. DATOS INICIALES.....	38
3.2.2. ENERGIA DE FORMACIÓN Y DISOCIACIÓN DEL AGUA.....	39
3.2.3. VOLUMENES Y FLUJOS DEL SISTEMA.....	41
3.2.4. CÁLCULO TEÓRICO SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DEL VEHÍCULO.....	43
3.3. CÁLCULOS APLICADOS PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL.....	45
3.3.1. COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL DE LA CELDA.....	45
3.3.1.1. Resistencia interna.....	45
3.3.1.2. Curva característica.....	46
3.3.1.3. Energía de disociación y asociación.....	48
3.3.1.4. Flujo mássico y volumen de las etapas.....	49
3.3.1.5. Fuerzas mecánicas.....	53
3.3.2. CONCORDANCIA ENTRE LOS RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES.....	53
4. ADQUISICIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE VÍA LabVIEW.....	56
4.1. COMUNICACIÓN SERIAL ENTRE ARDUINO UNO WIFI Y LabVIEW.....	56
4.2. DISEÑO Y FUNCIONAMIENTO DE LOS TIMERS.....	58
4.3. ESTRUCTURA DEL SISTEMA PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS DE LA INTERFAZ.....	61
4.3.1. ESTRUCTURA ETAPA DE CARGA.....	62
4.3.2. ESTRUCTURA ETAPA DE DESCARGA.....	68
4.3.3. ESTRUCTURA EN ESTADO DE REPOSO.....	72
5. CONCLUSIONES.....	74
ANEXO.....	76
CÓDIGOS DESARROLLADOS PARA LA CORRECTA OBTENCIÓN Y VISUALIZACIÓN DE DATOS EN ARDUINO.....	76
TEST DE FUNCIONAMIENTO DE LA PLACA ARDUINO UNO WIFI.....	76
CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES ACS712-5A.....	76
COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO DEL SISTEMA.....	79
COMUNICACIÓN VIA SERIAL ARDUINO/ LABVIEW.....	82



TABLAS DE DATOS	85
DATOS EXPERIMENTALES DE LOS 5 ENSAYOS PRINCIPALES	85
RESULTADOS DEL ESTUDIO TEÓRICO DEL SISTEMA.....	86
RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL SISTEMA	87
Etapa de Carga	87
Etapa de descarga	100
DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE LA RESISTENCIA INTERNA DE LA CELDA	120
ESQUEMAS ELÉCTRICOS	121
MONTAJE ELÉCTRICO PARA LA CALIRACIÓN DEL SENSOR 1 ACS712 -5A	121
MONTAJE ELÉCTRICO PARA LA CALIRACIÓN DEL SENSOR 2 ACS712 -5A	121
MONTAJE ELÉCTRICO PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS DEL SISTEMA	122
DIAGRAMA DE BLOQUES DE LabVIEW	123
TIMER 1	123
TIMER 2	124
ADQUISICIÓN DE DATOS DEL SISTEMA	125
PANEL FRONTAL DE LabVIEW	130
ADQUISICIÓN DE DATOS DEL SISTEMA	130
REFERENCIAS.....	131



ÍNDICE DE LAS TABLAS

Tabla 1. Indicadores Clave del abastecimiento energético correspondientes a 1993,2011 y 2020.....	5
Tabla 2. Reservas de carbón: 5 primeros países.....	7
Tabla 3. Reservas de crudo: 5 Primeros países.....	8
Tabla 4. Las Reservas de gas natural: 5 Primeros países.	8
Tabla 5. Energía nuclear: Primeros 5 países.	9
Tabla 6. Hidroelectricidad: 5 Primeros países.	9
Tabla 7. Energía eólica: Primeros 5 países.....	10
Tabla 8. Energía Solar: Primeros 5 países.	10
Tabla 9. Diferencia estructural y energética entre las dos etapas.....	28
Tabla 10. Carga eléctrica de un mol de electrones.....	34
Tabla 11. Propiedades termodinámicas de la etapa de carga.....	39
Tabla 12. Propiedades termodinámicas de la etapa de carga.....	40



ÍNDICE DE LAS FIGURAS

Figura 1. Máquina de vapor de Thomas Newcomen 1712.	2
Figura 2. Máquina de vapor de James Watt 1765.	2
Figura 3. Patente del motor de gas perfeccionado de Nicolaus Otto.	3
Figura 4. Evolución histórica del consumo de las diversas fuentes de energía.	4
Figura 5. Producción energética de 1972 hasta 2014.	7
Figura 6. Etapa de carga: esquema del principio de operación.	13
Figura 7. Etapa de descarga: esquema de principio de operación.	14
Figura 8. Representación del proceso de electrólisis del agua.	17
Figura 9. Esquema del proceso industrial del refinado del metano.	18
Figura 10. Proceso para la compresión del H ₂	20
Figura 11. Depósito de hidrógeno de alta presión del Toyota Mirai.	21
Figura 12. Planta de licuado de hidrógeno.	22
Figura 13. Tipos de nanofilamentos de carbono en la actualidad.	24
Figura 14. Esquema interno de la etapa de descarga de una pila PEM.	26
Figura 15. a) Estructura de una pila de combustible de carga, b) estructura de una pila de combustible de etapa de descarga.	28
Figura 16. Esquema eléctrico interno de la pila de combustible.	30
Figura 17. Curva de polarización de la celda.	32
Figura 18. Representación teórica ideal de las fuerzas mecánicas del vehículo.	36
Figura 19. a) Rueda en estática. b) Rueda en movimiento.	37
Figura 20. Resistencias internas de los 5 principales ensayos.	46
Figura 21. <i>Curvas características de los 5 principales ensayos en la etapa de carga.</i>	47
Figura 22. <i>Curvas características de los 5 principales ensayos en la etapa de descarga.</i>	48
Figura 23. Energía de disociación de los 5 principales ensayos.	49
Figura 24. Energía de asociación de los 5 principales ensayos.	49
Figura 25. Flujos másicos de los 5 principales ensayos en la etapa de carga.	50
Figura 26. Volúmenes de los 5 principales ensayos en la etapa de carga.	51
Figura 27. <i>Flujos másicos de los 5 principales ensayos en la etapa de descarga.</i>	52
Figura 28. <i>Volúmenes de los 5 principales ensayos en la etapa de descarga.</i>	52
Figura 29. <i>Fuerzas mecánicas de los 5 principales ensayos.</i>	53
Figura 30. <i>Tipo de conectores entre la placa Arduino y el PC.</i>	56



RESUMEN Y PLANTEAMIENTO DE LA TESIS

This thesis is part of the previous line of research carried out by the students of the mechanics specialty together with the Department of mechanics and fluids, who developed a Fuel Cell together further to a prototype of a small vehicle connected to another Cell, this last operative in the Discharge phase, which one allows to generate a current able to feeds two rotors connected in parallel resulting in the vehicle's movement.

The purpose of this project is to contribute and analyze the electrochemical processes from the Fuel Cells subjected to experimental tests to record the relationship between the theoretical and experimental areas and obtain these results by establishing a data acquisition system (LabVIEW) that could help us to see in real the consequent values of the process. As a consequence, it is intended to define all parameters in precise manner through the devices with which I will work on. All this to finally evaluate and ensure the performance obtained from the cell in order to demonstrate if its efficiency and the effects it causes are worthy of having a more relevant role as renewable energy in the future to come.

Generally, the fuel cells or also called cells usually have an energy efficiency between 30 - 60%, and can reach up to 85 - 90% if they capture the heat released for use. However, as I am working with a prototype assembly that has been somewhat less elaborate, I expect efficiency levels less than 20%.

The system of acquisition of this work starts from the classification of the two stages to discuss: the first will be the loading phase of the first fuel cell. And the second, the discharge phase from the little vehicle. Both names are referred to the different functions in which they can work it. Consequently, it will make a series of previous tests on the model with the aim to estimate the volume of hydrogen necessary to be able to start up the mini vehicle. Thereafter, from the quantity of the product and the consumption required, an average of the different samples are made together with stoichiometric calculations to determine the theoretical data with which to work.

Secondly, after knowing the values in which the system should operate, we must find the relationship between stoichiometric and electro-chemical data. Taking into account that when we are working at extremely small levels like these, any minimum variable or factor can cause inconsistencies and errors. Therefore, knowing the working ranges of the variables to be studied of the cell and the behavior that it covers and the possible errors, it is made a list of the necessary material to use later during the taking of data.

Thirdly, in reference to the process's material chosen previously, it's necessary a plaque computer, Arduino ONE WIFI, with two sensors of effect Hall like the ACS712 to obtain the values of the current that circulate in the two stages of the system. Together with resistors, leds and others, establishing a serial communication with my PC, in order to transfer the information, finally after calibrate the sensitivity of the sensors, design of the appropriate software and monitored the equivalent data between model and PC , lastly the interface will be designed through LabVIEW.

As output data, the interface displays the results of both Cell processes, whether volumetric flows, potentials variation, internal resistances, characteristic curves, yields and more. All these fundamental magnitudes, observable at all points during the course of the process.

MATERIAL DEL PROYECTO

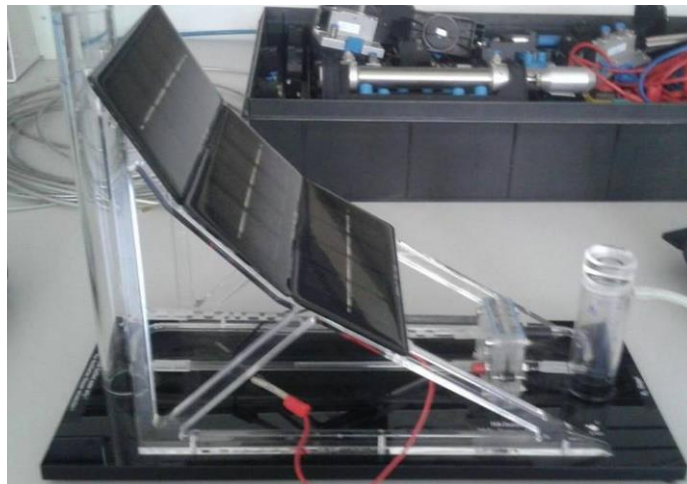
En este apartado aparece todo el material empleado para la realización del proyecto, junto a sus imágenes, y los softwares e extensiones que han sido usados durante el transcurso de éste.

SOFTWARES

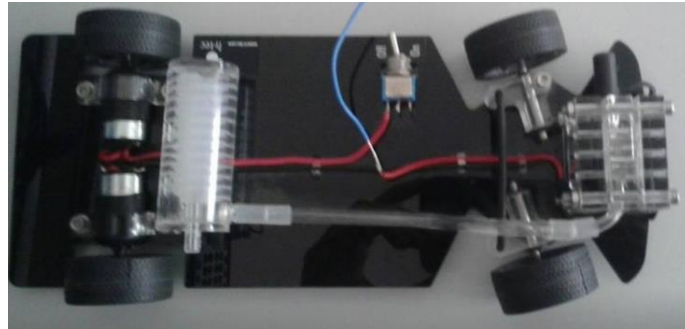
- 1) Microsoft Office Word 2013.
- 2) Microsoft Office Excel 2013.
- 3) Video VEGAS DEMO PRO 11.0.
- 4) Arduino.
- 5) LabVIEW 2015 (32 bit).
- 6) VI Package Manager – Extensión de LabVIEW.
- 7) NI-VISA Interactive control.
- 8) Fritzing.
- 9) Matlab.
- 10) Mendeley 1.11.

MATERIAL PRÁCTICO

Celda de combustible (etapa de carga)



Mini vehículo eléctrico (etapa de descarga)



Sensores de medida de corriente de efecto Hall (ACS712 5A)



Placa Arduino UNO WIFI



Cable tipo USB A/B



Soldador de estaño



Filamento para soldaduras de estaño



Pela-cables



Tornavis de punta plana



Componentes eléctricos

- 2x Placa Protoboard.
- 2x Resistencia de $1k\Omega$ de 0.25 W y tolerancia del 5%.
- 2x Resistencia de 220Ω de 0.25 W y tolerancia del 5%.
- 1x Diodo led de 5mm encapsulado rojo.
- 1x Diodo led de 5mm encapsulado transparente.
- 2x Pulsadores de 4 patas.



ESTRUCTURACIÓN DE LA TESIS

La estructura de la memoria es la siguiente:

El capítulo 1 tratara sobre hacer perspectiva a nivel histórico de la evolución que ha habido en lo referente a energías producidas, ya sean renovables o no, hasta llegar a las que tenemos al día de hoy. También se resumirá sobre la importancia de las principales invenciones tecnológicas, la clasificación de combustibles y procesos realizados después del boom tecnológico que tuvo lugar en el siglo XVIII, durante la Revolución industrial. Además de esto habrá un análisis en base al consumo y relevancia de las fuentes de energía que hay en la actualidad.

El capítulo 2 revisa los aspectos y términos fundamentales referentes a las pilas de combustible además de una explicación detallada sobre las formas de obtención y almacenaje del hidrógeno que existen en la actualidad.

En primer lugar se describe la función que cumple la pila, la composición en la que se puede fabricar, el comportamiento teórico y experimental en el que se rigen, junto a los parámetros que le afectan, más los diversos tipos presentes en el mercado hoy en día.

En segundo lugar se indagará sobre los métodos de obtención de hidrógeno y sus particularidades.

Y por último, las formas de almacenar el hidrógeno para su posterior transporte en referencia al estado físico.

El capítulo 3 se lleva a cabo el planteamiento y formulación de las teorías necesarias para el análisis del comportamiento teórico junto al experimental, procedente de los 5 ensayos más precisos y correctos, durante el período de obtención de datos del sistema. Para que en el siguiente subapartado del mismo capítulo tenga lugar a la implementación de éstas.

Inicialmente, será comentada la diferencia que se hayan entre las dos etapas que forman el sistema en sí (etapa de carga y etapa de descarga), señalando como la composición estructural de las celdas afecta al tipo de conversión que tiene lugar, además de las reacciones electroquímicas resultantes.

Tras haber hecho hincapié en el apartado anterior, lo siguiente es evaluar el trabajo eléctrico que se consume en su interior y el producido como salida final dirigido al motor eléctrico por ello será empleado la función de Gibbs y el potencial de Nernst.

En tercer lugar, se valorara la influencia de ciertas variables que tienen lugar en el proceso, (pérdidas óhmicas, pérdidas por activación y pérdidas por concentración), siendo estas las responsables de la disminución del rendimiento de la celda.



A continuació, se desenvoluparà la relació entre els valors purament químics juntament amb els elèctrics per establir posteriorment com el consum dels reactius produeix valors energètics en un interval de temps parametritzat.

Seguidament, tindrà lloc la explicació i elaboració dels càlculs que han de ser portats a terme per a la mesura de la força, fricció, velocitat, acceleració i altres que tindrà lloc en el mini vehicle.

Per últim, se faran a terme els càlculs de cada un dels apartats anteriors més la variació que han tingut lloc durant el procés en els diferents paràmetres tècnics a observar.

En el capítol 4 se mostra la interfície desenvolupada per a l'adquisició de dades del sistema via serial a través del software LabVIEW més una detallada explicació de la funcionalitat d'aquesta.

En el capítol 5 i últim d'aquesta memòria, conté les conclusions i logros personals assolits amb aquest treball.

Al final de la memòria se inclouen els diferents annexos emprats i obtinguts durant la realització del projecte, com són els codis formulats per a la calibració dels sensors a través del monitor del software Arduino, l'adquisició dels dades elèctrics de les cèl·lules, taules realitzades etc. més el llistat complet bibliogràfic.

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Magnitud	Unidades
V_o	Tensión de la celda en circuito abierto.	[V]
V_L	Tensión de salida de la celda.	[V]
V_{celda}	Potencial real de la celda.	[V]
I_{celda}	Corriente de salida de la celda.	[A]
j	Densidad de corriente del material de los electrodos.	[A·cm ⁻²]
R_{int}	Resistencia variable interna de la celda.	[Ω]
$R_{pérdidas}$	Resistencia provocada por las pérdidas internas de la celda.	[Ω]
$R_{óhm}$	Resistencia óhmica de la celda.	[Ω]
R_{elect}	Resistencia debida a los electrones.	[Ω]
R_{ion}	Resistencia debida a los iones.	[Ω]
$R_{terminales}$	Resistencia debida a los terminales de contacto y conexiones.	[Ω]
E_{ohm}	Pérdidas de potencial por oposición al flujo de iones y elect.	[mV]
E_{act}	Pérdidas de potencial por activación.	[mV]
E_{con}	Pérdidas de potencial por concentración.	[mV]
E_{NERNST}	Potencial teórico de la celda.	[mV]
T	Temperatura de operación.	[K]
t	Tiempo transcurrido.	[s]
α	Coefficiente de transporte de electrones.	[Adimensional]
$n_{el.}$	Número de electrones por moléculas.	[Adimensional]
$\zeta_{real PEM}$	Eficiencia real de la celda.	[Adimensional]
$\zeta_{energ. term.}$	Eficiencia de la energía térmica de la celda.	[Adimensional]
$\zeta_{Volt.}$	Eficiencia del voltaje de la celda.	[Adimensional]
$\zeta_{comb.}$	Eficiencia del combustible en la celda.	[Adimensional]
A	Superficie de los electrodos.	[cm ²]
ω	Velocidad angular de las ruedas.	[rad·s ⁻¹]
a_c	Aceleración centrípeta.	[m·s ⁻²]
F	Fuerza de desplazamiento.	[N]
$F_r.$	Fuerza de fricción del mini vehículo.	[N]
$E_{GIBBS.}$	Energía eléctrica producida o consumida en la celda.	[J]
$E_{Cinética.}$	Energía de desplazamiento del mini vehículo.	[J]
$E_{Rotación.}$	Energía de desplazamiento de las ruedas del mini vehículo.	[J]
R_{Gases}	Constante de los gases ideales.	[J·(mol·K) ⁻¹]
Q	Carga eléctrica.	[C]
I_c	Momento de inercia.	[kg·m ²]
$m_{sus.prod.}$	Masa de la sustancia producida en el electrodo.	[g]
$\dot{m}_{comb.}$	Flujo másico del combustible.	[kg·s ⁻¹]
$\dot{m}_{H_2O.}$	Flujo másico del agua destilada.	[kg·s ⁻¹]
$\dot{m}_{H_2.}$	Flujo másico del hidrógeno.	[kg·s ⁻¹]
$\dot{m}_{O_2.}$	Flujo másico del oxígeno.	[kg·s ⁻¹]
f	Constante de Faraday.	[96500 C·mol ⁻¹]



H	Entalpía de la etapa.	$[\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}]$
$T\cdot S$	Entropía de la etapa.	$[\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}]$
U	Energía interna de la etapa.	$[\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}]$
P	Presión.	$[\text{Pa}]$
W	Trabajo de expansión de los gases.	$[\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}]$
V	Velocidad del vehículo.	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
V_{H_2O}	Volumen del agua destilada.	$[\text{cm}^3]$
V_{H_2}	Volumen del hidrógeno.	$[\text{cm}^3]$
V_{O_2}	Volumen del oxígeno.	$[\text{cm}^3]$
n_{H_2O}	Moles del agua destilada.	$[\text{mol}]$
n_{H_2}	Moles del hidrógeno.	$[\text{mol}]$
n_{O_2}	Moles del oxígeno.	$[\text{mol}]$
d_{H_2O}	Densidad del agua destilada.	$[\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3}]$
d_{H_2}	Densidad del hidrógeno.	$[\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3}]$
d_{O_2}	Densidad del oxígeno.	$[\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3}]$
P_{et1}	Potencia en la etapa 1.	$[\text{w}]$
P_{et2}	Potencia en la etapa 2.	$[\text{w}]$
Rs	Unidades de señal por segundo.	$[\text{baudios}]$
Rb	Velocidad de transmisión de datos.	$[\text{bps}]$



1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA, TECNOLÓGICA Y ANÁLISIS DEL CONSUMO DE LAS FUENTES DE ENERGÍA

El objetivo de este capítulo es el de revisar los diferentes sucesos que han habido desde el inicio de la época industrial hasta la actualidad y las diferentes fuentes de energía que han ido surgiendo durante. Junto a esto, también se indagará sobre el consumo de energía en la actualidad, dando un mayor énfasis a las energías renovables como es el caso de las Pilas o Celdas de Combustible.

1.1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA TECNOLOGÍA Y SUS FUENTES DE ENERGÍA

Cuando se habla de la evolución histórica de la tecnología, se tiende a abarcar a conceptos muy amplios. Pues podemos pasar a tratar temas datados en los albores de la humanidad en los que el Homo erectus ajeno a su propia capacidad física dio lugar al descubrimiento del fuego, hará cerca de 790.000 años, además de las primeras herramientas fabricadas con piedras, y como a partir de entonces se produjesen una serie de avances y descubrimientos que llegarían hasta el día de hoy. No obstante, en el caso de que el tema fuese encaminado en ese sentido, seguramente se haría algo largo y tedioso, por lo que creo que lo más oportuno sería empezar a tratarlo desde mediados del s. XVIII, momento que dio lugar a la Revolución Industrial Inglesa y como esta supuso ser una ruptura con el pasado mucho más drástica que cualquier otra desde la invención de la rueda.

En referencia a lo anterior, la Revolución Industrial comenzó un proceso acumulativo de avances tecnológicos retroalimentados con repercusiones en diferentes sectores como fueron el agrícola, el textil, industrial, energético etc., pero por encima de estos, en el que supuso un mayor avance fue en el económico. Y es que, estos dispositivos permitieron un decrecimiento en el tiempo de transformación de los inputs dando lugar a unos productos finales con mejores acabados e uniformes, con unos costes reducidos además de unos volúmenes de producción inconcebibles por aquél entonces.

Una de las máquinas que tuvieron un papel decisivo en el desarrollo de la explotación energética durante esa época fue; la máquina de vapor. Y es que, para entonces, la energía proporcionada por la rueda hidráulica comenzaba a ser insuficiente. Motivo por el cual la explotación de la energía térmica se impuso de forma irreversible sobre esta.

Es necesario recalcar que cuando nos referimos a la máquina de vapor, no se está haciendo referencia a la máquina creada por James Watt en 1765. Sino al

inventor, al que años más tarde le sirvió de inspiración al ingeniero James Watt, Thomas Newcomen, herrero e inventor que construyó la máquina de vapor atmosférica utilizada con el fin de bombear agua fuera de las minas de carbón y estaño.

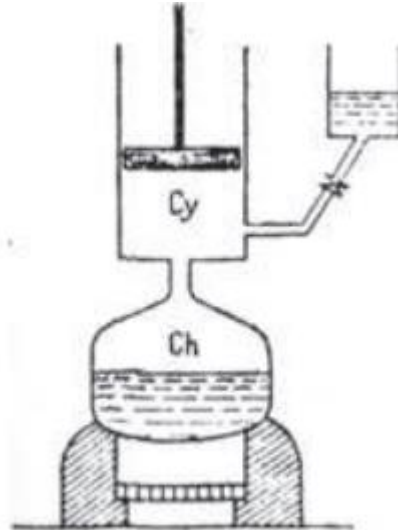


Figura 1. Máquina de vapor de Thomas Newcomen 1712.

Este dispositivo pese a generar un funcionamiento bastante irregular, pues se paraba con frecuencia y su eficiencia dejaba bastante que desear, alcanzó cierta difusión consiguiendo a la vez que el carbón no escasease en los mercados ingleses.

Más tarde en 1765 fue cuando James Watt creó la conocida máquina de vapor la cual en diferencia de la M.V. de Thomas decidió comunicar la salida del pistón a un depósito donde diese lugar la condensación del vapor, y no en el pistón como era el diseño de Thomas Newcomen.

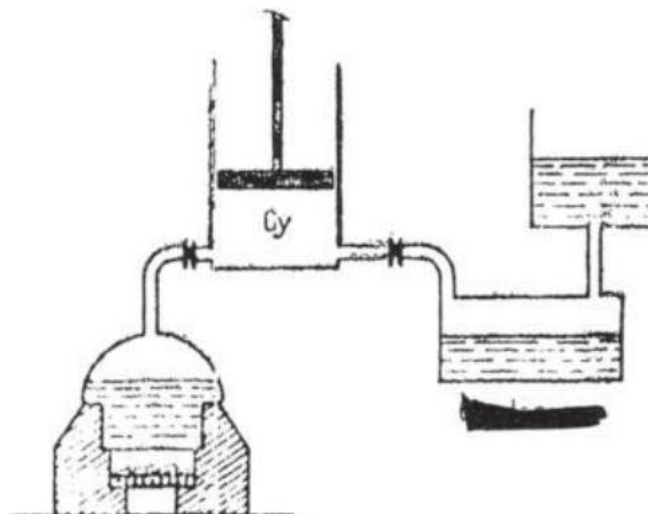


Figura 2. Máquina de vapor de James Watt 1765.



La nueva tecnología aportada por Watt, que iría optimizando en el transcurso de los años, entre otras muchas ventajas, tenía un bajo consumo de energía en comparación a la máquina atmosférica, y eso se plasmó en su comercialización. Pues en apenas 25 años, de las 70 máquinas de Newcomen que funcionaban en *Cornwall*¹, en 1790 fueron sustituidas todas a excepción de una por las de Watt. Y es que en las *Consolidated Mines de Cornwall* el gasto de carbón se redujo alrededor de 19.000 hasta las 6.100 toneladas al año. Constituyendo así un ahorro anual de 10.830 libras esterlinas al precio corriente de carbón.

Por lo tanto, se puede decir con claridad que el carbón desempeñó un papel principal durante aquél entonces pues paso a ser el combustible que le daba energía a las fabricas manufactureras, a varios dispositivos como la máquina de vapor y a diversos productos industriales. Hecho que hizo dejar atrás a fuentes de energía entre ellas; la madera y la hidroeléctrica relevándolas a un segundo plano.

El carbón siguió liderando el crecimiento industrial, a nivel mundial, hasta prácticamente los mediados del s. XIX, aunque resultaba ser un problema a la hora de ser usado junto a la máquina de vapor. Y es que, el hecho de combinar el hornillo más la caldera y el cilindro de la máquina de vapor suponía unos vehículos de grandes dimensiones, que a su vez equivalía a un mayor consumo de carbón debido a su peso para el funcionamiento de este. Por eso con la aparición del petróleo y el gas como fuentes energéticas las cuales sirvieron para alimentar a nuevos inventos como lo fue el motor de combustión interna en el año 1862 por Nikolaus August Otto sirvieron como punto de inflexión en el consumo energético y a su consecuencia precursor de la Segunda Revolución Industrial. De este modo, finalmente el carbón pasó a ser destronado por el petróleo y el gas como primera fuente. Sin embargo, sus usos se han reinventado y aún a día de hoy se sigue empleando mayoritariamente como materia prima para generar electricidad.

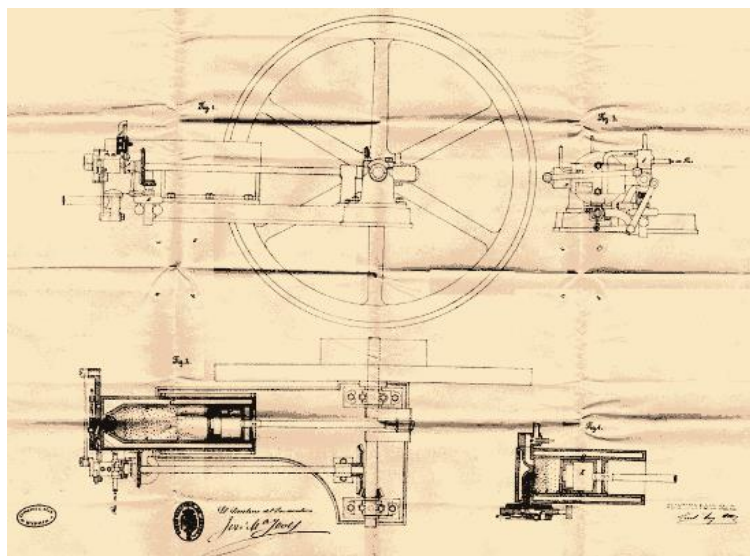


Figura 3. Patente del motor de gas perfeccionado de Nicolaus Otto.

Durante la primera mitad del s. XX, se caracterizó por el empleo de las mismas fuentes energéticas que en el siglo anterior, con el desarrollo adicional de la electricidad industrial en este periodo. Las principales invenciones tecnológicas fueron: en la industria, la invención creciente de aparatos domésticos como la lavadora y aspiradora, la obtención de nuevos materiales de construcción como el hormigón armado y el cristal, de fibras sintéticas para la producción textil, y de accesorios plásticos; en medicina, el hallazgo de sustancias contra las infecciones, como la penicilina y otros antibióticos; la mejora de los conocimientos en agricultura, alimentación y técnicas de conservación de alimentos; en el transporte la producción en serie del automóvil, que se convirtió en el medio predominante de locomoción, la invención del aeroplano; en los medios de comunicación el desarrollo de la cinematografía así como de la televisión creada a partir del invento del cinescopio en los años veinte. Además de la fabricación de nuevas armas bélicas debidas al origen de la Primera Guerra Mundial, dieron lugar a armamentos como el gas venenoso, misiles de largo alcance, un mayor desarrollo de la navegación y la aeronáutica que dio nuevo impulso al transporte intercontinental.

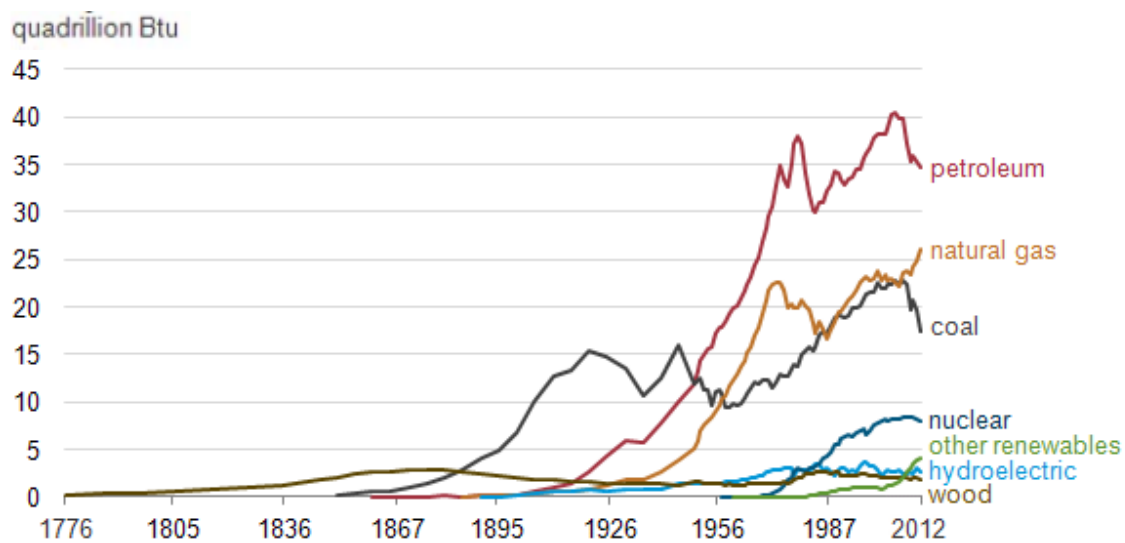


Figura 4. Evolución histórica del consumo de las diversas fuentes de energía.

El petróleo siguió en auge superando así al gas, hasta convertirse en la fuente de energía más utilizada a mediados del s. XX. No obstante, en la gráfica se aprecia un descenso de estos dos combustibles en los años 70. Esta caída fue consecuencia de la Crisis del Petróleo de 1973, en la que los países de la OPEP, (Organización de Países Exportadores de Petróleo), se negaron a exportar sus energías fósiles a los estados que habían apoyado a Israel en la reciente Guerra de Yom Kippur. Este suceso, sirvió de impulso a las energías renovables, que aparecieron por el deseo de los países occidentales de buscar una alternativa a la opresión a la que habían sido sometidos por la codependencia de los estados petroleros.

1.2. ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO MUNDIAL EN LA ACTUALIDAD

El acceso universal a la energía es como tal un objetivo para el futuro, pues en muchos países, especialmente en África y Asia, el ritmo de electrificación y de recursos energéticos, se encuentra rezagada en comparación a los países más desarrollados. Por lo tanto, se puede concluir que la evolución de las fuentes de energía primaria en el mundo durante las últimas décadas es muy distinta según la extensión de su análisis, ya se ha hecho en su conjunto o sólo en los países más desarrollados económicamente.

En mi caso, puesto que no es mi idea centrarme en realizar un estudio que abarque los diferentes países con sus propios establecimientos energéticos tanto su demanda, consumo y demás, trataré de exponer la oferta energética a nivel mundial que ha habido durante los últimos veinte años, la cantidad de reservas y producción de las diferentes fuentes, beneficios y desventajas de cada una además de una previsión de estas para el 2020.

Tabla 1. Indicadores Clave del abastecimiento energético correspondientes a 1993, 2011 y 2020

	1993	2011	2020	Crecimiento 1993 – 2011%
<i>Población, billones</i>	5.5	7	8.1	27
<i>Trillón USD</i>	25	70	65	180
<i>TPES Mtoe</i>	9532	14092	17208	48
<i>Carbón Mt</i>	4474	7520	10108	68
<i>Petróleo Mt</i>	3179	3973	4594	25
<i>Gas natural bcm</i>	2176	3510	4049	62
<i>Hidroelectricidad TWh</i>	2268	3229	3826	29
<i>Nuclear TWh</i>	2106	2386	3761	13
<i>Biomasa Mtoe</i>	1036	1277	1323	23
<i>Otras renovables*</i>	44	515	1999	1070
<i>TWh</i>				
<i>Total TWh</i>	12607	22202	23000	76
<i>Per cápita MWh</i>	2	3	3	52



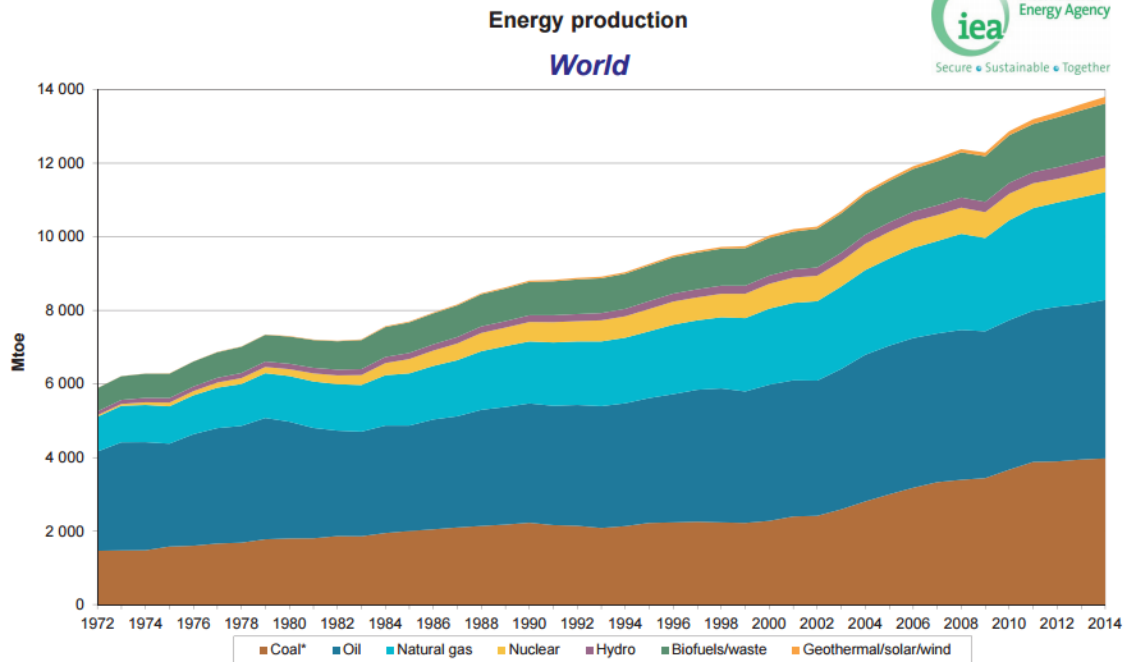
Total CO₂ Gt	21	30	42	44
Per cápita tonne CO₂	4	4	-	11
Intensidad energética	0.24	0.19	-	-21
Koe, 2005 USD				

En la **Tabla 1.**, se puede observar las cifras tomadas de “Energy for tomorrow’s World (WEC, 1995)”. Las cuales muestran los valores reales para una serie de indicadores registrados en 1993, el estado de estos indicadores en 2011 y las proyecciones para 2020.

Comparando los datos de energía primaria en todo el mundo se observa que:

- El suministro total de energía ha aumentado un 76% entre 1993 y 2011, mientras que para el 2020 según las predicciones llegarían hasta un total de 23000 TWh, casi el doble desde 1993.
- Se ha reducido de manera significativa la aportación de los combustibles fósiles, (petróleo, carbón y gas natural), y es que considerando el crecimiento de la población desde 1993 hasta 2011 de un total de 1.5 billones de personas, estas fuentes energéticas han padecido un cierto decremento. Pues pese a reflejar todavía una tendencia a la alza, si se extrapola con la cantidad de habitantes actuales, el consumo por individuo es inferior al de 1993.
- Aumenta la aportación de las energías renovables en un 1070% desde 1993, indicador que refleja que están tomando a pasos agigantados una mayor importancia en la carrera energética. Ya que ante la insostenibilidad y los efectos que causan las energías no renovables, el uso de éstas merecen ser potenciadas hasta finalmente sustituirlas.
- La biomasa y residuos desciende levemente, al igual que hacen los combustibles fósiles.

En la siguiente gráfica, obtenida de *IEA Energy Statistics*, se observa con mayor detalle la variación de la producción energética a escala mundial entre la década de los 80 y la actual:



* In this graph, peat and oil shale are aggregated with coal, when relevant.

Figura 5. Producción energética de 1972 hasta 2014.

Tras haber echado un vistazo a la producción y el consumo energético que producimos a escala mundial, es necesario además de esto mencionar las diferentes reservas de cada fuente primaria de energía y las consecuencias de su uso. Y es que tomando en consideración que el crecimiento de la población es uno de los principales impulsores en la demanda de energética, y este no parece que vaya a cesar, resulta interesante evaluar los cambios que han sufrido en el transcurso de las dos últimas décadas. Para ello se mostrará en las siguientes tablas un análisis de los 5 principales países, con mayores números de reserva y producciones que se hicieron en 1993 y 2011, en las que se mostrará la variación que ha habido.

Tabla 2. Reservas de carbón: 5 primeros países

País	Reservas (Mt)		Producción (Mt)		2011 R/P Años
	2011	1993	2011	1993	
<i>Estados Unidos</i>	237.295	168.391	1.092	858	>100
<i>Federación Rusa</i>	157.010	168.700	327	304	>100
<i>China</i>	114.500	80.150	3.384	1.150	34
<i>Australia</i>	76.400	63.658	398	224	>100

<i>India</i>	60.600	48.963	516	263	>100
<i>Resto del mundo</i>	245.725	50.148	1.805	1.675	>100
<i>Total mundial</i>	891.530	1031.610	7.520	4.474	>100

Tabla 2. Reservas de crudo: 5 Primeros países

País	Reservas (Mt)		Producción (Mt)		R/P
	2011	1993	2011	1993	Años
<i>Venezuela</i>	40.450	9.842	155	129	>100
<i>Arabia Saudita</i>	36.500	35.620	526	422	69
<i>Canadá</i>	23.598	758	170	91	>100
<i>Irán</i>	21.359	12.700	222	171	96
<i>Iraq</i>	19.300	13.417	134	29	>100
<i>Resto del mundo</i>	82.247	68.339	2.776	2.238	30
<i>Total mundial</i>	223.454	140.676	3.973	3.179	56

Tabla 3. Las Reservas de gas natural: 5 Primeros países.

País	Reservas (bcm)		Producción (bcm)		R/P
	2011	1993	2011	1993	Años
<i>Federación Rusa</i>	47.750	48.160	670	640	71
<i>Irán</i>	33.790	20.659	150	27	>100
<i>Qatar</i>	25.200	7.079	117	14	>100
<i>Turkmenistán</i>	25.213	2.860	75	57	>100

<i>Arabia Saudita</i>	8.028	5.260	99	36	81
<i>Resto del mundo</i>	69.761	57.371	2.398	1.438	22
Total mundial	209.742	141.335	3.509	3.179	55

Tabla 4. Energía nuclear: Primeros 5 países.

País	Capacidad instalada (MW)		Generación actual (GWh)	
	2011	1993	2011	1993
<i>Federación Rusa</i>	98.903	99.041	779.000	610.000
<i>Irán</i>	63.130	59.032	415.480	350.000
<i>Qatar</i>	38.009	38.038	162.900	246.000
<i>Turkmenistán</i>	23.643	19.843	122.000	119.000
<i>Arabia Saudita</i>	20.718	7.615	98.616	58.100
<i>Resto del mundo</i>	119.675	116.726	787.777	722.900
Total mundial	364.078	340.295	2.385.903	2.106.000

Tabla 5. Hidroelectricidad: 5 Primeros países.

País	Capacidad instalada (MW)		Generación real (GWh)	
	2011	1993	2011	1993
<i>China</i>	231.000	44.600	714.000	138.700
<i>Brasil</i>	82.458	47.265	428.571	252.804
<i>Estados Unidos</i>	77.500	74.418	268.000	267.326
<i>Canadá</i>	75.104	61.959	348.110	315.750
<i>Federación Rusa</i>	49.700	42.818	180.000	160.300
<i>Resto del mundo</i>	430.420	338.204	828.437	1.150.750
Total mundial	946.182	609.264	2.767.118	2.285.960

Tabla 6. Energía eólica: Primeros 5 países.

País	Capacidad instalada (MW)		Generación real (GWh)	
	2011	1993	2011	1993
<i>China</i>	62.364	15	73.200	-
<i>Estados Unidos</i>	46.919	1814	120.177	3.042
<i>Alemania</i>	29.071	650	48.883	-
<i>España</i>	21.673	52	41.790	177
<i>India</i>	15.880	40	19.475	45
<i>Resto del mundo</i>	62.142	-	74.087	-
<i>Total mundial</i>	238.049	-	337.613	-

Tabla 7. Energía Solar: Primeros 5 países.

País	Capacidad instalada (MW)		Generación real (GWh)	
	2011	1993	2011	1993
<i>Alemania</i>	25.039	-	19.340	-
<i>Italia</i>	12.773	-	10.730	-
<i>Estados Unidos</i>	5.171	360	5.260	897
<i>Japón</i>	4.914	-	5.160	-
<i>España</i>	4.332	-	7.386	-
<i>Resto del mundo</i>	16.621	-	5.002	-
<i>Total mundial</i>	68.850	-	52.878	-



1.3. IMPORTANCIA Y SITUACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

Las energías renovables son fuentes de energía limpia, inagotables y crecientemente competitivas. Estas se diferencian de los combustibles fósiles principalmente en su diversidad, abundancia y potencial de aprovechamiento. Además, no producen gases de efecto invernadero ni emisiones contaminantes, si a esto a más a más, se le añade unos costes de fabricación y de mantenimiento baratos en comparación al de los combustibles fósiles, hacen justificable el crecimiento exponencial que han tenido desde los años 90, (hecho que se ve reflejado en las tablas **1, 6, 7, y 8.** del **apartado 1.2. Análisis del consumo energético en la actualidad**).

A pesar de las cualidades y ventajas que presentan, todavía hay cierta desconfianza sobre ellas, pues constan de algunas desventajas las cuales las hacen ser volubles: el sol no brilla todo el día, no hay siempre viento para hacer girar los generadores etc.

Por ello, es justo citar los principales pros y contras que presentan:

<i>Renovables</i>	La disponibilidad es infinita.
<i>Fiabilidad del suministro</i>	Factores externos como lo es la meteorología, afectan al rendimiento de las centrales y a su vez a la cobertura de los picos de demanda energéticos.
<i>Beneficios medioambientales</i>	No conllevan apenas emisión de gases de efecto invernadero. No agotan recursos naturales. Contribuyen a mejorar los niveles de contaminación atmosférica.
<i>Producciones a pequeña escala</i>	Debido a la variable producción, sólo un gran número de centrales cubrieran la demanda exigida.
<i>Dependencia energética</i>	La implantación de centrales productoras de energías limpias, supondría una mayor dependencia de factores o países externos.
<i>Elevada inversión inicial</i>	Las inversiones iniciales para obtener energía procedente de fuentes renovables son altas. Además requieren una gran planificación previa con proyectos
<i>Beneficios económicos</i>	Presentan cada vez una mayor competitividad, además de suponer nuevos puestos de trabajo.
<i>Ocupación de terreno</i>	Plantas como las solares o las eólicas, requieren de extensas superficies para su construcción.
<i>Estabilización de los precios de la energía</i>	Con una producción estable y asentada basada en energías renovables, el precio de estas no sufriría tantos altibajos.



Según reflejan los datos, citados con anterioridad, en la actualidad representan cerca de la mitad de la nueva capacidad de generación eléctrica instalada que a su vez ha sido reconocida como la segunda fuente global de electricidad, sólo superada por el carbón. Este hecho las hace tener una mayor importancia, ya que resultan ser una necesidad primordial para poder abastecer la demanda actual de energía.

De acuerdo en las estadísticas aportadas en 2015 por la *Agencia Internacional de la Energía (AIE)* [4], prevén que estas eleven su participación en el mercado energético, representando así un cambio del 18% actual al 24% en el uso de energía final para el 2040. Y es que en cierto modo, aun teniendo presentes los diversos inconvenientes que conllevan, la transición hacia un sistema energético basado en tecnologías renovables hace que cada día estemos un paso más cerca de la meta, ya que la mayoría de contras a la hora de usar energías renovables no son nada en comparación a los pros que generan.

2. PILA DE COMBUSTIBLE COMO FUENTE GENERADORA DE HIDRÓGENO

El objetivo de este capítulo es la revisión de los aspectos teóricos sobre la pila o celda de combustible la cual definen.

Con este fin, pretendo entrar en detalle sobre los métodos de su composición, estructura, tipos de celdas, el funcionamiento de sus respectivas y la forma de almacenaje del hidrógeno.

2.1. LA PILA DE COMBUSTIBLE

La pila de combustible, también llamada célula o celda de combustible, (terminología que se podrá ver durante el resto del informe y que hará referencia a la pila de combustible), es un dispositivo electroquímico de conversión de energía en el cual, el flujo continuo de un combustible sufre una reacción química dando lugar a productos o bien a una corriente eléctrica.

2.1.1. LA PILA DE COMBUSTIBLE COMO HERRAMIENTA DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO Y ELECTRICIDAD

Para transformar hidrógeno en energía y viceversa, es común el uso de las celdas de la combustible para dicha tarea. Estas principalmente se componen de tres partes que son: ánodo, electrolito y cátodo. A su vez, según el producto o resultado final que se quiera obtener, siendo esta electricidad o este hidrógeno, existen dos etapas con diferentes estructuras entre sí:

La primera de ellas, la Etapa de Carga, que se puede observar en la **Figura 2.1.1.1**. En esta partiendo del reactivo, que viene siendo el agua destilada se le aplica una corriente eléctrica generada por una fuente externa produciendo así en este caso de tipo de pila alcalina (AFC), mediante la electrólisis alcalina, consigue la rotura de la molécula del agua dando pie a la obtención del hidrógeno y el oxígeno y a la siguiente ecuación:

Reacción electroquímica: Etapa de Carga; Reacción general.

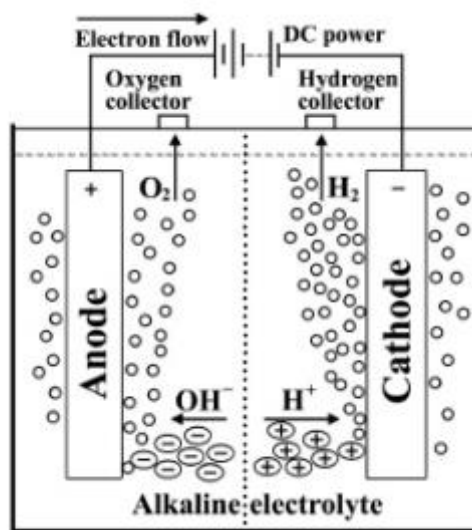
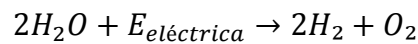
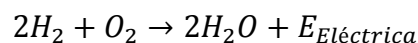


Figura 6. Etapa de carga: esquema del principio de operación.

La segunda, Etapa de Descarga, representada en la **Figura 2.1.1.2**. Mediante el hidrógeno, y el oxígeno obtenido del aire mediante un compresor se consigue obtener como producto agua en estado líquido y una corriente eléctrica.

Reacción electroquímica: Etapa de Descarga; Reacción general.



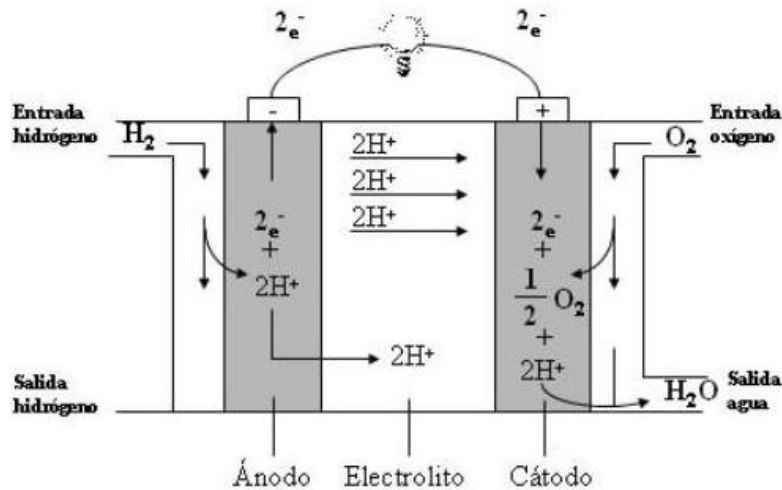


Figura 7. Etapa de descarga: esquema de principio de operación.

En definitiva, las pilas o celdas de combustible son dispositivos similares a las baterías con la diferencia en que está genera un abastecimiento ilimitado del producto final, siempre y cuando haya un flujo continuo de reactivo proveniente del exterior. Además, el proceso electroquímico que tiene lugar en los diferentes tipos de pila, es de alta eficiencia energética y mínimo impacto ambiental. Y es que debido a que la obtención de energía en las pilas de combustible está exentas de cualquier proceso térmico o mecánico, estas consiguen alcanzar eficiencias mayores que las máquinas térmicas, limitadas por el Ciclo de Carnot. Valores entre el 85 - 90%, siendo estas cogenerativas, respecto al 40 – 60% de las máquinas térmicas.

2.1.2. TIPOS DE PILAS Y SUS CARACTERÍSTICAS

En la actualidad existen varios tipos de celdas de combustible que son empleadas con diferentes propósitos dependiendo de sus propiedades que ofrecen, las cuales se describen a continuación. En el apartado de anexo en el capítulo 2 aparece una figura de un esquema que resume las distintas tecnologías de las pilas de combustible, además de una tabla en la que describe los diversos componentes que está compuesta cada una, los rangos de trabajo que alcanzan y en los ámbitos que se emplean.

2.1.2.1. Pila de combustible de membrana de intercambio protónico (PEM)



Las pilas de combustible del tipo PEM son un tipo de celdas que contienen un electrólito formado por una membrana polimérica, habitualmente hecha de un polímero sólido perfluosulfonado, que separa la parte anódica y catódica de una celda. Se trata de un conductor protónico, que permite el paso a través de él los iones H^+ , pero con la particularidad de ser impermeable al resto de sustancias. Mientras, los electrones circulan por el circuito externo hasta encontrarse con los protones que empiezan a reaccionar con el oxígeno generando agua en estado líquido considerado como residuo.

2.1.2.2. Pila de combustible de metanol (DMFC)

Al igual que las PEM este tipo de pilas utilizan una membrana de intercambio de protones solo que como combustible o reactivo utiliza el metanol. Su principal ventaja es la facilidad de transporte del metanol, un líquido denso en el cual su energía es razonablemente estable en condiciones ambientales, pero con la desventaja que sus eficiencias son bajas en comparación a otros tipos de celdas de combustible. Los rangos de trabajo habituales en este tipo de celdas están entre los 25W y los 5kW y las temperaturas de trabajo entre 90 y 120 °C.

2.1.2.3. Celdas de combustible alcalinas (AFC)

Las AFC, son un tipo de celdas que utilizan como electrólito una solución líquida de hidróxido de potasio en agua, además de hidrógeno y oxígeno como reactivos. Estas pilas son las que ofrecen una mayor eficiencia eléctrica equivalente a un 60 – 70%, sin emplear la cogeneración.

Sin embargo, a la hora de obtener el oxígeno proveniente del aire, la posibilidad de que contenga CO_2 o CO , hace de ella que su uso sea únicamente dirigido en el sector aeroespacial o en ambientes submarinos. Debido que al mezclar CO_2 o CO junto a KOH da lugar a una reacción que forma carbonato potásico, el cual reduce enormemente la eficiencia de la pila.

2.1.2.4. Pila de combustible de Ácido Fosfórico (PAFC)

Las PAFCs pueden utilizar hidrocarburos o biogás como combustible. Las reacciones producidas en el cátodo y en el ánodo son parecidas a las que se dan en las PEMs, pero la temperatura de operación es más alta y también toleran mejor las impurezas que pueda tener el combustible. Hoy en día, la comercialización de las PAFCs está muy extendida en el mercado actual, pues se utilizan con frecuencia para proveer de electricidad a edificios con alta demanda energética, tanto públicos como privados.



2.1.2.5. Pila de combustible de Carbonato Fundido (MCFC)

Las MCFCs son un tipo de celdas en las que sus altas temperaturas de operación les permite el reformado interno del combustible, es decir, la conversión de combustible a hidrógeno se hace dentro de la pila. Este hecho le permite entonces el poder utilizar como combustibles sustancias que no sean necesariamente hidrógeno puro sino que simplemente sean ricas en hidrógeno, como es el caso del metano, butano o el propano.

La principal desventaja de este tipo de pilas está en su corta vida útil, pues el electrólito de carbonato acelera la corrosión del ánodo y el cátodo acortando la durabilidad del sistema.

2.1.2.6. Pila de combustible de óxido Sólido (SOFC)

Este tipo de pila al igual que las MCFCs trabaja a unas temperaturas elevadas de entre los 800 – 1000 °C, (MCFC temp: operación = 650 °C). De manera que, además de poder emplear combustibles que no sean puramente hidrógeno, también se puede utilizar hidrocarburos más pesados como bien sería la gasolina o el diésel, siempre y cuando hayan pasado por una reformación previa.

2.2. MÉTODOS DE OBTENCIÓN DEL HIDRÓGENO

El hidrógeno en la actualidad se considera como la energía más atractiva y limpia para el futuro próximo puesto que no emite ningún tipo de contaminante durante su proceso electroquímico y que habita en abundancia en el planeta. No obstante, este elemento no está presente en su molécula más sencilla (H_2), por lo que para obtenerla se han de realizar diversos procesos eléctricos, térmicos etc. al agua o a hidrocarburos.

Los procesos existentes para la obtención de la molécula diatómica son los siguientes:

2.2.1. ELECTRÓLISIS

Este proceso consta de dos electrodos conectados a un flujo de energía eléctrica externa y sumergida en una solución alcalina, (comúnmente agua), conectado

al polo positivo el ánodo, el cual atrae los iones negativos. Y el cátodo conectado al polo negativo y que atrae los iones positivos. Dando a continuación lugar a las reacciones de Oxidación y de Reducción.

Habitualmente este sistema es utilizado para aplicaciones en el que los volúmenes de hidrógeno requeridos no son elevados y es que es conveniente señalar que el m³ de H₂, se consigue al aplicar una energía del orden de 4.9 -5.6 kWh, lo que resulta más caro que otros procesos como lo es el obtenido por reformado del gas natural.

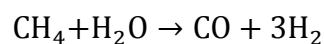


Figura 8. Representación del proceso de electrólisis del agua.

2.2.2. REFORMADO

Dentro de este apartado existen varios tipos de reformados que varían en función del hidrocarburo empleado como combustible, sin embargo, el proceso de obtención es el mismo, solo que cambian los valores de la presión y la temperatura del sistema. Por ello se trata con el hidrocarburo más empleado a día de hoy; el metano (CH₄). Y su ecuación es:

Reacción química de reformado del metano.



Este proceso consiste en hacer reaccionar el gas natural junto al vapor de agua sobre un catalizador de níquel colocado en un reformador primario a temperaturas de 1.200 °K y presión total de 20-30 bares. Puesto que el gas natural contiene impurezas de azufre, se requiere una etapa previa de eliminación de este contaminante para

evitar el deterioro de la actividad catalítica. La corriente limpia de metano se hace reaccionar después en un reactor al que se incorpora un catalizador de níquel.

El gas de salida es rico en hidrógeno pero contiene una cierta proporción de monóxido de carbono, que a su vez se transforma en otro reactor, o incluso en dos, en hidrogeno adicional mediante reacción con vapor de agua. El gas resultante tiene un contenido elevado de hidrógeno, junto a dióxido de carbono y cantidades mucho más bajas de metano no convertido y monóxido de carbono remanente, usualmente 1% en volumen. En las plantas modernas de producción de H₂ se incorporan unidades de purificación mediante compresión/adsorción/desorción que permiten alcanzar un hidrógeno muy puro (99,999% volumen).

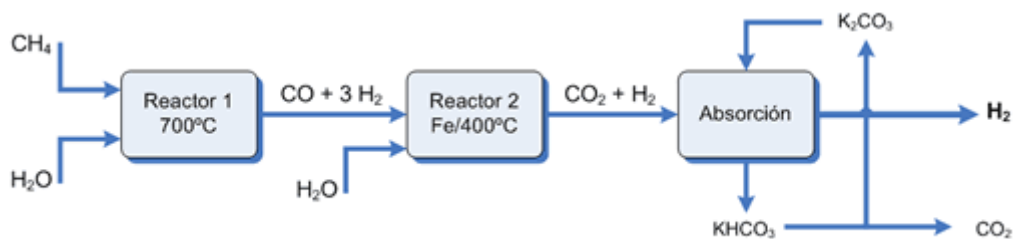


Figura 9. Esquema del proceso industrial del refinado del metano.

2.2.3. BIOMASA CELULÓSICA

El hidrógeno también puede obtenerse a partir de una fuente renovable como lo es la biomasa celulósica, y los procesos termoquímicos empleados son la combustión, la pirolisis y la gasificación esta última con mayor abundancia respecto a las otras.

El material lignocelulósico, proveniente de la biomasa celulósica, se oxida parcialmente a temperaturas superiores a los 1.000 °K, produciendo una fracción gaseosa junto a un residuo carbonoso que es reducido para formar posteriormente H₂, CO, CO₂ y CH₄. La gasificación de la biomasa en presencia del O₂ genera una corriente gaseosa rica en hidrógeno que se reforma con vapor de agua a la salida del gasificador con el objetivo de producir hidrógeno adicional. El inconveniente principal de la gasificación de biomasa es la formación de alquitrán, ya que los residuos pesados polimerizan y forman estructuras más complejas que no resultan apropiadas para la producción de hidrógeno mediante el reformado con vapor.

2.2.4. CICLOS TÉRMICOS



Otros procesos renovables utilizan la energía térmica para producir hidrógeno. Estos procesos no son catalíticos e incluyen la disociación termoquímica del agua mediante el uso de calor de una fuente energética a elevada temperatura, para llevar a cabo reacciones químicas en serie con la ayuda de reactores nucleares y hornos solares.

Estos procesos tienen un gran atractivo, ya que no se producen emisiones de CO₂ y su eficiencia gira alrededor del 85% de eficiencia energética; no obstante, todavía no está implantado a escala industrial.

2.2.5. FOTOQUÍMICOS

Otro proceso atractivo de producción de hidrógeno es la disociación del agua sobre semiconductores utilizando la luz solar. La eficiencia de este proceso viene determinada principalmente por las propiedades foto-físicas y la morfología del material semiconductor empleado.

Por otro lado, la aplicación comercial de la producción de hidrógeno mediante energía fotónica, requiere de desarrollos importantes en la ciencia e ingeniería hasta conseguir fotocatalizadores activos y estables en la reacción de disociación. Cuestiones como la transferencia de carga entre el semiconductor y el co-catalizador y su dependencia de factores estructurales y electrónicos permanecen todavía no resueltas. Por lo que estas áreas representan oportunidades excelentes de mejora de los fotocatalizadores utilizados en disociación fotoquímica del agua. El control de la morfología del catalizador en la escala nanométrica mediante procesos de fabricación innovadores es otra de las direcciones que permitirá modular la morfología y la reactividad de los fotocatalizadores.

2.3. ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO EN FUNCIÓN DE SU ESTADO

Durante mucho tiempo, la disponibilidad de un sistema o método adecuado para el almacenamiento de hidrógeno ha sido uno de los mayores obstáculos para el uso a gran escala del hidrógeno, sobre todo en el sector transportes. Pues los problemas para confinar el hidrógeno derivan de sus características físicas y químicas, ya que si bien el hidrógeno es un combustible que tiene una gran densidad energética por unidad de masa, presenta una muy baja densidad de energía volumétrica, tanto en estado líquido como gaseoso. Además, el hidrógeno tiene una gran difusividad y permeabilidad lo que hace que sea capaz de difundirse incluso a través de sólidos, lo que le conlleva a la pérdida de este incluso al estar almacenado, como la posible

fragilización de los metales empleados para confinar el elemento, el acero por ejemplo.

Por ahora, existen diferentes formas de almacenar el hidrógeno que cumplen, en mayor o menor medida, los requisitos para poder trabajar en diferentes situaciones. Estos sistemas de almacenamiento pueden ser:

2.3.1. ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO A PRESIÓN COMO GAS COMPRIMIDO

Este método de compresión del gas, para su posterior almacenamiento y transporte ha sido extensamente usado durante más de cien años, siendo así la más difundida y que cuenta con mayor experiencia entre las demás. El procedimiento para su posterior almacenaje consiste en comprimir, mediante compresores de H_2 , el gas a presiones elevadas de unas 200 atmósferas y finalmente envasarlo en depósitos como: depósitos de superficie móviles o estacionarios y cavernas subterráneas.



Figura 10. Proceso para la compresión del H_2 .

A pesar de ser el método más utilizado, presenta el inconveniente de que el hidrógeno como gas comprimido requiere el uso de cilindros contenedores de alta presión y de mayor tamaño del que ocuparía uno de gasolina. Esto es a consecuencia de la baja energía por unidad de volumen que presenta tanto en estado líquido como gaseoso. Valores que son de $3\text{kWh}/\text{Nm}^3$ o $10.8\text{MJ}/\text{Nm}^3$ en estado gas ($33.33\text{ kWh}/\text{kg}$) y como líquido $2.359\text{ kWh}/\text{l}$ o $8.495\text{MJ}/\text{l}$. Y que para poder proporcionar los valores energéticos equivalentes a otros combustibles, se requiere almacenar volúmenes tres o cuatro veces superiores. Por eso los precios que estos conllevan tienden a ser muy costosos, y ser empleados en ámbitos donde se requiera pequeñas cantidades de este, por ejemplo: laboratorios, algunos vehículos o en aplicaciones industriales a pequeña escala.

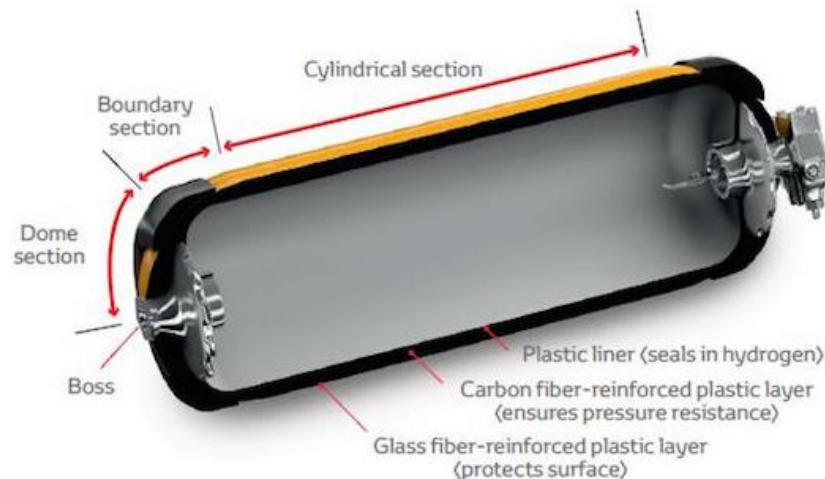


Figura 11. Depósito de hidrógeno de alta presión del Toyota Mirai.

2.3.2. ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO LICUADO

Esta es la forma preferida de almacenamiento de grandes cantidades de hidrógeno, y es empleado en ámbitos como lo son: la aviación, las lanzaderas y vuelos espaciales. La principal razón de ello se debe a que el hidrógeno líquido tiene la mayor densidad de energía de los combustibles químicos, conteniendo hasta tres veces más energía que un peso igual de gasolina.

El hidrógeno puede ser licuado a temperaturas extremadamente bajas, ya que su punto de licuefacción es 20.38°K ($-252,77^{\circ}\text{C}$), lo que permite almacenarlo como un líquido criogénico (a baja presión y baja temperatura). Este proceso se da a cabo en complejos procesos multi-estados que incluyen el uso del nitrógeno líquido y una secuencia de compresores junto a procedimientos especiales para controlar las proporciones de los dos tipos de moléculas de hidrógeno, conocidas como orto-hidrógeno (con spin paralelo) y para-hidrógeno (con spin antiparalelo). Si no se hiciera así en los tanques de distribución y almacenamiento el orto-hidrógeno espontáneamente podría convertirse en para-hidrógeno en un período de días o semanas (el hidrógeno normal está compuesto de tres cuartas partes de ortohidrógeno y una cuarta parte de para-hidrógeno), liberándose suficiente calor para vaporizarse la mayoría del líquido. Por lo que para este almacenamiento son necesarios unos tanques aislados a baja presión, con objeto de evitar que el hidrógeno pase a vapor, lo que puede ocurrir si se aumenta demasiado la presión dentro de los recipientes.

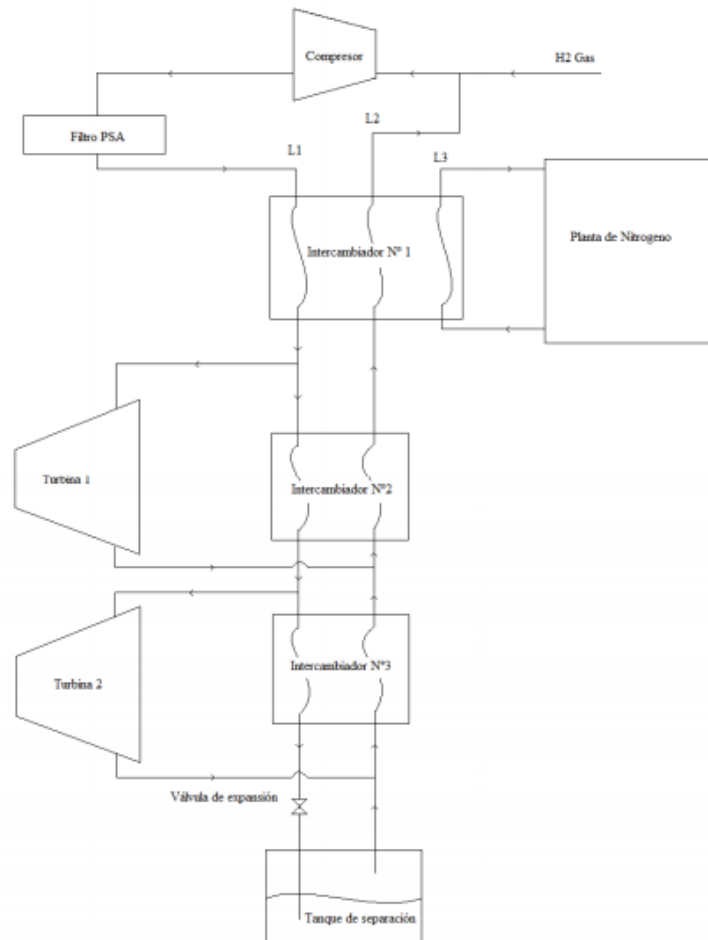


Figura 12. Planta de licuado de hidrógeno.

El principal inconveniente de almacenar y manipular el gas licuado en estas condiciones radica en el consumo energético teórico, que según el ciclo de Carnot aplicado al proceso de licuefacción es de 3.3 kWh/kg de H₂. En la práctica, para grandes instalaciones, este consumo ronda los 10 kWh/kg, lo que supone casi un 30 % del contenido energético del hidrógeno y un gasto más que considerable.

2.3.3. ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO EN HIDRUROS METÁLICOS

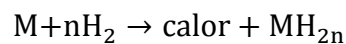
Este sistema de almacenaje, representa la forma más segura de almacenar el hidrógeno pero al mismo tiempo puede resultar muy cara. La base del método consiste en que ciertos metales y aleaciones metálicas tienen la propiedad de formar enlaces covalentes reversibles que al reaccionan con el hidrógeno, forman lo que se conoce como hidruros metálicos, pudiéndose descomponer posteriormente y liberar el hidrógeno aplicándole calor (300 - 350°C) o bien reduciendo la presión. El hidruro se forma sometiendo un determinado metal a una presión elevada de hidrógeno (entre 3



y 6MPa), lo que ocasiona que el metal, como si fuera una esponja, atrape los átomos de hidrógeno en su estructura cristalina.

El uso de este sistema de almacenamiento depende en gran parte de la capacidad de absorción que tenga el metal que contenga posteriormente el hidrógeno. Siendo las aleaciones del grupo V de los metales de transición las más adecuadas, tanto por su capacidad de almacenamiento como por su precio relativamente barato. El proceso se refleja en las siguientes reacciones químicas, (M representa el tipo de aleación empleado):

Reacción química exotérmica de absorción.



Reacción química endotérmica de desorción.



2.3.4. OTROS MÉTODOS DE ALMACENAMIENTO DEL HIDRÓGENO

2.3.4.1. Almacenamiento por adsorción en carbón o crioadsorción

Esta técnica de almacenaje del hidrógeno es muy similar al almacenamiento del gas comprimido, excepto que el tanque presurizado está lleno de grafito. Este hecho permite que al añadir carbón activado en el depósito se permite almacenar más hidrógeno ya que este es absorbido a bajas temperaturas (150 – 60°K), permitiendo un mayor volumen de hidrógeno equiparable al del almacenamiento en hidrógeno líquido.

Dentro de este procedimiento, existen diversos materiales como lo son los nanocarbonos, nanotubos, nanofibras y/o carbones superactivados que permiten almacenar mayores volúmenes de hidrógeno. Este sistema consiste en introducir en una cámara a presión nanotubos de carbono donde posteriormente se introduce el hidrógeno, cuando se deja salir el hidrógeno se aprecia una disminución del mismo de la que se deduce que la diferencia es la cantidad que ha quedado en los nanotubos.

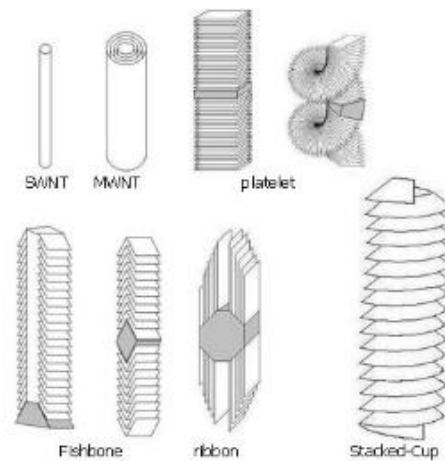


Figura 13. Tipos de nanofilamentos de carbono en la actualidad.

2.3.4.2. Almacenamiento en microesferas de vidrio y zeolitas

Es posible almacenar hidrógeno a alta presión en esferas de vidrio huecas con un diámetro que oscila entre 25 a 500 micrones, conocidas como microesferas. Estas se llenan con hidrógeno a temperaturas entre 200 a 400°C, la alta temperatura hace permeables las paredes y el gas llena las esferas. Al ser enfriadas hasta temperatura ambiente, el hidrógeno es atrapado y puede ser liberado cuando se necesite al calentar las esferas, éstas también pueden ser aplastadas para liberar el hidrógeno, sin embargo esta opción imposibilita su reciclado.

2.3.4.3. Almacenamiento en hidruros líquidos

La ventaja de este método de almacenamiento de hidrógeno es su almacenamiento durante largos períodos en condiciones más o menos estables, gracias a que los hidruros líquidos tiene la capacidad de unir el hidrógeno tal y como lo haría el amoníaco, metanol, etc. Sin embargo, a partir del verano al invierno, el almacenaje del H₂, sólo es capaz de ser preservado en volúmenes comparativamente pequeños en los que mediante la hidrogenación o deshidrogenación permitan el que no haya pérdidas de almacenaje.

3. PROCESOS TEÓRICOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA CELDA

El objetivo de este capítulo trata sobre los aspectos teóricos (fórmulas, operaciones, teorías etc.), que han sido utilizados para poder determinar su comportamiento a nivel teórico y experimental, para luego posteriormente poder establecer una relación entre ambos el cual me permitiese tener una idea clara sobre la estructura necesaria que debía utilizar a la hora de la escritura en código para la adquisición de datos.

Con este fin, tras haber realizado los primeros ensayos con ambas etapas del sistema, el primer apartado del capítulo muestra el comportamiento el cual se registrará la celda de combustible. Hablando por ello de las diferentes reacciones electroquímicas que tendrán lugar, los diferentes parámetros que afectan a su comportamiento más los flujos másicos de entrada y de salida del proceso en función de la corriente.

En segundo lugar, sabiendo los valores en los que el sistema trabaja de forma óptima, serán interpretados y sustituidos en las ecuaciones estequiométricas indicadas, en ambas etapas, más los cálculos necesarios para la conversión energética eléctrica a mecánica que tiene lugar en la etapa de descarga (mini vehículo).

Seguidamente, habiendo realizado varios ensayos, de la media de los valores obtenidos se medirá el comportamiento interno que tiene la celda mediante la medida de la resistencia interna y de la curva característica. Finalmente mediante la ley de Faraday se establecerá una conexión entre los datos electroquímicos (fase experimental) y los datos puramente químicos (fase teórica).

3.1. COMPORTAMIENTO DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE

En el sistema, se distingue claramente dos etapas, la etapa de carga y la de descarga, una de ellas para la transformación del agua destilada en hidrógeno e oxígeno y la otra para consumir susodicho en electricidad. Por lo tanto, para poder analizar con exactitud el comportamiento del proceso en general durante el resto de capítulos se especificará sobre que parte o etapa se está trabajando.

3.1.1. FUNCIONAMIENTO ELECTROQUÍMICO DEL SISTEMA (PILA PEM)

Como se ha hecho mención con anterioridad, en el capítulo 2; apartado 2.1.3.1. *Pila de combustible de membrana de intercambio protónica (PEM)*, este tipo de pila está constituida por siete partes fundamentales: la capa activa, la capa difusora, los terminales del ánodo y cátodo y la membrana. En la figura 1 se puede observar dicha distribución de sus elementos. Cabe recalcar que la imagen representa la

interpretación de la distribución que tiene lugar en la etapa de descarga. Aun así esta consta de los mismos elementos que tendría una en etapa de carga, con la diferencia de las direcciones de flujo y en vez de una carga, hubiese una fuente de alimentación externa.

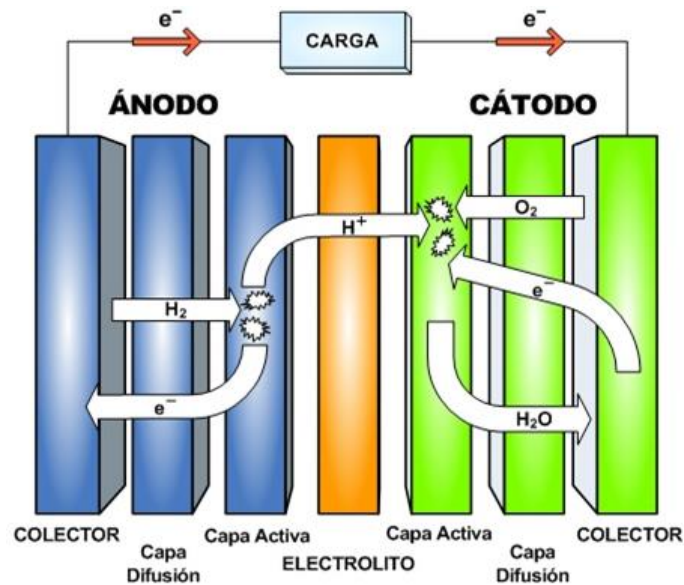
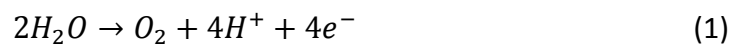


Figura 14. Esquema interno de la etapa de descarga de una pila PEM.

A continuación, se muestra las diferentes reacciones redox y operaciones que tienen lugar dentro de la pila de combustible según sus etapas:

- Para la etapa de carga

Siendo el reactivo o combustible inicial en este caso el agua destilada, entrará hacia el ánodo en el que sucede la pérdida de electrones que a su vez provocará la descomposición del agua en oxígeno (O_2) y en iones de carga positiva (H^+). A este proceso se le llama oxidación y se basa en la siguiente ecuación.



Los electrones formados son transportados hacia los terminales del ánodo y dirigidos a través de la batería o fuente externa hasta el cátodo. Mientras esto sucede, las moléculas de oxígeno son purgadas al exterior y los protones de hidrógeno cruzan la membrana protónica llegando hasta donde se encuentra el cátodo.

Por último, en el cátodo tiene lugar el proceso electroquímico de la reducción, por el cual el ion de hidrógeno gana electrones dando así lugar a la formación de hidrógeno como reactivo. Obteniendo de esta manera las dos ecuaciones restantes del proceso.



Reacci3n de Reducci3n en el c3todo; Etapa de carga



Reacci3n General; Etapa de carga



- Para la etapa de descarga

Partiendo como combustible inicial en este caso con el hidr3geno y el ox3geno, tenemos el hidr3geno es introducido en el espacio donde se encuentra el 3nodo llegando hasta su capa catal3tica mediante difusi3n, donde se produce la reacci3n de oxidaci3n.

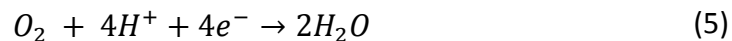
Reacci3n de Oxidaci3n en el 3nodo; Etapa de descarga



Los electrones formados son dirigidos hasta la capa colectora y dirigidos a trav3s de la carga hasta acabar en el c3todo. Durante, los iones de hidr3geno cruzan la membrana prot3nica llegando hasta donde se encuentra el c3todo.

Por 3ltimo, en el c3todo tiene lugar el proceso electroqu3mico de la reducci3n, por el cual el ion de hidr3geno junto a los electrones y el ox3geno obtenido del aire da lugar a la formaci3n del agua destilada como residuo. Dando lugar a las siguientes ecuaciones.

Reacci3n de Reducci3n en el c3todo; Etapa de descarga



Reacci3n General; Etapa de descarga



En definitiva, las diferencias entre ambas etapas radican en el tipo de conversi3n energ3tica que tienen lugar y en su consecuencia, en la polaridad del 3nodo y el c3todo que afecta a la direcci3n de la corriente el3ctrica la cual dicta en que sector se deber3 colocar las entradas de los reactivos.

Tabla 9. Diferencia estructural y energética entre las dos etapas.

	<i>Etapa de Carga</i>	<i>Etapa de Descarga</i>
<i>Tipo de Conversión</i>	Energía Química → Energía Eléctrica	E. Eléctrica → E. Química
<i>Electrodo positivo</i>	Cátodo (Reducción)	Ánodo (Oxidación)
<i>Electrodo negativo</i>	Ánodo (Oxidación)	Cátodo (Reducción)

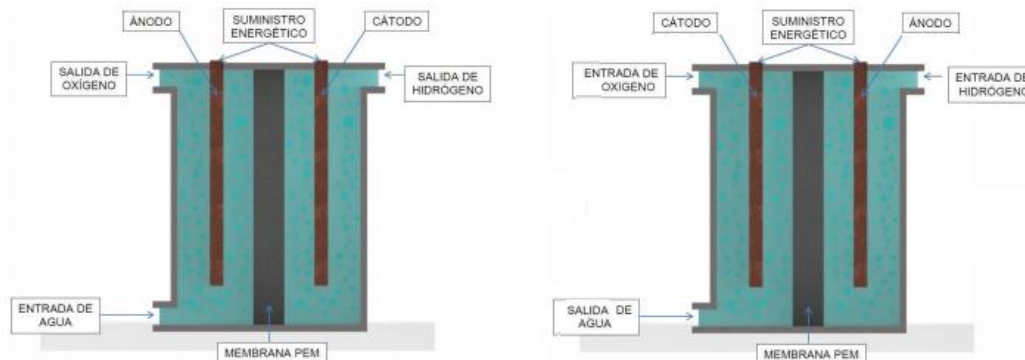


Figura 15. a) Estructura de una pila de combustible de carga, b) estructura de una pila de combustible de etapa de descarga.

3.1.2. FUNCIÓN DE GIBBS Y EL POTENCIAL DE NERNST

En la pila de combustible, se produce una reacción electroquímica a temperatura y presión constantes las cuales nunca llegan al equilibrio. A la energía o variación de energía que se puede obtener en dichas condiciones se le nombra trabajo de no expansión y su valor máximo coincide con la variación de energía libre de Gibbs.

En el caso de la pila, esta ecuación resulta muy útil para evaluar el trabajo eléctrico que se produce en su interior, indiferentemente si se trata de una etapa de carga o descarga pues las reacciones que tiene lugar son las mismas.

Relación entre trabajo eléctrico y energía libre de Gibbs.

$$W_{elec.} = \Delta G_{reac.} \quad (7)$$



El trabajo eléctrico se obtiene mediante el número n de electrones que son liberados por molécula producida durante la hidrólisis, y la diferencia de potencial E que adquieren al ser liberados.

$$W_{elec.} = -n \cdot q_{e^-} \cdot E = -n \cdot f \cdot E$$

El potencial E también conocido como potencial de Nernst, da la tensión eléctrica que se puede obtener cuando se produce una reacción electroquímica de forma reversible o fuerza electromotriz se obtiene en condiciones de circuito abierto, es decir, en ausencia de corriente eléctrica.

Es habitual encontrar la energía de Gibbs, o bien, los datos necesarios para calcularla mediante entalpías y entropías tabuladas en condiciones estándar, como se podrá ver en el apartado 3.2.2. *Energía de formación y disociación del agua* para el cálculo teórico del comportamiento del sistema. No obstante, la ecuación suele ser empleada de tal forma:

Relación energía libre de Gibbs en condiciones estándar.

$$\Delta G_{reac.} = \Delta G^0 + R \cdot \Delta T \cdot \ln Q \quad (8)$$

Dividiendo la ecuación anterior entre $(n \cdot F)$, obtenemos la Ecuación de Nernst:

Relación energía libre de Gibbs en condiciones estándar.

$$E = E^0 + \frac{R \cdot \Delta T}{n \cdot f} \cdot \ln Q \quad (9)$$

Por último, como en las pilas de combustible es normal tener los reactivos y los productos en estado gaseoso, entonces Q se obtiene a partir de las presiones parciales (ν_i y ν_j son los coeficientes estequiométricos de la reacción química):

Cociente de reacción.

$$Q = \frac{\prod(\text{Presiones parciales de los productos})^{\nu_i}}{\prod(\text{Presiones parciales de los reactivos})^{\nu_j}} \quad (10)$$

3.1.3. VARIABLES QUE AFECTAN AL FUNCIONAMIENTO DE LA PILA

El funcionamiento normal del sistema, presenta ciertos requerimientos internos de potencia, mencionados en el apartado anterior como *fuerza electromotriz* o *potencial de Nernst*, dados el caso de estar el circuito abierto entre los electrodos de la pila y por lo tanto en ausencia de corriente eléctrica. Sin embargo, a la hora de cerrarlo aparece una pérdida de potencial producida por la caída de tensión.

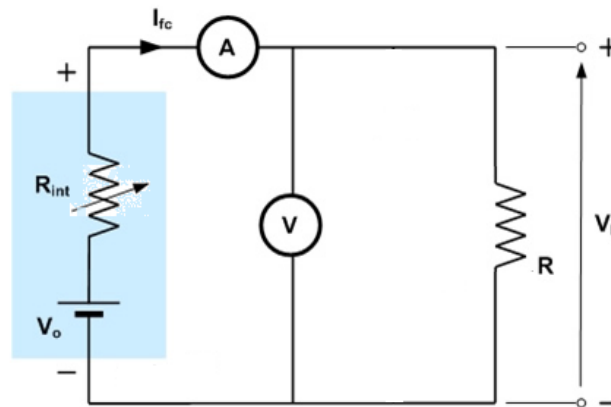


Figura 16. Esquema eléctrico interno de la pila de combustible.

Esta caída de tensión es debida a pérdidas de potencial relacionadas con la conducción de la carga dentro del electrólito y con fenómenos de polarización. Obteniendo la ecuación siguiente resultante, para la intensidad variable de la celda:

Corriente de salida de la celda de combustible.

$$I_{celda} = \frac{V_o - V_L}{R_{int} + R_{pérdidas}} \quad (11)$$

Las pérdidas de eficiencia de la celda producidas son debidas a las tres fuentes principales siguientes:

- Pérdidas por activación. Pérdidas de potencial producidas por la lentitud de las reacciones en los electrodos. Se expresa matemáticamente mediante la *ecuación de Tafel*.

Ecuación de Tafel.

$$\Delta E_{act} = \frac{R_{Gases} * T}{\alpha * n * f} * \log\left(\frac{I}{I_o}\right) \quad (12)$$



- Pérdidas óhmicas. Se deben a la resistencia que presentan los iones al electrólito y al flujo de los electrones que viajan a través del electrodo.

Ecuación para pérdida de potencial óhmico.

$$\Delta E_{ohm} = R_{ohm} * I_{celda}; \quad R_{ohm} = R_{elec} + R_{iones} + R_{terminales} \quad (13)$$

- Pérdidas por concentración. Pérdidas de potencial debidas al gradiente de concentración entre la superficie del electrodo y las entradas de reactivos o combustibles.

Ecuación de Barbir.

$$\Delta E_{con} = \frac{R_{Gases} * T}{n * f} * \ln \left(1 - \frac{I}{I_L} \right) \quad (14)$$

De este modo, el comportamiento ideal de la celda se ve afectado por la pérdida de estas tensiones dando lugar a la ecuación 15 y a la curva de polarización de la Figura .. la cual muestra el comportamiento real de la celda según sus tres regiones de operación representadas entre los ejes de potencial y densidad de corriente.

Ecuación del potencial real de la celda.

$$V_{celda} = E_{NERNST} - (\Delta E_{act} + \Delta E_{ohm} + \Delta E_{con}) \quad (15)$$

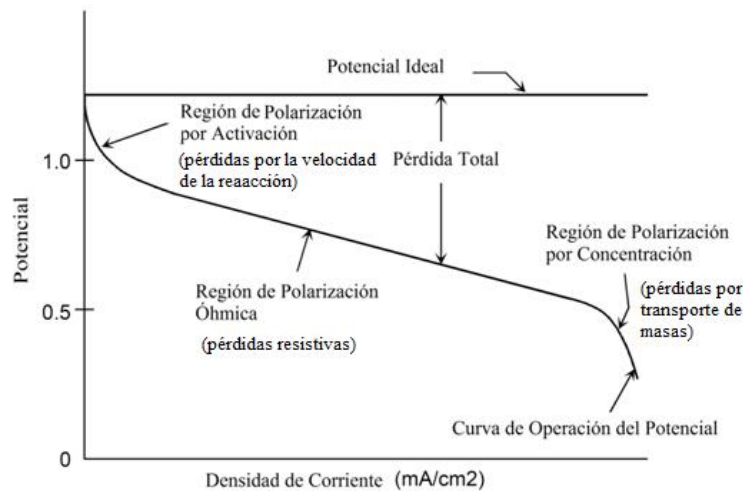


Figura 17. Curva de polarización de la celda.

3.1.4. EFICIENCIA DE LA PILA

Para la determinación de la eficiencia real de la pila de combustible hay que tener en consideración diversos factores. Por ejemplo, la cantidad de corriente que circula a través de ella, el aprovechamiento proporcionado por el combustible (agua destilada) y por último, los factores internos provenientes de las características estructurales por las que fue diseñada la celda (pérdidas por activación, óhmicas y de concentración).

De esta manera, queda claro que la eficiencia o rendimiento extraído de la celda no es establecida por un solo factor sino por un conjunto de eficacias las cuales se observan en la siguiente ecuación:

Ecuación para la eficiencia real de la celda.

$$\zeta_{real\ PEM} = \zeta_{ener.ter.} \cdot \zeta_{Volt} \cdot \zeta_{comb} \quad (16)$$

Y las ecuaciones para hallar dichas eficiencias son:

Ecuación eficiencia energética térmica.

$$\zeta_{ener.ter.(\%)} = \frac{\Delta G}{\Delta H} * 100 \quad (17)$$

Ecuación eficiencia de voltaje.

$$\zeta_{Volt(\%)} = \frac{V_{celda}}{E_{NERNST}} * 100 \quad (18)$$



Ecuación eficiencia del combustible.

$$\zeta_{comb(\%)} = \frac{\frac{j \cdot A}{n \cdot f}}{\dot{m}_{comb}} * 100 \quad (19)$$

Tal y como reflejan las siguientes fórmulas, hay parámetros como, ($j \equiv$ densidad de corriente del material, $A \equiv$ área de los electrodos, etc.) que varían en función del diseño de la pila. Por ello, al no poder averiguar dichos datos ya que no he sido yo quien la fabricó, la forma en la que mediré la eficiencia energética del sistema será mediante la energía eléctrica aplicada desde un inicio a la etapa de carga para dar lugar al proceso de hidrólisis, hasta el consumo energético producido por el vehículo durante su tiempo de funcionamiento. Intentando de esta manera obtener y valorar dicha eficiencia sin la necesidad de saber la estructura interna la cual componen las dos etapas del sistema.

3.1.5. LA LEY DE COULOMB Y DE FARADAY PARA EL FLUJO MÁSSICO DEL SISTEMA

Después de comprender el funcionamiento que envuelve a la pila de combustible, es necesario establecer un nexo entre los datos eléctricos obtenidos de ambas etapas del sistema (carga y descarga), junto a las reacciones redox que tienen lugar en su interior. Para poder saber la cantidad de reactivos y productos que se están formando a nivel molecular y el flujo de estos en función del tiempo.

Por ello, para conseguir tal propósito es necesario emplear las siguientes leyes:

- **Ley de Coulomb.**
- **Leyes de Faraday.**

Esta primera dictamina que la corriente es definida como la carga neta, producida por aquellas partículas cuyas presentan una carga eléctrica como bien son los electrones o iones, que fluye a través de un área transversal por unidad de tiempo. Dando origen ecuación 20.

Ecuación de la intensidad de las cargas eléctricas.

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (20)$$



En segundo lugar las leyes de Faraday referentes a la electrólisis, establecen que la masa cualquier sustancia depositada en un electrodo durante el proceso de electrólisis es directamente proporcional a la cantidad de electricidad, carga eléctrica (Q), transferida al electrodo (1ª ley de Faraday). Y que la masa depositada de una especie química en un electrodo, es directamente proporcional al peso equivalente del elemento (2ª ley de Faraday).

Tabla 10. Carga eléctrica de un mol de electrones.

Proceso	Cantidad depositada	Moles e ⁻ necesarios	Carga eléctrica
$Na^+ + 1e^- \rightarrow Na$	1 mol Na	1 mol e ⁻	96500 C = F
$Mg^{2+} + 2e^- \rightarrow Mg$	1 mol Mg	2 mols e ⁻	2*96500 C = 2F
$Na^+ + 1e^- \rightarrow Na$	1 mol Al	3 mols e ⁻	3*96500 C = 3F

Ecuación de la segunda ley de Faraday.

$$m_{sus.prod.} = \frac{Q}{F} * \frac{M}{n} \quad (21)$$

Por consiguiente, uniendo estas dos fórmulas junto a las reacciones electroquímicas de los electrodos, citadas en el apartado 3.1.1., se obtiene una serie de datos fijos sobre la producción y flujo másico de las diferentes etapas del sistema en función de la intensidad que circulará por ellas. Siendo tales:

$$I \left(\frac{C}{s} \right) * \frac{1 \text{ mol } e^-}{96500 \text{ C}} * \frac{2 \text{ moles } H_2}{4 \text{ moles } e^-} * \frac{2.016 \text{ g } H_2}{1 \text{ mol } H_2} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = I * 1.04456 * 10^{-8} \left(\frac{kg}{s} \text{ de } H_2 \right)$$

$$I \left(\frac{C}{s} \right) * \frac{1 \text{ mol } e^-}{96500 \text{ C}} * \frac{1 \text{ moles } O_2}{4 \text{ moles } e^-} * \frac{32 \text{ g } O_2}{1 \text{ mol } O_2} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = I * 8.289845 * 10^{-8} \left(\frac{kg}{s} \text{ de } O_2 \right)$$

$$I \left(\frac{C}{s} \right) * \frac{1 \text{ mol } e^-}{96500 \text{ C}} * \frac{2 \text{ moles } H_2O}{4 \text{ moles } e^-} * \frac{18.015 \text{ g } H_2O}{1 \text{ mol } H_2O} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = I * 9.3344 * 10^{-8} \left(\frac{kg}{s} \text{ de } H_2O \right)$$

Etapas de carga

Flujos de entrada

$$\dot{m}_{H_2O} = I * 9.3344 * 10^{-8} \left(\frac{Kg}{s} \text{ de } H_2O \right) \quad (22)$$

Flujos de Salida

$$\dot{m}_{H_2} = I * 1.04456 * 10^{-8} \left(\frac{Kg}{s} \text{ de } H_2 \right) \quad (23)$$

$$(24)$$



$$\dot{m}_{O_2} = I * 8.289845 \times 10^{-8} \left(\frac{Kg}{s} \text{ de } O_2 \right)$$

Etapa de descarga

Flujos de entrada

$$\dot{m}_{H_2} = I * 1.04456 \times 10^{-8} \left(\frac{Kg}{s} \text{ de } H_2 \right)$$

$$\dot{m}_{O_2} = I * 8.289845 \times 10^{-8} \left(\frac{Kg}{s} \text{ de } O_2 \right)$$

Flujos de Salida

$$\dot{m}_{H_2O} = I * 9.3344 \times 10^{-8} \left(\frac{Kg}{s} \text{ de } H_2O \right)$$

3.1.6. FÓRMULAS Y PRINCIPIOS MECÁNICOS PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL VEHÍCULO

Por último en la etapa de descarga, mediante el hidrógeno obtenido del proceso de carga y el oxígeno del compresor, la energía eléctrica que se genera se aplica al funcionamiento de los dos motores para el desplazamiento del vehículo.

De este modo, para poder determinar la dinámica del vehículo, se ha de estudiar previamente las fuerzas que generan los motores además de las fuerzas de rozamiento que se oponen al movimiento del vehículo, ya sea en estático como en movimiento. No obstante, el primer paso será el de encontrar el balance entre la energía obtenida del sistema junto al del desplazamiento del vehículo y al de sus ruedas. El cual será el siguiente:

Ecuación del balance de energía en el vehículo.

$$E_{et.2 \text{ Gibbs}} = E_{cinética} + E_{Rotación} \tag{25}$$

$$E_{et.2 \text{ Gibbs}} = \left(\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \right) + \left(\frac{1}{2} \cdot I_c \cdot \omega^2 \right)$$

Se considera m como la masa total del vehículo, v su velocidad, I_c cuto momento de inercia respecto su eje de simetría y ω la velocidad angular de la rueda.

Ecuación del momento de inercia.



$$I_c = \frac{R^2}{2} \cdot m \quad (26)$$

Ecuación velocidad angular de la rueda.

$$v = \omega \cdot R \quad (27)$$

Ecuación velocidad aceleración centrípeta.

$$a_c = \alpha \cdot R \quad (28)$$

A continuación, antes de calcular las fuerzas de fricción es necesario saber que esta se divide en dos tipos; la estática y la dinámica. La fuerza de fricción estática es presente en el momento en el que el vehículo se encuentra en reposo hasta que inicia su movimiento, coincidiendo con la fuerza aplicada. Luego, la fuerza de fricción dinámica a diferencia de la estática esta es constante y se mantiene hasta que el vehículo se pare como consecuencia de la desaparición de la fuerza aplicada. Dicha diferencia se observa en la figura 18.

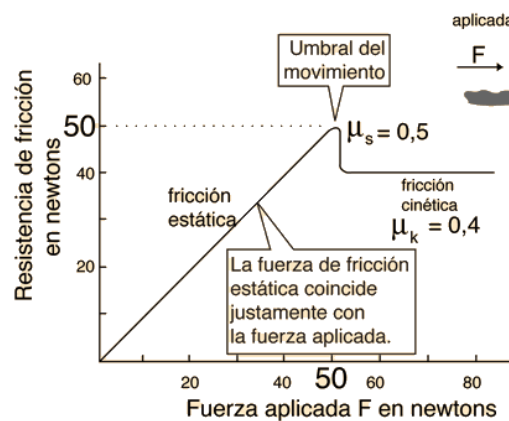


Figura 18. Representación teórica ideal de las fuerzas mecánicas del vehículo.

Sin embargo, considerando que el comportamiento de la fuerza de fricción será ploteada a tiempo real es innecesario diferenciarlas a nivel teórico pues tal resultado como en la figura 18, se podrá ver sin necesidad de establecer los valores de sus coeficientes de fricción o cinemáticos y sí mediante la fuerza de fricción de rozamiento y su fuerza aplicada mediante las ecuaciones de dinámica de translación y dinámica de rotación alrededor del eje.

Las siguientes ecuaciones son modificadas por el número de ruedas que generan una fuerza de rozamiento (cuatro), y las ruedas motrices que generan una fuerza (dos). Por lo tanto:

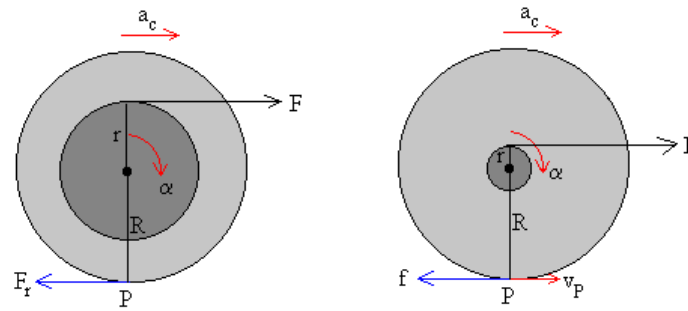


Figura 19. a) Rueda en estática. b) Rueda en movimiento.

Ecuación dinámica de translación.

$$F - F_r = m \cdot a_c \rightarrow 2F - 4F_r = m \cdot a_c \quad (29)$$

Ecuación Dinámica de rotación alrededor de un eje.

$$(F \cdot r) - (F_r \cdot R) = I_c \cdot \alpha \rightarrow (2F \cdot r) - (4F_r \cdot R) = I_c \cdot \alpha \quad (30)$$

Resolviendo las ecuaciones anteriores, sustituyendo I_c y α :

$$I_c \cdot \alpha = \frac{m \cdot R^2}{2} \cdot \frac{a_c}{R} \rightarrow \frac{m \cdot R \cdot a_c}{2}$$

Aislado a_c de la fórmula de translación:

$$a_c = \frac{2F - 4F_r}{m} \rightarrow I_c \cdot \alpha = R \cdot (F - 2F_r)$$

Por lo tanto aplicando está a la fórmula de rotación queda que:

Ecuación fuerza de fricción.

$$F_r = \frac{F}{6} * \left(1 - \frac{2r}{R}\right) \quad (31)$$

E igual con a_c :

$$a_c = \frac{F - F_r}{m} = \frac{F \left(-\frac{F}{6} * \left(1 - \frac{2r}{R}\right)\right)}{m} = \frac{6F + \left(-F \cdot \left(1 - \frac{2r}{R}\right)\right)}{6m}$$

Ecuación aceleración centrípeta.



$$a_c = \frac{F * \left(5 + \left(\frac{2r}{R}\right)\right)}{6 * m}$$

3.2. CÁLCULOS APLICADOS PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TEÓRICO

Para elaborar los cálculos de la parte teórica del sistema, previamente se ha realizado varios ensayos con el fin de averiguar qué cantidad de hidrógeno es necesario generar en la primera etapa de la celda para poder hacer funcionar el mini vehículo, 12 cm³, un tiempo relevante además de la cantidad de agua destilada que es consumida en dicho proceso. Esta será la data de partida para el siguiente apartado.

3.2.1. DATOS INICIALES

Partiendo del agua destilada consumida del primer tubo de ensayo se puede observar en su variación de altura el consumo de esta para la generación del hidrógeno siendo de 0.02 mm. Sabiendo entonces el diámetro del tubo que es de 2.4 cm, se calcula el volumen de agua destilada consumida para seguidamente averiguar su cantidad molar.

Ecuación para el volumen de agua destilada consumida.

$$v_{H_2O \text{ Cons.}} = \pi * \frac{D^2}{4} * h_{H_2O \text{ cons.}} = \pi * \frac{0.024^2}{4} * 0.00002 = 9.0478 \times 10^{-9} \text{ m}^3 \quad (33)$$

Ecuación para la masa del agua destilada consumida.

$$d_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{v_{H_2O \text{ cons}}} \rightarrow m_{H_2O} = (d_{H_2O} * v_{H_2O \text{ cons}}) * 1000 \quad (34)$$

$$= (999 * 9.0478 \times 10^{-9}) * 1000 \rightarrow m_{H_2O} = 0.009039 \text{ g de } H_2O$$

Ecuación para la masa molar.

$$Masa_{Molar \ H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{n_{H_2O}} \rightarrow n_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{Masa_{Molar \ H_2O}} = \frac{0.009039 \text{ g de } H_2O}{18 \text{ g/mol de } H_2O} \quad (35)$$

$$n_{H_2O} = 5.0215 \times 10^{-4} \text{ moles de } H_2O$$



Recordando las ecuaciones generales de la electrólisis, 3 y 6, se obtiene la cantidad de moles de O₂ y H₂ mediante equivalencias.

$$n_{H_2} = n_{H_2O} = 5.0215 \times 10^{-4} \text{ moles de } H_2 \text{ y } n_{O_2} = \frac{n_{H_2O}}{2} = 2.51 \times 10^{-4} \text{ moles de } O_2$$

Para la etapa de descarga, se parte en base a esta última cantidad de hidrógeno teórico mientras la cantidad molar de oxígeno obtenida será purgada. No obstante para la formación de energía eléctrica en la segunda etapa se requerirá la misma cantidad de oxígeno sólo que esta será recogida mediante un compresor del aire.

3.2.2. ENERGIA DE FORMACIÓN Y DISOCIACIÓN DEL AGUA

En esta sección los cálculos se dividirán en dos partes; la primera parte que hará referencia a la etapa de carga, la cual consiste en calcular la energía de disociación del agua durante el proceso de electrólisis. Y la segunda, etapa de descarga, será el proceso inverso en el que se obtendrá como producto final el agua, calculando la energía de formación del agua.

Etapa de carga

Para que se produzca el efecto de la hidrólisis sobre el agua destilada, es necesaria la aplicación de una fuente externa (batería), para que genere una energía capaz de romper los enlaces entre sus átomos y convertirlos en dos átomos gaseosos aislados (H₂ y O₂), referencia a la ecuación general de la hidrólisis mediante la energía de disociación.

Considerando, que el proceso tiene lugar bajo condiciones ideales (T = 25°C = 298 °K, P = 1 atm y volumen molar a 273 °K es de 22.4 l), mediante el uso de los potenciales termodinámicos, (Energía interna, entalpía, energía libre de Gibbs) y la primera ley de la termodinámica se puede calcular el trabajo eléctrico producido en el sistema.

Tabla 11. Propiedades termodinámicas de la etapa de carga.

	H ₂ O	H ₂	O ₂	Variación
Entalpía (H)	-285.83 kJ/mol	0	0	285.83 kJ/mol
	H ₂ O			H ₂ O
Entropía (T·S)	69.91 J/K·mol	130.68 J/K·mol	205.14 J/K·mol	48.67 kJ/mol
	H ₂ O	H ₂	O ₂	

En la tabla anterior dentro de la entalpía, está ya tiene en consideración tanto la energía de disociación necesaria como la energía para expandir los gases



producidos. Por ello, para averiguar el trabajo o energía interna (U) de la etapa, se le resta a la entalpia el trabajo de expansión de los gases producidos. Obteniendo así lo siguiente:

Ecuación trabajo de expansión de los gases en la etapa 1.

$$W = P * \Delta V = 101.3 \times 10^3 \text{ Pa} * 3 \text{ moles} * \frac{22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{\text{mol}} * \frac{298}{273} = 7.43 \text{ kJ} \quad (36)$$

Ecuación energía interna en la etapa 1.

$$\Delta U = \Delta H - W = 285.83 - 7.43 = 278.4 \text{ kJ} \quad (37)$$

Finalmente, teniendo en consideración que la entropía en este caso al ser superior a 0, se considera que pasa a ser proporcionada por el medio ambiente, afecta a que la energía suministrada por la batería sea el cambio en la energía libre de Gibbs, referencia en el apartado anterior. Y sea del valor de:

Ecuación energía libre de Gibbs en la etapa 1.

$$\Delta G = \Delta H - (T \cdot \Delta S) = 285.83 - 48.67 = 237.4 \text{ kJ} \quad (38)$$

Etapa de descarga

Siguiendo el mismo procedimiento que en la etapa anterior pero esta vez para la formación de agua tenemos que:

Tabla 12. Propiedades termodinámicas de la etapa de carga.

	H ₂	O ₂	H ₂ O	Variación
Entalpía (H)	0	0	-285.83 kJ/mol	-285.83 kJ/mol
			H ₂ O	H ₂ O
Entropía (T·S)	130.68 J/K·mol	205.14 J/K·mol	69.91 J/K·mol	-48.67 kJ/mol
	H ₂	O ₂	H ₂ O	

$$W = P * \Delta V = 101.3 \times 10^3 \text{ Pa} * 3 \text{ moles} * \frac{-22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{\text{mol}} * \frac{298}{273} = -7.43 \text{ kJ}$$

$$\Delta U = \Delta H - W = -285.83 - (-7.43) = -278.4 \text{ kJ}$$



$$\Delta G = \Delta H - (T \cdot \Delta S) = -285.83 - (-48.67) = -237.4 \text{ kJ}$$

Obteniendo de esta forma la eficiencia energética térmica de la transformación del combustible en energía eléctrica, siendo del 83 %. Mediante:

Ecuación eficiencia energética térmica.

$$\zeta_{ener.ter.(\%)} = \frac{\Delta G}{\Delta H} * 100 = \frac{237.4}{285.83} * 100 = 83.05 \% \quad (39)$$

De este modo, comparando ambos procesos es importante diferenciar el cambio de entalpía como el cambio total de energía que tiene lugar. Y la energía libre de Gibbs, como realmente la cantidad de energía que obtenemos o bien la necesaria para alimentar el proceso de reacción. Así pues en la etapa 1 en el que el cambio de entalpía es de 285.83 kJ, se debe suministrar 237.4 kJ de energía para impulsar la electrólisis, mientras que el medio ambiente contribuye con la diferencia $T \cdot \Delta S = 48.7$ kJ. Por otro lado, en la segunda etapa, se obtiene 237.4 kJ como energía eléctrica final del total de 285.83 kJ, desaprovechando así los 48.7 kJ convertidos en calor.

3.2.3. VOLUMENES Y FLUJOS DEL SISTEMA

A partir de la cantidad molar aportada u obtenida del apartado 3.2.1., de cada elemento en el sistema, mediante la ley de los gases ideales, descrita por la ecuación 40, se obtiene la densidad y el volumen de los gases de hidrógeno y oxígeno.

Ecuación ley de los gases ideales.

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (40)$$

Ecuación ley de los gases ideales en el hidrógeno.

$$V_{H_2} = \frac{n_{H_2} \cdot R \cdot T}{P} = \frac{5.0215 \times 10^{-4} \cdot 8.1314 \cdot 293}{101325} = 12.0725 \text{ cm}^3 \text{ de } H_2 \quad (41)$$

Ecuación ley de los gases ideales en el oxígeno.

$$V_{O_2} = \frac{n_{O_2} \cdot R \cdot T}{P} = \frac{2.51 \times 10^{-4} \cdot 8.1314 \cdot 293}{101325} = 6.0362 \text{ cm}^3 \text{ de } H_2 \quad (42)$$

Tras saber los volúmenes y densidades de los gases, los valores de energía de Gibbs se multiplican por el número de moles, ecuación y Dando lugar a la energía de disociación (etapa 1) y a la energía eléctrica final (etapa 2). A continuación, se divide entre el tiempo de duración de cada parte del proceso respectivamente obteniendo así su potencia, ecuación 43 y 46. Y por último, de la potencia se consigue la intensidad y tensión, ecuación 45 y 48, sustituyendo la corriente eléctrica en las ecuaciones del apartado 3.1.4. para obtener el flujo másico de los reactivos y productos en las dos etapas.

Etapa de carga

Ecuación para la energía de disociación.

$$E_{Gibbs\ et.1} = \frac{E_{dis.}}{n_{H_2O}} \rightarrow E_{dis.} = n_{H_2O} \cdot E_{Gibbs\ et.1} = 5.0215 \times 10^{-4} \text{ mols} \cdot 237.4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$= 119.21 \text{ J} \quad (43)$$

Ecuación potencia teórica en la primera etapa.

$$P_{et.1} = \frac{E_{dis.}}{t_{et.1}} = \frac{119.21}{165} = 0.7225 \text{ W} \quad (44)$$

Ecuación intensidad teórica en la primera etapa.

$$I_{et.1} = \frac{P_{et.1}}{V_{et.1}} = \frac{0.7225}{3} = 240.8302 \text{ mA} \quad (45)$$

$$\dot{m}_{H_2O} = I * 9.3344 \times 10^{-8} = 2.248 \times 10^{-8} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \text{ de } H_2O \right)$$

$$\dot{m}_{H_2} = I * 1.04456 \times 10^{-8} = 2.51562 \times 10^{-9} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \text{ de } H_2 \right)$$

$$\dot{m}_{O_2} = I * 8.289845 \times 10^{-8} = 1.9964 \times 10^{-8} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \text{ de } O_2 \right)$$



Etapa de descarga

Ecuación para la energía eléctrica final.

$$E_{Gibbs\ et.2} = \frac{E_{elec.fin.}}{n_{H_2O}} \rightarrow E_{elec.fin.} = n_{H_2O} \cdot E_{Gibbs\ et.2} \quad (46)$$

$$= 5.0215 \times 10^{-4} \text{ mols} \cdot 237.4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} = 119.21 \text{ J}$$

Ecuación potencia teórica en la segunda etapa.

$$P_{et.2} = \frac{E_{elec.fin.}}{t_{et.2}} = \frac{119.21}{360} = 0.3311 \text{ W} \quad (47)$$

Ecuación intensidad teórica en la segunda etapa.

$$I_{et.2} = \frac{P_{et.2}}{V_{et.2}} = \frac{0.3311}{2.7537} = 120.2511 \text{ mA} \quad (48)$$

$$\dot{m}_{H_2} = I * 1.04456 \times 10^{-8} = 1.1225 \times 10^{-8} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \text{ de } H_2O \right)$$

$$\dot{m}_{O_2} = I * 8.289845 \times 10^{-8} = 1.2561 \times 10^{-9} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \text{ de } H_2 \right)$$

$$\dot{m}_{H_2O} = I * 9.3344 \times 10^{-8} = 9.6863 \times 10^{-9} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \text{ de } O_2 \right)$$

3.2.4. CÁLCULO TEÓRICO SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DEL VEHÍCULO

Mediante las fórmulas del apartado 3.1.5. *Fórmulas y principios mecánicos para el funcionamiento del vehículo*, el apartado 3.2.2. *Energía de formación y disociación del agua* y los datos medidos del vehículo ($m_{total} = 0.269 \text{ kg}$, $R = 1.8 \text{ cm}$, $r = 1.35 \text{ cm}$, $I_c = 4.36 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ y un aprovechamiento energético del 10 % para el desplazamiento del vehículo), pasamos a re-obtener el valor de la energía eléctrica observada durante la etapa de descarga del proceso de conversión y lo sustituimos en la ecuación del balance de energía (ecuación ..), aislando como incógnita la variable de v. Siendo esta de:



$$E_{et.2 \text{ Gibbs}} = \left(\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2\right) + \left(\frac{1}{2} \cdot I_c \cdot \omega^2\right) = \left(\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2\right) + \left(\frac{1}{2} \cdot I_c \cdot (v \cdot R)^2\right)$$

$$E_{et.2 \text{ Gibbs}} = \frac{1}{2} \left((m \cdot v^2) + \left(m \cdot \frac{R^2}{2} \cdot (v \cdot R)^2 \right) \right) = \frac{1}{2} \left((m \cdot v^2) + \frac{(m \cdot R^4 \cdot v^2)}{2} \right)$$

$$2E_{et.2 \text{ Gibbs}} = (v^2 \cdot m) \cdot (2 + R^4) \rightarrow v = \sqrt{\frac{2E_{et.2 \text{ Gibbs}} \cdot 0.1}{m \cdot (2 + R^4)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 119.211 \cdot 0.1}{0.269 \cdot (2 + 1.8^4)}}$$

$$v = 2.66 \frac{cm}{s}$$

Seguidamente al saber la velocidad del vehículo, de la división de la E_{Gibbs} entre el tiempo da como resultado la potencia suministrada. De la cual teniendo la potencia suministrada y la velocidad a partir de la división de ellas se consigue la fuerza generada por los motores (F) siendo de:

$$F = \frac{P_{et.2}}{v} = \frac{0.3311}{0.02663} = 12.433 \text{ N}$$

A continuación, con las fórmulas desarrolladas previamente para las fuerzas existentes en el vehículo se consigue la fuerza de fricción (*ecuación 31*) y la aceleración centrípeta (*ecuación 32*).

$$F_r = \frac{12.433}{6} * \left(1 - \frac{2 \cdot 0.0135}{0.018} \right) = 1.036 \text{ N}$$

$$a_c = \frac{12.433 * \left(5 + \left(\frac{2 \cdot 0.0135}{0.018} \right) \right)}{6 * 0.269} = 50.07 \text{ m/s}^2$$

En el apartado de anexos están presentes las tablas en las que muestran todos los valores del comportamiento teórico de las dos etapas del sistema.

3.3. CÁLCULOS APLICADOS PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL

Durante la interpretación y comprensión de los valores obtenidos en el laboratorio, sólo se han tenido en cuenta los ensayos en los que los datos han sido coherentes, desechando por lo tanto, aquellos en los que se han utilizado para purgar de oxígeno la celda de combustible o de agua además de las primeras pruebas para entender cómo emplear las diferentes herramientas de las que constaba. Por ello, de entre todos los ensayos realizados únicamente cinco pruebas del proceso han sido escogidas para su posterior análisis, siendo estas presentes en el apartado de *anexos*.

Para esta sección, los cálculos serán idénticos a los del apartado teórico para poder determinar la relación entre ellos, con la diferencia de que los datos experimentales parten desde los valores eléctricos obtenidos en ambas etapas en función del tiempo transcurrido durante los procesos y no de valores constantes

3.3.1. COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL DE LA CELDA

3.3.1.1. Resistencia interna

Haciendo referencia a las variables teóricas que afectan al comportamiento de la pila apartado 3.1.3., se ha dicho que al cerrar el circuito y aplicarle una corriente, la pila se ve afectada por caídas de tensión, producidas mayoritariamente por las pérdidas de activación, óhmicas y de concentración.

Esta variación de tensión es consecuencia de la variación de resistencia, que a su vez afecta a la intensidad. Este comportamiento es visible en las gráficas, en las que se puede ver como a medida que la intensidad aumenta la resistencia decrece. Esto es debido a que la conductividad de la membrana protónica de la pila queda afectada por el contenido del agua destilada, la cual acelera la reacción en los electrodos a medida que pasa el tiempo haciendo que haya una menor oposición a la reacción electroquímica que tiene lugar en los electrodos.

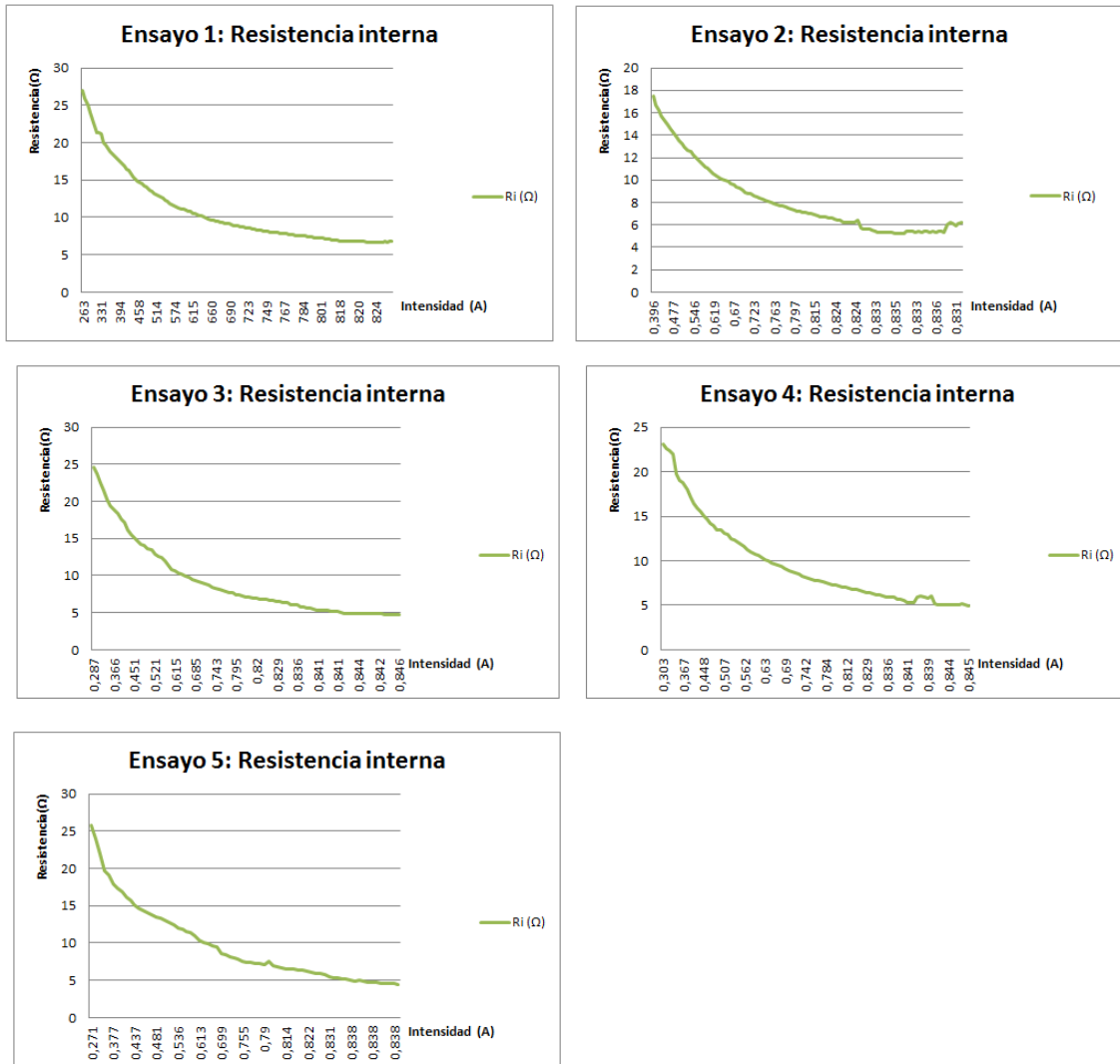


Figura 20. Resistencias internas de los 5 principales ensayos.

3.3.1.2. Curva característica

El siguiente paso, mediante la intensidad y el voltaje obtenido en ambas etapas se realiza la curva característica para poder visualizar que potencia genera consume durante el sistema.

Etapa de carga

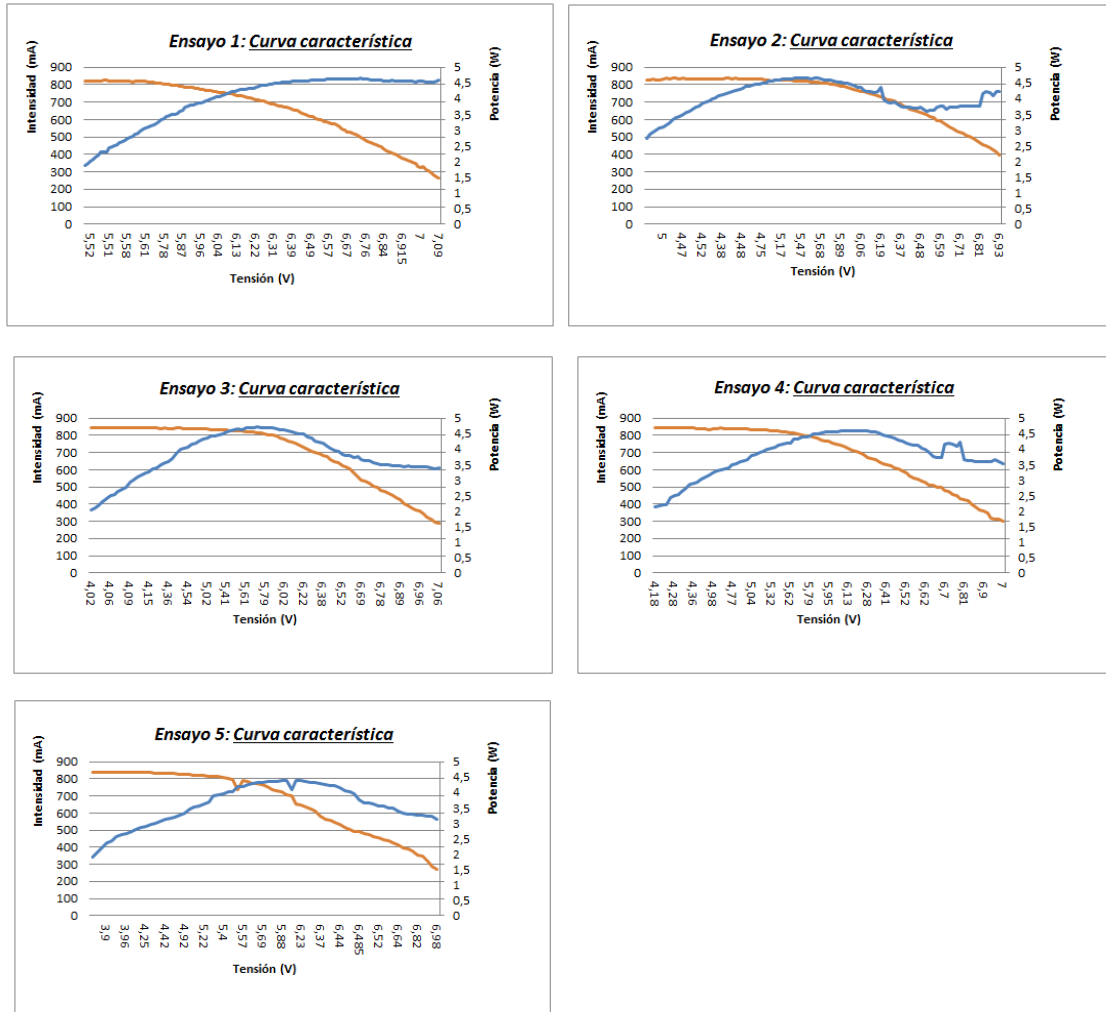
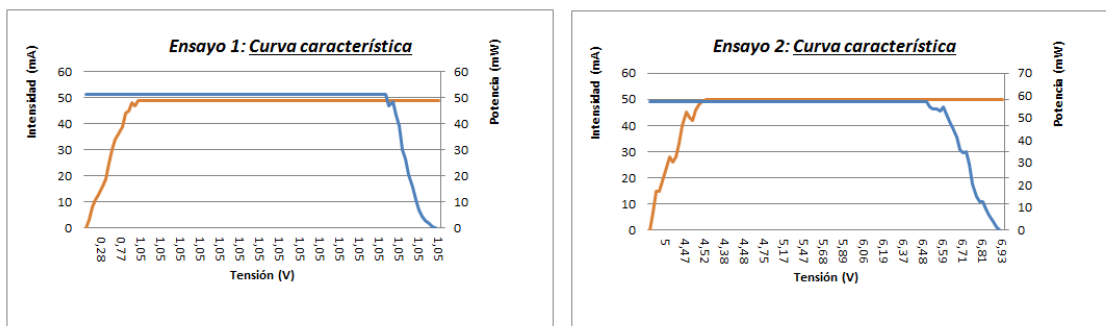


Figura 21. Curvas características de los 5 principales ensayos en la etapa de carga.

Etapa de descarga



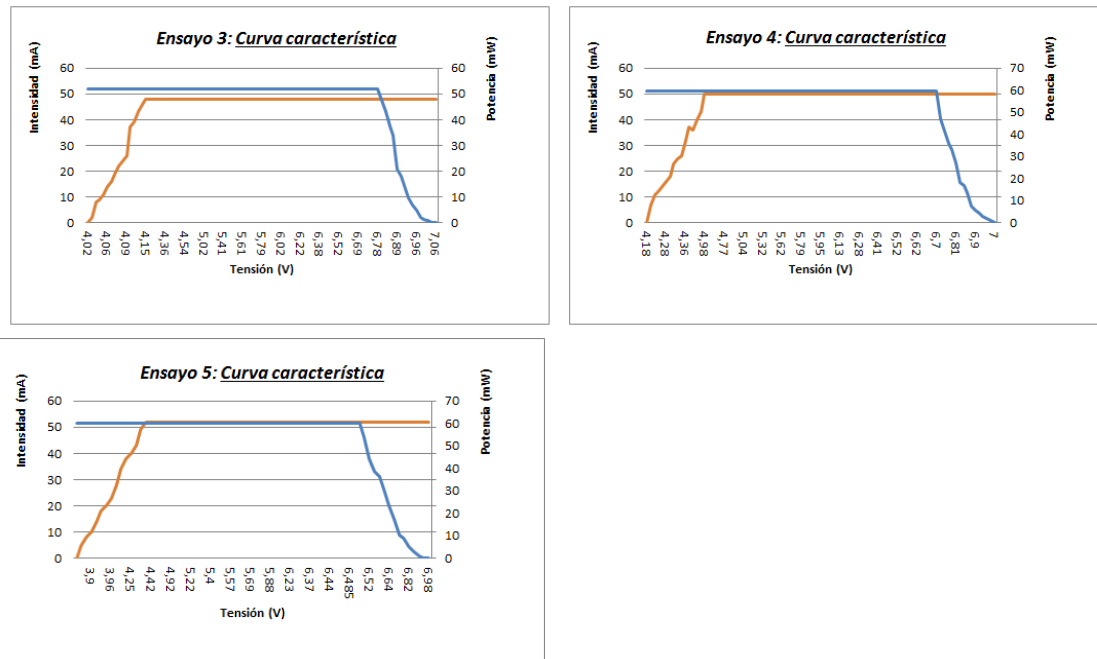
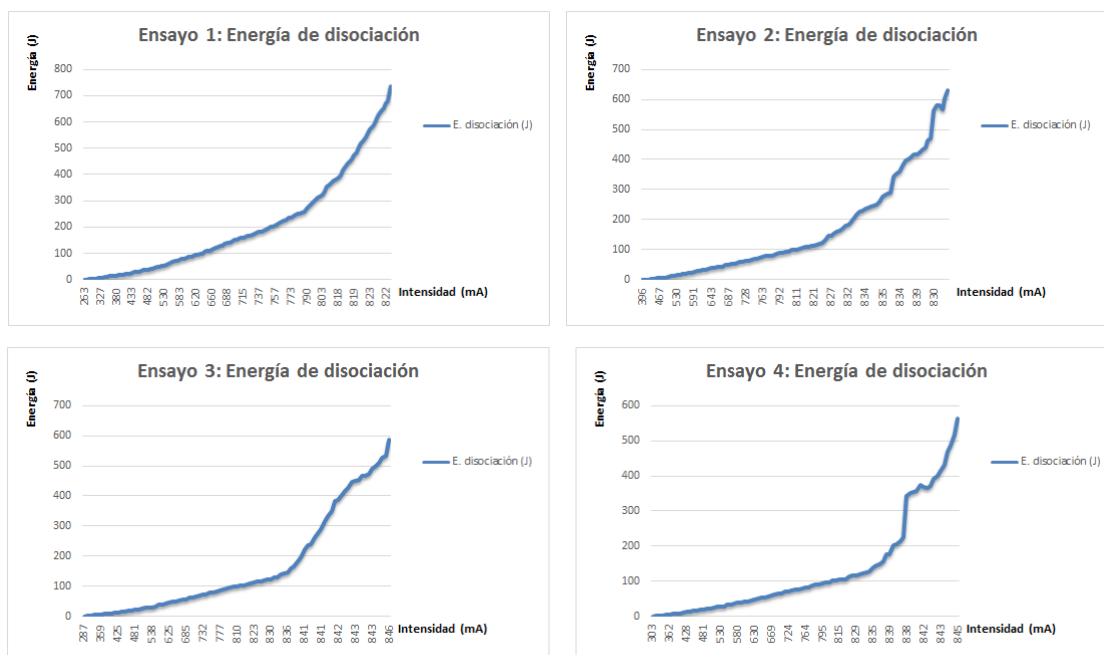


Figura 22. Curvas características de los 5 principales ensayos en la etapa de descarga.

Esta diferencia visible al comparar ambas etapas es como consecuencia a que en la primera parte sus voltajes e intensidades dependen de la resistencia interna variable de la celda, mientras que en la segunda parte al ser su resistencia constante depende de los motores del vehículo.

3.3.1.3. Energía de disociación y asociación

Etapa de carga



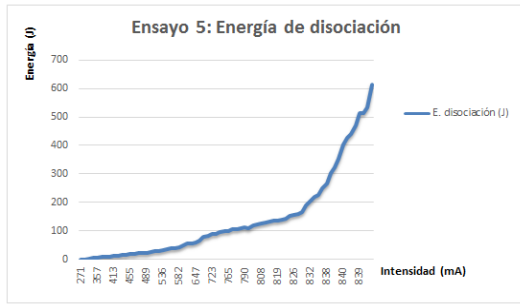


Figura 23. Energía de disociación de los 5 principales ensayos.

Etapa de descarga

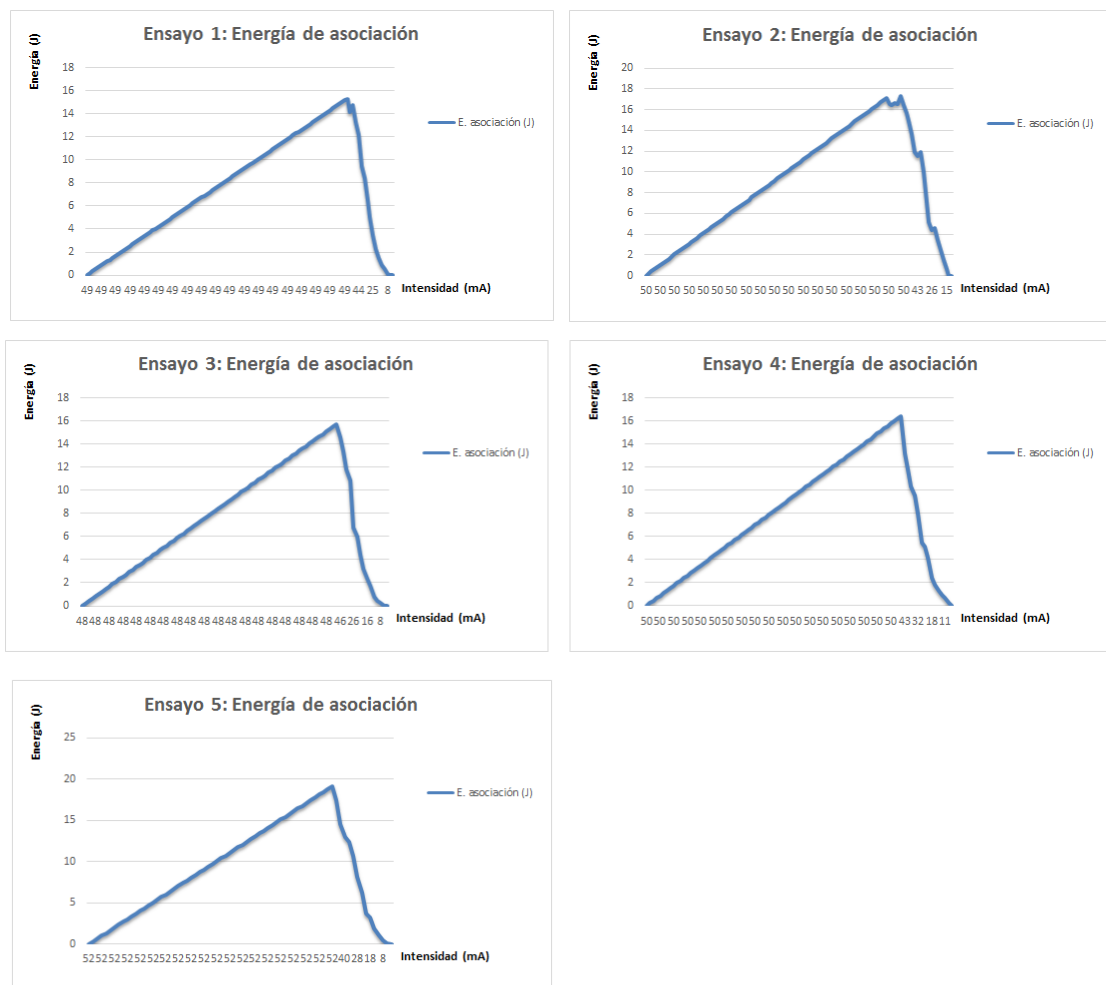


Figura 24. Energía de asociación de los 5 principales ensayos.

3.3.1.4. Flujo másico y volumen de las etapas

A continuación, mediante la intensidad aplicamos la fórmula de Coulomb averiguando así la carga en cada momento del proceso, después de ello mediante la



constante de Faraday se encuentra los moles de los reactivos y de los productos. Los siguientes gráficos muestran dicho comportamiento:

Etapa de carga

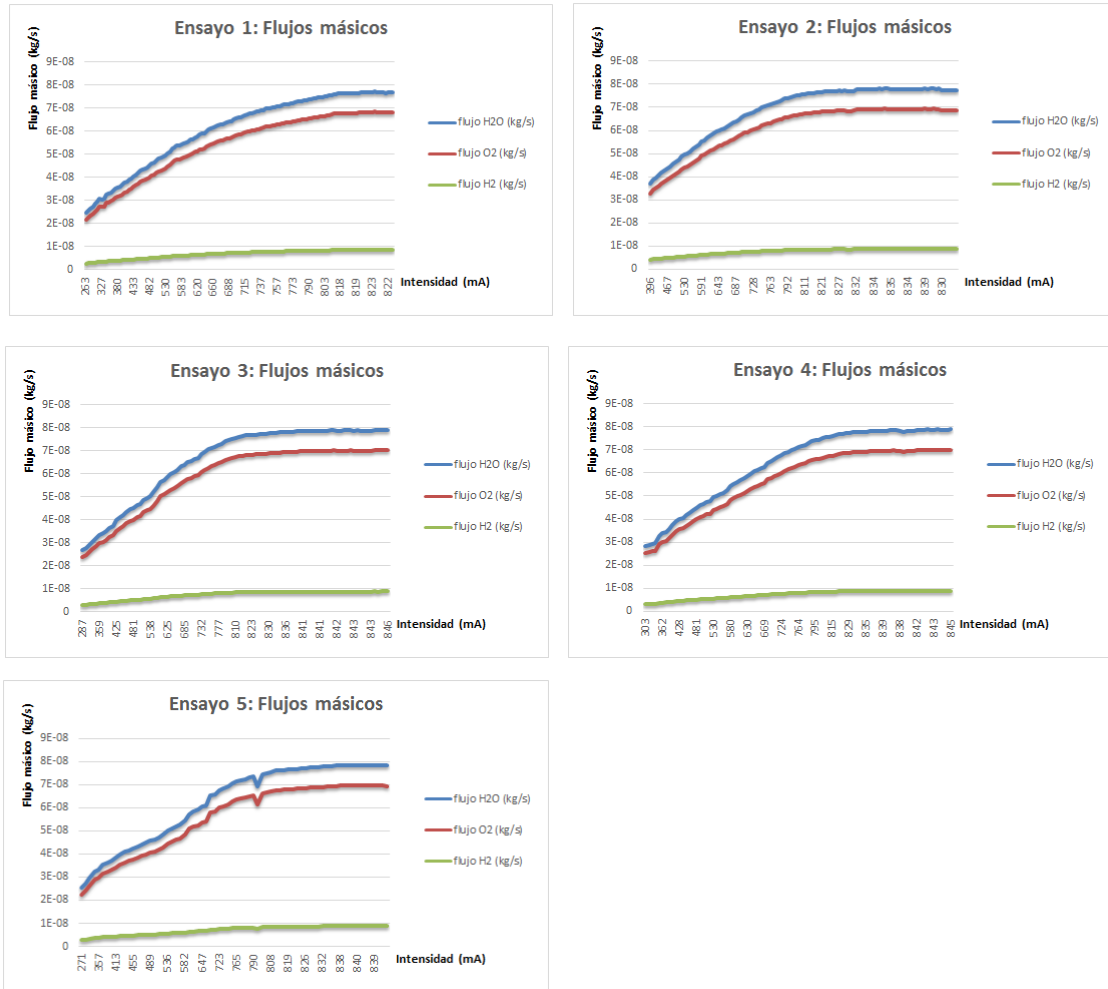
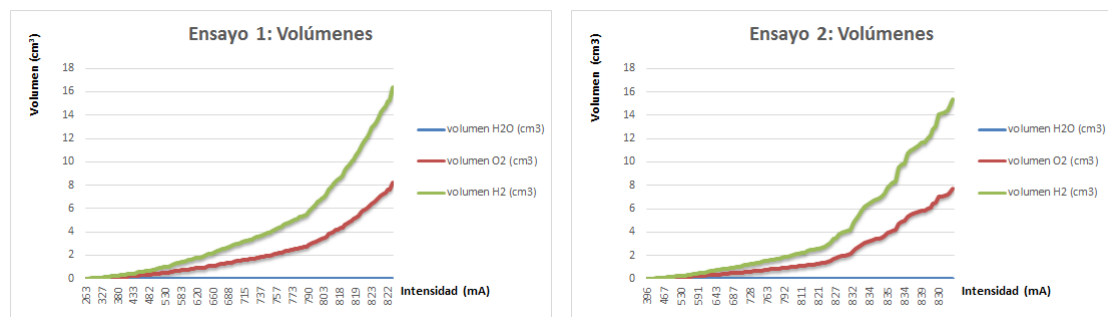


Figura 25. Flujos mássicos de los 5 principales ensayos en la etapa de carga.



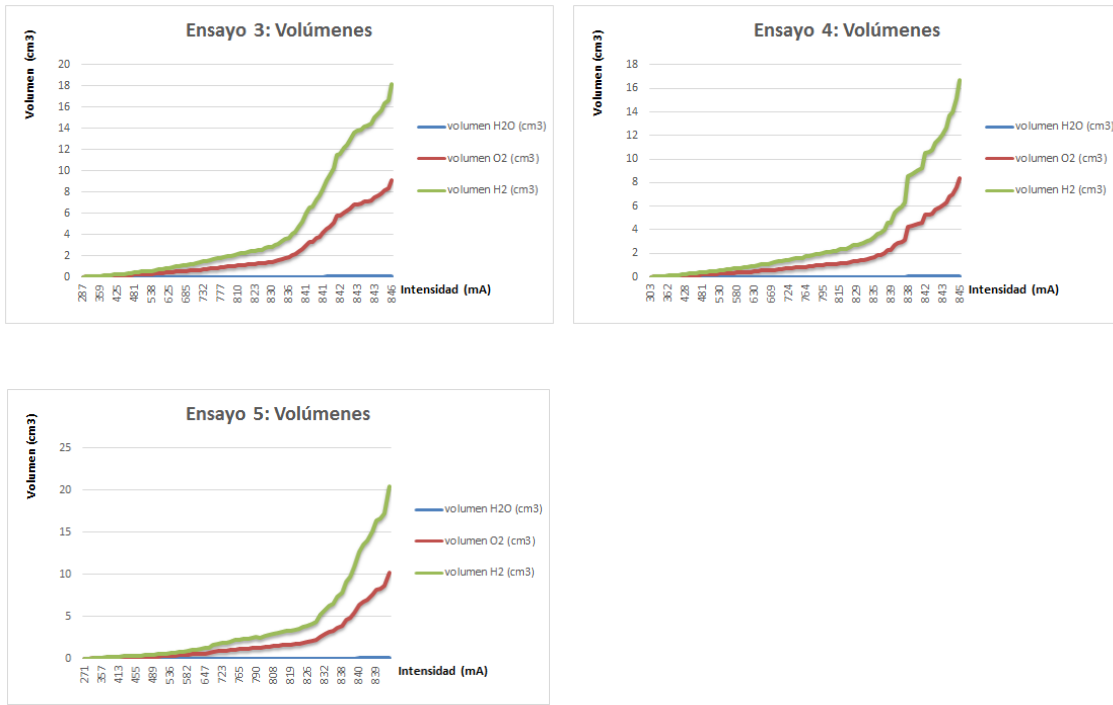
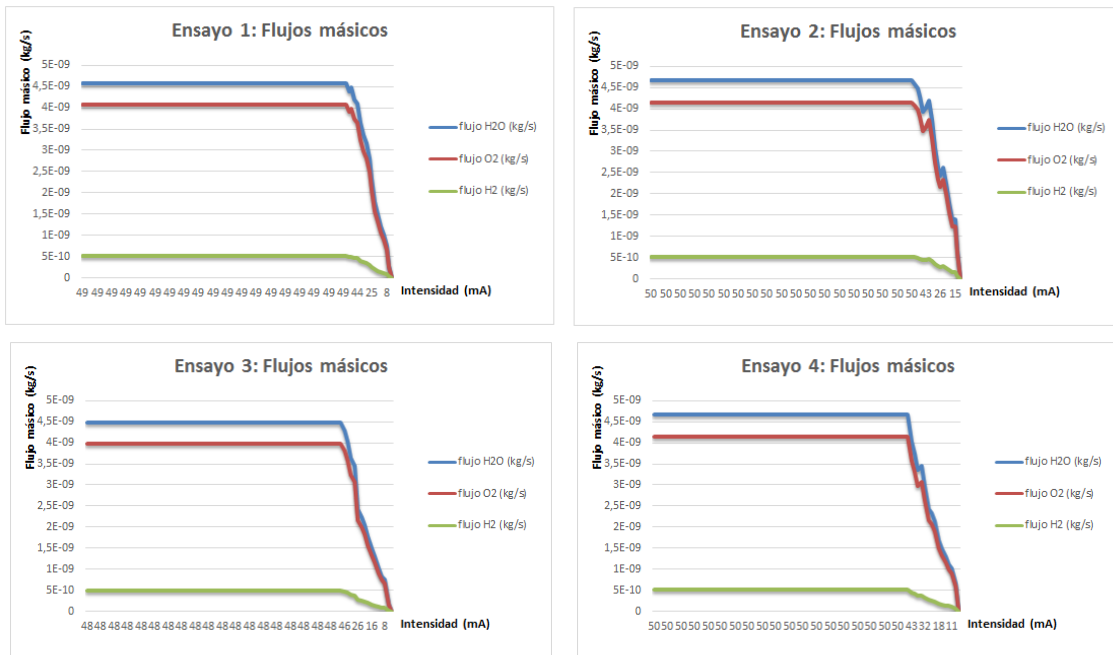


Figura 26. Volúmenes de los 5 principales ensayos en la etapa de carga.

Etapa de descarga



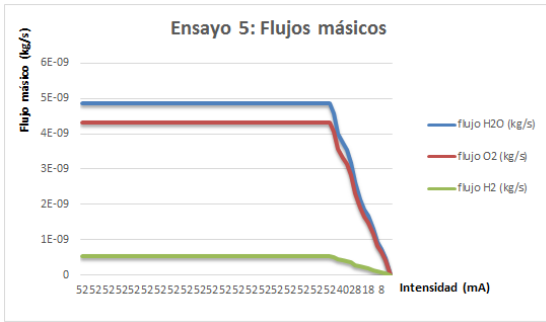


Figura 27. Flujos máscicos de los 5 principales ensayos en la etapa de descarga.

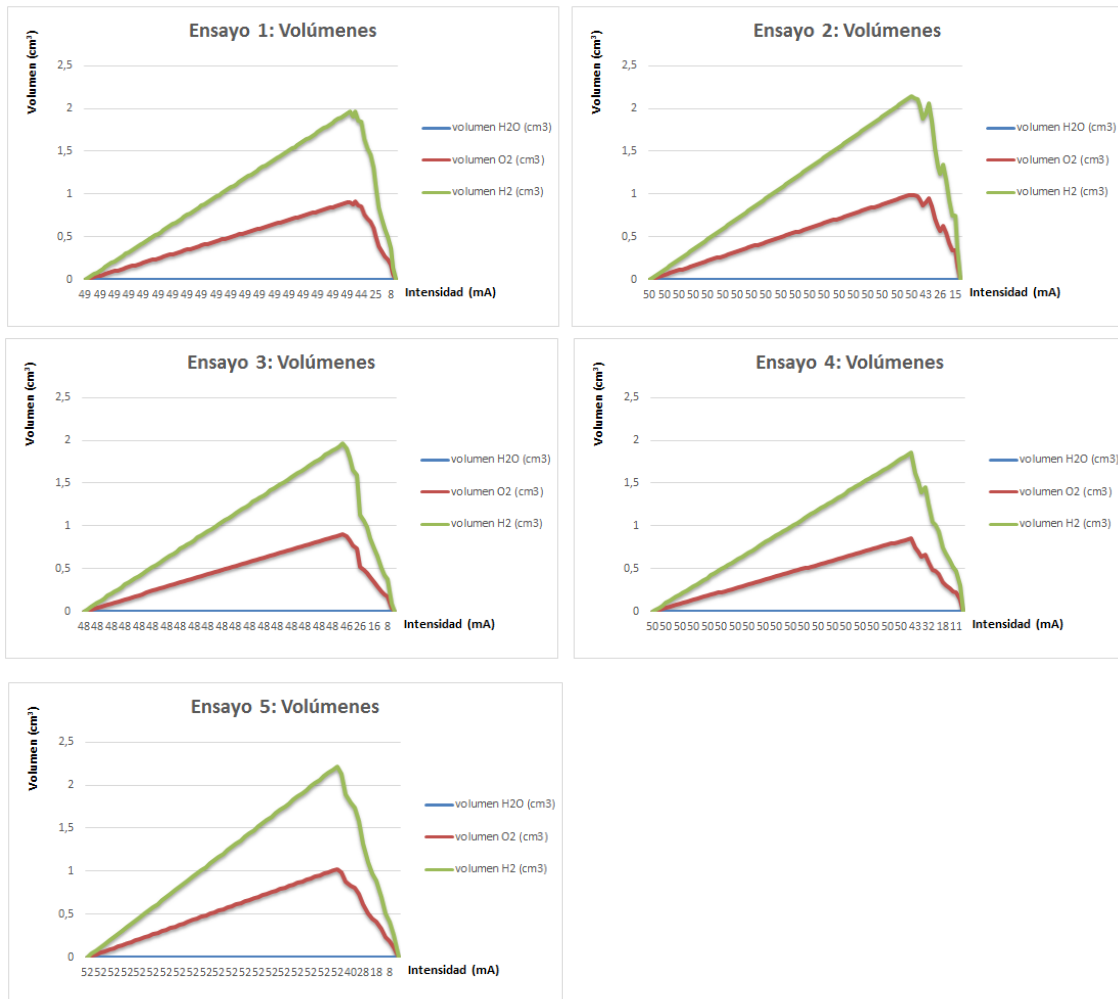


Figura 28. Volúmenes de los 5 principales ensayos en la etapa de descarga.



3.3.1.5. Fuerzas mecánicas

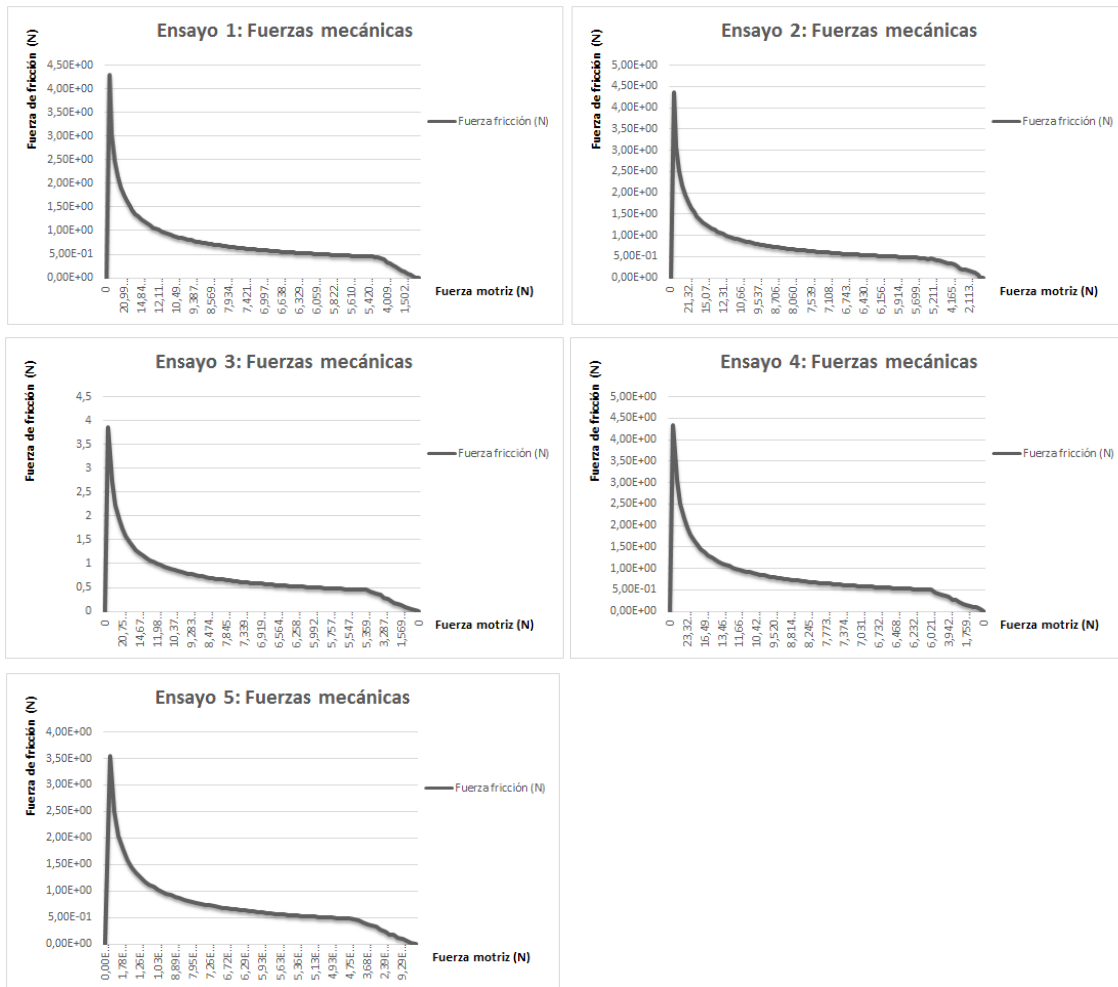


Figura 29. Fuerzas mecánicas de los 5 principales ensayos.

3.3.2. CONCORDANCIA ENTRE LOS RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES

Sí nos fijamos en las gráficas anteriores como son las de los volúmenes de los diversos reactivos y productos generados o consumidos en ambas etapas del apartado anterior, se puede observar claramente como el volumen de hidrógeno el cual en la práctica era de 12 cm³ (producidos y a posteriori consumidos), éste es notoriamente más pequeño (Etapa de carga = media de 18 cm³ y etapa de descarga = media de 2 cm³).

Estas alteraciones o diferencias, influyen de forma análoga al resto de resultados, haciendo que sus parámetros sean superiores a lo que deberían.



La causa de tales diferencias es debido a la relación entre los valores electroquímicos y los puramente eléctricos. Con esto quiere decir que considerando el hecho de estar trabajando con parámetros sumamente pequeños inferiores a un mol, establecer un paralelismo exacto entre ambos resulta prácticamente imposible ya que cualquier mínima perturbación que afecte el sistema termina por producir tales errores. Por ello para solventar tal inconveniente, estableceré una relación entre los datos puramente electroquímicos obtenidos en la parte teórica junto a los experimentales (S), *ecuación 49*, para luego hacer la media de dicha constante de los diferentes ensayos y aplicarla al diseño de la interfaz.

Relación electroquímica/eléctrica.

$$Datos_{eléctricos} = Datos_{electroquímicos} \cdot S \quad (49)$$

Por ello, para aislar dicha constante se realizará mediante la división de carga eléctrica respecto la parte teórica y los diferentes ensayos experimentales en las dos etapas.

Etapas de carga

Ensayo n°1:

$$S = \frac{Q_{eléctrico}}{Q_{electroquímico}} = \frac{131.58}{96.9246} = 1.358$$

Ensayo n°2:

$$S = \frac{123.24}{96.9246} = 1.272$$

Ensayo n°3:

$$S = \frac{146.3157}{96.9246} = 1.51$$

Ensayo n°4:

$$S = \frac{134.4564}{96.9246} = 1.387$$

Ensayo n°5:

$$S = \frac{163.97}{96.9246} = 1.692$$

Media:

$$S = \sum_{i=0}^n \left(\frac{S_i}{n} \right) = \sum_{i=0}^n \left(\frac{1.358 + 1.272 + 1.51 + 1.387 + 1.692}{5} \right) = 1.444$$

Etapas de descarga

Y lo mismo para la segunda etapa, siendo $S = 5$ multiplicándolo a los datos eléctricos, pues son inferiores a los que deberían.



4. ADQUISICIÓ DEL COMPORTAMENT DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE VÍA LabVIEW

Este capítulo se centra en la explicación detallada de cada componente que forma la interfaz realizada para la adquisición de los datos del sistema global del proyecto, en la que se muestra la estructura y diseño para comprender el completo funcionamiento de esta además de los nexos que contiene respecto a los cálculos del apartado del capítulo 3.

4.1. COMUNICACIÓN SERIAL ENTRE ARDUINO UNO WIFI Y LabVIEW.

Para establecer la conexión y transporte de los datos entre los sensores ACS 712 5A al Arduino Uno Wifi y posteriormente al software de LabVIEW, se requiere primero de todo un cable USB del tipo A/B (figura 30), el cual permite conectar la placa de Arduino y alimentarla desde el PC además de transferir los datos a través de él.

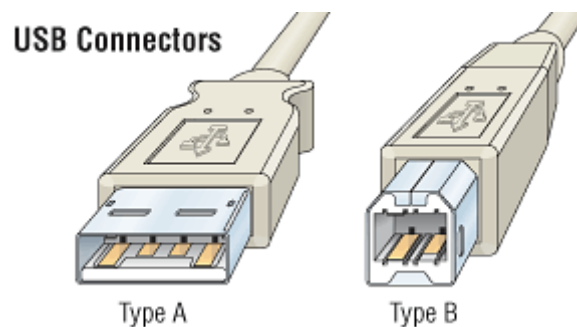


Figura 30. Tipo de conectores entre la placa Arduino y el PC.

Por consiguiente teniendo ya el medio de comunicación entre el PC y la placa el siguiente paso es el desarrollo del código que comunique los datos de Arduino al software de LabVIEW, por ello desde Arduino se lleva a cabo tal cometido mediante el programa **LIFA_Base** (*LabVIEW Interface for Arduino*), este código se encuentra en el apartado de Anexos el cual se puede obtener fácilmente a través de internet.

A continuación, para trabajar con estos datos es necesario instalar el *Toolkit de Arduino*, que se consigue mediante la descarga previa de la extensión del **VI Package Manager** y **NI – VISA Interactive Control** (Driver necesario para la lectura de los datos del puerto en la que es transmitida la información), permitiendo de este modo la configuración de las entradas/ salidas digitales y analógicas además de la configuración de la transmisión de los datos entre ambas.

Las siguientes imágenes ya permanecen a la interfaz desarrollada del proyecto y a la explicación de su respectivo funcionamiento:



En la imagen se observa en panel frontal y su equivalente en diagrama de bloques de las características esenciales que han de llevarse a cabo para la configuración de la transmisión de datos.

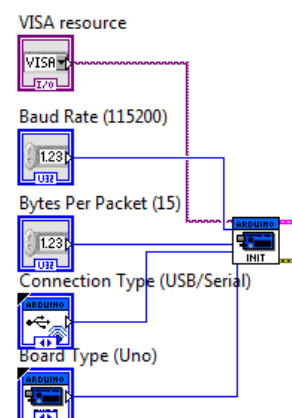
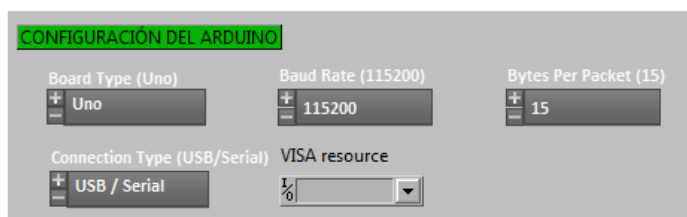
Primero de todo está la elección del tipo de placa con la que se trabaja, en mi caso pese a ser una placa de Arduino Uno Wifi, debido a que el módulo Wifi ESP 8266 es un añadido para poder comunicar los datos vía wifi, su composición electrónica es la de un Arduino UNO. Luego viene la velocidad de transmisión de datos que se obtiene mediante la elección del *Baud Rate* y los *bytes per packet*. Baud rate es el número de unidades de señal por segundo y se emplea mediante la siguiente ecuación:

$$R_s = \frac{1}{t} \rightarrow t = \frac{1}{R_s} = \frac{1}{115200} = 8.68 \times 10^{-6} s \quad (50)$$

Mientras que para el cálculo de bits que se transmiten en un tiempo T (*bitrate*), se lleva a cabo a partir de:

$$R_b = \frac{2^n}{t} \rightarrow \frac{2^{15}}{8.68 \times 10^{-6}} = 3774873600 \text{ bps} \quad (51)$$

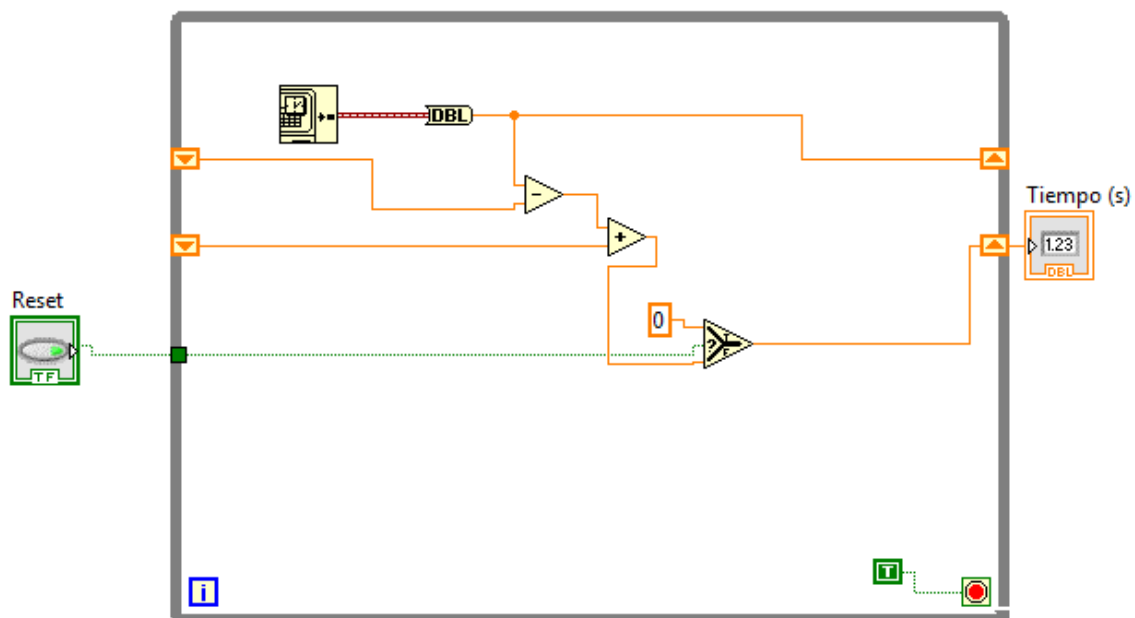
Después viene el tipo de comunicación en la que se establecerá la comunicación (serial) y por último la elección del puerto. Es necesario mencionar que la lectura del puerto USB se lleva a cabo mediante *encuesta*, este hecho puede causar algunos problemas si tienes conectados algunos periféricos al PC, dando como resultado problemas de lectura y errores en la adquisición de los datos.





4.2. DISEÑO Y FUNCIONAMIENTO DE LOS TIMERS.


Para el proyecto se requirió de dos Timers que me trabajasen de forma asíncrona entre ellos para poder determinar el tiempo de duración de cada etapa y poder aplicar dicho tiempo a la obtención o consumo de energía producida para observar la variación de flujo másico y volumétrico que tiene lugar el sistema.



Con la idea de ahorrar en espacio en el diagrama de bloques principal, realice dichas estructuras en sub VI's y su funcionamiento es el siguiente (la estructura de ambos timers es la misma):



El funcionamiento del timer se ubica dentro de la estructura While loop, la cual me permite definirla como en constante funcionamiento. A posteriori, mediante la

función get data time  obtengo el tiempo en el que inicia en formato double precision para convertirlo en tipo float mediante . Tras esto se calcula diferencia

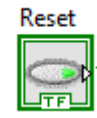
entre el tiempo previo y el actual mediante el operational  y los shift registers

. Y se le añade de nuevo el tiempo actual a lo anterior  expresando de esta forma el tiempo



transcurrido. Por último se le añade un selector , el cual viene siendo un

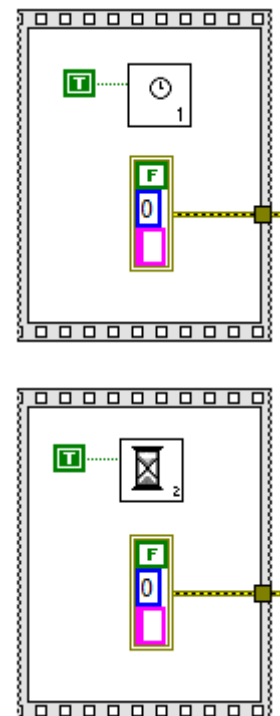
condicional en el que en el momento que apriete el botón reset




pondrá a 0. Visualizando el transcurso del tiempo en el indicador

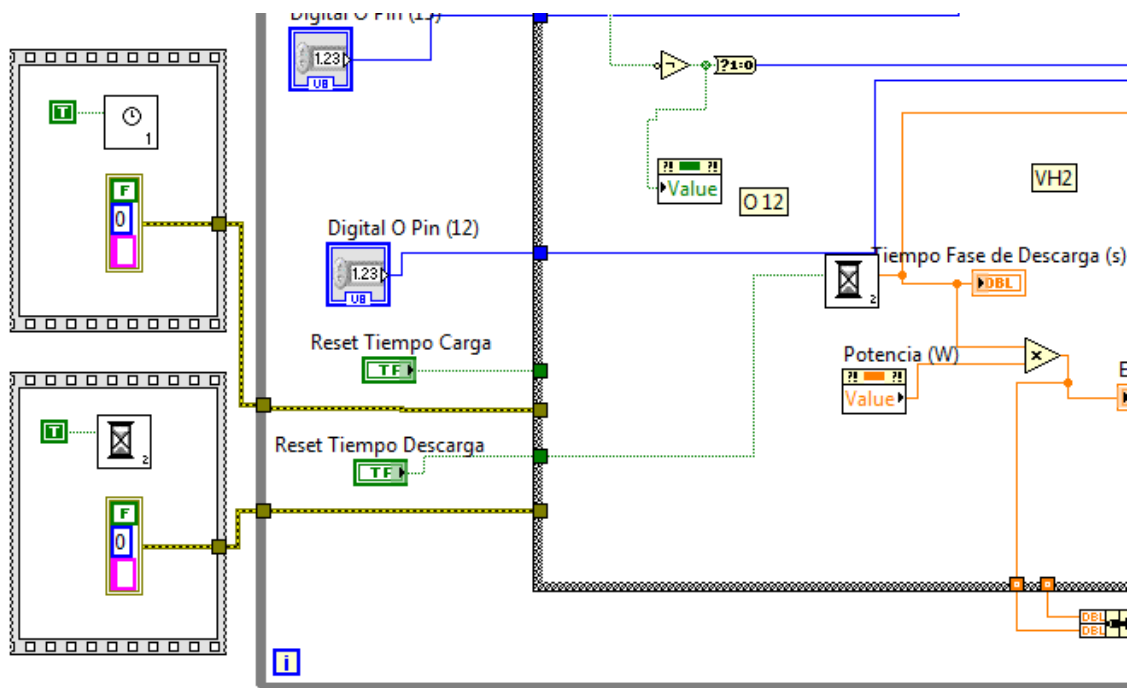
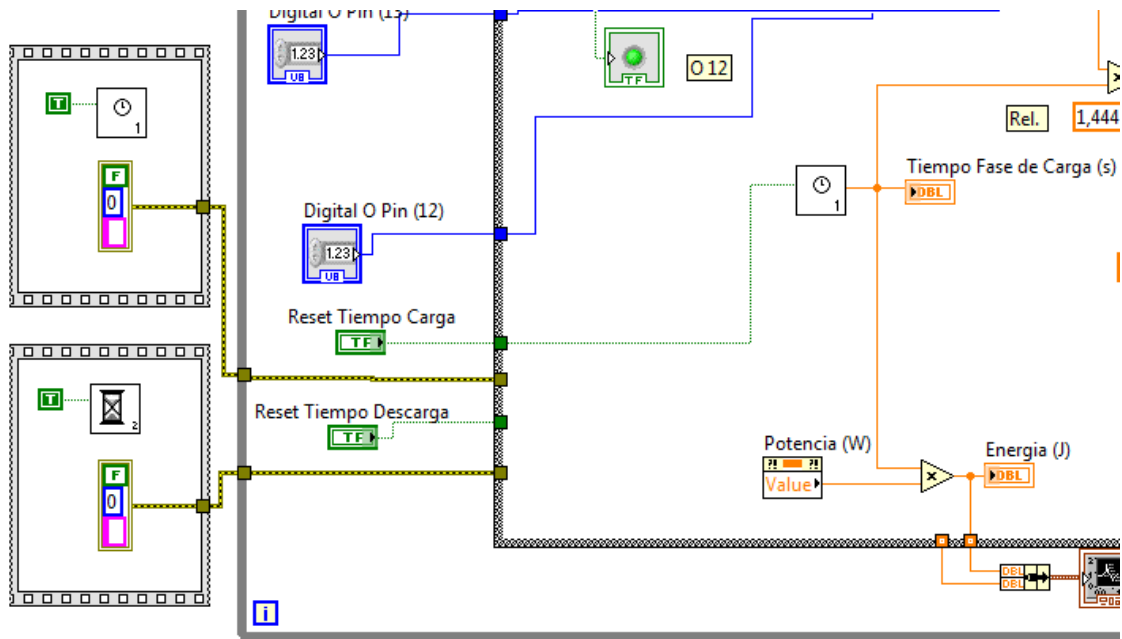


Finalmente teniendo la estructura de los timers, estos son trasladados al VI



principal en el que se les añade un flat y error sequence configurando su reset como true , para que siempre que se encuentren fuera de la elección de la etapa de funcionamiento su valor sea constantemente 0.

Sin embargo, al ser seleccionada ya sea la etapa de carga o descarga, el respectivo timer entra en ejecución pues vuelve a ser empleado el subVI con el reset puesto como false esta vez dentro de la estructura case de la etapa, tal y como se observa en las imágenes de a continuación:



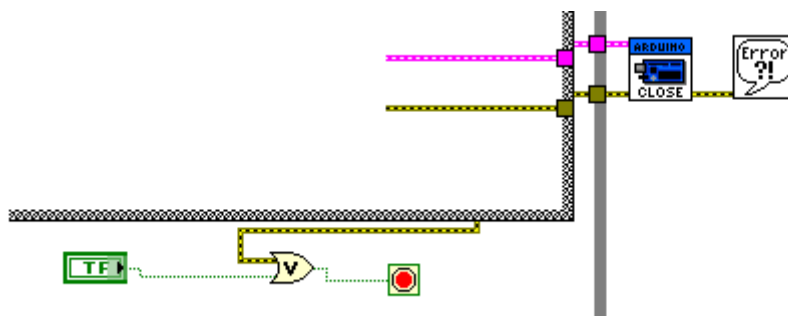


4.3. ESTRUCTURA DEL SISTEMA PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS DE LA INTERFAZ

Para la obtención de los datos de las diferentes etapas del sistema, las cuales son:

- Etapa de carga.
- Etapa de descarga.
- Estado de reposo.

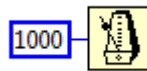
Se decidió emplear una estructura case con cada una de las siguientes englobadas por una estructura while. Y que me permite seleccionar la etapa en la que deseo trabajar o bien detener el sistema de adquisición siempre y cuando yo lo decida mediante el botón de parada de emergencia colocada en el panel frontal o en el caso de que haya algún error (mostrándomelo en forma de comentario) durante la transferencia de información por parte de la placa.



Como se puede observar en la figura anterior, para saber con mayor claridad en la etapa de trabajo, se han colocado dos leds que indican dicho ejemplo el cual se explicará el esquemático de estos en el siguiente subapartado.

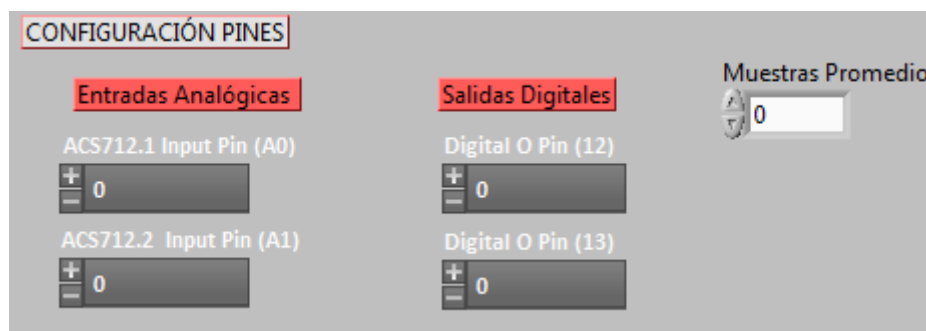


Por último respecto a la estructura general, con tal de poder visualizar claramente los valores del proceso, e empleado la función *wait until next ms multiple* haciendo de este modo que tras cada segundo muestre los datos en la interfaz.

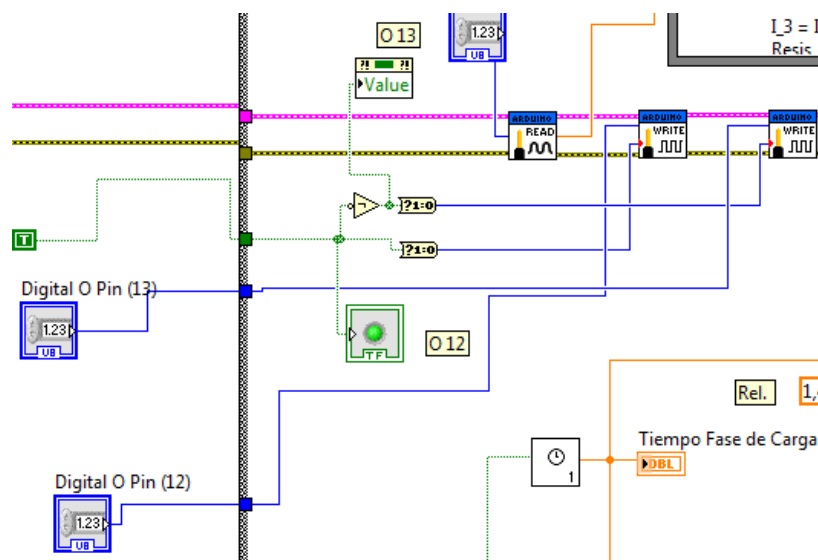


4.3.1. ESTRUCTURA ETAPA DE CARGA

Para poder empezar la adquisición de datos previamente se han de configurar las entradas/ salidas digitales y analógicas, la cual se lleva a cabo mediante el panel frontal.





Una vez configurados los diferentes pines necesarios, mostramos la estructura en la que se encuentra las salidas digitales para el encendido y apagado automático de los leds en el caso de la etapa de carga:




Primero, diferenciando las funciones *digital write pin* del resto, se observa 6 terminales. Estos terminales, 4 de entrada y 2 de salida, permiten la



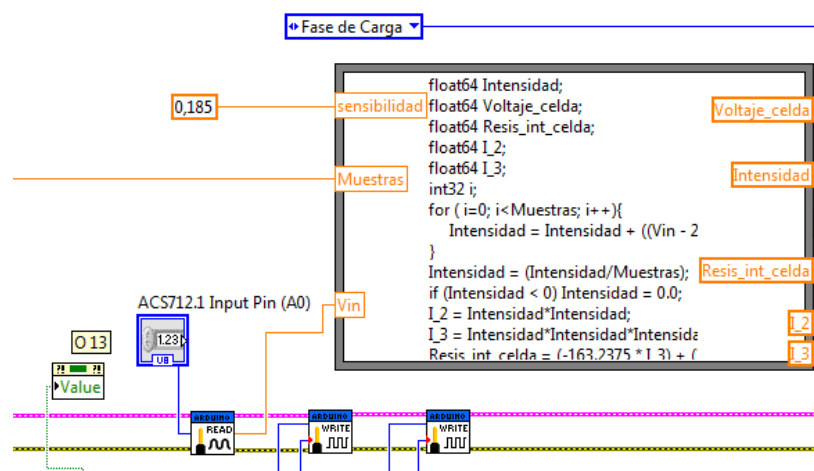
escritura y orden des de el LabVIEW a la placa Arduino, de modo que al expresar el pin digital de salida y el comportamiento en binario que ha de tener, se puede controlar el comportamiento en este caso el encendido o apagado del led.

Fijandonos de nuevo en la imagen anterior, al querer que el led blanco esté encendido y el rojo apagado (funcionamiento de la etapa de carga), mediante el booleano definido como True que se encuentra fuera de la estructura case se enlaza dentro de dicha estructura en la que mediante un inversor , definimos el estado del led blanco/ output 12 como true y el led rojo/ output 13 como false. Despues mediante unos indicadores podemos ver el comportamiento de estos en la interfaz, mostrada anteriormente y finalmente el uso de convertidores de booleano to binary  dirigidos hacia sus respectivos digital writes para el control de los leds físicos.

Tras la escritura de las entradas digitales, viene la lectura de los sensores ACS

7512 5A, empleando la función analog read pin , en la que de igual a forma a los digital write pin, se debe seleccionar el pin el cual estará conectado el sensor para hacer la lectura. Este valor es definido como Vin, y varía entre 0 – 5 aproximadamente según la intensidad que fluya a través del sensor (Comportamiento sensor: - 5A --> 0, 0A --> 2.5 y 5A --> 5), información detallada en el datasheet del sensor ACS 75112 5A de los anexos.

Este valor Vin, obtenido del sensor 1, será trasladado hacia la estructura fórmula node para poder conseguir la intensidad y a su vez la resistencia interna de la celda dependiente del corriente junto al voltaje y potencia en el transcurso del proceso.





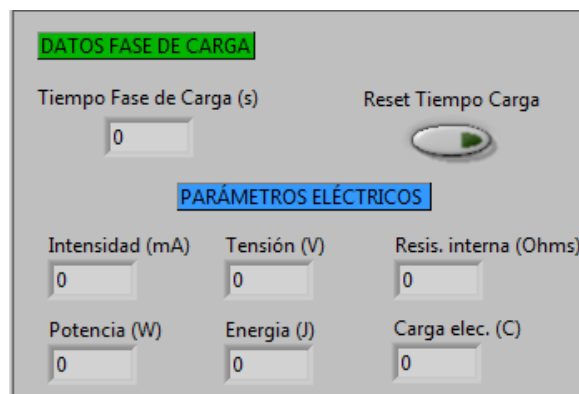
Dentro de esta primera estructura de formula node aparecen los cálculos empleados durante el cálculo teórico y experimental del capítulo 3 solo que con la diferencia de que estos se muestran en escritura en código C.

En la estructura como se puede observar, aparecen todos los cálculos para la determinación de los valores eléctricos de la primera etapa con la diferencia del añadido de un promedio para la intensidad cuyo fin sirve para representar con mayor precisión el valor debido a que al estar trabajando con valores sumamente pequeños a la escala de milis existen variaciones pequeñas que afectan al resultado, siendo así lo más apurados posibles.

Y por último, en el caso de que el resultado de la intensidad sea negativa, se establezca como límite mínimo el 0,0 y un límite máximo de 0.9 A.

```
float64 Intensidad;
float64 Voltaje_celda;
float64 Resis_int_celda;
float64 I_2;
float64 I_3;
int32 i;
// if (Vin < 2.55) Vin = 2.50;
for ( i=0; i<Muestras; i++){
    Intensidad = Intensidad + ((Vin -
    2.50)/sensibilidad);
}
Intensidad = (Intensidad/Muestras);
if (Intensidad > 0.900) Intensidad = 0.900;
if (Intensidad < 0.350) Intensidad = 0.0;
I_2 = Intensidad*Intensidad;
I_3 = Intensidad*Intensidad*Intensidad;
Resis_int_celda = (-163.2375 * I_3) +
(321.065*I_2)+(-227.98*Intensidad)+67.33075;
Voltaje_celda = Intensidad*Resis_int_celda;
```

En el panel de control se visualizará en la siguiente parte:



A continuación, a partir de la intensidad, el tiempo y la relación establecida entre los datos químicos y eléctricos se aísla la carga eléctrica para ser introducida como variable de entrada junto a las constantes de densidades másicas de los productos (H₂ y O₂) y combustibles (H₂O) en una nueva estructura de fórmula node, con el siguiente código y estructura en el panel:



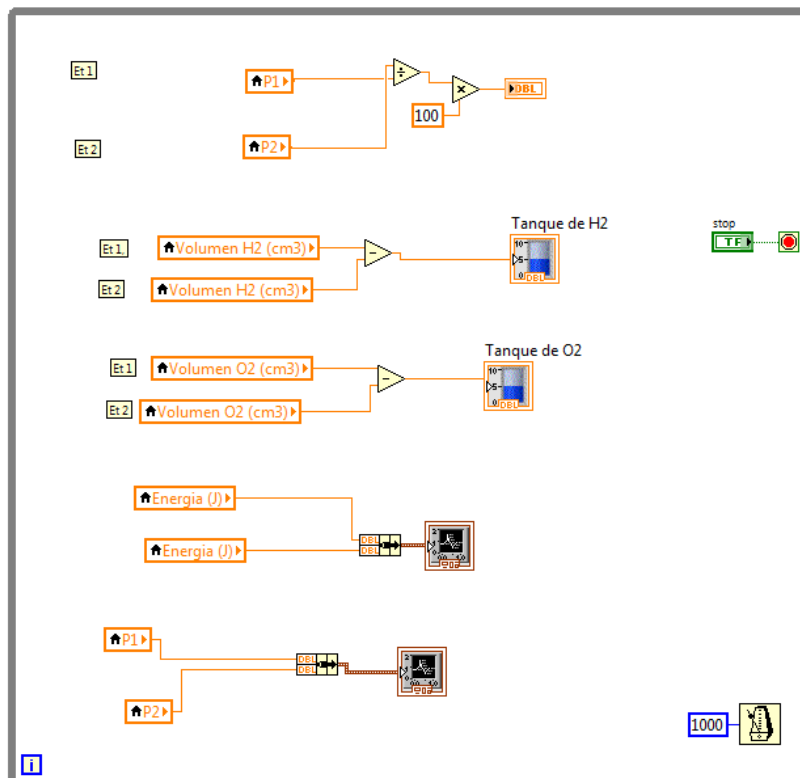
PARÀMETRES ELECTROQUÍMICOS			
Moles H2	Masa H2 (Kg)	Masa H2(g)	Volumen H2 (cm3)
0	0	0	0
Moles O2	Masa O2 (Kg)	Masa O2 (g)	Volumen O2 (cm3)
0	0	0	0
Moles H2O	Masa H2O (g)	Masa H2O (Kg)	Volumen H2O (cm3)
0	0	0	0

float64 MolesH2;
float64 masaH2;
float64 MolesH2O;
float64 MasaH2O;
float64 MolesO2;
float64 MasaO2;
float64 VH2;

Tal y como se contempla al fijarse en el código están presentes las fórmulas para calcular y poder monitorizar posteriormente la cantidad molar, el flujo másico y el flujo volumétrico de los componentes.

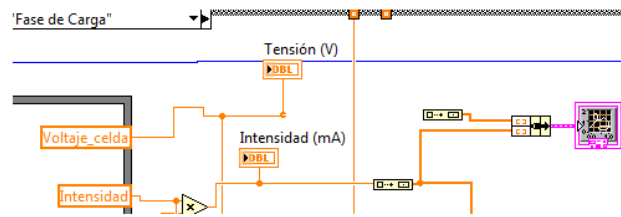
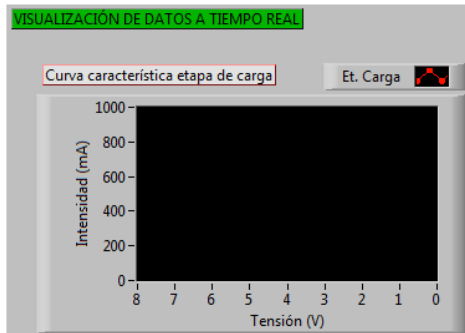
MolesH2 = Q/193000;
MolesH2O = MolesH2;
MolesO2 = MolesH2O/2;
*masaH2 = (MolesH2*MmolarH2)/1000;*
*MasaH2O = (MolesH2O*18)/1000;*
*MasaO2 = (MolesO2*32)/1000;*
*VH2 = (masaH2/DensH2)*1000000;*
*VO2 = (MasaO2/DensO2)*1000000;*
*VH2O = (MasaH2O/DensH2O)*1000000;*

Por último, para el riguroso control temporal de la etapa y variaciones de sus parámetros se grafican aquellos que son considerados como esenciales para la comprensión del funcionamiento dentro de la estructura de cada caso y otra una estructura while independiente en la que se visualiza los datos que afectan a ambas etapas.

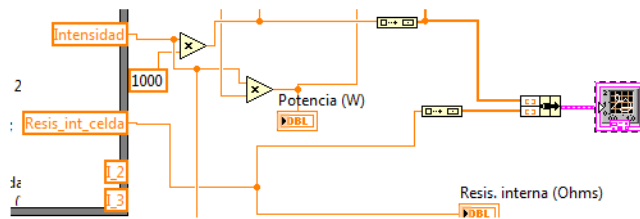
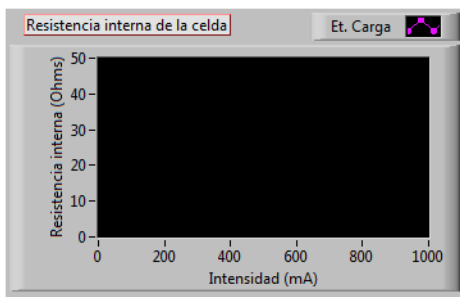


Entre ellos se destacan para la etapa de carga:

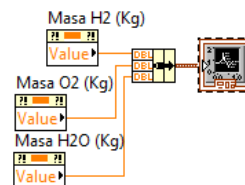
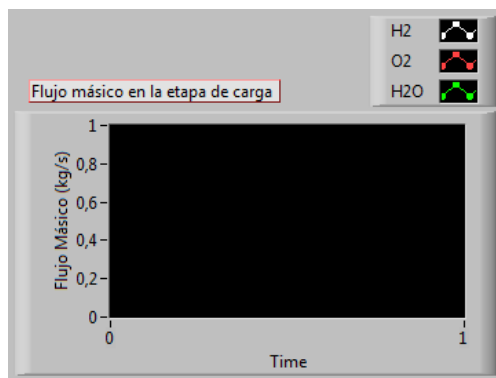
- Curva característica.



- Resistencia interna de la celda.

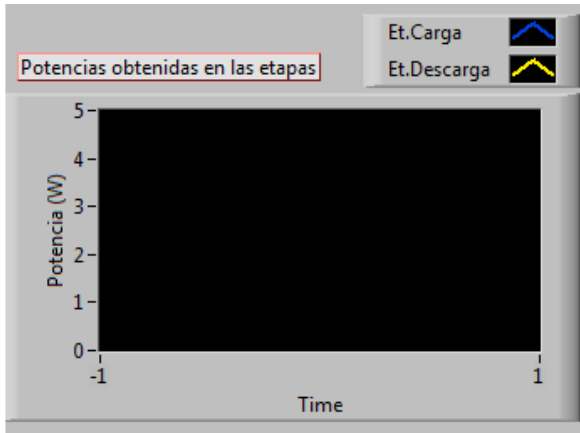


- Flujo másico.

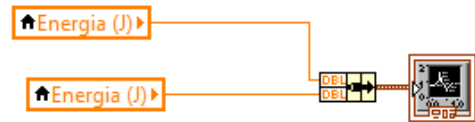
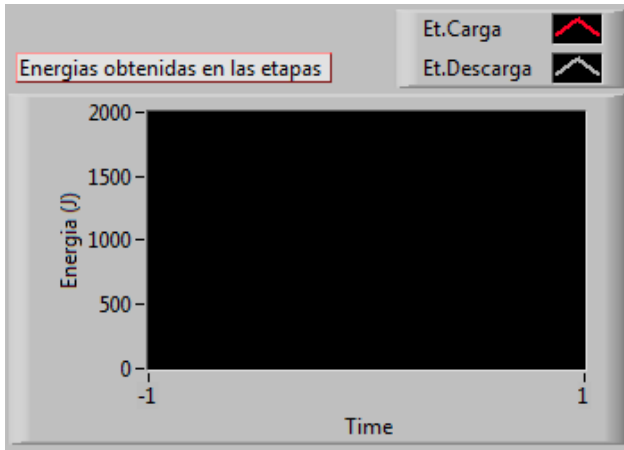


Y como gráficas generales, las cuales se muestran los valores de ambas etapas en un mismo gráfico y que se encuentran fuera de la estructura case son:

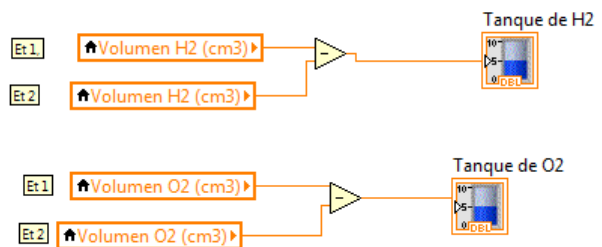
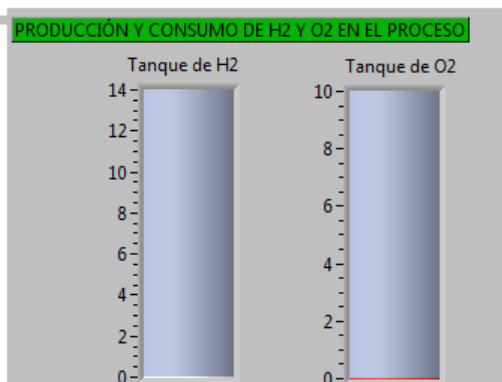
- Potencia obtenida.



- Energía obtenida.

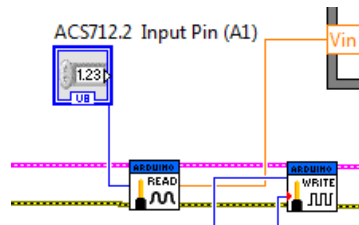


- Producción del hidrógeno y oxígeno en la etapa.

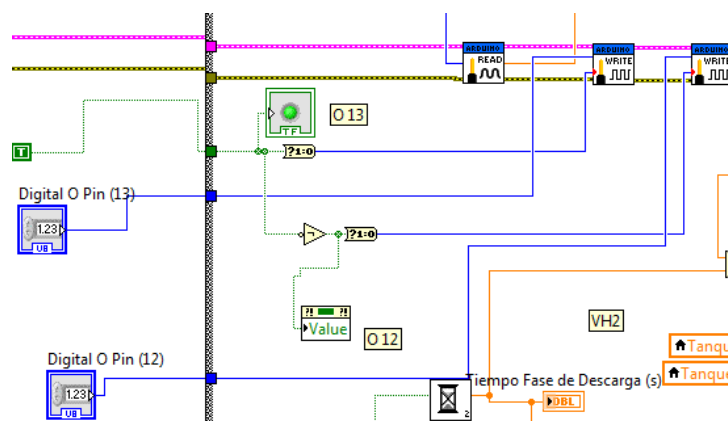


4.3.2. ESTRUCTURA ETAPA DE DESCARGA

La configuración de entradas y salidas de la placa será la misma que la del apartado anterior con la diferencia que esta vez los datos son adquiridos a través del pin analógico 1 o A1, pin que irá conectado al sensor 2 de efecto Hall ACS712 5A.



En referencia a la configuración de leds, esta es igual a la configuración previa de la etapa de carga aunque esta vez el estado del led blanco/ output 12 como false y el led rojo/ output 13 como true estando así este último encendido mientras siga seleccionada la etapa de descarga.



Y para la obtención de los parámetros eléctricos otra fórmula node pero con código diferente.

La principal diferencia entre este y el de la etapa de carga reside en que la resistencia no viene determinada por la corriente que circula por la celda siendo esta variable sino por la resistencia constante de los motores medida durante los ensayos (45.8 Ω).

Estando en paralelo ambos motores, su valor queda dividido entre 2, tal y como se refleja en la ecuación.

```
float64 Intensidad;
float64 Voltaje_coche;
int32 i;
for ( i=0; i<Muestras; i++){
    Intensidad = Intensidad + ((Vin - 2.50)/sensibilidad);
}
Intensidad = Intensidad/Muestras;
if (Intensidad < 0) Intensidad = 0.054;
if (Intensidad > 0.054) Intensidad = 0.054;
Voltaje_coche = (Intensidad)*(R_mot_paral/2);
```

A continuación vendrían el cálculo del consumo de los parámetros electroquímicos que al igual que antes se llega a ellos mediante la carga eléctrica en la



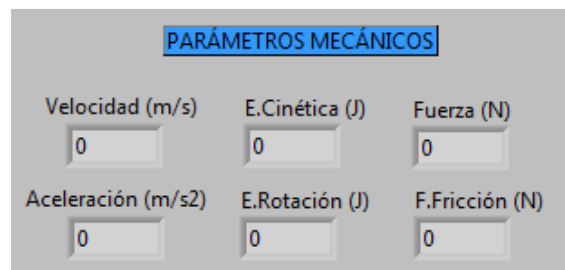
etapa actual y la relación entre datos químicos y electroquímicos transformados todos en outputs que son restados a los productos de la etapa anterior, ahora combustibles con tal de mesurar la producción energética obtenida. Y para ello se vuelve a emplear de nuevo otra fórmula node.

Al final del código se puede contemplar lo citado anteriormente, restando la producción volumétrica del hidrógeno y oxígeno de la etapa de descarga a los valores de la etapa de carga viendo así como en los tanques de la interfaz se van consumiendo mientras hace funcionar el mini vehículo hasta que este se quede sin combustible.

```
float64 MolesH2_2;  
float64 masaH2_2;  
float64 VH2_2;  
float64 VO2_2;  
float64 VH2O_2;  
float64 MolesH2O_2;  
float64 MasaH2O_2;  
float64 MolesO2_2;  
float64 MasaO2_2;
```

```
MolesH2_2 = Q/193000;  
MolesO2_2 = MolesH2_2/2;  
MolesH2O_2 = MolesH2_2;  
masaH2_2 = (MolesH2_2*MmolarH2)/1000;  
MasaO2_2 = (MolesO2_2*32)/1000;  
MasaH2O_2 = (MolesH2O_2*18)/1000;  
VH2_2 = (masaH2_2/DensH2)*1000000;  
VO2_2 = (MasaO2_2/DensO2)*1000000;  
VH2O_2 = (MasaH2O_2/DensH2O)*1000000;
```

Después, en esta etapa se mesura las fuerzas que son generadas en el vehículo, además de la aceleración, la fricción de las ruedas al contacto con el suelo, las energías cinéticas y rotacionales obtenidas a partir de la energía eléctrica.



A la derecha aparece el código utilizado para hallar los datos previos.

```
float64 ECinetica;
float64 ERotacion;
float64 Fuerza;
float64 Friccion;
float64 Aceleracion;
```

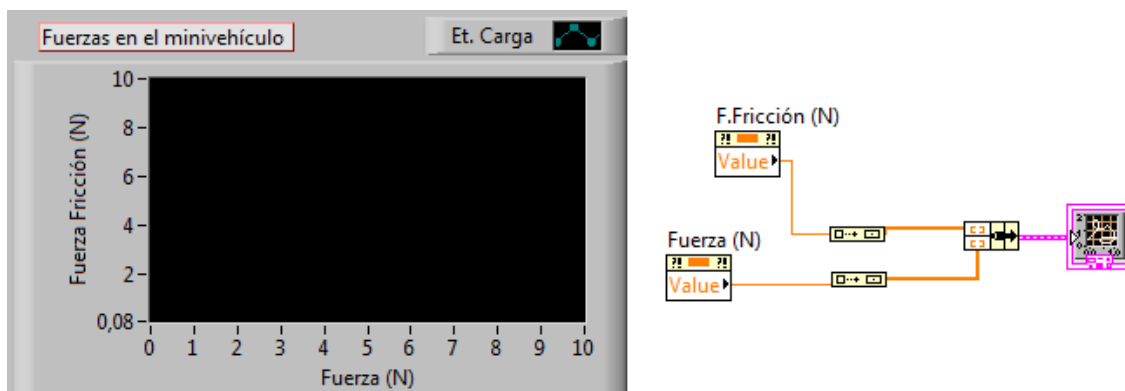
```
ECinetica =
(0.5*0.269*(Velocidad*Velocidad)/100);
ERotacion = (Energia*0.1) - ECinetica;
Fuerza = Potencia/Velocidad;
Friccion = ((Fuerza/6)*(-0.5));
```

Tras tener los valores potenciales energéticos guardados de la primera etapa, junto a los que se van obteniendo en el transcurso del tiempo de esta segunda, se divide dichos resultados de la segunda etapa por los de la primera para finalmente ser multiplicado por cien encontrando de esta forma la eficiencia del sistema en general. El cual se puede contemplar en la interfaz mediante:

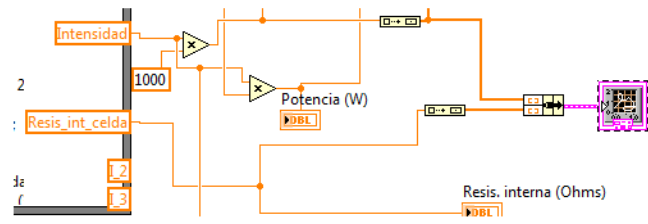
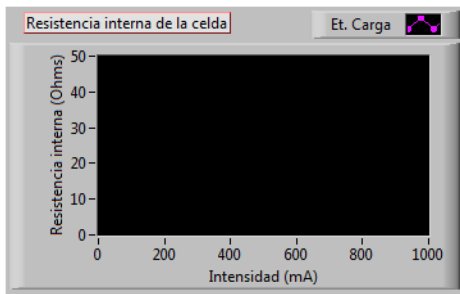


Por último, para el riguroso control temporal de la etapa y variaciones de sus parámetros se grafican los siguientes parámetros:

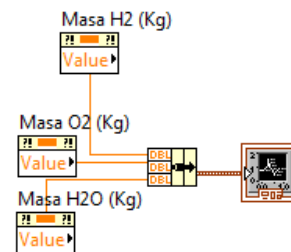
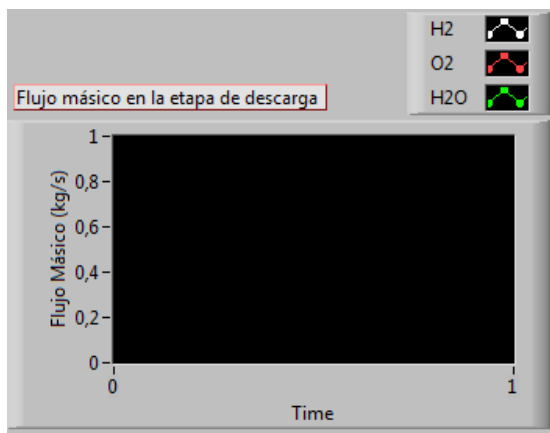
- Fuerzas existentes en el vehículo a escala.



- Resistencia interna de la celda.

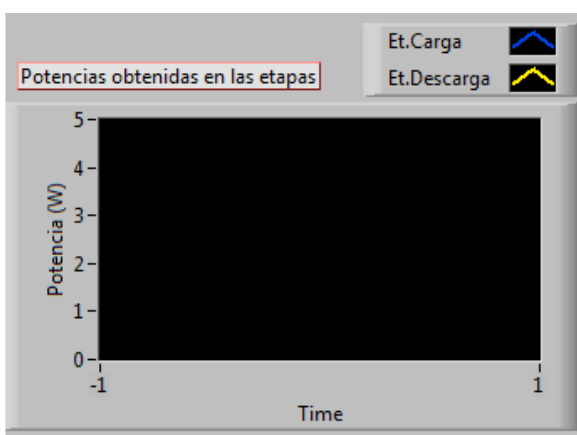


- Flujo másico.

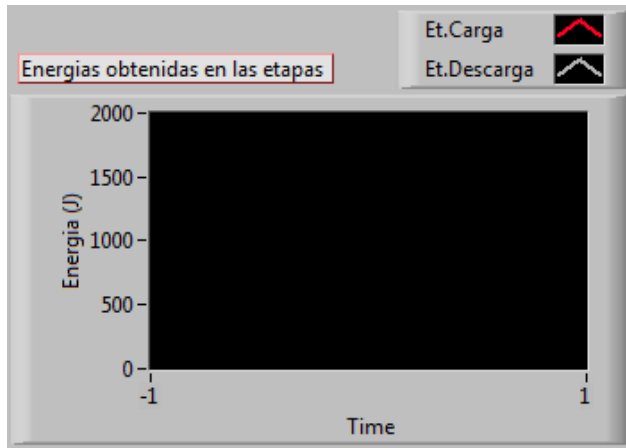


Y como gráficas generales:

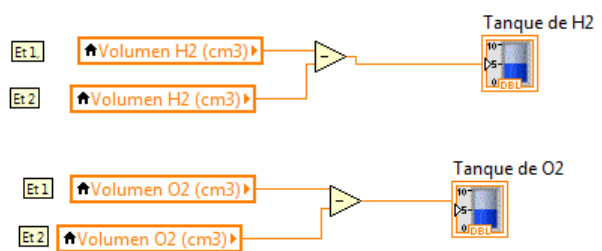
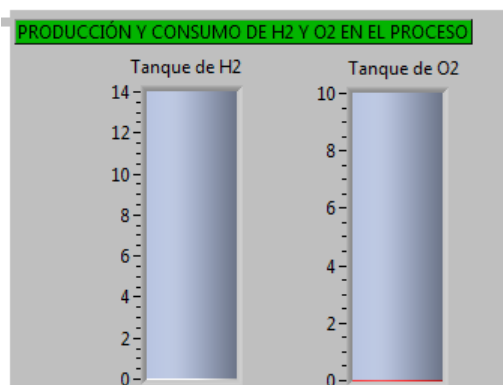
- Potencia obtenida.



- Energía obtenida.

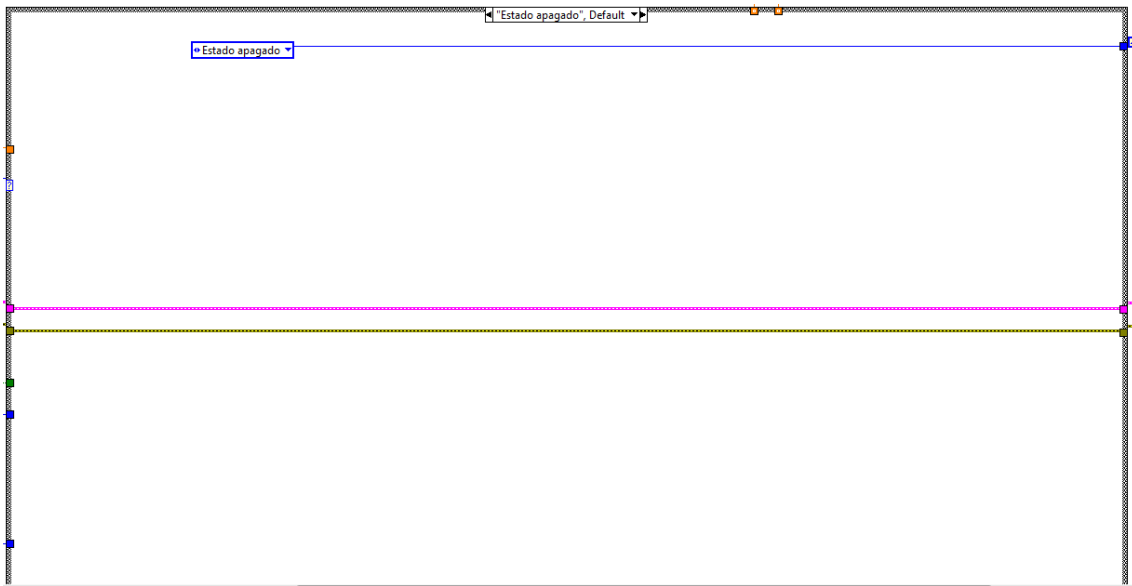


- Producción del hidrógeno y oxígeno en la etapa.



4.3.3. ESTRUCTURA EN ESTADO DE REPOSO

Finalmente en este estado, como el sistema permanece en reposo, no es necesario configurar ni realizar ningún esquemático. Por lo que la estructura case queda en blanco, tal que así:





5. CONCLUSIONES

La memoria de la tesis finaliza con la exposición de las conclusiones extraídas en la realización del proyecto aunque previamente se resaltarán las aportaciones y resultados obtenidos en el presente.

- a) Caracterización y cálculo del comportamiento de un sistema constituido por dos celdas de combustible, orientadas en la formación de hidrógeno a partir de agua destilada para el posterior uso del mismo como combustible generador de energía eléctrica para la alimentación de dos motores instalados en un dispositivo similar a un vehículo.
- b) Contraste entre los valores teóricos y experimentales para la determinación de una relación que permita igualar dicho comportamiento para mostrar posteriormente con la máxima precisión posible en la interfaz con la que trabajará el usuario.
- c) Desarrollo de los algoritmos en la plataforma Arduino, para la calibración y adquisición de los datos eléctricos provenientes de los sensores de efecto Hall (ACS712 5A), del sistema lo más depurado y preciso posible.
- d) Creación del panel frontal y del diagrama de bloques que forman la interfaz que monitoriza a tiempo real la adquisición de datos del proceso a partir de LabVIEW.
- e) Medida de la eficiencia del proyecto mediante la potencia consumida y generada entre las dos etapas para la posterior valoración del papel que puede representar en un futuro la utilización de energías renovables como fuente principal el hidrógeno.

Finalmente, como conclusiones generales del presente trabajo caben destacar las siguientes:

- a) La eficiencia energética obtenida del sistema ha sido más o menos la esperada desde un inicio, no superando así el 10% (entre un 6 y 8%, en todos los ensayos probados).
- b) Pese a parecer ser resultados relativamente bajos inclusive en comparación con dispositivos térmicos regidos por el ciclo de Carnot, al tener en cuenta que al haber estado trabajando con una maqueta a pequeña escala y construida de forma muy simple hace que dichos resultados sean suficientemente grandes como para tener en cuenta si este mismo estudio se hubiese llegado a realizar con un dispositivo más complejo en el que además pudiese ser cogenerativo.



Factor el cual permitiría de forma indudable una eficiencia que rondase el 70% o superior.

- c) Obviamente el supuesto bajo rendimiento del sistema es debido a factores como; Pérdidas por activación producidas por el deterioro de los electrodos en ambas etapas, provocando una mayor lentitud en las reacciones electroquímicas. Pérdidas óhmicas provocadas por la resistencia del electrolito al flujo de los iones y pérdidas por concentración del combustible. Por otro lado, en lo que respecta al diseño de la etapa de descarga, para llevar a cabo la formación de energía eléctrica, es necesario tener como combustible hidrógeno y oxígeno en estado gaseoso lo más puro posible, sin embargo el compresor existente en dicha etapa no se encarga de filtrar el oxígeno del aire sino que lo emplea todo como combustible. Teniendo en consideración que el aire suele estar compuesto por un 78% nitrógeno, 21 % oxígeno y otras sustancias como hidrógeno, dióxido de carbono etc. 1% hace todavía más justificable el descenso del rendimiento del proceso.
- d) En definitiva, el hidrógeno como recurso energético resulta a mí parecer ser una fuente energética renovable la cual además de no generar ningún tipo de emisión de gas contaminante, permite obtener un rendimiento energético elevado prácticamente de la nada. Pues como se ha podido observar durante el proyecto, simplemente con apenas 10 ml de agua destilada ha permitido poner en funcionamiento una pequeña maqueta de coche durante un tiempo promedio de 3 minutos. Por ello creo, que en un futuro se llevaran a cabo serias investigaciones que harán del hidrógeno el precursor de las fuentes de energías renovables a nivel mundial.



ANEXO

CÓDIGOS DESARROLLADOS PARA LA CORRECTA OBTENCIÓN Y VISUALIZACIÓN DE DATOS EN ARDUINO

TEST DE FUNCIONAMIENTO DE LA PLACA ARDUINO UNO WIFI

```

/*
-----
Parpadeo del LED 13 / Funcionamiento Placa ARDUINO UNO WIFI
-----
*/

int LED = 13; // LED pin 13

void setup() {

  pinMode(LED,OUTPUT); // pin 13 LED declarado como salida
}

void loop() {

  digitalWrite(LED,HIGH); //Led=on
  delay(3000); // tiempo de espera de medio segundo
  digitalWrite(LED,LOW); // Led=off
  delay(3000);
}
//-----

```

CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES ACS712-5A

```

/*
-----
Corriente sensor 1 sin promedio
-----
*/

float Sensibilidad=0.185; //sensibilidad en Voltios/Amperio para sensor de 5A
float Offset_1 = -0.063;
void setup() {

```



```

Serial.begin(9600);
}

void loop() {

    float voltajeSensor= analogRead(A0)*(4.937 / 1023.0); //lectura del sensor
    float I=(voltajeSensor-2.475)/Sensibilidad; //Ecuación para obtener la corriente
    float I_2=(I-Offset_1);
    Serial.print("Corriente: ");
    Serial.println(I_2,4);
    delay(200);
}

//-----

/*
-----
Corriente sensor 2 sin promedio
-----
*/

float Sensibilidad=0.185; //sensibilidad en Voltios/Amperio para sensor de 5A

void setup() {

    Serial.begin(9600);
}

void loop() {

    float voltajeSensor= analogRead(A1)*(4.9377 / 1023.0); //lectura del sensor
    float I=(voltajeSensor-2.5)/Sensibilidad; //Ecuación para obtener la corriente
    Serial.print("Corriente: ");
    Serial.println(I,4);
    delay(200);
}

//-----

/*
-----
Corriente sensor 1 con promedio
-----

```



```

*/

float Sensibilidad=0.185; //sensibilidad en Voltios/Amperio para sensor de 5A
float Offset_1 = 0.008;
void setup() {

    Serial.begin(9600);
}

void loop() {

    float I=get_corriente(800); // corriente promedio de 800 muestras
    float I_milis=I*1000;
    Serial.print("Corriente: ");
    Serial.print(I_milis,4);
    Serial.println("mA");
    delay(100);
}

float get_corriente(int n_muestras)
{
    float voltajeSensor;
    float corriente=0;
    for(int i=0;i<n_muestras;i++)
    {
        voltajeSensor = analogRead(A0) * (4.937 / 1023.0);////lectura del sensor
        corriente+=(voltajeSensor-2.475)/Sensibilidad; //Ecuación para obtener la corriente
    }
    corriente=corriente/n_muestras;
    return(corriente);
}
//-----

/*
-----
Corriente sensor 2 con promedio
-----

*/
float Sensibilidad=0.185; //sensibilidad en Voltios/Amperio para sensor de 5A
float Offset_2 = -0.111;
void setup() {

    Serial.begin(9600);
}

```



```
void loop() {

    float I=get_corriente(800); // corriente promedio de 800 muestras
    float I_milis=I*1000;
    Serial.print("Corriente: ");
    Serial.print(I_milis,4);
    Serial.println("mA");
    delay(100);
}

float get_corriente(int n_muestras)
{
    float voltajeSensor;
    float corriente=0;
    for(int i=0;i<n_muestras;i++)
    {
        voltajeSensor = analogRead(A1) * (4.937 / 1023.0);////lectura del sensor
        corriente+=(voltajeSensor-2.475)/Sensibilidad; //Ecuación para obtener la corriente
    }
    corriente=corriente/n_muestras;
    return(corriente);
}
//-----
```

COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO DEL SISTEMA

```
/*
-----
Fases carga y descarga para la adquisición de datos
-----
*/
#include <math.h>

int fase[] = {0, 1, 2};
int led_rojo = 13; // pin donde se encuentra el led rojo
int led_blanco = 12;
int interruptor1 = 2; // " " interruptor 1
```



```

int interruptor2 = 3; // " " interruptor 2
float sensibilidad = 0.185; // sensibilidad ACS712-5A ( V/A )
float Resis_paralelo = 22.9;
float Offset_1_Bat_ON = -0.011;
float Offset_1_Bat_OFF = -0.038;
float Offset_2_Bat_ON = -0.20;
float Offset_2_Bat_OFF = -0.20;
void setup() {

    pinMode(interruptor1,INPUT); // Configurar el led como salida
    pinMode(interruptor2,INPUT); // Configurar el led como salida
    pinMode(led_blanco,OUTPUT); // Configurar el led como salida
    pinMode(led_rojo,OUTPUT); // Configurar el led como salida
    Serial.begin(9600); // Inicio comunicaci3n serial 9600 baudios

}

void loop() {

    int i = 0;
    switch (fase[i]){
        case 0: // FASE CARGA Y DESCARGA OFF.
            if ((digitalRead(interruptor1) == LOW) && (digitalRead(interruptor2) == LOW)){
                digitalWrite(led_rojo,LOW);
                digitalWrite(led_blanco,LOW);
                Serial.println("ETAPA DE NO ADQUIRIR");
            }
            fase[i] = 1;
            break;

        case 1: // FASE DE CARGA
            if (digitalRead(interruptor1) == HIGH){
                digitalWrite(led_rojo,HIGH);
                float I_carga = corriente_fcarga(800); // Corriente promedio de 800 muestras de
                la celda
                float I_carga_milis = I_carga * 1000; // Corriente en mA
                float Resis_int_celda = -163.2375*(pow(I_carga,3))+321.065*(pow(I_carga,2))-
                (227.98*I_carga)+67.33075; //Ecuaci3n de la recta para la Resistencia
                float Voltaje_celda = I_carga*Resis_int_celda; // Voltaje de la celda
                float Potencia_celda = Voltaje_celda*I_carga;
                Serial.println("Datos Experimentales de la Celda");
                Serial.print("Intensidad: ");
                Serial.print(I_carga_milis,3);
            }
    }
}
    
```




```

    Serial.print("mA, Voltaje: ");
    Serial.print(Voltaje_celda,3);
    Serial.print("V, Resistencia: ");
    Serial.print(Resis_int_celda,3);
    Serial.print("Ohms, Potencia: ");
    Serial.print(Potencia_celda,3);
    Serial.println("W");

  }
  digitalWrite(led_rojo,LOW);
  fase[i] = 2;
  break;

case 2: // FASE DE DESCARGA
  if (digitalRead(interruptor2) == HIGH){
    digitalWrite(led_blanco,HIGH);
    float I_descarga = corriente_fdescarga(800); // Corriente promedio de 800
muestras del motor
    float I_descarga_milis = I_descarga * 1000; // Corriente en mA
    float Voltaje_coche = I_descarga*Resis_paralelo; // Voltaje coche
    float Potencia_coche = Voltaje_coche*I_descarga;
    Serial.println("Datos Experimentales del vehículo");
    Serial.print("Intensidad: ");
    Serial.print(I_descarga_milis,3);
    Serial.print("mA, Voltaje: ");
    Serial.print(Voltaje_coche,3);
    Serial.print("V, Potencia: ");
    Serial.print(Potencia_coche,3);
    Serial.println("W");

  }
  digitalWrite(led_blanco,LOW);
  fase[i] = 0;
  break;
}
}

// Lectura sensor fase de carga y conversión a intensidad

float corriente_fcarga(int num_muestras1)
{
  float Voltaje_sensor1;
  float Intensidad = 0; // Considero el primer valor como 0

```



```

for (int i=0; i<num_muestras1; i++)
{
    Voltaje_sensor1 = analogRead(A0)*(4.937/1023.0); // Lectura del sensor 1
    Intensidad += (Voltaje_sensor1 - 2.475)/sensibilidad; // Ecuación para la
    intensidad de la pila de combustible
}
Intensidad = Intensidad/num_muestras1; // Promedio de las muestras de la
intensidad
return(Intensidad-Offset_1_Bat_ON);

}
// Lectura sensor fase de descarga y conversión a intensidad

float corriente_fdescarga(int num_muestras2)
{
    float Voltaje_sensor2;
    float Intensidad2 = 0; // Considero el primer valor como 0

    for (int i=0; i<num_muestras2; i++)
    {
        Voltaje_sensor2 = analogRead(A1)*(4.937/1023.0); // Lectura del sensor 2
        Intensidad2 += (Voltaje_sensor2 - 2.475)/sensibilidad; // Ecuación para la
        intensidad de la pila de combustible
    }
    Intensidad2 = Intensidad2/num_muestras2; // Promedio de las muestras de la
    intensidad
    return(Intensidad2-Offset_2_Bat_ON);

}

//-----
    
```

COMUNICACIÓN VIA SERIAL ARDUINO/ LABVIEW

```

/*****
**
** LVFA_Firmware - Provides Basic Arduino Sketch For Interfacing With LabVIEW.
**
** Written By: Sam Kristoff - National Instruments
** Written On: November 2010
    
```



```

** Last Updated: Dec 2011 - Kevin Fort - National Instruments
**
** This File May Be Modified And Re-Distributed Freely. Original File Content
** Written By Sam Kristoff And Available At www.ni.com/arduino.
**

*****/

/*****
**
** Includes.
**

*****/

// Standard includes. These should always be included.
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <Servo.h>
#include "LabVIEWInterface.h"

/*****
** setup()
**
** Initialize the Arduino and setup serial communication.
**
** Input: None
** Output: None

*****/

void setup()
{
    // Initialize Serial Port With The Default Baud Rate
    syncLV();

    // Place your custom setup code here

}

/*****
** loop()
**
** The main loop. This loop runs continuously on the Arduino. It
** receives and processes serial commands from LabVIEW.

```

**

** *Input: None*

** *Output: None*

*****/

```
void loop()
```

```
{
```

```
  // Check for commands from LabVIEW and process them.
```

```
  checkForCommand();
```

```
  // Place your custom loop code here (this may slow down communication with  
  LabVIEW)
```

```
  if(acqMode==1)
```

```
  {
```

```
    sampleContinuously();
```

```
  }
```

```
}
```



TABLAS DE DATOS

DATOS EXPERIMENTALES DE LOS 5 ENSAYOS PRINCIPALES

	FASE 1. ETAPA DE CARGA							FASE 2. ETAPA DE DESCARGA				
	Volumen H2 (cm ³)	Volumen H2 (m ³)	Tensión inicial (V)	Tensión final (V)	Intensidad inicial (mA)	Intensidad final (mA)	Tiempo (s)	Tensión inicial (V)	Tensión final (V)	Intensidad inicial (mA)	Intensidad final (mA)	Tiempo (s)
<u>n1</u>	11	1,10E-05	7,09	5,52	263	822	162	1,05	0	49	0	350
<u>n2</u>	12	1,20E-05	6,93	5,17	356	830	150	1,15	0	50	0	379
<u>n3</u>	10,5	1,05E-05	7,07	3,94	328	847	152	1,08	0	48	0	364
<u>n4</u>	11	1,10E-05	7,08	4,16	313	845	157	1,19	0	50	0	331
<u>n5</u>	10,5	1,05E-05	6,85	3,76	290	838	182	1,16	0	52	0	395



RESULTADOS DEL ESTUDIO TEÓRICO DEL SISTEMA

ETAPA 1. Etapa de carga $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$

Energía formación agua (kJ/mol)	Mn H2O (g/mol)	Mn H2 (g/mol)	Mn O2 (g/mol)	VH2O (m³/s)	Densidad H2O (kg/m³)	Masa H2O (kg)	Masa H2O (g)	moles H2O (mol)	Energía disociación (J)	Tiempo (s)	Potencia necesaria (kW)	Tensión (V)	Intensidad (A)	Intensidad (mA)	moles H2 (mol)	moles O2 (mol)	Masa H2 (g)	Masa H2 (kg)	Masa O2 (g)	Masa O2 (kg)	Densidad H2 (kg/m³)	Volumen H2 (m³/s)	Volumen H2 (cm³/s)	Densidad O2 (kg/m³)	Volumen O2 (m³/s)	Volumen O2 (cm³/s)	Flujo másico (kg/s) H2O	Flujo másico (kg/s) H2	Flujo másico (kg/s) O2
237,4	38	2,018	32	9,0478E-09	999	9,039E-06	0,00904	0,00050215	0,11921093	165	0,0007249	9	0,24083015	240,830152	0,00050215	0,00025108	0,001013343	1,01334E-06	0,008034435	8,03443E-06	0,08393829	1,20725E-05	12,0724706	1,33103339	6,03624E-05	6,03623829	2,248E-08	2,51562E-09	1,99644E-08

ETAPA 2. Etapa de descarga $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

Energía formación agua (kJ/mol)	Volumen H2 (cm³/s)	Volumen O2 (cm³/s)	Energía elec. Total (kJ)	Tiempo (s)	Potencia generada (kW)	Resis. motores (Ω)	Resis. parais. o (Ω)	Intensidad (A)	Intensidad (mA)	Tensión (V)	E. cinética (J)	E. rotación (J)	Velocidad (cm/s)	Fuerza (N)	F. Fricción (N)	Aceleración (m/s²)	Flujo másico (kg/s) H2O	Flujo másico (kg/s) H2	Flujo másico (kg/s) O2
237,4	12,0724766	6,03623829	0,11921093	360	0,00033114	45,8	22,9	0,12025109	120,251094	2,75375006	9,53871E-05	11,9209971	2,6630761	12,43	1,03621228	30,0771734	1,12247E-08	1,25609E-09	9,96863E-09



RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL SISTEMA

Etapa de Carga

PRUEBA 1			PRUEBA 2			PRUEBA 3			PRUEBA 4			PRUEBA 5		
Tensión (V)	Intensidad (mA)	tiempo (s)	Tensión (V)	Intensidad (mA)	tiempo (s)	Tensión (V)	Intensidad (mA)	tiempo (s)	Tensión (V)	Intensidad (mA)	tiempo (s)	Tensión (V)	Intensidad (mA)	tiempo (s)
7,09	263	0	6,93	396	0	7,06	297	0	7	303	0	6,98	271	0
7,07	273	0,17	6,91	415	0,15	7,04	297	1,01	6,99	310	0,95	6,97	290	0,05
7,06	282	0,68	6,89	426	0,27	7,03	312	1,2	6,98	313	1,04	6,96	317	0,99
7,05	293	1,09	6,85	437	1,11	7,01	327	1,98	6,97	317	1,15	6,94	346	1,95
7,03	305	1,3	6,84	448	1,22	6,98	343	2,08	6,93	350	2	6,82	357	2,1
7,02	315	2,04	6,82	456	1,88	6,96	359	2,19	6,9	362	2,09	6,78	377	2,99
7,01	328	2,15	6,81	467	2,03	6,95	366	3,02	6,89	367	2,98	6,76	389	3,12
7	327	2,29	6,8	477	2,15	6,94	378	3,12	6,87	382	3,06	6,71	399	4,01
6,99	331	3,13	6,78	480	2,22	6,92	392	3,94	6,86	399	3,31	6,64	413	4,12
6,96	348	4,03	6,76	501	3,13	6,9	401	4,08	6,85	418	4,12	6,63	424	4,9
6,95	353	4,19	6,74	510	3,94	6,89	425	4,19	6,81	428	4,46	6,57	437	5,01
6,94	360	5,08	6,73	520	4,04	6,85	440	5,02	6,76	435	4,97	6,53	446	5,88
6,93	367	5,17	6,71	530	4,12	6,84	451	5,15	6,75	448	5,05	6,52	455	5,91
6,92	375	5,22	6,7	535	4,24	6,81	463	5,98	6,73	458	5,19	6,51	463	6,11
6,915	380	5,66	6,69	546	5,08	6,79	476	6,14	6,71	471	6,04	6,5	472	6,89
6,91	386	6,19	6,67	557	5,21	6,78	481	7,01	6,7	481	6,17	6,48	481	7,03
6,9	394	6,63	6,65	567	6,04	6,76	497	7,09	6,69	485	7,01	6,485	489	7,13
6,89	402	7,13	6,63	580	6,14	6,74	502	7,94	6,68	497	7,07	6,47	494	7,98
6,88	408	7,23	6,59	591	6,77	6,72	521	8,1	6,66	507	7,31	6,46	506	8,96
6,86	416	7,85	6,57	596	7,14	6,7	531	8,18	6,65	511	7,89	6,455	517	9,06
6,85	422	8,16	6,54	610	7,21	6,69	538	8,22	6,62	520	8	6,44	526	9,1
6,84	433	8,28	6,53	619	8,02	6,67	555	9,18	6,61	526	8,12	6,435	546	10,03
6,81	443	9,17	6,51	627	8,19	6,64	581	9,99	6,58	545	8,98	6,425	555	10,88
6,8	449	9,67	6,49	636	8,96	6,58	606	10,11	6,56	551	9,21	6,42	564	11
6,79	458	10,02	6,48	643	9,13	6,56	615	10,21	6,54	562	9,96	6,37	582	11,87
6,785	463	10,2	6,46	647	9,25	6,52	625	11,07	6,52	580	10,06	6,33	613	12,87
6,78	469	11,1	6,45	654	10,02	6,49	639	11,78	6,49	592	10,19	6,3	623	13,92
6,77	474	11,13	6,41	662	10,21	6,47	648	12	6,46	609	10,99	6,27	633	14,06
6,76	482	11,25	6,4	670	10,29	6,45	658	12,15	6,45	610	11,05	6,23	647	14,98
6,74	484	12,17	6,39	678	11,08	6,41	676	13,04	6,43	621	11,2	6,17	653	16,02
6,73	499	12,27	6,37	687	11,2	6,38	685	13,14	6,41	630	12,04	6,02	699	18,9
6,72	508	13,28	6,32	696	12,05	6,36	695	13,98	6,39	638	12,13	5,96	705	19,35
6,71	514	14,04	6,29	704	12,16	6,31	702	14,1	6,37	650	12,96	5,88	723	20,89
6,7	520	14,15	6,27	712	12,27	6,3	709	14,96	6,34	658	13,13	5,86	731	21,01
6,68	525	15	6,25	715	13,14	6,28	717	15,07	6,32	665	13,31	5,84	739	21,95
6,67	530	15,11	6,23	723	13,27	6,22	732	16,04	6,28	669	13,86	5,75	755	22,94
6,66	540	15,24	6,19	728	14,03	6,18	743	16,16	6,26	690	14,13	5,69	765	23,91
6,65	547	16,12	6,18	736	14,11	6,13	755	17,07	6,22	698	15	5,67	771	23,96
6,63	560	17,02	6,16	741	14,38	6,11	761	17,2	6,21	706	15,1	5,64	775	24,13
6,61	568	17,96	6,12	750	15,01	6,04	768	18,07	6,16	715	15,97	5,61	782	25,03
6,59	574	19,02	6,09	756	15,2	6,02	777	18,56	6,13	724	16,06	5,57	790	25,94
6,58	578	19,15	6,08	760	16	6	782	18,93	6,1	735	16,2	5,55	799	26,88
6,57	583	19,8	6,06	763	16,14	5,9	785	19,93	6,07	742	17,02	5,51	798	27,11
6,56	587	20,1	6,01	769	17	5,89	800	20,1	6,04	749	17,15	5,45	809	28,08
6,55	590	20,26	5,99	775	17,12	5,84	804	20,95	6,01	756	17,39	5,4	809	29,07
6,54	597	21,13	5,96	779	17,28	5,79	810	21,1	5,95	764	18,12	5,33	814	30,06
6,53	602	22,03	5,94	783	17,91	5,75	814	22,04	5,94	769	18,32	5,31	815	30,88
6,52	606	22,13	5,9	790	18,17	5,73	817	22,19	5,9	774	19	5,26	817	31,89
6,5	615	23,08	5,89	792	19,05	5,69	820	23,06	5,86	784	19,98	5,22	819	32,1
6,49	620	23,16	5,85	797	19,23	5,63	822	23,96	5,82	790	20,07	5,16	821	33,06
6,48	626	23,25	5,8	800	20	5,61	823	24,11	5,79	795	20,23	5,13	822	33,99
6,47	630	24,08	5,79	804	20,18	5,585	824	24,95	5,77	798	21,03	5,09	825	36,93
6,45	634	24,22	5,76	807	21,1	5,53	825	25,11	5,72	803	21,18	4,92	826	38,1
6,43	642	25,21	5,72	809	21,25	5,48	827	26,03	5,7	808	21,95	4,85	828	40,02
6,41	651	26,1	5,68	811	21,79	5,43	829	26,94	5,67	812	22,11	4,77	830	41,96
6,4	654	26,28	5,66	813	22,18	5,41	830	27,11	5,62	815	22,94	4,53	831	49,99
6,39	660	27,09	5,64	815	23,18	5,27	832	28,13	5,58	818	23,02	4,42	832	55,91
6,37	666	27,26	5,59	817	24,05	5,25	833	29,95	5,53	822	23,21	4,36	833	60,12
6,36	669	28,12	5,53	819	24,23	5,11	834	33	5,48	826	24,97	4,34	835	62,09
6,35	674	29,15	5,51	820	25,12	5,06	835	34,09	5,37	828	26,01	4,27	837	70,05
6,34	676	30,03	5,47	821	25,28	5,02	836	35,12	5,32	829	26,22	4,25	838	74,95
6,33	679	30,23	5,45	822	26,14	4,88	837	39,06	5,28	831	27,12	4,15	839	86,9
6,32	684	31,16	5,42	823	27,05	4,82	838	41,13	5,22	833	28,16	4,17	838	92,92
6,31	688	32,06	5,36	824	28,11	4,72	839	45,94	5,17	832	29,09	4,04	839	104,03



6.29	630	32.28	5.3	809	30.11	4.68	840	48.97	5.11	893	30.18	3.94	840	121.0
6.28	635	36.17	5.27	806	33.1	4.54	841	58.26	5.04	895	32.96	3.97	838	129.9
6.26	701	36.13	5.17	807	34.11	4.5	841	61.13	4.96	896	35.11	3.97	840	134.11
6.25	706	36.34	5.12	806	36.28	4.48	842	63.17	4.91	898	36.22	3.89	841	144.06
6.24	708	35.01	5.11	807	38.01	4.43	848	70.01	4.93	897	38.1	3.9	839	157.05
6.23	712	35.88	5.09	802	39.01	4.48	840	73.05	4.78	898	44.01	3.85	840	159.09
6.22	715	36.01	5.13	804	40.16	4.38	841	76.09	4.77	899	44.19	3.86	838	164.98
6.1	720	36.28	5.26	809	41.09	4.3	842	87.09	4.65	899	52.14	3.75	837	185.9
6.19	723	37.01	4.75	802	46.08	4.38	841	91.1	4.48	901	54.26			
6.18	725	37.23	4.66	803	48.12	4.24	848	97.96	4.48	902	57.3			
6.16	730	36.34	4.64	802	52.25	4.16	845	109.12	4.42	901	60.28			
6.15	734	36.07	4.66	804	56.04	4.15	840	110.17	4.98	898	82.01			
6.14	735	36.37	4.57	804	59.24	4.13	845	116.15	5.03	894	84			
6.13	737	40.01	4.5	803	61.01	4.12	841	118.09	4.96	898	85.08			
6.11	741	40.23	4.48	804	63.13	4.11	841	123.09	4.89	899	87.14			
6.10	747	41.1	4.47	805	64.11	4.1	845	129.13	5.04	898	88.28			
6.08	749	41	4.45	806	65.23	4.09	848	130.97	4.36	902	100.18			
6.07	750	41.17	4.44	805	66.21	4.08	841	132.08	4.3	903	101.14			
6.06	753	44.01	4.43	807	67.24	4.1	840	135.1	4.29	901	102.1			
6.05	755	44.28	4.45	805	70.04	4.07	848	136.1	4.27	905	108.15			
6.04	757	45.1	4.38	805	75.23	4.07	842	138.2	4.25	901	111.26			
6.03	759	45.01	4.34	802	78.14	4.06	848	140.2	4.28	903	115.05			
6.02	762	47.19	4.35	804	79.1	4.05	846	146.19	4.25	906	120.01			
6	765	46.23	4.33	805	80.22	4.04	845	149.09	4.27	901	130.1			
5.99	767	46.38	4.48	804	91.26	4.01	846	155.38	4.26	901	133.12			
5.98	768	50.01	4.5	803	94.04	3.99	847	158.04	4.25	901	144.29			
5.97	771	51.01	4.52	804	95.11	4.02	846	172.95	4.38	905	159.12			
5.96	773	51.23	4.41	803	103.23									
5.94	775	52.23	4.48	804	106.03									
5.93	778	53.31	4.47	803	107									
5.92	782	54.01	4.49	804	108.13									
5.91	785	54.34	4.53	803	110									
5.9	784	55.34	4.47	808	111.27									
5.89	786	56.01	4.52	803	112.17									
5.87	790	58.13	4.49	806	115.16									
5.84	791	60.15	4.5	807	117.25									
5.83	794	61.28	4.51	804	123.24									
5.82	796	64.01	4.48	806	125.1									
5.81	798	66.01	5	800	126.11									
5.8	800	67.07	5.11	808	127.09									
5.79	801	68.07	5.06	809	128.18									
5.78	803	70.07	4.91	801	129.11									
5.75	806	72.13	5.09	808	143.17									
5.73	807	75.17	5.12	807	149.03									
5.72	810	76.26												
5.68	814	81												
5.65	815	82.01												
5.64	816	83.11												
5.63	818	85.01												
5.62	819	86.23												
5.61	818	91.04												
5.6	818	93.11												
5.59	818	95.07												
5.6	817	98.19												
5.59	818	100.01												
5.58	819	103.01												
5.57	820	106.25												
5.565	821	110.01												
5.56	820	113.01												
5.54	823	115.04												
5.53	820	119.11												
5.52	823	122.38												
5.51	823	126.04												
5.5	826	128.23												
5.52	824	131												
5.51	820	135.34												
5.50	820	138.01												
5.52	821	142.23												
5.51	820	144												
5.52	820	148.01												
5.54	820	149.26												
5.6	820	160.07												



4,3401	9,11594203	4,3725	6,42424242	3,9144	5,54761905	4,25663	6,13445378	3,3264	4,71428571
4,3646	9,03597122	4,35302	6,38014528	3,81814	5,39833532	4,2084	6,03592814	3,28496	4,6778043
4,38826	8,93009986	4,27559	6,25151149	3,7845	5,35077289	4,14656	5,93301435	3,2844	4,6547619
4,4125	8,85269122	4,22912	6,19854722	3,78058	5,33254157	4,11458	5,85918854	3,27149	4,6254459
4,41792	8,81355932	4,22597	6,1789601	3,73449	5,25504152	4,12641	5,89008363	3,2721	4,64839094
4,43576	8,75	4,18398	6,19221411	3,7632	5,33333333	4,01402	5,71599045	3,234	4,58333333
4,4473	8,6993007	4,22712	6,22572816	3,66676	5,1843044	4,00203	5,68533969	3,23468	4,60620525
4,464	8,61111111	4,34476	6,36803874	3,6206	5,10688836	3,90135	5,54231228	3,13875	4,48028674
4,47537	8,5615491	3,952	5,70913462	3,64153	5,14863258	3,76768	5,32699168		
4,4805	8,52413793	3,88178	5,5942377	3,57856	5,02369668	3,73006	5,26128266		
4,4968	8,43835616	3,86048	5,57692308	3,5152	4,92307692	3,71722	5,25564804		
4,5141	8,37874659	3,88644	5,58752998	3,4943	4,92874109	4,17324	5,94272076		
4,5129	8,3537415	3,81138	5,47961631	3,48159	4,89916963	4,19502	6,03117506		
4,51781	8,31750339	3,7485	5,40216086	3,49416	4,90521327	4,15648	5,91885442		
4,52751	8,24561404	3,73632	5,37170264	3,46884	4,86966825	4,09432	5,81644815		
4,54923	8,15261044	3,73245	5,35329341	3,4645	4,85207101	4,22352	6,01431981		
4,55392	8,11748999	3,7202	5,32296651	3,44787	4,85172005	3,67112	5,17814727		
4,5525	8,09333333	3,7074	5,31736527	3,44352	4,83412322	3,6249	5,10083037		
4,56318	8,04780876	3,70791	5,29271207	3,4522	4,86935867	3,62076	5,08293839		
4,56775	8,01324503	3,7202	5,32296651	3,43101	4,82799526	3,60815	5,05325444		
4,57228	7,97886394	3,6573	5,24550898	3,42694	4,83372922	3,587	5,03554502		
4,57074	7,95514512	3,61088	5,21634615	3,42258	4,81613286	3,60804	5,07710558		
4,57962	7,88713911	3,6279	5,21582734	3,4263	4,78723404	3,5955	5,02364066		
4,59	7,84313725	3,61555	5,18562874	3,4138	4,78106509	3,60388	5,05924171		
4,59433	7,80964798	3,74466	5,38369305	3,39246	4,73995272	3,65452	5,13033175		
4,59264	7,78645833	3,7485	5,40216086	3,37953	4,7107438	3,59544	5,04739336		
4,60287	7,74319066	3,76968	5,41966427	3,40092	4,75177305	3,5321	4,94674556		
4,60708	7,71021992	3,67353	5,29411765						
4,60944	7,65463918	3,74466	5,38369305						
4,61947	7,61232349	3,72351	5,36614646						
4,62944	7,57033248	3,74466	5,38369305						
4,62753	7,54789272	3,77349	5,43817527						
4,6256	7,5255102	3,75033	5,32777116						
4,62954	7,49363868	3,76516	5,42617047						
4,6373	7,43037975	3,75364	5,3708134						
4,62528	7,37373737	3,7665	5,37634409						
4,62902	7,34256927	3,76134	5,40767386						
4,63272	7,31155779	3,74528	5,35885167						
4,63638	7,28070175	4,15	6,02409639						
4,64	7,25	4,23108	6,17149758						
4,63779	7,22846442	4,19474	6,10373945						
4,64134	7,19800747	4,08021	5,90854392						
4,6345	7,13399504	4,21452	6,147343						
4,62411	7,10037175	4,23424	6,191052						
4,6251	7,04938272								
4,60724	6,95331695								
4,60475	6,93251534								
4,60224	6,91176471								
4,58898	6,85819071								
4,57821	6,82539683								
4,56444	6,82151589								
4,57262	6,83374083								
4,57262	6,83374083								
4,5752	6,85434517								
4,57262	6,83374083								
4,57002	6,81318681								
4,5674	6,79268293								
4,568865	6,77831912								
4,57032	6,76399027								
4,55942	6,73147023								
4,54566	6,72749392								
4,54296	6,70716889								
4,53473	6,69501823								
4,543	6,65859564								
4,54848	6,69902913								
4,54566	6,72749392								
4,52922	6,70316302								
4,53192	6,72350792								
4,5346	6,74390244								
4,53744	6,71532847								
4,54834	6,74786845								
4,6032	6,81265207								



131,655975	24,84075	1,29E-04	6,44E-05	1,29E-04	2,32E-03	2,06E-03	2,60E-04	0,00231907	1,54717534	3,09427987	7,70088E-08	6,839112E-08	8,61762E-09
144,520284	27,4232	1,42E-04	7,10E-05	1,42E-04	2,56E-03	2,27E-03	2,87E-04	0,00256016	1,70802003	3,41596191	7,71021E-08	6,84741E-08	8,62807E-09
145,840375	28,20897	1,46E-04	7,31E-05	1,46E-04	2,63E-03	2,34E-03	2,95E-04	0,00263352	1,73696075	3,51384109	7,71953E-08	6,8557E-08	8,63851E-09
153,432474	29,96728	1,55E-04	7,76E-05	1,55E-04	2,79E-03	2,48E-03	3,13E-04	0,00279767	1,86647491	3,7328644	7,71021E-08	6,84741E-08	8,62807E-09
160,62912	31,43427	1,63E-04	8,14E-05	1,63E-04	2,93E-03	2,61E-03	3,29E-04	0,00293463	1,95784456	3,91559953	7,71953E-08	6,8557E-08	8,63851E-09
163,2589	32,07444	1,66E-04	8,31E-05	1,66E-04	2,99E-03	2,66E-03	3,35E-04	0,00299439	1,99771676	3,99534209	7,67288E-08	6,81425E-08	8,58628E-09
169,761139	33,09284	1,71E-04	8,57E-05	1,71E-04	3,09E-03	2,74E-03	3,46E-04	0,00308937	2,06108425	4,12207419	7,69155E-08	6,83083E-08	8,60717E-09
178,482741	33,93208	1,76E-04	8,79E-05	1,76E-04	3,16E-03	2,81E-03	3,55E-04	0,00316782	2,11341756	4,22673841	7,71021E-08	6,84741E-08	8,62807E-09
182,10816	38,33856	1,99E-04	9,93E-05	1,99E-04	3,58E-03	3,18E-03	4,01E-04	0,0035792	2,38786971	4,77563014	7,76622E-08	6,89715E-08	8,69074E-09
190,673034	40,91896	2,12E-04	1,06E-04	2,12E-04	3,82E-03	3,39E-03	4,28E-04	0,00381991	2,54946216	5,09680769	7,7556E-08	6,90544E-08	8,70118E-09
201,71008	43,472	2,25E-04	1,13E-04	2,25E-04	4,05E-03	3,60E-03	4,55E-04	0,00405844	2,70759966	5,41507541	7,76622E-08	6,89715E-08	8,69074E-09
217,796098	46,73786	2,42E-04	1,21E-04	2,42E-04	4,36E-03	3,87E-03	4,89E-04	0,00436329	2,91097856	5,82182391	7,78489E-08	6,91373E-08	8,71163E-09
225,786151	49,40616	2,56E-04	1,28E-04	2,56E-04	4,61E-03	4,10E-03	5,17E-04	0,00461244	3,07720146	6,1542621	7,78489E-08	6,91373E-08	8,71163E-09
228,73347	50,82966	2,63E-04	1,32E-04	2,63E-04	4,74E-03	4,21E-03	5,31E-04	0,00474534	3,1658624	6,33157991	7,7556E-08	6,90544E-08	8,70118E-09
235,836518	52,64208	2,73E-04	1,36E-04	2,73E-04	4,91E-03	4,36E-03	5,50E-04	0,00491454	3,27874673	6,55734342	7,78489E-08	6,91373E-08	8,71163E-09
239,28737	53,53185	2,77E-04	1,39E-04	2,77E-04	4,99E-03	4,44E-03	5,60E-04	0,00499761	3,33416495	6,66817733	7,79422E-08	6,92202E-08	8,72208E-09
242,668646	54,53228	2,83E-04	1,41E-04	2,83E-04	5,09E-03	4,52E-03	5,70E-04	0,005091	3,39647549	6,79279556	7,80356E-08	6,93031E-08	8,73252E-09
245,504028	55,2937	2,86E-04	1,43E-04	2,86E-04	5,16E-03	4,58E-03	5,78E-04	0,00516209	3,4438996	6,88764159	7,79422E-08	6,92202E-08	8,72208E-09
249,319868	56,27988	2,92E-04	1,46E-04	2,92E-04	5,25E-03	4,67E-03	5,88E-04	0,00525415	3,5053226	7,01048478	7,81289E-08	6,9386E-08	8,74297E-09
260,562808	58,55344	3,03E-04	1,52E-04	3,03E-04	5,46E-03	4,85E-03	6,12E-04	0,00546641	3,64692846	7,29369004	7,80356E-08	6,93031E-08	8,73252E-09
275,138679	62,81705	3,25E-04	1,63E-04	3,25E-04	5,86E-03	5,21E-03	6,57E-04	0,00586445	3,91248213	7,82478522	7,79422E-08	6,92202E-08	8,72208E-09
282,154163	65,01248	3,37E-04	1,68E-04	3,37E-04	6,06E-03	5,39E-03	6,80E-04	0,00606941	4,04922177	8,09825823	7,76622E-08	6,89715E-08	8,69074E-09
287,32968	66,0528	3,42E-04	1,71E-04	3,42E-04	6,16E-03	5,48E-03	6,91E-04	0,00616653	4,11401681	8,22784535	7,78489E-08	6,91373E-08	8,71163E-09
290,039421	66,9837	3,47E-04	1,74E-04	3,47E-04	6,25E-03	5,55E-03	7,00E-04	0,00625344	4,17199676	8,34380261	7,79422E-08	6,92202E-08	8,72208E-09
341,737672	76,11084	3,94E-04	1,97E-04	3,94E-04	7,10E-03	6,31E-03	7,96E-04	0,00710553	4,74046937	9,4807218	7,78489E-08	6,91373E-08	8,71163E-09
352,50894	78,33532	4,06E-04	2,03E-04	4,06E-04	7,31E-03	6,49E-03	8,19E-04	0,0073132	4,87901835	9,75781342	7,7556E-08	6,90544E-08	8,70118E-09
358,534265	79,32174	4,11E-04	2,05E-04	4,11E-04	7,40E-03	6,58E-03	8,29E-04	0,00740529	4,9404563	9,88068651	7,78489E-08	6,91373E-08	8,71163E-09
379,218502	85,99059	4,46E-04	2,23E-04	4,46E-04	8,02E-03	7,13E-03	8,99E-04	0,00802788	5,35381736	10,7113896	7,7556E-08	6,90544E-08	8,70118E-09
397,0463	88,42902	4,58E-04	2,29E-04	4,58E-04	8,25E-03	7,33E-03	9,25E-04	0,00825552	5,50769195	11,0151319	7,78489E-08	6,91373E-08	8,71163E-09
398,41557	89,131	4,62E-04	2,31E-04	4,62E-04	8,31E-03	7,39E-03	9,32E-04	0,00832106	5,5514139	11,1025738	7,7556E-08	6,90544E-08	8,70118E-09
404,910086	90,18042	4,67E-04	2,34E-04	4,67E-04	8,41E-03	7,48E-03	9,43E-04	0,00841903	5,61677573	11,2332944	7,78489E-08	6,91373E-08	8,71163E-09
415,0839	91,68	4,75E-04	2,37E-04	4,75E-04	8,55E-03	7,60E-03	9,58E-04	0,00855436	5,70706102	11,4138609	7,7556E-08	6,90544E-08	8,70118E-09
417,299219	93,35553	4,84E-04	2,42E-04	4,84E-04	8,71E-03	7,74E-03	9,76E-04	0,00871545	5,81453352	11,628801	7,83156E-08	6,95518E-08	8,76386E-09
422,337997	93,43761	4,84E-04	2,42E-04	4,84E-04	8,71E-03	7,75E-03	9,77E-04	0,00872311	5,81964577	11,6390252	7,7556E-08	6,90544E-08	8,70118E-09
432,269182	96,27376	4,99E-04	2,49E-04	4,99E-04	8,98E-03	7,98E-03	1,01E-03	0,00898789	5,99629186	11,9923093	7,80356E-08	6,93031E-08	8,73252E-09



195,801568	41,9748	2.17E-04	1.09E-04	0.00021748	0.00391473	3.48E-03	0.00048889	0.00391267	2,61434841	5,22857719	7,8409E-08	6,96347E-08	8,7743E-09
222,139385	48,81938	2.54E-04	1.27E-04	0.00023332	0.00436336	4.06E-03	0.0005116	0.00436793	3,04730381	6,09487216	7,83023E-08	6,97176E-08	8,78473E-09
235,130985	52,25123	2.71E-04	1.35E-04	0.00027073	0.00487318	4.33E-03	0.00054634	0.00487806	3,25440933	6,50866977	7,83023E-08	6,97176E-08	8,78473E-09
238,819239	53,18914	2.78E-04	1.38E-04	0.00027329	0.00486063	4.41E-03	0.00055614	0.00486361	3,21281968	6,51548777	7,83959E-08	6,98003E-08	8,7932E-09
261,451645	59,01848	3.06E-04	1.53E-04	0.00030579	0.00530431	4.89E-03	0.00061709	0.00530982	3,67588979	7,35161136	7,8689E-08	6,98334E-08	8,80564E-09
274,90176	61,362	3.18E-04	1.59E-04	0.00031794	0.00572238	5.09E-03	0.0006416	0.00572661	3,62183614	7,64333739	7,8409E-08	6,98347E-08	8,7743E-09
289,417367	66,39013	3.44E-04	1.72E-04	0.00034394	0.00619039	5.50E-03	0.00069407	0.00619709	4,13440415	8,26861911	7,83023E-08	6,97176E-08	8,78473E-09
315,318034	73,32978	3.80E-04	1.90E-04	0.00037995	0.00683903	6.08E-03	0.00078673	0.00684639	4,38723449	9,13429998	7,83959E-08	6,98003E-08	8,7932E-09
332,107336	76,6992	3.97E-04	1.99E-04	0.00039741	0.00713329	6.38E-03	0.00080196	0.00713045	4,77711464	9,53401067	7,83023E-08	6,97176E-08	8,78473E-09
330,553738	82,67834	4.28E-04	2.14E-04	0.00042838	0.00771092	6.85E-03	0.00086448	0.00771864	5,14851174	10,2987878	7,87823E-08	6,99663E-08	8,81609E-09
383,578624	92,2064	4.78E-04	2.39E-04	0.00047775	0.00839956	7.64E-03	0.00096411	0.00839217	5,74296138	11,483566	7,88757E-08	7,00492E-08	8,82633E-09
384,967031	92,76314	4.81E-04	2.40E-04	0.00048094	0.00835148	7.69E-03	0.00096993	0.00836014	5,77637314	11,5350101	7,83959E-08	6,98003E-08	8,7932E-09
404,386679	97,91448	5.07E-04	2.54E-04	0.00050735	0.00913192	8.12E-03	0.00102379	0.00914106	6,0984802	12,1968813	7,8689E-08	6,98334E-08	8,80564E-09
415,580449	100,37892	5.20E-04	2.60E-04	0.00052009	0.00996138	8.32E-03	0.00104954	0.00997095	6,2318521	12,3034181	7,87823E-08	6,99663E-08	8,81609E-09
426,879516	103,88796	5.38E-04	2.69E-04	0.00053828	0.00989903	8.61E-03	0.00108623	0.00989673	6,47033287	12,9407896	7,87823E-08	6,99663E-08	8,81609E-09
447,370883	109,11483	5.63E-04	2.83E-04	0.00056336	0.01017631	9.05E-03	0.0011409	0.0101867	6,79608324	13,3918333	7,88757E-08	7,00492E-08	8,82633E-09
451,567534	110,40771	5.73E-04	2.88E-04	0.00057206	0.01029709	9.15E-03	0.00115442	0.0103074	6,87680742	13,7329002	7,8889E-08	6,98334E-08	8,80564E-09
454,847946	111,43332	5.77E-04	2.89E-04	0.00057737	0.01039274	9.24E-03	0.00116314	0.01040315	6,94048627	13,8806349	7,87823E-08	6,99663E-08	8,81609E-09
466,39212	113,7542	5.89E-04	2.95E-04	0.0005894	0.0106092	9.43E-03	0.00118941	0.01061882	7,08503941	14,1697346	7,83959E-08	6,98003E-08	8,7932E-09
466,960461	114,7323	5.94E-04	2.97E-04	0.00059447	0.01070042	9.51E-03	0.00119964	0.01071113	7,14869915	14,2915913	7,8689E-08	6,98334E-08	8,80564E-09
473,603108	116,3644	6.03E-04	3.01E-04	0.00060292	0.01085264	9.65E-03	0.0012167	0.0108635	7,24761248	14,4948933	7,83959E-08	6,98003E-08	8,7932E-09
490,113456	120,7176	6.23E-04	3.13E-04	0.00062548	0.01123884	1.00E-02	0.00126222	0.01128991	7,52874615	15,0371482	7,8689E-08	6,98334E-08	8,80564E-09
500,890797	123,87674	6.41E-04	3.20E-04	0.00064081	0.01133482	1.03E-02	0.00129316	0.01134616	7,70205232	15,4057323	7,8969E-08	7,01321E-08	8,83698E-09
508,963442	125,98105	6.53E-04	3.26E-04	0.00065275	0.01174933	1.04E-02	0.00131723	0.01176129	7,84837361	15,6927881	7,88757E-08	7,00492E-08	8,82633E-09
526,441943	131,28228	6.80E-04	3.40E-04	0.00068022	0.01234394	1.09E-02	0.00137268	0.0123562	8,17675415	16,3331341	7,8969E-08	7,01321E-08	8,83698E-09
534,100921	133,83888	6.94E-04	3.47E-04	0.00069337	0.01248434	1.11E-02	0.00139963	0.01249684	8,33729677	16,674212	7,90624E-08	7,0113E-08	8,84742E-09
588,189114	146,3157	7.58E-04	3.79E-04	0.00075811	0.01364602	1.21E-02	0.00152967	0.01365968	9,11309109	18,2157671	7,8969E-08	7,01321E-08	8,83698E-09



128,37996L	25,12328	1,30E-04	6,51E-05	1,30E-04	2,34E-03	2,08E-03	2,63E-04	0,00234545	1,56477237	3,12947313	7,77556E-08	6,90544E-08	8,70118E-09
138,708864	27,5216	1,43E-04	7,13E-05	1,43E-04	2,57E-03	2,28E-03	2,88E-04	0,00256935	1,71414876	3,42821907	7,79422E-08	6,92202E-08	8,72208E-09
145,585722	29,35196	1,52E-04	7,60E-05	1,52E-04	2,74E-03	2,43E-03	3,07E-04	0,00274023	1,82815046	3,65621726	7,80356E-08	6,93031E-08	8,73252E-09
149,03008E	30,35236	1,57E-04	7,86E-05	1,57E-04	2,83E-03	2,52E-03	3,17E-04	0,00283362	1,89045914	3,78083176	7,82223E-08	6,94689E-08	8,75341E-09
157,21622L	31,8897	1,65E-04	8,26E-05	1,65E-04	2,97E-03	2,64E-03	3,33E-04	0,00297715	1,98621045	3,97233001	7,81289E-08	6,9586E-08	8,74297E-09
176,65702	36,88038	1,91E-04	9,55E-05	1,91E-04	3,44E-03	3,06E-03	3,86E-04	0,00344306	2,29704877	4,59399243	7,82223E-08	6,94689E-08	8,75341E-09
176,84970E	37,07541	1,92E-04	9,61E-05	1,92E-04	3,46E-03	3,07E-03	3,88E-04	0,00346127	2,30919598	4,61828628	7,83156E-08	6,95518E-08	8,76386E-09
203,41638E	43,74546	2,27E-04	1,13E-04	2,27E-04	4,08E-03	3,63E-03	4,57E-04	0,00408397	2,72463178	5,44913887	7,83156E-08	6,95518E-08	8,76386E-09
204,434317	45,63266	2,36E-04	1,18E-04	2,36E-04	4,26E-03	3,78E-03	4,77E-04	0,00426015	2,84217369	5,68421732	7,85023E-08	6,97176E-08	8,78475E-09
213,35943E	48,1624	2,50E-04	1,25E-04	2,50E-04	4,49E-03	3,99E-03	5,04E-04	0,00449633	2,99973541	5,99933355	7,85956E-08	6,98005E-08	8,7952E-09
224,07402E	50,69548	2,63E-04	1,31E-04	2,63E-04	4,73E-03	4,20E-03	5,30E-04	0,00473281	3,15750516	6,31486583	7,85023E-08	6,97176E-08	8,78475E-09
342,24741E	68,72438	3,56E-04	1,78E-04	3,56E-04	6,41E-03	5,70E-03	7,19E-04	0,00641594	4,28041286	8,56062984	7,82223E-08	6,94689E-08	8,75341E-09
352,38168	70,056	3,63E-04	1,81E-04	3,63E-04	6,53E-03	5,81E-03	7,33E-04	0,00654026	4,36335116	8,72650265	7,78489E-08	6,91373E-08	8,71163E-09
353,63332E	71,29704	3,69E-04	1,85E-04	3,69E-04	6,65E-03	5,91E-03	7,45E-04	0,00665612	4,4406478	8,88109239	7,82223E-08	6,94689E-08	8,75341E-09
356,77904E	73,11046	3,79E-04	1,89E-04	3,79E-04	6,82E-03	6,06E-03	7,64E-04	0,00682542	4,53359442	9,10898045	7,83156E-08	6,95518E-08	8,76386E-09
372,85234E	73,97864	3,83E-04	1,92E-04	3,83E-04	6,90E-03	6,13E-03	7,74E-04	0,00690647	4,60786793	9,21512501	7,82223E-08	6,94689E-08	8,75341E-09
387,77282E	84,35156	4,37E-04	2,19E-04	4,37E-04	7,87E-03	6,99E-03	8,82E-04	0,00787486	5,2537324	10,5072244	7,85956E-08	6,98005E-08	8,7952E-09
386,62238E	85,26102	4,42E-04	2,21E-04	4,42E-04	7,95E-03	7,07E-03	8,91E-04	0,00795976	5,31037699	10,620511	7,8689E-08	6,98834E-08	8,80564E-09
370,04167E	86,2568	4,47E-04	2,23E-04	4,47E-04	8,04E-03	7,15E-03	9,02E-04	0,00805273	5,37239792	10,74455	7,87823E-08	6,99663E-08	8,81609E-09
390,22142E	91,38675	4,74E-04	2,37E-04	4,74E-04	8,52E-03	7,58E-03	9,56E-04	0,00853165	5,6919105	11,3835905	7,88757E-08	7,00492E-08	8,82653E-09
399,08962	93,90344	4,87E-04	2,43E-04	4,87E-04	8,76E-03	7,78E-03	9,82E-04	0,0087666	5,84865941	11,6970512	7,87823E-08	6,99663E-08	8,81609E-09
415,10502E	96,98715	5,03E-04	2,51E-04	5,03E-04	9,05E-03	8,04E-03	1,01E-03	0,00905449	6,04072447	12,0811725	7,8689E-08	6,98834E-08	8,80564E-09
431,53191	101,53692	5,26E-04	2,63E-04	5,26E-04	9,47E-03	8,42E-03	1,06E-03	0,00947924	6,32410126	12,6479131	7,8969E-08	7,01321E-08	8,83698E-09
469,22517E	109,8888	5,69E-04	2,85E-04	5,69E-04	1,02E-02	9,11E-03	1,15E-03	0,01025896	6,84428776	13,6882623	7,87823E-08	6,99663E-08	8,81609E-09
486,48970E	112,35328	5,82E-04	2,91E-04	5,82E-04	1,05E-02	9,31E-03	1,17E-03	0,01048903	6,99778484	13,9952494	7,87823E-08	6,99663E-08	8,81609E-09
518,78603E	121,78076	6,31E-04	3,15E-04	6,31E-04	1,14E-02	1,01E-02	1,27E-03	0,01136916	7,58496375	15,1695804	7,87823E-08	6,99663E-08	8,81609E-09
562,02775E	134,4564	6,97E-04	3,48E-04	6,97E-04	1,25E-02	1,11E-02	1,41E-03	0,01255253	8,37445028	16,7485173	7,88757E-08	7,00492E-08	8,82653E-09



1,05	49	232,24	1,15	30	251,48	1,08	48	287,16	1,19	30	261,12	0	0	395,00
1,05	49	235,51	1,15	30	255,02	1,08	48	291,20	1,19	30	264,80			
1,05	49	238,78	1,15	30	258,57	1,08	48	295,24	1,19	30	268,48			
1,05	49	242,05	1,15	30	262,11	1,08	48	299,29	1,19	30	272,15			
1,05	49	245,33	1,15	30	265,65	1,08	48	303,33	1,19	30	275,83			
1,05	49	248,60	1,15	30	269,19	1,08	48	307,38	1,1	48	279,51			
1,05	49	251,87	1,15	30	272,73	1	43	311,42	1,04	40	283,19			
1,05	49	255,14	1,15	30	276,28	0,96	39	315,47	1	36	286,87			
1,05	49	258,41	1,15	30	279,82	0,92	37	319,51	0,99	37	290,54			
1,05	49	261,68	1,15	30	283,36	0,8	28	323,56	0,85	32	294,22			
1,05	49	264,95	1,15	30	286,90	0,76	24	327,60	0,7	26	297,90			
1,05	49	268,22	1,15	30	290,44	0,61	22	331,64	0,58	23	301,58			
1,05	49	271,49	1,15	30	293,99	0,5	19	335,69	0,59	23	305,25			
1,05	49	274,76	1,15	30	297,53	0,43	18	339,73	0,43	18	308,93			
1,05	49	278,04	1,1	30	301,07	0,36	14	343,78	0,36	16	312,61			
1,05	49	281,31	1,08	30	304,61	0,2	11	347,82	0,3	14	316,29			
1,05	49	284,58	1,08	30	308,15	0,14	9	351,87	0,25	12	319,97			
1,05	49	287,85	1,06	30	311,70	0,1	8	355,91	0,2	11	323,64			
1,05	49	291,12	1,1	30	315,24	0,06	7	359,96	0,12	7	327,32			
1,05	49	294,39	1,08	30	318,78	0	0	364,00	0	0	331,00			
1,05	49	297,66	0,98	49	322,32									
1	47	300,93	0,95	48	325,86									
1,01	48	304,20	0,9	48	329,41									
0,96	45	307,47	0,85	42	332,95									
0,88	44	310,75	0,8	43	336,49									
0,77	39	314,02	0,75	45	340,03									
0,74	36	317,29	0,73	40	343,57									
0,6	34	320,56	0,67	33	347,12									
0,52	30	323,83	0,59	28	350,66									
0,48	25	327,10	0,48	26	354,20									
0,36	19	330,37	0,46	28	357,74									
0,28	16	333,64	0,4	24	361,28									
0,2	13	336,91	0,36	19	364,83									
0,13	11	340,18	0,27	15	368,37									
0,09	8	343,46	0,21	13	371,91									
0	3	346,73	0	7	375,45									
0	0	350,00	0	0	378,99									



11,94879945	11,379809	5,8963E-05	2,9481E-05	5,8963E-05	1,06E-03	9,43E-04	1,29E-04	0,00106239	0,7087773	1,53131731
12,1170924	11,540088	5,9793E-05	2,9897E-05	5,9793E-05	1,08E-03	9,57E-04	1,30E-04	0,00107735	0,71876008	1,55288516
12,28538535	11,700367	6,0624E-05	3,0312E-05	6,0624E-05	1,09E-03	9,70E-04	1,32E-04	0,00109232	0,72874286	1,57445301
12,4536783	11,860646	6,1454E-05	3,0727E-05	6,1454E-05	1,11E-03	9,83E-04	1,34E-04	0,00110728	0,73872564	1,59602086
12,62197125	12,020925	6,2285E-05	3,1142E-05	6,2285E-05	1,12E-03	9,97E-04	1,36E-04	0,00112224	0,74870842	1,61758871
12,7902642	12,181204	6,3115E-05	3,1558E-05	6,3115E-05	1,14E-03	1,01E-03	1,38E-04	0,00113721	0,7586912	1,63915656
12,95855715	12,341483	6,3946E-05	3,1973E-05	6,3946E-05	1,15E-03	1,02E-03	1,39E-04	0,00115217	0,76867398	1,66072441
13,1268501	12,501762	6,4776E-05	3,2388E-05	6,4776E-05	1,17E-03	1,04E-03	1,41E-04	0,00116713	0,77865676	1,68229226
13,29514305	12,662041	6,5606E-05	3,2803E-05	6,5606E-05	1,18E-03	1,05E-03	1,43E-04	0,0011821	0,78863954	1,70386011
13,463436	12,82232	6,6437E-05	3,3218E-05	6,6437E-05	1,20E-03	1,06E-03	1,45E-04	0,00119706	0,79862231	1,72542796
13,63172895	12,982599	6,7267E-05	3,3634E-05	6,7267E-05	1,21E-03	1,08E-03	1,47E-04	0,00121202	0,80860509	1,74699581
13,8000219	13,142878	6,8098E-05	3,4049E-05	6,8098E-05	1,23E-03	1,09E-03	1,48E-04	0,00122699	0,81858787	1,76856366
13,96831485	13,303157	6,8928E-05	3,4464E-05	6,8928E-05	1,24E-03	1,10E-03	1,50E-04	0,00124195	0,82857065	1,79013151
14,1366078	13,463436	6,9759E-05	3,4879E-05	6,9759E-05	1,26E-03	1,12E-03	1,52E-04	0,00125691	0,83855343	1,81169936
14,30490075	13,623715	7,0589E-05	3,5295E-05	7,0589E-05	1,27E-03	1,13E-03	1,54E-04	0,00127188	0,84853621	1,83326721
14,4731937	13,783994	7,142E-05	3,571E-05	7,142E-05	1,29E-03	1,14E-03	1,56E-04	0,00128684	0,85851899	1,85483505
14,64148665	13,944273	7,225E-05	3,6125E-05	7,225E-05	1,30E-03	1,16E-03	1,58E-04	0,0013018	0,86850177	1,8764029
14,8097796	14,104552	7,3081E-05	3,654E-05	7,3081E-05	1,32E-03	1,17E-03	1,59E-04	0,00131677	0,87848455	1,89797075
14,97807255	14,264831	7,3911E-05	3,6956E-05	7,3911E-05	1,33E-03	1,18E-03	1,61E-04	0,00133173	0,88846732	1,9195386
15,1463655	14,42511	7,4742E-05	3,7371E-05	7,4742E-05	1,35E-03	1,20E-03	1,63E-04	0,00134669	0,8984501	1,94110645
15,31465845	14,585389	7,5572E-05	3,7786E-05	7,5572E-05	1,36E-03	1,21E-03	1,65E-04	0,00136166	0,90843288	1,9626743
14,143804	14,143804	7,3284E-05	3,6642E-05	7,3284E-05	1,32E-03	1,17E-03	1,60E-04	0,00132043	0,88092931	1,90325268
14,74776144	14,601744	7,5657E-05	3,7828E-05	7,5657E-05	1,36E-03	1,21E-03	1,65E-04	0,00136318	0,90945153	1,9648751
13,2828768	13,83633	7,1691E-05	3,5845E-05	7,1691E-05	1,29E-03	1,15E-03	1,56E-04	0,00129173	0,86177867	1,86187762
12,1687742	13,67278	7,0843E-05	3,5422E-05	7,0843E-05	1,28E-03	1,13E-03	1,54E-04	0,00127646	0,85159216	1,83986961
9,42990048	12,246624	6,3454E-05	3,1727E-05	6,3454E-05	1,14E-03	1,02E-03	1,38E-04	0,00114332	0,7627658	1,64795976
8,45252568	11,422332	5,9183E-05	2,9592E-05	5,9183E-05	1,07E-03	9,47E-04	1,29E-04	0,00106636	0,7114258	1,5370394
6,5393832	10,898972	5,6471E-05	2,8236E-05	5,6471E-05	1,02E-03	9,04E-04	1,23E-04	0,0010175	0,67882897	1,46661376
5,0517324	9,71487	5,0336E-05	2,5168E-05	5,0336E-05	9,06E-04	8,05E-04	1,10E-04	0,00090696	0,60507864	1,30727577
3,516325	8,1775	4,237E-05	2,1185E-05	4,237E-05	7,63E-04	6,78E-04	9,24E-05	0,00076343	0,50932546	1,10040048
2,25973764	6,277049	3,2524E-05	1,6262E-05	3,2524E-05	5,85E-04	5,20E-04	7,09E-05	0,00058601	0,39095822	0,84446741
1,49471616	5,338272	2,7659E-05	1,383E-05	2,7659E-05	4,98E-04	4,43E-04	6,03E-05	0,00049837	0,33246766	0,71834144
0,8759738	4,379869	2,2694E-05	1,1347E-05	2,2694E-05	4,08E-04	3,63E-04	4,95E-05	0,00040889	0,27279471	0,5893745
0,48646312	3,742024	1,9389E-05	9,6944E-06	1,9389E-05	3,49E-04	3,10E-04	4,23E-05	0,00034935	0,23306733	0,50354326
0,0824292	2,74764	1,4236E-05	7,1182E-06	1,4236E-05	2,56E-04	2,28E-04	3,10E-05	0,00025651	0,17113335	0,36973456
0	1,040178	5,3895E-06	2,6948E-06	5,3895E-06	9,70E-05	8,62E-05	1,17E-05	9,7109E-05	0,0647862	0,13997094
0	0	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0	0	0



4,57386E-09	4,06202E-09	5,11834E-10	0,00095609	1,19392386	0,84311668	6,10235819	5,09E-01	2,46E+01
4,57386E-09	4,06202E-09	5,11834E-10	0,00096955	1,21073969	0,84903337	6,05983252	5,05E-01	2,44E+01
4,57386E-09	4,06202E-09	5,11834E-10	0,00098302	1,22755552	0,8549091	6,0181837	5,02E-01	2,42E+01
4,57386E-09	4,06202E-09	5,11834E-10	0,00099649	1,24437134	0,86074472	5,97738198	4,98E-01	2,41E+01
4,57386E-09	4,06202E-09	5,11834E-10	0,00100995	1,26118717	0,86654105	5,93739904	4,95E-01	2,39E+01
4,57386E-09	4,06202E-09	5,11834E-10	0,00102342	1,278003	0,87229886	5,89820786	4,92E-01	2,38E+01
4,57386E-09	4,06202E-09	5,11834E-10	0,00103688	1,29481883	0,87801891	5,85978265	4,88E-01	2,36E+01
4,57386E-09	4,06202E-09	5,11834E-10	0,00105035	1,31163466	0,88370194	5,82209877	4,85E-01	2,34E+01
4,57386E-09	4,06202E-09	5,11834E-10	0,00106382	1,32845049	0,88934866	5,78513269	4,82E-01	2,33E+01
4,57386E-09	4,06202E-09	5,11834E-10	0,00107728	1,34526632	0,89495975	5,7488619	4,79E-01	2,32E+01
4,57386E-09	4,06202E-09	5,11834E-10	0,00109075	1,36208215	0,90053587	5,71326489	4,76E-01	2,30E+01
4,57386E-09	4,06202E-09	5,11834E-10	0,00110421	1,37889798	0,90607769	5,67832105	4,73E-01	2,29E+01
4,57386E-09	4,06202E-09	5,11834E-10	0,00111768	1,39571381	0,91158581	5,64401064	4,70E-01	2,27E+01
4,57386E-09	4,06202E-09	5,11834E-10	0,00113115	1,41252963	0,91706085	5,61031475	4,68E-01	2,26E+01
4,57386E-09	4,06202E-09	5,11834E-10	0,00114461	1,42934546	0,92250339	5,57721526	4,65E-01	2,25E+01
4,57386E-09	4,06202E-09	5,11834E-10	0,00115808	1,44616129	0,92791402	5,54469478	4,62E-01	2,23E+01
4,57386E-09	4,06202E-09	5,11834E-10	0,00117154	1,46297712	0,93329327	5,51273662	4,59E-01	2,22E+01
4,57386E-09	4,06202E-09	5,11834E-10	0,00118501	1,47979295	0,9386417	5,48132476	4,57E-01	2,21E+01
4,57386E-09	4,06202E-09	5,11834E-10	0,00119848	1,49660878	0,94395983	5,45044381	4,54E-01	2,20E+01
4,57386E-09	4,06202E-09	5,11834E-10	0,00121194	1,51342461	0,94924816	5,42007898	4,52E-01	2,18E+01
4,57386E-09	4,06202E-09	5,11834E-10	0,00122541	1,53024044	0,95450719	5,39021606	4,49E-01	2,17E+01
4,38717E-09	3,89623E-09	4,90943E-10	0,00113172	1,41324868	0,91729423	5,12376492	4,27E-01	2,06E+01
4,48051E-09	3,97913E-09	5,01389E-10	0,00118005	1,4735961	0,93667429	5,17575859	4,31E-01	2,08E+01
4,20048E-09	3,73043E-09	4,70052E-10	0,00106283	1,32722485	0,8889383	4,85972984	4,05E-01	1,96E+01
4,10714E-09	3,64753E-09	4,59606E-10	0,00097369	1,21590373	0,85084209	4,60249917	3,84E-01	1,85E+01
3,64042E-09	3,23304E-09	4,07378E-10	0,00075454	0,94223551	0,74899532	4,00937086	3,34E-01	1,61E+01
3,36038E-09	2,98434E-09	3,76042E-10	0,00067633	0,84457624	0,70911847	3,75677706	3,13E-01	1,51E+01
3,1737E-09	2,81855E-09	3,5515E-10	0,00052325	0,65341507	0,62372613	3,27066623	2,79E-01	1,32E+01
2,80032E-09	2,48695E-09	3,13368E-10	0,00040422	0,50476902	0,54820844	2,84563296	2,37E-01	1,15E+01
2,3336E-09	2,07246E-09	2,6114E-10	0,00028136	0,35135114	0,4573725	2,35038178	1,96E-01	9,47E+00
1,77354E-09	1,57507E-09	1,98466E-10	0,00018081	0,22579295	0,36665242	1,86552702	1,55E-01	7,51E+00
1,4935E-09	1,32638E-09	1,6713E-10	0,0001196	0,14935202	0,29819813	1,50235685	1,25E-01	6,05E+00
1,21347E-09	1,07768E-09	1,35793E-10	7,0091E-05	0,08752729	0,2282817	1,13894366	9,49E-02	4,59E+00
1,02678E-09	9,11883E-10	1,14902E-10	3,8925E-05	0,04860739	0,17011809	0,84059254	7,00E-02	3,39E+00
7,46752E-10	6,63188E-10	8,35648E-11	6,5956E-06	0,00823632	0,07002709	0,3427245	2,86E-02	1,38E+00
2,80032E-10	2,48695E-10	3,13368E-11	0	0	0	#! DIV/0!	#! DIV/0!	#! DIV/0!
0	0	0	0	0	0	#! DIV/0!	#! DIV/0!	#! DIV/0!



14,460215	12,5741	6,5151E-05	3,2575E-05	6,5151E-05	1,17E-03	1,04E-03	0,00014203	0,00117389	0,78316224	1,69202638
14,66388	12,7512	6,6068E-05	3,3034E-05	6,6068E-05	1,19E-03	1,06E-03	0,00014403	0,00119042	0,79419269	1,71585774
14,867545	12,9283	6,6986E-05	3,3493E-05	6,6986E-05	1,21E-03	1,07E-03	0,00014603	0,00120696	0,80522315	1,73968909
15,07121	13,1054	6,7904E-05	3,3952E-05	6,7904E-05	1,22E-03	1,09E-03	0,00014803	0,00122349	0,8162536	1,76352045
15,274875	13,2825	6,8821E-05	3,4411E-05	6,8821E-05	1,24E-03	1,10E-03	0,00015003	0,00124002	0,82728406	1,78735181
15,47854	13,4596	6,9739E-05	3,4869E-05	6,9739E-05	1,26E-03	1,12E-03	0,00015203	0,00125656	0,83831451	1,81118317
15,682205	13,6367	7,0656E-05	3,5328E-05	7,0656E-05	1,27E-03	1,13E-03	0,00015403	0,00127309	0,84934496	1,83501452
15,88587	13,8138	7,1574E-05	3,5787E-05	7,1574E-05	1,29E-03	1,15E-03	0,00015603	0,00128962	0,86037542	1,85884588
16,089535	13,9909	7,2492E-05	3,6246E-05	7,2492E-05	1,30E-03	1,16E-03	0,00015803	0,00130616	0,87140587	1,88267724
16,2932	14,168	7,3409E-05	3,6705E-05	7,3409E-05	1,32E-03	1,17E-03	0,00016003	0,00132269	0,88243633	1,90659086
16,496865	14,3451	7,4327E-05	3,7163E-05	7,4327E-05	1,34E-03	1,19E-03	0,00016203	0,00133922	0,89346678	1,93033995
16,70053	14,5222	7,5245E-05	3,7622E-05	7,5245E-05	1,35E-03	1,20E-03	0,00016403	0,00135576	0,90449723	1,95417131
16,904195	14,6993	7,6162E-05	3,8081E-05	7,6162E-05	1,37E-03	1,22E-03	0,00016603	0,00137229	0,91552769	1,97800267
17,10786	14,8764	7,708E-05	3,854E-05	7,708E-05	1,39E-03	1,23E-03	0,00016803	0,00138883	0,92655814	2,00183403
16,55885	15,0535	7,7997E-05	3,8999E-05	7,7997E-05	1,40E-03	1,25E-03	0,00017003	0,00140536	0,9375886	2,02566538
16,449048	15,2306	7,8915E-05	3,9458E-05	7,8915E-05	1,42E-03	1,26E-03	0,00017203	0,00142189	0,94861905	2,04949674
16,640316	15,4077	7,9833E-05	3,9916E-05	7,9833E-05	1,44E-03	1,28E-03	0,00017404	0,00143843	0,9596495	2,0733281
16,519888	15,5848	8,075E-05	4,0375E-05	8,075E-05	1,45E-03	1,29E-03	0,00017604	0,00145496	0,97067996	2,09715946
17,33809	15,7619	8,1668E-05	4,0834E-05	8,1668E-05	1,47E-03	1,31E-03	0,00017804	0,00147149	0,98171041	2,12099081
16,41717	15,939	8,2585E-05	4,1293E-05	8,2585E-05	1,49E-03	1,32E-03	0,00018004	0,00148803	0,99274087	2,14482217
15,6358402	15,793778	8,1833E-05	4,0917E-05	8,1833E-05	1,47E-03	1,31E-03	0,0001784	0,00147447	0,98369589	2,12528046
14,8593984	15,641472	8,1044E-05	4,0522E-05	8,1044E-05	1,46E-03	1,30E-03	0,00017668	0,00146025	0,9742097	2,10478549
13,6374084	15,152676	7,8511E-05	3,9256E-05	7,8511E-05	1,41E-03	1,26E-03	0,00017115	0,00141462	0,94376565	2,03901094
11,8862436	13,983816	7,2455E-05	3,6228E-05	7,2455E-05	1,30E-03	1,16E-03	0,00015795	0,0013055	0,87096465	1,88172398
11,575256	14,46907	7,4969E-05	3,7485E-05	7,4969E-05	1,35E-03	1,20E-03	0,00016343	0,0013508	0,9011881	1,94702119
11,9351232	15,30144	7,9282E-05	3,9641E-05	7,9282E-05	1,43E-03	1,27E-03	0,00017283	0,00142851	0,95305123	2,05902928
10,0323608	13,74296	7,1207E-05	3,5604E-05	7,1207E-05	1,28E-03	1,14E-03	0,00015523	0,00128301	0,85596324	1,84931334
7,10199336	11,454828	5,9351E-05	2,9676E-05	5,9351E-05	1,07E-03	9,50E-04	0,00012939	0,0010694	0,71344977	1,5414122
5,20376472	9,818424	5,0873E-05	2,5436E-05	5,0873E-05	9,16E-04	8,14E-04	0,0001109	0,00091662	0,61152837	1,32121046
4,420416	9,2092	4,7716E-05	2,3858E-05	4,7716E-05	8,59E-04	7,63E-04	0,00010402	0,00085975	0,57358361	1,23923059
4,60771696	10,016776	5,19E-05	2,595E-05	5,19E-05	9,34E-04	8,30E-04	0,00011314	0,00093514	0,62388248	1,34790158
3,4683264	8,670816	4,4927E-05	2,2463E-05	4,4927E-05	8,09E-04	7,19E-04	9,794E-05	0,00080949	0,54005103	1,16678326
2,49540984	6,931694	3,5916E-05	1,7958E-05	3,5916E-05	6,46E-04	5,75E-04	7,8296E-05	0,00064713	0,43173197	0,93275933
1,4918904	5,52552	2,863E-05	1,4315E-05	2,863E-05	5,15E-04	4,58E-04	6,2413E-05	0,00051585	0,34415017	0,74353835
0,6136515	5,57865	2,8905E-05	1,4452E-05	2,8905E-05	5,20E-04	4,62E-04	6,3013E-05	0,00052081	0,3474593	0,75068776
0	2,628164	1,3617E-05	6,8087E-06	1,3617E-05	2,45E-04	2,18E-04	2,9686E-05	0,00024536	0,16369194	0,35365734
0	0	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0	0	0	0



4,6672E-09	4,14492E-09	5,2228E-10	0,00115704	1,44486446	0,92749787	6,19947513	5,17E-01	2,50E+01
4,6672E-09	4,14492E-09	5,2228E-10	0,00117334	1,46521466	0,93400671	6,15627268	5,13E-01	2,48E+01
4,6672E-09	4,14492E-09	5,2228E-10	0,00118963	1,48556487	0,9404705	6,11396103	5,09E-01	2,46E+01
4,6672E-09	4,14492E-09	5,2228E-10	0,00120593	1,50591507	0,94689017	6,07250997	5,06E-01	2,45E+01
4,6672E-09	4,14492E-09	5,2228E-10	0,00122222	1,52626528	0,95326661	6,03189072	5,03E-01	2,43E+01
4,6672E-09	4,14492E-09	5,2228E-10	0,00123852	1,54661548	0,95960067	5,99207582	4,99E-01	2,41E+01
4,6672E-09	4,14492E-09	5,2228E-10	0,00125482	1,56696568	0,96589321	5,95303908	4,96E-01	2,40E+01
4,6672E-09	4,14492E-09	5,2228E-10	0,00127111	1,58731589	0,97214501	5,91475548	4,93E-01	2,38E+01
4,6672E-09	4,14492E-09	5,2228E-10	0,00128741	1,60766609	0,97835686	5,87720109	4,90E-01	2,37E+01
4,6672E-09	4,14492E-09	5,2228E-10	0,00130371	1,62801629	0,98452952	5,84035307	4,87E-01	2,35E+01
4,6672E-09	4,14492E-09	5,2228E-10	0,00132	1,6483665	0,99066372	5,80418955	4,84E-01	2,34E+01
4,6672E-09	4,14492E-09	5,2228E-10	0,0013363	1,6687167	0,99676017	5,76868959	4,81E-01	2,32E+01
4,6672E-09	4,14492E-09	5,2228E-10	0,0013526	1,6890669	1,00281956	5,73383314	4,78E-01	2,31E+01
4,6672E-09	4,14492E-09	5,2228E-10	0,00136889	1,70941711	1,00884255	5,69960099	4,75E-01	2,30E+01
4,6672E-09	4,14492E-09	5,2228E-10	0,00132496	1,65456004	0,99252312	5,54143261	4,62E-01	2,23E+01
4,6672E-09	4,14492E-09	5,2228E-10	0,00131618	1,64358862	0,98922693	5,45880811	4,55E-01	2,20E+01
4,6672E-09	4,14492E-09	5,2228E-10	0,00133148	1,66270012	0,99496163	5,42734498	4,52E-01	2,19E+01
4,6672E-09	4,14492E-09	5,2228E-10	0,00132184	1,65066696	0,99135476	5,34621934	4,46E-01	2,15E+01
4,6672E-09	4,14492E-09	5,2228E-10	0,00138731	1,73242169	1,01560814	5,4154745	4,51E-01	2,18E+01
4,6672E-09	4,14492E-09	5,2228E-10	0,00131363	1,64040337	0,98826791	5,21113752	4,34E-01	2,10E+01
4,5739E-09	4,06202E-09	5,1183E-10	0,00125111	1,56233291	0,96446431	5,02973513	4,19E-01	2,03E+01
4,4805E-09	3,97913E-09	5,0139E-10	0,00118898	1,48475086	0,9402128	4,84996586	4,04E-01	1,95E+01
4,2938E-09	3,81333E-09	4,805E-10	0,0010912	1,36264964	0,90072345	4,59630532	3,83E-01	1,85E+01
3,9204E-09	3,48173E-09	4,3872E-10	0,00095108	1,18767328	0,84090679	4,24541701	3,54E-01	1,71E+01
4,0138E-09	3,56463E-09	4,4916E-10	0,0009262	1,1565994	0,82983328	4,14541097	3,45E-01	1,67E+01
4,2005E-09	3,73043E-09	4,7005E-10	0,00095499	1,19255733	0,84263404	4,16550937	3,47E-01	1,68E+01
3,7338E-09	3,31594E-09	4,1782E-10	0,00080274	1,00243334	0,77255093	3,77968609	3,15E-01	1,52E+01
3,0804E-09	2,73565E-09	3,447E-10	0,00056827	0,70963107	0,65000348	3,14767548	2,62E-01	1,27E+01
2,6136E-09	2,32116E-09	2,9248E-10	0,00041638	0,51996009	0,55639648	2,66716281	2,22E-01	1,07E+01
2,4269E-09	2,15536E-09	2,7159E-10	0,0003537	0,4416879	0,51281075	2,43364634	2,03E-01	9,80E+00
2,6136E-09	2,32116E-09	2,9248E-10	0,00036869	0,46040301	0,52356239	2,46006974	2,05E-01	9,91E+00
2,2403E-09	1,98956E-09	2,5069E-10	0,00027752	0,34655512	0,45424016	2,11341947	1,76E-01	8,51E+00
1,7735E-09	1,57507E-09	1,9847E-10	0,00019967	0,24934131	0,38529776	1,77525037	1,48E-01	7,15E+00
1,4002E-09	1,24348E-09	1,5668E-10	0,00011937	0,14906967	0,29791612	1,35944304	1,13E-01	5,47E+00
1,4002E-09	1,24348E-09	1,5668E-10	4,9102E-05	0,06131605	0,19106734	0,8635699	7,20E-02	3,48E+00
6,5341E-10	5,80289E-10	7,3119E-11	0	0	0	0	0,00E+00	0
0	0	0	0	0	0	0	0,00E+00	0



14,8861276	13,7834515	7,1417E-05	3,5708E-05	7,1417E-05	1,29E-03	1,14E-03	1,56E-04	0,00128679	0,8584852	1,85476206
15,0957914	13,9775846	7,2423E-05	3,6211E-05	7,2423E-05	1,30E-03	1,16E-03	1,58E-04	0,00130491	0,87057654	1,88088547
15,3054552	14,1717178	7,3429E-05	3,6714E-05	7,3429E-05	1,32E-03	1,17E-03	1,60E-04	0,00132304	0,88266788	1,90700887
15,5151119	14,3658509	7,4434E-05	3,7217E-05	7,4434E-05	1,34E-03	1,19E-03	1,62E-04	0,00134116	0,89475922	1,93313228
15,7247827	14,559984	7,544E-05	3,772E-05	7,544E-05	1,36E-03	1,21E-03	1,64E-04	0,00135929	0,90685056	1,95925569
14,5635431	14,1393622	7,3261E-05	3,663E-05	7,3261E-05	1,32E-03	1,17E-03	1,60E-04	0,00132002	0,88065266	1,90265497
13,3911408	13,3911408	6,9384E-05	3,4692E-05	6,9384E-05	1,25E-03	1,11E-03	1,51E-04	0,00125016	0,83405062	1,801971
11,811059	12,3031865	6,3747E-05	3,1874E-05	6,3747E-05	1,15E-03	1,02E-03	1,39E-04	0,0011486	0,76628873	1,65557106
10,8761463	11,8218981	6,1253E-05	3,0627E-05	6,1253E-05	1,10E-03	9,80E-04	1,34E-04	0,00110366	0,73631228	1,59080678
6,72994816	8,4124352	4,3588E-05	2,1794E-05	4,3588E-05	7,85E-04	6,97E-04	9,50E-05	0,00078536	0,5239581	1,1320144
5,97541743	7,86239136	4,0738E-05	2,0369E-05	4,0738E-05	7,33E-04	6,52E-04	8,88E-05	0,00073401	0,4896993	1,05799807
4,45066355	7,29616976	3,7804E-05	1,8902E-05	3,7804E-05	6,80E-04	6,05E-04	8,24E-05	0,00068115	0,45443289	0,9818048
3,18904094	6,37808188	3,3047E-05	1,6524E-05	3,3047E-05	5,95E-04	5,29E-04	7,20E-05	0,00059544	0,39725093	0,85826284
2,33736276	5,43572736	2,8164E-05	1,4082E-05	2,8164E-05	5,07E-04	4,51E-04	6,14E-05	0,00050747	0,33855754	0,73145546
1,7326381	4,8128836	2,4937E-05	1,2469E-05	2,4937E-05	4,49E-04	3,99E-04	5,44E-05	0,00044932	0,29976449	0,64764285
0,78520805	3,82604024	1,9824E-05	9,912E-06	1,9824E-05	3,57E-04	3,17E-04	4,32E-05	0,00035719	0,23830018	0,51484886
0,44335151	3,16679652	1,6408E-05	8,2041E-06	1,6408E-05	2,95E-04	2,63E-04	3,58E-05	0,00029564	0,19724	0,42613811
0,28472858	2,84728576	1,4753E-05	7,3764E-06	1,4753E-05	2,66E-04	2,36E-04	3,22E-05	0,00026582	0,17733967	0,38314334
0,04319462	0,71991032	3,7301E-06	1,8651E-06	3,7301E-06	6,71E-05	5,97E-05	8,13E-06	6,7209E-05	0,04483872	0,09687431
0	0	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0	0	0

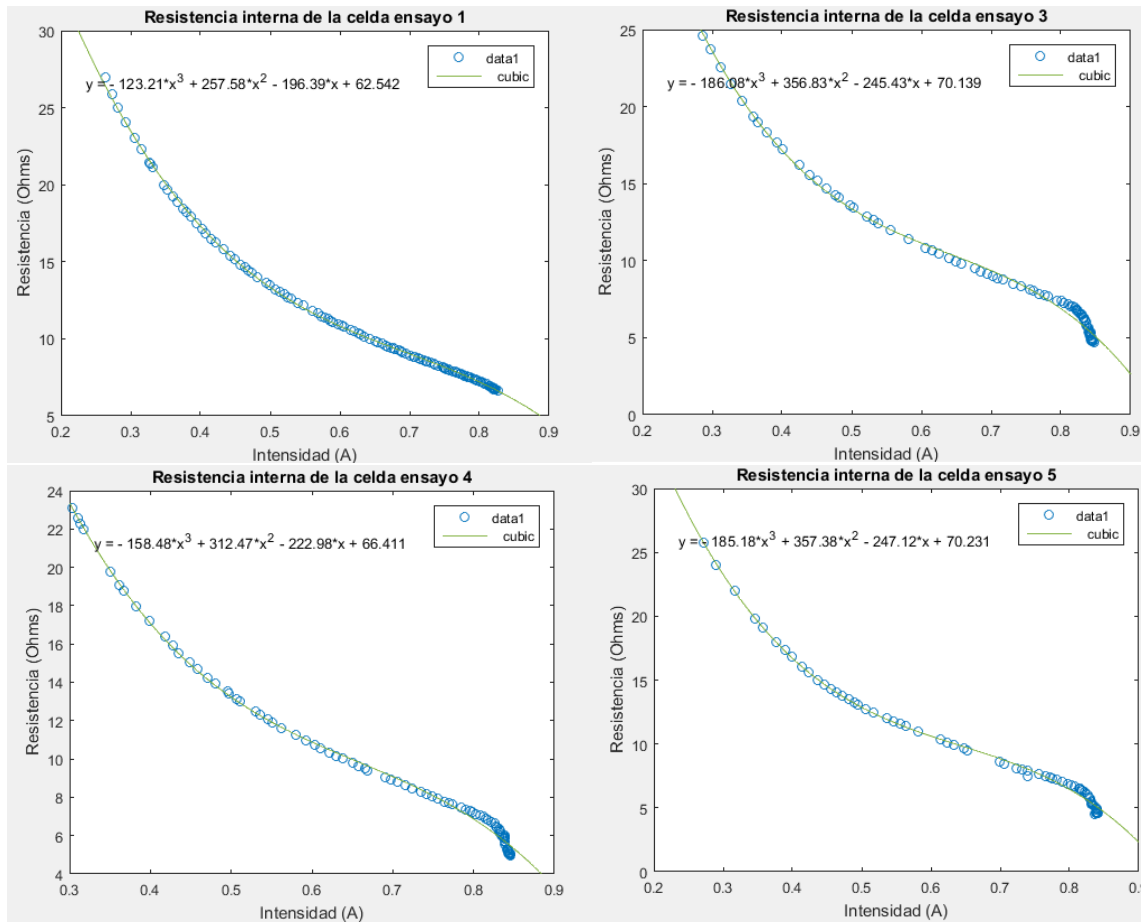
4,48051E-09	3,97913E-09	5,01389E-10	1,19E-03	1,48742165	0,94105806	5,50869308	0,45905776	2,22E+01
4,48051E-09	3,97913E-09	5,01389E-10	1,21E-03	1,50837125	0,94766205	5,47030451	0,45585871	2,20E+01
4,48051E-09	3,97913E-09	5,01389E-10	1,22E-03	1,52932085	0,95422035	5,43270747	0,45272562	2,19E+01
4,48051E-09	3,97913E-09	5,01389E-10	1,24E-03	1,55027045	0,96073387	5,39587513	0,44965626	2,17E+01
4,48051E-09	3,97913E-09	5,01389E-10	1,26E-03	1,57122005	0,96720353	5,35978191	0,44664849	2,16E+01
4,29382E-09	3,81333E-09	4,80498E-10	1,17E-03	1,455189	0,93080578	5,09021335	0,42418445	2,05E+01
4,01379E-09	3,56463E-09	4,49161E-10	1,07E-03	1,33804259	0,89255366	4,8176375	0,40146979	1,94E+01
3,64042E-09	3,23304E-09	4,07378E-10	9,45E-04	1,18016084	0,83824306	4,46648493	0,37220708	1,80E+01
3,45373E-09	3,06724E-09	3,86487E-10	8,70E-04	1,08674437	0,80438334	4,23181315	0,3526511	1,70E+01
2,42694E-09	2,15536E-09	2,71586E-10	5,38E-04	0,67245632	0,63274891	3,2872439	0,27393699	1,32E+01
2,24026E-09	1,98956E-09	2,50694E-10	4,78E-04	0,59706362	0,5962243	3,05925136	0,25493761	1,23E+01
2,05357E-09	1,82377E-09	2,29803E-10	3,56E-04	0,44471023	0,51456226	2,60804203	0,21733684	1,05E+01
1,77354E-09	1,57507E-09	1,98466E-10	2,55E-04	0,31864892	0,43556763	2,181062	0,18175517	8,78E+00
1,4935E-09	1,32638E-09	1,6713E-10	1,87E-04	0,23354925	0,37289676	1,8450147	0,15375122	7,43E+00
1,30682E-09	1,16058E-09	1,46238E-10	1,39E-04	0,17312517	0,32105503	1,56982434	0,1308187	6,32E+00
1,02678E-09	9,11883E-10	1,14902E-10	6,12E-05	0,07645958	0,21336113	1,03111563	0,0859263	4,15E+00
8,40096E-10	7,46086E-10	9,40104E-11	3,55E-05	0,04429968	0,16240509	0,77583774	0,06465314	3,12E+00
7,46752E-10	6,63188E-10	8,35648E-11	2,28E-05	0,02845007	0,13014907	0,61467976	0,05122331	2,48E+00
1,86688E-10	1,65797E-10	2,08912E-11	3,46E-06	0,00431601	0,05069211	0,23672323	0,01972694	9,53E-01
0	0	0	0,00E+00	0	0	0	0	0



15,5367394	13,0660835	6,7648E-05	3,3824E-05	6,7648E-05	1,22E-03	1,08E-03	1,47E-04	0,00121888	0,81318198	1,75688421
15,7555667	13,239972	6,8601E-05	3,43E-05	6,8601E-05	1,23E-03	1,10E-03	1,50E-04	0,00123605	0,82463525	1,78162905
15,974394	13,4238605	6,9554E-05	3,4777E-05	6,9554E-05	1,25E-03	1,11E-03	1,52E-04	0,00125322	0,83608852	1,8063739
16,1932213	13,607749	7,0506E-05	3,5253E-05	7,0506E-05	1,27E-03	1,13E-03	1,54E-04	0,00127039	0,84754179	1,83111875
16,4120486	13,7916375	7,1459E-05	3,573E-05	7,1459E-05	1,29E-03	1,14E-03	1,56E-04	0,00128755	0,85899505	1,8558636
13,2208476	12,0189524	6,2274E-05	3,1137E-05	6,2274E-05	1,12E-03	9,96E-04	1,36E-04	0,00112206	0,74858556	1,61732326
11,7806329	11,3275316	5,8692E-05	2,9346E-05	5,8692E-05	1,06E-03	9,39E-04	1,28E-04	0,00105751	0,70552127	1,52428254
10,3271782	10,3271782	5,3509E-05	2,6754E-05	5,3509E-05	9,63E-04	8,56E-04	1,17E-04	0,00096412	0,6432155	1,38967066
9,56760832	10,7501217	5,57E-05	2,785E-05	5,57E-05	1,00E-03	8,91E-04	1,21E-04	0,00100361	0,66955801	1,44658381
8,00282752	9,4150912	4,8783E-05	2,4391E-05	4,8783E-05	8,78E-04	7,81E-04	1,06E-04	0,00087897	0,58640729	1,26693622
5,42176853	7,74538362	4,0132E-05	2,0066E-05	4,0132E-05	7,22E-04	6,42E-04	8,75E-05	0,00072309	0,48241162	1,042253
5,12681138	7,5394285	3,9064E-05	1,9532E-05	3,9064E-05	7,03E-04	6,25E-04	8,52E-05	0,00070386	0,46958396	1,01453877
4,14230913	7,02086293	3,6378E-05	1,8189E-05	3,6378E-05	6,55E-04	5,82E-04	7,93E-05	0,00065545	0,43728575	0,9447583
2,39113894	5,56078824	2,8812E-05	1,4406E-05	2,8812E-05	5,19E-04	4,61E-04	6,28E-05	0,00051914	0,34634681	0,7482842
1,80063619	5,0017672	2,5916E-05	1,2958E-05	2,5916E-05	4,66E-04	4,15E-04	5,65E-05	0,00046695	0,31152887	0,67305986
1,32841052	4,42803508	2,2943E-05	1,1472E-05	2,2943E-05	4,13E-04	3,67E-04	5,00E-05	0,00041339	0,27579468	0,59585594
0,95989797	3,83959188	1,9894E-05	9,9471E-06	1,9894E-05	3,58E-04	3,18E-04	4,34E-05	0,00035846	0,23914422	0,51667243
0,71201627	3,56008136	1,8446E-05	9,223E-06	1,8446E-05	3,32E-04	2,95E-04	4,02E-05	0,00033236	0,22173526	0,47906026
0,27495009	2,29125071	1,1872E-05	5,9359E-06	1,1872E-05	2,14E-04	1,90E-04	2,59E-05	0,00021391	0,14270771	0,30832081
0	0	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0	0	0

4,6672E-09	4,14492E-09	5,2228E-10	0,00124318	1,55243076	0,96140303	6,18887168	5,16E-01	2,49E+01
4,6672E-09	4,14492E-09	5,2228E-10	0,00126069	1,57429598	0,9681498	6,14574313	5,12E-01	2,48E+01
4,6672E-09	4,14492E-09	5,2228E-10	0,0012782	1,5961612	0,97484988	6,10350384	5,09E-01	2,46E+01
4,6672E-09	4,14492E-09	5,2228E-10	0,00129571	1,61802642	0,98150422	6,06212368	5,05E-01	2,44E+01
4,6672E-09	4,14492E-09	5,2228E-10	0,00131322	1,63989165	0,98811376	6,0215739	5,02E-01	2,43E+01
4,0138E-09	3,56463E-09	4,4916E-10	0,00105787	1,32102689	0,88686026	5,33342195	4,44E-01	2,15E+01
3,7338E-09	3,31594E-09	4,1782E-10	0,00094263	1,17712065	0,83716268	4,96916562	4,14E-01	2,00E+01
3,3604E-09	2,98434E-09	3,7604E-10	0,00082633	1,03189148	0,78382007	4,59289079	3,83E-01	1,85E+01
3,4537E-09	3,06724E-09	3,8649E-10	0,00076556	0,95599528	0,7544444	4,36480141	3,64E-01	1,76E+01
2,987E-09	2,65275E-09	3,3426E-10	0,00064035	0,7996424	0,68999712	3,94204546	3,29E-01	1,59E+01
2,4269E-09	2,15536E-09	2,7159E-10	0,00043382	0,54174303	0,5679316	3,20461126	2,67E-01	1,29E+01
2,3336E-09	2,07246E-09	2,6114E-10	0,00041022	0,51227091	0,55226716	3,07822034	2,57E-01	1,24E+01
2,1469E-09	1,90666E-09	2,4025E-10	0,00033145	0,41389946	0,49641718	2,73358792	2,28E-01	1,10E+01
1,6802E-09	1,49217E-09	1,8802E-10	0,00019133	0,23892257	0,37716202	2,05216845	1,71E-01	8,26E+00
1,4935E-09	1,32638E-09	1,6713E-10	0,00014408	0,17991954	0,32729437	1,75988362	1,47E-01	7,09E+00
1,3068E-09	1,16058E-09	1,4624E-10	0,00010629	0,13273476	0,28111997	1,49402405	1,25E-01	6,02E+00
1,1201E-09	9,94781E-10	1,2535E-10	7,6807E-05	0,09591299	0,23896708	1,25540302	1,05E-01	5,06E+00
1,0268E-09	9,11883E-10	1,149E-10	5,6972E-05	0,07114465	0,20581191	1,06893716	8,91E-02	4,30E+00
6,5341E-10	5,80289E-10	7,3119E-11	2,2E-05	0,02747301	0,12789468	0,65679042	5,47E-02	2,65E+00
0	0	0	0	0	0	0	0,00E+00	0

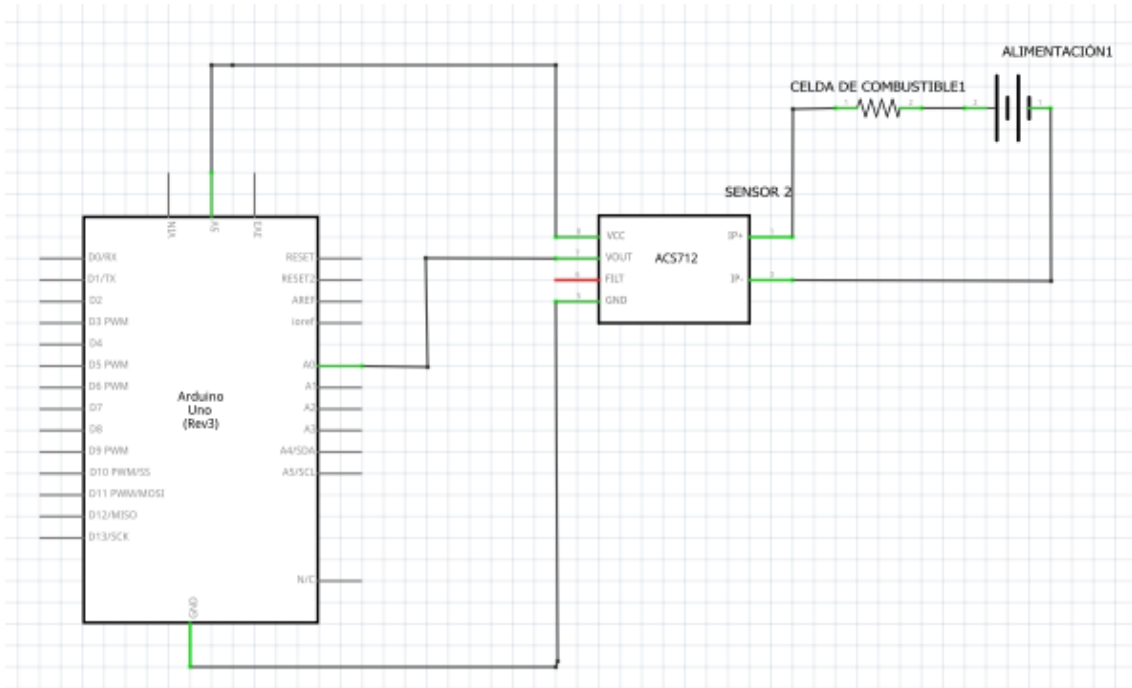
DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE LA RESISTENCIA INTERNA DE LA CELDA



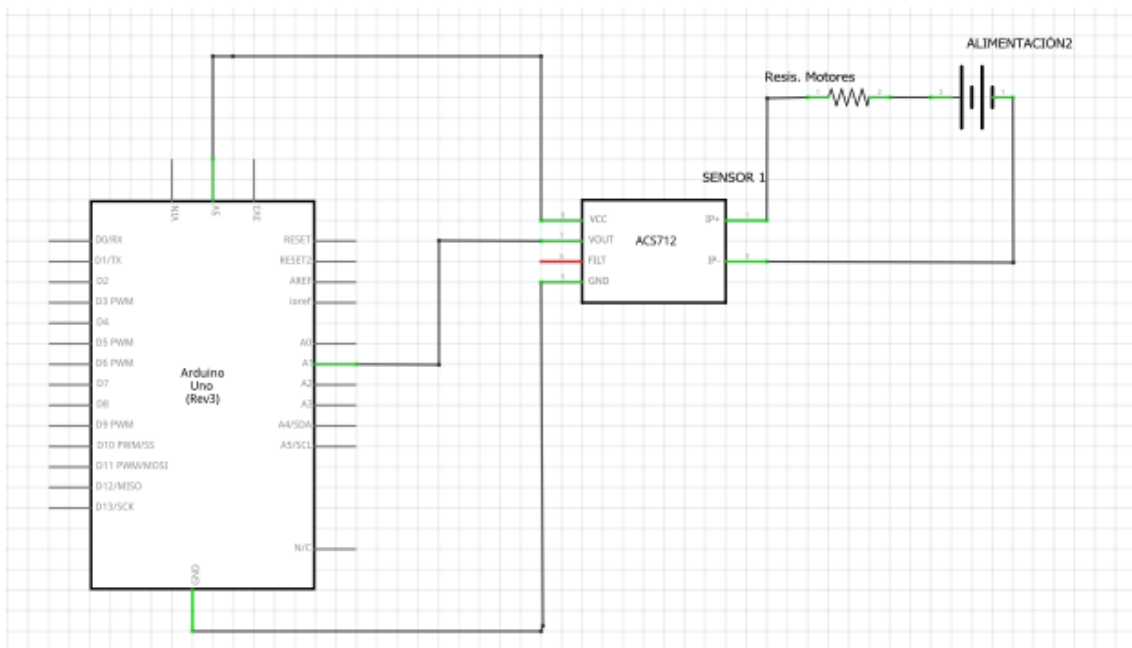
Ensayo	x3	x2	x	x0
1	-123,21	257,58	-196,39	62,542
3	-186,08	356,83	-245,43	70,139
4	-158,48	312,47	-222,98	66,411
5	-185,18	357,38	-247,12	70,231
media	-163,2375	321,065	-227,98	67,33075

ESQUEMAS ELÉCTRICOS

MONTAJE ELÉCTRICO PARA LA CALIRACIÓN DEL SENSOR 1 ACS712 -5A



MONTAJE ELÉCTRICO PARA LA CALIRACIÓN DEL SENSOR 2 ACS712 -5A



MONTAJE ELÉCTRICO PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS DEL SISTEMA

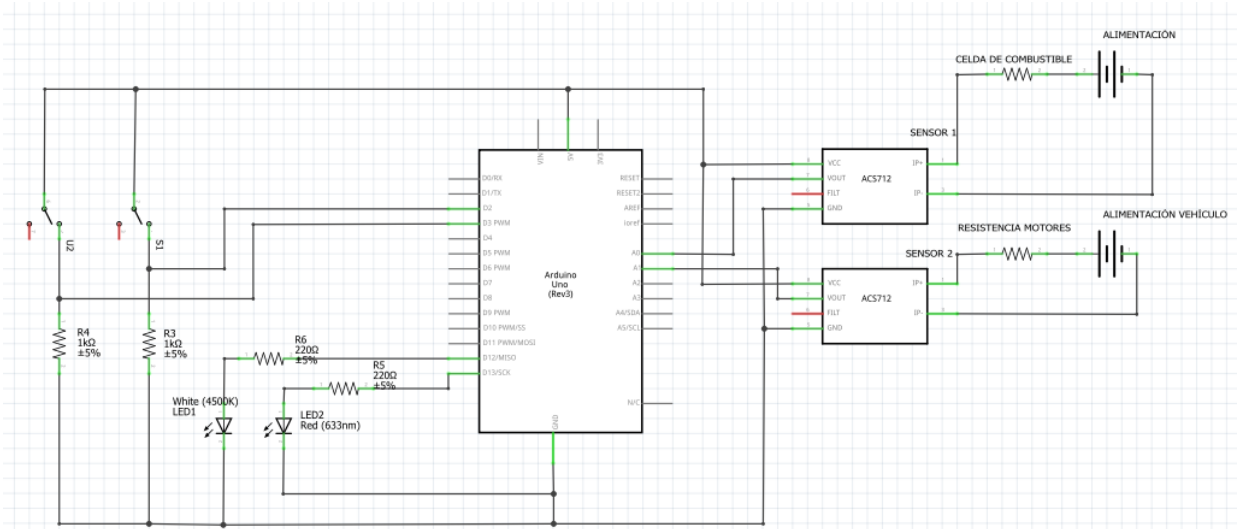
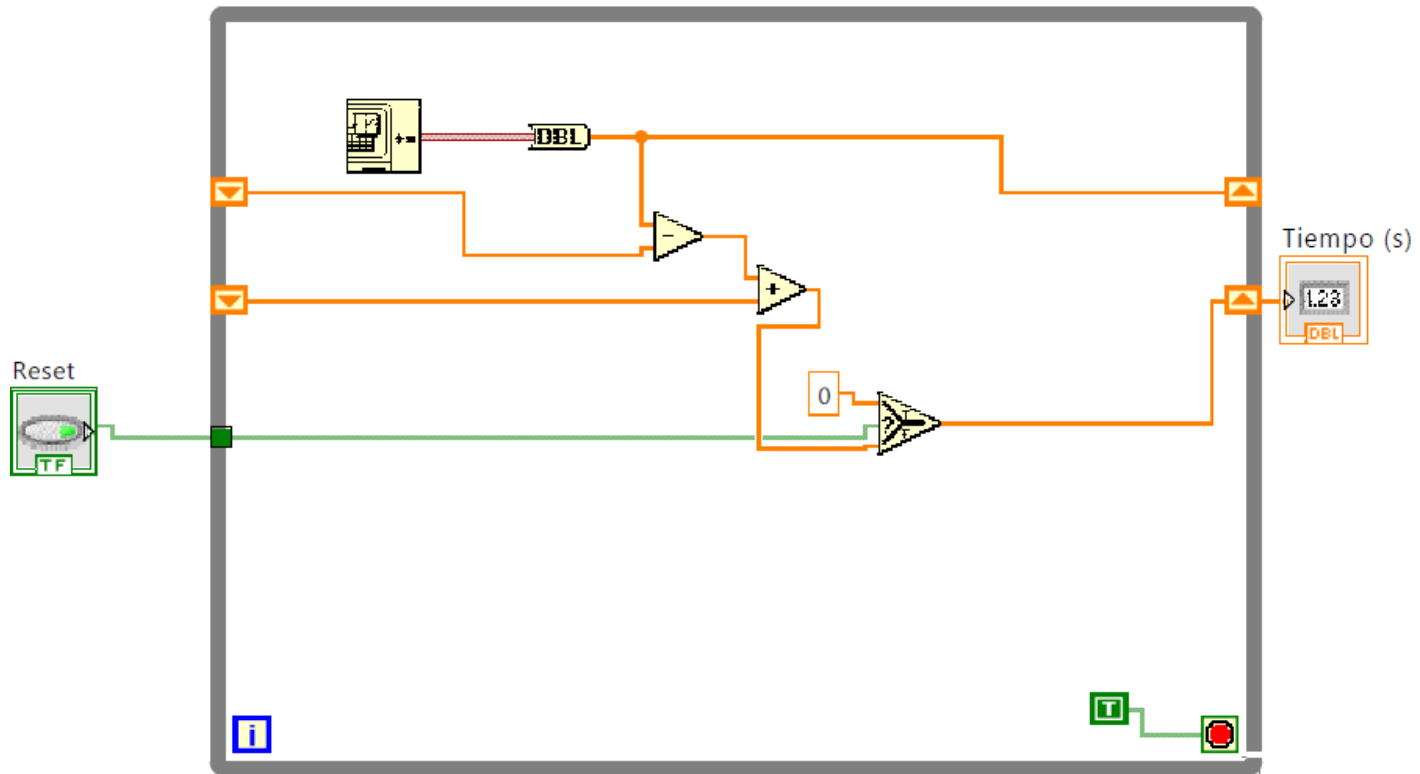
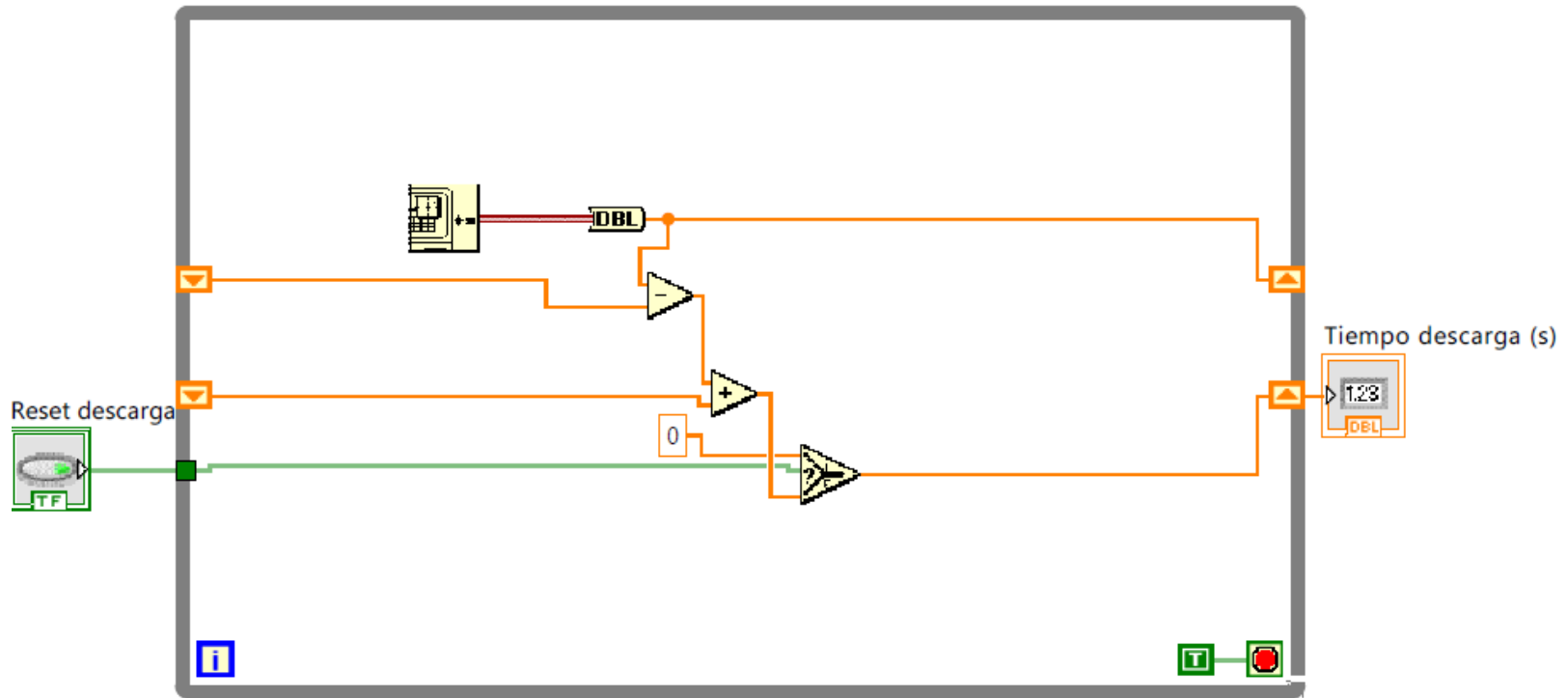


DIAGRAMA DE BLOQUES DE LabVIEW

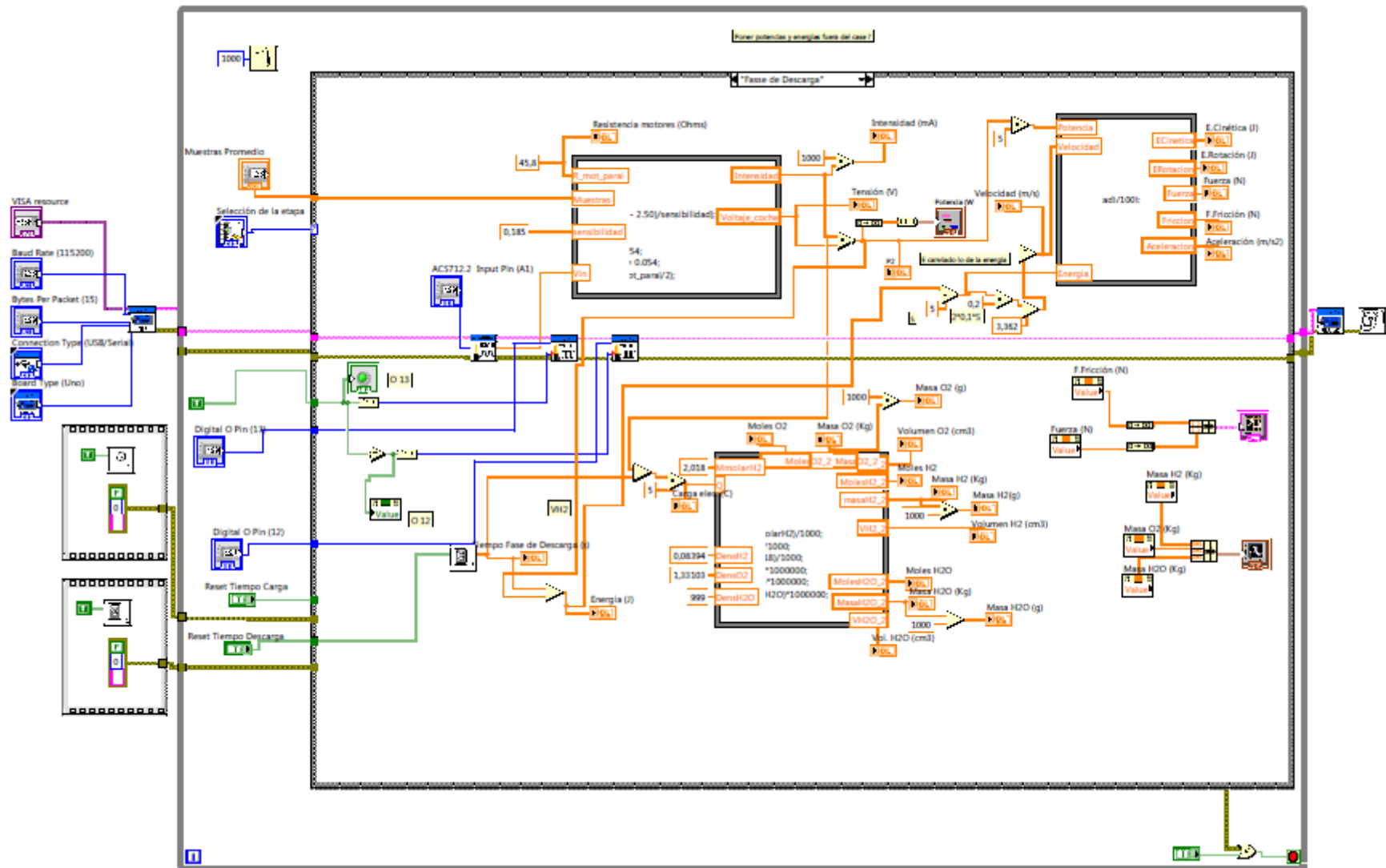
TIMER 1

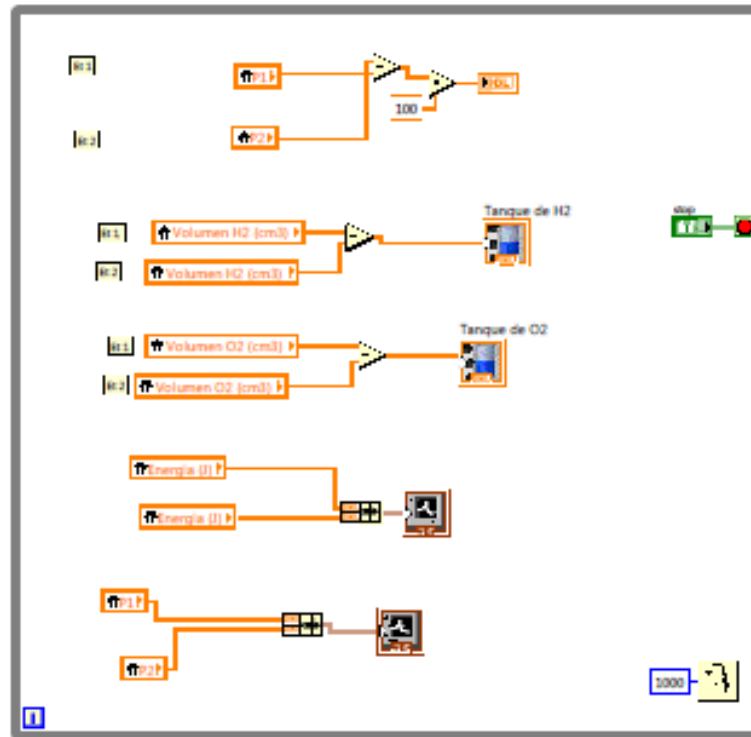


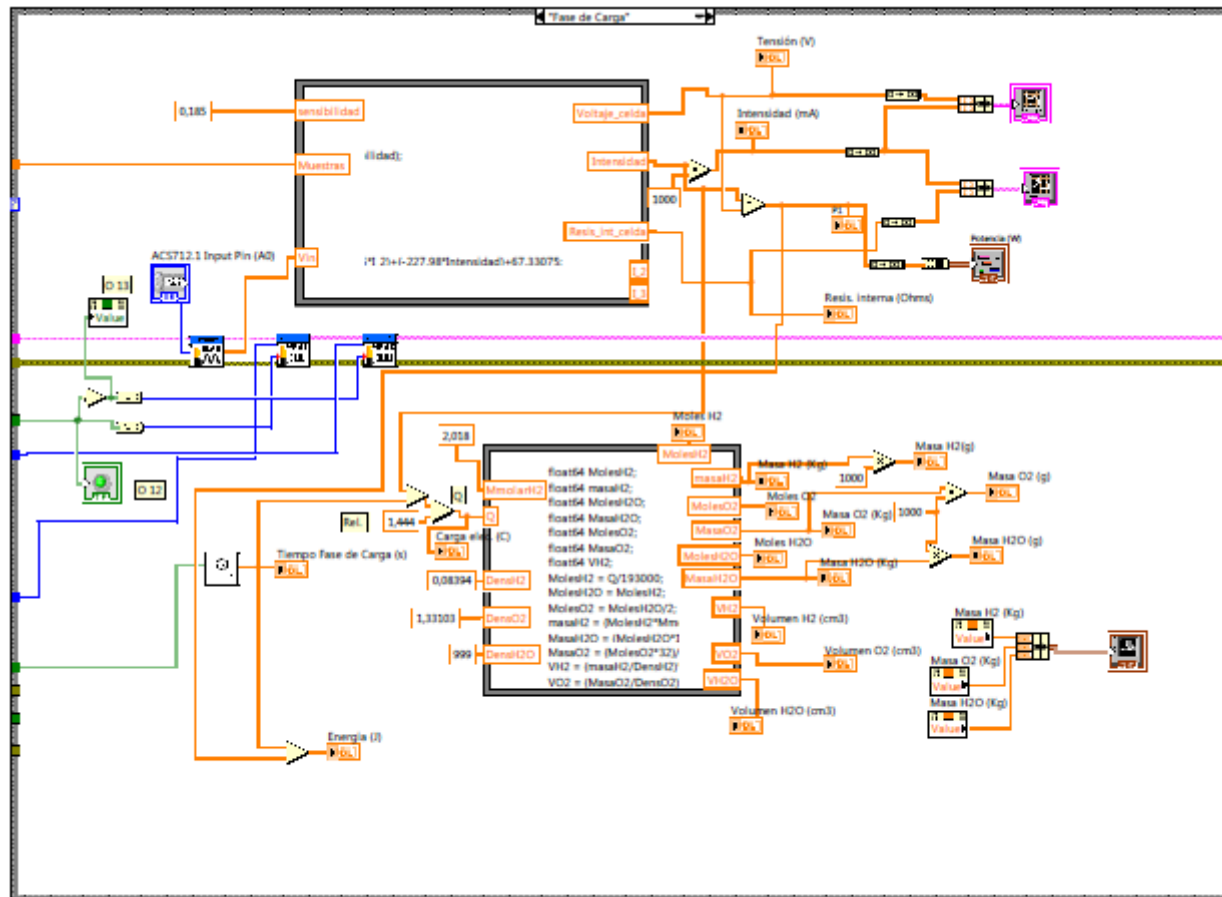
TIMER 2

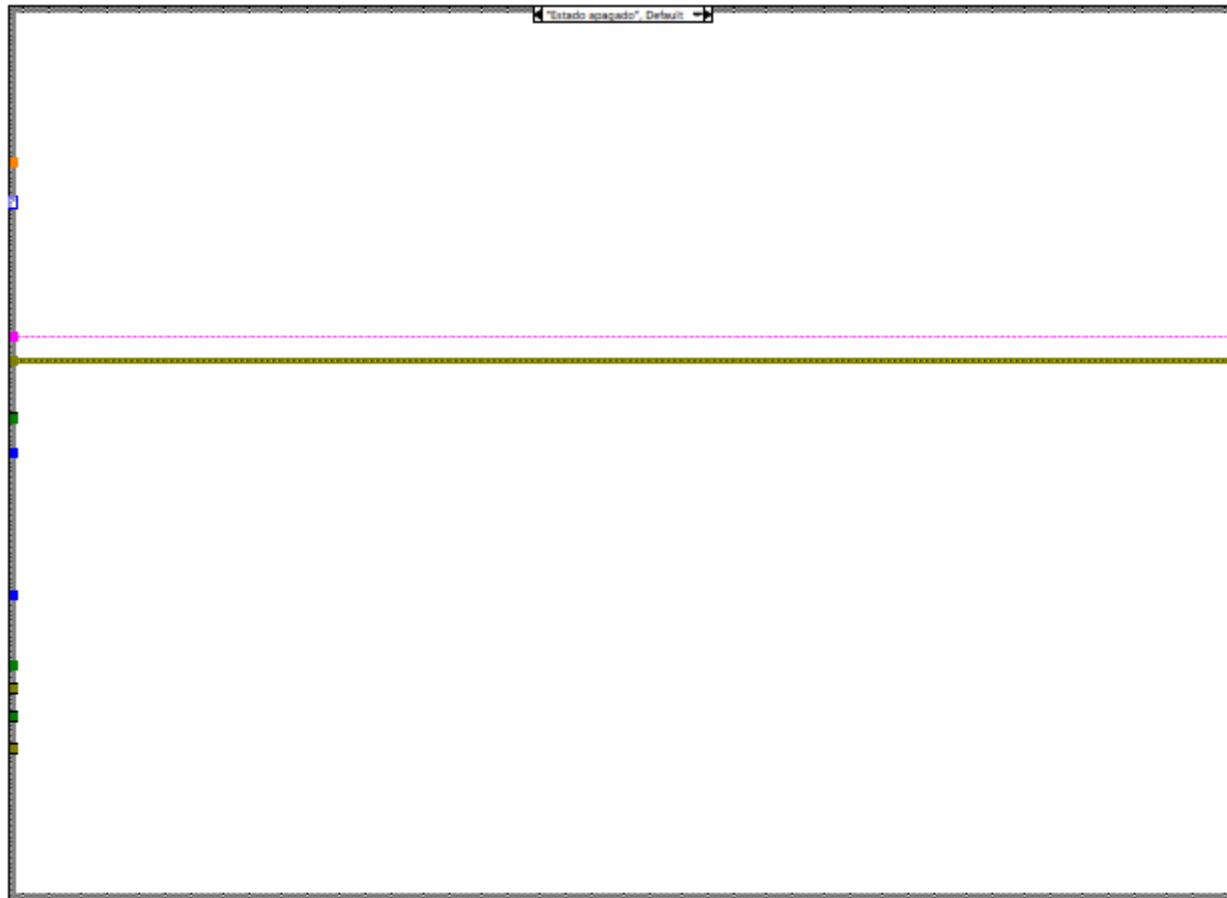


ADQUISICIÓN DE DATOS DEL SISTEMA





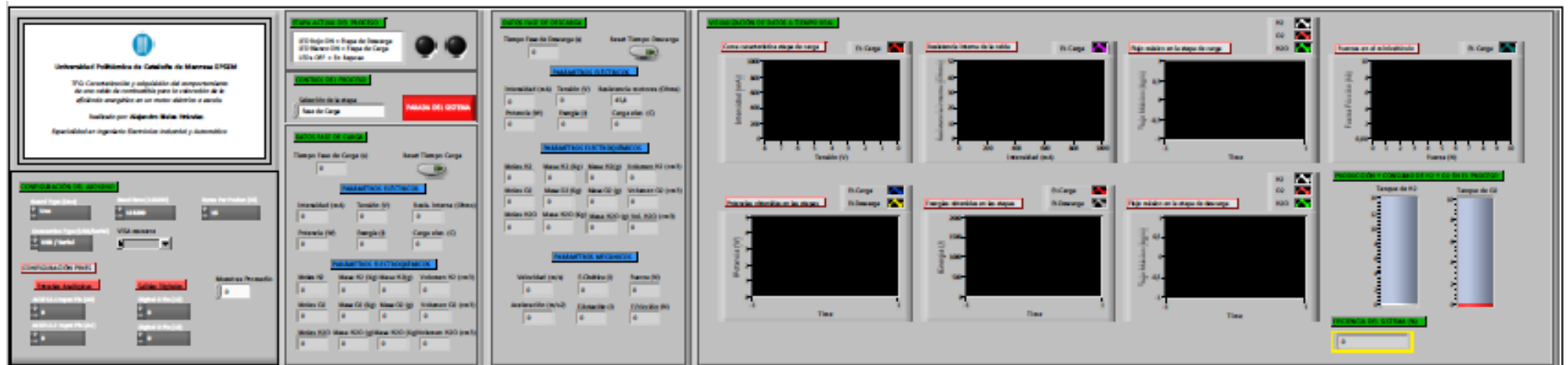






PANEL FRONTAL DE LabVIEW

ADQUISICIÓN DE DATOS DEL SISTEMA





REFERENCIAS

- [1] J. Chaves Palacios, “Desarrollo Tecnológico En La Primera Revolución Industrial,” *Norba. Rev. Hist.*, vol. 17, pp. 213–375, 2004.
- [2] C. Mondial, D. E. L. É. Gie, Y. D. Kim, L. Birnbaum, G. Ward, and C. Frei, “Recursos energéticos globales,” 2013.
- [3] J. A. Francisco, L. M. Castro, and E. Cerdá, “Las energías renovables en el ámbito internacional,” *Cuad. económicos ICE # 83. 2012*, vol. 83, pp. 11–36, 2012.
- [4] “Balance del Consumo de energía final.” [Online]. Disponible en: <http://sieeweb.idae.es/consumofinal/bal.asp?txt=2015&tipbal=t>
- [5] “Electrolizador para la generación de hidrógeno.” [Online]. Disponible en: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia54/HTML/Articulo16.html>
- [6] M. M. Zegarra and I. Mecánico, “Potencia y Energía de las Celdas de Combustible.”
- [7] “Pila de combustible.” [Online]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Pila_de_combustible
- [8] “Electrolysis of Water and Fuel Cell Operation.” [Online]. Disponible en: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/thermo/electrol.html>
- [9] Fundación General CSIC., *Lychnos cuadernos de la Fundación General CSIC*. Fundación General CSIC, 2010.
- [10] “Arduino y solo Arduino - Todo lo que necesitas lo encontrarás aquí.: Resistencias Pull-Up - Pull-Down.” [Online]. Disponible en: <https://soloarduino.blogspot.com.es/2013/07/resistencias-pull-up-pull-down.html>
- [11] “Puerto Serie | Aprendiendo Arduino.” [Online]. Disponible en: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/category/puerto-serie/>
- [12] “GUÍA BÁSICA DE ARDUINO.” [Online]. Disponible en: <http://alsw.net/libro-pdf/Guia-basica-de-Arduino.pdf>
- [13] J. Pomares Baeza, “Control por Computador Manual de arduino.”
- [14] “Aplicando una fuerza sobre una rueda.” [Online]. Disponible en: http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/solido/roz_rodadura/rozamiento.htm