

TRABAJO DE FINAL DE GRADO

Grado en Ingeniería Eléctrica

**ELECTRÓNICA DE POTENCIA Y CONTROL DE UN MOTOR
CONECTADO A UNA CÉLULA DE COMBUSTIBLE**



Memoria y Anexos

Autor/a: Alejandro González Zardoya

Director/a: Sergi Fillet Castella

Convocatoria: 05/2021



Resumen

El presente proyecto explica el funcionamiento de los principales componentes eléctricos y electrónicos de un vehículo eléctrico. Se hace hincapié en la cadena de alimentación el cual está compuesto por una célula de combustible de hidrógeno y una batería de litio en paralelo. Al mismo tiempo se han desarrollado controles para llevar a cabo la movilidad lineal del vehículo de forma óptima.

Se presentan un diseño del sistema modular para poder adaptarse al modelado de diferentes vehículos reales, para así, conseguir un dimensionado de la cadena de alimentación y elaborar ensayos en las estrategias de control.

Se abarcan diferentes elementos, como por ejemplo, el tipo de motor empleado, que en función de las necesidades, varían diferentes aspectos. En este caso se ha tomado que el vehículo sea unifamiliar de 4 plazas, debido a que se toma un motor de baja potencia para estos casos, pero sin embargo cumple con las expectativas. Al mismo tiempo se implican también las diferentes fuentes de alimentación que se implementan en función de la actividad del vehículo, es decir, por ejemplo, la potencia requerida para un camión transportista es mucho mayor que para una moto. Por ello este factor es clave en el proyecto.

Palabras clave:

Electrónica de potencia, célula de combustible, control vectorial, vehículo eléctrico.

Resum

El present projecte explica el funcionament dels principals components elèctrics i electrònics d'un vehicle elèctric. Es posa l'accent en l'esquema d'alimentació el qual està compost per una cèl·lula de combustible d'hidrogen i una bateria de liti en paral·lel. Al mateix temps s'han desenvolupat controls per dur a terme la mobilitat lineal del vehicle de forma òptima.

Es presenten dissenys elaborats manualment, però amb blocs de programari per permetre així una millor comprensió en el disseny de sistema i al mateix temps a les possibles modificacions en funció del vehicle comercial final a la qual s'intenti plasmar.

S'abasten diferents elements, com per exemple el tipus de motor empleat, que en funció de les necessitats, podran prendre diferents opcions. En aquest cas s'ha proposat un vehicle unifamiliar de ciutat de 4 places, amb un motor de baixa potència. Al mateix temps s'impliquen també les diferents fonts d'alimentació que s'implementen en funció de l'activitat del vehicle, és a dir ara la potència requerida per a un camió transportista és molt més gran que per a una moto. Per això aquest factor és clau en el projecte.

Paraules clau:

Electrònica de potència, cèl·lula de combustible, control vectorial, vehicle elèctric.

Abstract

This project explains the operation of the electrical and electronic components of an electric vehicle. Emphasis is placed on the power scheme which is composed of a hydrogen fuel cell and a lithium battery in parallel. At the same time, controls have been developed to carry out the linear mobility of the vehicle in an optimal way.

Manually elaborated designs are presented, but with software blocks to allow a better understanding in the design of the system and at the same time in the possible modifications depending on the final commercial vehicle to which we would want to apply it.

Various options are considered, such as the type of engine used, which as it is written in this document, depending on its activity, the type of engine will be different. In this case, the vehicle chosen is a 4-seater city single-family vehicle, due to the fact that a low-power engine will be appropriate for these cases, but nevertheless it meets expectations. Also have been considered the different types of power supply that are implemented depending on the activity of the vehicle; that is, for example, the power required for a transport truck is much greater than for a motorcycle. For this reason, this is a key factor in the project.

Keywords:

Power electronics, fuel cell, vector control, electric vehicle.

Dedicatorias

Altamente agradecido a mis familiares cercanos por apoyarme en todo momento a realizar este proyecto conservando siempre la mejor aptitud durante su realización.

Gracias de todo corazón a mis amigos y compañeros de trabajo por ayudarme anímicamente en los momentos difíciles donde el programa no conseguía realizar lo que le pedía.

A mi profesor y tutor de este documento por conseguir hacer realidad el haber diseñado este estudio, con todo lo que conlleva.

Agradecimientos

Hace mucho tiempo, me llegó el momento de decidir sobre que debería hacer con mi futuro (mi vida fuera del ámbito estudiantil). Era el día en el que tenía que elegir mi profesión para dedicarme a lo largo de mi vida y que me gustara. Sin embargo, para mí aún era pronto, no estaba preparado para afrontar ese escalón. De todos modos, también sabía que tenía que superarlo como lo hacen todos, así que emprendí mi cometido observando qué era lo que me gustaba hasta el momento.

Esta no es la mejor opción debido a que influyen cómo han sido las clases académicas antes de la universidad, es decir, dependen no sólo del temario sino también de si el profesor ha sido capaz de motivarte en esa asignatura. De muy temprana edad he observado que esto se tendría que cambiar, pero aún no sabía cómo, simplemente quería cambiarlo. De esa manera hablé con el profesor de la asignatura que más me gustaba (electrotecnia), seguramente por su metodología de trabajo. Hablé con él varios días antes de realizar la Selectividad y me comentó que con mis atributos de trabajo podría realizar la ingeniería en la provincia. Sin embargo, eso se lo dijo a muchos de mis compañeros así que no quedé contento. Decidí, egoístamente, convertirme en el mejor, o por lo menos intentarlo, así que busqué dónde estaba la mejor universidad en ese momento para ingeniería eléctrica.

Una vez tuve claro mi objetivo, Barcelona, fue aquí donde empecé a forjarme como ingeniero. Aprecié nada más comenzar, que no tenía el nivel académico suficiente para llevar al día el curso, pero eso no me hizo rendirme. En ese instante me elaboré una metodología de trabajo que fuese capaz de seguir durante mis años de carrera. Estuve todos los días en la universidad, tuviera o no clases, y debido a esto conocí gente muy aplicada de la cual aprendía formas de trabajo, tipos de apuntes, modelos de esquemas para estudiar e incluyo alumnos mayores que yo, que me ayudaron en alguna ocasión.

Por esto y por mucho más quiero agradecer de todo corazón a todos mis compañeros y amigos por todos esos días interminables que empalmábamos bibliotecas por más de 24 horas, por estar en todo momento apoyándonos entre nosotros, aun siendo de diferentes carreras. Agradezco personalmente a Miguel Ángel, Oscar, Víctor, Irene, Helena, Sai, Daniel, Anna. A mis amigos de la isla Alejandro, Aaron, José Jesús e Ibra por decirme de vez en cuando que descansa de tanto estudio, a mi jefe Xavi por dejarme el despacho los fines de semana para poder estudiar y por supuesto a mi tutor Sergi por soportarme durante este proyecto y conseguir que saliera adelante. Y finalmente, a toda mi familia por estar pendiente de mi estado anímico. sin todos ellos no podría haber conseguido esto. Estoy muy feliz de haberme arriesgado ese día tan crítico en mi vida.

Glosario de términos

Agua líquida: Mención concreta al estado líquido del agua.

Ánodo: Electrodo donde se oxida el combustible.

Apilamiento: Asociación de materiales conductores que permiten elevar la tensión generada de manera proporcional al número de capas que se suman.

Armónicos: Frecuencias, múltiplos de la frecuencia fundamental de trabajo del sistema y cuya amplitud va decreciendo conforme aumenta el múltiplo.

Bloqueo: Denominación de la tensión, cuando se destaca en el ámbito de ejes de coordenadas.

Bornes: Conectores eléctricos.

Catalizador: Sustancia, simple o compuesta, que aumenta o reduce la velocidad de una reacción química.

Cátodo: Electrodo donde el oxidante se reduce.

Colindado: Estado en el que un elemento está en contacto con otro al lado.

Comburente: Sustancia química que provoca o favorece la combustión en una reacción.

Combustibles reformados: Proceso más habitual y desarrollado para producir hidrógeno a partir de hidrocarburos.

Crossover: Traducción al inglés de "Transversal".

Directa y Cuadratura: Ejes de ordenadas y abscisas ficticios empleados en el modelo matemático.

Duty Cycle: Traducción al inglés para período de conmutación.

Efecto pelicular: Efecto que ocurre donde la densidad de corriente es mayor en la superficie de un conductor antes que en su centro longitudinal.

Electrodo: Conductor eléctrico utilizado para realizar contacto con un elemento no metálico en un circuito eléctrico.

Electrólisis: Proceso que separa los elementos de un compuesto por medio de la electricidad.

Electrolito: Cualquier elemento o sustancia que contiene en su composición química iones libres produciendo que su comportamiento sea el de un conductor eléctrico.

Electrones libres: Electrones de la órbita más apartada del núcleo de un átomo.

Energía cinética: Energía que posee un sistema debido a su movimiento relativo.

Energía interna: Reflejo de la energía a escala macroscópica compuesta por el sumatorio de la energía cinética interna y la energía potencial interna.

Entalpía: Cantidad de energía que un sistema intercambia con su entorno.

Entrehierro: Espacio que se encuentra normalmente entre el rotor y el estátor.

Entropía: Magnitud termodinámica que indica el grado de desorden molecular de un sistema.

Fourier: Modelo matemático.

Fracción molar: Unidad química que se usa para expresar la concentración de un soluto en una disolución.

Gases nobles: Gases localizados en la última columna empezando por la izquierda de la tabla periódica, los cuales están completos molecularmente.

Gas seco: Gas natural que existe en ausencia de condensado o hidrocarburos líquidos, o gas del que se han eliminado los hidrocarburos condensables.

Hidrocarburos: Los hidrocarburos son compuestos orgánicos conformados únicamente por átomos de carbono e hidrógeno.

Membrana: Película de polímero hidrofílico o hidrofóbico de porosidad elevada (20% o 40%), con diámetro de poros uniforme, comprendido en el intervalo de 0,002 μm a 10 μm , según la operación que se desarrolle. Se utiliza para llevar a cabo operaciones de separación, tales como ultra y microfiltración, ósmosis inversa o permeación de gases.

Moduladora: Señal de información que se quiere transportar y, por tanto, dicta la forma definitiva de la señal modulada.

Molécula: Composición de varios átomos para formar un nuevo compuesto.

Nafión: Polímero plástico usado como electrolito base para intercambio iónico de células de combustible.

Ortogonal: Perpendicular, con un desfase de 90 grados.

Paso polar: Distancia que existe entre los ejes de dos polos consecutivos, tomada sobre arco de circunferencia de entrehierro o en número de ranuras.

Período de conmutación: Lapso de tiempo en el que un componente circuital, con capacidad de control de encendido, está en dicho período.

Polos: Número de juegos de bobinados electromagnéticos de tres vías que tiene un motor.

Portadora: Señal que transmite la información de la moduladora.

Reluctancia variable: Resistencia que un circuito ofrece al paso del flujo magnético, modificable.

Samario: Elemento químico de los imanes, normalmente utilizados en los motores.

Teflón: Politetrafluoroetileno.

Tensión de línea: Aquella tensión que se encuentra entre dos fases de un sistema multifásico.

Tensión en circuito abierto: Es aquel voltaje que se produce entre dos puntos cualesquiera de un sistema eléctrico que no estén conectados entre sí, normalmente a la salida de dicho circuito en los bornes positivo y negativo de dicho sistema.

Teslas: Unidad de medida para los campos electromagnéticos.

Vacío: Estado en el que el circuito se encuentra abierto.

Glosario de abreviaturas

H^+ : Proton de hidrógeno.

H_2 : Molécula de hidrógeno.

P_{Fe} : Perdida en el hierro.

P_{Cu} : Perdida en el cobre.

e^- : Electrón libre.

f_s : Frecuencia de conmutación.

k_b : Coeficiente de fricción.

m_a : Modulación de amplitud.

m_f : Modulación frecuencial.

p_r : Polos que se encuentran en el rotor de un motor.

p_s : Polos en el estátor.

η_{relat} : Velocidad relativa.

η_s : Velocidad de sincronismo.

η_x : Velocidad de sincronismo estipulada.

σ_i : Conductividad del material.

A: Área o sección.

AC: Corriente Alterna (Altern Current).

ACF: Célula de combustible alcalina (Alkaline Fuel Cell).

Art.: Artículo.

Cant.: Cantidad.

cm: Centímetro.

DC: Corriente continua (Direct Current).

DFOC: Control de Flujo Orientado Directo.

DMFC: Célula de combustible de metanol directo (Direct Metanol Fuel Cell).

DTC: Control de Par Directo.

EIA: Evaluación del Impacto Ambiental.

F: Fuerza.

FC: Célula de combustible (Fuel Cell).

FOC: Control de Flujo Orientado.

h: Hora.

HHV: Poder Calorífico Superior.

HP: Potencia en caballos de vapor (Horse Power).

I: Intensidad.

ID: Control Integrador Derivativo.

IFOC: Control de Flujo Orientado Inverso.

L: Longitud.

MCC: Modo de Conducción Continuo.

MCD: Modo de Conducción Discontinuo.

MCFC: Célula de combustible de carbonato fundido.

MEA: Ensamblaje de membrana de electrodos (Membrane Electrode Assembly).

°C: Grado Celsius.

°K: Grado Kelvin.

P: Control Proporcional.

PAFC: Cella de combustible de ácido fosfórico.

PEM: Membrana de intercambio de protones (Proton Exchange Membrane).

PI: Control Proporcional Integrador.

PID: Control Proporcional Integrador y Derivativo.

Pt: Platino (Elemento químico).

PWM: Modulación por ancho de pulsos (Pulses width modulation).

Q: Calor.

RD: Real Decreto.

RDL: Real Decreto Ley.

rpm: Revolucion por minuto.

SOFC: Célula de Combustible de Oxido Sólido.

SPWM: Modulación por ancho de pulsos senoidal (Sinusoidal Pulses Width Modulation).

SVPWM: Modulación de Ancho de Pulsos del Vector Espacial (Space Vector Pulse Width Modulation).

THD: Tasa de Distorsión Armónica.

U: Energía interna.

Ud.: Unidad.

W: Trabajo.

k : Numero entero cualquiera (si no se especifica).



Índice

	Pág.
RESUMEN _____	3
RESUM _____	4
ABSTRACT _____	5
DEDICATORIAS _____	6
AGRADECIMIENTOS _____	7
GLOSARIO DE TÉRMINOS _____	8
GLOSARIO DE ABREVIATURAS _____	11
ÍNDICE _____	14
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES _____	18
ÍNDICE DE GRÁFICAS _____	18
ÍNDICE DE TABLAS _____	27
CAPÍTULO 1.-PREFACIO _____	29
1.1. Origen del trabajo.....	29
1.2. Motivación.....	29
1.3. Requerimientos previos.....	29
CAPÍTULO 2.- INTRODUCCIÓN _____	31
2.1. Objetivos del trabajo	31
2.1.1. Objetivos principales.....	31
2.1.2. Objetivos secundarios	31
2.2. Alcance del trabajo	32
CAPÍTULO 3.- TEORÍA BÁSICA _____	33
3.1. Teoría previa asociada al proyecto.....	33
3.1.1. Electrónica de Potencia	33
3.1.2. Máquinas eléctricas	36

	Pág.
3.1.2.1. Motores síncronos de reluctancia variable	36
3.1.2.1.1 Estructura de la máquina eléctrica	39
3.1.2.1.2 Producción del Par motor.....	40
3.1.2.1.3 Características Par-Velocidad	41
3.1.2.1.4 Convertidor clásico para los motores de reluctancia conmutada	42
3.1.2.1.5 Aplicaciones de uso.....	44
3.1.2.1.6 Ventajas e inconvenientes.....	44
3.1.2.2. Motores síncronos de imanes permanentes.....	45
3.1.2.2.1 Clasificación de motores brushless	46
3.1.2.2.2 Pérdidas en los motores de imanes permanentes	49
3.1.2.2.3 Ventajas y desventajas	52
3.1.2.3. Motores asíncronos.....	52
3.1.2.3.1 Estátor del motor de inducción	53
3.1.2.3.2 Motor de rotor bobinado	53
3.1.2.3.3 Motor de jaula de ardilla.....	54
3.1.2.3.4 Doble jaula de ardilla.....	54
3.1.2.3.5 Clasificación por criterio NEMA	55
3.1.2.3.6 Funcionamiento.....	56
3.1.2.3.7 Deslizamiento	58
3.1.3. Células de combustible	59
3.1.3.1. Constitución de la célula de combustible	60
3.1.3.2. Sistemas de células de combustibles.....	63
3.1.3.2.1 Celdas unitarias.....	63
3.1.3.2.2 Apilamientos.....	63
3.1.3.3. Tipos de células de combustible	65
3.1.3.3.1 Pila de combustible de membrana de intercambio protónico.....	66
3.1.3.4. Célula de combustible PEM.....	69
3.1.3.4.1 Membrana de intercambio	70
3.1.3.4.2 Proceso crossover	71
3.1.3.4.3 Catalizadores	71



3.1.3.4.4	Placas de difusión	73
3.1.3.4.5	Placas bipolares	75
3.1.3.4.6	Distribución de los reactivos	75
3.1.3.4.7	Número de celdas	79
3.1.3.4.8	Conexión de las células	81
3.1.3.5.	Termodinámica de la pila de combustible.....	82
3.1.3.5.1	Primera ley de la termodinámica	82
3.1.3.5.2	Segunda ley de la termodinámica	84
3.1.3.5.3	Potenciales termodinámicos.....	85
3.1.3.5.4	Potencial de una célula de combustible	86
3.1.3.6.	Electricidad de la pila de combustible.....	89
3.1.3.7.	Gestión del agua en una pila de combustible	99
3.1.3.8.	Gestión térmica de la pila de combustible	104
3.1.3.9.	Aplicaciones de las células de combustible	107
3.1.4.	Control avanzado	108
3.1.4.1.	Control de campo orientado (FOC).....	108
3.1.4.1.1	Transformación de Clark.....	109
3.1.4.1.2	Transformación de Park.....	111
3.1.4.1.3	Tipologías de control FOC.....	112
3.1.4.1.4	Control FOC básico	113
3.1.4.1.5	Controlador PI para Flujo.....	115
3.1.4.1.6	Controlador PI para Par	117
3.1.4.1.7	Controlador PI para Velocidad	118
3.1.4.2.	Control directo de par (DTC)	120
3.1.4.2.1	Estimación del flujo y del par	123
3.1.4.2.2	Efecto de las fronteras de los controladores	125
3.1.4.2.3	Ventajas e inconvenientes del control DTC	127
3.1.4.3.	Control escalar	128

CAPÍTULO 4.- PROCEDIMIENTO 131

4.1.	Diseño del proyecto.....	131
------	--------------------------	-----

	Pág.
4.1.1. Fuente de alimentación	131
4.1.2. Convertidor.....	137
4.1.3. Inversor del sistema.....	139
4.1.4. Motor empleado	140
4.1.5. Tipología de control.....	142
4.1.6. Parámetros del vehículo	144
4.2. Procedimiento del diseño	144
4.2.1. Alimentación eléctrica y convertidor	144
4.2.2. Esquema mecánico.....	148
4.2.3. Control e inversor.....	161
4.3. Simulación digital	168
4.3.1. Alimentación eléctrica y convertidor	168
4.3.2. Esquema mecánico.....	170
4.3.3. Control e inversor.....	170
CAPÍTULO 5.- RESULTADOS DEL PROYECTO	175
5.1. Resultados de la investigación	175
5.2. Aplicaciones asociadas a las células de combustible	176
5.3. Análisis del sistema	177
CAPÍTULO 6.- ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL	179
6.1. Impacto ambiental de la realización del proyecto	179
6.2. Contenido de un estudio de impacto ambiental.....	179
6.3. Impacto ambiental de la industria del vehículo eléctrico	183
CONCLUSIONES	189
Proyectos futuros.....	190
PRESUPUESTO Y/O ANÁLISIS ECONÓMICO	191
BIBLIOGRAFÍA	193
ANEXO A	197
A1. Variables definidas en Matlab	197
A2. Par motor	198
A4. Modelo simulink ampliado	201

Índice de ilustraciones

	Pág.
Ilustración 1. -Ejemplo de control SPWM .(1)._____	34
Ilustración 2. - Proceso de un motor de reluctancia conmutada.(3). _____	37
Ilustración 3. -Representación de la conducción cuando conmuta el segundo interruptor. (4).__	37
Ilustración 4. -Convertidor clásico. _____	43
Ilustración 5. -Rotor con imanes exteriores.(8). _____	47
Ilustración 6. - Rotor interior de imanes interiores.(8)._____	47
Ilustración 7. - Rotor interior de imanes interiores tangenciales.(8). _____	48
Ilustración 8. - Rotor interior de imanes interiores radiales.(8). _____	49
Ilustración 9. -Motor con rotor en el exterior.(8). _____	49
Ilustración 10. - Proceso de histéresis.(9)._____	51
Ilustración 11. - Motor de rotor bobinado.(10). _____	53
Ilustración 12. -Motor con rotor de jaula de ardilla.(12). _____	54
Ilustración 13. - Composición del aire en la superficie terrestre. _____	60
Ilustración 14. - Esquema de funcionamiento de una célula de combustible de hidrógeno. ____	62
Ilustración 15. -Apilamiento tubular a la izquierda y apilamiento plana a la derecha_____	64
Ilustración 16. - Configuración de célula de placas bipolares verticales.(15). _____	64
Ilustración 17. - Configuración de célula de placas bipolares horizontales. (15). _____	65

	Pág.
Ilustración 18.- Configuración de célula de placas bipolares en zig-zag. (15). _____	65
Ilustración 19.- Diagrama de pila de combustible (H ₂) PEMFC. _____	66
Ilustración 20.- Diagrama de pila de combustible (CH ₃ OH) DMFC. _____	67
Ilustración 21.- Diagrama de pila de combustible (H ₂) AFC. _____	68
Ilustración 22.- Diagrama de pila de combustible (H ₂) PAFC. _____	68
Ilustración 23.- Diagrama de pila de combustible (H ₂) MCFC. _____	69
Ilustración 24.- Diagrama de pila de combustible (H ₂) SOFC. _____	69
Ilustración 25.- Diagrama de una célula de intercambio de protones. _____	70
Ilustración 26.- Esquema representativo del proceso de ionización. (15). _____	72
Ilustración 27.- Esquema gráfico de las configuraciones de ensamblaje. _____	74
Ilustración 28.- Diseño en serpentin. (15). _____	76
Ilustración 29.- Diseño en paralelo. (15). _____	76
Ilustración 30.- Diseño interdigital. (15). _____	77
Ilustración 31. Diseño en forma U o flujo inverso. _____	78
Ilustración 32.- Diseño en forma Z o de flujo paralelo. _____	79
Ilustración 33.- Criterio tradicional _____	83
Ilustración 34.- Criterio IUPAC _____	83
Ilustración 35.- Modelo de máquina térmica. _____	84



Ilustración 36.- Modelo de refrigerador. _____	85
Ilustración 37.- Potenciales termodinámicos. (15). _____	85
Ilustración 38.- Demostración de la conducción eléctrica e iónica. (15). _____	96
Ilustración 39.- Circulación del agua en una célula PEMFC. (15). _____	100
Ilustración 40.- Transformada de Clark (vista vectorial).(20). _____	110
Ilustración 41.- Representación polar y gráfica de la transformada de Park. (20). _____	112
Ilustración 42.- Esquema Simulink del control FOC general independiente.(25) _____	114
Ilustración 43.- Diagrama fasorial del control FOC. _____	114
Ilustración 44.- Lazo de control de la intensidad directa.(27). _____	116
Ilustración 45.- Lazo de control de la intensidad de cuadratura con FEM. (27). _____	117
Ilustración 46.- Lazo de control de la intensidad de cuadratura simplificado. (27). _____	118
Ilustración 47.- Control general de velocidad mediante FOC. (25). _____	119
Ilustración 48.- Lazo de control de velocidad mediante FOC. (27). _____	119
Ilustración 49.- Variación del flujo del estátor de la máquina en el primer sector.(28). _____	120
Ilustración 50.- Controlador de flujo. (28). _____	122
Ilustración 51.- Controlador de par.(28). _____	122
Ilustración 52.- Flujo del estátor con el control DTC en el sector 1. (28). _____	124
Ilustración 53.- Variación del flujo y par del control DTC. (28). _____	125

	Pág.
Ilustración 54. -Diferentes flujos del estátor con control DTC. (28). _____	126
Ilustración 55. -Corrientes del estátor con control DTC. (28). _____	126
Ilustración 56. -Curvas de funcionamiento con misma relación a diferentes frecuencias.(30). __	128
Ilustración 57. -Esquema general del control escalar. (30). _____	130
Ilustración 58. -Bloque del Simulink (Célula de combustible). _____	132
Ilustración 59. -Modelo de la célula de combustible en la simulación. _____	133
Ilustración 60. -Características de la célula de combustible seleccionada. _____	134
Ilustración 61. - Esquema en Simulink de la célula de combustible controlada. _____	135
Ilustración 62. - Características del regulador de flujo. _____	136
Ilustración 63. - Características de la pila alcalina. _____	137
Ilustración 64. - Convertidor Elevador (Boost Converter). _____	138
Ilustración 65. - Valores determinados por el usuario para el convertidor. _____	138
Ilustración 66. - Esquema de la fuente de alimentación conectada al convertidor. _____	139
Ilustración 67. -Bloque del inversor en Simulink. _____	139
Ilustración 68. -Características del inversor. _____	140
Ilustración 69. - Parámetros determinados para un motor de imanes permanentes. _____	141
Ilustración 70. -Bloque de control FOC del Simulink. _____	142
Ilustración 71. -Parámetros del control FOC. _____	143



	Pág.
Ilustración 72.- Esquema de alimentación. _____	144
Ilustración 73.- Algoritmo para los modelos de simulación de la célula de combustible. _____	145
Ilustración 74.- Modelo detallado discreto de la célula de combustible. _____	146
Ilustración 75.- Algoritmo interno de la celula de combustible. _____	146
Ilustración 76.- Función límite de absorción de oxígeno. _____	147
Ilustración 77.- Función de intensidad máxima admisible. _____	147
Ilustración 78.- Función límite de U_f . _____	147
Ilustración 79.- Presiones parciales de la célula de combustible. _____	148
Ilustración 80.- Calculador de U_f de la célula de combustible. _____	148
Ilustración 81.- Esquema mecánico mediante software (Simulink). _____	148
Ilustración 82.- Parámetros establecidos en el bloque "Solver" _____	149
Ilustración 83.- Esquema interno del vehículo. _____	150
Ilustración 84.- Propiedades generales del cuerpo del vehículo. _____	151
Ilustración 85.- Parámetros de fuerza antiparalela. _____	152
Ilustración 86.- Suspensión del vehículo. _____	153
Ilustración 87.- Criterio de prioridad de la velocidad. _____	154
Ilustración 88.- Parámetros generales de las ruedas. _____	154
Ilustración 89.- Geometría de las ruedas. _____	155

	Pág.
Ilustración 90.- Parámetros dinámicos del cuerpo. _____	155
Ilustración 91.- Parámetros de rodaje. _____	156
Ilustración 92.- Umbral de velocidad límite del vehículo. _____	157
Ilustración 93.- Numero de marchas del vehículo. _____	157
Ilustración 94.- Variables prioritarias de la caja de cambios. _____	158
Ilustración 95.- Viento medio en contra (m/s). _____	158
Ilustración 96.- Pendiente de carretera. _____	159
Ilustración 97.- Relación del diferencial del vehículo. _____	159
Ilustración 98.- Pérdidas ocasionadas por el diferencial. _____	160
Ilustración 99.- Pérdidas de viscosidad en el diferencial. _____	161
Ilustración 100.- Inercia ejercida por el diferencial. _____	161
Ilustración 101.- Esquema de control mediante software (Simulink). _____	162
Ilustración 102.- Inversor. _____	163
Ilustración 103.- Calculo de la intensidad. _____	163
Ilustración 104.- Aspectos generales del control FOC. _____	164
Ilustración 105.- Bucle exterior del control FOC. _____	164
Ilustración 106.- Bucle interno del control FOC. _____	165
Ilustración 107.- Aspectos del PWM del control FOC. _____	166



	Pág.
Ilustración 108.- Aspectos generales del PID. _____	166
Ilustración 109.- Valores de inicio del PID. _____	167
Ilustración 110.- Saturación de salida del PID. _____	167
Ilustración 111.- Tipología de datos del PID. _____	168
Ilustración 112.- Atributos de estado del control PID. _____	168
Ilustración 113.- Valores de velocidad en función de tiempos discretos. _____	171
Ilustración 114.- Valores de pendiente. _____	172
Ilustración 115.- Esquema del ensamblado completo (Simulink). _____	175
Ilustración 116.- Matriculaciones de turismos eléctricos en enero de 2018 y 2019.(32). _____	185
Ilustración 117.- Impacto ambiental de los vehículos. (32). _____	185
Ilustración 118.- Modelo del diseño ampliado en Simulink. _____	201

Índice de gráficas

Gráfica 1.- Curva característica Por-Velocidad de un motor de reluctancia conmutada.(4).	_____ 41
Gráfica 2.- Energía de activación en función de la existencia del catalizador. (15).	_____ 72
Gráfica 3.- Regiones de comportamiento ideal de una celula.(17).	_____ 80
Gráfica 4.- Regiones de comportamiento de las celulas de combustible. (15).	_____ 89
Gráfica 5.- Pérdidas eléctricas en las células de combustible PEMFC. (15).	_____ 98
Gráfica 6.- Señales trifásicas de tensión de línea.	_____ 109
Gráfica 7.- Transformada de Clark de un sistema de tensiones de línea.	_____ 111
Gráfica 8.- Representación del ángulo de referencia.(21)	_____ 112
Gráfica 9.- Curva Tensión-Corriente de la célula de combustible.	_____ 135
Gráfica 10.- Curva Potencia-Corriente de la célula de combustible.	_____ 135
Gráfica 11.- Relación tensión-tiempo a la salida del convertidor elevador.	_____ 169
Gráfica 12.- Velocidad en función del tiempo del vehículo con motor ideal.	_____ 170
Gráfica 13.- Relación velocidad angular en rpm respecto el tiempo.	_____ 171
Gráfica 14.- Velocidad del vehículo con velocidades discretas.	_____ 172
Gráfica 15.- Valores de velocidad en función de la pendiente.	_____ 173
Gráfica 16.- Señal de salida del sistema ensamblado (velocidad respecto al tiempo del vehículo).	176
Gráfica 17.- Tiempo de autonomía del vehículo eléctrico.	_____ 177



Pág.

Gráfica 18.- Intensidades de directa y cuadratura. _____ 177

Gráfica 19.- Par motor y control por PI. _____ 178

Índice de tablas

	Pág.
Tabla 1.- Valores generales de tensión y densidad de corriente de las células de combustible. ___	80
Tabla 2.- Valores de entalpía y entropía de la reacción del agua. _____	87
Tabla 3.- Propiedades de algunos fluidos. (15). _____	107
Tabla 4.- Tipos y características de las diferentes células de combustible (19)._____	108
Tabla 5.- Influencia de los vectores de tensión sobre el flujo y el par. _____	121
Tabla 6.- Configuración óptima de conmutación _____	121
Tabla 7.- Funcionamiento del control de flujo. _____	122
Tabla 8.- Funcionamiento del control de par _____	122
Tabla 10.- Tipificación de los impactos ambientales considerando los distintos atributos. ____	181
Tabla 11.- Factores que caracterizan el impacto ambiental. _____	182
Tabla 12.- Criterio de prioridad de cuantificación y cualidad. _____	183
Tabla 13.- Presupuesto medio para vehículos eléctricos monovolúmenes. _____	191

Capítulo 1.-Prefacio

Este proyecto ha sido realizado para aquellos que les motiva la tecnología y se atreven a dar un paso más allá en las energías limpias. No solo está pensado para gente de altos conocimientos, sino también, para estudiantes con ganas de aprender un poco más sobre la ingeniería actual.

1.1. Origen del trabajo

El inicio de este proyecto comenzó por tomar la mayor complejidad del grado académico en la Universidad Politécnica de Cataluña y plasmarla en un trabajo. Se plantearon varios proyectos al inicio, con una gran variedad de docentes. Finalmente se decidió por abarcar no solo una materia, sino globalizarlas todas, requiriendo así un modelo complejo para su elaboración.

1.2. Motivación

La motivación del autor recae en que en la actualidad se está comenzando a optimizar las energías limpias. La tecnología avanza a pasos agigantados, por ello ser alguien de los que se encuentra en ese cambio radical enciende una motivación que va a la par de ser un investigador o desarrollador. De la misma manera da pie a poder demostrar temas que no se han elaborado en la carrera y que aun así se acomodan a lo que sí se ha dado, concluyendo en un proyecto completo de alto conocimiento.

1.3. Requerimientos previos

Para poder comprender este proyecto el lector requiere de conocimientos científicos tecnológicos básicos, más allá de esto, se ofrece un capítulo sobre la teoría más específica en la cual se redacta una amplia gama de conocimientos en profundidad para poder llegar a comprender el objetivo del estudio.

Al mismo tiempo, el proyecto está elaborado de tal manera que se pueda comprender lo que se está realizando, pero no es suficiente para proyectar las analogías requeridas a un lector sin un nivel mínimo de esta modalidad de ciencias tecnológicas capaz de plasmar un proyecto parecido o similar. En este caso concreto el lector podría realizar únicamente ligeras modificaciones de este modelo, no crear uno paralelo, mientras que un individuo con un nivel superior podría, por ejemplo, realizar este proyecto con otro vehículo, difiriendo del actual que se presenta.

Capítulo 2.- Introducción

Dentro de la energía renovable aún se sigue buscando la más alta eficiencia en los sistemas, para conseguir dicha eficiencia es necesario controlar el proceso de manera la cual se tome el mejor rendimiento de todos los elementos. El presente proyecto consta sobre el control de un motor de corriente alterna de un vehículo eléctrico asociado a una célula de combustible con unas características determinadas por el componente físico del que se dispondrá en la parte experimental de dicho trabajo. El sistema general será simulado y analizado mediante el software matemático “Matlab” desde el cual se diseñará todo el esquema incorporando: flujos de aire, control variable, fricciones, etc.

2.1. Objetivos del trabajo

Lo más importante para determinar un buen proyecto es tener bien definido cuáles son los temas a cumplir y las metas que se quieren alcanzar. Por ello, se determinan diferentes objetivos en función de su impacto en el proyecto.

2.1.1. Objetivos principales

El objetivo principal del proyecto es elaborar un modelo de la cadena de alimentación a un motor eléctrico con una célula de combustible para poder testear estrategias de control, aplicando los conocimientos necesarios sobre la electrónica de potencia y asimismo los de las células de combustibles, las cuales tendrán unas propiedades específicas comerciales. Para optar por la mejor eficiencia, se aplicará sobre software, el sistema donde los componentes serán ideales. Sin embargo, se tomarán los mismos componentes con sus características mercantiles, para a la vez que se realiza el proyecto se pueda hacer un seguimiento e ir comprobando que todo va según corresponde.

2.1.2. Objetivos secundarios

Por otro lado, como se trabaja sobre varios factores de la ingeniería, uno de los objetivos menos relevante, será el realizar una implementación a una actividad específica. Se conectará un modelo simulado de un vehículo. Con esto se consigue un proyecto final de vehículo eléctrico alimentado por una célula de combustible.

2.2. Alcance del trabajo

Lo más importante para enfrentarse a una situación compleja en la que lo más probable es no saber por dónde comenzar, es tener unos buenos cimientos de conocimientos relacionados a lo que se pretende proyectar. Es por eso que el proyecto se divide en varias fases la primera viene relacionada a la teoría necesaria para poder llegar a entender las posibles situaciones potenciales a futuro de los problemas que se podrían llegar a causar en los diferentes componentes de nuestro sistema.

Seguidamente viene la fase del procedimiento, cómo se abarca el proyecto. Qué hay que hacer para ensamblar los diferentes elementos a un único sistema y que funcione correctamente.

Y para finalizar, la última fase que será el análisis del trabajo realizado, resultados ha dado el sistema, saber si es óptimo o no y observar si aún se podría mejorar todavía más.

Capítulo 3.- Teoría básica

3.1. Teoría previa asociada al proyecto

Como ya se ha mencionado anteriormente, ésta es la primera fase se explica el funcionamiento básico tanto de los elementos que se han utilizado como de los componentes alternativos que suelen encontrarse en este tipo de aplicaciones, para facilitar al lector no avanzado, la posibilidad de evaluar modelos alternativos a los presentados en este proyecto, donde se explica la teoría necesaria relacionada a los diferentes componentes del sistema, para que cualquier lector sea capaz de entender qué se ha hecho. El orden de los componentes o sistemas no están en prioridad debido a que el sistema no podría funcionar si cualquiera de los siguientes apartados faltase.

3.1.1. Electrónica de Potencia

Esto es una rama de la ingeniería tanto eléctrica como electrónica. Es la encargada de gestionar energía al gusto del usuario. Dentro de la electrónica de potencia se explicará cómo son las funcionalidades de los componentes circuitales tales como las bobinas, los condensadores, los potenciadores...

Por otra parte, no sólo se citarán de componentes, también se repasará lo que son los controles y distribuciones en los esquemas como la modulación por ancho de pulsos (PWM o SPWM).

El control PWM conlleva un funcionamiento muy sencillo. Consiste en la implementación de pulsos a una señal, sea sinusoidal o cuadrada, para que tome como ciclo de trabajo la parte positiva del ancho de banda de los pulsos. Este ancho es variable al gusto del individuo, es decir si se varía la variable (Duty Cycle) se variará el ancho de los pulsos.

Como se comentó previamente en la electrónica de potencia existen diferentes controles. Sin embargo, destacaremos la modulación senoidal del ancho de pulsos (SPWM). Este control se realiza con señales moduladoras sinusoidales y produce que se desplace la distorsión a mayor frecuencia y por ello los filtros se verán simplificados

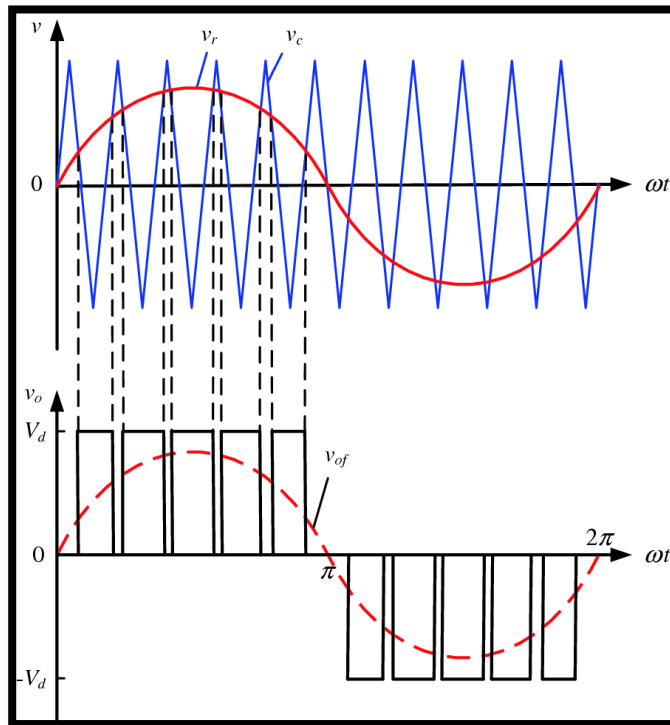


Ilustración 1.-Ejemplo de control SPWM .(1).

Este es uno de los muchos ejemplos que existen para controles SPWM, en este caso concreto la señal roja corresponde a una moduladora sinusoidal, mientras que la señal azul corresponde a una portadora triangular. Según como esté distribuido el esquema eléctrico el control modulado podrá ser únicamente positivo de rango entre 0 y la tensión de entrada, bien podrá ser positivo y negativo, donde el rango toma como punto de referencia la mitad de la tensión de entrada, siendo así que la gráfica se divide simétricamente en la parte superior de 0 a la tensión de entrada entre 2, y negativamente de 0 a menos la tensión de entrada entre 2. Visualizando la ilustración 1 estos valores corresponderían a la variable $\pm V_d$.

Para conocer cómo es la modulación se tienen que tener en consideración tanto la amplitud de las señales como su frecuencia de trabajo. Así se definen la modulación de amplitud que tiene como relación las amplitudes de las señales de la moduladora y de la portadora, mientras que la modulación de frecuencia se hace mediante las frecuencias de éstas, de la siguiente manera:

$$m_a = \frac{V_{\text{moduladora}}}{V_{\text{portadora}}}$$

$$m_f = \frac{f_{\text{portadora}}}{f_{\text{moduladora}}}$$

Si se supone que la frecuencia de la portadora es mucho mayor que de la moduladora, se estima que la tensión de salida es constante en cada ciclo, siendo un valor positivo $V_{DC}/2$ y un valor negativo el simétrico vertical.

Por otro lado, los armónicos de la tensión en bornes a la salida del inversor aparecen como barras de la frecuencia de conmutación y múltiplos. Este criterio es válido para cuando la modulación frecuencial es mayor de 9 y cuando la potencia no es elevada. Para el caso general, se puede llegar a decir que la amplitud de los armónicos es independiente de la modulación frecuencial. Sin embargo, indica en donde se encuentran los paquetes de armónicos siguiendo la siguiente ecuación cíclica:

$$f_s = (jm_f \pm k)f$$

Donde:

f_s es la frecuencia del armónico correspondiente al paquete de armónicos.

k número entero cualquiera.

j índice de modulación.

Cuando el valor del índice de modulación es impar solo aparecen armónicos para k pares, y viceversa. Lo más óptimo es que la modulación frecuencial sea un entero impar. Así se consigue una simetría de media onda. Por ello, la tensión en bornes a la salida producirá que desaparezcan los paquetes de armónicos de orden par, debido a que en el proceso de cálculo se utiliza Fourier y debido a esto solo existirán los términos en función seno.

Para la selección de los valores de modulación lo más importante es que la mejor opción para la modulación frecuencial sea lo más alta posible. Esto se debe a que los paquetes de armónicos aparecen a frecuencias elevadas, lo cual facilita el filtrado. Por ello que se suele optar por frecuencias superiores a 20 kHz o por el caso contrario en potencias elevadas este rango será menor de 6 kHz. Por ello se ha tomado como valor crítico el 21.

Si la modulación es baja, menor de 21 las señales de la portadora y de la moduladora deben estar sincronizadas. Para conseguir esto se requiere que la modulación frecuencial sea un valor entero, preferiblemente impar como se comentó previamente para aprovechar la simetría de la señal. Además las señales de la tensión de la moduladora y de la portadora tienen que tener una pendiente polarmente opuestas y coincidentes en su paso por 0.

Por otro lado, si la modulación frecuencial es elevada (superior a 21) las amplitudes de los armónicos laterales de un mismo paquete son despreciables. Por tanto, si el valor de la modulación frecuencial es

elevado se puede dejar fija la frecuencia de la portadora y variar la frecuencia de la moduladora, pero si la carga es un motor, no debe emplearse el modo asíncrono dado que aunque no aparezcan armónicos con mucha amplitud, sí que pueden generarse corrientes elevadas indeseables.

A parte de lo mencionado anteriormente, todo ello con modulación de amplitud lineal (valor de la relación, menor a la unidad) también puede ocurrir que se tenga una modulación de amplitud mayor a la unidad. En este caso se habla de sobremodulación, el problema que conlleva es que aparecen más armónicos y a frecuencias más bajas que con modulación de amplitud lineal. Para este caso de funcionamiento se recomienda que las máquinas eléctricas sean síncronas, pero se debe evitar en sistemas donde la alimentación no sea continua para conseguir evitar lo máximo posible la distorsión del voltaje a la salida. La modulación de amplitud queda limitada a que tiene que ser menor a cuatro veces la inversa del número pi. Para valores mayores a ese criterio el concepto de PWM se degenera en una onda cuadrada.

3.1.2. Máquinas eléctricas

Dentro de este apartado, se comentarán las máquinas mecánicas eléctricas rotativas, también conocidas más coloquialmente como motores eléctricos, estos son los elementos encargados de transformar en energía cinética la energía adquirida por la célula de combustible del vehículo eléctrico para permitir el desplazamiento mediante iteraciones electromagnéticas.

Hay diferentes tipos de motores eléctricos, de los cuales se debe conocer su aplicación óptima en función de su actividad relativa. En lista tenemos los motores síncronos de reluctancia variable, los motores síncronos de imanes permanentes, los motores sin escobillas de imanes permanentes, los motores asíncronos, etc. Cada uno de estos tienen sus peculiaridades. Por ello se tienen que conocer los límites de trabajo y se recuerda que se está trabajando en el ámbito del automovilismo.

3.1.2.1. Motores síncronos de reluctancia variable

Los motores síncronos de reluctancia variable, o conmutada más comúnmente conocidos, son las máquinas eléctricas donde la producción del par motor y el movimiento resultante son la causa de reluctancia variable que se encuentra en el entrehierro localizado más específicamente entre el rotor y el estátor. Su funcionamiento consiste en que cuando una fase del estátor se energiza, se genera un campo magnético y aparece un par reluctante producido por la posterior tendencia del rotor a desplazarse hacia donde exista la mínima reluctancia posible. Este proceso es análogo a la fuerza que atrae el metal hacia el electroimán. Estas máquinas eléctricas se diferencian de los motores que trabajan en corriente continua, donde en estos casos el movimiento del motor se produce por la actuación de dos

campos magnéticos, el campo generado por el rotor y el campo generado por el estátor. Para comprender correctamente el funcionamiento de los motores síncronos de reluctancia variable se aplicará la teoría a un motor de tres fases que tenga por ejemplo 6 polos en el estátor y 4 polos en el rotor. (2)

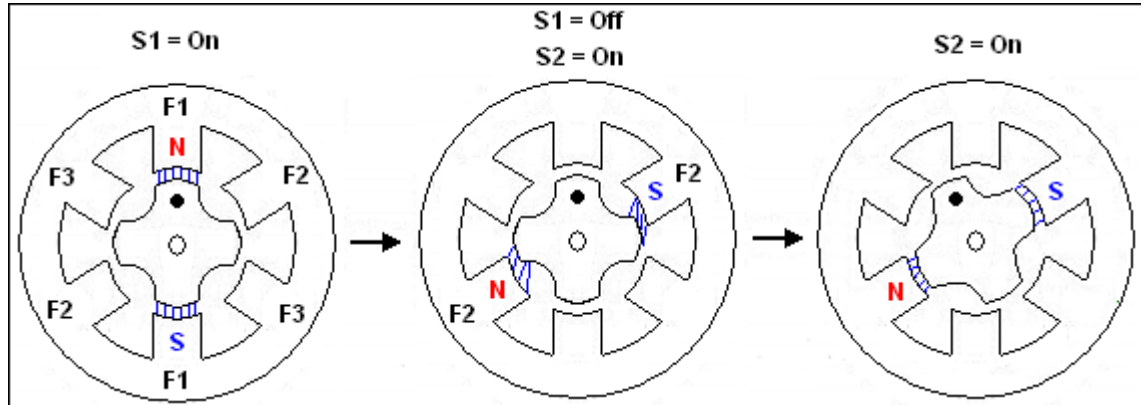


Ilustración 2.- Proceso de un motor de reluctancia conmutada. (3).

Como se puede apreciar en la imagen previa el cambio de fase se realiza mediante las corrientes generadas por el convertidor, esta conmutación de las corrientes, viene determinada por un juego lógico de interruptores, o más técnicamente hablando la conmutación viene dada por el convertidor (Buck, Boost o Buck-Boost). La secuencia de conmutación de los interruptores está controlada por la posición del rotor a través de sensores magnéticos u ópticos. Es debido a esto que el par se produce al movimiento del rotor intentando conseguir la menor reluctancia posible independientemente del sentido de la corriente.

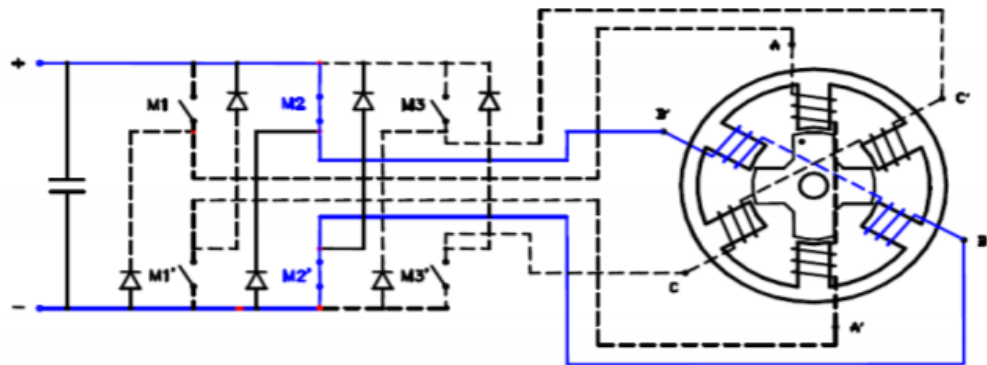


Ilustración 3.- Representación de la conducción cuando conmuta el segundo interruptor. (4).

Visualizando la ilustración previa, hace falta recalcar que en ningún momento del proceso pueden estar más de una fase conectada, es decir si el proceso de conmutación está cuando la actuación de los interruptores de la fase 2, los interruptores de las otras dos fases no pueden estar conectados. En

cambio, sí que pueden estar todos los interruptores apagados, en este caso el convertidor estaría trabajando en modo de conducción discontinua (MCD).

Tomando como punto de referencia que el rotor del motor gira en el mismo sentido que las agujas del reloj, en el mismo instante de tiempo donde el polo del rotor empieza el recubrimiento del polo del estátor, se genera una señal ocasionada por los sensores de posición que producen el cierre automático de los interruptores de la conmutación, excitando así su fase, es decir cuando se cierran los interruptores de la primera fase excitarán la fase AA'. La conducción se prolonga a lo largo de un ángulo de paso, calculado de la siguiente manera.

$$\varepsilon = \frac{360}{m \cdot p_r} = \frac{360}{3 \cdot 4} = 30^\circ$$

Donde:

ε es el ángulo de paso en grados.

m es el número de fases.

p_r son el número de polos en el rotor.

Siguiendo con el ejemplo anterior ahora los interruptores se abren, o dejan de conducir, por lo que ahora es el momento donde los diodos se ponen a funcionar, produciendo así una tensión negativa en los bornes de la misma fase (AA') la cual obliga a la corriente a ser nula y pasa a excitarse la siguiente fase BB'. Durante el siguiente ángulo de paso la intensidad circula por la misma fase mientras se hace nula por los diodos. Posteriormente se realiza el mismo proceso para la fase CC' para así completar un paso polar del rotor.

Este ciclo se irá repitiendo en bucle excitando en el mismo orden las fases. Por otro lado, la frecuencia de conmutación de estas fases para determinar una velocidad viene determinada por la siguiente ecuación.

$$f = \frac{N \cdot p_r}{60}$$

Donde:

f es la frecuencia de conmutación en Hz.

N es la velocidad en rpm.

p_r son el número de polos en el rotor.

3.1.2.1.1 Estructura de la máquina eléctrica

La estructura de una máquina eléctrica de reluctancia conmutada o variable es un accionamiento electromecánico, sin escobillas, sin colector de delgas, sin devanado eléctrico en el rotor y sin imanes permanentes. En los polos del estátor se encuentran las bobinas conectadas entre sí, en serie y a pares una frente a la opuesta, formando las fases de la máquina eléctrica. Las configuraciones más habituales en la actualidad son 6/4 (6 polos en el estátor y 4 polos en el rotor), 12/8 para sistemas trifásicos, 8/6 y 16/12 para sistemas tetrafásicos y 10/8 para los pentafásicos.

En el interior de las máquinas eléctricas el número de polos que se han diseñado en el rotor deberán conseguir que no exista una alineación con los polos del estátor, debido a que el rotor se encargará de alcanzar el siguiente polo del estátor más próximo para poder moverse. Si existe esta alineación el recorrido es nulo, por ello no existiría movimiento en la máquina.(4).

$$p_s = 2 \cdot k \cdot m$$

$$p_r = 2 \cdot k \cdot (m \pm 1)$$

Donde:

p_s es el numero de polos en el estátor.

p_r es el numero de polos en el rotor.

k es un numero entero cualquiera.

m es el numero de fases del motor.

De la misma manera si se busca cual es la frecuencia de conmutación de una fase del motor, la ecuación es así:

$$f = \frac{N \cdot p_r}{60}$$

Donde:

f es la frecuencia de conmutación en Hz.

N es la velocidad en rpm.

p_r es el numero de polos en el rotor.

Y finalmente, otro factor importante es la resolución, número de conmutaciones necesarias para dar una vuelta completa calculándose como el múltiplo del número de fases del motor, por el número de polos del estátor.

$$s = m \cdot p_s$$

Donde:

s es la resolución.

m es el numero de fases del motor.

p_s es el numero de polos en el estátor.

3.1.2.1.2 Producción del Par motor

El par motor en una máquina de reluctancia variable viene definido por la relación de las inductancias en las fases de la máquina eléctrica y de sus intensidades representadas de la siguiente manera en forma de ecuación en un régimen de no saturación.(4)

$$T = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial L}{\partial \theta} \cdot i^2$$

Donde:

$\frac{\partial L}{\partial \theta}$ es la variación de la inductancia en función de la posición.

i es la intensidad por fase.

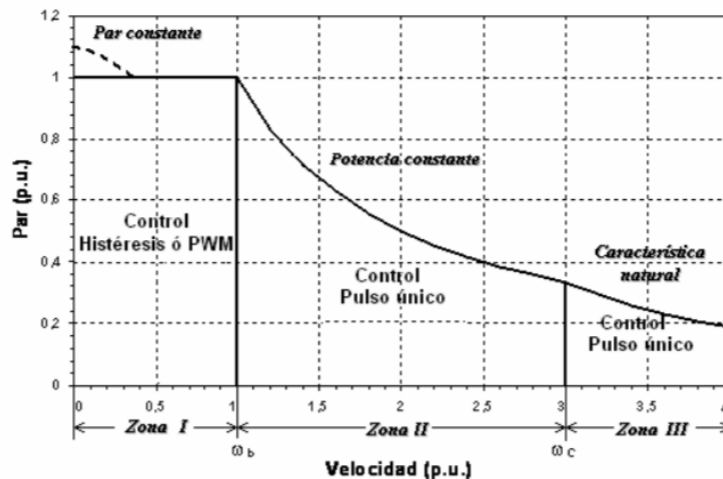
De esta misma relación se desarrolla que el signo del par motor es indiferente del signo de las intensidades en las fases de la máquina, es debido a esto que en la industria se trabaje con accionamientos unidireccionales. Sin embargo, hay que tener en cuenta que en la zona de crecimiento del bobinado se crea un par motor positivo mientras que en la zona de decrecimiento el par es negativo.

Finalmente, en los motores de reluctancia variable tiene que existir un par que obligue a la correcta funcionalidad de giro. Antes de que el par sea nulo por su alineamiento en los polos, se deben conectar

la siguiente fase conmutando los interruptores correspondientes para que el giro sea en el mismo sentido que la anterior variación de fase causando así que en este tipo de motores el par sea por naturaleza pulsante y aparezca un rizado notable a la hora de su comportamiento y lectura.

3.1.2.1.3 Características Par-Velocidad

La curva característica de una máquina de reluctancia variable se puede dividir en tres zonas de funcionamiento que pueden tomarse por separado o conjuntamente en un mismo accionamiento eléctrico. Dentro de la zona delimitada por esta característica podrá señalarse el punto de trabajo de la máquina.



Gráfica 1.-Curva característica Par-Velocidad de un motor de reluctancia conmutada.(4).

Como se ha mencionado anteriormente la curva característica se divide en tres zonas según su funcionamiento. La primera es donde el motor de reluctancia conmutada trabaja a par constante. La segunda zona el par se vuelve inversamente proporcional a la velocidad, pero mantiene en este caso la potencia constante. Finalmente, la última zona es la zona denominada como zona natural, en este fragmento el par es inversamente proporcional al cuadrado de la velocidad.

Asimismo, en la curva característica se diferencian dos tipologías de velocidades críticas.

La velocidad base es la velocidad más alta donde el voltaje máximo consigue el par nominal. Antes de conseguir esta velocidad el par es constante, incluso si esta velocidad es relativamente baja, el par puede aumentar manteniendo el voltaje constante, y como consecuencia al aparecer pocas pérdidas

en el hierro aumenta la intensidad. Mientras que, por otro lado, está también la velocidad característica, cuando el motor ya no funciona a potencia constante y comienza la característica natural de la zona III del motor de reluctancia variable. (4).

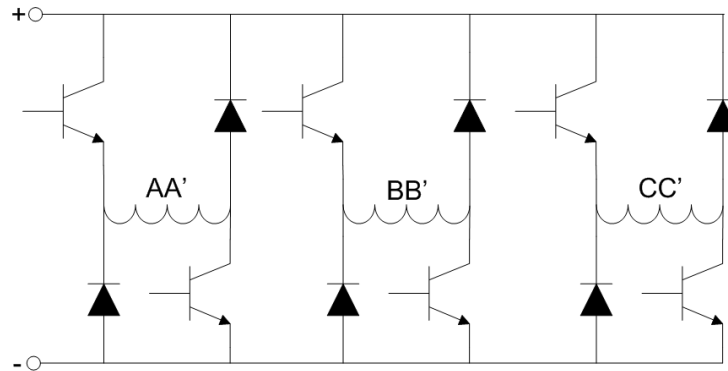
3.1.2.1.4 Convertidor clásico para los motores de reluctancia conmutada

Para poder regular y controlar un motor, sea de reluctancia conmutada u otra tipología llevarán siempre conectados convertidores para realizar dicha función. Estos convertidores son compuestos de elementos circuitales que gestionan el flujo de energía a la salida. Estos convertidores pueden llegar a ser de hasta cuatro cuadrantes (bloqueo bidireccional y corriente bidireccional), El número de cuadrantes irá en función de la aplicación a la que se someta el sistema. Por ejemplo, si es el convertidor de una batería recargable, este necesita estrictamente que sea de cuatro cuadrantes, mientras que si es de un motor que únicamente circula en un único sentido el convertidor podría ser de dos cuadrantes.

El objetivo de estos convertidores electrónicos es, en función de la potencia de entrada tomando un control con los interruptores de tal manera que se modifique la conmutación de ellos, sacar una potencia de salida determinada para la aplicación. Este funcionamiento consiste en ir variando las conmutaciones de los interruptores de las ramas del convertidor equitativamente para conseguir una señal uniforme siguiendo un determinado patrón de encendido y apagado. Debido a esto se pueden cambiar diferentes variables del sistema como las tensiones, intensidades, par motor, etc.

De la misma manera las funciones de los convertidores, se resumen en conseguir efectuar las correspondientes conmutaciones de los interruptores en el orden establecido por el usuario en el control. Estos interruptores serán transistores IGBT o MOSFET, siempre en función de la magnitud del voltaje en el que se trabaje. Asimismo, también tienen como función el asegurarse de eliminar toda la magnetización de las fases del motor. La intensidad en una fase de un motor de reluctancia conmutada es unipolar, por ello solo se requiere de un único interruptor por fase para hacer a la conmutación. Esta desmagnetización se realiza en el instante de tiempo en el cual el interruptor de la fase no circula, por lo que lo hará el diodo del convertidor con una resistencia en serie, provocando una caída de tensión en sentido contrario en la fase anulando la intensidad. (4).

La composición de este convertidor es simple, tiene tantas ramas en paralelo como fases tenga el motor, y en cada rama existen dos dualidades de transistor junto al diodo en paralelo tal y como se muestra en la figura siguiente.



Il·lustració 4.-Convertidor clàssic.

Visualizando la imagen se pueden llegar a encontrar cinco diferentes tipologías en el circuito con las conmutaciones correspondientes.

- En el instante de tiempo en el que los cuatro interruptores por rama están abiertos, la tensión es nula.
- Cuando los dos transistores están cerrados existe una circulación de energía, siendo la tensión aplicada la de entrada en positivo.
- Si un transistor y su diodo correspondiente, que se encuentra en serie, están circuitalmente conectados, provocan un cortocircuito en el motor, en este caso la intensidad sigue el mismo sentido que antes. Sin embargo, la energía almacenada en la bobina se disipa, esta transición se le conoce por fase de libre circulación donde la tensión queda anulada.
- Con los interruptores complementarios de la rama sucedería lo mismo que en el caso anterior.
- El último caso sería en el modo de no conducción, donde los transistores estarán apagados, mientras que los diodos seguirán funcionando, en este caso, se tiene un sentido de corriente que se mantiene igual en la carga, pero el valor de tensión que se lee, es el voltaje de entrada con signo negativo.

En dichos motores la intensidad se conmuta a través del bobinado las cuales tienen el trabajo de crear el campo magnético rotativo atrayéndose los polos entre sí para crear un par de fuerza que los alimenta estos motores son muy robustos ofreciendo un alto par, son bastante económicos.

3.1.2.1.5 Aplicaciones de uso

Actualmente los motores de reluctancia variable se enfocan para aplicaciones de media y gran potencia alimentadas desde la red para así conseguir una óptima fiabilidad, un buen rendimiento, un alto par de arranque y que sean insensibles al ruido. Estos motores son muy típicos debido a sus múltiples aplicaciones como por ejemplo en vehículos eléctricos, electrodomésticos, procesadores de comida, etc.

Con el tiempo y trabajo se podrían conseguir llevarlos también al ámbito de la robótica industrial donde los procesos requieren trabajar a par o potencia constantes.

3.1.2.1.6 Ventajas e inconvenientes

Tomando como referencia lo anterior a continuación se comentarán las ventajas y desventajas que conllevan los motores de reluctancia conmutable, empezando por las ventajas lo primero a comentar es que la máquina eléctrica tiene una estructura mecánica muy sencilla a la par que robusta, y sin embargo el coste no es elevado debido a que no llevan incorporados imanes permanentes, escobillas ni conmutadores en su sistema. Dicho esto, queda que el estátor está compuesto en una serie de láminas de metal apiladas formando la estructura de polos salientes.

El rotor es una pieza de acero que forma al mismo tiempo la estructura de los polos salientes. Otras ventajas a tener en consideración es que puede conectarse una amplia gama de tipologías de convertidores para un correcto funcionamiento. Estas máquinas aportan una alta fiabilidad a la hora de demandar una alta densidad de potencia. Su rendimiento es equiparable a los motores convencionales de alterna y al mismo tiempo puede adoptar un elevado par motor a velocidades bajas. Este par puede llegar a ser mayor que los producidos por motores de inducción, con las mismas condiciones de velocidad baja, aunque sigue siendo más pequeño que el que aportan los de imanes permanentes.

Por otro lado, se encuentra la estructura mencionada anteriormente. Las máquinas de reluctancia conmutada son simples y robustas como si de un motor convencional se tratara, por ello es perfectos para aplicaciones donde la temperatura de trabajo sea elevada o donde exista mucha vibración. De la misma manera si ocurre un problema eléctrico, como por ejemplo un cortocircuito en las fases del motor, esta máquina estará más protegida debido a que no tiene los imanes permanentes a la par de que estos motores pueden seguir funcionando si como mínimo existe una fase utilizable, aunque el rendimiento decaería en picado. (4).

Otra ventaja es que el rango de velocidades de los motores de reluctancia conmutada es muy amplio. su curva característica se asemeja a la de un motor AC con un control vectorial donde el par es lo mayor posible a las menores velocidad, y cuando la velocidad es alta la potencia se vuelve constante. De la misma manera su momento de inercia es mínimo por la falta de masa en los dientes del rotor de la máquina debido a que no existen bobinados ni imanes permanentes. Teniendo en consideración su peso, la relación potencia por unidad de masa es más pequeña que la de los motores convencionales. Siguiendo este criterio también se tiene en cuenta el coste de esta tipología de motores, resulta que incluyendo su conjunto de convertidores el precio del motor es bajo si se compara con otros tipos de máquinas eléctricas que no sean de reluctancia conmutada. Y finalmente las pérdidas en estos motores de reluctancia conmutada son muy bajas. El calor generado es únicamente del estátor que debido a que esta inmóvil su refrigeración es fácil, por ello pueden trabajar a altas temperaturas tal y como se comentó previamente. Asimismo, estas máquinas no requieren de un campo de excitación continuo porque las fases toman energía únicamente cuando sea necesario, no como las máquinas de imanes permanentes. (4).

En cambio, no se utilizan solo estos motores en la actualidad, debido a que también tienen sus inconvenientes. Por ejemplo, para conseguir la velocidad de sincronismo es necesario conocer la posición exacta del rotor para las diferentes fases, por ello se integran sensores lo cual ocasiona un incremento en el coste de la máquina eléctrica a parte de un aumento de complejidad en el sistema concluyendo un déficit de fiabilidad.

Otra desventaja que tienen estos motores es que el rizado del par motor es mucho mayor que en cualquier otro modelo de máquina. Debido a esto existe mucha vibración y ruido acústico que limita las aplicaciones de uso, para poder reducir estos factores se elabora un diseño mecánico más rígido y un control óptimo que los reduzcan a valores estándares.

Y por último, la constitución de los polos salientes es mayor para poder producir un par motor reluctante, de la misma manera tal y como se observó en la curva característica cuando la máquina opera a régimen de saturación produce campos magnéticos no lineales dificultando así el análisis y el accionamiento eléctrico del motor.

3.1.2.2. Motores síncronos de imanes permanentes.

Los motores síncronos de imanes permanentes son unas máquinas con una estructura compuesta por un estátor fijo, un rotor móvil y un espacio de aire entre ellos denominado como entrehierro. Para poder conseguir un movimiento con estas piezas, tanto el estátor como el rotor están sometidos magnéticamente a través de un campo entre sí. El estátor está hecho, de una cantidad limitada por el usuario, de placas ferromagnéticas apiladas en el mismo eje vectorial, contando al mismo tiempo con un

juego de inductancias polifásicas de corriente alterna. Por otro lado, está el rotor que, aunque también sea de un material ferromagnético este es el que tiene como objetivo generar un campo magnético. El bobinado de los motores convencionales ahora es sustituido por lo que se denominaron imanes permanentes. Esto se debió a que las máquinas convencionales no tenían tanta eficiencia porque resultaban la aparición de una consideración de pérdidas por culpa del colector de delgas debido a que producían rozamiento y se necesitaba mucho más mantenimiento que los motores de imanes permanentes. Al implementar los imanes en estos sistemas se alcanza una mejor eficiencia y el coste monetario del mantenimiento decae por el ahorro de los devanados.(5)

3.1.2.2.1 Clasificación de motores brushless.

En el mundo de la industria, estos motores se pueden dividir en dos grupos fundamentales, los cuales son los motores brushless DC y los AC. Estos dependen únicamente en una separación por el tipo de alimentación de corriente continua y alterna respectivamente. De la misma manera este último, los motores brushless AC son lo comúnmente conocidos por motores de imanes permanentes en el ámbito de la industria.

Entrando en mayor detalle los motores brushless DC son aquellos que se alimentan mediante el estátor con una señal en forma cuadrada para conseguir la fuerza contraelectromotriz de esa misma forma de onda. El control de este tipo de máquina se realiza aplicando un inversor a la entrada y conmutando los diferentes interruptores para captar la tensión de entrada al motor determinada por el usuario. Esta regulación es sencilla, concluyendo es que el coste monetario es muy bajo, pero sin embargo aparecen rizados en el par electromagnético.

Por otro lado, los motores de imanes permanentes, tienen como finalidad una evolución en la señal de alimentación sinusoidal, a la par que la fuerza contraelectromotriz. Comparándolo con el anterior este desarrolla un menor rizado en el par, una densidad de campo magnético en el entrehierro mucho mayor y una mejor eficiencia.(6)

Ahora bien, dentro de las configuraciones de alimentación en alterna también existen otras configuraciones a la hora del diseño de la estructura.

- Rotor interno con imanes exteriores.

En esta configuración tal y como indica su nombre, los imanes permanentes se encuentran en el exterior del rotor, son simplemente unas piezas conectadas adhesivamente al rotor, el cual es también ferromagnético, al mismo tiempo en esta estructura los imanes tienen que ser de una alta densidad de energía e inducción remanente como por ejemplo imanes de Samario Cobalto.

Debido a que la permeabilidad relativa del imán es muy similar a la del aire por sus propiedades magnéticas, las líneas de campos pueden circular tanto por los imanes como por el aire que se encuentra en el entrehierro, es por ello que no se puede aumentar el campo magnético añadiendo más imanes que los diseñados para el motor. Desde la perspectiva ferromagnética el rotor sería liso donde el entrehierro sería constante y las reactancias directas y de cuadratura son parecidas.(7)

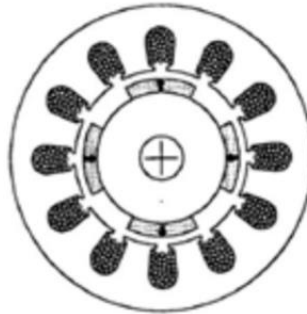


Ilustración 5.-Rotor con imanes exteriores.(8).

Por otro lado, el espacio del entrehierro toma la proporcionalidad de la reluctancia causando que en esta tipología de máquinas sea un poco elevado concluyendo así en una menor inductancia e intensidades de cortocircuito superiores. Sin embargo, hay un gran inconveniente en estos motores, los imanes pueden llegar a desmagnetarse si se les aplica corrientes inductivas.

- Rotor interno con imanes interiores.

Esta configuración conlleva que los imanes se encuentren en los huecos del interior del rotor siguiendo la estructura cilíndrica de éste. Al contrario que los imanes exteriores, los interiores requieren de poca densidad de energía e inducción remanente. Normalmente estos imanes bastan con que sean de ferrita, cuyo campo magnético alcanza 0,4 Teslas resultando que el precio del motor no se eleve. Sin embargo, el montaje resulta más complejo que con los imanes exteriores.

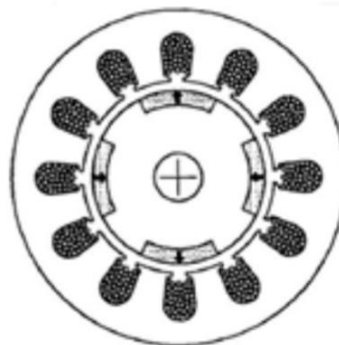


Ilustración 6.- Rotor interior de imanes interiores.(8).

En este caso la permeabilidad del material es mucho más baja. Diferenciado con el caso anterior las reactancias directas y de cuadratura resultan muy dispares concluyendo que ésta última es mucho mayor que la directa en su comparación. Debido a su estructura, gracias a que los imanes se encuentran en el interior, se consigue un entrehierro más pequeño, permitiendo así que esta tipología de motores alcance velocidades mucho más elevadas. Queda como resultado un motor mucho más robusto capaz de competir con los motores de polos salientes.

- Rotor interno con imanes interiores tangenciales.

En este caso las variaciones respecto a los imanes interiores no son muy dispares. Sin embargo, las configuraciones hacen que varíen algunos factores, como la forma de los imanes. En esta configuración los imanes tienen que ser necesariamente rectangulares lo que conlleva unas ventajas y desventajas. Al estar más en el interior del rotor, asegura el calor generado por la máquina y al mismo tiempo al estar más separados de la superficie están más protegidos de la desmagnetización parcial generando menos pérdidas de efecto Foucault. Por las mismas circunstancias, se producen menos pérdidas, también se produce menos densidad de flujo en el entrehierro y como la forma de estos es cuadrada, se suma, a que la onda resultante no queda tan sinusoidal.



Ilustración 7.- Rotor interior de imanes interiores tangenciales.(8).

- Rotor interno con imanes interiores radiales.

Esta tipología tiene los imanes cuadrados, en cambio la distribución es ligeramente diferente. En este caso concreto los imanes están localizados desde casi la superficie del rotor hasta el interior, provocando que la densidad de flujo magnético sea radial. La reluctancia aumenta considerablemente, provocando un aumento de las intensidades para una misma potencia generada.

Del mismo modo, en las bobinas que se encuentran en el estátor la dispersión de flujo es casi nula, sin tener en consideración los extremos colindantes al entrehierro donde sí que aparece esta dispersión.

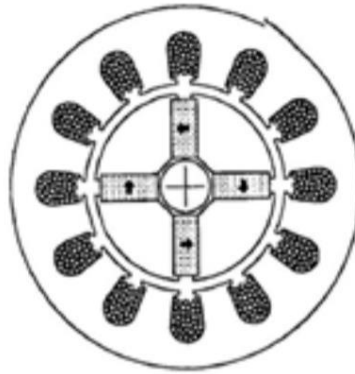


Ilustración 8.- Rotor interior de imanes interiores radiales.(8).

- Rotor externo

El rotor de este motor se encuentra en el exterior del sistema electromagnético. Esta tipología de motores suele usarse en vehículos en movimiento, como una moto, o simplemente un patinete eléctrico de la actualidad. En este último caso para que sea más intuitivo hay que mencionar que el estátor sería parte de la estructura del patinete (chasis), mientras que el rotor tomaría la función de la llanta de una rueda. Simplemente con este cambio se consigue que el sistema de motor sea mucho más adaptable y compacto a la hora del diseño del patinete. También tiene como ventaja que el ruido sonoro disminuya y al mismo tiempo en los períodos de arranque se reducen los picos de consumo energético, por ello el consumo de energía es mucho menor.

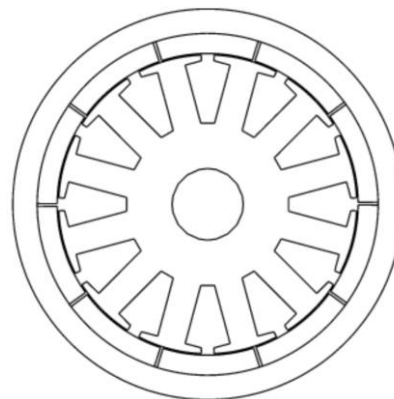


Ilustración 9.- Motor con rotor en el exterior.(8).

3.1.2.2.2 Pérdidas en los motores de imanes permanentes

Las pérdidas en motores de imanes permanentes se clasifican en pérdidas en el cobre, pérdidas en el hierro, pérdidas magnéticas y pérdidas mecánicas. Por ello, como conclusión a la potencia eléctrica absorbida, habrá que eliminar las pérdidas mencionadas previamente para conseguir la magnitud de la potencia útil del motor.

- Pérdidas en el cobre.

Normalmente estas pérdidas son las mayores y las que hay que tener más en consideración a la hora de realizar cálculos. Estas pérdidas son las denominadas pérdidas por efecto Joules, es decir que se puede aplicar con el cálculo de la potencia haciendo uso de la resistencia y la corriente.

$$P_{cu} = R_{fase} \cdot I^2$$

Donde:

P_{cu} son las pérdidas en el cobre.

R_{fase} es la resistencia del devanado por cada fase expresada en ohmios.

I es la intensidad en amperios.

Si la resistencia no está como dato en los cálculos se puede determinar así:

$$R_{fase} = \frac{L}{\sigma_{cu} \cdot S}$$

Donde:

L es la longitud del cobre de la fase en metros.

σ_{cu} es la conductividad del cobre.

S es la sección del conductor expresado en mm^2 .

Con estas ecuaciones ya se podrían calcular las pérdidas en el cobre teniendo en cuenta que la conductividad del cobre variará con la temperatura. Sin embargo, hay que tener en consideración el efecto pelicular, el cual es ocasionado por la circulación de corriente alterna en los conductores. Este efecto, en resumen, provoca que la resistencia vaya aumentando conforme lo hace la frecuencia.

- Pérdidas en el hierro.

Las pérdidas en el hierro son las ocasionadas por el núcleo magnético del motor. Estas pérdidas van aumentando a medida que la velocidad aumenta debido al efecto de histéresis y corrientes de Foucault. La histéresis es producida en unos pocos materiales ferromagnéticos en los cuales lo que sucede es que en el momento en el que se deja de inducir un campo magnético en el

material donde se ha inducido aun quedaría magnetismo por ello. Para poder anular este magnetismo se induce corriente en sentido contrario hasta llegar a ser el campo magnético del material nulo.

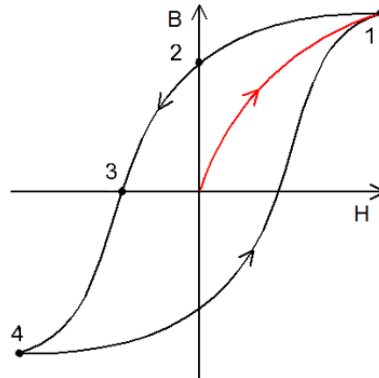


Ilustración 10.- Proceso de histéresis.(9).

Previsualizando la anterior imagen queda con mayor claridad lo explicado anteriormente, siguiendo con la ilustración el eje de abscisa es el correspondiente a la intensidad de campo magnético, mientras que el eje de coordenadas hace referencia a la densidad de flujo magnético.

La primera parte del proceso corresponde a la línea roja en la cual induciendo corriente ésta genera un campo magnético hasta alcanzar el punto 1. Posteriormente, la intensidad queda reducida a 0 alcanzando el punto 2 de la imagen. A continuación, interesa que el magnetismo sea nulo, por ello se induce la intensidad en sentido contrario hasta alcanzar dicho punto correspondiente al número 3. Finalmente el objetivo es llegar al mismo valor que en el punto 1, pero en sentido contrario, quedando así un sistema en bucle tomando como referencia los cuatro puntos.

- Pérdidas magnéticas.
Las pérdidas en los imanes son causa de dos factores muy comunes y de los que hay que tener mucho cuidado: la temperatura y las corrientes Foucault. El magnetismo de un material se va degradando a la par que su temperatura aumenta, que en este caso van de la mano con las corrientes de Foucault, debido a que son éstas las que ocasionan estos sobrecalentamientos. El principal problema de éstos es que podría llegar a darse el caso de que la magnetización perdida sea irreversible.
- Pérdidas mecánicas.
Estas pérdidas son aquellas ocasionadas por el rozamiento interno de la máquina.



3.1.2.2.3 Ventajas y desventajas

El uso de motores de imanes permanentes tiene como ventajas principales la inexistencia del devanado que excita en el rotor, por ello se pueden omitir las pérdidas eléctricas que no llegan a ocasionar en el cobre del rotor, concluyendo una mejor eficiencia del motor. Del mismo modo al no tener escobillas ni anillos rozantes el mantenimiento se vuelve más sencillo y menos costoso. Su estructura es mucho más compacta debido a su sencilla constitución porque el tamaño de los imanes, como se comentó con anterioridad, no beneficia ni perjudica al nivel de inducción magnética de manera que existe la posibilidad de aumentar el número de polos sin agrandar el paso polar. Como hay una mayor densidad de potencia aumenta el par, sobre todo a bajas velocidades. Los flujos de dispersión y distorsión quedan limitados, igual que el ruido de estos motores que queda muy reducido de la misma manera que las vibraciones.

Pero, por otro lado, existen los inconvenientes de que el montaje puede ser muy complejo, en función de la tipología para su aplicación. Los campos magnéticos no se pueden regular directamente debido a que los imanes permanentes son los causantes de esta generación, necesitando así un control de debilitamiento de campo, por ello, su control tampoco queda sencillo, resultando una tarea compleja.

3.1.2.3. Motores asíncronos

Como se ha ido mencionando a lo largo de las diferentes tipologías de máquinas eléctricas donde más se hace hincapié es en las piezas más esenciales: el rotor y el estátor. Este caso concreto los motores asíncronos o también conocidos como motores de inducción, se dividen en dos grupos por su estructura del rotor. Estas máquinas pueden tener el rotor liso o devanado. Un motor de inducción está hecho por un estátor y un rotor montado sobre cojinetes.

- Rotor liso

Un rotor liso o comúnmente conocido jaula de ardilla es un motor que está constituido por unas ranuras en la superficie para el paso de las barras conductoras conectadas en cortocircuito con unos anillos.

- Rotor devanado

Este consta con un arrollamiento trifásico como reflujo simétrico del devanado del estátor. Las tres fases del rotor normalmente se conectan en estrella y los extremos se conectan a unos anillos sobre el eje, al mismo tiempo los devanados de este tipo de rotor se pueden poner en cortocircuito mediante la aplicación de escobillas que están en contacto con dichos anillos.

3.1.2.3.1 Estátor del motor de inducción

Por otra parte, se encuentra el estátor de las máquinas de inducción, como se ha mencionado en la tipología de rotor devanado. Consta con un devanado trifásico arrollado a un núcleo compacto de hierro el cual es el encargado de producir el campo magnético de la máquina para su funcionamiento. Este devanado es prácticamente igual al de las máquinas eléctricas síncronas. En cambio, el rotor no cumple esa condición, en los motores de inducción el bobinado del rotor está en cortocircuito.

El estátor se realiza con una pieza de acero perforado como un cilindro hueco donde se situará el rotor. Conlleva un devanado distribuido en las tres fases de la máquina por las ranuras que se encuentran en la superficie. Estas bobinas constan con dos mitades situadas diagonalmente opuestas tomando como referencia el estátor. Por ello, como están distribuidas por fases se separarán tantos grados sea prescindible como para que la distancia entre ellos sea equitativa, es decir si consta de 3 fases la separación respecto a una vuelta entera (360°), la separación quedaría en 120° , una respecto a las otra. Para así cuando la corriente circule, se induzca un campo magnético lo más uniforme posible.

3.1.2.3.2 Motor de rotor bobinado

Entrando en mayor detalle con la tipología de rotor, comenzando con la máquina de rotor de bobinado, esta está compuesta por dos piezas montables, las cuales son el estátor como devanado de cobre arrollado en una pieza maciza de hierro que tiene como objetivo producir un campo magnético rotativo en el motor, mientras que por otro lado se encuentra el devanado del núcleo compuesto por un eje gíatorio, un par de cojinetes, unas placas de cobre denominadas anillos rozantes, etc.

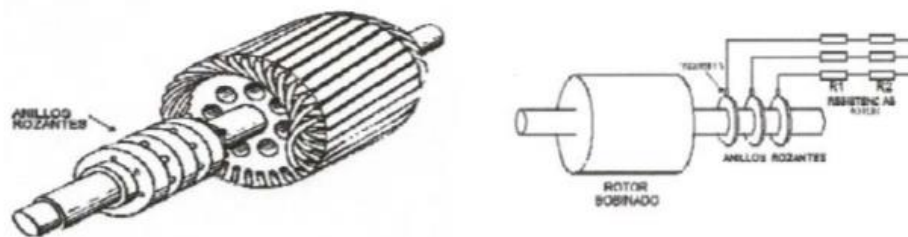


Ilustración 11.- Motor de rotor bobinado.(10).

Esta tipología de motores, es en el rotor donde se inserta el bobinado. Éste se puede llegar a conectar con el exterior mediante el uso de escobillas y los anillos rozantes. Al mismo tiempo tienen la posibilidad de reducir las intensidades añadiendo resistencias en el exterior, alcanzando así en una menor saturación en el hierro y que al mismo tiempo el par motor en el arranque sea mayor. A medida que la

velocidad vaya aumentando, estas resistencias se volverán negligibles permitiendo así mantener el par alto.(11)

3.1.2.3.3 Motor de jaula de ardilla

Este motor se encuentra con un estátor es su diseño, comparándolo con el rotor bobinado, en el rotor de esta tipología las barras metálicas, no se encuentran aisladas del núcleo, se inclinan un poco (para reducir ruido y oscilaciones en el campo magnético). Para poder conectar los conductores la ranuras también se diseñan de manera oblicua próximo al paso de ranura para así reducir las variaciones del par motor y evitar que el rotor se bloquee en el arranque. Sin embargo, debido a estas inclinaciones la tensión se induce en el rotor, aumentando su resistencia y flujo de dispersión de éste.

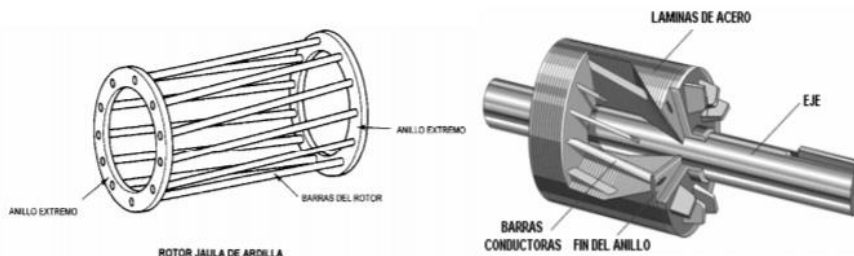


Ilustración 12.- Motor con rotor de jaula de ardilla.(12).

En el rotor se encuentran unos anillos cuyo objetivo es el de cortocircuitar las barras metálicas. Las barras visualizadas en la imagen previa son macizas de aluminio conectadas a las ranuras del rotor, siendo éstas las que están en cortocircuito mediante los anillos. Este diseño resulta muy económico monetariamente hablando y por ello son muy populares.

3.1.2.3.4 Doble jaula de ardilla

Finalmente, dentro del grupo de los motores de inducción de jaula de ardilla, se encuentra el de doble jaula, que como bien su nombre indica está compuesto por dos jaulas. Esta está prediseñada con una jaula exterior que sea de un material de una resistencia más elevada que la del interior. Cuando está en el intervalo de arranque, es decir a velocidades muy reducidas, la frecuencia de deslizamiento es elevada, mientras que la densidad de corriente tiende a viajar por la superficie exterior resultando así que la resistencia es más alta a la vez que el par motor crece. Cuando la máquina está en velocidades más elevadas la frecuencia de deslizamiento baja como consecuencia, a la par que la intensidad del rotor baja reduciendo sus pérdidas. Es decir, este tipo de motor está pensado para tener un mejor arranque que uno de inducción de una única jaula de ardilla, teniendo en cuenta el rango de potencias.

Por ello en el instante de tiempo de los arranques cuando la frecuencia es elevada e igual a la de la línea a la que está conectada la impedancia del bobinado inferior queda más notable que la del superior. Resultando que una gran parte de las intensidades del rotor se inducen en el devanado superior diseñado para soportarlo, creando así un par motor de arranque máximo. En cambio, si la máquina se acelera la frecuencia decae a la vez que la impedancia de interior, por ello cuando la máquina está en plena carga al haber un menor valor de deslizamiento se considera que el rendimiento del motor es mucho mejor por su baja pérdida en el cobre.

3.1.2.3.5 Clasificación por criterio NEMA

Para poder conocer cómo se subdividen las diferentes tipologías de motores, la Asociación Nacional del Fabricante de material Eléctrico (ANFE), ha clasificado los motores por su forma en la jaula de ardilla.

- **Jaula de ardilla clase A**
Este primer motor es el más conocido y común entre todos de la tipología de trabajo a velocidad constante. Su estructura tiene grandes ranuras para así conseguir una gran disipación de calor como refrigerante natural. En los períodos de arranque la densidad de intensidad es elevada en la superficie del rotor, mientras que en los períodos de marcha ésta se va distribuyendo uniformemente, originando así una leve resistencia y reactancia en el arranque por ello en plena carga el par motor puede llegar a alcanzar la mitad o incluso tres cuartas partes más que el par motor en período de plena carga. Al mismo tiempo aparece una aceleración veloz hasta alcanzar la velocidad nominal por su baja resistencia en el rotor a parte del añadido del par motor de arranque. Asimismo, tiene el mejor control de velocidad, sin embargo, su intensidad en el instante de arranque oscila entre cinco y siete veces más que la intensidad nominal. Esto ocasiona que no se considere óptimo para arranques conectados a línea.
- **Jaula de ardilla clase B**
Esta tipología de motores es muy similar a los anteriores debido a que también son de ámbito general por su comportamiento de deslizamiento respecto al par motor. Las ranuras de estos motores están más ajustadas con mayor profundidad ocasionando así una ligera tendencia a que la reactancia de arranque y la marcha del motor aumenten, esto ocasiona que el par motor y las intensidades de arranque disminuyan ligeramente. Las intensidades de arranque oscilan entre cuatro y cinco veces su valor nominal en máquinas de más de 5 HP, por ello esta tipología se prefiere cuando se trata de aplicaciones con mayor demanda de potencia.

- Jaula de ardilla clase C

En esta categoría se caracteriza porque su rotor ya no es único, el rotor es de doble jaula de ardilla, que como se explicó con anterioridad proporciona un gran par motor de arranque y mucha menos intensidad en este intervalo, esta tipología se implementa en sistemas donde se requiera un buen arranque pesado, debido a que por su constitución acelera velozmente. Por otro lado, aparece el inconveniente de cuando esta máquina trabaja en grandes cargas, esta limita la disipación de calor debido a que una gran parte de la intensidad se origina en el devanado superior. En acumulaciones de arranque frecuentes, el rotor tiende a sobrecalentarse. Es más recomendable a grandes cargas, pero infrecuente a pequeñas inercias. A la par de tener un deslizamiento y arranque normales, estos su deslizamiento nominal no alcanza el 5%. Estas máquinas están pensadas para industria.

- Jaula de ardilla clase D

Estas máquinas eléctricas entran en la disposición de alto par motor y resistencia. En su diseño las barras son de una aleación de una resistencia elevada y se sitúan en unas ranuras en el rotor muy próximas a la superficie. La relación de resistencia a reactancia es la más elevada hasta el momento en los intervalos de arranque. Este diseño se implementa en actividades donde el par de arranque es muy elevado, sin embargo, su control de velocidad es el peor de todas las categorías.

- Jaula de ardilla clase F

Las máquinas eléctricas de rotor clase F son muy semejantes a las de clase B. Los de clase F tienen una cuarta parte más de par motor de arranque respecto al nominal y unas corrientes entre 2 y 4 veces menos que la nominal. Su diseño es con una capacidad de 25 HP. Dada la elevada resistencia que se genera en los intervalos de arranque y marcha, el control de tensión es menor comparados con los motores de clase B, al mismo tiempo sucede que no soportan bien las sobrecargas y conllevan un rendimiento bajo, en cambio, a la hora de realizar trabajos con grandes cargas, al producir intensidades pequeñas se elimina la necesidad de equipo para tensión reducida.(12)

3.1.2.3.6 Funcionamiento

Un motor de inducción, por norma general opera únicamente como motor y se puede considerar al mismo tiempo como un transformador generalizado, debido a que ofrece fenómenos de inducción de los cuales se inducen intensidades en el rotor. Sin embargo, la diferencia con los transformadores estáticos es que la máquina de inducción conlleva movimiento produciendo que las intensidades que se inducen tengan frecuencias distintas a las intensidades del estátor.

A estos tipos de motores se les proporciona corriente alterna en los devanados del estátor, para que, mediante el proceso de inducción, las intensidades inducidas, en el rotor y así, se originen la interacción de dos campos magnéticos siendo el rotor y el estátor ocasionando un par motor electromagnético.

Como bien su nombre indica estos motores no alcanzan la velocidad de sincronismo nominal, es debido a que el flujo del estátor de la máquina de inducción se adelanta respecto al movimiento del rotor, originando así un par motor electromagnético. Hay que tener en consideración que los flujos del estátor giran en sincronismo entre ellos. Mientras que el rotor no, como se menciona anteriormente. A este fenómeno se le conoce como deslizamiento.

Tomando que el motor, arranque a tensión nominal aplicada en los terminales del estátor, éste ofrecerá un par motor de arranque que concluirá con un aumento de velocidad. En el momento en que esta velocidad aumente desde el reposo, es decir que el deslizamiento sea total, él mismo irá disminuyendo mientras que el par ira aumentando hasta que llegue al par máximo que ofrece el máximo deslizamiento. Con esto se concluye que la velocidad se eleve disminuyendo al mismo tiempo el deslizamiento y el par motor de la máquina rotativa. Ambos pares, tanto el de arranque como el correspondiente al ocasionado al valor del deslizamiento, son mayores al que se aplica en la carga. Por otro lado, la velocidad de la máquina ira en aumento resultando que el par se irá reduciendo hasta alcanzar el par aplicado donde el motor comenzará a trabajar en modo nominal hasta que el par crezca o minorice.

Cuando el rotor bloqueado se libera con el arrollamiento cerrado, este continúa girando debido a que aún conserva un flujo giratorio residual ejerciendo fuerzas tangenciales sobre los conductores. El sentido de rotación del rotor es el mismo que el del flujo giratorio de velocidad constante en relación al flujo del estátor, denominada como velocidad de sincronismo.

$$\eta_s = \frac{120 \cdot f}{p}$$

Donde.

η_s es la velocidad de sincronismo.

f es la frecuencia en Hz.

p son los polos del motor.

Cuando la máquina de inducción está en reposo, la velocidad relativa entre el flujo generado y la del rotor es igual a la velocidad de sincronismo y la fuerza contraelectromotriz inducida en el rotor es la de línea. Para realizar cálculos cuando la máquina de inducción gira a una velocidad determinada, la velocidad relativa entre el flujo y el rotor es la resta de la velocidad estipulada respecto la de sincronismo.

$$\eta_{relat} = \eta_s - \eta_x$$

Donde.

η_{relat} es la velocidad de sincronismo relativa.

η_s es la velocidad de sincronismo.

η_x es la velocidad de sincronismo estipulada.

3.1.2.3.7 Deslizamiento

Entrando en mayor detalle, en las diferentes velocidades del motor de inducción, se encuentra el denominado deslizamiento, es la consideración de las pérdidas de velocidad angular del motor, para que puedan generar un par motor electromagnético, representada por unidad de velocidad síncrona. Este factor (el deslizamiento) concede la velocidad requerida entre el flujo y la velocidad del rotor, como relación de la velocidad síncrona

En estado de reposo no existen intensidades en el rotor, por ello no aparecen fuerzas tangenciales. Una máquina de inducción no está diseñada para poder llegar a la velocidad de sincronismo, este operará con un deslizamiento asequible para inducir corriente y generar fuerza tangencial y par motor en plena carga. El deslizamiento es una variable fundamental de los motores de inducción que se encuentra en el rango de entre 0 y 1 siendo el reposo y la plena carga estos valores delimitantes.

$$0 < s < 1$$

De la misma marena existen cuatro tipologias de trabajo para los motores de inducción.

- Trabajo en vacío

Cuando la máquina de inducción trabaja en vacío el deslizamiento no alcanza al 1%, de la misma manera ni la frecuencia del motor, ni la reactancia ni la fuerza contraelectromotriz son grandes. Por ello, aunque la corriente sea tan pequeña, puede generar el mínimo par motor necesario. Como la corriente en el rotor es pequeña, la corriente del estátor es el vector suma de su intensidad de excitación requerida para generar, un flujo rotatorio en el estátor y una componente primaria inducida en el motor por el efecto del transformador.

- **Media carga**
Por otro lado, cuando el motor está operando a media carga, la velocidad de trabajo baja ligeramente, ocasionando así un leve deslizamiento y un aumento de frecuencia del rotor, reactancia y fuerza electromotriz inducida. Este crecimiento de intensidad inducida se interpreta como un aumento de la intensidad en el estátor.
- **Plena carga**
En este caso la máquina de inducción está en movimiento de tal manera que proporciona un equilibrio entre el par motor y el par generado, en el caso de sobrepasar ese equilibrio aplicando más carga ocasionaría un aumento en el deslizamiento debido a que aparece un par motor más elevado que el generado. En el momento en que al eje del motor se le imponga un par nominal, la intensidad del estátor queda aumentada comparándola con la corriente en vacío. El factor de potencia oscila entre 0,8 (motores de inducción pequeños de límite 1 HP) hasta 0,95 (motores de inducción grandes de mínimo 150 HP).
- **Sobrecarga**
Finalmente, cuando a un motor de inducción se le demanda una carga más de la prediseñada para la máquina, el deslizamiento ira creciendo conforme lo haga la carga, de la misma manera aumentan en gran medida las frecuencias y las reactancias, lo que ocasiona que el factor de potencia decaiga. Para conseguir que el par alcance la demanda, las intensidades tanto del rotor como del estátor deben aumentar, de ahí la denominación de sobrecarga.

3.1.3. Células de combustible

Las células de combustible son unos elementos encargados de producir energía eléctrica. El concepto es similar al funcionamiento de una fuente de alimentación, como podría llegar a ser una batería. Su funcionamiento consiste en producir corriente a partir del proceso de electrolisis que se produce internamente en las células de la estructura mediante la oxidación de reactivos. Las reacciones se producen con componentes moleculares de los fluidos del aire, pero no cualquier aire, sino con la composición media de la superficie terrestre donde se encontrarán las células de los vehículos. Si en un futuro se quisiera implementar en vehículos aéreos o submarinos esta composición variaría debido a su composición de gases. En este proyecto nos centraremos en células de combustible de hidrógeno. En estos casos el hidrógeno estará almacenado en tanques de almacenamiento adaptados para su recarga en subestaciones de repostaje.

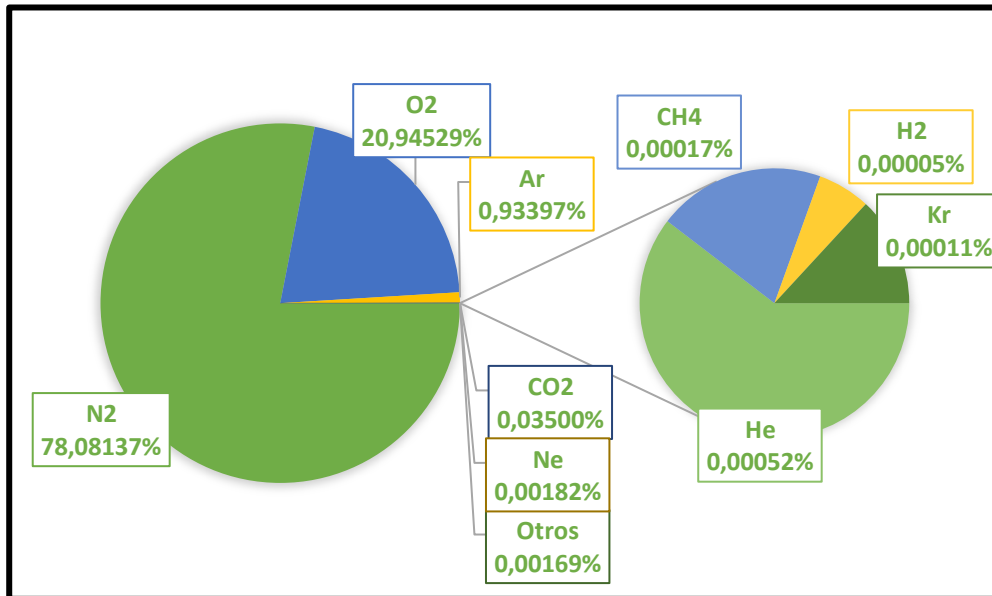


Ilustración 13.- Composición del aire en la superficie terrestre.

Como se puede observar en la ilustración 13, en el aire sobre la superficie, se encuentran varios gases, sobre todo nobles, sin embargo, para que el sistema de alimentación no genere contaminación, se busca que la reacción de fluidos sea limpia. Conociendo esto, la reacción más óptima que se puede realizar es la compuesta por el hidrógeno de los tanques y las moléculas de oxígeno que se encuentran en el aire. Esto se debe a que la reacción general dará como resultado energía eléctrica y agua como fluido residual, mejor dicho, vapor de agua.

Todo el proceso electroquímico es de muy alta eficiencia y muy bajo impacto ambiental debido a que no se producen emisiones de fluidos nocivos. Por otra parte, la diferencia más notoria con las baterías convencionales es que el combustible se consume para producir energía, así que cuando no se tiene combustible se cambian o por el contrario si son reversibles se pueden recargar, mientras que el combustible de las células de hidrógeno tiene el combustible en el exterior, por ello los reactivos se suministran como un flujo constante permitiendo un continuo abastecimiento de energía eléctrica.

3.1.3.1. Constitución de la célula de combustible

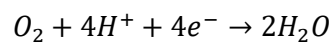
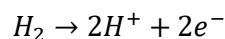
Las células de combustibles tratadas en este documento están constituidas por un tanque de fibra de carbono capaz de almacenar moléculas de hidrógeno a 750 bares de presión y una pequeña batería de iones de litio. Esta no tiene por qué ser de gran capacidad. Sin embargo, es necesario que sea muy potente, para poder cumplir los requisitos del motor eléctrico, no solo en par, sino también en los momentos de aceleración y de frenada, donde se requieren picos de intensidad para actuar con rapidez.

Por otro lado, la seguridad de las células depende de la presión que sean capaces de soportar los tanques, por ello lo más sensato es cubrir ese defecto dividiendo el tanque en varias unidades disminuyendo así la presión que se produce. Debido a este fenómeno se consigue que las células de combustible sean más seguras que los tanques de gasolina porque se consigue que se expulse el hidrógeno de manera que no explote liberándose por el aire, mientras que con el tanque de gasolina no se pueden dividir y por ello la presión pueden producir explosiones.

El resto del esqueleto del vehículo es igual para todos, es decir el motor y el tren motriz con la electrónica de potencia necesaria para su gestión.

Actualmente las células más comunes llevan una membrana de intercambio de protones de polímero fino, en el electrolito, donde se producen las reacciones químicas. Esta está entre un cátodo de platino y un ánodo.

Actualmente en la sociedad se pueden encontrar todo tipos de células de combustible, por ello a lo largo de la memoria se centrará en cómo está constituida la célula (PEMFC). Estas células de combustible están compuestas por dos electrolitos catalizadores. Estas células de combustible constan de dos electrodos catalizadores, los cuales son el ánodo y el cátodo. Asimismo, se encuentra entre ellos el electrolito que actúa simultáneamente tanto como aislante eléctrico como conductor y separador de las reacciones que se producen mediante la electrolisis en el cátodo respecto el ánodo. Conociendo esto, se implementa un circuito externo a la célula, como consecuencia de la generación de electrones para poder aislar la energía producida en corriente suministrada al resto del sistema del vehículo eléctrico. Este circuito exterior va desde el ánodo hasta el cátodo, mientras que por otro lado los protones libres del cátodo circulan internamente travesando la membrana de intercambio de protones encontrada en el electrolito. En el cátodo tanto los electrones como los protones y el comburente se reducen dando como solución química otras sustancias. Esta reacción normalmente se realiza lentamente, aunque sea espontánea, pero para evitar eso se instalan catalizadores, por ello tomamos que tanto el cátodo como el ánodo serán electrodos catalizadores. (13)



El proceso de la generación es un intercambio de protones pasando del ánodo de la celda al cátodo de la misma. En el ánodo se encuentra la entrada ininterrumpida del hidrógeno, mientras que en el cátodo se encuentra el oxígeno del aire también ininterrumpidamente, cuando estos dos fluidos entran en contacto no solo se produce energía, sino que el resultado de la reacción es agua, es por ello que se dice que no contiene gases nocivos para el ambiente. A continuación, se representa como es el proceso de producción.

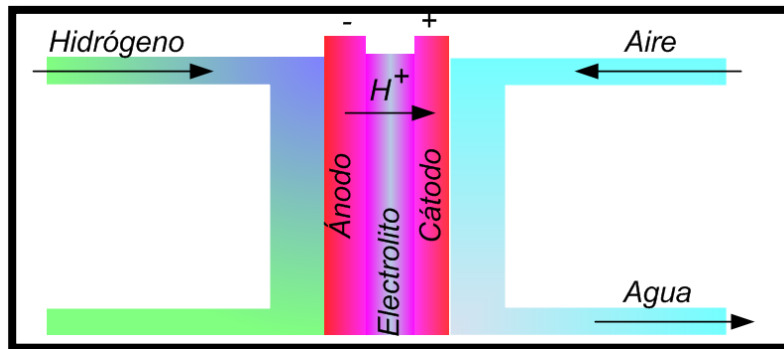


Ilustración 14.- Esquema de funcionamiento de una célula de combustible de hidrógeno.

Se puede observar cómo al realizar una reacción con las moléculas de hidrógeno y el oxígeno del aire el intercambio de protones que se produce en el electrolito provoca que los electrones dejados en el ánodo nos generen una densidad de corriente de cátodo a ánodo. Si se quiere más tensión o corriente se deben instalar diferentes celdas en serie o paralelo, sin embargo, por defecto la tensión generada por una única celda es de 1,2 voltios en circuito abierto. Químicamente hablando el ánodo es donde se oxida el combustible y el cátodo es donde el oxidante se reduce, mientras que la membrana central de polímero sólido es aquella que actúa como aislante eléctrico, como conductor protónico y como separador de las reacciones químicas entre el cátodo y el ánodo.

Los electrones separados del hidrógeno viajan por un circuito secundario, los cables del sistema eléctrico, estos serán, los cuales tengan las características físicas para transportar la corriente generada, mientras que los protones atravesarán el electrolito produciendo a la salida del cátodo la salida de los residuos como agua y los componentes comunes del aire que no tomen reacción en la célula como puede llegar a ser el nitrógeno, el argón, el dióxido de carbono, etc.

Para que los protones puedan atravesar la membrana de la célula de combustible esta tiene que estar ligeramente húmeda dado que depende de la humedad de los fluidos que entran del exterior. Estas células de combustible se pueden clasificar por el electrolito y el combustible debido a que eligiendo estos criterios tomas como referencia las reacciones que se realizaran en las células como solución y

los tipos de iones que circularan por el sistema. Actualmente las células más comunes son la de combustible de hidrógeno debido a que es un combustible que se puede tomar a partir de energías renovables o incluso combustibles fósiles, de la misma manera reacciona muy bien con las moléculas de oxígeno que se encuentran en el ambiente, lo cual constituyen el 21% del aire aproximadamente. Asimismo, tienen la capacidad de almacenarse criogénicamente de forma compacta.

3.1.3.2. Sistemas de células de combustibles.

Actualmente las células de combustible no son capaces de generar mucho potencial por si solas, es por ello que normalmente estas se agrupan en serie y/o paralelo para poder adquirir una mayor tensión en circuito abierto.

3.1.3.2.1 Celdas unitarias

Por un lado, las células de combustibles independientes solo están compuestas por un electrolito, el cual actúa como aislante eléctrico, pero a su vez como conductor iónico y separador entre electrodos. Es electrolito se puede encontrar en dos estados, en sólido y en líquido.

- Electrolito sólido. Es aquel que contiene un gran número de catalizadores y que debe estar conectado eléctrica e iónicamente a los electrodos.
- Electrolito líquido. En este caso el electrolito está en contacto con electrodos porosos donde los reactivos gaseosos se difunden a través de una capa delgada de electrolito reaccionando en la superficie de los electrodos. Sin embargo, aquí la cantidad de electrolito es limitada debido a que si supera su límite podría no permitir el transporte de fluidos gaseosos para reaccionar electroquímicamente.

Por otro lado, en las células de combustible también se encuentran los electrodos, aquí es donde se producen las reacciones electroquímicas, más específicamente en la superficie húmeda. Existen dos electrodos el ánodo en el cual el combustible se oxida y el cátodo donde el oxígeno se reduce. (14)

3.1.3.2.2 Apilamientos

Como ya se mencionó con anterioridad las células de combustible actualmente son capaces de generar una mínima tensión, por ello para poder elevar esta tensión, y conseguir aplicarla en diferentes actividades se apilan las células de diferentes maneras, para poder elevar la tensión la interconexión de células se realiza en serie, siendo con materiales conductores para que la densidad de corriente pueda circular con las mínimas pérdidas. Los apilamientos más comunes son el tubular y el plano por capas.

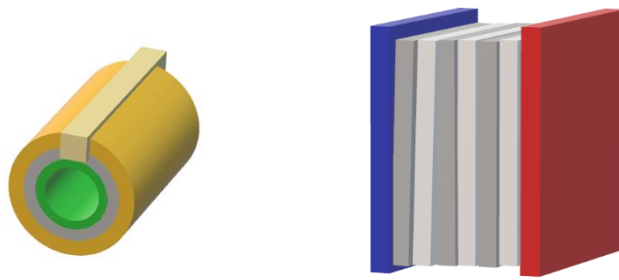


Ilustración 15.-Apilamiento tubular a la izquierda y apilamiento plana a la derecha

Dentro de los apilamientos planos se encuentran diferentes modalidades, aunque la más común dentro de las células de combustible de membrana de intercambio de protones es la de placas bipolares, sin embargo, también existen diferentes tipos de configuraciones donde la más usual es la de placas bipolares. Pero en cambio los materiales aplicados son ligeramente diferentes entre modalidades. En esta configuración una única placa bipolar está en contacto con el electrodo de una celda y con su colindante para así, dejar ambas celdas conectas en serie produciendo a su vez unas pérdidas mínimas.

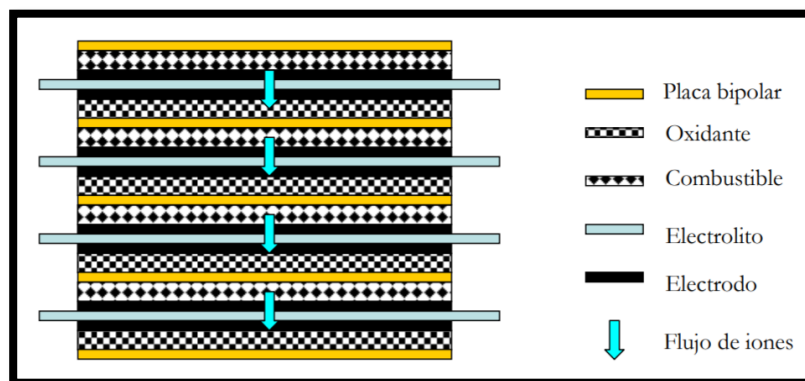


Ilustración 16.- Configuración de célula de placas bipolares verticales.(15).

Un sistema alternativo de conexión siguiendo el anterior criterio, es conectar sin agrupar las células, es decir se juntarán eléctricamente de la misma manera, pero no físicamente, esta configuración se le denomina lateral. Así como la anterior configuración está en vertical adecuada para sistemas de gran demanda de potencia, la configuración en lateral lo es para aplicaciones portátiles como por ejemplo móviles donde la potencia demandada es poca.

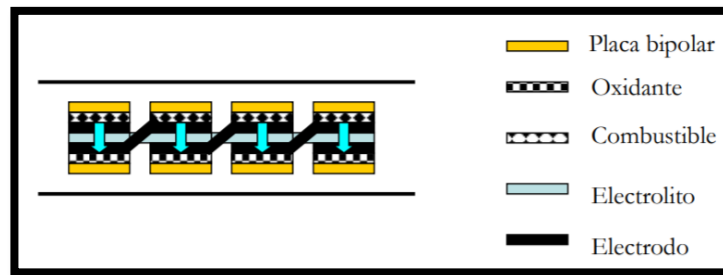


Ilustración 17.- Configuración de celda de placas bipolares horizontales. (15).

En este caso se puede observar como el cátodo de la primera celda está conectado eléctricamente con el ánodo de la segunda atravesando el electrolito. Como se mencionó anteriormente este sistema ocupa mucho menos espacio que un apilamiento vertical común, sin embargo, a cada acción se opone una reacción, por lo que no todo son ventajas. La principal desventaja es la conexión en sí misma, si la interconexión entre electrodos se realiza rodeando el electrolito en vez de atravesándolo requiriendo conductores más largos, esto supondría un aumento en las pérdidas resistivas.

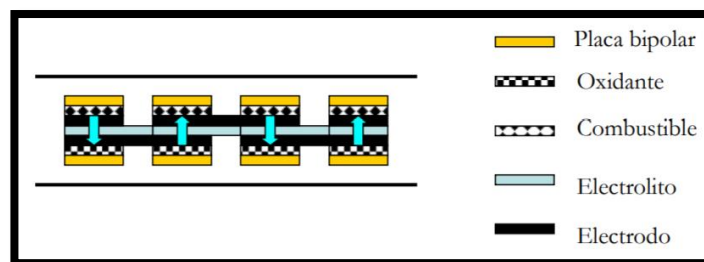


Ilustración 18.- Configuración de celda de placas bipolares en zig-zag. (15).

Por otro lado, si se considera que invertimos las celdas no colindantes se consigue reducir la longitud de los conductores y así mismo seguir con el mismo criterio que la configuración lateral, pero en este caso se le llama configuración en zig-zag. En este modelo el ánodo de la primera se conecta al ánodo de la segunda, de tal manera que la orientación de la celda se invierte produciendo así un zig-zag entre celdas. Debido a la complejidad de este sistema hay que tener en cuenta una diversidad de factores como son: el tamaño, el peso, volumen, costes, temperatura de operación, gestión del agua, humidificación, presiones, tipo de pila y almacenamiento.

3.1.3.3. Tipos de células de combustible

Como se ha estado mencionando a lo largo de este proyecto en la actualidad existen diferentes tipos de células de combustible. Eso no quiere decir que se explique únicamente una, en este apartado se comentaran las características de las más conocidas, comenzando por la más utilizada hasta la fecha.

3.1.3.3.1 Pila de combustible de membrana de intercambio protónico

Este tipo de pila es la más utilizada de todas las que existen debido a sus inmensas aplicaciones en el ámbito de la industria. Las células de combustible de membrana de intercambio protónico, se les denomina así por utilizar una malla porosa entre los electrodos, lugar donde se realiza el intercambio de protones, estos protones se producen de la ionización del combustible. Los electrones separados de las moléculas del hidrógeno circulan por un sistema externo a la célula, mientras que los iones del hidrógeno (los protones) atraviesan el electrolito enlazándose químicamente con las moléculas del oxígeno del aire. El resultado de este enlace produce vapor de agua, lo cual será su fluido residual.

Estas células de combustibles se les conoce por "PEM" (Proton Exchange Membrane), se utilizan en muchas actividades porque son capaces de operar a temperaturas bajas (tratándose de células alrededor de 90 °C), asimismo tienen una alta densidad de potencia y a su vez tienen la capacidad de variar rápidamente su potencia de salida para acatar la demanda. Este tipo de pila se recomienda en aplicaciones que requieran una respuesta rápida en su sistema, por ello es muy común verlo en telecomunicaciones. Además tienen la posibilidad de tomar como combustible hidrógeno, metanol o combustibles reformados.

En esta configuración el electrolito es un polímero sólido que contiene ácido sulfónico perfluorado que debe estar constantemente húmedos para poder favorecer la transmisión de protones al cátodo. Es por esto que la temperatura queda limitada a estar por debajo de la ebullición. (16)

Los inconvenientes en este nivel son reducir el coste y aumentar la eficiencia, mejorar las prestaciones de la membrana polimérica y encontrar un material alternativo al grafito para la placa bipolar, que sea lo más resistente a la corrosión, más ligero y más económico. (16)

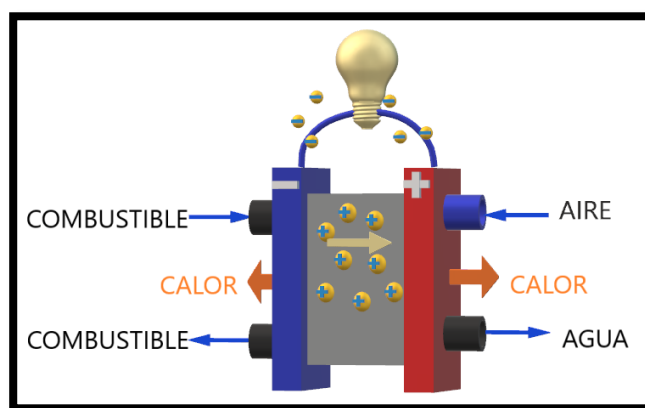


Ilustración 19.- Diagrama de pila de combustible (H₂) PEMFC.

Por otro lado, se encuentran las pilas de combustible de metanol, conocidas como DMFC, estas al igual que las anteriores, las PEMFC, usan una membrana de polímero como electrolito, sin embargo, el combustible no tiene por qué pasar por un reformador debido a que el ánodo catalizador ya será capaz de producir la ionización del hidrógeno al metanol líquido. La gran ventaja en este tipo de pilas es su baja temperatura de trabajo, permitiendo así que sean implementadas en sistemas como la telefonía móvil, portátiles, cargadores de batería...

Pero el mayor problema es aumentar el rango de temperatura de trabajo, el objetivo actual en este tipo de pilas es superar los 130 °C y que no presente problemas de crossover (paso del reactante anódico al comportamiento catódico a través de la membrana) y buscar un catalizador anódico que reaccione mejor con la oxidación directa del metanol.

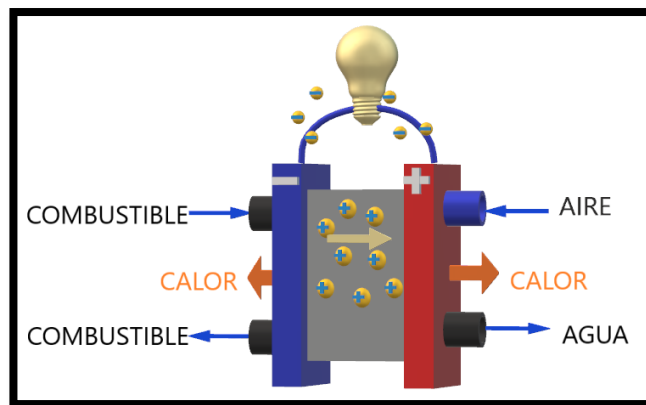


Ilustración 20.- Diagrama de pila de combustible (CH₃OH) DMFC.

Otra de las pilas más conocidas, son las de combustible alcalino (AFC). Este tipo puede llegar a ser peligroso debido a que por sus reacciones la solución general produce fluidos nocivos para el ser humano, en estas células el combustible tiene que ser hidrógeno puro, a la par que el oxidante, que tiene que ser oxígeno puro. En este caso particular el electrolito es una solución de hidróxido de potasio en agua produciendo así una solución general de carbonato potásico que en pequeñas dosis ya es nocivo, es debido a esto que se suele utilizar este tipo de pilas en las aplicaciones submarinistas o espaciales. Estas pilas aportan una mayor eficiencia, a lo visto anteriormente.

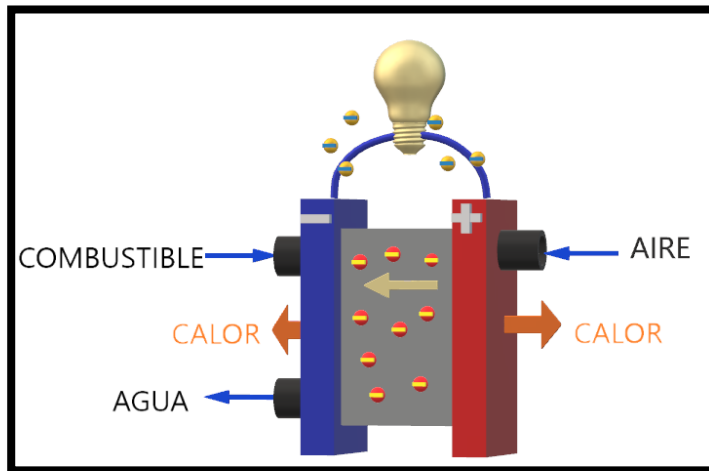


Ilustración 21.- Diagrama de pila de combustible (H₂) AFC.

Las pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC) tienen como electrolito ácido fosfórico líquido, a su vez usan como combustibles hidrocarburos o biogás, es por ello que las reacciones son muy parecidas a las PEMFC, pero la temperatura de trabajo es más elevada que en estas y al mismo tiempo toleran mejor las impurezas del combustible. De la misma manera se utilizan para cubrir grandes demandas de energía, como por ejemplo edificios residenciales.

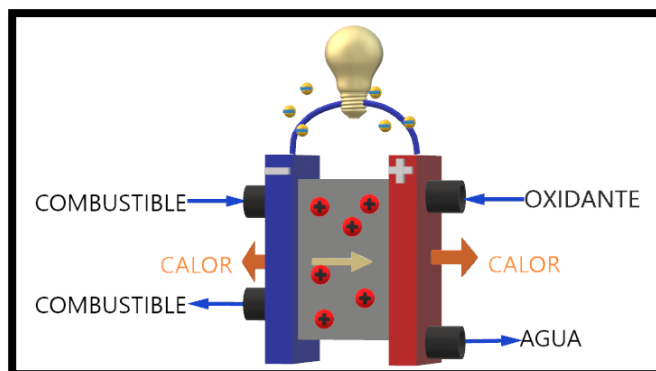


Ilustración 22.- Diagrama de pila de combustible (H₂) PAFC.

Dentro de las células más conocidas, se encuentran las de combustible de carbonato fundido (MCFC). Tienen incorporado un electrolito de carbonato alcalino sobre una matriz cerámica, en cambio los electrodos difieren del resto que hemos visto, estos no son de platino como en las PEMFC. Este tipo de pilas opera a altas temperaturas (sobre los 650 °C). La conversión del combustible a hidrógeno se realiza en el mismo interior de la pila, estas tienen la ventaja de no contaminarse ni con dióxido de carbono ni con monóxido de carbono, por ello pueden utilizarse combustibles procedentes del carbón, como podría ser óxido de carbono.

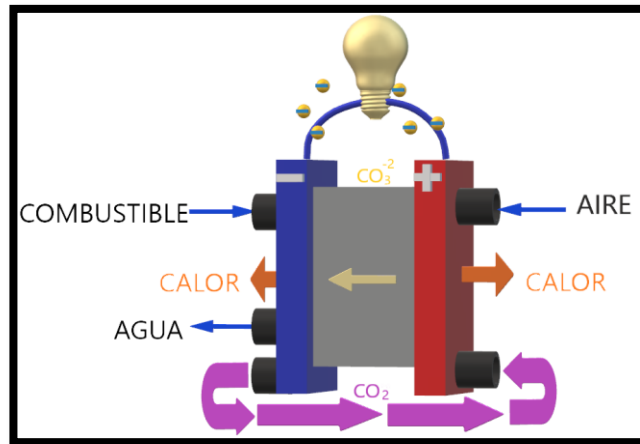


Ilustración 23.- Diagrama de pila de combustible (H₂) MCFC.

Por último, de las pilas más conocidas, se encuentran las de combustible de óxido sólido, estas son las que a mayor temperatura operan de todas las que se han visto, trabajan alrededor de los 800 y 1000°C. Asimismo el rendimiento de estas puede llegar al 60%, lo cual es muy cercano al teórico de las pilas. Estas pilas de alta temperatura están diseñadas para reconstruir hidrocarburos ligeros, tales como el gas natural, internamente. Aunque si se quisiera emplear hidrocarburos más pesados, como la gasolina, bastaría con introducir en el sistema un reformador externo encargado únicamente de este trabajo.

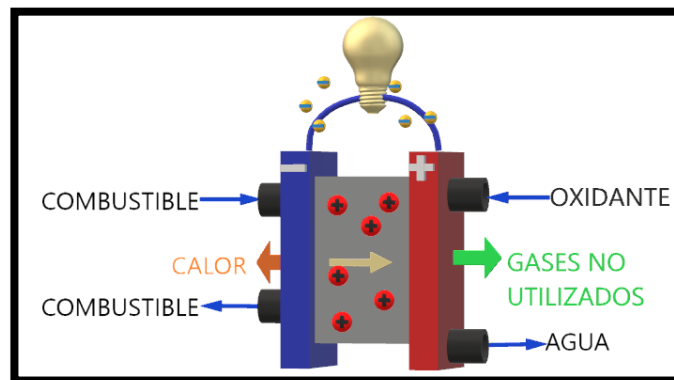


Ilustración 24.- Diagrama de pila de combustible (H₂) SOFC.

3.1.3.4. Célula de combustible PEM

Como este proyecto va a tratar una célula de combustible PEM, se entrará con más detalle en sus atributos y generalidades. Se recuerda que de todas las existentes en la sociedad esta es la más óptima en el ámbito de la automoción. Es una pila con un esquema y funcionamiento sencillo, las moléculas de hidrógeno son entregadas al ánodo mediante un tanque recargable en subestaciones, mientras que

el oxígeno puro, o bien el del ambiente, es entregado al cátodo. En cambio, ambos fluidos se introducen a través de canales de las placas bipolares distribuyéndose mediante el difusor de gas.

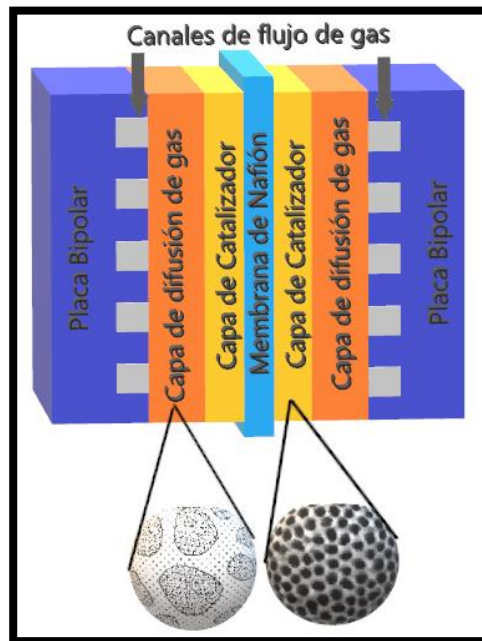


Ilustración 25.- Diagrama de una célula de intercambio de protones.

Como se puede apreciar, tanto la capa de difusión como la capa de los catalizadores tienen macro y microporos respectivamente para así los gases reactivos que han atravesado la capa de difusión se encuentren con el catalizador compuesto por aleaciones metálicas basadas en platino. Una vez las moléculas del combustible se han disociado los electrones libres viajan por un circuito eléctrico externo para alimentar la carga que esté conectada mientras que los protones libres del hidrógeno ionizado atraviesan la membrana hasta encontrarse con el cátodo, donde reaccionando químicamente mediante un enlace iónico producen agua como fluido residual.

3.1.3.4.1 Membrana de intercambio

Como se ha ido mencionando con anterioridad las células de combustibles se pueden clasificar en función de un componente, el electrolito, dentro de las células clasificadas como intercambio de protones estas tienen un electrolito en forma de membrana de un grosor de entre 75 y 150 micras (comercialmente este elemento se le conoce como Nafion, y es un derivado del Teflón utilizado mayoritariamente en tuberías de agua). El objetivo fundamental de este componente es el de aislar los gases reactivos, pero a su vez se un conductor iónico internamente en la célula.

3.1.3.4.2 Proceso crossover

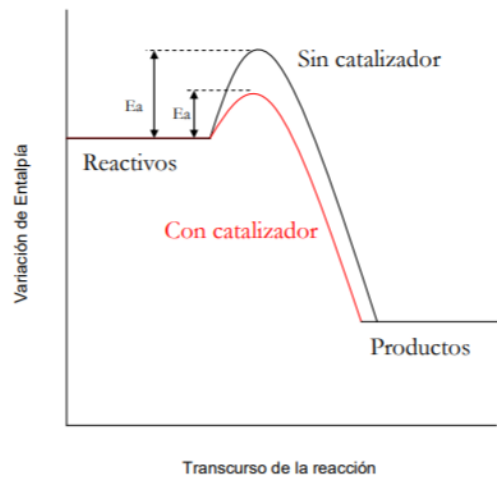
Pese a que, como se ha mencionado, el electrolito no tiene contacto con los electrones, debido a que estos circulan por el exterior. Existen un pequeño número de ellos que logran atravesar el electrolito debido a que el combustible utilizado en este tipo de células, es el hidrógeno, resulta que su molécula es muy pequeña, por ello es que tiende a filtrarse a través de la membrana polimérica. Esto es un inconveniente dado que todas las moléculas de hidrógeno que se filtren a través de la membrana polimérica no actuarán con el aire que entra por el cátodo de la pila, es decir, no se generará corriente desde el flujo de electrones. Sin embargo, la humidificación de la membrana favorecerá o dificultará dicho filtrado

3.1.3.4.3 Catalizadores

Dentro de los conocimientos de la química básica, toda reacción está compuesta por dos sub reacciones separadas, la oxidación producida en el electrodo negativo (ánodo) y la reducción en el electrodo positivo (cátodo). En las células de combustibles PEMFC los componentes que reaccionan son el hidrógeno y el oxígeno, aunque la reacción sea espontánea se produce muy lentamente, así que es necesario aumentar su velocidad de reacción para que se pueda cubrir la demanda de energía que se requiere en todo momento. Una de las soluciones es aumentar la temperatura del fluido para poder superar la energía límite de ionización, sin embargo las pilas PEMFC operan a temperaturas muy bajas, esto provoca que la opción de elevar la temperatura del fluido quede descartada, en cambio aún está la opción de utilizar catalizadores en el proceso.

También cabe mencionar que la potencia va a la par que la velocidad de reacción química que se produce internamente, esto se debe a que la oxidación de las moléculas de hidrógeno es 100 veces mayor a la reducción del oxígeno. Sin embargo, en las pilas aun manteniendo constante las concentraciones, presiones del fluido y la temperatura, existen otros factores como el estado y superficie de contacto de los reactivos. Es por ello que para poder producir el cambio de velocidad en la reacción se introducen catalizadores dado que es una sustancia que participa en mejorar la velocidad de reacción, pero no se ven afectados por la química producida.

Estos elementos, como ya se han mencionado, forman parte de la reacción, debido a que forman compuestos químicos intermedios que se descomponen al instante y así regeneran el catalizador, es por esto que se recalcó que el catalizador no sufría.



Gráfica 2.- Energía de activación en función de la existencia del catalizador. (15).

Tal como muestra la gráfica, la energía de activación será menor si existen catalizadores dentro de la célula de combustible. Por ello, gracias al material del catalizador, se consigue que mediante la ionización del platino (en células PEMFC) los electrones circulen por el exterior y los protones a través de la membrana. Aunque se haya comentado que el catalizador es de platino, no quiere decir que sea el único material, pero en cambio sí es el mejor de todos los posible que se puedan utilizar para este sistema.

El proceso electroquímico que se produce en la célula es que mientras el hidrógeno atraviesa el catalizador el platino se encarga de coger los protones de hidrógeno separándolos de los electrones libres, los cuales viajan por el circuito exterior.

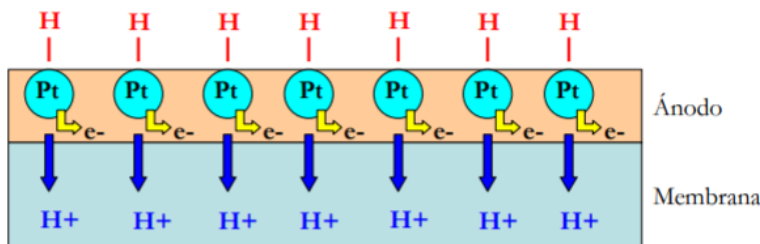
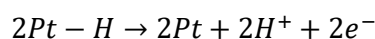
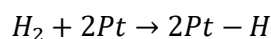


Ilustración 26.-Esquema representativo del proceso de ionización. (15).

Como se puede observar en el esquema las reacciones de los reactivos serían las siguientes:



Visualizando las reacciones por cada reacción global, se separan dos electrones, aunque no siempre se irán el 100% de estos, algunas de las moléculas de hidrógeno atravesarán por los poros de la membrana dejando como resultado que no haya reacción química. El primer proceso donde se encuentra la toma de moléculas de hidrógeno con el catalizador de platino se le conoce como absorción.

Las células PEMFC de baja potencia basta con entregarles el hidrógeno mediante un tanque a presión para que el proceso sea óptimo, sin embargo, si se aumenta la potencia para aplicaciones industriales es recomendable que el hidrógeno se obtenga refinado de los combustibles fósiles, como el gas natural.

De los procesos de reformado se obtienen monóxido de carbono e hidrógeno, la concentración del monóxido de carbono de un sistema típico es aproximadamente del 1%, por ello resulta excesivo conociendo que con la milésima parte ya se produce una variación notable en la eficiencia de las pilas. Esto se debe a que el monóxido de carbono tiene cierta afinidad con el platino del catalizador porque ocuparía los huecos que tendría que tomar el hidrógeno. De la misma manera existen otros métodos que permiten reducir el envenenamiento del catalizador como podría ser inyectar oxígeno al aire del combustible de manera que el monóxido de carbono se encargue de limpiar los huecos catalíticos y a su vez reaccionar con el hidrógeno. Como se mencionó con anterioridad también existen otros catalizadores a parte del platino como podría ser el rutenio, los cuales son capaces de tolerar alrededor de 200 ppm de concentración del monóxido de carbono, en cambio como contaminantes se encuentran el azufre, el dióxido de carbono, el amoníaco, metales alcalinos, partículas e hidrocarburos pesados.

Lo que es importante para la optimización de un catalizador es su superficie, por ello lo más ideal es reducir su peso a partir del grosor de la placa para así reducir el coste de este. Esto se debe a que la densidad de corriente viene reflejada por la cantidad de caudal de fluido que reacciona. Esta superficie no solo se toma en alto y ancho de la lámina, sino también la porosidad de esta a nivel de microporos.

Para conseguir este alto rendimiento en el uso de los catalizadores hay que distribuir partículas de estos, sobre las partículas de los electrodos, constituidas por polvo de carbono. Este polvo más el platino se dispersan de tal manera que la superficie que entra en contacto con el fluido reaccionante se eleva.

3.1.3.4.4 Placas de difusión

Dentro del ensamblaje de las células de combustible se tienen en cuenta a los dos electrodos y a la membrana electrolítica, denominado como MEA 3 (Membrane Electrode Assembly), mientras que el MEA 5 también tiene en cuenta las placas de difusión de gases. Estas configuraciones no se pueden cambiar, es decir, si se tiene un ensamblaje MEA 3, no se puede transformar a MEA 5, es necesario que

salga de fábrica directamente como MEA 5, esto se debe a que el proceso de interconexión es demasiado complejo, simplemente por el hecho de que los materiales están impregnados unos con otros.

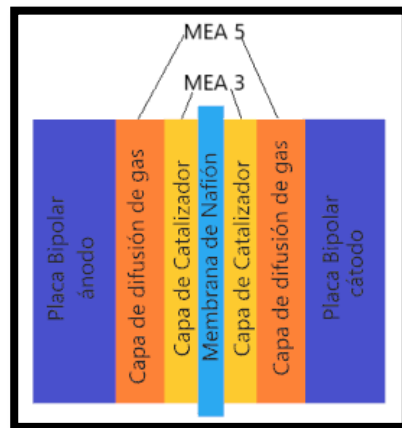


Ilustración 27.- Esquema gráfico de las configuraciones de ensamblaje.

Por otro lado, las capas de difusión de gases están localizadas colindantemente al lado del ánodo y del cátodo. Estas son fabricadas con un material poroso procedente de la tela de grafito, con un espesor determinado, de tal manera que exista la posibilidad de que los electrones libres se desplacen por el circuito exterior. Estas capas difusoras son esenciales para el correcto funcionamiento en las pilas de combustible debido a que facilita la difusión del gas hasta los electrodos, asimismo soportan mecánicamente el conjunto de MEA 3, ofrecen un camino de salida del ánodo hasta el cátodo y tiene como función principal extraer el vapor de agua de la reacción general.

La difusión se define, como el caudal de moléculas gaseosas de la zona de alta presión, donde se encuentra el ánodo, en la parte exterior de la capa de soporte que circula a través del interior de la célula, hasta la capa del catalizador, donde el fluido es consumido en la reacción.

El objetivo de este componente es lograr que los gases a alta presión se distribuyan de manera uniforme a lo largo de la superficie útil del catalizador, de la misma manera trabajan sobre la gestión del agua de la pila de combustible. Estas capas normalmente están impermeabilizadas con teflón para procurar que la mayoría de los macroporos no se inunden de agua debido a que esto produciría que la velocidad de reacción variase notoriamente.

3.1.3.4.5 Placas bipolares

Internamente a los lados de las células de combustible se encuentran las placas bipolares colindando a las capas de difusión de gases, estas preferiblemente deben estar compuestas de un material poco denso, pero a su vez que sea fuerte, capaz de tener una buena conductividad a los electrones y que sea impermeable al fluido gaseoso incidente. Por ejemplo, entre los materiales más utilizados se encuentran el grafito. Sin embargo, este aún no consigue evitar las fugas de las moléculas de hidrógeno debido a su volatilidad. Conociendo esto, las placas bipolares realizan dos funciones fundamentales, las cuales son como se ha mencionado con anterioridad, aportar un canal de flujo al gas reactante y la de servir como colector de corriente.

El área localizada junto a la capa de difusión está compuesta por canales, los cuales transportan el gas reactante sobre toda la superficie de la capa difusora, estos canales tienen como objetivo distribuir uniformemente los gases sobre el área catalizada, y a su vez repartir el suministro y evacuación del agua en el sistema.

3.1.3.4.6 Distribución de los reactivos

La distribución de los gases reactivos se realiza en la superficie activa de los electrodos catalizados. El objetivo de estos sistemas es llegar a la máxima optimización. Para ello se intenta conseguir la máxima superficie húmeda que permita aprovechar al máximo el catalizador. La única manera de optimizar estos elementos es variando las placas bipolares tanto en forma como en tamaño. El tamaño medio de los canales de flujo ronda las unidades milimétricas, sin embargo, obviamente variará este factor en función de las aplicaciones para la que la célula de combustible esté diseñada.

Como se ha mencionado con anterioridad, la superficie de contacto no únicamente está vinculada al proceso eléctrico, también se encuentra el factor de gestión de agua y evacuación. Por ejemplo, en el caso concreto de gestión del agua, la forma geométrica juega un papel muy importante, donde su diseño es tal que rompe la tensión de la superficie del agua con mucha facilidad, provocando así que no se produzcan pequeñas gotas que impidan el flujo continuo del gas.

Dentro de los diseños de las placas bipolares existen tres tipos de muy alta eficiencia que se encuentran a la mano de los diseñadores, estas son el “serpentín”, “paralelo” e “interdigital”.

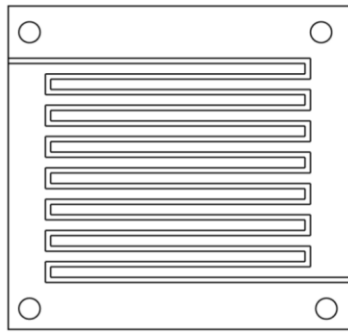


Ilustración 28.-Diseño en serpentin. (15).

Comenzando por el diseño en serpentin, estos obligan a que el gas reactante viaje continuamente, desde el inicio del sistema, hasta su final por un único trayecto, en forma de zigzag, por toda la superficie de la placa, sin embargo, existe un inconveniente, y es que si se obstruye de alguna manera ese camino por el que circula el fluido, todo el gas quedaría taponado.

Si se aplica el aire que se encuentra en la atmosfera a la altura terrestre, como oxidante, este sistema provoca que en la zona del cátodo se acumule una cantidad mayor de agua. Por otro lado, tiene como ventaja que su fabricación es fácil y sencilla, pero a su vez como existe mucha longitud de recorrido, las presiones del fluido circulante se van reduciendo, por ello este sistema suele estar acompañado de un sistema en paralelo, como soporte, siendo de eficiencia alta. En cambio, estas mismas caídas de presión que se producen durante la circulación, son beneficiosas para todas aquellas células de combustible de membrana de intercambio de protones debido a que facilitan a la extracción del agua sobrante como vapor de agua residual.

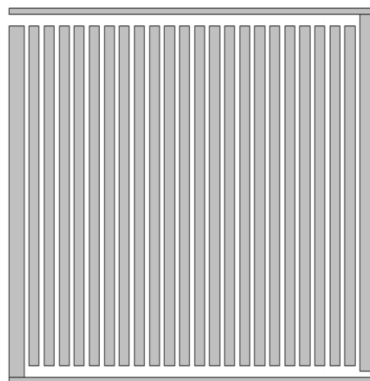


Ilustración 29.- Diseño en paralelo. (15).

A continuación, se encuentra el diseño en paralelo, en este caso concreto los canales de la célula de combustible no necesitan tanto caudal de gas para que su funcionamiento sea gratificante, de la misma manera esta distribución, donde el caudal se distribuye de manera proporcional al número de vertientes de la placa, facilita una mejor distribución y menores caídas de presión que con el diseño visto anteriormente (serpentín). El inconveniente de estos sistemas es el uso en aplicaciones de larga duración debido a que si se toma como oxidante de nuevo, el aire de la superficie, se producirán acumulaciones de agua en los canales de flujo, provocando una nueva distribución del gas dentro del diseño y provocando como resultado que una parte del catalizador quede inutilizada.

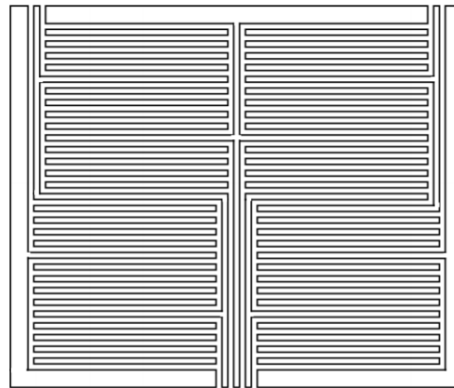


Ilustración 30.-Diseño interdigital. (15).

En el último caso de las placas más eficiente, se encuentra el diseño interdigital. Este diseño consiste en comprimir el gas con su propia fuerza creando caminos cortados para que se obligue a atravesar las paredes porosas, el sistema se asemeja mucho al paralelo, se podría considerar un derivado, pues aunque el objetivo no sea el mismo el transcurso para llegar sí lo es, ambos se encargan de distribuir el gas de manera uniforme al lado de la superficie de la placa, sin embargo la diferencia reside aquí, en el paralelo como se mencionó anteriormente los caminos son continuos desde el inicio hasta el final en línea recta, pero el interdigital va un paso más allá, y es que para poder favorecer la transmisión de los gases se les genera fuerza propia, es decir, el gas que entra en contacto con la pared del canal está sometido a una fuerza en la misma dirección y sentido a la que está golpeando la pared, provocando así que el gas incida en la superficie normal.

Con todo lo que se ha explicado hasta ahora cabe mencionar que lo más limitado en las celdas de combustible es la potencia o la energía que pueden llegar a generar de manera continuada. Debido al comportamiento de la célula de combustible, que es muy dependiente del caudal de los gases reactivos para su correcto funcionamiento, es necesario conseguir que no solo una, sino que todas las células de combustible de un mismo sistema tengan un flujo constante y uniformemente distribuido

para que cada célula de combustible consiga la misma cantidad de reactantes, porque si se diese el caso de que no existe dicha uniformidad el sistema general se comportaría irregularmente.

La uniformidad de la que se está comentando es la que consisten conseguir una distribución proporcional al número de trayectos del sistema del diseño aplicado mediante la alimentación en paralelo aplicando colectores múltiples tanto externos como internos. Alguna de las ventajas más favorables de dichos colectores es su gran simplicidad y tamaño que les permite mantener al mínimo las caídas de presión de los circuitos de distribución de los gases reactantes. En cambio, estos colectores no pueden utilizarse en todas las configuraciones de los canales de flujo debido a que provocaría variaciones de temperatura, alterando el gas a lo largo de todo el apilamiento.

En el caso concreto de las células de combustible de este proyecto (PEMFC) los colectores de distribución tienen aún más ventajas debido a que por su configuración no tienden a tener tantas fugas de gas por su sellado. Otra mención recalable es que expresan una gran flexibilidad a la hora de diseñar la dirección y sentido del flujo de los canales. Sin embargo, el principal inconveniente es que el diseño puede llegar a ser comprensiblemente complejo en cuanto a su fabricación a la par que su elevado coste.

En las configuraciones de flujo, en general existen dos únicas configuraciones, estas van en función únicamente del sentido del gas entrante respecto al mismo saliente. Por ello únicamente existen dos configuraciones la primera en "forma U" y la segunda en "forma Z". Estos nombres vienen denominados por como es el sentido del gas. La configuración en forma U quiere decir que el gas que entra a la célula de combustible se distribuye por la placa y sale en sentido contrario a la entrada, mientras que en forma Z entra y siguiendo el mismo sentido después de la distribución el gas sale de frente.

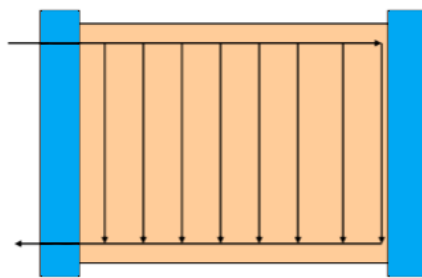


Ilustración 31. Diseño en forma U o flujo inverso.

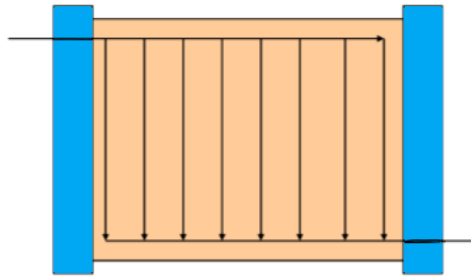


Ilustración 32.- Diseño en forma Z o de flujo paralelo.

En los dos casos de distribución de flujo se debe tener en consideración factores como la estructura de los canales, el tamaño, el número de canales, la profundidad y la relación entre áreas de canales entre electrodo. Esta área es el factor fundamental de la optimización debido a que dependiendo de su forma y área, la velocidad del fluido que circule variará. Es lo que determinará si el caudal es laminar o turbulento.

3.1.3.4.7 Número de celdas

Para la demanda de potencia en las pilas de combustible, esta viene de la mano al número de células asociadas siendo así el potencial máximo demandado igual al sumatorio de las tensiones de las células de combustible en serie.

En los sistemas de células de combustible se busca que todas y cada una de las células sean de las mismas dimensiones y características para poder realizar cálculos rápidos y fiables al conectar en serie y paralelo, donde en serie se van sumando las tensiones generadas, mientras que en paralelo es la corriente de salida la que va aumentando.

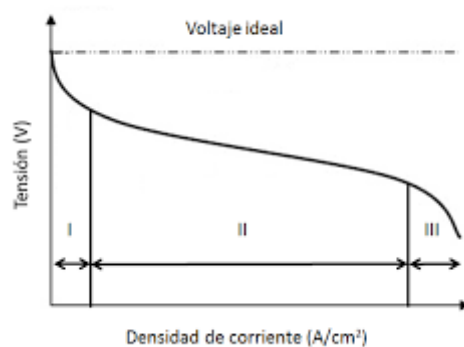
En cambio, en este concepto aparecen unos problemas existenciales y es la limitación de asociación de apilamiento, lo mejor sería que el número de celdas asociadas no fuese ni muy grande ni muy pequeño (las magnitudes dependen de la aplicación). Esto se debe a que si el sistema está compuesto por pocas células, el ensamblaje daría problemas, produciendo un deterioro al Nafión o incluso se tendrían mayores indicios de corrientes crossovers. De la misma manera, si el área activa de contacto es demasiado grande existe el problema de no lograr una temperatura uniforme a lo largo de la superficie útil, así también como una resistencia elevada y problemas de humidificación.

A continuación, se presenta una tabla con valores generales de tensión y corrientes generadas para diferentes células de combustible.

Tabla 1.- Valores generales de tensión y densidad de corriente de las células de combustible.

Tipo de célula de combustible	Tensión media nominal (V)	Intensidad nominal (mA)
PEMFC	0,60 a 0,70	300 a 1000
DMFC	0,35 a 0,40	200 a 600
AFC	0,70 a 0,80	300 a 800
MCFC	0,60 a 0,80	200 a 600
PAFC	0,60 a 0,70	300 a 600
SOFC	0,70 a 0,80	300 a 1200
PCFC	0,50 a 0,60	200 a 600

A continuación, se representa la curva característica del punto de trabajo de la célula de combustible.


Gráfica 3.- Regiones de comportamiento ideal de una célula.(17).

Observando la imagen detenidamente, la zona II es la más óptima para elegir nuestro punto de trabajo, esto es debido a que si el sistema se encuentra en cualquiera de las otras dos regiones, la eficiencia general decaerá mucho. Si se elige un potencial reducido de célula, a potencia nominal, a la salida aparecerá una gran cantidad de densidad de potencia y como consecuencia a este, una reducción considerable del tamaño de las células, es decir, que en función de la aplicación a la que esté orientado el sistema de la célula de combustible, este punto de trabajo tendrá una influencia directa y notoria.

Por citar algunos ejemplos, un apilamiento con una tensión de celda de 0.7 V requiere un 40% más de área activa que la misma pila operando con una tensión de celda de 0.6 V. Por otra parte, si se selecciona una tensión de celda de 0.8 V a potencia nominal, el resultado sería de más del doble de la superficie necesaria para generar la misma potencia que la pila de 0.7 V.

Pero, por otro lado, la mejora de rendimiento de las células de combustible viene determinado por la variación de tensión que se puede llegar a generar con su totalidad. Aunque en la actualidad las tensiones nominales por célula unitaria sean de alrededor de 0,6 y 0,7, lo óptimo sería que llegasen a 0,8 V por célula unitaria.

3.1.3.4.8 Conexión de las células

Una vez mencionado todos los elementos de los que está compuesto una célula de combustible, la continuación es como poder ensamblarlo todo para un correcto funcionamiento. Todos los componentes mencionados previamente en los diferentes apartados se deberán juntar con suficiente presión de contacto, de manera que no permitan fugas de gases. Esto se consigue con la configuración sándwich, que como bien su nombre indica dos paneles conectados en los extremos de la pila de combustible estarán unidos mediante tornillos bordeando el perímetro exterior, aunque en algunas ocasiones será necesario también implementar tornillos en el interior.

Ya mencionado con anterioridad, para que no aparezcan fugas, lo más importante es la unión de este “sándwich”, no solo ve verá afectado en función de la fuerza, sino también se tendrá en consideración la tipología del material.

$$T = \frac{F \cdot K_b \cdot D_b}{N_b}$$

Donde:

T = Par de apriete (N/m).

F = Fuerza de apriete del tornillo (N).

K_b es el Coeficiente de fricción (0.20 para tornillos secos y 0.17 para lubricados).

D_b es el Diámetro nominal del tornillo (m).

N_b es el Número de tornillos.

En cambio, la fuerza bruta no lo es todo, de la misma manera que no apretar suficiente, generaría fugas por las vías libres, apretar demasiado provocaría deformación estructural de las células de combustible o incluso problemas eléctricos.

Una parte de las pérdidas en las células de combustible que hay que considerar es la que proviene de la mala sujeción, estas se pueden determinar de manera empírica aplicando un voltaje al apilamiento y midiendo la caída de tensión que viene producida en las celdas de las pilas de combustible, lo cual puede llegar a expresarse de una manera más cómoda para cálculos como una resistencia eléctrica. Por ello para poder reducir esta resistencia, se le aplica una presión que oscila entre 150 y 200 bares.

3.1.3.5. Termodinámica de la pila de combustible

Como se ha ido mencionando a lo largo de este proyecto, en las células de combustible se producen reacciones electroquímicas, estas reacciones se producen a una temperatura y presión constante que nunca llegará al equilibrio. La gran ventaja que conllevan las células de combustible es que el calor generado internamente se transforma en electricidad. La energía intrínseca total que aparece en las celdas es comúnmente conocida como “energía interna”, esta se puede cuantificar y a su vez viene asociada a las iteraciones ocurridas a nivel molecular.(18)

En cambio, hablando de las células PEMFC la energía interna contenida en el hidrógeno no se convierte en su totalidad en electricidad, existe una porción que no lo hace cumpliéndose así las dos primeras leyes de la termodinámica.

3.1.3.5.1 Primera ley de la termodinámica

La primera ley de la termodinámica o el primer principio de ella, relacionan el trabajo y el calor transferido intercambiado en un sistema a través de una nueva variable termodinámica, U , la energía interna mencionada anteriormente. Esta energía no se crea ni se destruye, únicamente se transforma.

Esta ley determina que la energía interna de un sistema aumenta cuando se le transfiere calor o se realiza un trabajo sobre él. Este es un sistema de equilibrio y por ello se requiere seguir un criterio de signos, sin embargo, en este caso aparecen dos:

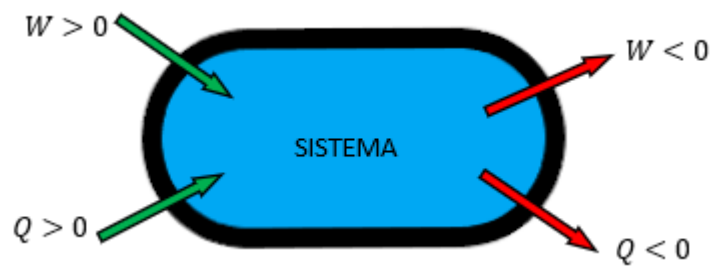


Ilustración 33.-Criterio tradicional

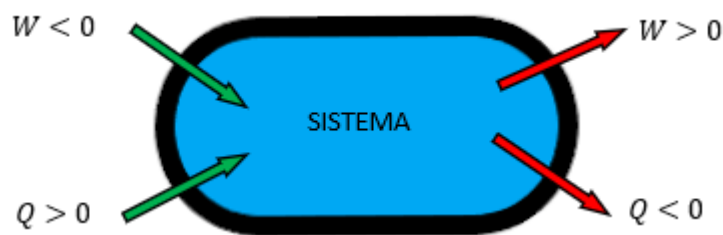


Ilustración 34.-Criterio IUPAC

Donde se considera que W es el trabajo realizado y Q el calor al que se somete.

Visualizando cuidadosamente las imágenes se observa que de la metodología aplicando el criterio tradicional se considera positivo el calor absorbido y el trabajo que realiza el sistema sobre el entorno, mientras que con el criterio IUPAC el calor sigue el mismo criterio, pero el trabajo no, en este caso se considera negativo al trabajo que realiza el sistema. Es por ello que se concluyen dos ecuaciones posibles en función de sus criterios:

$$\Delta U = Q - W \text{ (Criterio tradicional)}$$

$$\Delta U = Q + W \text{ (Criterio IUPAC)}$$

Donde ΔU es el incremento de energía interna del sistema representado en J, Q es el calor intercambiado por el sistema con el entorno representado también en julios y W es el trabajo intercambiado por el sistema (en julios).

Como se mencionó con anterioridad, la primera ley de la termodinámica se basa en sistemas de equilibrio y que la energía interna ni se crea ni se destruye, solo se transforma. Entonces este primer principio se acata a estos criterios. En un sistema aislado la variación de energía interna es cero. Así pues, esto quedaría como una función de estado, es decir, que esta variación es función de la relación de la energía que existe al final menos la energía interna que hay al inicio de los procesos. Ahora bien, que la energía sea una variable de estado no quiere decir que el trabajo y el calor lo sean, al contrario, no lo son.

3.1.3.5.2 Segunda ley de la termodinámica

Tal y como se comentó con la primera ley de la termodinámica, la segunda ley estipula que es un principio que impone unas limitaciones a la dirección de la transferencia de calor, y al rendimiento de las máquinas térmicas. Por ello, las restricciones van más allá que en la primera ley de la termodinámica. En este caso se aplica en 3 modelos. Las máquinas térmicas, los refrigeradores y la entropía.

Según la segunda ley de la termodinámica es imposible extraer una cantidad de calor de un foco caliente y usar su totalidad para producir trabajo, un poco de este calor debe ser expulsado al foco frío, oponiéndose así a un motor térmico perfecto.

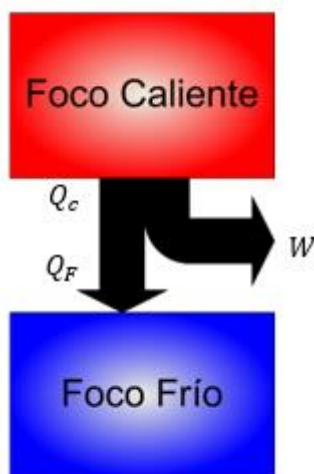


Ilustración 35.-Modelo de máquina térmica.

Por otro lado, no es posible que el calor que fluye desde un foco frío hasta un foco caliente se conserve sin generar un trabajo adicional correspondiente a que la relación sea constante. La energía no fluye espontáneamente desde un objeto a baja temperatura a uno de mayor temperatura.

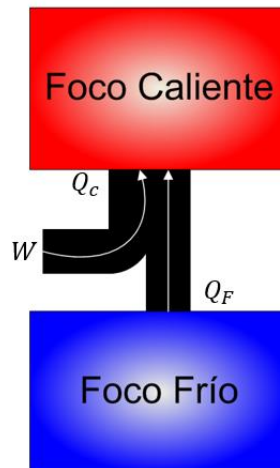


Ilustración 36.-Modelo de refrigerador.

Y por último en cualquier proceso cíclico la entropía será la misma o aumentará, esta variable está definida por la relación del calor absorbido entre su intervalo de temperatura.

$$\Delta S = \frac{Q}{T} = c_p \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$

3.1.3.5.3 Potenciales termodinámicos

Teniendo en consideración las dos leyes de la termodinámica vistas anteriormente se pueden plasmar el modo de como la energía se transforma.

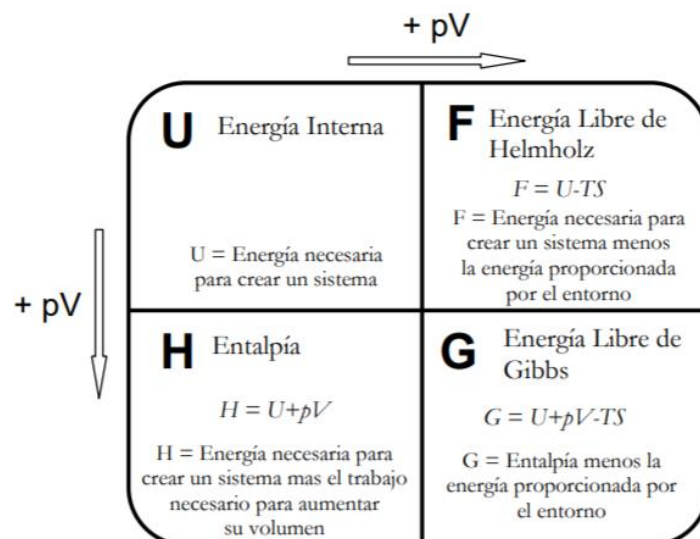


Ilustración 37.- Potenciales termodinámicos. (15).

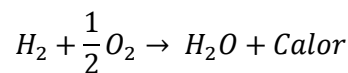
En la figura puede observarse un resumen de los cuatro potenciales termodinámicos. Para el estudio de las pilas de combustible, el que tiene más relevancia es la Energía Libre de Gibbs, la cual representa el coste energético neto de un sistema creado a temperatura T y volumen V constantes, después de extraer la energía que requiere dicho sistema.

3.1.3.5.4 Potencial de una célula de combustible

Una vez se han definidos las leyes de la termodinámica, se toma en cuenta que para un proceso a una presión constante, la cantidad de energía va en función únicamente de la reacción del combustible aplicado. Para poder aplicarla en los cálculos se traduce en una ecuación en función de la energía interna mencionada con anterioridad. Quedando así:

$$\partial H = T\partial S = \partial U + \partial W$$

Tal y como queda esta relación se llega a la conclusión de que el calor intercambiado en una reacción se debe por la variación de la energía interna. Aplicando este concepto a la reacción de la célula de combustible se traduce a una reacción exotérmica, es decir expulsa calor, de la misma manera resulta que por igualdad el agua tendrá menor energía interna que las moléculas de hidrógeno y oxígeno.



La entalpía o el calor resultante es la variación de los reactivos respecto los productos, es decir, se calcula la entalpía del agua y se le resta las entalpías de las moléculas del oxígeno e hidrógeno con sus respectivas proporciones tomando como resultado (conociendo que la entalpía del agua a 298,15 °K es -286 kilojulios por mol):

$$\Delta H = (h_f)_{H_2O} - (h_f)_{H_2} - \frac{1}{2}(h_f)_{O_2} = -286 - 0 - 0 = -286 \text{ kJ/mol}$$

Como se puede apreciar por criterio de signos como el agua libera calor, se le introduce el signo menos al resultado de la ecuación. Por otro lado, no solo hay que observar la entalpía, también hay que tener en consideración la entropía tal y como se mencionó en el segundo principio de la termodinámica.

Ahora bien, sabiendo esto, toda aquella energía que se pueda transformar en electricidad viene definida por la ecuación de la energía libre de Gibbs

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Es decir, siguiendo el criterio de esta relación siempre existirán unas pérdidas no reversibles producidas por la entropía. La energía libre de Gibbs también tiene la capacidad de determinar si el proceso es espontáneo, de la misma manera si la variación de la energía libre es cero quiere decir que el trabajo realizado es nulo, mientras que si es positiva se deberá realizar un trabajo para realizar el proceso y si es negativa la reacción será energéticamente favorable.

De igual forma que la entalpía se representaba como la variación de los reactivos y los productos. También sucede lo mismo con la entropía.

$$\Delta S = (S_f)_{H_2O} - (S_f)_{H_2} - \frac{1}{2}(S_f)_{O_2} = 0,06996 - 0,13066 - \frac{1}{2}0,20517 = -0.163385 \text{ kJ/mol}$$

Tabla 2.- Valores de entalpía y entropía de la reacción del agua.

	$h_f \text{ kJ/mol}$	$S_f \text{ kJ/mol}$
Hidrógeno (H_2)	0	0,13066
Oxígeno (O_2)	0	0,20517
Agua líquida (H_2O)	-286,02	0,06996
Vapor de agua (H_2O)	-241,98	0,18884

Conociendo los valores de la entalpía y la entropía de los productos y reactivos del agua se toma a continuación la energía libre de Gibbs nuevamente con los valores determinados para poder conocer cuanta electricidad se puede captar del generador.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S = -286,02 - 298,15 \cdot (-0.163385) = 237,287 \text{ kJ/mol}$$

Por lo tanto, de los 286.02 kJ/mol de energía disponible, y a 25 °C, solo 237,287 kJ/mol se pueden aprovechar para obtener electricidad, mientras que los restantes 48.68 kJ/mol se transforman en calor.

Por otro lado, el trabajo eléctrico viene definido por la magnitud de la carga del electrón por su potencial.

$$W_e = q \cdot E$$

Donde:

W es el trabajo eléctrico (J/mol).

q es la carga eléctrica (C/mol).

E es el potencial eléctrico (V).

Sin embargo, hay que tener en cuenta que en las células de combustible no solo se trabaja con átomos, sino también con moléculas. Por ello el valor de la carga del electrón queda definido de forma que se tiene en consideración el número de electrones del elemento

$$q = n \cdot N_a \cdot q_e$$

Donde:

n representa el número de electrones por cada molécula de hidrógeno.

N es el número de Avogadro. (6.023x10²³ moléculas/mol).

q_e es la carga de un electrón (1.3052x10⁻¹⁹ C/electrón).

Por ello, teniendo en cuenta que en las pilas de combustible PEMFC el combustible que se utiliza son las moléculas de hidrógeno, el número de electrones que intervienen son 2, debido a que en el ambiente no se encuentra el hidrógeno como átomo, sino como molécula.

$$q = n \cdot N_a \cdot q_e = n \cdot F$$

Otra forma de ver representada esta ecuación es con el producto del número de electrones con la constante de Faraday, que determina el valor de 96400 Coulomb por cada mol, esto viene definido del producto de 2 constantes, las cuales son el número de Avogadro y la carga eléctrica del electrón, ambas constantes.

$$W_e = n \cdot F \cdot E$$

Entonces con todo lo visto anteriormente, el trabajo máximo que puede aportar una célula de combustible viene definida por la energía libre de Gibbs

$$W_e = -\Delta G$$

Como conclusión el potencial eléctrico de una célula de combustible es:

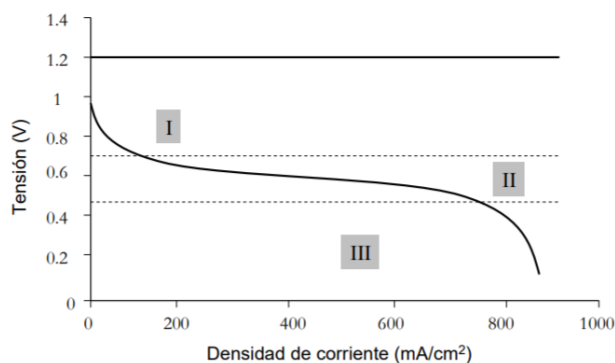
$$E = -\frac{\Delta G}{n \cdot F} = \frac{237,04}{2 \cdot 96400} = 1,229 \text{ V}$$

3.1.3.6. Electricidad de la pila de combustible

Como se ha presenciado anteriormente, el valor teórico de una célula de combustible, en bornes, viene determinado por la ecuación:

$$E = -\frac{\Delta G}{n \cdot F}$$

Entonces teniendo en cuenta lo visto hasta el momento las células de combustible PEMFC que operen alrededor de los 100 grados Celsius son capaces de generar una tensión aproximada de 1,2 voltios en bornes, en cambio en la práctica este valor puede reducirse considerablemente, y es debido a las curvas de polarización.

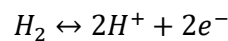


Gráfica 4.- Regiones de comportamiento de las células de combustible. (15).

Los términos a tener en consideración son que la tensión en bornes es menor que la teórica, la tensión decae rápidamente al inicio de su funcionamiento, una vez se estabiliza esta sigue reduciéndose lentamente y cuando aparece una gran cantidad de demanda esta tensión vuelve a decaer exponencialmente. Así, de la misma manera la gráfica está dividida en tres zonas o regiones. En la primera región el voltaje a circuito abierto es menor que la idealidad, al mismo tiempo se produce una caída importante en esta tensión cuando empieza a generar corriente. Es un comportamiento común en las células de combustible de baja temperatura como son las PEM, mientras que en las de alta temperatura esta curva es menos pronunciada, en cambios en todas las tipologías de células de combustibles esta región es donde se aprecian las pérdidas por activación del efecto crossover. En la segunda región la caída de tensión se considera lineal y las pérdidas que se tiene en cuentas son las ocasionadas por las pérdidas

resistivas y por último en la tercera región se observa una nueva pendiente pronunciada debido a las pérdidas por el transporte de masas.

Toda reacción electroquímica conlleva un intercambio de protones, así teniendo en cuenta la química básica es lo que se diferencia de las reacciones comunes en donde solo se intercambian los reactivos y productos. La simple existencia de electrones libres implica que los procesos son heterogéneos, como por ejemplo, el hidrógeno, el cual solo puede producirse entre un electrodo y un electrolito expresado de la siguiente manera.



Es decir, ni los átomos de hidrógeno ni los protones libres pueden coexistir como tal en la superficie del electrodo, ni los electrones libres en el electrolito, en cambio sí se pueden interactuar en la zona donde colindan el electrolito con el electrodo.

Anteriormente comentamos como era el cálculo de la tensión generada, pero ahora viene determinar la corriente, este factor está conectado a la velocidad de la reacción global que se produce dentro de la célula de combustible.

$$i = \frac{\partial Q}{\partial t}$$

Donde:

Q es la carga del electrón (C).

t es la unidad de tiempo (s).

En cambio, si en dicha reacción existe la aparición de más de un electrón de intercambio, la ecuación se transforma quedando como resultado:

$$i = n \cdot F \frac{\partial N}{\partial t}$$

Donde:

$\frac{\partial N}{\partial t}$ es la velocidad de la reacción electroquímica (mol/s).

F es la constante de Faraday (96400 C/mol), necesaria para transformar un mol de electrones en una carga, en Culombios.

Sin embargo, esto no queda aquí, en los procesos electroquímicos las reacciones se producen en las superficies de los electrodos, por ello no interesa la intensidad tal cual, sino la densidad de corriente, que es aquella corriente por unidad de superficie, para ello se integra la anterior fórmula dando como resultado:

$$\int_0^t i dt = Q = n \cdot F \cdot N$$

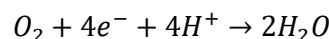
$$i = n \cdot F \cdot j$$

Donde:

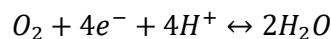
$n \cdot F$ es la carga eléctrica transferida (C/mol).

j es el flujo de reactante por unidad de área (mol/s·cm²).

Teniendo todo esto en cuenta se podría llegar a pensar que si se conecta un amperímetro a la célula de combustible este daría la corriente que generaría, pero no es así, lo que calcularía sería la medición de corriente neta, la cual es la variación de la intensidad inversa y directa del electrodo. Estas polarizaciones se deben a los procesos de oxidación y reducción. Si se tiene en cuenta la reacción que se forma en el cátodo de las células PEMFC se observa:



Entonces llegados a este punto se podría pensar que si la densidad de corriente es nula no existe actividad en el electrodo, pero en cambio esto es incorrecto, lo que sucedería es que la reacción está en equilibrio y actuaría en ambos lados a la misma velocidad quedando:



El consumo de los reactantes es directamente proporcional a la concentración que tengan en la superficie del electrodo, por ello el flujo directo se representará así:

$$j_d = k_d \cdot C_{ox}$$

Mientras que el flujo inverso es la reacción que se produce en el ánodo:

$$j_i = k_i \cdot C_{rd}$$

Donde:

j_d es el flujo directo

k_d es el coeficiente de reacción de reducción

C_{ox} es la concentración de los oxidantes

j_i es el flujo inverso

k_i es el coeficiente de reacción de la oxidación

C_{rd} es la concentración de los reactantes

Por ello, conociendo que el flujo neto, es la variación del flujo directo respecto al inverso, la ecuación de la densidad de corriente se transforma a esto:

$$i = n \cdot F \cdot (k_d \cdot C_{ox} - k_i \cdot C_{rd})$$

Repasando de nuevo por qué la tensión teórica de las células de combustible es mucho mayor a la experimental, se debe al caso del uso de polarizadores. Esto se debe a las pérdidas que se producen a lo largo del sistema. En ingeniería eléctrica a estas pérdidas se les conoce por pérdidas de tensión mientras que si se habla desde la rama de la química a estas pérdidas se les denomina sobre potencial, o polarizadoras. Por ello se verá desde la electroquímica debido a que es donde se aprecian diferencias de estado, ya que para el eléctrico solo serán pérdidas de tensión o potencia.

Se comentarán 4 tipos de pérdidas relacionadas con esto. Las pérdidas por activación, las pérdidas por concentración, las pérdidas resistivas y las de efecto crossover. Comenzando por las pérdidas por activación. Recordando que para que se pueda realizar una reacción electroquímica esta tiene que estar sometida bajo una ligera tensión la cual está directamente relacionada a la espontaneidad de la reacción, produciendo así que a mayor densidad de corriente generada menor serán estas pérdidas, estas pérdidas de activación se producen tanto en el cátodo como en el ánodo, tratándose de células de combustibles PEMFC la tensión en el ánodo que es donde se encuentra el hidrógeno requerirá de una menor tensión que la necesaria en la reducción del oxígeno en el cátodo.

Considerando que las pérdidas se toman en cuenta como la derivación del potencial empírico de celda respecto al teórico la polarización en el cátodo quedaría así:

$$\Delta V_{act_{cat}} = \frac{RT}{\alpha_c F} \cdot \ln \left(\frac{i}{i_{0_{cat}}} \right)$$

Donde:

α_c es el coeficiente de transferencia, que básicamente determina la cantidad de electricidad empleada en cambiar la velocidad de una reacción.

$i_{0_{cat}}$ es la densidad de corriente de intercambio, que representa la máxima cantidad de corriente que se puede extraer de la pila sin apreciar caída de tensión. Físicamente coincide con la corriente que se establece una vez que se alcanza el equilibrio químico.

i es la densidad de corriente demandada por la carga.

Por consiguiente, la tensión de generación de la célula, que repitiendo es la teórica menos la de activación por el momento quedaría así:

$$E_{cel} = E - \Delta V_{act_{cat}} = E - \frac{RT}{\alpha_c F} \cdot \ln \left(\frac{i}{i_{0_{cat}}} \right)$$

Las pérdidas de concentración vienen delimitadas por la alimentación de los reactantes. El proceso de suministro de reactantes y eliminación de productos también se le conoce como transporte de masas. Es decir, si existe una demanda de potencia en la célula de combustible es necesario suministrar una mayor cantidad de reactantes para poder cubrir esa demanda de potencia satisfactoriamente. Por ello se pueden definir a las pérdidas por concentración aquellas que están asociadas a la incapacidad de la célula de combustible por llegar a la demanda necesaria.

Estas pérdidas se pueden optimizar variando así la concentración o bien en la presión de reactantes modificando las superficies de contacto. Entrando más en detalle estas pérdidas se efectúan de manera diferente según donde se produzcan, si en los electrodos o en los canales de flujo. Esto se debe nada más y nada menos que a la superficie de contacto, el flujo de reactantes circula por canales del orden del milímetro mientras que la porosidad de los electrodos es del nivel de la micra. Por ello es diferente, el flujo de los reactantes se basa en el transporte por convección mientras que en los electrodos es por difusión.

Durante la convección actúan las fuerzas mecánicas, aquellas impuestas por el usuario que fuerzan al combustible a los cambios de presión, mientras que en la difusión se debe al consumo de los reactantes. Para poder determinar el valor de la difusividad, hay que tener en consideración que las estructuras porosas dificultan el flujo continuo de los fluidos reactantes, por ello se tomará en cuenta un término conocido como difusividad efectiva, la cual será determinada a partir de la difusividad nominal por el coeficiente de la porosidad elevado a 1,5.

$$D_{xy}^{ef} = \varepsilon^{1,5} \cdot D_{xy}$$

De la misma manera tal y como se mencionó con anterioridad, las diferencias de presión del combustible y oxidante influyen en el rendimiento de la célula de combustible. La caída de tensión variará en función de las presiones parciales de cada uno de los gases reactantes de la siguiente fórmula:

$$\Delta V = \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \ln \left(\frac{C_B}{C_S} \right)$$

Donde:

C_B es la concentración total del reactante (mol/cm³).

C_S es la concentración del reactante en la superficie del electrodo catalizado (mol/cm³).

Asimismo, el flujo de los reactantes es proporcional a su gradiente de concentración en los canales:

$$N = \frac{D \cdot (C_B - C_S)}{\delta} \cdot A$$

Donde:

N es el flujo total de reactantes (mol/s).

D es el coeficiente de difusión de las especies reactantes (cm²/s).

A es el área activa del electrodo (cm).

δ es la distancia de difusión (cm).

Retomando la ley de Faraday el consumo de los reactantes es:

$$N = \frac{i}{n \cdot F}$$

Así que combinando ambas ecuaciones se define, cuanto es la densidad de intensidad demandada de las pérdidas por concentración:

$$\frac{i}{A} = \frac{n \cdot F \cdot D \cdot (C_B - C_S)}{\delta}$$

Como se puede apreciar en la fórmula resultante a menor concentración de reactantes mayor es la densidad de corriente demandada. Y finalmente las pérdidas de tensión por concentración queda como:

$$\Delta V = \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \ln \left(\frac{i_L}{i_L - i} \right)$$

De manera experimental se ha observado que debido a la porosidad de los electrodos de una célula de combustible, la caída de tensión no ocurre de manera brusca, sino progresiva. Para que esta caída de tensión fuera rápida la densidad de corriente debería de ser uniforme debido a que de la manera real hay zonas del electrodo que alcanzan las corrientes límites antes que otras.

Por otro lado, están las pérdidas resistivas, en este tipo de pérdidas son en resumen las pérdidas ocasionadas por la tipología de los materiales reales implicados. Existen dos tipos de cargas que actúan en las células de combustibles. Estas son los electrones libres y los iones de hidrógeno, cuyo traslado va directamente definido a la polarización resistiva. Para poder minimizar estas pérdidas un factor esencial es disminuir al máximo la membrana polimérica para reducir su resistencia. Como estas pérdidas van asociadas a la resistencia eléctrica la caída de tensión se puede transformar en una ecuación simple aplicando la ley de ohm con un sistema de resistencias en serie para así tener en consideración tanto la resistencia de los electrones como la parte iónica del hidrógeno quedando como resultado:

$$\Delta V_{ohm} = I \cdot (R_{e^-} + R_{H^+})$$

Para poder tener una evaluación correcta de la fórmula, se deberá tener en consideración el material, por ello habrá que hacer uso de la conductividad del material implicado. Como la resistencia también depende del tamaño del elemento las resistencias de la anterior fórmula se transcribirá a:

$$R = \frac{L_{cond} \cdot \rho}{A}$$

Donde:

L_{cond} es la longitud de la pieza conductora (cm).

ρ es la resistividad del material (Ωcm).

A es el área de la sección de la pieza conductora (cm²).

Tal y como se puede observar de las ecuaciones expuestas las pérdidas resistivas disminuyen la tensión a la vez que aumenta la intensidad siguiendo el criterio de la ley de Ohm.

En cambio, hay mucha diferencia entre la conducción iónica y la conducción eléctrica. En esta última los electrones tienen total libertad de movimiento a lo largo de los conductores, mientras que la conducción iónica solo circula por los huecos vacíos de la estructura cristalográfica del material siendo concluyente que la conducción sea menor que la conducción eléctrica.

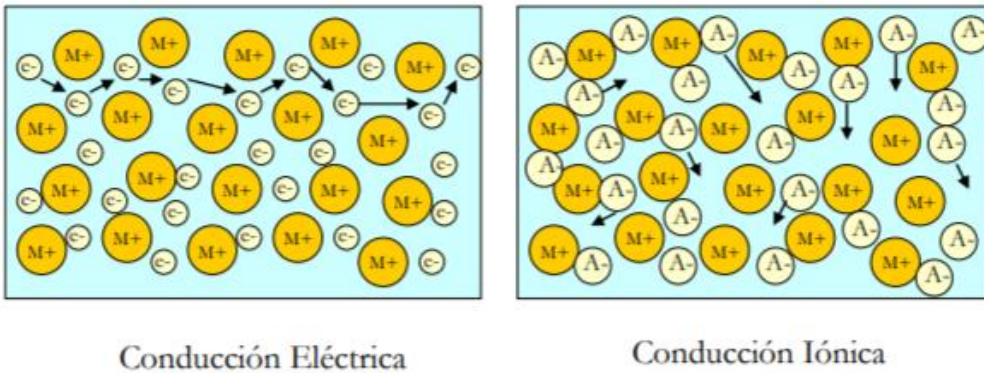


Ilustración 38.-Demostración de la conducción eléctrica e iónica. (15).

Para poder reducir entonces estas pérdidas, el método más óptimo, comentado con anterioridad, es reducir el material de contacto, la membrana polimérica al máximo posible. Asimismo, se consigue mantener el ánodo saturado en humedad lo cual es muy beneficioso para el sistema. Por ello la caída de tensión quedará tomando todos los factores en cuenta, de la siguiente manera:

$$\Delta V_{ohm} = I \cdot R_{ohm} = i \cdot A \left(\frac{\delta_{Naf}}{\sigma \cdot A} \right) = i \cdot \left(\frac{\delta_{Naf}}{\sigma} \right) = i \cdot \delta_{Naf} \cdot \rho$$

Donde:

A es la superficie activa de la pila de combustible (cm²).

δ_{Naf} es el grosor de la membrana polimérica de Nafión (cm).

Y por último las pérdidas por efecto crossover, estas pérdidas se producen debido a que, aunque la membrana polimérica no sea conductora, en ocasiones deja atravesar los reactantes a través de su porosidad. Debido a que la molécula de hidrógeno conlleva 2 electrones, por ello cada molécula de hidrógeno que atraviesa la membrana no viajará por el circuito externo porque no ha sido capaz de

ionizarse. De primeras estas pérdidas son insignificantes dado que la cantidad de moléculas de hidrógeno que atraviesan es mucho menor a las que se ionizan, sin embargo, esto no es del todo correcto. A bajas demandas de potencias las pérdidas son mucho más elevadas. La intensidad de corriente neta es el sumatorio de la que circula por el circuito externo, más las debidas al efecto crossover.

$$I = I_{ext} + I_{crossover}$$

Ahora bien, añadiendo estas pérdidas a la ecuación de la tensión generada. Transformando la intensidad en densidad de corriente dividiendo por el área de contacto quedaría así:

$$i = \frac{I}{A}$$

$$E_{cel} = E - \frac{R \cdot T}{\alpha_c \cdot F} \ln \left(\frac{i_{ext} + i_{crossover}}{i_0} \right)$$

El efecto crossover del hidrógeno se mide en función de la permeabilidad del material de la membrana polimérica, su grosor y la presión parcial de la molécula. Al comienzo de la generación de potencia la concentración de hidrógeno en las capas del catalizador disminuye, y con ello la intensidad. Esta es la principal razón de que estas pérdidas sean despreciables.

Un factor que si hay que tener en consideración al realizar los cálculos es la velocidad de propagación de los reactantes que dependen directamente de la permeabilidad del material:

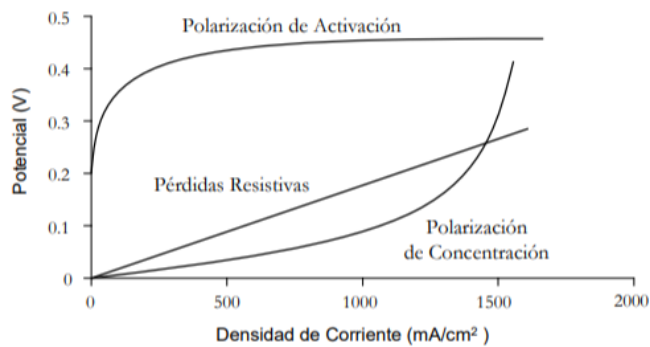
$$N_{gas} = \frac{I}{n \cdot F} \rightarrow i = \frac{n \cdot F \cdot N_{gas}}{A}$$

Donde:

N_{gas} es la velocidad de propagación a través de la membrana (mol/s).

A es la superficie del electrodo (cm²).

Teniendo en cuenta todas las pérdidas sin tener en consideración las de efecto crossover debido a su baja magnitud se pueden representar en un gráfico en función de la densidad de corriente.



Gráfica 5.- Pérdidas eléctricas en las células de combustible PEMFC. (15).

Por ello teniendo en cuenta las pérdidas vistas hasta ahora la tensión en la célula resultante quedara así:

$$E_{cel} = E - \frac{RT}{\alpha_c F} \ln\left(\frac{i}{i_{0c}}\right) - \frac{RT}{\alpha_a F} \ln\left(\frac{i}{i_{0a}}\right) - \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{i_{Lc}}{i_{Lc} - i}\right) - \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{i_{La}}{i_{La} - i}\right) - iR_i - i_{ext}(R_{i_e} + R_{i_c})$$

Donde:

E es la tensión reversible de celda (V).

R es la constante de los gases (8.314 J/mol K).

R_{i_e} es la resistencia del circuito eléctrico externo (Ω).

R_{i_c} es la resistencia eléctrica de los puntos de contacto (Ω).

T es la temperatura de funcionamiento del dispositivo (K)

F es la constante de Faraday (96485 C/electrón-mol).

$i = i_{ext} + i_{loss}$ es la densidad de corriente demandada, sumatorio de la densidad de corriente externa (i_{ext}) y crossover (i_{loss})(mA).

i_{La} es la densidad de corriente límite del ánodo (mA).

i_{Lc} es la densidad de corriente límite del cátodo (mA).

i_{0a} es la densidad de corriente de intercambio del ánodo (mA).

i_{0c} es la densidad de corriente de intercambio del cátodo (mA).

n es el número de electrones que intervienen en cada reacción electroquímica.

α es el coeficiente de transferencia, que toma típicamente valores entre 1 y 0.5.

Como ya se ha mencionado a lo largo de este proyecto, en la mayoría de los casos empíricos solo se consideran las pérdidas de activación en el cátodo de la célula de combustible debido a que la reducción del oxígeno respecto la oxidación del hidrógeno se realiza mucho más lento. Por otra parte, se pueden considerar las pérdidas por concentración simétricas por ello se considera una única densidad de corriente para todo el conjunto de la célula de combustible. En cambio, las pérdidas resistivas debidas a la conducción iónica se desprecian quedando como resultado la siguiente ecuación:

$$E_{cel} = E - \frac{RT}{\alpha_c F} \ln\left(\frac{i}{i_{0c}}\right) - \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{i_L}{i_L - i}\right) - iR_i$$

3.1.3.7. Gestión del agua en una pila de combustible

Tal y como se ha ido comentando a lo largo de este proyecto, la humedad en el sistema de la célula de combustible es de vital importancia debido a que afecta directamente al rendimiento electroquímico de la pila. Si el electrolito no tiene suficiente agua, la conductividad irá disminuyendo hasta llegar a 0. De la misma manera un exceso de humedad resultaría perjudicial debido a que inundaría la membrana polimérica, taponando las zonas porosas por donde atravesarían los iones, o incluso inundaría los canales de flujo de las placas bipolares. Por ello es necesario alcanzar un equilibrio equiparable a un buen rendimiento de la célula de combustible.

En las células de combustibles PEMFC que es la que estará implementada en el proyecto digital, el agua de la reacción resulta en el cátodo, de manera que la membrana polimérica se encuentra debidamente hidratada dentro de un rango aceptable, en cambio el aire suministrado por el cátodo arrastra consigo el agua sobrante como vapor de agua fuera de la célula de combustible. Teóricamente gracias al grosor ideal de la célula de combustible el agua se absorbería por la membrana de Nafión de manera uniforme y se extendería por las células hasta conseguir el nivel de humedad más óptimo, sin embargo, empíricamente hablando esto no puede llegar a ocurrir y es uno de los problemas más comunes de las células de combustibles a resolver.

Entonces uno de los primeros factores a corregir es el “Arrastre Electro Osmótico”, el cual consiste en que cada molécula de hidrógeno arrastra consigo, un cierto número de moléculas de agua. Del mismo modo si hay una gran demanda de densidad de corriente en la carga, el ánodo podría llegar a secarse por esta insuficiencia de líquido impidiendo que los iones de hidrógeno puedan atravesar la membrana polimérica.

Otro problema muy importante es la alta temperatura de la célula de combustible, si esta es muy elevada el agua podría llegar a evaporarse sobre todo si la temperatura de trabajo ronda los 100 grados. De la misma manera a estas temperaturas el aire secaría los electrodos a una velocidad superior a la de humidificarse.

Asimismo, otro problema muy frecuente y del que se debe tener mucha consideración es la de distribuir uniformemente la humedad por toda la superficie de contacto de la célula de combustible. Experimentalmente siempre abre zonas que tengan más humedad que otras debido a la forma y rugosidad del material. Toda la circulación que recorre el agua de una célula de combustible PEMFC se muestra a continuación mediante una ilustración.

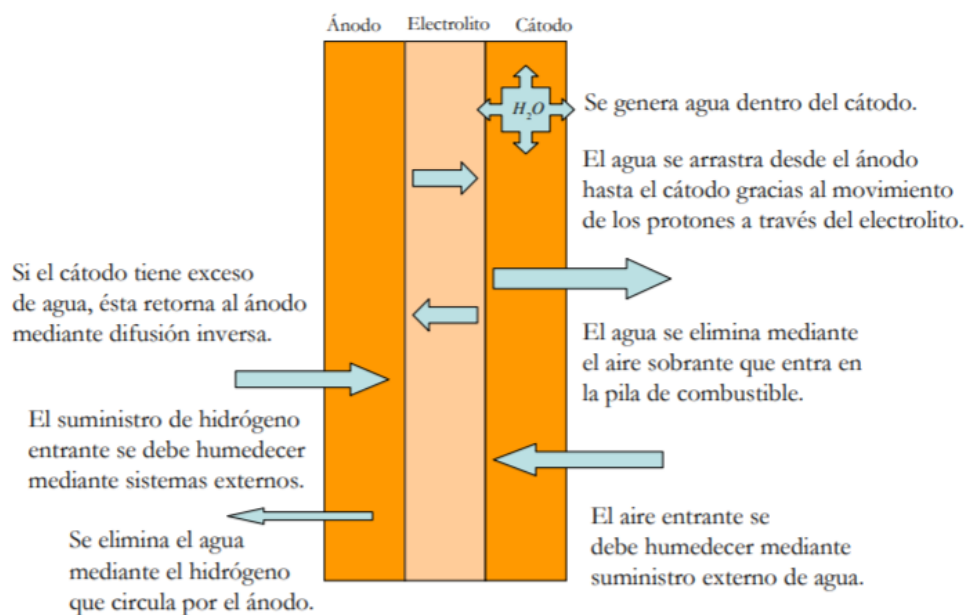


Ilustración 39.- Circulación del agua en una célula PEMFC. (15).

Al lado derecho de la ilustración, en el cátodo, el aire suministra mayor cantidad de la necesaria para cubrir la demanda de densidad de corriente porque si se alimenta en función de la estequiometría exacta podrían aparecer problemas de pérdidas de concentración.

Cuando se quiere diseñar una metodología para humidificar el aire que entra al cátodo, hay que tener en cuenta que este mismo aire también conlleva un cierto nivel de humedad, esta misma humedad se puede llegar a cuantificar de manera muy exacta mediante el término de la humedad absoluta en la cual hay que tener en consideración los factores de temperatura, humedad del entorno y zona geográfica en la que se implementa la instalación de la célula de combustible.

$$\omega = \frac{m_w}{m_a}$$

Donde:

m_w es la masa de agua presente en la mezcla de gases que componen el aire.

m_a es la masa total de aire seco.

Siguiendo el criterio de la ecuación se entiende que la masa total del aire es la suma de la masa de agua más la masa total de aire seco, en cambio esto no da una idea totalmente fundamental de la tarea del aire en el cátodo. Simplemente apoya a lo que se ha ido comentando durante el proyecto de que el aire tiene que tener un efecto de secado en el cátodo.

El aire caliente tiene un nivel de humedad, aunque parezca que esté seco, sin embargo, el aire frío no conlleva tanta humedad como podría haberse esperado. Esto se debe a las presiones parciales de los fluidos gaseosos que forman el aire. Si la presión de saturación es mayor a la presión parcial del agua, el agua contenida comenzará a evaporarse más rápido que lo que es capaz de condensarse. Y viceversa si las presiones son al contrario.

Recordemos que también existía el factor de la geolocalización como punto determinante, en este caso se puede hacer un rango de humedades relativas donde el 30% equivaldría a un desierto y el 70% a una ciudad en la costa.

Teniendo en cuenta lo visto en el apartado de electricidad a mayor temperatura mayor será la presión de saturación. Esto sucede si no se varía ningún otro valor de la ecuación de los gases. Un ejemplo muy claro es el tubo de escape de un coche, cuando el fluido sale al exterior de vehículo la presión parcial del combustible se iguala a la presión de saturación del ambiente y provoca que no pueda absorber más humedad y el sobrante se condense. Por ello queda claro que para la temperatura de trabajo superiores a 60 grados la humedad relativa del aire será siempre inferior al 100%.

Cuando existe demasiada demanda de densidad de corriente la circulación del agua que va desde el ánodo hasta el cátodo podría no ser la suficiente, tendiendo así a que la membrana polimérica se deshidratara, resultando así que es preferible conseguir una buena humidificación en el ánodo antes que en el cátodo.

La humedad de los gases reactantes es el factor que está entre la cantidad de vapor de agua y la cantidad de gas seco. De manera que la fracción de humedad vista desde la masa se calcula así:

$$x = \frac{G_v}{G_a}$$

La razón molar de humedad (moles de vapor de agua/moles de gas seco) es:

$$X = \frac{N_v}{N_a}$$

La relación entre las dos ecuaciones anteriores es la siguiente:

$$x = \frac{M_v}{M_a} \cdot X$$

La fracción molar de los gases es igual a la relación entre las presiones parciales:

$$X = \frac{p_v}{p_a} = \frac{p_v}{p - p_v}$$

Donde:

p es la presión total.

p_v es la presión parcial del vapor.

p_a es la presión parcial del gas.

La entalpía de un gas seco es:

$$h_g = c_{pg} \cdot T$$

Donde:

h_g es la entalpía del gas seco (Jg^{-1}).

c_{pg} es el calor específico del gas ($\text{Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$).

T es la temperatura en ($^{\circ}\text{C}$).

La entalpía del vapor de agua es:

$$h_v = c_{pv} \cdot T + h_{fg}$$

Donde:

h_v es la entalpía del vapor de agua (Jg^{-1}).

c_{pv} es el calor específico, ($\text{Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$).

T es la temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

h_{fg} es el calor de evaporación, cuyo valor es 2500 Jg^{-1} a 0°C .

La entalpía del gas húmedo es:

$$h_{vg} = c_{vg} \cdot T + x(c_{pv} \cdot T + h_{fg})$$

Donde:

h_{vg} es la entalpía del vapor de agua (Jg^{-1} de gas seco).

c_{vg} es el calor específico, ($\text{Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$).

T es la temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

h_{fg} es el calor de evaporación, cuyo valor es 2500 Jg^{-1} a 0°C .

x es la humedad relativa.

La entalpía del agua líquida es:

$$h_w = c_{pw} \cdot T$$

Como se ha ido comentando a la salida de la célula de combustible aparecen tanto agua líquida como vapor de agua por lo que la ecuación final queda así:

$$h_{vg} = c_{vg} \cdot T + x_v(c_{pv} \cdot T + h_{fg}) + x_w \cdot c_{pw} \cdot T$$

Donde:

x_v es el contenido en vapor de agua (gramos de agua líquida por gramos de gas seco)

x_w es el contenido en agua líquida (gramos de agua líquida por gramos de gas seco)

Por lo tanto, es fácil deducir que el contenido total de agua es el sumatorio del contenido de vapor de agua más el agua líquida.

Como se podría llegar a entender, lo imprescindible es conseguir diseñar una célula de combustible sin apoyo de humedad, para así reducir costes, en cierta manera es necesario, pero esto repercutiría en el rendimiento, sin apoyo de humedad la eficiencia rondaría por el 40%. Lo ideal para no tener este apoyo y mantener la eficiencia es conseguir introducir un caudal de aire en el cátodo de tal manera que se consiga una humedad relativa del 100%. Para conseguir este proceso se implementa que el flujo del hidrógeno y del aire tengan sentidos opuestos en el apilamiento de la célula de combustible, en este método se suelen utilizar electrodos muy finos y electrolitos gruesos para retener la mayor cantidad de agua posible.

El método mencionado es óptimo únicamente para dispositivos de pequeña potencia, las células de alta potencia necesitan el apoyo sí o sí. En la actualidad existen algunos métodos de refrigeración que actúan de tal manera que son capaces de funcionar en sistemas de gran potencia. El aire caliente a la salida de la célula de combustible pasa junto a la superficie de contacto de la membrana polimérica donde es enfriado hasta condensarse. Al mismo tiempo el agua atraviesa la membrana y se evapora gracias al vapor.

Otro de los métodos más efectivos es el denominado “inyección directa de agua”, en este sistema los canales de flujo fuerzan a los reactantes a impulsar el agua por cada célula y electrodo, humedeciendo así los gases. Los canales forman un laberinto sin salida de manera que los gases reactantes se fuerzan a distribuirse por toda la superficie del electrodo arrastrando agua en su recorrido.

Por otro lado, también existe la posibilidad de que el electrolito no absorba el agua, sino que la produzca, esto es posible si se cambia el material de dicho elemento con óxido de silicio o titanio los cuales son componentes hidrófilos, el inconveniente es que este sistema es muy costoso.

3.1.3.8. Gestión térmica de la pila de combustible

Tal y como se comentó anteriormente las células de combustible PEMFC operan en un rango de temperatura que está aproximadamente oscilando sobre los 100 °C, aunque este rango de temperatura viene predefinido por su diseño, es decir en función de la aplicación al cambiar el diseño de la célula este rango variará. Entonces los factores que hay que tener en cuenta para el diseño son la demanda de potencia que se solicita, el tamaño del apilamiento, corrientes parásitas y sistema de refrigeración.

El calor que ha sido generado en el interior de las células de combustible viene del resultado de las reacciones electroquímicas de los componentes de la pila, este calor debe ser evacuado para evitar

sequedad en la membrana y mantener el sistema a una temperatura uniforme, una parte de este calor es expulsado por modo de convección natural y radiación, y otra gran parte añadiendo un sistema forzado es disipado mediante radiación.

En función de la potencia generada de la célula de combustible, el sistema de refrigeración forzado estará prediseñado para que sea capaz de utilizarse con aire o con refrigerante líquido, sin embargo, también se deberá diseñar el apilamiento para que estos fluidos puedan circular óptimamente por el interior de la célula de combustible. Para poder diseñarlo bien se prueban unos canales en el interior de las placas bipolares que sean capaces de evacuar parte del aire caliente generado mediante la conducción. Este es un sistema que permite ser controlado eficazmente con la temperatura como variable de control y al mismo tiempo permite reutilizar el calor expulsado.

Existe un inconveniente relacionado con la temperatura, y es que esta no es uniforme durante el lapso de trabajo, sino que esta varía desde la entrada hasta la salida de la célula de combustible. Lo más recomendado para un control de temperatura es tomar como referencia la temperatura superficial de los apilamientos, la temperatura que sale de ellos o incluso el refrigerante. La temperatura existente al exterior de la pila es mucho mayor a la que hay en el interior, de tal manera que como las pérdidas por calor se pueden asociar a las reacciones electroquímicas ocasionadas en el cátodo, la referencia más óptima queda como la temperatura a la salida.

Si el apilamiento de la célula de combustible se enfría mediante la circulación de fluidos refrigerantes, la temperatura a la salida también se puede considerar una buena referencia. Sin embargo, esto dependerá de la conductividad, si existe una velocidad de flujo muy elevada este no será capaz de absorber todo lo demandado por lo que el calor tampoco podrá ser absorbido siendo así que la referencia en la salida no sea buena.

En la actualidad existen varias formas de refrigerar el sistema de las células de combustible, pero las más comunes y eficaces son la circulación de refrigerante entre las celdas, la circulación de refrigerante por el exterior del apilamiento y la refrigeración por cambio de fase.

Circulación de refrigerante entre las celdas: el fluido puede ser tanto aire como agua desionizada o anticongelante, sin embargo, de ninguna manera, se tienen que forzar la circulación de estos refrigerantes a través de cada célula para lograr una distribución uniforme de los mismos.

Circulación de refrigerante por el exterior del apilamiento: este método se suele aplicar para las células de combustible de baja demanda de potencia. Consiste en que el refrigerante sea el aire exterior y que este circule a través de unas aletas conductoras del calor situándolas en la parte más exterior de la célula de combustible.

Refrigeración por cambio de fase: en este caso el agua que ha sido generada en el cátodo después de las reacciones electroquímicas será reaprovechada como refrigerante condensándolo a la salida.

Otro de los factores a tener en consideración en la gestión térmica es el balance energético, según las células de combustibles la energía entrante es igual a la energía saliente.

$$\sum Q_{in} - \sum Q_{out} = W_e + Q_{dis} + Q_c$$

Donde:

Q_{in} es la entalpía (calor) de los elementos entrantes.

Q_{out} es la entalpía (calor) de los elementos salientes.

Q_{dis} es el calor disipado por convección/radiación en el entorno.

W_e es el trabajo eléctrico obtenido.

Q_c es el calor extraído mediante circulación de refrigerante.

Como se ha mencionado anteriormente una parte del calor que se ha producido mediante las reacciones se disipa por convección y radiación mientras que el restantes es expulsado por los circuitos de refrigeración. Se puede conseguir una buena estimación aplicando el uso de las entalpías de los fluidos.

$$\frac{I}{n \cdot F} H_{hv} \cdot n_{cel} = Q_{gen} + I \cdot V_{cel} \cdot n_{cel}$$

Si a la salida del cátodo sale agua líquida, el calor generado por la célula de combustible es:

$$Q_{gen} = (1,482 - V_{cel}) \cdot I \cdot n_{cel}$$

Mientras que si es gaseoso, el calor es:

$$Q_{gen} = (1,254 - V_{cel}) \cdot I \cdot n_{cel}$$

Sin embargo, esto son aproximaciones aplicando el uso de las entalpías, para realizar un cálculo más exacto se debería determinar el estado concreto de los fluidos. Pero siguiendo el uso de la entalpía con la siguiente fórmula se puede llegar a determinar:

$$h = \dot{m} \cdot c_p \cdot T$$

Donde:

\dot{m} es el flujo de gas que interviene en la reacción (g/s).

c_p es el calor específico (J/gK).

T es la temperatura (°C).

Si el gas en cuestión tiene Poder Calorífico Superior, la ecuación queda como sigue:

$$h = \dot{m} \cdot (c_p \cdot T + h_{hhv}^0)$$

Este valor de HHV (J/g), se puede encontrar generalmente tabulado a 25 °C. La diferencia entre el Poder Calorífico Superior a 25 °C y a 0°C, es precisamente la diferencia entre las entalpías de los reactantes y los productos a esas temperaturas. Para el caso del hidrógeno, se puede calcular como sigue:

$$h_{hhv}^0 = h_{hhv}^{25} - \left(c_{p_{H_2}} + \frac{1}{2} \frac{M_{O_2}}{M_{H_2O}} c_{p_{O_2}} - \frac{M_{H_2O}}{M_{H_2}} c_{p_{H_2O(l)}} \right) \cdot 25$$

Tabla 3.-Propiedades de algunos fluidos. (15).

	Peso Molecular (g/mol)	Calor Específico (Jg/K)	Poder Calorífico Superior (J/g)
Hidrógeno, H_2	2.0158	14.2	141900
Oxígeno, O_2	31.9988	0.913	
Nitrógeno, N_2	28.0134	1.04	
Aire	28.848	1.01	
Vapor de agua, $H_2O(g)$	18.0152	1.07	
Agua, $H_2O(l)$	18.0152	4.18	
Monóxido de Carbono	28.0150	1.1	10100
Dióxido de Carbono	44.0099	0.84	
Metano	16.0427	2.18	55500
Metanol (l)	32.04	2.5	22700

3.1.3.9. Aplicaciones de las células de combustible

Las células de combustibles son las fuentes de generación de energía de los infinitos sistemas que existen en el mundo, en función de la aplicación a la que se le quiera implantar esta tecnología se instalará una tipología de célula con sus características asociadas. En este caso como el proyecto está centrado

en el ámbito del automovilismo la célula que se ha elegido es una del tipo “PEMFC (Proton-Exchange Membrane Fuel Cell)”, sin embargo, existen otras muchas para diferentes aplicaciones como:

Tabla 4.- Tipos y características de las diferentes células de combustible (19).

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
Electrolito	Membrana de polímero sólido	Solución alcalina	Ácido fosfórico	Carbonatos Fundidos	Oxido sólido	Membrana de polímero sólido
Temperatura de operación en °C	60 – 80	100 – 120	200 – 250	600 – 700	800 – 1000	50 – 120
Rango de potencia	5 – 250 kW	5 – 150 kW	50 – 11.000 kW	100 – 2.000 kW	100 – 250 kW	Hasta 5 kW
Ventajas	Baja temperatura, arranque rápido, baja corrosión y mantenimiento	Mayor eficiencia y reacción catódica más rápida	Acepta H ₂ impuro	Reformado interno cogeneración	Reformado interno cogeneración	No necesita reformador de combustible
Aplicaciones	Transporte, portátiles y residencial	Espaciales	Generación distribuida y calor	Generación distribuida y calor	Generación distribuida y calor	Portátiles

3.1.4. Control avanzado

En función de los motores que se implementen en un sistema determinado vendrá predefinido un control específico para dicha aplicación. Estos controles son modelos matemáticos que influyen en las características generadas de los distintos motores. Este proyecto llevará a cabo el modelo matemático propio de los motores de imanes permanentes, el cual el más óptimo se corresponde al control de campo orientado, o comúnmente conocido control FOC, sin embargo, se dará una pincelada sobre otros tipos de controles como son el control directo de par (DTC) y el control escalar.

3.1.4.1. Control de campo orientado (FOC)

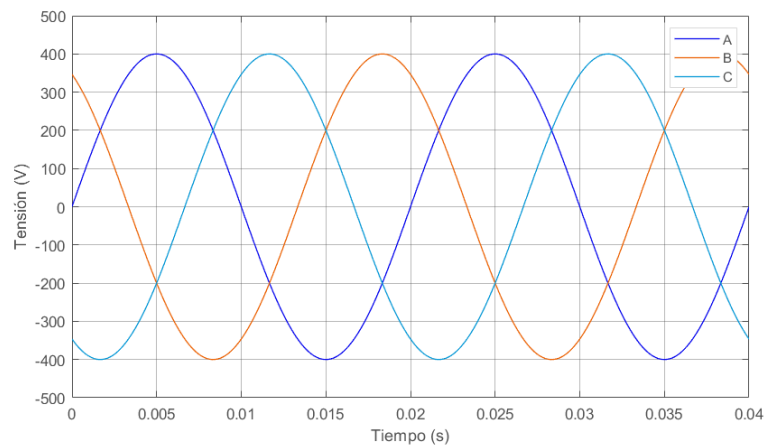
El control de campo orientado o coloquialmente conocido el control FOC, es la tipología de control más compleja de las que se visualizarán en este proyecto, experimentalmente hablando esta modelización se realiza sobre las tres fases de un motor. Las ecuaciones matemáticas que establecen los estados de las diferentes variables de la máquina eléctrica como las tensiones, las intensidades, las velocidades y el par motor. Todas y cada una de las variables mencionadas con anterioridad están descritas en función del tiempo de actuación, al mismo tiempo son también ecuaciones diferenciales debido a esto la

complejidad de ejecución de los modelos matemáticos incrementa si se desean aproximar valores inclusive. Por ello lo más común en estos casos es realizar un cambio de variable que permita eliminar la variable problemática del tiempo para así ocasionar una simplicidad al problema de aplicación.

Estos cambios de variable se realizan con unas transformaciones de ejes conocidas como transformación de Clark y de Park.

3.1.4.1.1 Transformación de Clark

En el caso de la primera transformación denominada transformación de Clark. Esta tiene como principio fundamental en el proyecto el traspasar de un sistema trifásico del sistema simétrico y equilibrado de entrada a un sistema compuesto por dos variables definidas como directa y cuadratura. Esta transformación consiste en convertir las variables del sistema trifásico como por ejemplo las tensiones de línea trifásica.



Gráfica 6.- Señales trifásicas de tensión de línea.

Como se puede apreciar se encuentran las tres señales de las tres fases de una red trifásica simétrica y equilibrada. En el momento de aplicar la transformada de Clark estas tres señales pasan a convertirse en dos variables ortogonales.

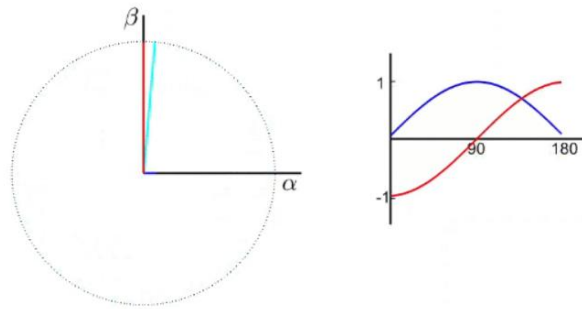


Ilustración 40.-Transformada de Clark (vista vectorial).(20).

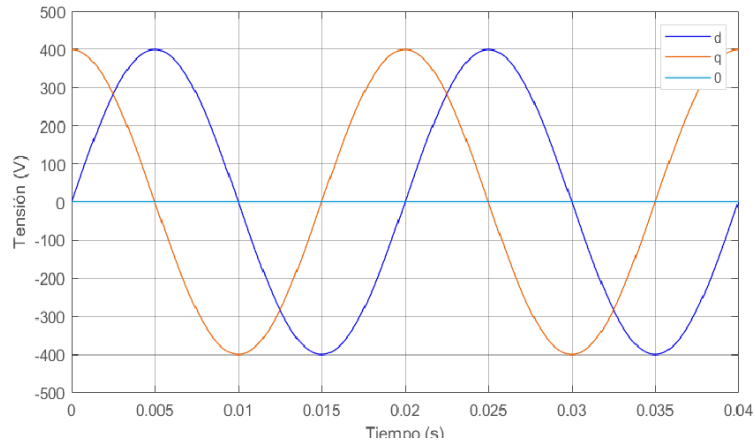
Para poder conseguir la transformación de manera analítica se aplica el siguiente sistema matricial para adquirir las señales directa y de cuadratura.

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_A \\ x_B \\ x_C \end{bmatrix}$$

En caso contrario, si se buscan los valores de un sistema trifásico, es suficiente con resolver el sistema anterior tomando como resultado lo siguiente:

$$\begin{bmatrix} x_A \\ x_B \\ x_C \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix}$$

Con este sistema matricial plasmándolo se puede obviar la componente x_0 , debido a que el sistema de tres variables al resolverlo analíticamente se suprime, esto se debe a que se toma esa variable como referencia.(20)



Gráfica 7.- Transformada de Clark de un sistema de tensiones de línea.

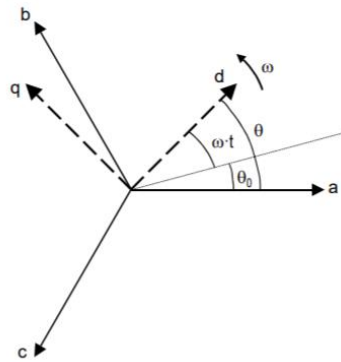
3.1.4.1.2 Transformación de Park

Por otro lado, está la transformada de Park, esta consiste en traspasar un sistema $[x_A, x_B, x_C]$ a un sistema de dos variables denominadas directa y cuadratura, sin embargo, en este caso se tomará como referencia un vector en movimiento. Esta transformación consigue cambiar los valores de tres señales sinusoidales a dos variables constantes. (21)

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_A \\ x_B \\ x_C \end{bmatrix}$$

Donde.

θ es el ángulo de referencia rotativo del sistema dq0.



Gráfica 8.-Representación del ángulo de referencia.(21)

Aplicándolo a un sistema de tensiones de línea se puede observar:

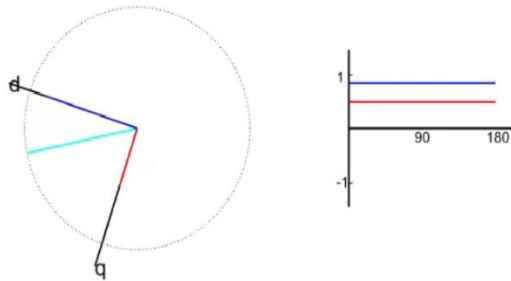


Ilustración 41.-Representación polar y gráfica de la transformada de Park. (20).

En este caso la imagen de la izquierda está en constante movimiento, los ejes de directa y cuadratura se mueven rotativamente a lo largo del tiempo a una velocidad angular constante, provocando así que el sistema de referencia no sea fijo (la línea azul clara), concluyendo en dos valores constantes de magnitudes de variable directa y variable de cuadratura.

3.1.4.1.3 Tipologías de control FOC

En la metodología de control vectorial se encuentran diferentes tipos, en función de cómo se oriente el flujo a la máquina eléctrica. Se pueden instalar un control directo o indirecto siempre y cuando existan sensores de posición, si no es el caso, existe otro tipo, denominado sensorless, que como su nombre indica del inglés, no requiere de sensor.

- DFOC

Este tipo de control se denomina control directo de campo orientado, como su nombre indica en esta tipología la medición del flujo electromagnético que se origina en el rotor de la máquina eléctrica es directo, mediante la utilización de sensores situados en el entrehierro del motor. De la misma manera si se emplea el control DFOC hace falta variar el prediseño del

estátor de la máquina eléctrica para poder acoplar dichos sensores teniendo en consideración que las características del motor deben variar lo mínimo respecto a lo que la máquina eléctrica podía aportar sin los sensores. Sin embargo, el costo de dicha modificación hace que aumente considerablemente.

- IFOC

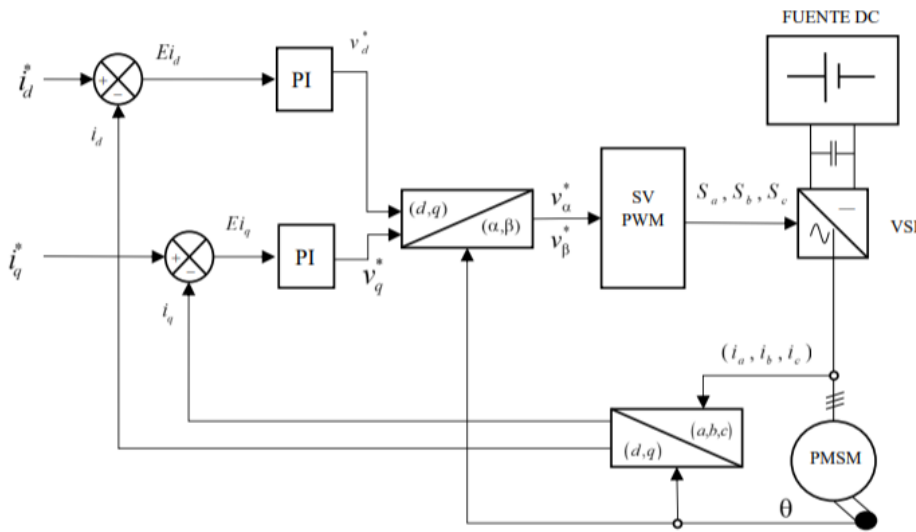
Por otro lado, se encuentra el control indirecto de campo orientado, los sensores que se implantaron en la anterior modalidad no son necesarios situarlos en el motor, en este caso concreto el flujo electromagnético se estima en función de las corrientes más la aplicación de modelos matemáticos se implementen dichas variables para su cálculo. Este control suele ser más utilizado debido a que no se debe modificar ninguna parte de la estructura de la máquina eléctrica, por ello el costo es también más económico que en el control directo de campo orientado.(22)

- Sensorless

Finalmente, se encuentra el control vectorial sensorless, del inglés sin sensor, ahora el control no dispone de sensores de velocidad ni posición, debido a esto, sí se requieren mediciones de las intensidades o por su dualidad de los voltajes. Como se ha suprimido la utilización de estos elementos tanto la velocidad como la posición se estiman haciendo uso de modelos matemáticos teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, corrientes y tensiones medidas en la máquina eléctrica. De la misma manera que al eliminar los sensores del motor el coste monetario de la máquina decae, también conlleva su desventaja, la máquina se vuelve muy sensible a las estimaciones que realizan los modelos matemáticos. Por ello, se requiere una buena modelación de la máquina eléctrica, a la par que se deben implementar sensores de intensidad y tensión lo más precisos posibles según la aplicación del motor.(23)

3.1.4.1.4 Control FOC básico

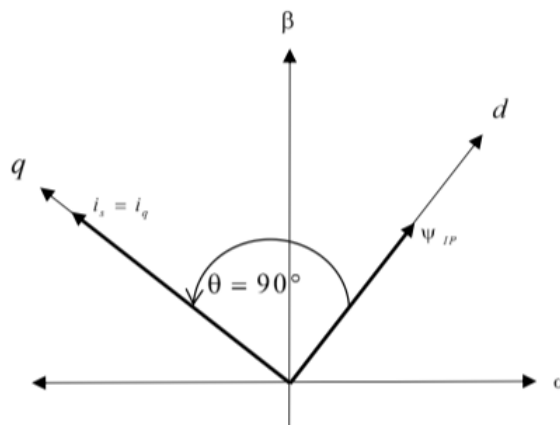
El diagrama en simulación de este tipo de control se realiza mediante un software matemático conocido como Simulink, en el cual se determina no solo las constantes sino los sensores del sistema, en este proyecto se realiza sobre un motor de reluctancia variable el cual es el escogido por ser el más adecuado para un vehículo eléctrico. Eso concluye en que el control de dicho sistema es muy complejo. La representación independiente del control FOC en simulink se representa de la siguiente manera.(24)



Il·lustració 42.- Esquema Simulink del control FOC general independiente.(25)

El diagrama que se observó previamente se visualiza como el control, este lo regula el sistema bifásico de ejes de directa y cuadratura, los valores de referencia de dichas intensidades y las corrientes que se han hallado mediante las transformaciones de Clark y Park. La discrepancia de las intensidades de referencia y las corrientes halladas generan un error que es enviado a los controladores PI, estas señales enviadas serán posteriormente modificadas por las transformadas de Park al sistema bifásico de alfa-beta para así ser enviadas a un módulo SVPWM, que es capaz de generar un cambio en los estados de conmutación, al inversor que conecta al motor de reluctancia conmutada.(26)

El objetivo principal del control FOC es el de conseguir un ángulo recto de adelanto de los ejes que componen el vector de flujo del estátor con el flujo que generan los imanes permanentes.



Il·lustració 43.-Diagrama fasorial del control FOC.

Tal y como se muestra en la imagen se observan las componentes del vector de corriente en el eje de directa y en el de cuadratura. La intensidad del estátor del eje de directa se tiene que regular a cero ocasionando así que el flujo de directa sea fijo, resultando que el flujo de los imanes es constante en una máquina de imanes permanentes, por ello el par electromagnético es proporcional a la intensidad de cuadratura.

Considerando las ecuaciones vistas anteriormente, frente al modelo matemático del control PWM, se toma como referencia la intensidad directa nula, simplificando las ecuaciones de la siguiente manera.

$$v_d = -(L_q \cdot i_q) \omega_r$$

$$v_q = \psi_{IP} \cdot \omega_r + R_s \cdot i_q + L_q \cdot \frac{\partial i_q}{\partial t}$$

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot p(i_q \cdot \psi_{IP})$$

$$\frac{\partial \omega_r}{\partial t} = \frac{p(T_e - T_L) - (\beta \cdot \omega_r)}{J}$$

Ocasionalmente el control de FOC está compuesto por dos controladores PI para poder controlar la corriente tanto en el eje de cuadratura como en el de directa. Este tipo de control se le denomina control Proporcional Integrador, en ellos el primer paso a realizar es el de representar la función de transferencia en la planta en el dominio de Laplace, por ello las ecuaciones anteriores se traducen así:

$$v_d = R_s \cdot i_d + s(L_s \cdot i_d)$$

$$v_q = \psi_{IP} \cdot \omega_r + R_s \cdot i_q + s(L_s \cdot i_q)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot p(i_q \cdot \psi_{IP})$$

$$s \cdot \omega_r = \frac{p}{J} T_e$$

3.1.4.1.5 Controlador PI para Flujo

Realizando un diagrama de bloques sobre la corriente del eje de directa aplicando un control proporcional integrador en planta, y todo en lazo cerrado.

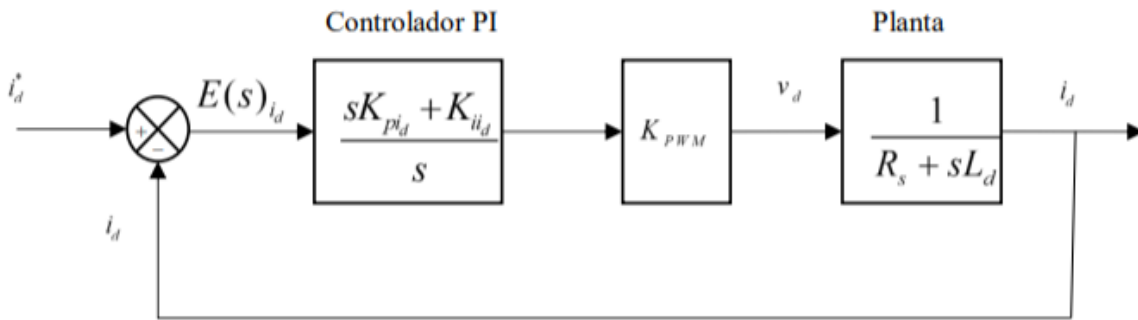


Ilustración 44.- Lazo de control de la intensidad directa.(27).

A partir de aquí la función de transferencia del controlador PI:

$$G_c(s)_{i_d} = \frac{sK_{pi_d} + K_{ii_d}}{s}$$

Donde:

$$s \rightarrow j \cdot \omega_{cid}$$

Por otro lado, la función de transferencia de la planta:

$$G_p(s)_{i_d} = \frac{1}{R_s + sL_d}$$

Ahora bien, se añade la ganancia al lazo abierto, quedando así:

$$G_{LA}(s)_{i_d} = \frac{sK_{pi_d} + K_{ii_d}}{s} \cdot \frac{1}{R_s + sL_d} \cdot K_{PWM}$$

Para conseguir una mayor rapidez en los cálculos dentro del modelo matemático que resolucionara todo el sistema de control la última ecuación vista hasta ahora se transforma, de manera que sea más fácil el cálculo en bucle.

$$G_{LA}(s)_{i_d} = \left(\frac{K_{ii_d}}{s} \cdot \left(1 + \frac{s}{\frac{K_{ii_d}}{K_{pi_d}}} \right) \right) \cdot K_{PWM} \cdot \left(\frac{\frac{1}{R_s}}{1 + \frac{s}{\frac{R_s}{L_d}}} \right)$$

Teniendo en consideración esto, para la selección del valor del control proporcional, o la relación de ganancias se considera que debe haber un margen de 90°, quedando la relación de la siguiente forma.

$$\frac{K_{ii_d}}{K_{pi_d}} = \frac{R_s}{L_d} \rightarrow K_{pi_d} = K_{ii_d} \cdot \frac{L_d}{R_s}$$

Con esto se consigue cancelar el cero que se encuentra en el sistema de control resultando que la función en lazo abierto, cambia bruscamente.

$$G_{LA}(s)_{i_d} = \frac{K_{ii_d} \cdot K_{PWM}}{s \cdot R_s}$$

Al mismo tiempo se define la frecuencia de corte en función de la frecuencia de conmutación más pequeña.

$$K_{ii_d} = \frac{w_{cid} \cdot R_s}{K_{PWM}}$$

3.1.4.1.6 Controlador PI para Par

Al igual que en el control de flujo, este también se puede desarrollar mediante lazos de control, en este caso al inicio queda de la siguiente manera.

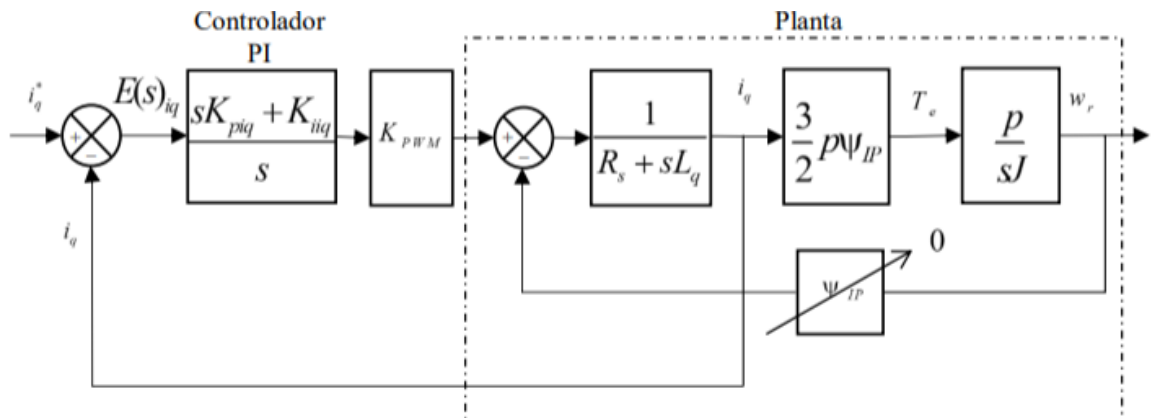


Ilustración 45.-Lazo de control de la intensidad de cuadratura con FEM. (27).

Sin embargo, sucede que la velocidad de ejecución del lazo de corriente es mucho más rápida que el lazo de control de velocidad, esto concluye en que se omite la FEM simplificándose del siguiente modo.

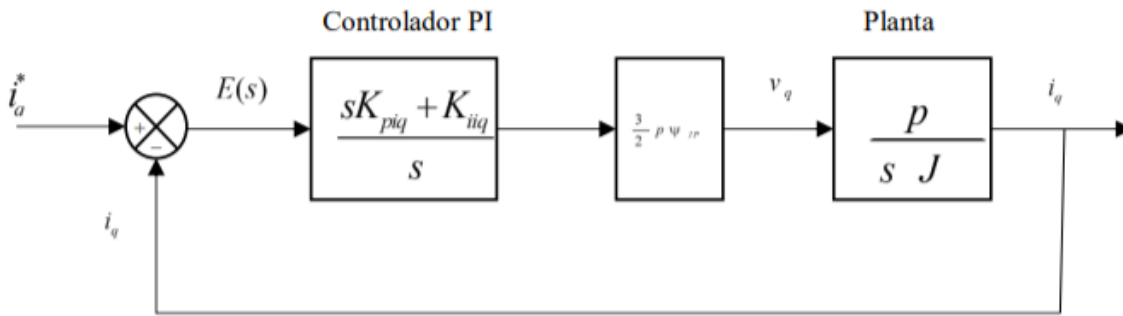


Ilustración 46.- Lazo de control de la intensidad de cuadratura simplificado. (27).

Teniendo en cuenta el nuevo modelo, se puede comprobar que su estructura es la misma que la del control de flujo, por ello las relaciones para hallar las constantes de controles de proporcionalidad e integración se realizan de la misma manera.

$$\frac{K_{i_d}}{K_{p_d}} = \frac{R_s}{L_d} \rightarrow K_{p_d} = K_{i_d} \cdot \frac{L_d}{R_s}$$

$$K_{i_d} = \frac{w_{cid} \cdot R_s}{K_{PWM}}$$

3.1.4.1.7 Controlador PI para Velocidad

El control de velocidad, al generar el sistema conlleva un lazo cerrado con la velocidad calculada del SPWM, en el cual la intensidad de referencia es la activa del motor.

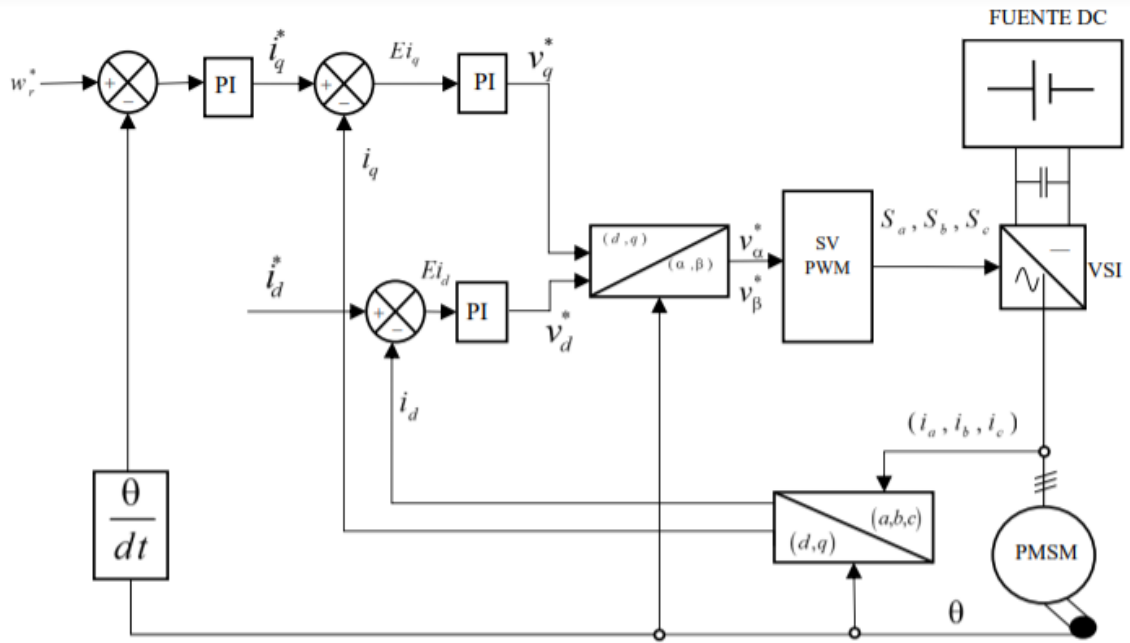


Ilustración 47.- Control general de velocidad mediante FOC. (25).

Observando la parte de diseño de control, este es muy parecido al control de par directo, al mismo tiempo el diagrama de bloques cumple las mismas condiciones que en los apartados anteriores de los diferentes controles.

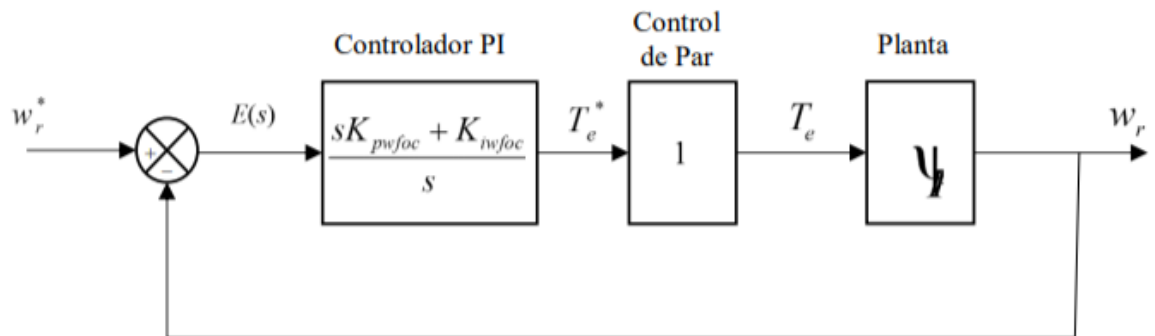


Ilustración 48.-Lazo de control de velocidad mediante FOC. (27).

Como se ha comentado las condiciones de adquisición de las variables son las mismas. Sin embargo, las variables de ganancias se hallan de la siguiente manera.

$$k_{PWFOC} = \frac{k_{IWFOC} \cdot \tan(-180 + MF)}{w_c}$$

$$k_{IWFOC} = \frac{w_{CWFOC}^2 \cdot J}{p \cdot \sqrt{\tan^2(-180 + MF) + 1}}$$

3.1.4.2. Control directo de par (DTC)

El objetivo principal del control directo de par o DTC es el de adquirir los datos instantáneos tanto del par como del flujo electromagnético partiendo de las variables que aporta el estátor de la máquina. El par motor y el flujo electromagnético se pueden llegar a controlar directamente e independientemente entre sí, haciendo uso de las secciones optimas de los estados de conmutación del inversor, al mismo tiempo se limitan los errores no solo del par, sino también del flujo a partir de controladores de histéresis.

La modalidad del control es concisa, consiste en controlar el par motor con la rotación del vector flujo del estátor de la máquina eléctrica, pero utilizando los estados de conmutación del controlador. Al mismo tiempo se regulan los valores de magnitud del vector de flujo aplicando la misma conmutación del inversor. Este valor de vector se verá modificado en función de la consigna.

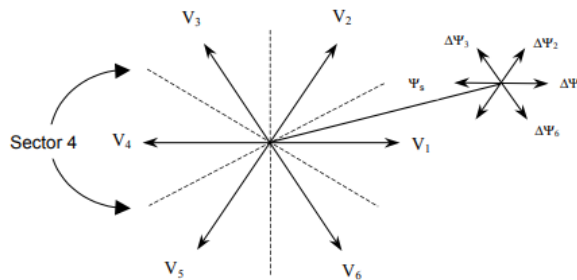


Ilustración 49.-Variación del flujo del estátor de la máquina en el primer sector.(28).

Para entrar en mejor comprensión, en ejemplo sería la imagen anterior. Las influencias de cada vector de voltaje en el sector 1 sobre el par y el flujo se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 5.-Influencia de los vectores de tensión sobre el flujo y el par.

Vector tensión	$\Delta\psi_s$	ΔT_e
V_1	++	-
V_2	+	+
V_3	-	++
V_4	--	+
V_5	-	-
V_6	+	--
$V_0 - V_7$	0	-

Observando este ejemplo y añadiendo la imagen, se explica el comportamiento de cada vector del voltaje tanto en magnitud como en ángulo. Al mismo tiempo, la variación del ángulo del flujo afecta también al par en gran medida, debido a que el par motor es ocasionado por el producto vectorial de los flujos del estátor por los del rotor. Como el flujo en el rotor está en constante oscilación una variación brusca del vector espacial produciría un gran cambio en el producto vectorial, que a su vez se lo ocasionaría al par motor de la máquina eléctrica.(25)

Con lo explicado anteriormente, se pueden llegar a estudiar los efectos de los estados de conmutación (vectores espaciales) de la tensión sobre la magnitud, el par motor y el ángulo de flujo.

Tabla 6.- Configuración óptima de conmutación

ψ_s está en el sector K		C_T		
		1	0	-1
C_ψ	1	V_{k+1}	V_0, V_7	V_{k-1}
	0	V_{k+2}	V_0, V_7	V_{k+2}

Mencionado con anterioridad, tanto el flujo electromagnético del estátor como el par se regulan mediante dos controladores de histéresis.

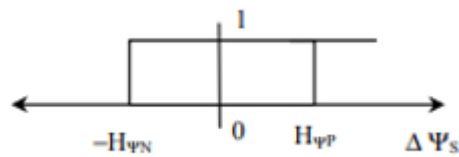


Ilustración 50.-Controlador de flujo. (28).

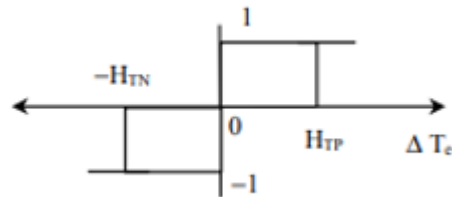


Ilustración 51.-Controlador de par.(28).

Tabla 7.- Funcionamiento del control de flujo.

Condición	Salida del controlador
$\Delta\psi_s \geq H_{\psi P}$	$C_{\psi} = 1$
$\Delta\psi_s \leq -H_{\psi N}$	$C_{\psi} = 0$
$ \Delta\psi_s < H_{\psi P}$ $ \Delta\psi_s > H_{\psi N}$	Mantener C_{ψ}

Tabla 8.-Funcionamiento del control de par

Condición	Salida del controlador
$\Delta T_e \geq H_{TP}$	$C_T = 1$
$\Delta T_e \leq 0$	$C_T = 0$
OTRO	Mantener C_T
$\Delta T_e \leq -H_{TN}$	$C_T = -1$
$\Delta T_e \geq 0$	$C_T = 0$
OTRO	Mantener C_T

3.1.4.2.1 Estimación del flujo y del par

Lo primero es determinar el vector espacial, este se conoce tomando como variable de referencia la tensión bus de continua de entrada, mediante un sensor, normalmente de efecto Hall, mientras que al mismo tiempo se toman también los valores de conmutación de los sensores del controlador. Tomando como resultado una tensión:

$$\bar{V}_s = \frac{2}{3} V_{DC} \left(S_a + e^{\frac{j2\pi}{3}} S_b + e^{\frac{j4\pi}{3}} S_c \right)$$

De la misma manera se comentó previamente que para las estimaciones de corriente, se pueden optar por elegir las corrientes de las fases del estátor estimándolas a partir de las intensidades del motor. Hace falta mencionar que al componerse de tres fases no se requieren tres sondas, es suficiente la implementación de dos de ellas y la última corriente calcularla mediante análisis.

$$\bar{I}_s = \frac{2}{3} \left(i_a + e^{\frac{j2\pi}{3}} i_b + e^{\frac{j4\pi}{3}} i_c \right)$$

Teniendo ya estos valores de cálculo el vector espacial del flujo se consigue realizando la integral de la fuerza electromotriz.

$$\bar{\psi}_s = \int (\bar{V}_s - R_s \bar{I}_s) dt$$

Del mismo modo el par electromagnético se halla mediante el producto vectorial del vector espacial de su intensidad por su relación.

$$T_e = \frac{2}{3} \cdot \frac{p}{2} (\bar{\psi}_s \times \bar{I}_s)$$

Por otro lado, para poder conseguir el ángulo del vector se realiza trigonometría sobre los ejes de directa y cuadratura.

$$\theta_s = \arctan \left(\frac{\psi_q}{\psi_d} \right)$$

En función de los signos de los vectores, estos son multiplicados por una constante, para así limitar el ángulo en los grados de una circunferencia, es decir, entre 0 y 360 grados. Sin embargo este no es el único método de estimación del flujo, aparecen una gran variedad que a la par otorgan una mejoría en el funcionamiento del accionamiento a velocidades reducidas, debido a la afectación que soporta la resistencia del estátor de la máquina eléctrica.

Por otro lado, el control DTC tiene una implementación en formato digital, dado esto, se debe insertar una formulación discreta para que lo puedan interpretar los algoritmos de controladores.

$$\overline{\psi}_s(n+1) = \overline{\psi}_s(n) + T_s(\overline{v}_s(n) - R_s \cdot \overline{i}_s(n))$$

$$\overline{\psi}_d(n+1) = \overline{\psi}_d(n) + T_s(\overline{v}_d(n) - R_s \cdot \overline{i}_d(n))$$

$$\overline{\psi}_q(n+1) = \overline{\psi}_q(n) + T_s(\overline{v}_q(n) - R_s \cdot \overline{i}_q(n))$$

Donde:

T_s es el tiempo de muestreo.

n es el número de muestra.

Este tiempo de muestreo es dependiente de unos valores, los cuales son la velocidad de la tarjeta adquirenta de datos y de los intervalos de tiempo de ejecución de los algoritmos del sistema de programación.

Siguiendo el criterio el par electromecánico se halla de la siguiente manera.

$$T_e(n+1) = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} (\overline{\psi}_d(n+1) \cdot \overline{i}_q(n+1) - \overline{\psi}_q(n+1) \cdot \overline{i}_d(n+1))$$

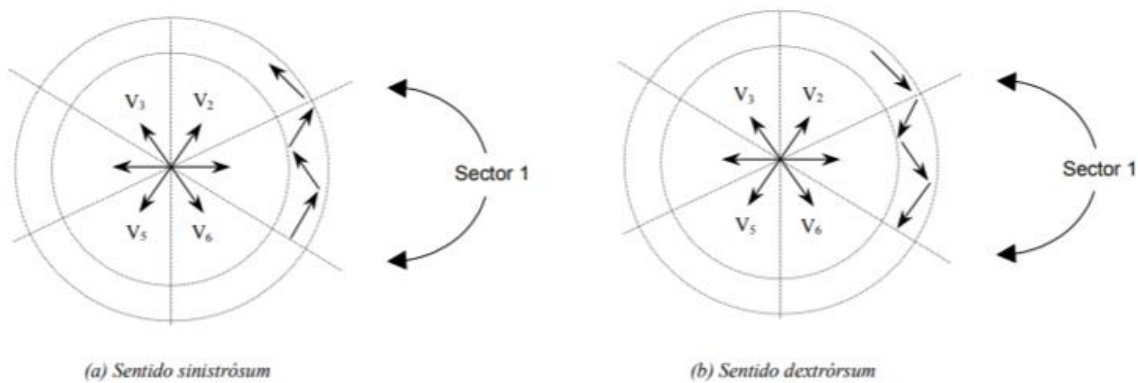


Ilustración 52.-Flujo del estator con el control DTC en el sector 1. (28).

Tomando como referencia el sector 1, el flujo del estator se desplazará en función de las conmutaciones que se requieran, es decir, por ejemplo, si se quiere un sentido del flujo sinistrorsum, las tensiones que se elegirán como primera conmutación serán la de los vectores 2 y 3. Al mismo tiempo se pueden

manipular las magnitudes de salida en función a los tiempos de conmutación. Si se busca elegir el sentido contrario, lo único que se requiere es elegir los vectores 5 y 6 para el sentido dextrósum. De esta forma es como se regulan tanto el flujo como el par. (29)

Como la constante de tiempo eléctrica del rotor de la máquina es sumamente notable (superior a 0,1s) en comparación al tiempo del estátor, se considera que el flujo del rotor oscila levemente en comparación a las variaciones del estátor, debido a esto se mantiene que el ángulo de los vectores es fijo. Por ello un mínimo cambio en este factor ocasionaría un gran cambio en la magnitud del par motor.

El cambio de dichos vectores es ocasionado por la aplicación de un vector espacial del inversor, para así poder controlar el par motor en función de la demanda del sistema. Aunque de la misma manera la ondulación del par motor no únicamente se ve afligida por la ondulación del flujo, sino en cambio la variación de los ángulos de sus vectores espaciales.

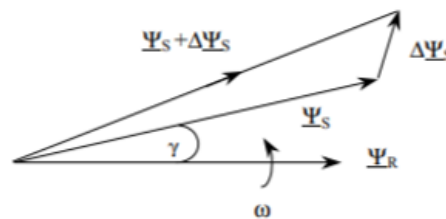


Ilustración 53.-Variación del flujo y par del control DTC. (28).

3.1.4.2.2 Efecto de las fronteras de los controladores

La metodología del control DTC está directamente en relación a la regulación tanto del par como del flujo. La ondulación visualizada en el par motor se ve afligida por el factor de “frontera”. Estas ondulaciones mencionadas previamente se tienden a aminorar lo máximo posible debido a que son las causantes de generar vibraciones y ruidos a la máquina eléctrica. Hay que tener en consideración que las ondulaciones del par no solo influyen en el empeoramiento del comportamiento de la velocidad angular del motor, sino que al mismo tiempo se producen desgastes mecánicos y materiales como por ejemplo en los cojinetes o los ejes del motor, sin embargo, cuando la máquina se dispone a altas frecuencias, se pueden negligir estas ondulaciones, gracias a la inercia del sistema.

- Controlador de flujo
Tomando como punto de referencia que la anchura de banda del controlador de par se mantiene fijo, se consigue obtener que una banda estrecha de flujo aumente la frecuencia de conmutación. Al mismo tiempo como el lugar geométrico del flujo que se produce en el estátor

es muy similar a un círculo, la onda de corriente que se genera en el estátor tendrá una forma muy parecida a una sinusoidal perfecta. En cambio, cuando el flujo aumente, la frecuencia de conmutación decaerá y el lugar geométrico de este pasara a ser más parecido a una forma hexagonal lo que ocasiona un aumento en la distorsión de la corriente en el estátor.

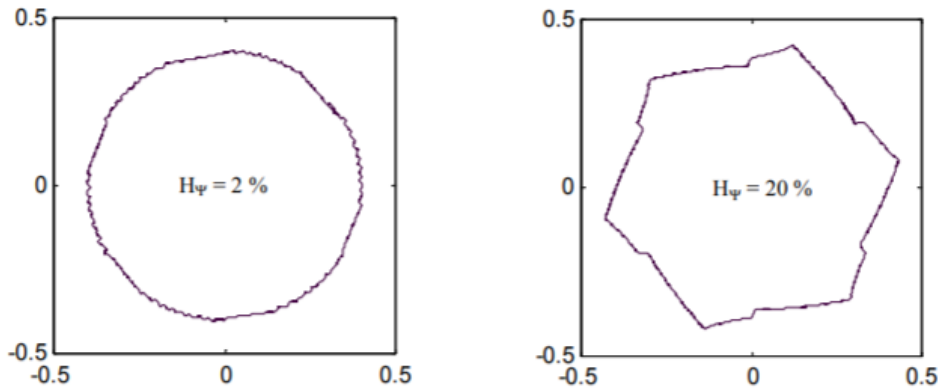


Ilustración 54.-Diferentes flujos del estátor con control DTC. (28).

- Controlador de par

La banda del controlador del par motor modifica la tasa de distorsión armónica (THD), a la par que la frecuencia de conmutación, dado que esta a su vez depende de las bandas de los controladores de histéresis tanto de par como de flujo.

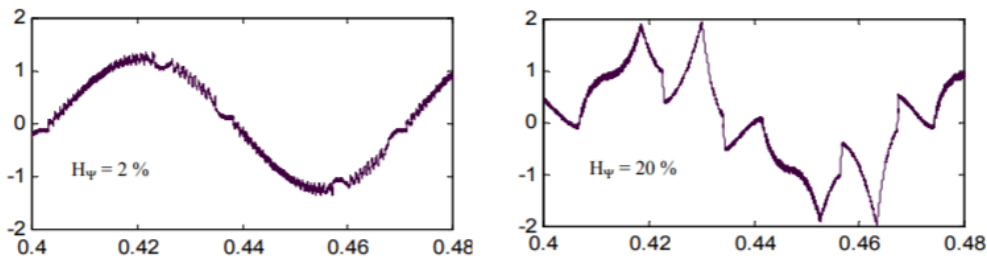


Ilustración 55.-Corrientes del estátor con control DTC. (28).

Tal y como se muestra en la imagen a medida que la anchura de bandas de histéresis aumenta, mayores son los efectos en las señales de las corrientes del estátor. Se aprecia que existe una gran dependencia a la frecuencia de conmutación. Por ello como esta frecuencia no es fija, se define como la relación de las conmutaciones entre el tiempo completo de una onda sinusoidal.

$$F_{sw} = \frac{N_s}{T_f}$$

Donde:

N_s es el numero de conmutaciones en un período completo de señal.

T_f es el tiempo total de la señal.

3.1.4.2.3 Ventajas e inconvenientes del control DTC

Comenzando por las ventajas del control directo de par, este es capaz de proporcionar una respuesta rápida y dinámica del comportamiento del par motor y del flujo, al mismo tiempo, no requiere de controladores PI para regular la intensidad del sistema. Con únicamente conocer el sector en el que se encuentra el vector espacial se puede conseguir el control deseado. También es un sistema robusto contra las variaciones de los parámetros del motor necesitando tan solo el valor de la magnitud de la resistencia del estátor para su regulación y finalmente el control no requiere de transformación de coordenadas, como ocurre con el control FOC en el cual se trabaja con las transformadas de Clark y Park.

Por otra parte, el control DTC también conlleva varios inconvenientes, sobre todo a velocidades muy reducidas. En primer lugar, en el intervalo de arranque, la corriente genera un pico, que en función de los interruptores, estos pueden ser quemados, la ondulación del par motor que se genera, ocasiona muchas vibraciones en la máquina, lo que dificulta la aplicación del control en dichas velocidades.

Para poder bajar la ondulación del par motor con la metodología analógica del control DTC, se requiere que el ancho de banda del controlador de par se reduzca al mínimo posible, para así aumentar la frecuencia de conmutación del inversor, pero esto en cambio podría también facilitar la quema de los interruptores.

Debido al retardo temporal que se origina en los algoritmos del control, los valores de frontera no están bien definidos, es decir el par instantáneo supera el máximo delimitado. Por ello cuando se implementa el control DTC digitalmente es prescindible tener la máxima frecuencia de muestreo posible, para que el efecto de retardo sea mínimo, ocasionando así un elevado coste monetario en el control.

Mirando el sistema analógico, el offset de las intensidades del estátor ocasiona dificultades a la hora del funcionamiento de los accionamientos del sistema. Se generan ondulaciones en el par motor de la misma frecuencia que las corrientes del estátor. Estas oscilaciones de frecuencia baja ocasionan que la velocidad del motor no sea lineal, lo que puede resultar en que las piezas del sistema se estropeen como en cualquier control vectorial que requiera de ondas para tomar datos de las corrientes. Aparte de esto, las variaciones que aparecen en la resistencia del estátor dificultan el comportamiento del

control, sobre todo a velocidades reducidas, por ello es necesario estimar el valor de dicha resistencia, más necesariamente en el intervalo de arranque.

Finalmente, en los tiempos donde la velocidad se encuentra muy baja, la precisión tanto del flujo como del par motor estimados es limitada, debido a estos existen dos métodos a aplicar en estos casos, los cuales son un estimador híbrido el cual aplica modelos matemáticos sobre las ecuaciones del rotor y por contraparte la implementación de observadores (filtros de Kalman).

Como se ha ido mencionando los inconvenientes del control DTC ocurren con mayor magnitud en los tiempos de velocidades reducidas, sin embargo, cuando las máquinas eléctricas conllevan una potencia mayor a los 15 kW aparecen otros inconvenientes que ocasionan que el control DTC sea incompatible con el inversor clásico. El problema más notorio es la distorsión de trayectorias del flujo que supera el límite mínimo establecido por las fronteras introduciendo armónicos en el sistema.

3.1.4.3. Control escalar

Teniendo en cuenta los controles mencionados con anterioridad, este puede resultar muy simple. El control escalar también denominado control Tensión-Frecuencia consiste en mantener dicha relación de cociente siempre constante.

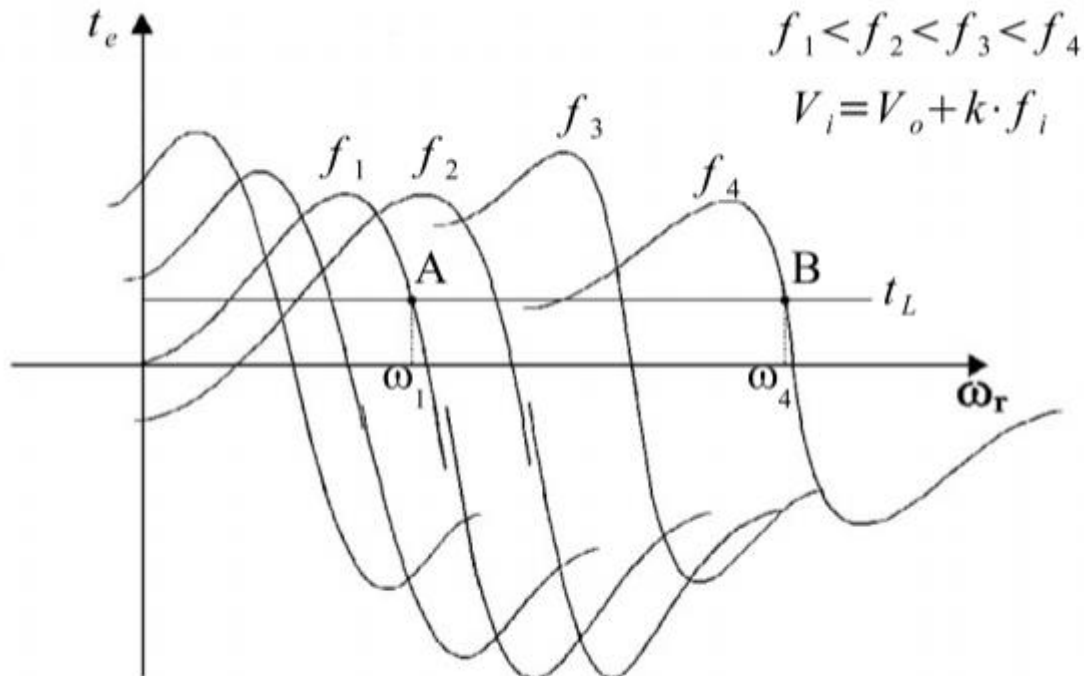


Ilustración 56.-Curvas de funcionamiento con misma relación a diferentes frecuencias. (30).

Tal y como se aprecia en la imagen previa, se observan diferentes curvas que tienen una forma casi idéntica, en función de cómo sea la frecuencia la gráfica se verá desplazada. Al variar dicha frecuencia en un motor se modifica como resultado la velocidad de sincronismo de la máquina, concluyendo que para un mismo par motor la velocidad angular de giro será distinta. El control escalar se basa en este fenómeno para poder otorgar así un control de velocidad en función de la frecuencia, es decir ser capaz de cambiar la velocidad de la máquina únicamente aplicando un cambio en su frecuencia de alimentación.

El control de la amplitud del voltaje de alimentación se realiza para así conseguir mantener fijo la densidad de flujo magnético. Visto desde el sentido más sencillo, se mantiene una relación de proporcionalidad entre la amplitud de la tensión de alimentación y la frecuencia de la máquina eléctrica. Tal y como muestra la imagen, una carga mecánica que va desde el punto A hasta el punto B se va acelerando conforme se va aumentando la frecuencia de alimentación de la máquina de f_1 a f_4 pasando su velocidad angular de ω_1 a ω_4 .

Cuando la variación de frecuencia se lleva lentamente teniendo en comparación la inercia del conjunto completo, la intensidad es sumamente inferior a la corriente en el período de arranque, por ello se aprovecha en la mayoría de los arrancadores comerciales que impliquen esta técnica.

Además, es posible conseguir cualquier punto de operación intermedio variando la velocidad. A bajas frecuencias el par motor se incrementa considerablemente, sin embargo, el par motor máximo es constante técnicamente. El sistema de control se realimenta con su propia velocidad o con la posición del eje mecánico y se lo compara con la magnitud de referencia determinada por el usuario.

El controlador, normalmente un Proporcional Integrador Derivativo (PID), calcula a partir del error la frecuencia de deslizamiento que sumándolo con la velocidad angular de giro del rotor crea la consigna de la frecuencia de alimentación del estátor de la máquina eléctrica. La relación de proporcionalidad que existe entre la tensión de alimentación y la frecuencia representan la consigna de la amplitud de la tensión. Las dos magnitudes se aplican para hallar las señales de conmutación de encendido y apagado de los componentes electrónicos de potencia del inversor. El inversor como fuente primaria de tensión ofrece la tensión aplicada al motor de manera alterna no sinusoidal con una frecuencia y un voltaje determinados por el controlador.

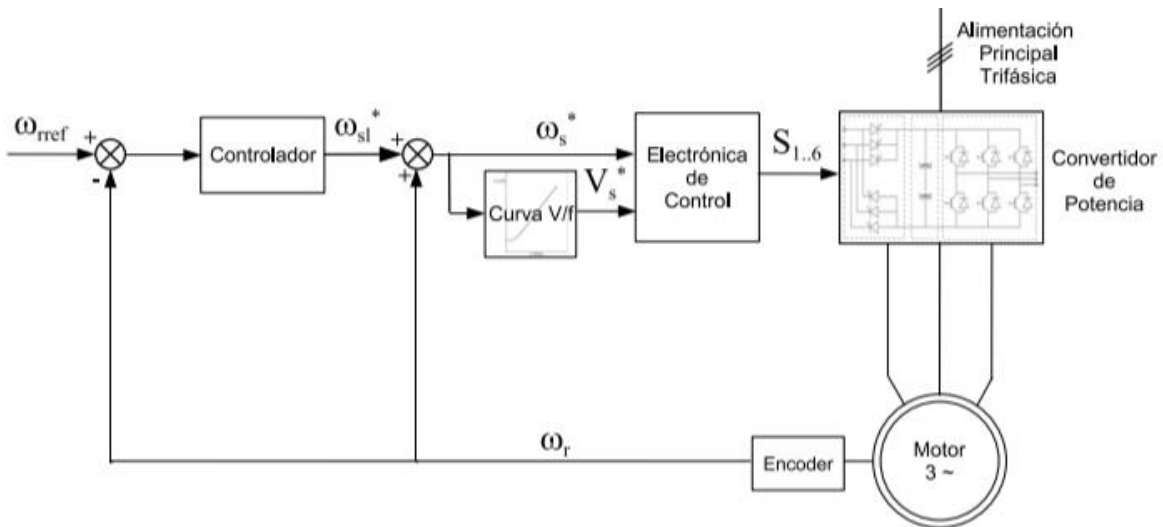


Ilustración 57.-Esquema general del control escalar. (30).

En los sistemas comerciales más comunes de control escalar la relación constante de la tensión de alimentación entre la frecuencia es habitualmente sustituido por un modelo matemático con una función no lineal que procura optimizar el comportamiento a velocidades reducidas. Sin embargo, el mayor inconveniente es su baja eficiencia y un intervalo de tiempo de reacción muy elevado.

Capítulo 4.- Procedimiento

4.1. Diseño del proyecto

Lo primero que hay que tener en consideración es a donde se quiere llegar, que es lo primero que se busca. En este caso sería mover la máquina eléctrica, pero para ello se requiere de una fuente de alimentación externa, la célula de combustible.

4.1.1. Fuente de alimentación

Circuitalmente lo que interesa es la corriente. Sin embargo, esta, la cual aporta la célula de combustible es variable, y eso es debido precisamente a la electrolisis que se produce en la fuente. La célula de combustible estará fijada en la zona frontal del automóvil, donde el radiador en los vehículos actuales, es por ello que el flujo de aire variará en función del caudal de fluido que penetre perpendicularmente a la célula, cuanto más caudal se introduce en las celdas de fuente generadora más energía se produce, pero esta energía no es fija, se rige por dos fórmulas las cuales son:

$$U_{f_{H_2}} = \frac{60000 \cdot R \cdot T \cdot N \cdot i_{fc}}{z \cdot F \cdot P_{H_2} \cdot V_{lpm(H_2)} \cdot x(\%)}$$

$$U_{f_{Aire}} = \frac{60000 \cdot R \cdot T \cdot N \cdot i_{fc}}{2 \cdot z \cdot F \cdot P_{H_2} \cdot V_{lpm(Aire)} \cdot y(\%)}$$

Donde:

R – Contante de valor 8,3145 J / (mol · K)

T – Temperatura de trabajo en grados Kelvin.

N – El número de celdas en la batería de combustible.

i_{fc} – Corriente generada mediante la electrolisis.

z – Numero de electrones en el intercambio de la electrolisis.

F – Constante de valor 96485 A · s / mol.

P – Presión de suministro absoluta del fluido.

V_{lpm} – Rango del flujo de aire.

$x(\%)$ – Porcentaje de hidrógeno en el combustible.

$y(\%)$ – Porcentaje de Oxígeno en el aire.

A partir de aquí se introducen, mediante estas dos ecuaciones, a la célula de combustible del software matemático. La aplicación que se ha utilizado para este proceso es la herramienta del Matlab, Simulink.

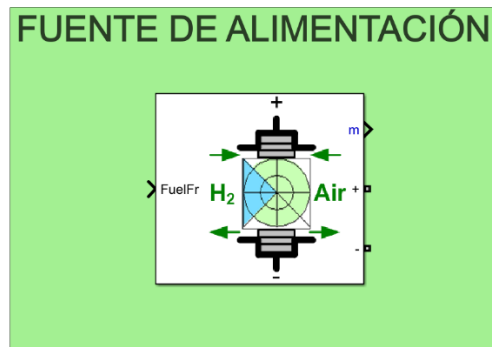
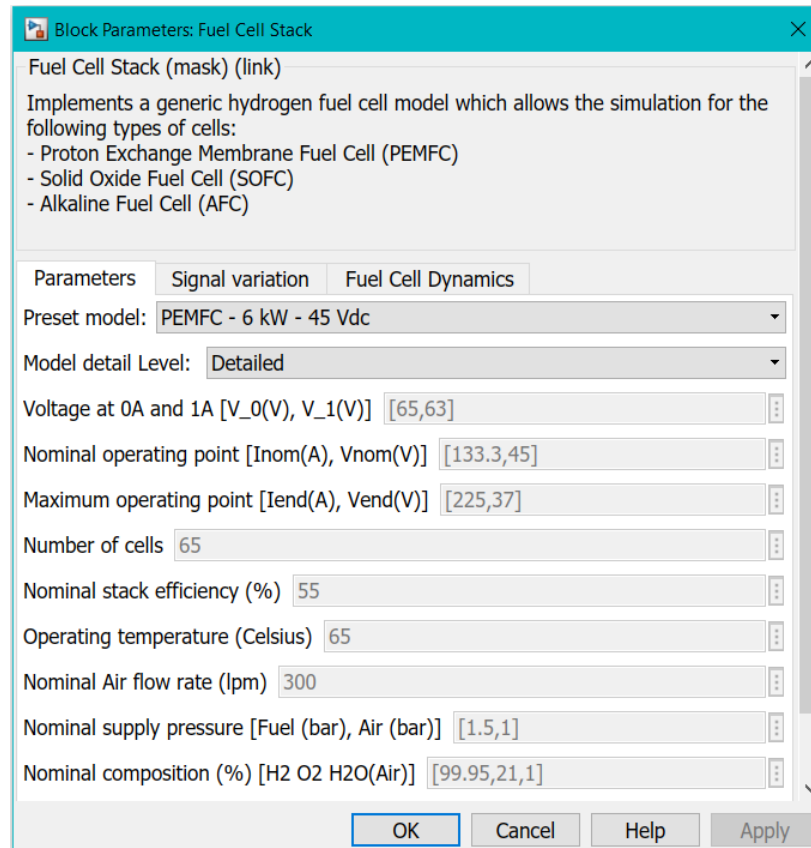


Ilustración 58.-Bloque del Simulink (Célula de combustible).

Tal y como se muestra en la imagen, el primer paso es sacar de la barra de herramientas la célula de combustible. Este y todos los siguientes bloques se sacan de la etiqueta de la barra de herramientas “Library Browser”, seguidamente comenzando por este bloque se elige la librería de “Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Electric Drives/Extra Sources”. Una vez puesto sobre el proyecto en blanco este mismo bloque se puede modificar en función de la aplicación a la que será diseñado.



Il·lustració 59.-Modelo de la cèlula de combustible en la simulació.

Primero se elige una cèlula comercial cuyas características fueran razonables para la aplicación, por ello se eligió la “PEMFC – 6 kW – 45 Vdc” y tomando esta como referencia los datos predeterminados son que trabaja a una temperatura nominal de 65 °C, está compuesta por 65 celdas, la presión del hidrógeno y del oxígeno son de 1,5 y 1 bares respectivamente. El número de electrones intercambiados van en función de las ecuaciones de reacción, siendo para el hidrógeno la variable igual a 2 y para el oxígeno igual a 4. El porcentaje de hidrógeno en el combustible será 0,9995 por ciento, el porcentaje de oxígeno en el aire es de 0,21 por ciento y los rangos de flujo para el hidrógeno y el oxígeno son 50,96 y 300 respectivamente.

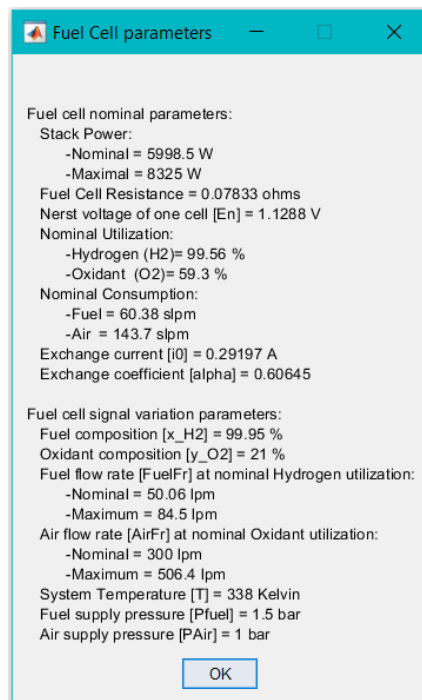


Ilustración 60.-Características de la célula de combustible seleccionada.

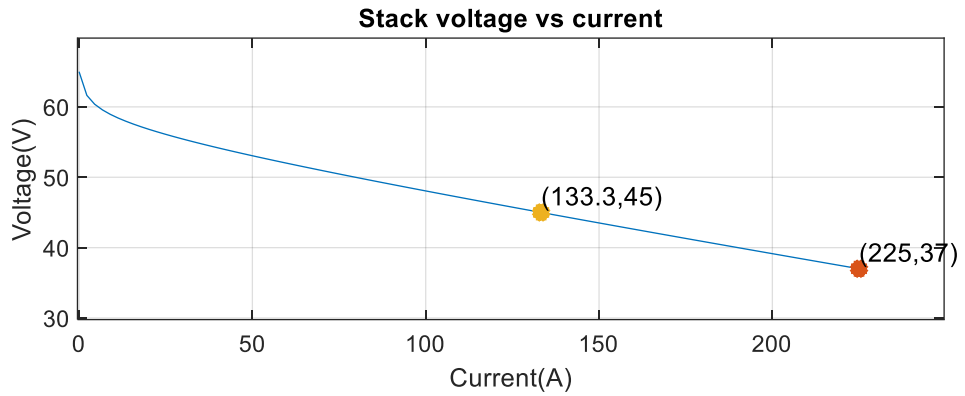
Y quedando como resultado de las ecuaciones:

$$U_{f_{H_2}} = \frac{60000 \cdot 8,3145 \cdot (65 + 273,15) \cdot 65 \cdot i_{fc}}{2 \cdot 96485,3364 \cdot (1,5 \cdot 100000) \cdot 50,96 \cdot 0,9995}$$

$$U_{f_{Aire}} = \frac{60000 \cdot 8,3145 \cdot (65 + 273,15) \cdot 65 \cdot i_{fc}}{2 \cdot 4 \cdot 96485,3364 \cdot (1 \cdot 100000) \cdot 300 \cdot 0,21}$$

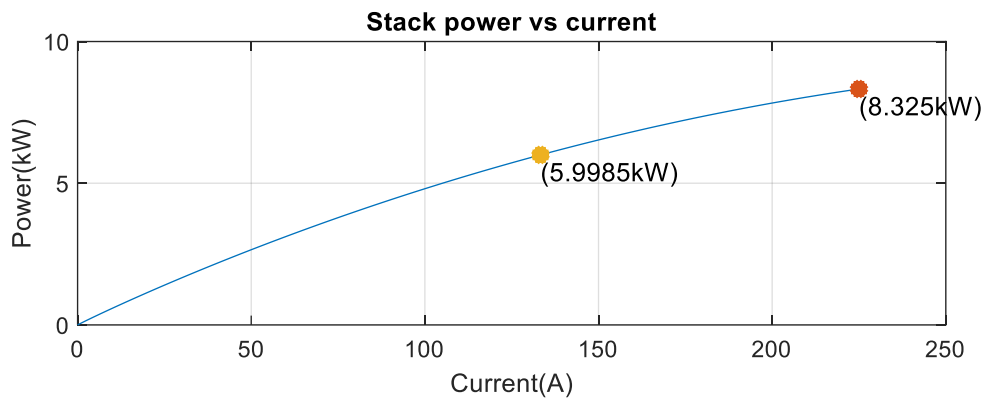
Una vez definidas las ecuaciones, se aplican mediante el bloque de “subsistema” en el software de manera que el flujo sea variable a la intensidad de entrada del proceso.

Al mismo tiempo se pueden observar las curvas de Tensión-Corriente.



Gráfica 9.- Curva Tensión-Corriente de la célula de combustible.

O por el contrario también viene definido la curva de Potencia-Corriente.



Gráfica 10.- Curva Potencia-Corriente de la célula de combustible.

Por otro lado, no siempre existirá la posibilidad de que la célula tome el flujo necesario para poder realizar las tareas del automóvil, en estos casos se ha tomado una medida muy común pero que garantiza la reducción de anomalías al mínimo y es tomar una batería de Litio como soporte quedando finalmente el sistema de generación así:

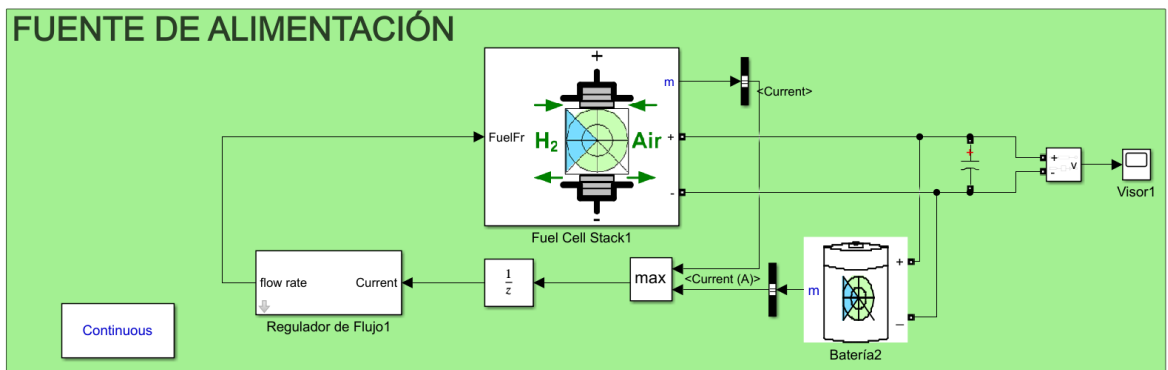


Ilustración 61.- Esquema en Simulink de la célula de combustible controlada.

Como se puede apreciar se tomará la intensidad más viable entre las dos fuentes, siempre en función de lo que se pueda generar, si la célula de combustible es capaz de generar lo suficiente como para superar a la batería de litio, será esta la que genere la intensidad mediante la electrolisis, sin embargo eléctricamente a la salida de ambas fuentes lo que sale como resultado es la tensión en continua de salida en circuito abierto, a partir de aquí es cuando se comienza a conectar todo el sistema que será alimentado, eso sí, siempre con el debido control, por ello a partir de este punto hay que pararse a visualizar a lo que se quiere suministrar primero, en esto proyecto lo que estará alimentado será el motor que hará mover las ruedas del vehículo. El motor que se ha seleccionado ha seguido el mismo criterio que la fuente de alimentación, se elegirá un motor comercial síncrono de imanes permanentes, más concretamente de características tales como “67,27 Nm, 560 Vdc, 1700 rpm”.

También se ha considerado como es la entrada de la consigna del bloque de la célula de combustible. Tal y como muestra el bloque la entrada de información corresponde al flujo de combustible. Por ello mediante la ecuación redactada en el anterior capítulo se realizan subsistemas que comprendan las características de la célula de combustible comercial, es decir no cumplirá con un 100% de fiabilidad, pero se tendrán en consideración todos los factores convenientes y razonables para realizar dicho estudio.

En el primer caso se encuentran las características de la célula elegida que se implementarán en el subsistema del regulador de flujo en el cual se agregan el número de células de las que está compuesta la célula de combustible completa, al mismo tiempo se introducen otros valores como la temperatura de trabajo o la composición del hidrógeno a aplicar en la reacción electroquímica interna.

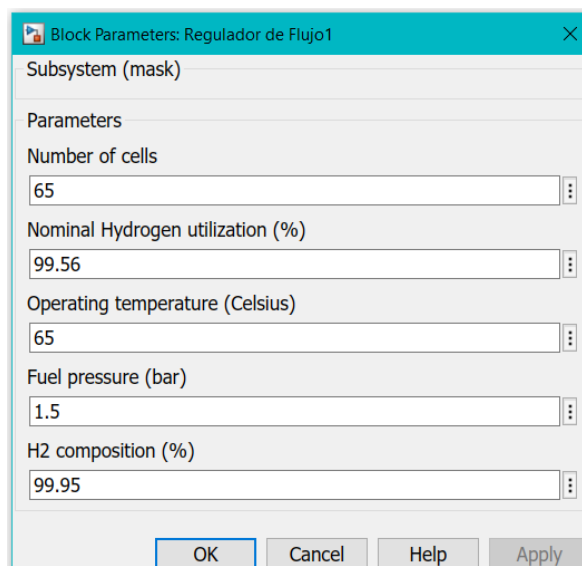


Ilustración 62.- Características del regulador de flujo.

Del mismo modo, la batería de litio conectada en paralelo con la célula de combustible debe elegirse de manera que se complemente con todo el sistema de alimentación primaria. Recordando que todos los componentes del sistema serán elementos comerciales, entonces se ha elegido una batería de la misma potencia que la de los vehículos actuales, de manera que la tensión de salida en bornes será de 11 voltios.

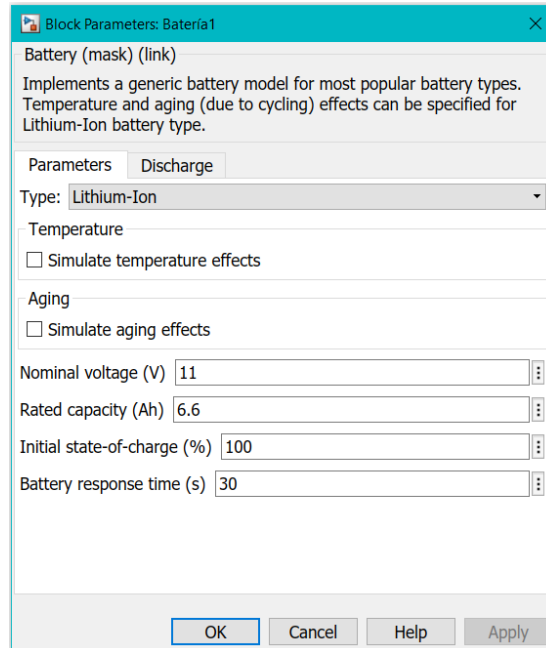


Ilustración 63.- Características de la pila alcalina.

Hasta aquí terminaría lo que es el sistema de alimentación del vehículo eléctrico. El arranque de este sistema de primer orden, al inicio de la señal de tensión, posteriormente este irá aumentando hasta alcanzar la tensión nominal de trabajo del sistema.

4.1.2. Convertidor

A la salida de la fuente de tensión se conecta seguidamente un convertidor, en este caso como se tiene una batería de litio como fuente de soporte no es necesario reducir la tensión de salida en bornes de la fuente de tensión, por ello se pueden obviar tanto un convertidor reductor, como un elevador-reductor. Dado esto, se concluye implantar un convertidor únicamente elevador. Al mismo tiempo como el software matemático ya tiene un bloque designado a esta tarea, será el que se aplique en el proyecto debido a que la realización a mano no ocasionaría cambios en las señales de conmutación.

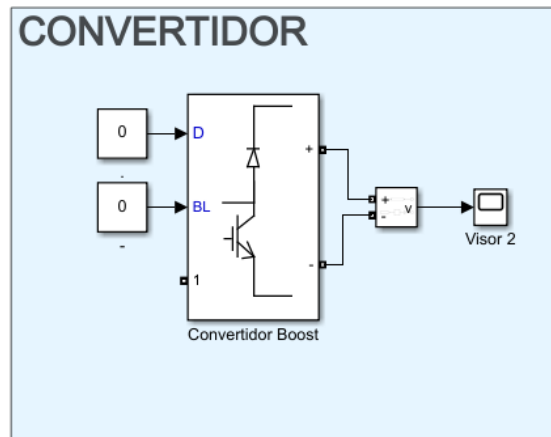


Ilustración 64.- Convertidor Elevador (Boost Converter).

Una vez implementado el convertidor se escogen unos valores estándar para sus componentes, estos no serán los definitivos, sin embargo, ayudan a seguir las pautas observando el comportamiento que realizan los diferentes valores en la misma consigna. Como punto de partida se estipulan los siguientes valores para los componentes del convertidor.

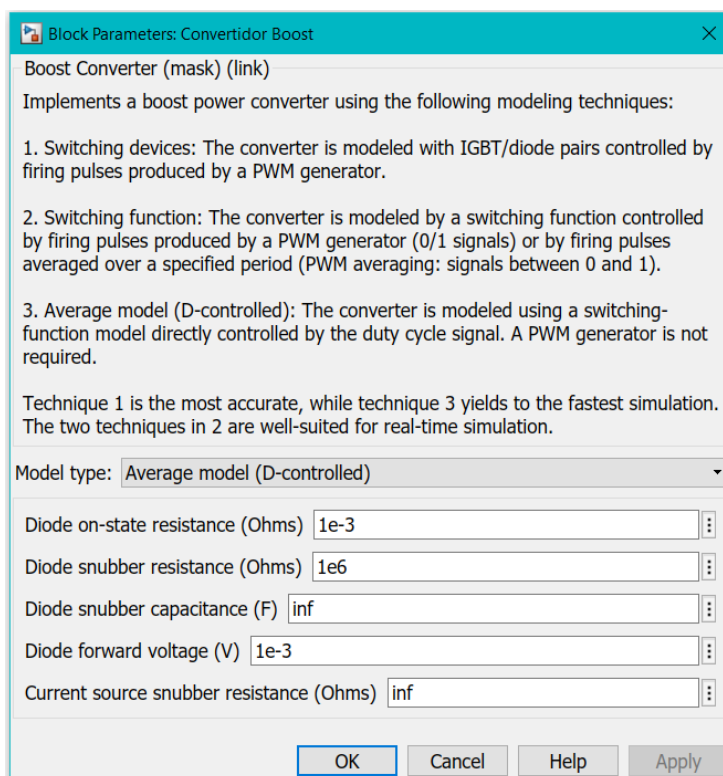


Ilustración 65.- Valores determinados por el usuario para el convertidor.

Del mismo modo también se realiza con los períodos de conmutación del transistor que lleva incorporado el convertidor electrónico. Asimismo, en este punto se puede interconectar con la fuente de energía para ir aumentando el sistema del proyecto quedando como resolución el siguiente esquema.

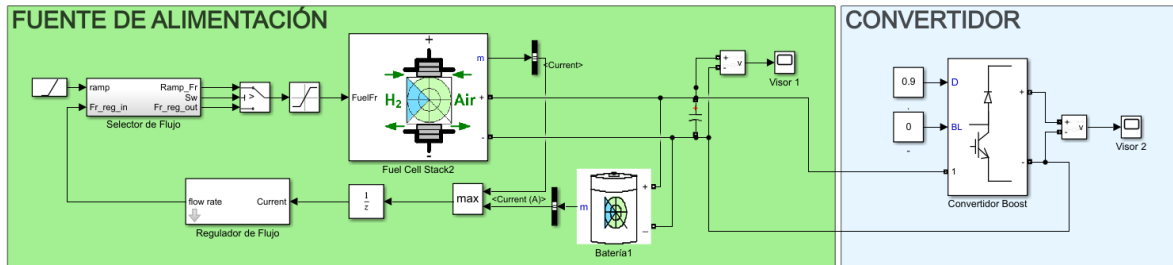


Ilustración 66.- Esquema de la fuente de alimentación conectada al convertidor.

4.1.3. Inversor del sistema

A continuación, siguiendo la lógica del sistema general para poder alimentar el motor de imanes permanentes del vehículo eléctrico, este previamente deberá estar conectado a un inversor que le permita alimentarse de las señales fasoriales a la salida del inversor. Este es otro bloque de la librería del simulink.

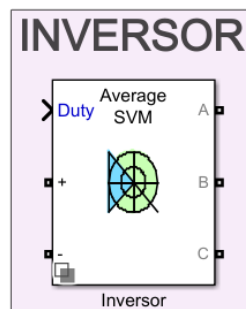
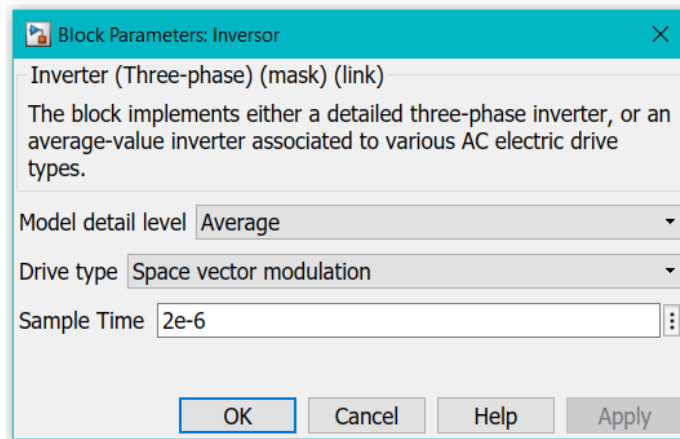


Ilustración 67.-Bloque del inversor en Simulink.

Recordar que el objetivo del inversor es transformar la señal continua de entrada a una señal alterna que alimente a la máquina eléctrica encargada del movimiento del vehículo.

Los parámetros del inversor que se modifican, son el tiempo de muestreo, el modelo y el tipo de accionamientos. Al inicio se tomará modelos rápidos para conocer el comportamiento del sistema, una vez todo el sistema en su conjunto funcione razonablemente bien, se irán modificando valores que incluyan perturbaciones probables en el sistema, para conseguir así un esquema lo más idealizado a la realidad. En este caso el inversor comienza con las siguientes características.

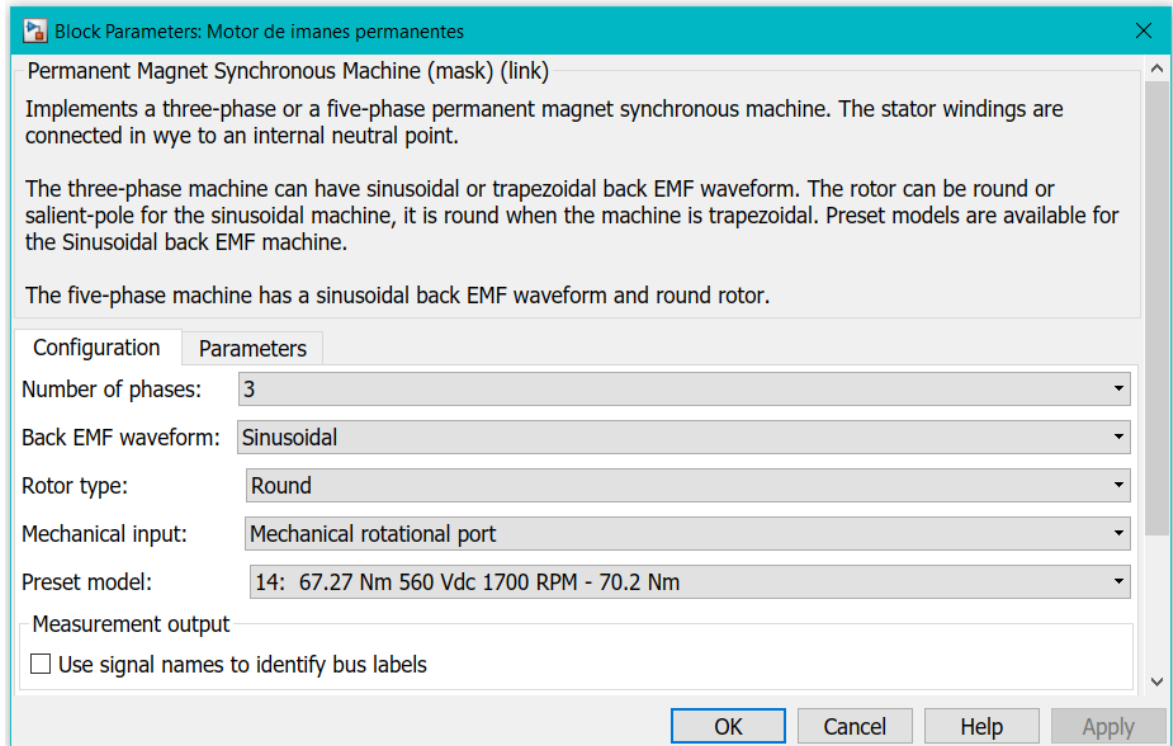


Il·lustració 68.-Característiques del inversor.

4.1.4. Motor empleado

Teniendo constancia de la implementación del inversor, a su salida ya podría conectarse el motor a emplear en el vehículo eléctrico. En este caso haciendo uso de la teoría explicada a lo largo de este proyecto, se considera que la elección más óptima a instalar en el vehículo en temas de máquinas eléctricas, es el motor de imanes permanentes. En este caso se elige un motor de características comerciales predeterminado por el software.

Para elección concreta de los motores de imanes permanentes, se ha realizado un leve estudio para conocer sobre que rangos oscila este tipo de motores en esta aplicación concreta. El intervalo de potencia en los vehículos eléctrico esta delimitado entre los 35 kW y los 100 kW. Por ello, calculando las potencias de los prediseños disponibles en el software, se ha elegido un motor de imanes permanentes de 40 kW. Este es el motor de mayor potencia que aporta la versión actual del programa.



Il·lustració 69.- Paràmetres determinats per a un motor de imanes permanentes.

Se recuerda que el objetivo era implementar todo este sistema a un vehículo unifamiliar de ciudad, es por ello que no se busca obtener un alto par, debido a esto se ha omitido la elección de tomar como motor de aplicación uno de reluctancia conmutada, este sería adecuado para vehículos que demanden un alto par como por ejemplo grúas o inclusive camiones de transporte.

Tal y como se muestra en la imagen el motor alcanza las 1700 revoluciones por minuto, estas revoluciones se transforman al sistema internacional aplicando las medidas de las ruedas como valor de referencia. En este caso se toma el valor reglamentario de las ruedas de un vehículo unifamiliar de ciudad, las cuales constan de 40 cm de radio. Una vez conocido este valor se puede determinar la velocidad nominal del vehículo en su última marcha. En el caso de que se requiera aplicar velocidades inferiores a esta se utiliza el juego de marchas del que contará el vehículo para dividir en rangos de revoluciones las diferentes marchas del vehículo, estas normalmente, en estos tipos de vehículos constan de entre 5 y 6 marchas de movimiento más la añadida de marcha atrás.

Por ello, para conocer la velocidad a la que podrá correr el vehículo se aplica la siguiente ecuación, la cual convierte las velocidades rpm en velocidad lineal.

$$V\left(\frac{km}{h}\right) = V(rpm) \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot r \cdot \frac{3600}{1000}$$

Donde:

$V\left(\frac{km}{h}\right)$ es la velocidad lineal del sistema.

$V(rpm)$ es la velocidad angular del motor.

r es el radio de referencia en metros.

Tomando ahora los valores de referencia la velocidad lineal nominal del vehículo es:

$$V\left(\frac{km}{h}\right) = 1700 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot 0,4 \cdot \frac{3600}{1000} \approx 256 \frac{km}{h}$$

4.1.5. Tipología de control

Una vez se ha conseguido alcanzar el funcionamiento del motor eléctrico de imanes permanentes, se requiere realizar un control correspondiente a esta tipología de máquina. Tal y como se mencionó en el capítulo de los controles los motores de imanes permanentes requieren de un control complejo, en este caso concretamente se opta por aplicar un control de campo orientado, o comúnmente conocido, un control FOC.

El control FOC consiste en una secuencia de procesos de transformación de señales aplicando los conceptos vistos en la teoría tales como la transformación analítica de Clark y Park. Debido a esto el software facilita este proceso aplicándolo a un bloque individual de información de parámetros.

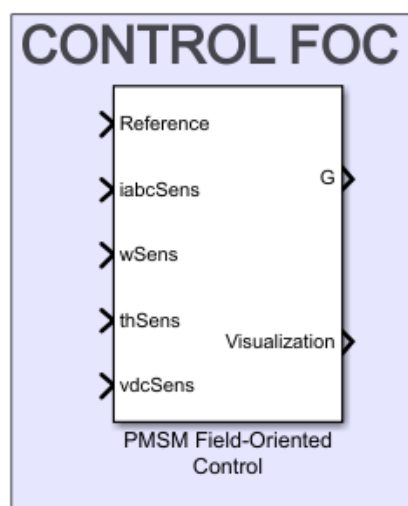
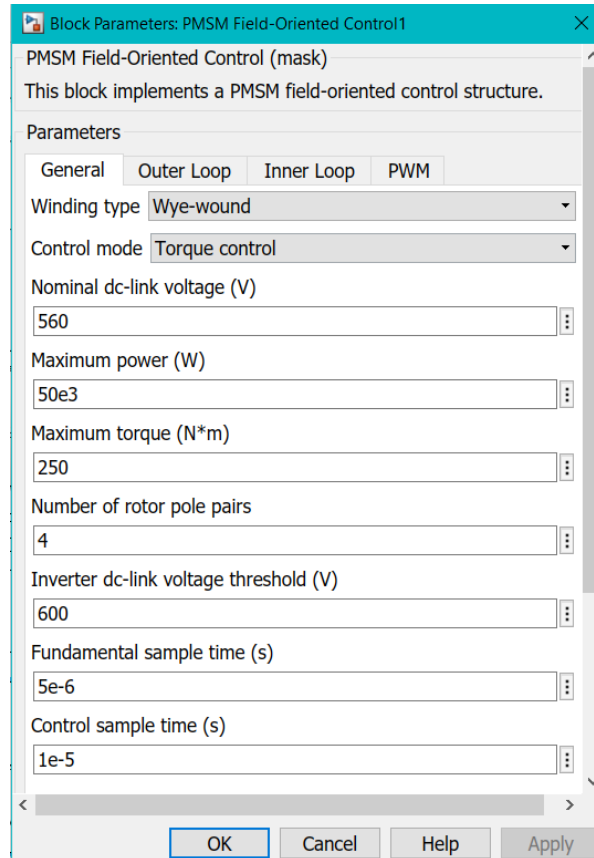


Ilustración 70.-Bloque de control FOC del Simulink.

De este modo se puede determinar los parámetros de control sin recurrir al diseño personalizado aplicando los controles manualmente. Tal y como se observa en la imagen las consignas de referencia de la intensidad o la velocidad angular se definen mediante el usuario si se busca modificar el sistema, si lo que se requiere es regularlo sin más, se puede determinar a partir de un lazo secundario de control del mismo sistema interno.



Il·lustración 71.-Parámetros del control FOC.

El control de flujo orientado es el más complejo a desarrollar en los motores, incluyendo los motores de imanes permanentes, por ello las modificaciones de los diferentes valores se realizan al mismo tiempo con todo el sistema de control y la parte mecánica. Recurriendo a esto, se pueden ajustar los diferentes valores críticos que varían el sistema por completo.

4.1.6. Parámetros del vehículo

Tomando como punto de referencia la velocidad se plantea que lo más factible es elevar la tensión de salida de la célula de combustible a la nominal del motor para que este pueda trabajar en su punto más óptimo de rendimiento. Es por ello que se instalará un inversor a parte de un convertidor elevador dado que el motor no es en continua sino en alterna trifásica, por lo que necesitara de un cambio de continua a alterna.

4.2. Procedimiento del diseño

Como se ha podido comprobar, este proyecto conlleva una simulación compleja que requiere de varios intentos para alcanzar el valor óptimo en cada dispositivo, debido a esto se ha considerado la posibilidad de subdividir la simulación en diferentes partes para así conseguir realizar las simulaciones necesarias con los tiempos que corresponden en cada caso. Por ejemplo, no tendría sentido comprobar cómo funciona un vehículo durante un lapso de tiempo de 2 segundos, mientras que es suficiente tiempo para comprobar cómo está la situación de los elementos de control. Como solución se ha dividido el programa en tres secciones independientes, en las cuales se estudiarán y valorarán los resultados que se obtengan para que una vez se tengan todas las secciones separadas, agruparlas en la simulación final, que será la compuesta por todas sus partes, ahora bien, dependientes unas de otras.

4.2.1. Alimentación eléctrica y convertidor

La primera parte que se ha subdividido es la alimentación general del sistema, teniendo en cuenta la elevación de tensión que se ocasiona en el convertidor elevador conectado justo a la salida de la célula de combustible y la batería de Litio.

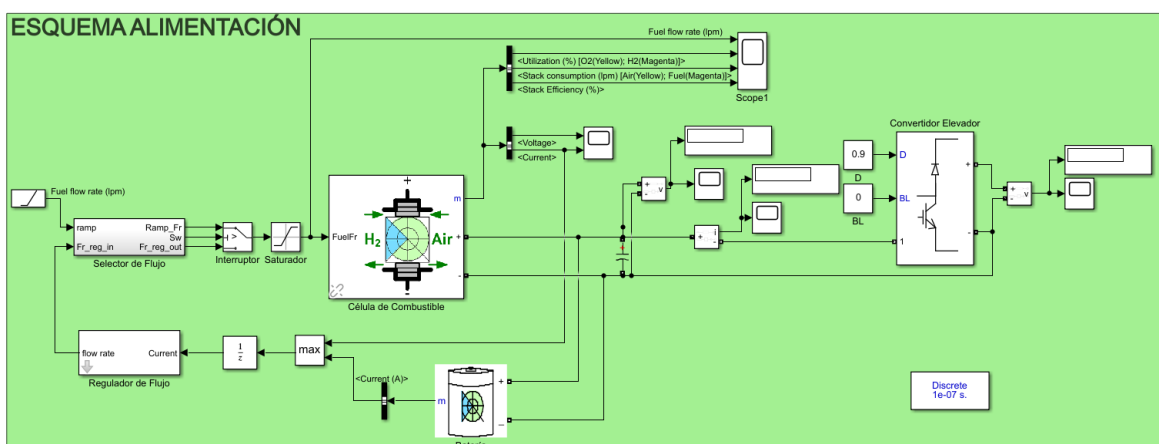


Ilustración 72.- Esquema de alimentación.

Tal y como se puede llegar a apreciar la anterior ilustración, concuerda con lo que se realizó durante el proceso del proyecto. Esto se debe a que es el comienzo del programa y a medida que se iba realizando la parte de alimentación se ha ido configurando acorde a los datos que se buscaban.

La única modificación que se ha realizado es el "Duty cycle" del convertidor, el cual se ha impuesto que sea de un valor determinadamente alto para comprobar hasta qué nivel podría elevarse la tensión de salida del sistema principal de alimentación.

Del mismo modo existen 4 tipologías para medir las variables de la célula de combustible. Por motivos de tiempo en simulación al inicio se ha optado por elegir un modelo discreto detallado.

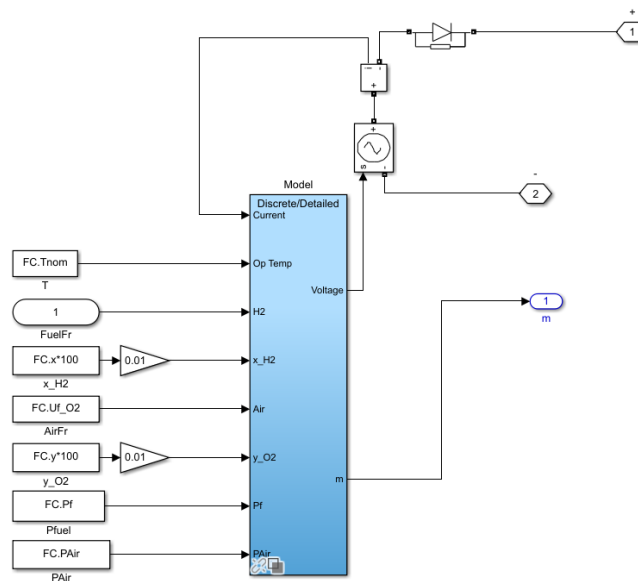


Ilustración 73.-Algoritmo para los modelos de simulación de la célula de combustible.

Al inicio, al tener que realizar un número incontable de simulaciones para alcanzar un resultado óptimo se optó por un modelo discreto detallado, tal y como se muestra en la ilustración previa para que los tiempos de simulación fuesen cortos en comparación con las simulaciones con el modelo continuo en los cuales existen más variables a tener en cuenta.

Dentro de este bloque de célula de combustible se han designados los diferentes subsistemas y valores:

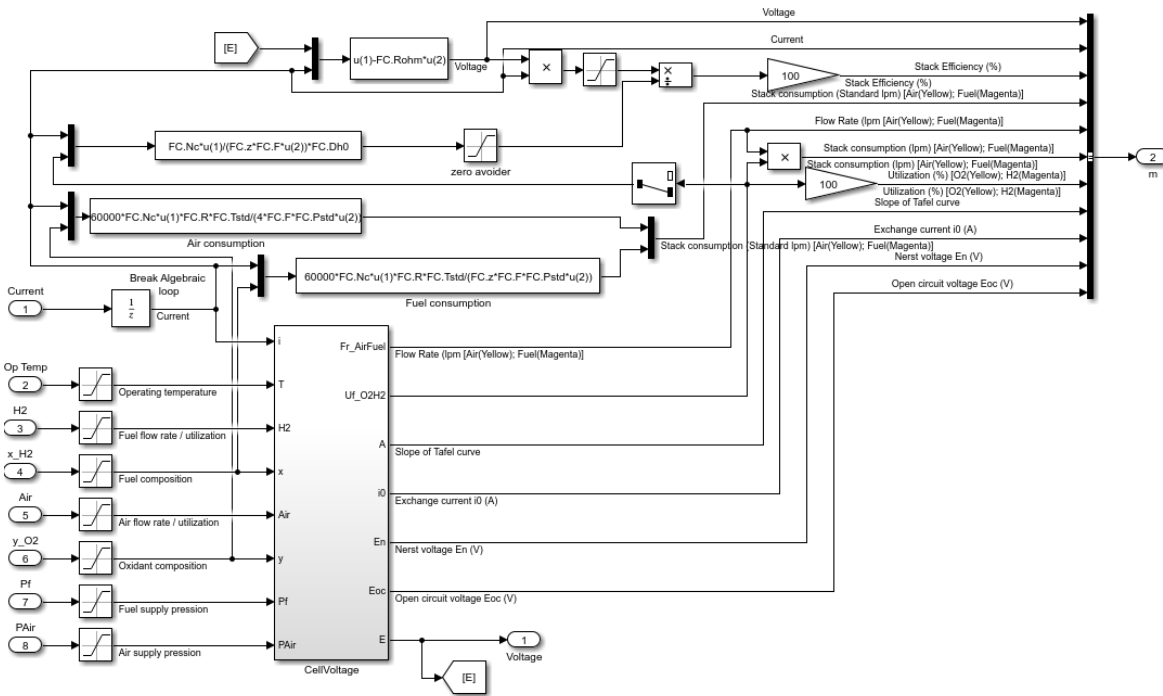


Ilustración 74.-Modelo detallado discreto de la célula de combustible.

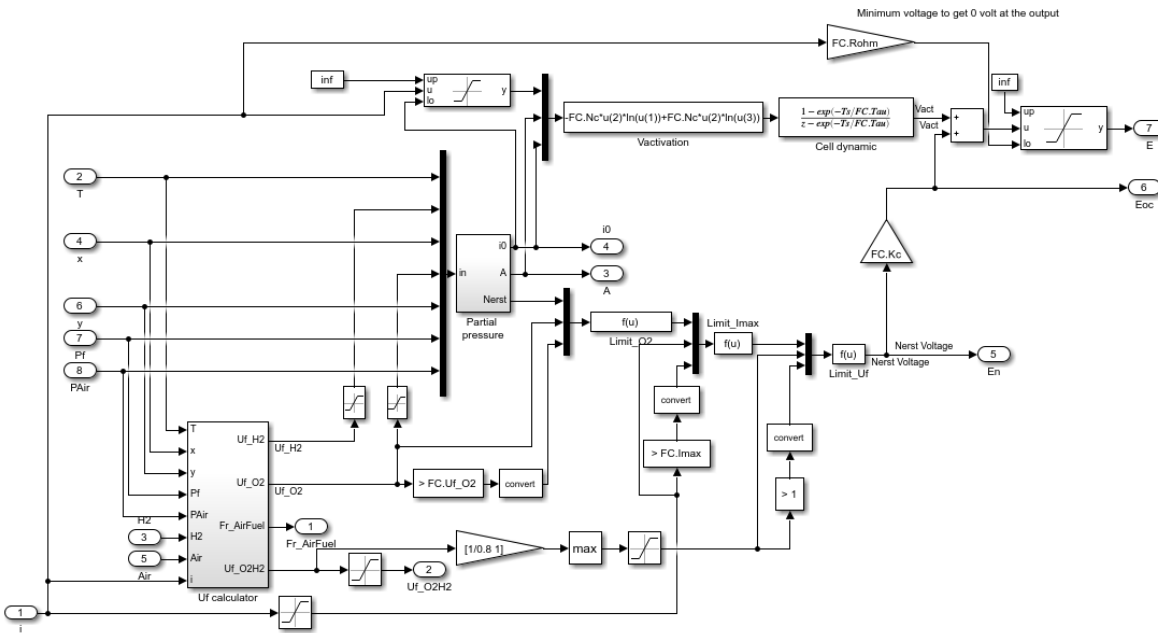
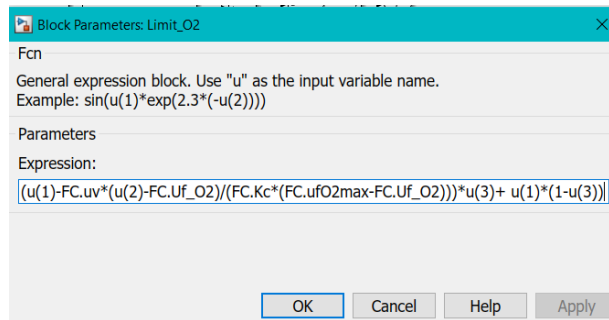
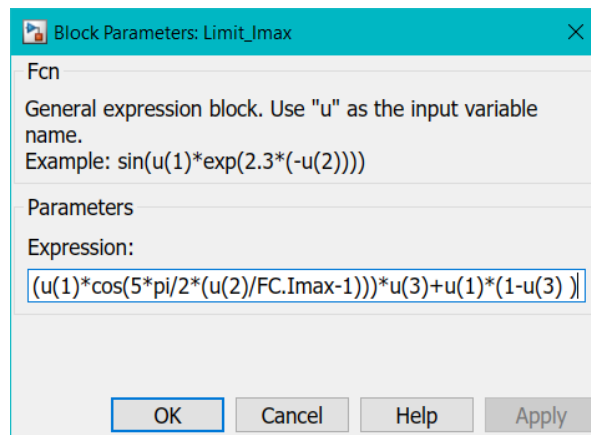


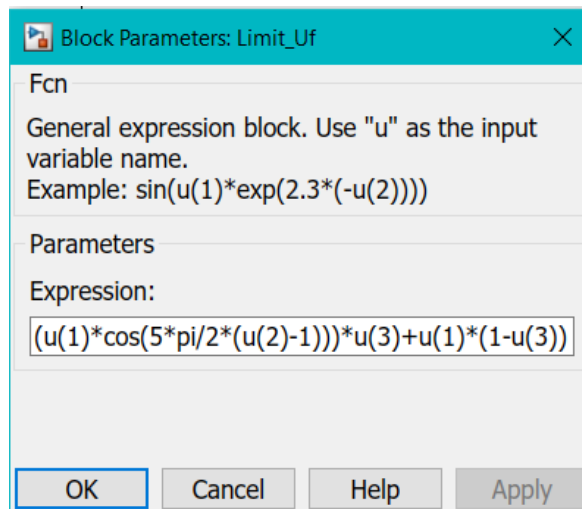
Ilustración 75.-Algoritmo interno de la célula de combustible.



Il·lustració 76.-Funció límit de absorció de oxigeno.



Il·lustració 77.-Funció de intensitat màxima admissible.



Il·lustració 78.-Funció límit de Uf.

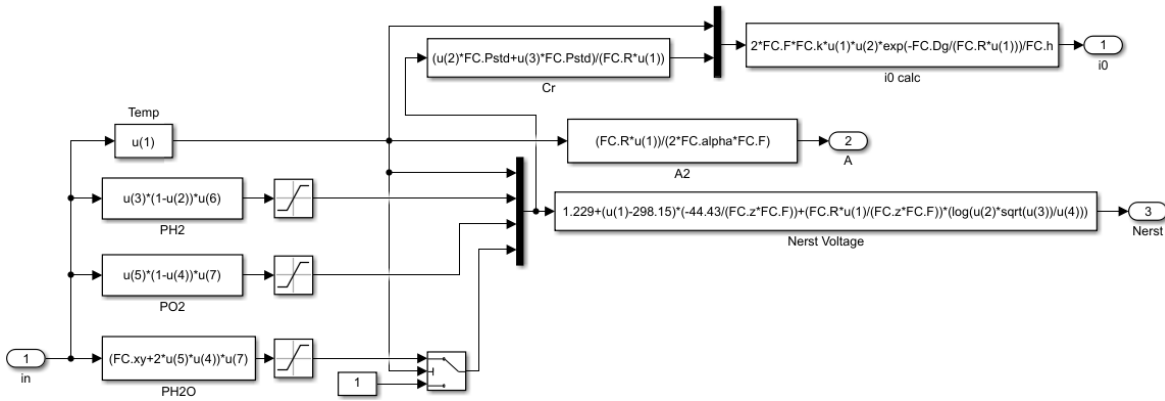


Ilustración 79.- Presiones parciales de la célula de combustible.

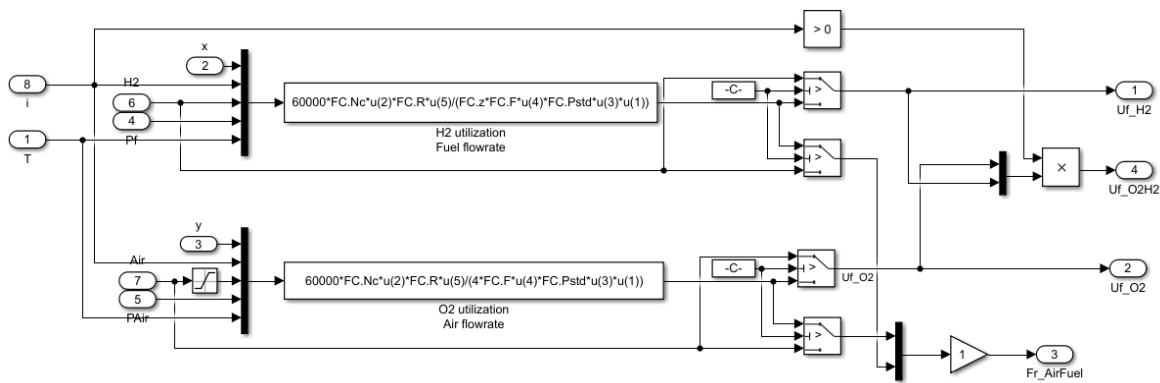


Ilustración 80.-Calculador de Uf de la célula de combustible.

4.2.2. Esquema mecánico

Dentro del esquema mecánico como su propio nombre indica, solo se tendrá en consideración el comportamiento del vehículo a partir del motor que se ha seleccionado previamente.

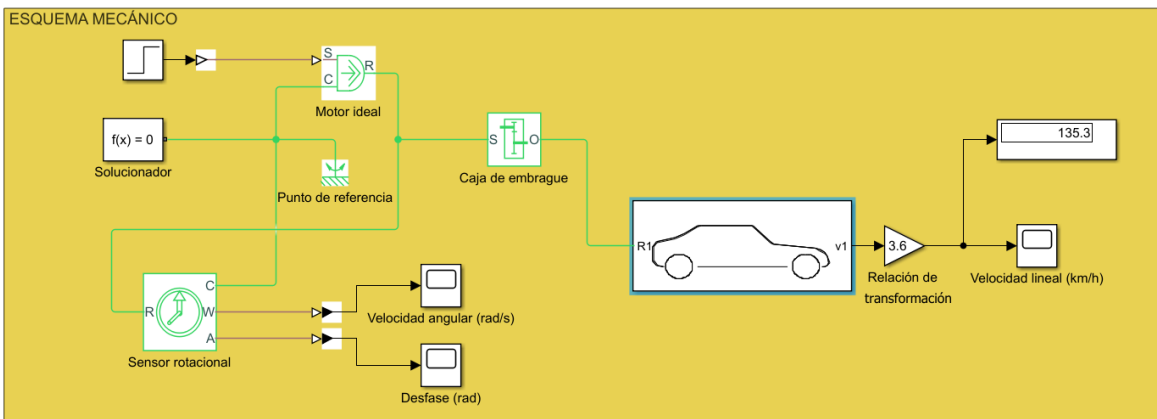


Ilustración 81.-Esquema mecánico mediante software (Simulink).

Tal y como se muestra en la imagen, el comienzo de este esquema reside en el motor que se ha seleccionado. Como bien se ha comentado con anterioridad, esta última parte también debe ser dependiente del resto, por ello el par motor máximo que se toma de referencia se plasma en el motor ideal de la ilustración. Mostrando por partes el par motor estará presente durante todo el trayecto del vehículo, debido a esto se ha elegido un bloque “Step” como modelo de par estacionario con una magnitud de 126 Nm.

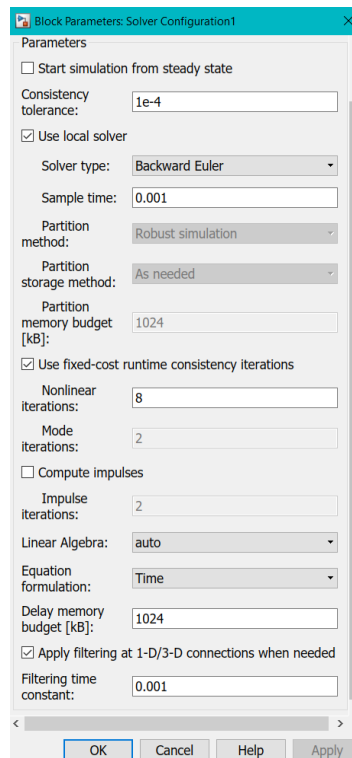


Ilustración 82.- Parámetros establecidos en el bloque “Solver”

Estos valores del bloque del software se han ido modificando en función de la proximidad a la que se encontraba la solución, es decir, este bloque consiste en que el programa sea capaz de realizar algoritmos matemáticos para hallar una respuesta en función de la tipología de solucionador. Al inicio se optó por una simulación de aproximación trapezoidal la cual es más rápida que la que se muestra en la imagen (solucionador de Euler). Esto se impartió porque las lecturas de la velocidad del vehículo tenían un tiempo de muestreo igual al tiempo de paso del “Simscape” en su parte mecánica.

Al realizar un control vectorial muy rápido, que controla el par motor en el orden de milisegundos, el muestreo lento de velocidad provoca inestabilidades por la parte integral del control.

Posteriormente se conectó el vehículo sin tener en consideración relaciones de velocidades para las marchas, se buscaba alcanzar una velocidad normalizada para un vehículo de ciudad unifamiliar. Se considera que este valor alcanza los 150 km/h como velocidad máxima teniendo en cuenta inercias, masa del vehículo, radio de las ruedas, etc.

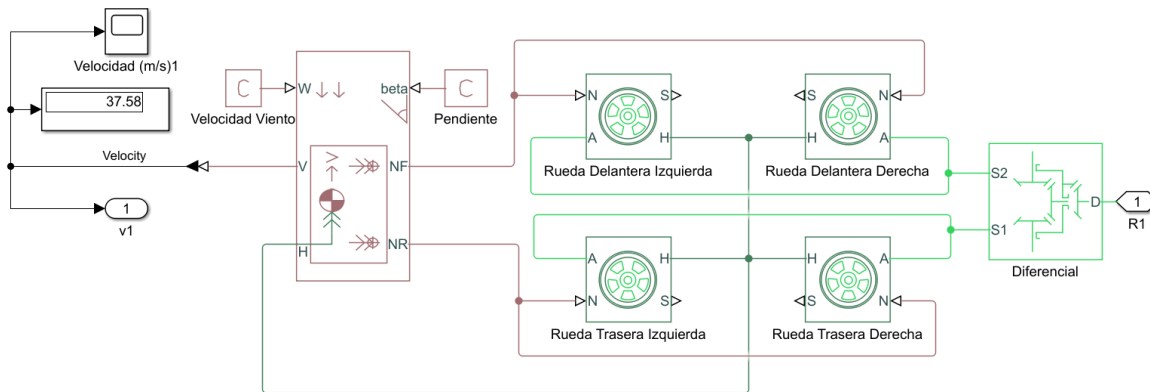


Ilustración 83.-Esquema interno del vehículo.

Tal y como se muestra en la ilustración, en el bloque del vehículo se encuentran las fuerzas de rozamiento correspondiente a diferentes elementos que se deben tener en consideración como pueden llegar a ser la velocidad del viento que soporta en sentido contrario al vehículo, la inclinación de la carretera por la cual circula o incluso las características de las ruedas. Se han implementado diferentes valores, siempre considerando magnitudes razonables al proyecto.

Del mismo modo se observa que la velocidad del vehículo alcanza los 37,58 m/s, que realizando el cambio de unidades al sistema internacional resultan:

$$37,58 \frac{m}{s} \cdot \frac{3600 s}{1 h} \cdot \frac{1 km}{1000 m} = 135,29 \frac{km}{h}$$

Para poder alcanzar dicho valor lo primero que se observó fue el rango de valores de los motores que se implementan en estos sistemas. Buscando información se estima que actualmente el rango de potencias ronda entre los 35kW y los 100kW. Debido a esto como el modelo detallado del motor del software alcanza los 40kW (el mayor de todos), se valora el tomar medidas de referencias mecánicas de vehículos pequeños para que el par motor sea capaz de transportar personas. Principalmente se ha

optado por un vehículo de 4 plazas de 2.000 kg de peso, que al incluir 4 personas ocupando dichas plazas la masa del vehículo aumenta a 2.280 estimando que las 4 personas pesan 70 kg cada una.

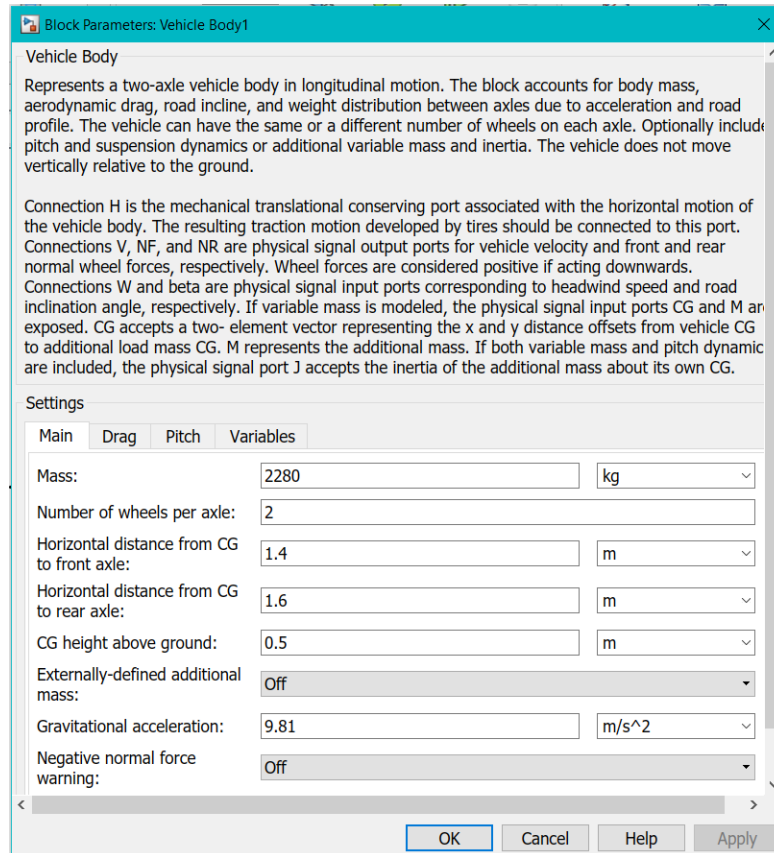


Ilustración 84.- Propiedades generales del cuerpo del vehículo.

Tal y como se muestra en la ilustración las características generales se han tenido en consideración bajo los estándares de Matlab/Simulink los cuales toman por defecto algunos de ellos como son las distancias del centro de gravedad de los ejes, tanto delanteros como traseros y como tratamos un vehículo de ciudad unifamiliar es razonable considerar que únicamente conllevan dos ruedas cada eje del sistema.

Por otro lado, siguiendo con las modificaciones del sistema del vehículo, existen valores que no se pueden definir si no se opta por un modelo en concreto, debido a esto aquellos valores que dependen del modelo del vehículo se rigen por el factor de mayor deficiencia, es decir en la siguiente ilustración se observa que la superficie frontal del vehículo es de 3 m². Este valor no corresponde con vehículos pequeños de 4 plazas. Es un valor estándar de vehículos de 5 plazas por lo que el modelo estará diseñado frente a mayores restricciones.

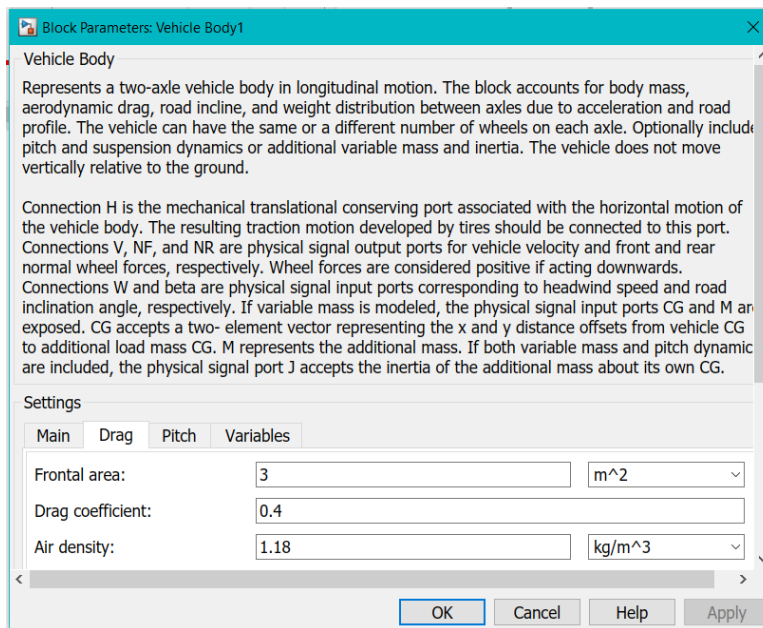
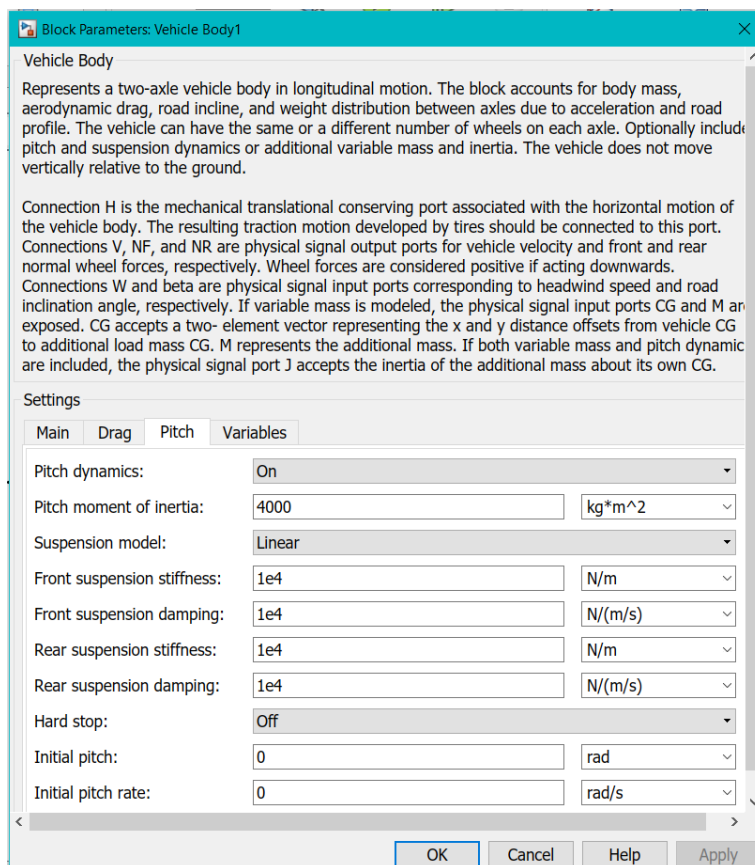


Ilustración 85.-Parámetros de fuerza antiparalela.

Al mismo tiempo el cálculo de la densidad del aire varía en función de varios factores como la humedad, la presión atmosférica, temperatura del ambiente, etc. El cálculo consiste en la relación de la masa respecto el volumen del aire que se encuentra en la superficie de empleo. Por ello como es variable y depende de donde se encuentra el vehículo se ha determinado, una aproximación anual de la densidad dando como resultado $1,18 \text{ kg/m}^3$. (31)

$$\rho_{aire} = \frac{m_{aire}}{V_{aire}}$$

Por otro lado, se encuentra la opción de las suspensiones del vehículo, como actúan las variaciones de fuerzas a los cambios de dirección y las inercias de las ruedas. Al igual que en el anterior caso, estos valores vienen predefinidos por las piezas del modelo del vehículo, tenerlas en consideración y no tenerlas varían únicamente un poco, por ello las modificaciones leves entre modelos se pueden considerar negligibles. En conclusión, se toma los valores estándares de los vehículos, tal y como se muestran a continuación.



Il·lustració 86.-Suspensió del vehicle.

Del mismo modo sucede con las prioridades de variables. Lo que más influye en la parte mecánica variable es la velocidad inicial del vehículo a la que comienza el sistema. En este caso tomamos como punto de referencia el reposo absoluto debido a que los vehículos siempre comenzarán el movimiento desde la velocidad inicial nula. Para que no existan errores por cruzamiento de ceros o de indeterminaciones en los algoritmos se valora el modificar el cero absoluto por la aproximación de cero por la derecha de la terminología de cálculo matemático, plasmando este concepto se inserta en el software que la velocidad lineal inicial sea de 0,1 m/s, la cual técnicamente se puede llegar a considerar directamente nula, evitando así variaciones en el sistema original.

Al mismo tiempo como se pueden modificar las variables de simulink se opta por extraerla del Matlab por si se requiere modificar dicho valor, no requiriendo así la misma versión del software o incluso vincular una pantalla de interfaz modificable la cual se podría diseñar con Scada o algún programa similar que pueda establecer tareas similares. Debido a esto la modificación de valores es mucho más cómoda, aunque solo se introducen valores del tipo que la variable no influya directamente al sistema principal del vehículo eléctrico.

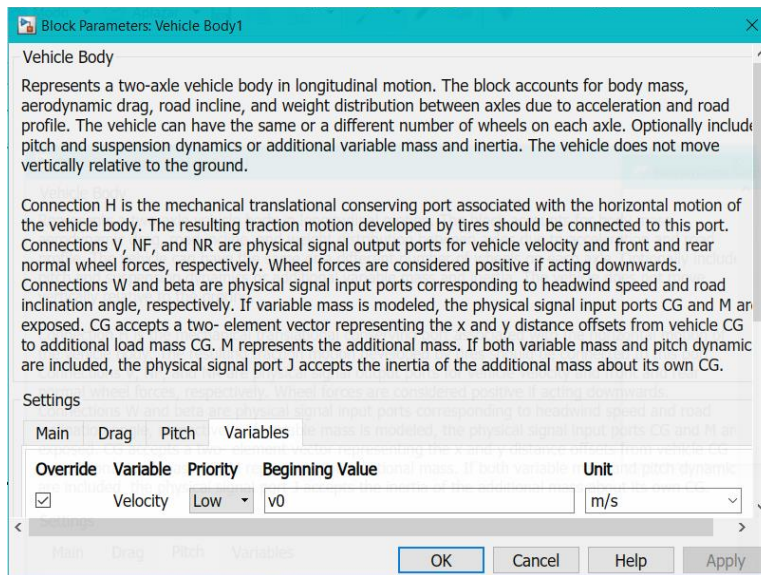


Ilustración 87.-Criterio de prioridad de la velocidad.

Tal y como se muestra en la anterior ilustración, la prioridad que toma la velocidad inicial, está referenciada con un nivel mínimo. Esto es debido a que como se ha comentado anteriormente no influyen mucho las ligeras variaciones de dicho valor.

Por otro lado, en este sistema se encuentran las cuatro ruedas del vehículo que estarán distribuidas simétricamente entre ellas, por ello los valores de las diferentes ruedas serán iguales entre ellas, concluyendo en que solo se visualizarán los resultados de una de estas.

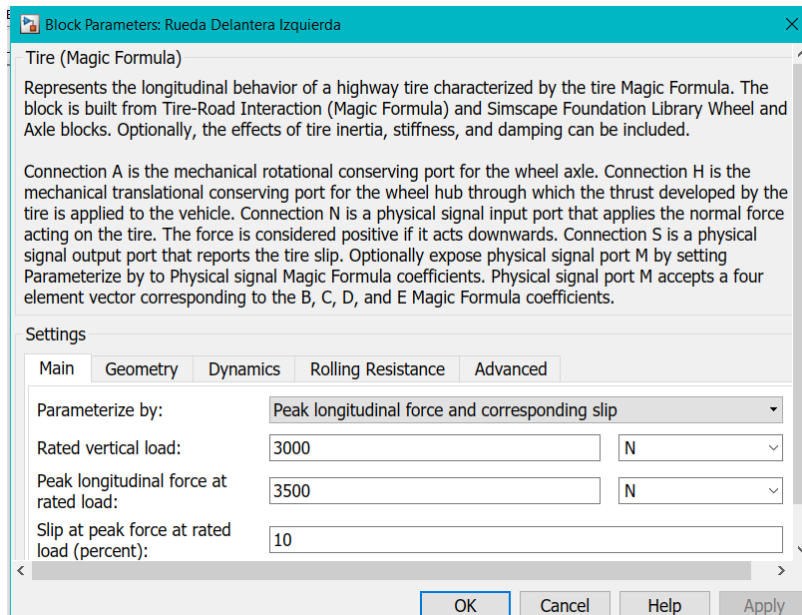


Ilustración 88.-Parámetros generales de las ruedas.

Las características generales de las ruedas corresponden a las fuerzas que se ejercen sobre ellas, en este caso también se toman valores estándares y al mismo tiempo se ha considerado un intervalo de seguridad del 10% empleado en la fuerza ejercida.

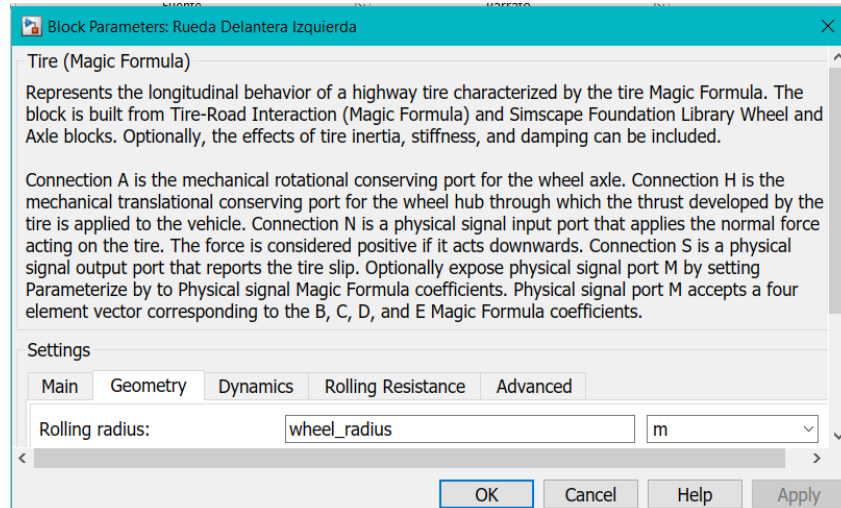


Ilustración 89.- Geometría de las ruedas.

Por otro lado, en la ventana de geometría se ha considerado realizar la misma tipología de variable que en el caso de la velocidad inicial, dado que la velocidad angular irá expresada en función de esas dos variables. Por defecto se ha impuesto que el radio de la rueda sea de 40 cm como las ruedas de los vehículos convencionales de ciudad actuales. Aunque este factor puede llegar a variar según el tipo de vehículo que se implemente.

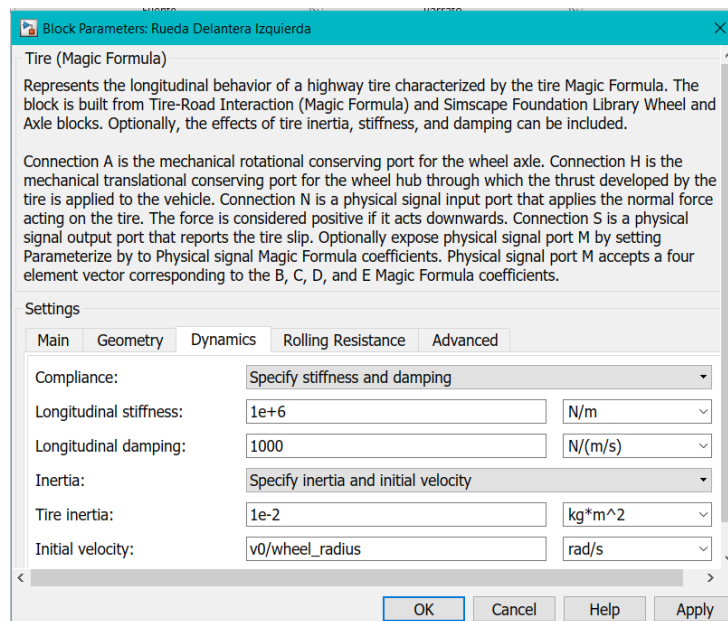


Ilustración 90.- Parámetros dinámicos del cuerpo.

Se ha tenido en consideración todas las características que afectaran al sistema para que el caso sea lo más realista posible, de esta forma no se quedan negligibles los diferentes valores del vehículo o las ruedas, como es el caso de las inercias. Al mismo tiempo se elige la opción más restrictiva sobre el modelo de resistencia el cual es el dependiente de los dos valores la presión y la velocidad.

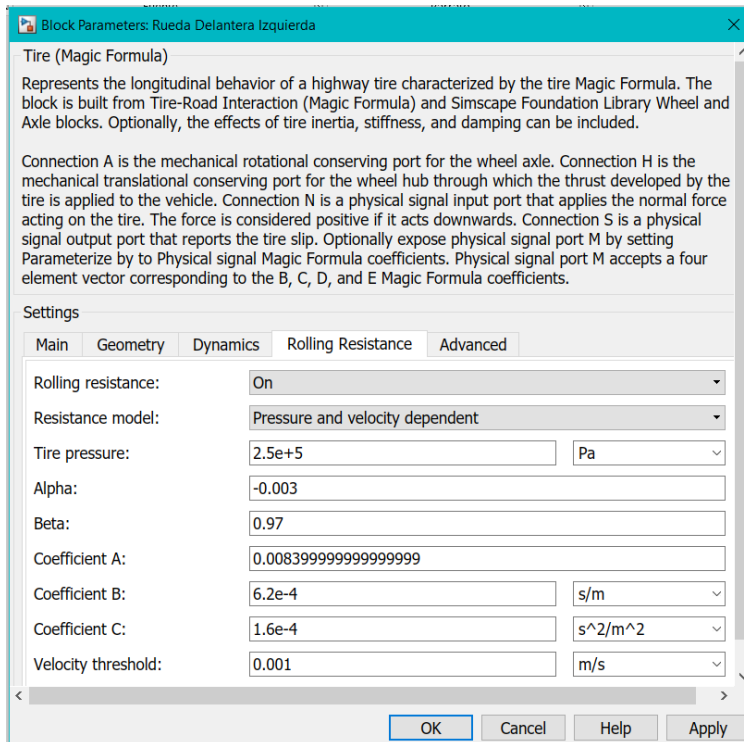


Ilustración 91.- Parámetros de rodaje.

Tal y como se puede visualizar en la imagen las presiones que se ha elegido junto con el resto de valores son medidas medias, en función de los modelos de vehículos. Recordemos que los vehículos para los que está pensado este motor son pequeños de entre 2 y 4 plazas ocupadas, no se toman en consideración los vehículos de 5 plazas debido a que la potencia del motor con la cual se está trabajando este proyecto es de las más bajas en cuanto a esta temática se refiere. Por ello se pueden llegar a observar valores inquietantes como puede ser la presión de las ruedas, las cuales ilustran que son de 2 bares y medio, cuando normalmente en los vehículos comunes se observan de 3 bares o superior.

Este valor de presión también está teniendo en cuenta que la carga va a la mitad. Es decir, se considera o 2 personas de 70 kg y el maletero ocupado con 100 kg o por el contrario se tiene en cuenta que únicamente hay 4 personas de 70kg cada una, pero el maletero está vacío.

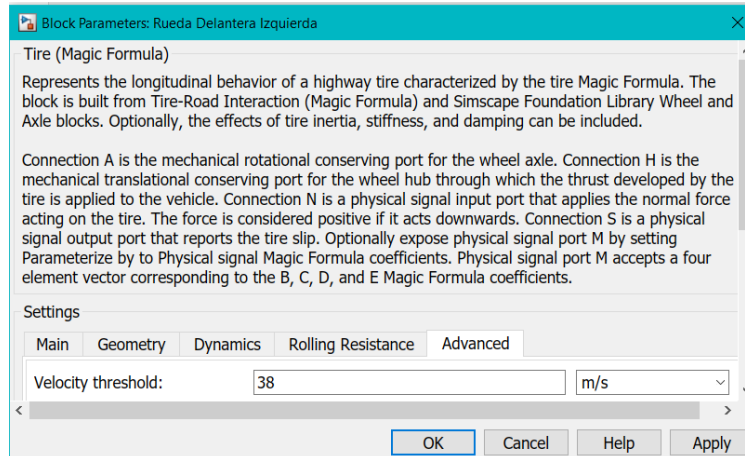


Ilustración 92.- Umbral de velocidad límite del vehículo.

Del mismo modo la velocidad del vehículo se limita a 38 m/s que equivalen a 136,8 km/h para que en el caso de estar en una pendiente descendiente el vehículo no pueda circular a mayor velocidad que esta.

Únicamente sucedería en estos casos donde el coche tiene la posibilidad de aumentar la velocidad apoyándose de la ventaja del terreno debido a que por sí solo en llano o carretera con pendiente nula la velocidad máxima que alcanza es de 135,3 km/h.

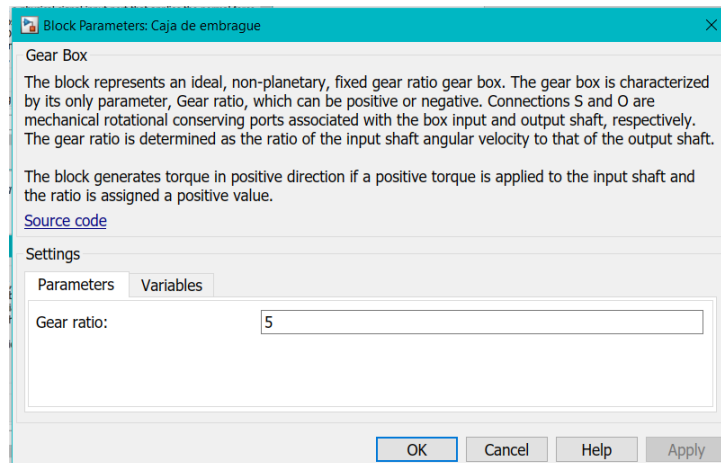


Ilustración 93.-Numero de marchas del vehículo.

Previamente se ha comentado la velocidad máxima que alcanzaría el vehículo, como es común, los vehículos tienen una caja de cambios, esta caja realiza la acción de intercambiar relaciones de transmisión con el motor. Si se quiere que el vehículo vaya rápido, por el contrario, el par motor será muy bajo, es decir, tendrá dificultades en subir pendientes, sin embargo, está la inversa, si se busca aumentar el par motor el vehículo tendrá que reducir sus rpm lo suficiente en función de la pendiente que se

requiera subir y a la velocidad que se quiera. Como el estudio se está mirando con velocidades máximas se está imponiendo que el vehículo tenga 5 marchas para alcanzar dicha velocidad máxima.

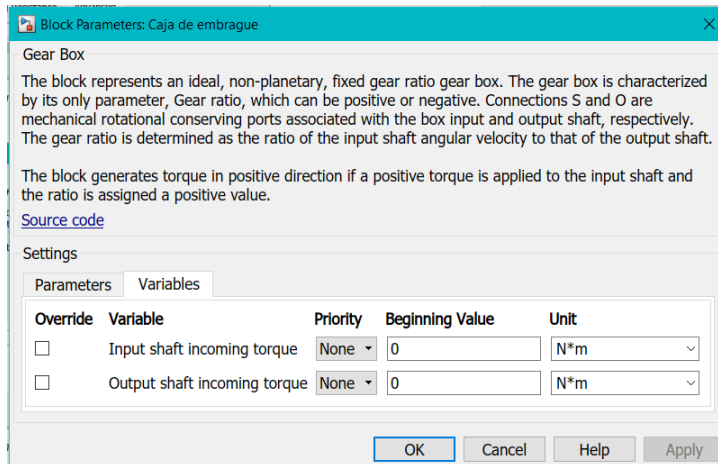


Ilustración 94.-Variables prioritarias de la caja de cambios.

Por otro lado, aunque la caja de velocidades tenga pérdidas mecánicas por fricción, en este apartado no se tendrán en consideración debido a que no influyen lo más mínimo en los resultados y el tiempo de simulación aumenta considerablemente si se tienen presentes.

Al mismo tiempo también se consideran dos valores muy importantes en el funcionamiento del vehículo los cuales siempre están presentes como son la velocidad de viento y la inclinación de la carretera. En estos casos para la velocidad del viento se ha impuesto una fuerza en contra con el valor estándar para así sufrir un poco de fricción en carretera.

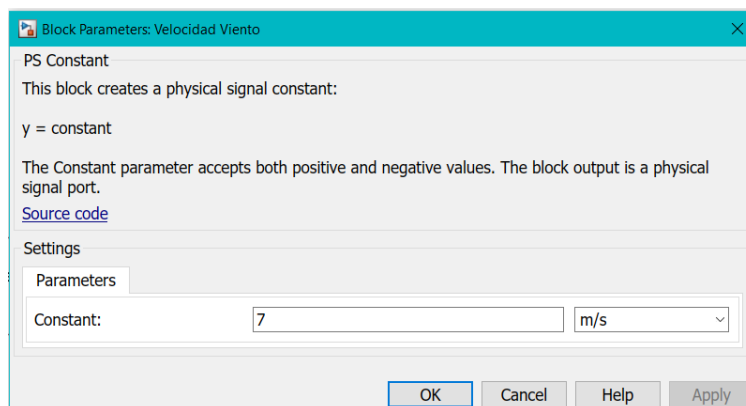


Ilustración 95.-Viento medio en contra (m/s).

Del mismo modo para valorar el sistema del vehículo la pendiente de la carretera se toma totalmente nula, debido a que el juego de marchas será la variación de transmisión del par motor el cual favorecerá en las pendientes, es decir a mayor pendiente menor velocidad para conseguir un mayor par motor.

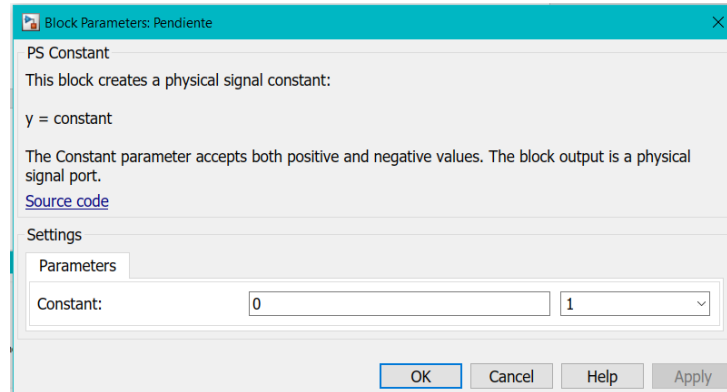


Ilustración 96.-Pendiente de carretera.

Finalmente, el último elemento a tener en consideración en la parte mecánica del sistema es el diferencial, el cual es el encargado de gestionar la tracción a los dos ejes, tanto delantero como trasero.

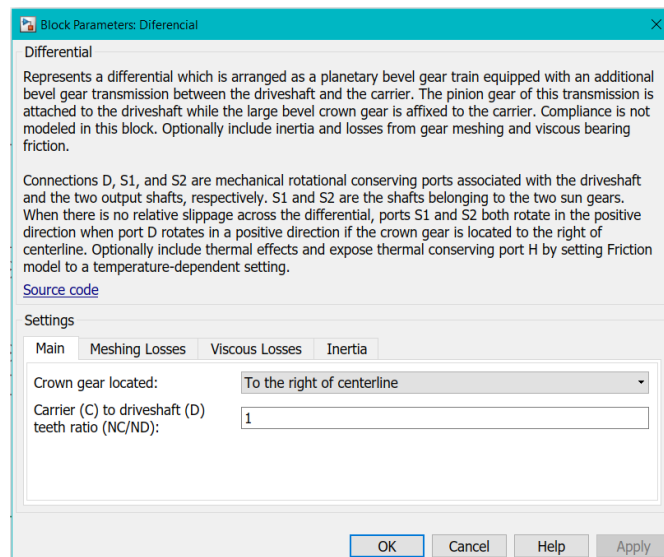


Ilustración 97.-Relación del diferencial del vehículo.

Como característica principal de la caja de cambios aparece la localización del engranaje y cuanto tiene que ser la transmisión de los dientes del eje. En este caso al haber realizado interpolaciones esta transmisión puede ser a la unidad debido a que la velocidad máxima a la que consigue llegar es el límite de lo que se quería conseguir. Por ello estos factores quedarían igual que como se muestra en la figura.

Del mismo modo no importa donde se encuentre localizado, en cierta manera, el engranaje de corona, debido a que no va a influir en ninguno de los valores por su simetría estructural.

Sin embargo, las pérdidas de este influyen en el rendimiento general del sistema mecánico del vehículo reduciendo la velocidad lineal final de este. Debido a esto el límite fijado por el usuario es el que se muestra a continuación dando una velocidad final de aproximadamente 127 km/h. No se podría bajar más este factor porque resultaría improductivo dado que el vehículo tiene que poder circular a 120 km/h. Por ello se han determinado como eficiencia mínima la que se visualiza en la siguiente ilustración.

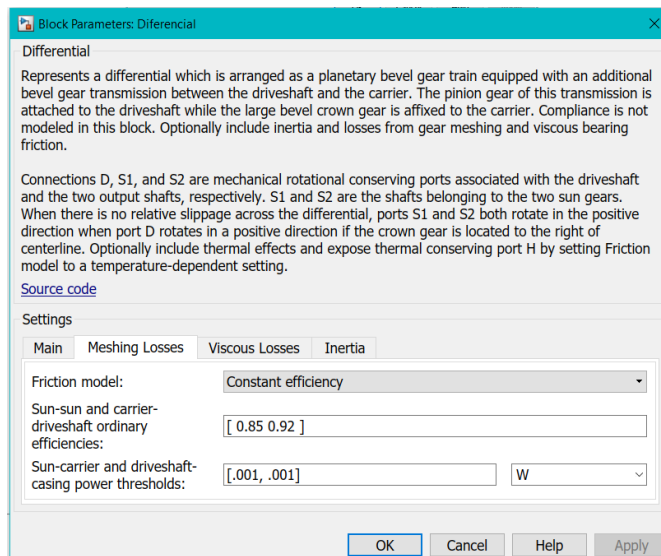
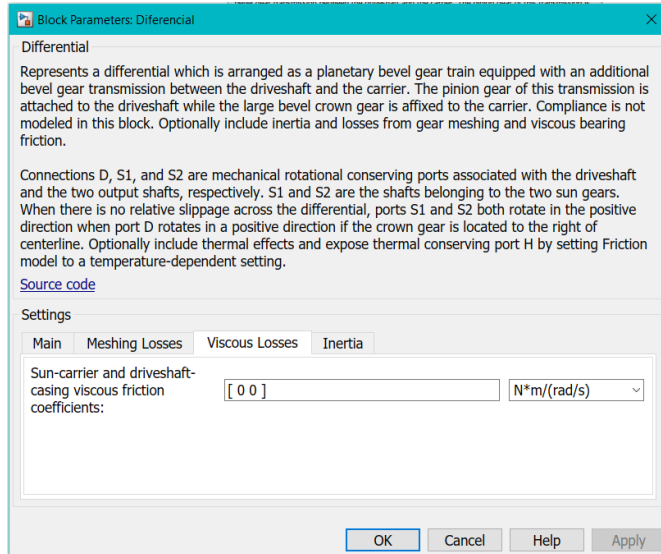


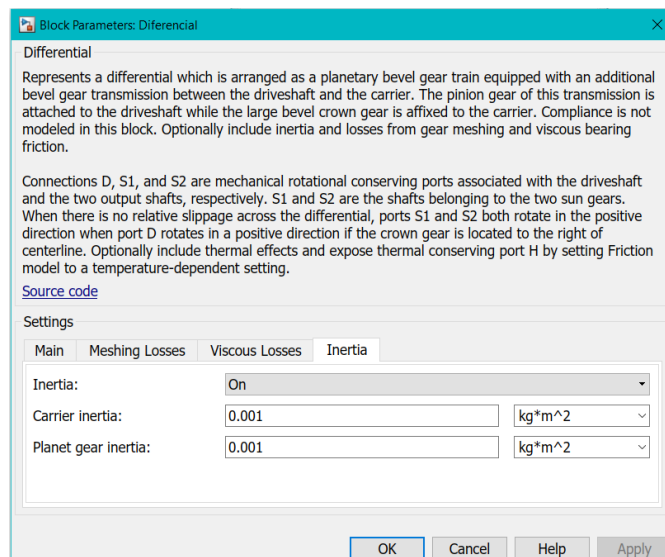
Ilustración 98.-Pérdidas ocasionadas por el diferencial.

De la misma manera, también se encuentran las pérdidas de los fluidos, al no poder separar estas pérdidas con la eficiencia general el total de todas las pérdidas mecánicas vendrán impuestas en la eficiencia del diferencial, sin distintivos, aunque hay que tener en consideración que las pérdidas de los fluidos viscosos son las leves que las partes donde se producen fricción y rozamiento.



Il·lustració 99.-Pèrdenes de viscositat en el diferencial.

Finalmente, para acabar se han introducido unos valores de inercia acorde con los diferenciales de los vehículos pequeños como son el “Smart” o “Mini”. Aunque estos valores deben predefinirse según el modelo de diferencial del que dispongan los vehículos.



Il·lustració 100.-Inercia ejercida por el diferencial.

4.2.3. Control e inversor

Para este apartado, el control se aplica también junto con la parte mecánica, para poder ajustar con la tensión nominal de entrada, los parámetros de salida. Se recuerda que en este aspecto el control es el factor más relevante de todos, incluyendo la velocidad máxima del vehículo. Al tener un sistema con

un motor de 40 kW se da el caso que con el peso medio de los monovolúmenes el par es insuficiente de alcanzar velocidades máximas más elevadas que las muestradas. Esto concluye en que el actual vehículo con un control perfecto no es capaz de alcanzar.

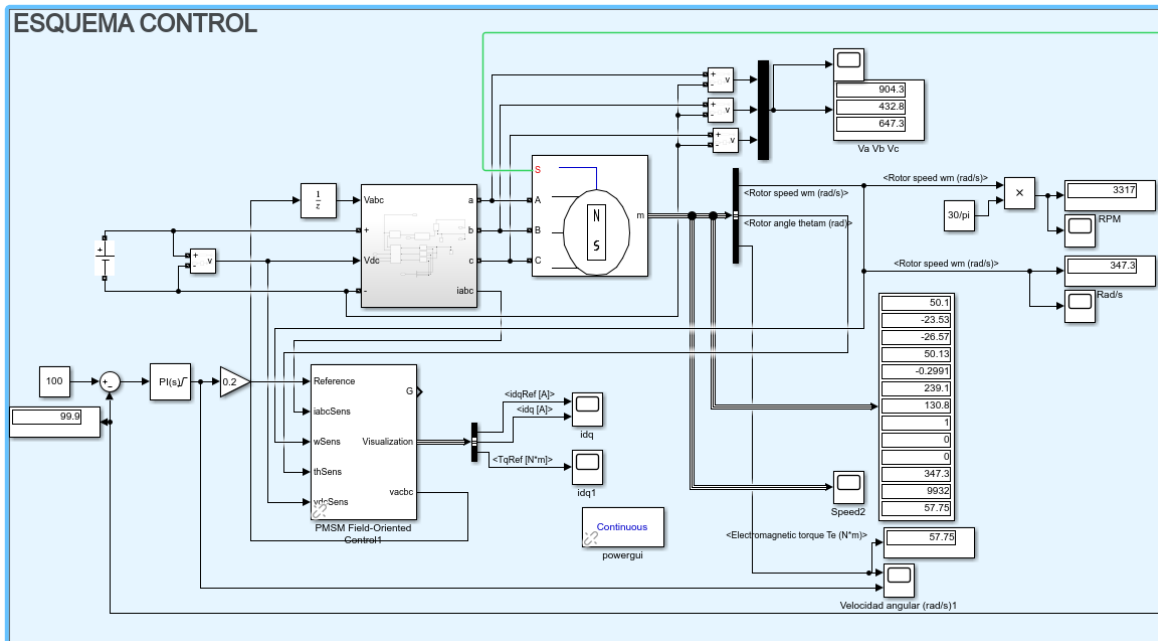


Ilustración 101.- Esquema de control mediante software (Simulink).

Se observa que el control que conlleva esta tipología de motor es el FOC, por lo explicado con anterioridad. Para poder regular el control independientemente se ha seleccionado como tensión de entrada, el voltaje en régimen permanente de la célula de combustible.

Por otro lado, el control también se puede analizar con el vehículo conectado. Para ello se tiene que cambiar dentro del bloque del motor la entrada. Si se quiere hacer independiente la entrada es una consigna de librería simulink (de velocidad o par motor). Mientras que si se desea conectar la parte mecánica para analizar su funcionamiento, la entrada que se selecciona es de otra librería del software, "Simscape".

A parte, el inversor se ha optado por la forma promediada dado a que el supercapacitador que suele incluirse para filtrar los armónicos de conmutación hace que estos no afecten substancialmente al comportamiento de la cadena de alimentación. Por este motivo, utilizar el modelo conmutado, alargaría enormemente los tiempos de simulación sin que nos aportase más información relevante para testear estrategias de gestión.

Con el modelo final, si se quisiese utilizar el modelo conmutado solo tendría que utilizarse el modelo de inversor que aporta simulink utilizando la salida G para ello.

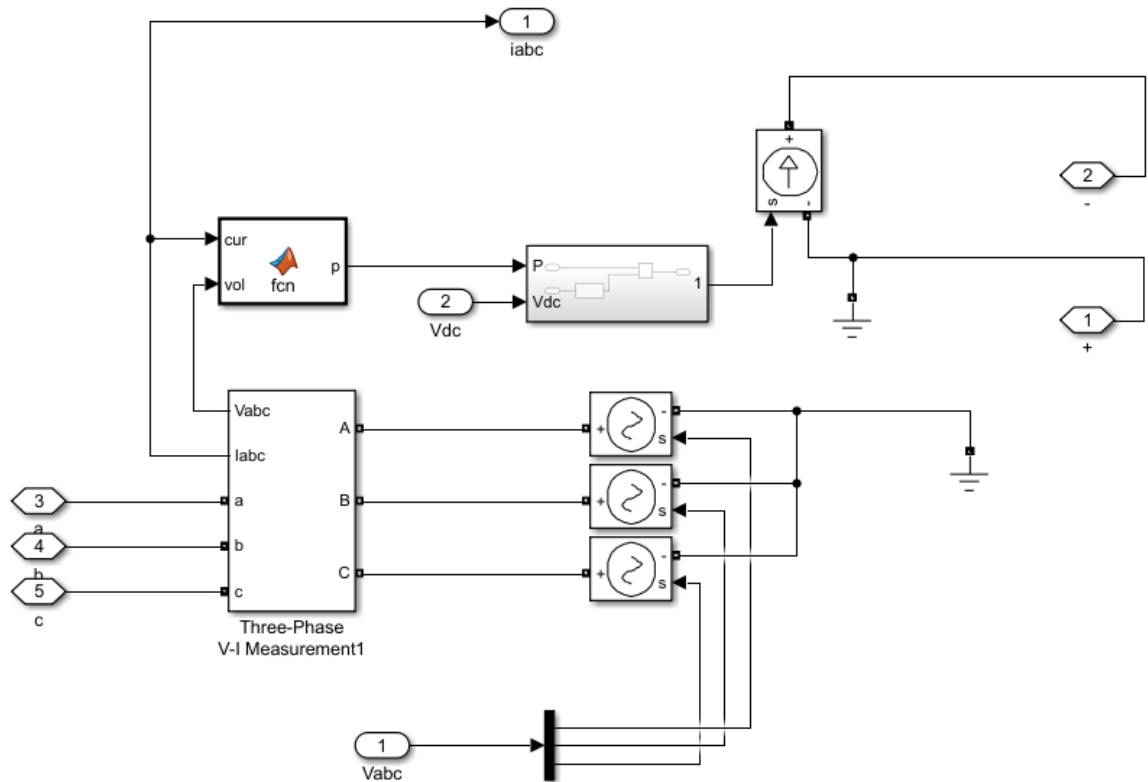


Ilustración 102.-Inversor.

La ilustración previa es la correspondiente al inversor promediado. En este caso para poder realizar la labor de inversor, las entradas al bloque corresponden con la tensión en bornes del convertidor elevador, con la alimentación en continua del primario y con las tensiones que vienen del control FOC. Mientras que las salidas son las tres tensiones que alimentan a la máquina eléctrica y las intensidades, que van dirigidas hacia el control. Dentro del inversor se observa un subsistema, este es el correspondiente a la siguiente ilustración.

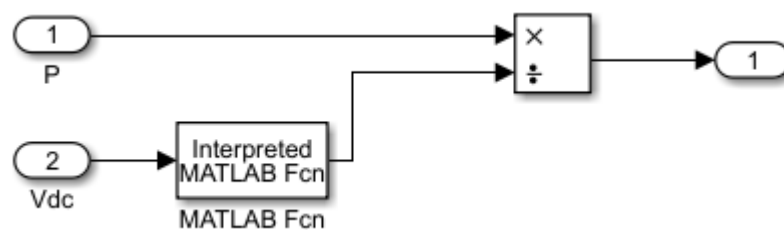


Ilustración 103.-Calculo de la intensidad.

La representación del sistema es la resolución de la fórmula de la potencia. La intensidad calculada mediante el cociente de la potencia entre la tensión.

Internamente el bloque de control, no se ha modificado, por ello con la implementación de este solo se han variado los valores modificables al gusto del usuario. Quedando en las cuatro pestañas del control los siguientes valores.

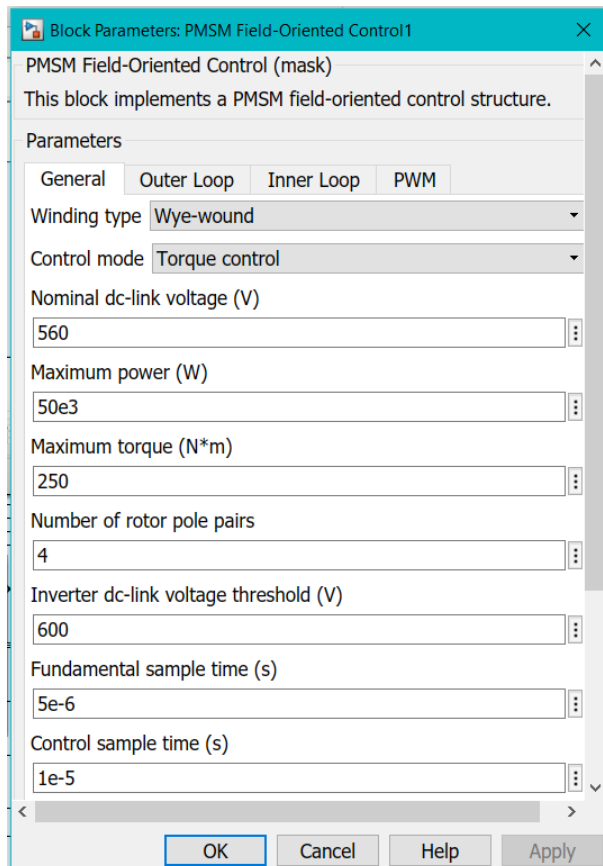


Ilustración 104.-Aspectos generales del control FOC.

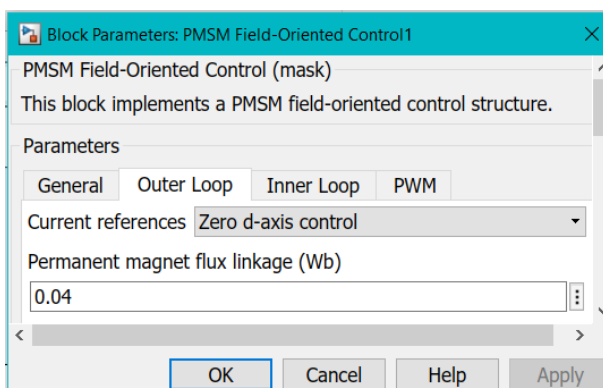
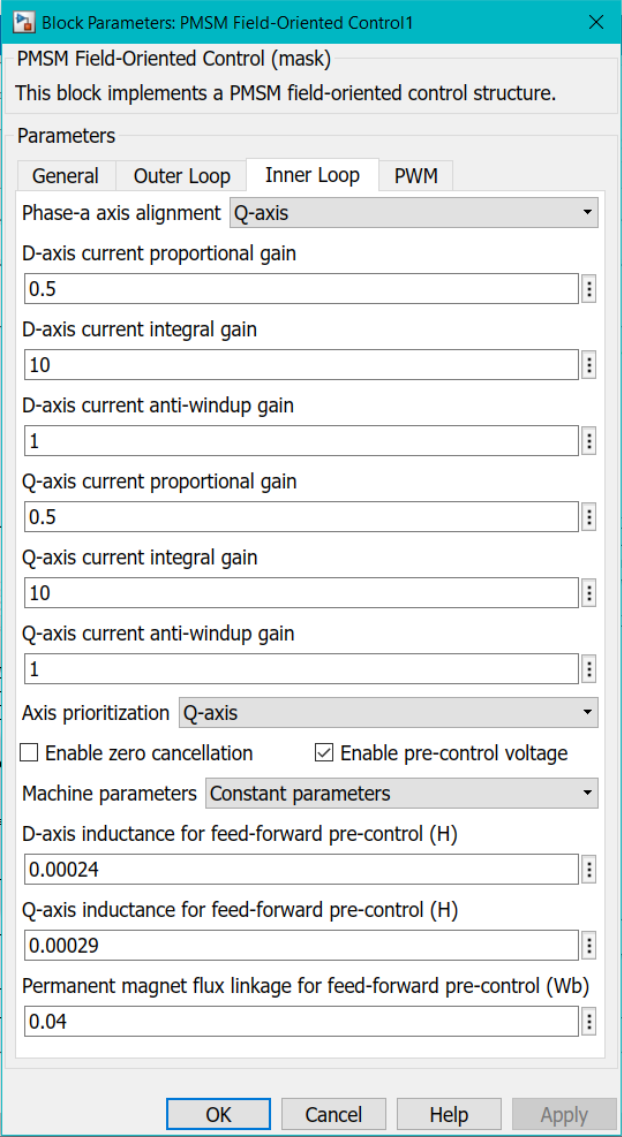


Ilustración 105.- Bude exterior del control FOC.



Block Parameters: PMSM Field-Oriented Control1

PMSM Field-Oriented Control (mask)
This block implements a PMSM field-oriented control structure.

Parameters

General Outer Loop Inner Loop PWM

Phase-a axis alignment Q-axis

D-axis current proportional gain
0.5

D-axis current integral gain
10

D-axis current anti-windup gain
1

Q-axis current proportional gain
0.5

Q-axis current integral gain
10

Q-axis current anti-windup gain
1

Axis prioritization Q-axis

Enable zero cancellation Enable pre-control voltage

Machine parameters Constant parameters

D-axis inductance for feed-forward pre-control (H)
0.00024

Q-axis inductance for feed-forward pre-control (H)
0.00029

Permanent magnet flux linkage for feed-forward pre-control (Wb)
0.04

OK Cancel Help Apply

Il·lustració 106.- Bucle interno del control FOC.

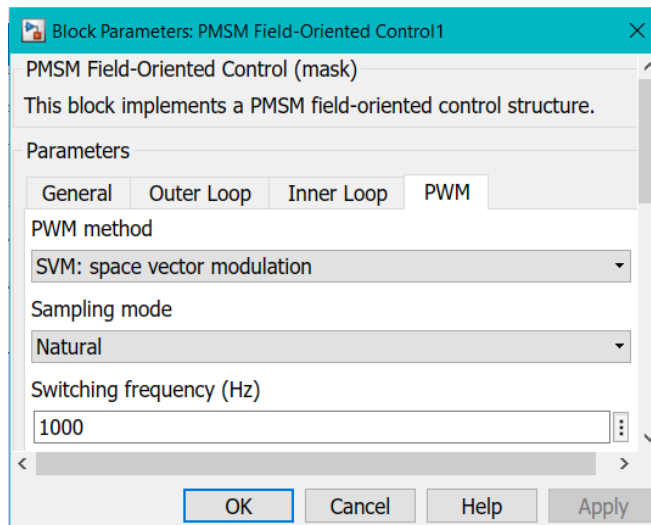


Ilustración 107.-Aspectos del PWM del control FOC.

Por otro lado, se encuentra el controlador PID que se localiza antes del control, conectándose a su vez a una realimentación para un mejor control en lazo cerrado. Este control es más específicamente un proporcional integrador, no hay parte derivativa.

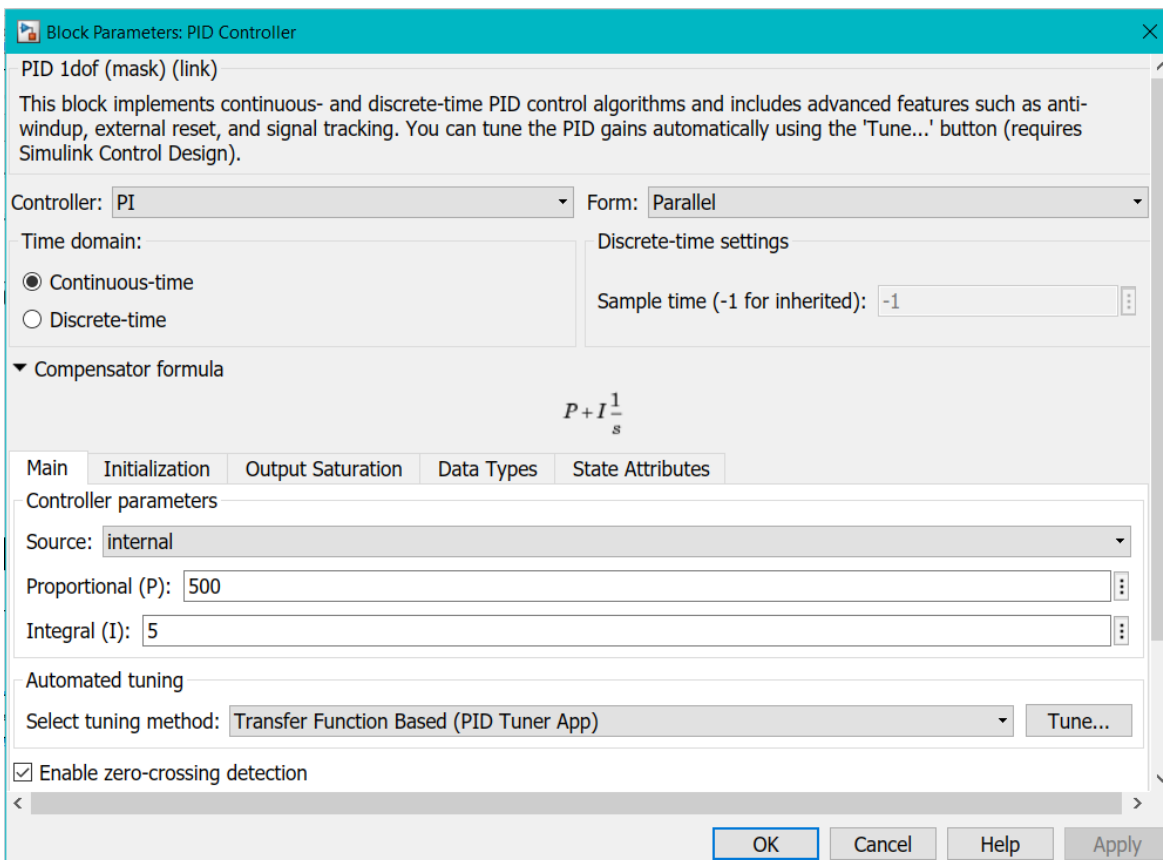
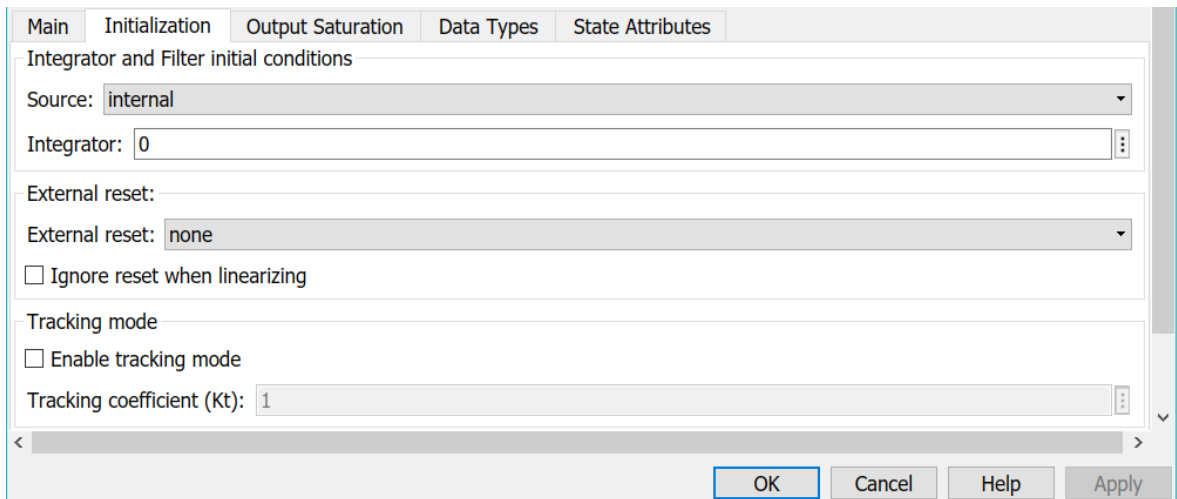
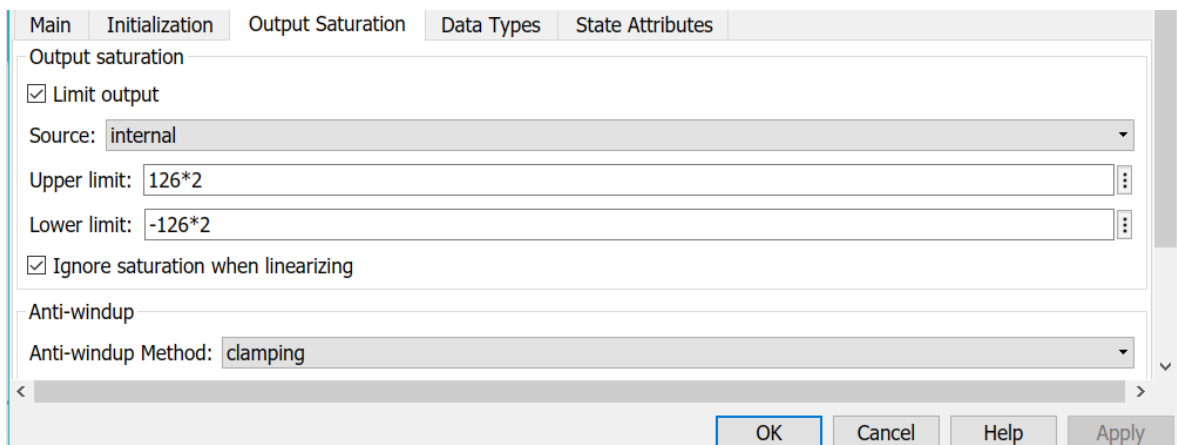


Ilustración 108.- Aspectos generales del PID.



The screenshot shows the 'Initialization' tab of a PID control configuration window. The 'Integrator and Filter initial conditions' section has 'Source' set to 'internal' and 'Integrator' set to '0'. The 'External reset' section has 'External reset' set to 'none' and the 'Ignore reset when linearizing' checkbox is unchecked. The 'Tracking mode' section has the 'Enable tracking mode' checkbox unchecked and 'Tracking coefficient (Kt)' set to '1'. At the bottom, there are 'OK', 'Cancel', 'Help', and 'Apply' buttons.

Il·lustració 109.- Valores de inicio del PID.



The screenshot shows the 'Output Saturation' tab of the same PID control configuration window. The 'Limit output' checkbox is checked, with 'Source' set to 'internal', 'Upper limit' set to '126*2', and 'Lower limit' set to '-126*2'. The 'Ignore saturation when linearizing' checkbox is also checked. The 'Anti-windup' section has 'Anti-windup Method' set to 'clamping'. At the bottom, there are 'OK', 'Cancel', 'Help', and 'Apply' buttons.

Il·lustració 110.- Saturación de salida del PID.

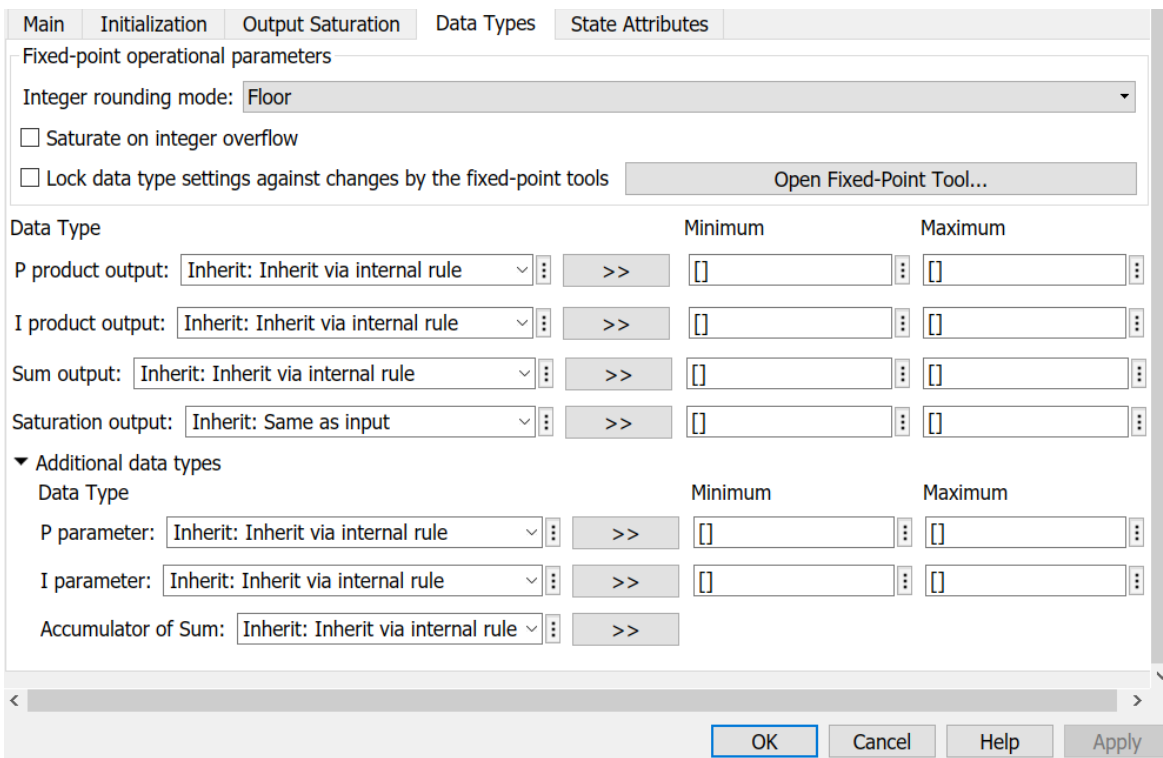


Ilustración 111.-Tipología de datos del PID.

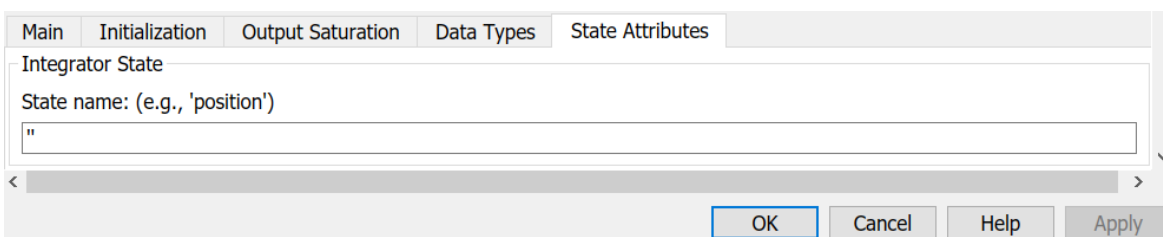


Ilustración 112.-Atributos de estado del control PID.

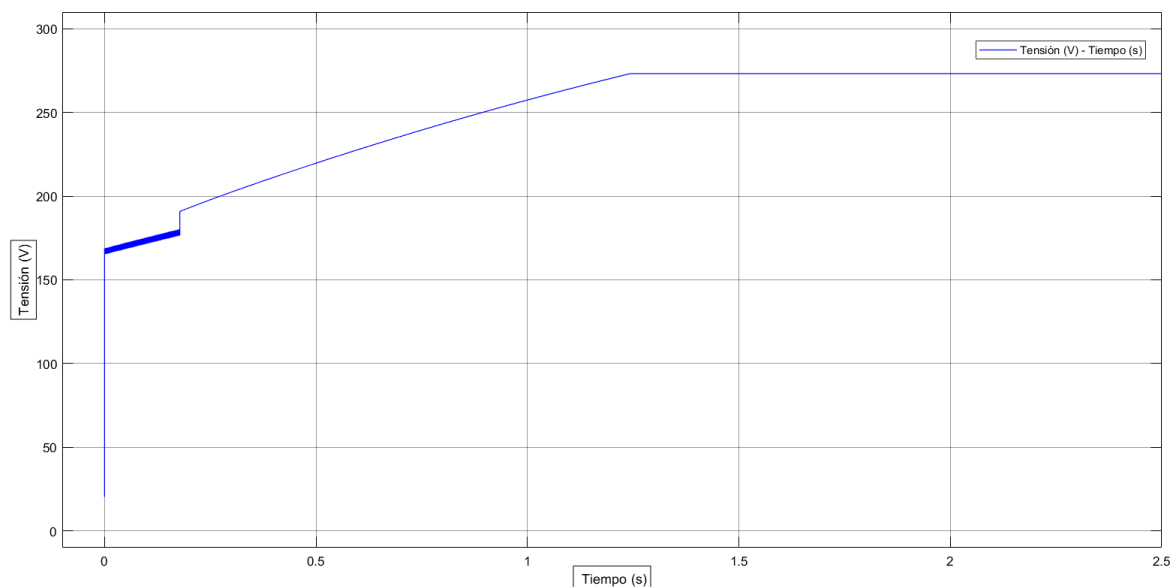
4.3. Simulación digital

En este apartado se visualizarán los diferentes objetivos a los que se quiere llegar en función del sistema que se estudie.

4.3.1. Alimentación eléctrica y convertidor

En la parte de alimentación, el paralelo constituido por las dos fuentes de tensión (la célula de combustible y la batería de litio) tienen como mínimo generar 11,1 V, los cuales son los establecidos por la batería de litio, hasta que la célula de combustible consiga generar más de esta tensión. Una vez la

célula sobrepase dicho valor, solo se tomarán en cuenta estos. El valor final al que alcanza la célula de combustible con la ayuda del convertidor elevador es de 661,5 V, los cuales son representados mediante la recta horizontal que se genera alrededor de los 1,25 segundos desde su inicio. Este valor ha sido buscado para poder corresponder a la demanda que necesita el motor que se ha elegido para el vehículo.



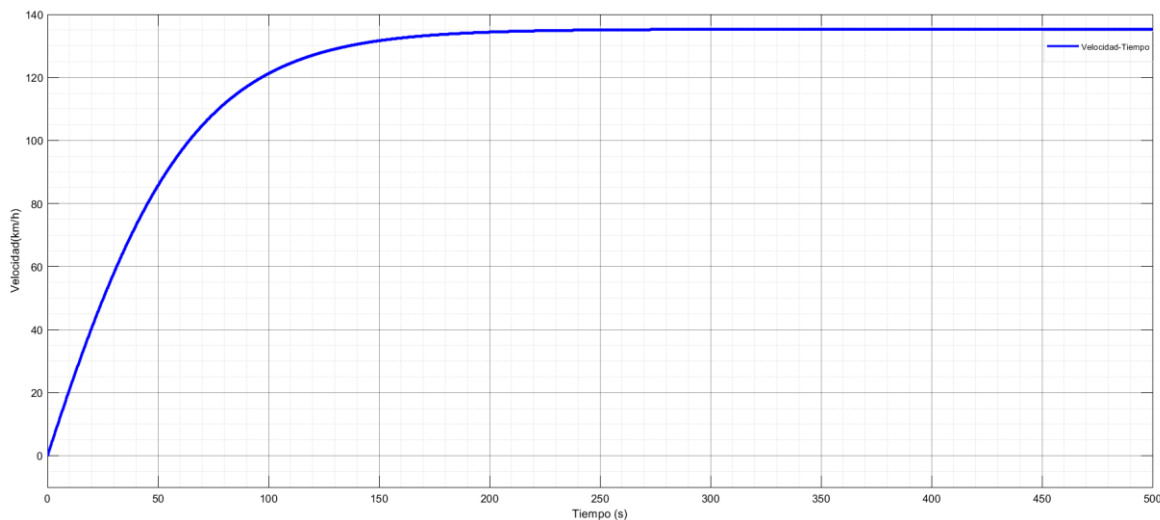
Gráfica 11.- Relación tensión-tiempo a la salida del convertidor elevador.

Tal y como se puede llegar a observar la gráfica se puede dividir en tres secciones.

- El estado inicial.
En el instante de tiempo en el que el sistema se conecta la tensión de salida no es nula, esto se debe a que como se mencionó anteriormente, se ha instalado una batería de litio como fuente de soporte que junto al convertidor elevador se consigue una tensión inicial de aproximadamente 170 V.
- Zona de transición.
En este periodo, si la célula de combustible genera más de los 11,1 V, esta predominará respecto a la batería de litio hasta alcanzar el valor máximo.
- Tensión continua.
Es la zona en la que la batería de litio consigue alcanzar el valor máximo con su combustible, generando una onda continua.

4.3.2. Esquema mecánico

Para el apartado mecánico, con los valores estipulados previamente se consigue una señal críticamente amortiguada a una velocidad razonable para un vehículo con un motor de 40 kW. Este valor es para vehículos pequeños, debido a que no pueden generar un par que permita alcanzar velocidades de los coches comerciales como los 240 km/h, la velocidad máxima más común en los vehículos unifamiliares.



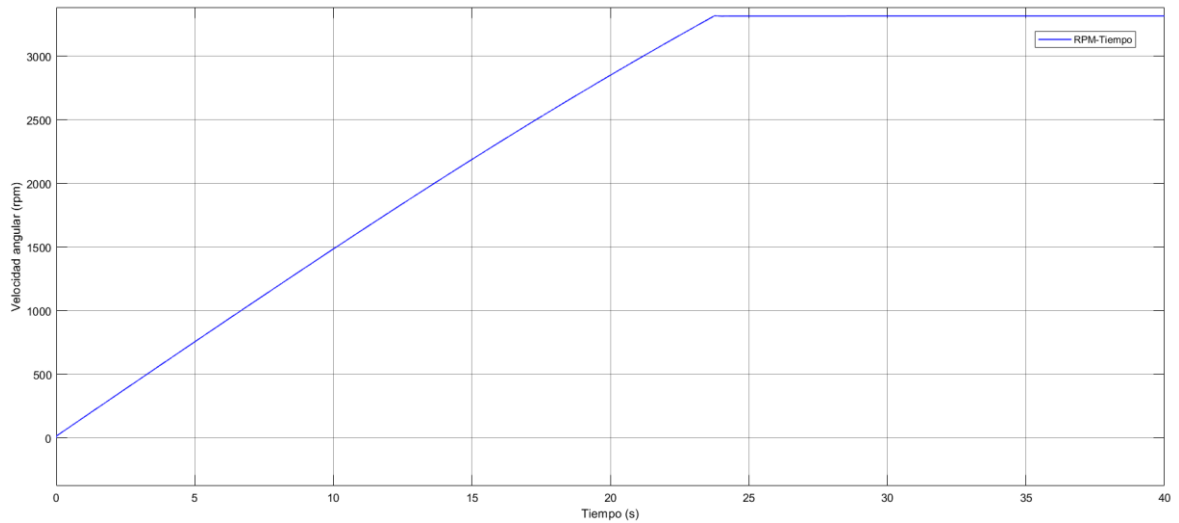
Gráfica 12.-Velocidad en función del tiempo del vehículo con motor ideal.

En esta sección del sistema no se tiene en cuenta ningún control. Se ha realizado mediante un motor ideal que cumpliera las mismas prestaciones que el elegido en el control. Aun así, se visualiza un arranque muy lento para poder corresponder a esta señal crítica. La aceleración del vehículo es de 0 km/s a 100 km/s en un lapso de tiempo de 64,5 segundos.

Esto en términos de aceleración no dice nada, pero comparado con vehículos, donde este mismo intervalo puede ser de entre 5 segundos y 12 segundos, se comprende que la aceleración del vehículo es muy lenta, entre 5 y 10 veces más lenta. Sin embargo, esto se arregla con la ayuda del control.

4.3.3. Control e inversor

En el caso del todo el sistema de control, se ha realizado una modificación de valores para que el motor alcance un poco más de las 3.000 revoluciones. Al igual que en los vehículos convencionales al alcanzar dicha cifra, la marcha se modifica a una superior. Para tener una linealidad se ha optado por mantener este criterio incluido en la velocidad máxima de crucero.



Gráfica 13.-Relación velocidad angular en rpm respecto el tiempo.

Tal y como se observa en la figura, añadiendo un control vectorial se ha conseguido mantener la señal controlada. Al mismo tiempo comparándolo con el sistema mecánico independiente del control, se observa que la aceleración aumenta.

En este caso el vehículo alcanza la velocidad máxima antes de los 25 segundos. Es decir que alcanza todavía antes de este lapso los 100 km/h que se han estipulado como referencia.

A partir de aquí se ha realizado un análisis tomando diferentes valores de control en la velocidad. Para ello donde reside la constante de 112 km/h dentro del esquema de control, se le cambia por un repetidor de secuencias (Repeating Sequence). Este bloque permite definir diferentes valores, en este caso de velocidad de referencia, para distintos tiempos de activación.

Para conocer cómo se comporta el control se han elegido los diferentes valores:

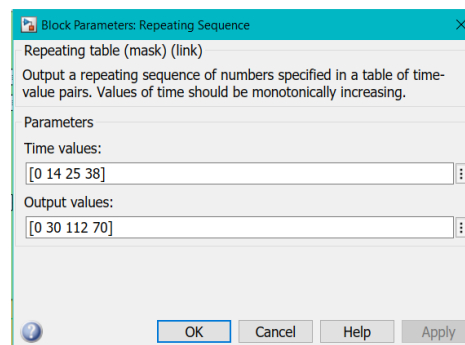
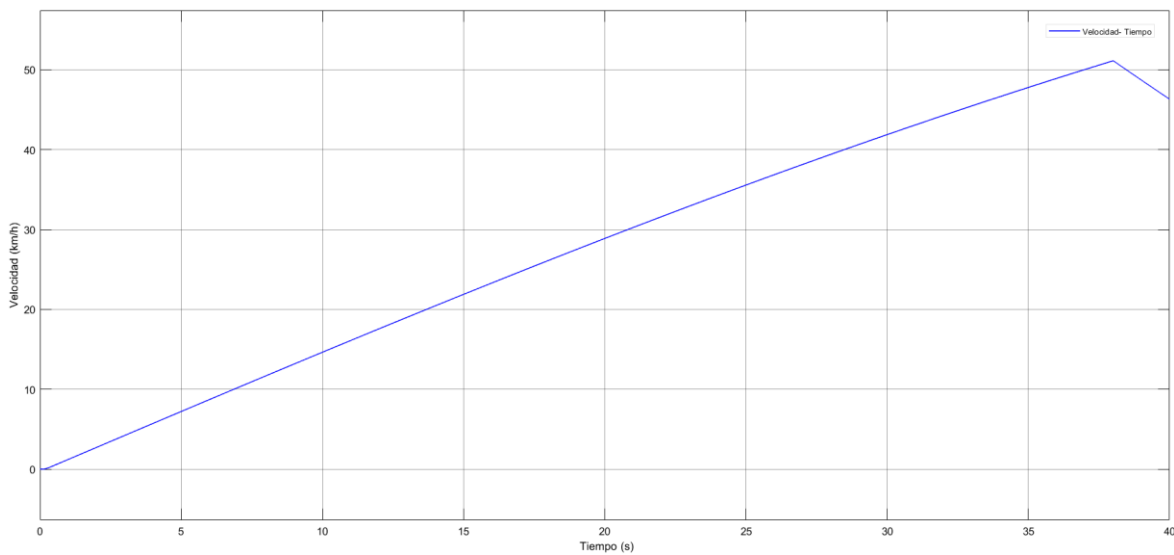


Ilustración 113.- Valores de velocidad en función de tiempos discretos.

Estos valores resultan en la siguiente gráfica.



Gráfica 14.-Velocidad del vehículo con velocidades discretas.

El valor máximo de la velocidad para que el control no cometiera errores es de 112km/h de velocidad de referencia. Teniendo esto en consideración se observa que si se toman valores más pequeños que este el arranque es más lento.

Para conocer también como se comporta el vehículo a los cambios de pendientes se ha sustituido la consigna de pendiente constante por "PS Repeating Sequence". Este bloque hace la misma función que el anterior, pero desde otra librería del Matlab.

Tomando como valores de pendiente los siguientes en diferentes lapsos de tiempo.

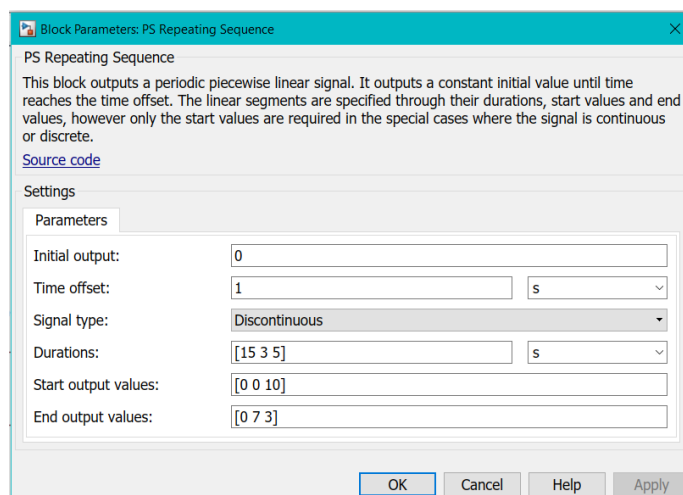
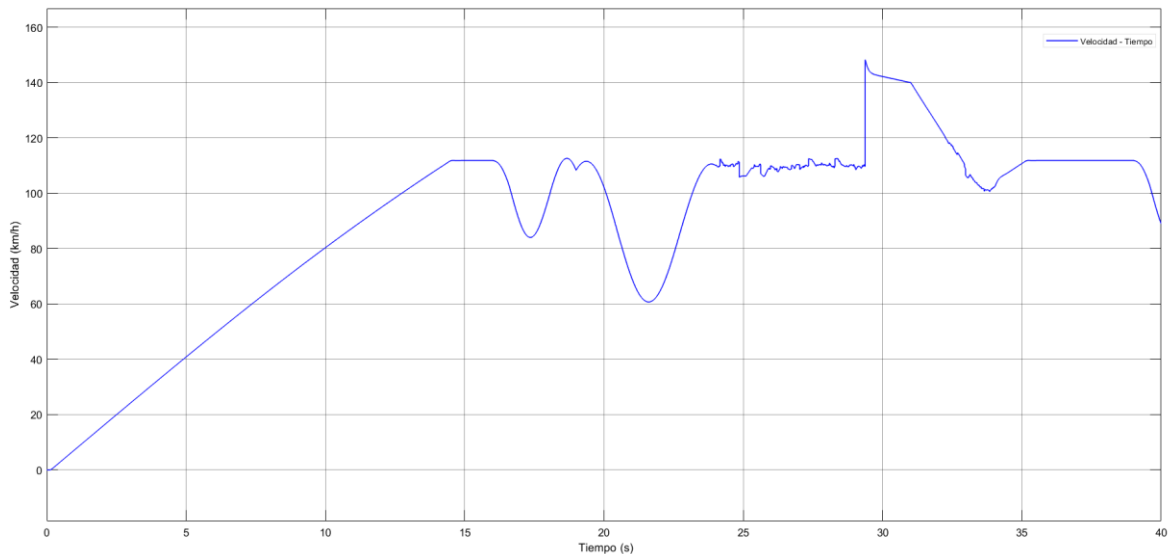


Ilustración 114.- Valores de pendiente.

Como se observa, para tomar las diferentes pendientes se espera hasta que alcance la velocidad máxima, para comprobar que sucede después.



Gráfica 15.- Valores de velocidad en función de la pendiente.

Se observa que el primer tramo de pendiente es hasta los 15 segundos, como ya se observó como a una pendiente nula el vehículo alcanza la velocidad máxima sobre los 14 segundos. Tal y como se observa del tramo de los 14 segundos hasta los 15, aunque la pendiente sea nula, el vehículo no puede alcanzar mayor velocidad debido a que el motor no tiene suficiente par.

Cuando el vehículo sufre una pendiente que puede soportar, únicamente la velocidad se ve reducida, pero en cuando la pendiente es muy elevada, el control se distorsiona, señalando en la señal ese ruido que se ocasiona entre los 25 segundos y los 30 segundos.

Y finalmente si la pendiente es hacia abajo el vehículo puede alcanzar velocidades mayores a la máxima. Tal y como se observa en el ultimo tramo donde la pendiente empieza en 10 y decae a 3 de pendiente.

Capítulo 5.- Resultados del proyecto

5.1. Resultados de la investigación

Los resultados del proyecto residen en la simulación final, la compuesta por las tres partes conectadas entre sí. Lo más importante en este sector, es comprobar cómo se comporta la velocidad del vehículo conectada a la célula de combustible y al control. En este apartado ya se han comprobado que las partes por separado funcionasen.

Por otro lado, cuando éstas se han conectado se han tenido que realizar ligeras modificaciones para la toma de datos.

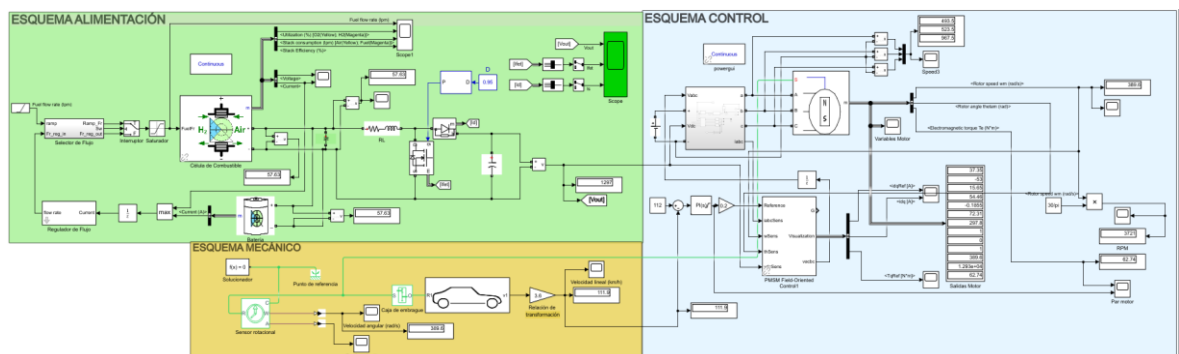


Ilustración 115.- Esquema del ensamblado completo (Simulink).

Tal y como se puede observar los esquemas independientes son relativamente similares a los anteriores. El cambio más visual reside en el convertidor boost.

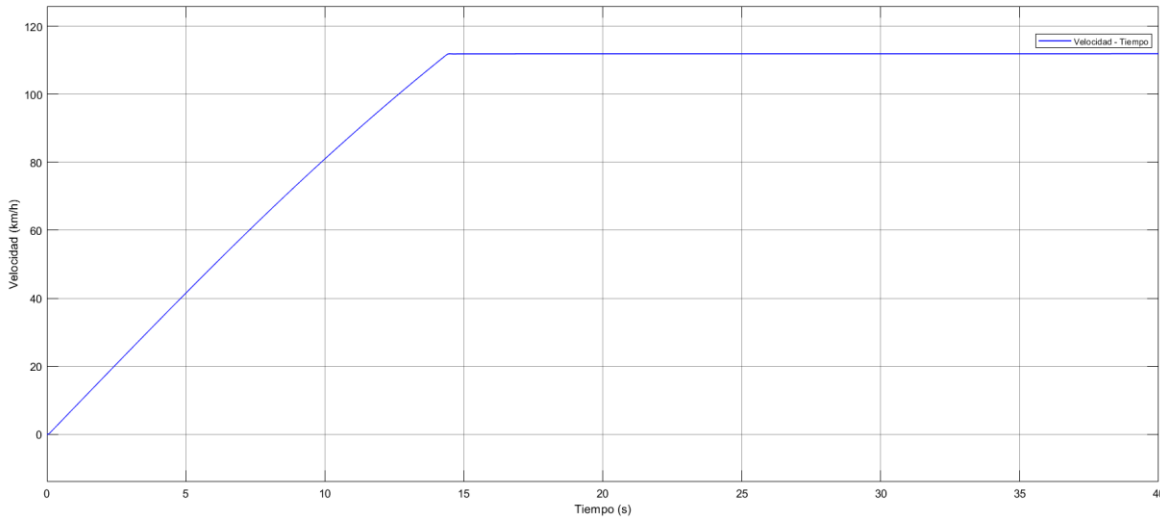
Del mismo modo, se han tenido que cambiar los valores del solucionador de la parte mecánica y del “Solver” para poder tener en consideración los valores con un criterio razonable.

En el “Solver” situado en la pestaña de modelación, dentro del software, se ha optado por un solucionador automático con un tamaño de salto máximo de 0,1 ms. Una tolerancia relativa de 1 ms para poder dejar actuando la célula de combustible.

También se han agregado que el mínimo de pasos consecutivos sea de 500 pasos, mientras que los cruzamientos por cero consecutivos se han tenido que aumentar hasta el valor de 1000 cruzamientos.

En la sección del esquema de la parte mecánica el solucionador se ha variado, reduciendo su magnitud a 0,005 segundos como tiempo de muestreo, para poder conseguir una linealidad en la señal, y al mismo tiempo se ha variado la tolerancia a 0,0001.

Con estas modificaciones y regulando el control PID se ha conseguido una señal de salida como la que se muestra a continuación.



Gráfica 16.- Señal de salida del sistema ensamblado (velocidad respecto al tiempo del vehículo).

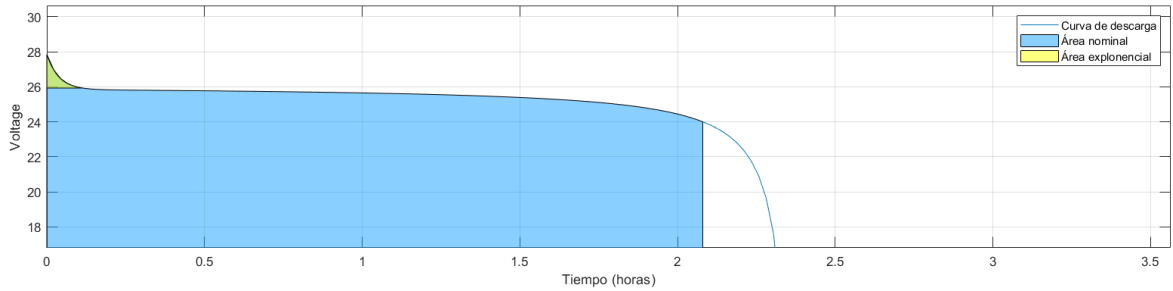
5.2. Aplicaciones asociadas a las células de combustible

Tomando como análisis el sistema completo siendo las células de combustible el punto de inicio. Las células ofrecen un alto rendimiento que se pueden aprovechar para diferentes aplicaciones. Se ha visto que para un motor de un vehículo eléctrico con las prestaciones que tiene actualmente, no puede generar suficiente tensión en el arranque, pero deja claro una gran autonomía en el proceso. Estas aplicaciones podrían ser cargadores de componentes eléctricos como el cargador del teléfono inalámbrico del hogar, también si se aumenta la generación de energía se podría implementar en el ámbito de la industria, en cadenas de montaje, sin embargo, la autonomía tendría que aumentar, por ello el modelo no sería una PEMFC.

Al mismo tiempo, si se quiere mantener la modalidad automovilística, con los mismos elementos eléctricos y electrónicos se puede, modificar la parte mecánica para que cumpla las condiciones requeridas. Si en vez de un vehículo de tracción 4 ruedas, se elige una motocicleta que requiere menos par para su desplazamiento, o incluido un ciclomotor.

5.3. Análisis del sistema

En este apartado se realiza un análisis de las diferentes variables que afectan al sistema.

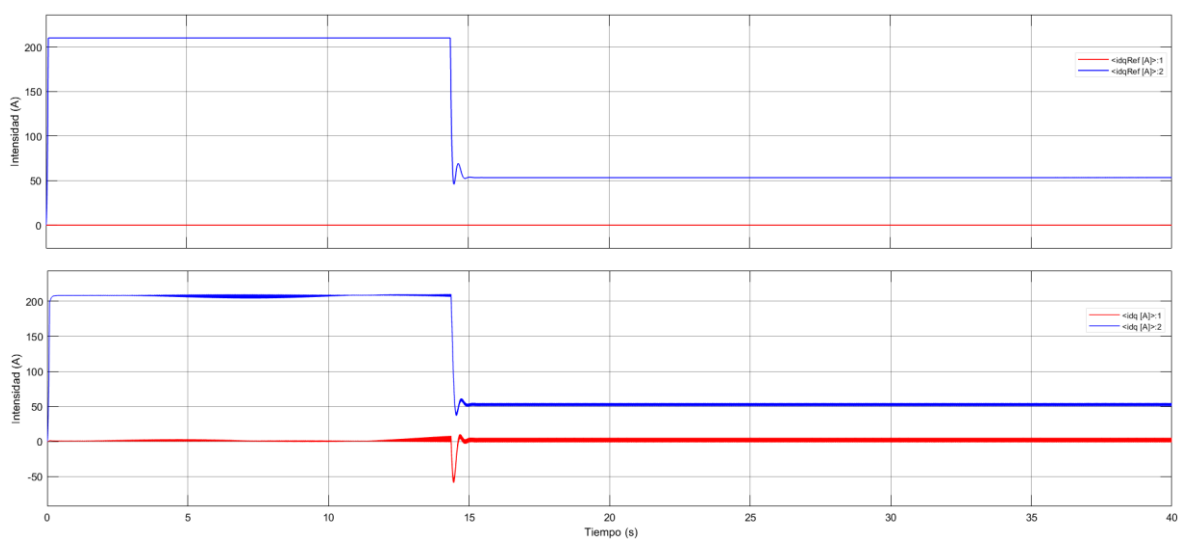


Gráfica 17.- Tiempo de autonomía del vehículo eléctrico.

El primer aspecto que se analiza es la autonomía del vehículo. Los vehículos eléctricos de la actualidad tienen una autonomía aproximada de 250 km. Calculando que el vehículo actual va a una velocidad de crucero máxima de 112km/h su autonomía respecto la zona azul, la cual corresponde a la tensión nominal que cede la alimentación.

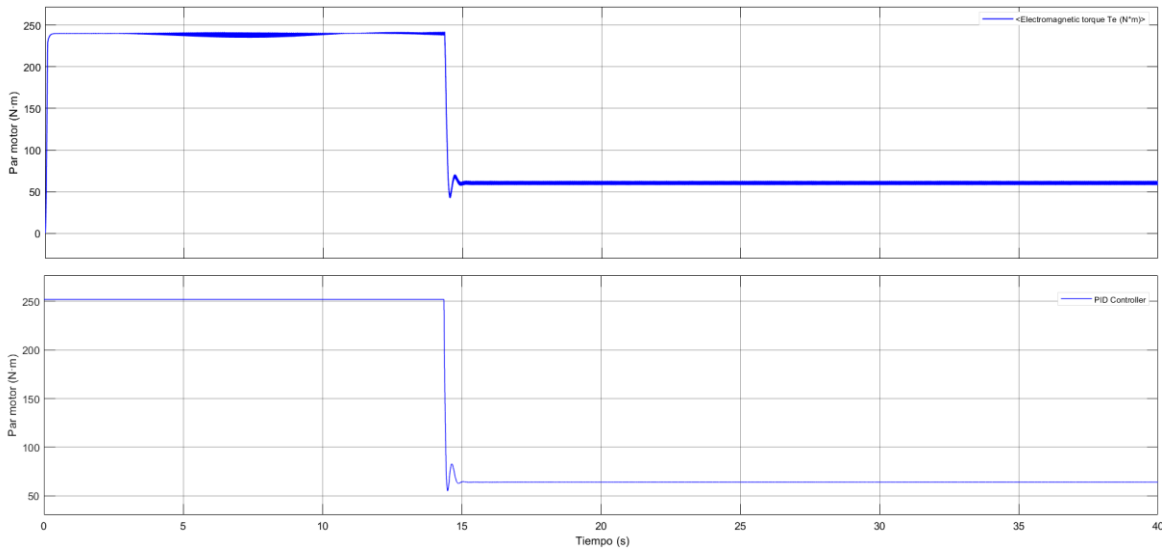
Calculando estos dos valores, resulta una autonomía, tomando como tiempo final de la zona azul, 2,08 h (2 h 4,8 min).

$$km = 112 \frac{km}{h} \cdot 2,08h = 233 km$$



Gráfica 18.- Intensidades de directa y cuadratura.

Aquí las intensidades que se visualizan, son máximas en el primer tramo de los 14 segundos. Este es el lapso de arranque del vehículo, por ello es cuando la intensidad es máxima, porque así lo requiere el par motor. Concluyendo que cuando el vehículo alcanza la velocidad crucero este, consume una densidad de corriente mucho menor, tal y como se muestra en la siguiente ilustración.



Gráfica 19.- Par motor y control por PI.

Al mismo tiempo existe una proporcionalidad con el par motor y las intensidades de directa y cuadratura, tal y como se observa el motor eléctrico en el arranque demanda más par que a velocidades nominales. En el intervalo de arranque el par que demanda el motor es máximo.

Capítulo 6.- Análisis del impacto ambiental

6.1. Impacto ambiental de la realización del proyecto

En la elaboración de este proyecto no existe casi impacto ambiental. Esto es debido a que el proyecto solo se ha desarrollado mediante ordenador. El impacto que se ha producido es el crecimiento de consumo energético del ordenador que se ha utilizado y su futuro desguace de piezas electrónicas.

6.2. Contenido de un estudio de impacto ambiental

Según el marco legislativo y el proceso de tramitación, el contenido mínimo expuesto en este capítulo constará con la Evaluación del Impacto Ambiental (EIA). Esto consta con lo determinado por el artículo 7 del RDL 1/2008. Concretando en mayor medida teniendo en consideración el tercer apartado de este artículo en el cual hace referencia a los efectos previsibles directos e indirectos a tener en consideración en este análisis de impacto medioambiental. El apartado dictamina:

c) Evaluación de los efectos previsibles directos o indirectos del proyecto sobre la población, la flora, la fauna, el suelo, el aire, el agua, los factores climáticos, el paisaje y los bienes materiales, incluido el patrimonio histórico artístico y el arqueológico. Asimismo, se atenderá a la interacción entre todos estos factores.

Sin embargo, por otro lado, la normativa, no establece ningún criterio de metodología acorde sobre la parametrización o valores de los diferentes impactos potenciales, ni mucho menos sus umbrales de actuación, de los cuales no se puede considerar un determinado impacto compatible con la temática de análisis.

Del mismo modo el real decreto RD 1131/1988 el cual es aprobado mediante la ejecución del RDL 1302/1986 el cual ha sido derogado por el RDL 1/2008, dictamina como las únicas indicaciones a impartir las siguientes:

Artículo 10. Identificación y valoración de impactos.

Se incluirá la identificación y valoración de los efectos notables previsibles de las actividades proyectadas sobre los aspectos ambientales indicados en el artículo 6 del presente Reglamento, para cada alternativa examinada.

Necesariamente, la identificación de los impactos ambientales derivará del estudio de las interacciones entre las acciones derivadas del proyecto y las características específicas de los aspectos ambientales afectados en cada caso concreto.

Se distinguirán los efectos positivos de los negativos; los temporales de los permanentes; los simples de los acumulativos y sinérgicos; los directos de los indirectos; los reversibles de los irreversibles; los recuperables de los irrecuperables; los periódicos de los de aparición irregular; los continuos de los discontinuos.

Se indicarán los impactos ambientales compatibles, moderados, severos y críticos que se prevean como consecuencia de la ejecución del proyecto.

La valoración de estos efectos, cuantitativa, si fuese posible, o cualitativa, expresará los indicadores o parámetros utilizados, empleándose siempre que sea posible normas o estudios técnicos de general aceptación, que establezcan valores límite o guía, según los diferentes tipos de impacto. Cuando el impacto ambiental rebase el límite admisible, deberán preverse las medidas protectoras o correctoras que conduzcan a un nivel inferior a aquel umbral; caso de no ser posible la corrección y resultar afectados elementos ambientales valiosos, procederá la recomendación de la anulación o sustitución de la acción causante de tales efectos.

Se indicarán los procedimientos utilizados para conocer el grado de aceptación o repulsa social de la actividad, así como las implicaciones económicas de sus efectos ambientales.

Se detallarán las metodologías y procesos de cálculo utilizados en la evaluación o valoración de los diferentes impactos ambientales, así como la fundamentación científica de esa evaluación.

Se jerarquizarán los impactos ambientales identificados y valorados, para conocer su importancia relativa. Asimismo, se efectuará una evaluación global que permita adquirir una visión integrada y sintética de la incidencia ambiental del proyecto.

Debido a esto, en resumen, se intenta cuantificar los resultados del análisis del impacto ambiental ocasionado no solo por desechos, sino por actividades y modificaciones que ocurran en el medioambiente. Del mismo modo es muy complicado cuantificar dichos aspectos, sin embargo, lo primero a acatar es subdividir dichos aspectos.

Tabla 9.-Tipificación de los impactos ambientales considerando los distintos atributos.

Por la evolución de la calidad ambiental del medio	Por la evolución de la calidad ambiental del medio
Impacto positivo	Impacto irreversible
Impacto negativo	Impacto reversible
Por la intensidad	Por la relación causa-efecto
Impacto notable o muy alto	Impacto directo
Impacto mínimo o bajo	Impacto indirecto o secundario
Impacto medio y alto	Por la interrelación de acciones y/o efectos
Impacto umbral	Impacto simple
Por la extensión	Impacto acumulativo
Impacto parcial	Impacto sinérgico
Impacto extenso	Por su periodicidad
Impacto total	Impacto continuo
Impacto de ubicación crítica	Impacto discontinuo
Por el momento en que se manifiesta	Por la necesidad de aplicaciones de medidas correctoras
Impacto latente	Impacto ambiental severo
Impacto inmediato	Impacto ambiental moderado
Impacto de momento crítico	Impacto ambiental compatible
Por su perseverancia o duración	
Temporal	
Permanente	


Teniendo en consideración los diferentes aspectos a la hora de realizar un análisis de impacto ambiental, estos se pueden clasificar en dos grandes factores. los cuales son su “Signo” y su “Valor”. El signo es el denominante de los efectos del impacto ambiental resultando positivos o negativos para el entorno y el valor o comúnmente conocido el grado de manifestación, expresa sus términos de manera cuantitativa o su importancia cualitativa.

Tabla 10.-Factores que caracterizan el impacto ambiental.

Signo	Positivo	
	Negativo	
	Indeterminado	
Valor	Magnitud	Grado de manifestación cuantitativa
	Importancia o grado de manifestación cualitativa	Caracterización: Extensión, persistencia, reversibilidad, recuperabilidad, efecto, sinergia, periodicidad, etc.

Tal y como se ha indicado, en su totalidad los impactos ambientales no permiten cuantificarse ni cualificarse, sea por motivos intrínsecos o extrínsecos. A continuación, se representa una tabla esquematizada de una clasificación de los aspectos que pueden ser medidos relacionado a su vez con la dificultad de parametrizarlo.

Tabla 11.-Criterio de prioridad de cuantificación y cualidad.

DESPRECIABLES			
CUANTIFICABLES	Directamente		MEDIBLES 
	A través de un índice o modelo		
CUALITATIVOS	Criterios objetivos de valoración	Escalas proporcionales	
		Escalas jerárquicas	
	Criterios objetivos	Escalas de preferencia	
		Otros criterios subjetivos	
Estrictamente cualitativos		NO MEDIBLES	

6.3. Impacto ambiental de la industria del vehículo eléctrico

Entrando dentro de la tecnología de los vehículos eléctricos, el objetivo final de este proyecto. Lo primero a recalcar es que los vehículos eléctricos no son del todo limpios para el medio ambiente, simplemente ofreciendo valores, en media los vehículos eléctricos son un 30% menos nocivos para la atmosfera que los vehículos de combustión. Como se ha mencionado anteriormente no son dispositivos totalmente limpios, pero al final de su vida útil se han ahorrado una cantidad considerablemente grande de poluciones en comparación con los vehículos de combustión. Esto se ha confirmado mediante estudios publicados por la Agencia Europea de Medio Ambiente, la cual tiene como objetivo desmentir los distintos rumores que rondan sobre la desacreditación de esta nueva forma de movilidad vial.

Observando y estudiando las sospechas e incertidumbres sobre la verdadera conclusión del impacto medioambiental que ocasionan los vehículos eléctricos, informan que desde la Agencia del Medio Ambiente no hay mas que aspectos verdes en el sector.

Por otro lado, también se considera el lapso de fabricación, en esta parte donde al mismo tiempo se consideran la obtención de materias primas para el producto final se visualiza un mayor impacto que



el ocasionado mediante la fabricación de los vehículos convencionales, aunque el balance está equilibrado si se realiza un análisis teniendo en cuenta la vida útil del conjunto del sistema desde que se termina de fabricar hasta que se desguaza.

Durante adquisición de las materias primas que se requieren en la elaboración de las baterías y en el proceso de fabricación del vehículo se emiten sustancias nocivas para el medio ambiente cuya cantidad oscila entre 1,3 y 2 veces a las que se emiten, mediante la fabricación de vehículos convencionales de gasolina.

Según el informe que dictamina la Agencia Europea de Medio Ambiente, ello es así porque un vehículo eléctrico requiere en su fabricación una media aproximada de 4 veces más de cobre y potencialmente de níquel, entre otros compuestos con los consiguientes impactos en el proceso de extracción y procesamiento. Del mismo modo para optar porque el peso del vehículo sea lo más bajo posible, se requiere que sea la carrocería de un material liviano, ocasionando así una mayor autonomía debido a que el vehículo consta de una menor fuerza en contraposición. Para conseguir esto, los materiales empleados suelen ser materiales como el aluminio, fibra de carbono o composite, los cuales ocasionan un mayor impacto.

Uno de los materiales más empleados en la elaboración de baterías en vehículos eléctricos es el cobalto, que junto con el litio, el cual es el material empleado en el centro de la polimérica. Estos materiales son comúnmente conocidos, pero eso no implica que su adquisición sea barata o fácil. El cobalto es extraído mayoritariamente de la república del Congo, uno de los países más pobres del mundo actualmente y sometido a una gran inestabilidad, este elemento es muy codiciado, tanto es así que media docena de fondos de inversión han pagado por 6.000 toneladas de cobalto valorado por 280 millones de dólares (234 millones de euros). Este problema fue lo que se denominó guerra sucia.

Matriculaciones de turismos eléctricos

ENERO 2019

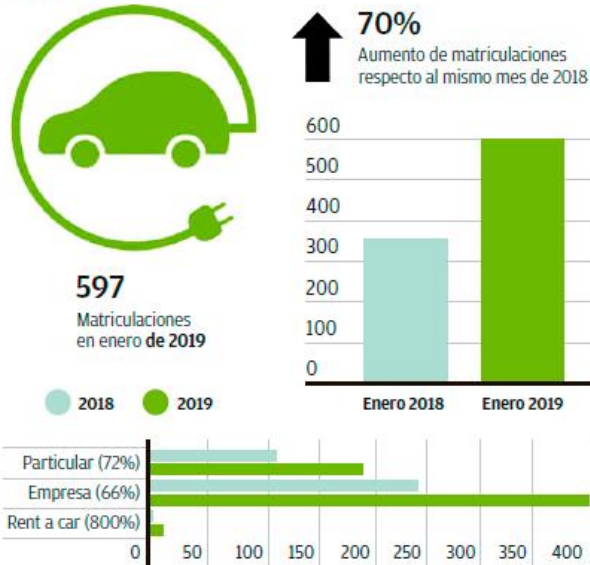


Ilustración 116.- Matriculaciones de turismos eléctricos en enero de 2018 y 2019.(32).

Aunque se vean estos factores de impacto, la adquisición y elaboración de vehículos eléctricos va en aumento gradual, debido a que en todo su conjunto sigue teniendo menor emisiones nocivas que los vehículos convencionales, entre otras muchas ventajas.

El impacto ambiental de los coches

SEGÚN SU TIPO DE PROPULSIÓN

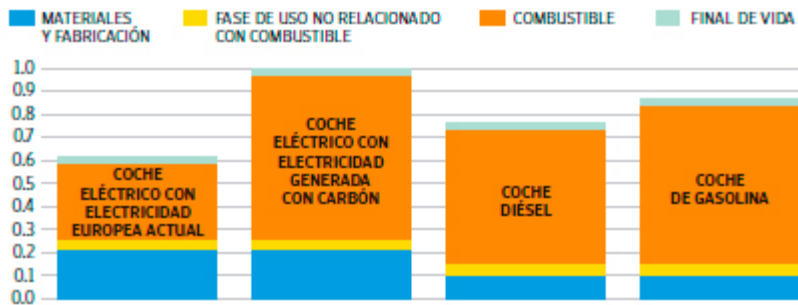


Ilustración 117.-Impacto ambiental de los vehículos. (32).

Teniendo en consideración todo el período de fabricación del vehículo, ahora comienza la parte donde se toma en cuenta el rodaje de este. Una vez el vehículo eléctrico se encuentra en carretera la huella ecológica queda drásticamente reducida, hasta tal punto en que el conjunto de todos los tipos de impactos que se muestran en la ilustración decae entre un 17% y un 21% en comparación con los vehículos diésel y un intervalo aproximado de entre 26% y 30% de los vehículos convencionales de gasolina. Estos valores de porcentaje se han obtenido mediante estudios e informes de la Agencia Europea de

Medio Ambiente tomando como referencia que la batería se recarga con el tipo de electricidad habitual en la Unión Europea, debido a que si la recarga se realiza mediante energía limpia, como puede ser la generada eólicamente o fotovoltaicamente, su reducción abarcaría un porcentaje del 90% frente a un vehículo convencional. Sin embargo, un vehículo eléctrico que requiera recargarse en una ciudad únicamente con opción de energía térmica, podría llegar a contaminar excesivamente más que un vehículo de gasolina. Por el contrario, estos casos son casi inexistentes.

Añadiendo valores a los impactos ocasionados por los vehículos con el mix eléctrico medido en España, un vehículo con motor de combustión genera una media de 143 gramos de dióxido de carbono, mientras que, por otro lado, los vehículos eléctricos solo generan entre 60 y 76 gramos, es decir, entre un 47% y un 58%. Los expertos confían en que la progresiva mejora en la sostenibilidad de la generación eléctrica y en el desarrollo de las baterías para que reduzca en gran medida los valores actuales de la huella ecológica, lo máximo posible sin perjudicar el funcionamiento del sistema o el entorno medioambiental en el cual se encontrara el vehículo activo.

En los resultados analíticos que se calcularon para España, esta agencia ha estimado que las emisiones directas totales de dióxido de carbono de los vehículos de ciudad se reducirán de 50 millones de toneladas desde el 2017 a 37 toneladas para el año 2030 y a tan solo 5 millones de toneladas para el 2050, estos cálculos se han realizado sin tener en consideración un crecimiento en el ámbito de las generaciones de energías renovables.

Por otro lado, no solo tratando las contaminaciones nocivas para el medio ambiente, los vehículos eléctricos constan de otra gran ventaja. Esta es que requieren en mucho menor medida las revisiones al taller. Esto se debe a que por lo general ocurren menos averías en estos vehículos, debido a que disponen aproximadamente de 1.000 piezas menos que los vehículos de combustión. De la misma forma el mantenimiento es mucho más reducido porque no se requiere hacer la revisión del aceite ni de filtros anualmente y al mismo tiempo son vehículos más silenciosos.

Otras ventajas que conllevan es que son capaces de estacionar en zonas azules gratuitamente si es para la recarga del vehículo. Así también los ayuntamientos de España los eximen de pagar por los impuestos de circulación para promover este tipo de vehículos. Sin embargo, estos siguen siendo más caros que los vehículos convencionales de combustión y de igual forma aun no existen numerosos talleres especializados en la reparación y mantenimiento de los vehículos eléctricos.

A la par con lo anterior, tampoco hay una considerable cantidad de puntos de recarga en la actualidad. Por ello hay numerosas personas que ni se plantean comprarse un vehículo eléctrico aún. En cambio, estos desperfectos van disminuyendo cada vez más.

Actualmente las marcas comerciales de vehículos afirman que el vehículo eléctrico se amortiza a partir de los 10 años de su compra, o inclusive antes si se utiliza en mayor frecuencia. Una vez alcanza los 15.000 kilómetros anuales se confirma que monetariamente el vehículo eléctrico es más económico que los convencionales. El vehículo eléctrico en si es más caro que el convencional, sin embargo, contando todo su conjunto, donde más se aprecia la amortización monetaria es en el combustible, la recarga eléctrica de las baterías cuesta aproximadamente 1,30€ cada 100 kilómetros, mientras que el combustible de gasolina ronda sobre los 7€ u 8€ para esa misma distancia. Esto junto a que las revisiones al taller son reducidas debido a su bajo requerimiento consiguen que sea asequible.

Conclusiones

Tal y como se ha mencionado en los diferentes apartados de este documento, uno de los mayores retos de este siglo es el de mejorar lo máximo posible los controles de consumo de energía para así evitar el exceso de emisiones nocivas a la atmosfera, produciendo como consecuencia un efecto invernadero proveniente de la elevada quema de combustibles fósiles, elevando la temperatura del planeta como resultado.

Las células de combustible tienen un alto grado de rendimiento y un gran margen de mejora, las cuales son perfectas para explotar esa rama de desarrollo, al mismo tiempo se consiguen aplicar en diferentes actividades como es la implementación de esta en un vehículo eléctrico (objetivo secundario del proyecto), el cual a su vez tiene un coste minoritario comparándolo a uno convencional.

En este informe se ha demostrado como un vehículo alimentado mediante un compuesto químico, el cual no es nocivo para el medio ambiente, puede llegar a aportar las mismas capacidades que uno convencional de ciudad. Con un motor eléctrico y con el control de velocidad se ha conseguido simular una velocidad más que apta para un vehículo de este calibre.

Al mismo tiempo, se comprende la funcionalidad de cada tipo de motor como depende de las prestaciones que se requieren. No es lo mismo un motor de un par medio que conllevan los vehículos de ciudad ponérselo a un monovolumen que a un camión, este último no podrá moverse debido a que con la cantidad de masa que transporta el par que ofrece este motor es incapaz de alcanzarlo.

De igual manera, en este mismo sentido se ha llegado a la comprensión del concepto velocidad inversamente proporcional al par motor ejercido del vehículo, es decir, para poder subir pendientes en las que obviamente se requiere más par, debido a que el vehículo se está enfrentando a una fuerza en función de la gravedad proporcional a la pendiente. Se ha conseguido visualizar como añadiendo una pendiente al vehículo la velocidad decae para mantener el par y que el vehículo consiga ascender la pendiente en la que se encuentra.

Con todos los conceptos vistos hasta el momento este proyecto no acabaría aquí. Estas son las bases para llegar a comprender esta tipología de sistemas. De ahora en adelante para poder complementar todo lo visto hasta el momento con una mejora en su eficiencia, se tienen que desarrollar elementos acordes a la aplicación que aún no se encuentran en el software de simulación.

Con el análisis que se ha realizado se ha observado que con un motor de 40 kW no se puede alcanzar el par motor suficiente a los vehículos convencionales, pero se ha conseguido ver el límite del proyecto,

con un motor de 40 kW y teniendo en consideración todas las prestaciones de la célula de combustible, el vehículo ha sido capaz de alcanzar 112 km/h. Si a este motor se le añadiera más par generado, el vehículo podría alcanzar las velocidades deseadas.

Sin embargo, los motores prediseñados por el software no alcanzan dichas cifras, se ha elegido el motor más potente que se encuentra disponible actualmente. Por ello, a partir de aquí, si se desea aumentar las velocidades de un vehículo se tiene que diseñar un motor de imanes permanentes, si aún se requiere la investigación en vehículos que aporten un par bajo. Como se ha mencionado con anterioridad en función de la aplicación a la que esté dirigido el vehículo, este constará de una tipología de motor o de otra.

Proyectos futuros

Tomando como base este proyecto se puede proceder a estudiar el efecto de diferentes estrategias de gestión del nivel de carga de la batería y de la inyección de combustible en la célula de hidrogeno para evaluar la eficiencia global sobre el uso del combustible y las prestaciones del vehículo.

Un menor estado de carga de las baterías nos lleva a un peor comportamiento dinámico del vehículo a largo plazo, pero mejor aprovechamiento del retorno de energía durante los frenados o bajadas. Un estado de carga muy elevado nos reduce la eficiencia global del sistema al llevarnos a que en determinados momentos tengamos que eliminar energía devuelta por el motor por tener las baterías llenas.

Los sistemas de gestión que podríamos elaborar por ejemplo como arboles de decisiones en stateflow de Matlab, nos permitirían por ejemplo evaluar el comportamiento del sistema en diversos escenarios:

- Gestión de energía distribuida al sistema electromecánico.
- Análisis del sistema en función de la tipología de zona.
 - Rural.
 - Ciudad.
 - Montaña.
 - Ciénaga.
- Análisis del sistema en función del nivel de pendiente.
 - Subida o Bajada
 - Pronunciada o Leve
- Diseño de una maquina eléctrica acorde con la actividad determinada.

Presupuesto y/o Análisis Económico

En el apartado de presupuesto se realiza una subdivisión de categorías, se separará en diferentes fases las cuales serán catalogadas de diferentes desarrollos.

- Fase A: En la primera fase se realiza una recopilación de datos para el desarrollo del diseño del vehículo.
- Fase B: En la segunda y última fase se implementan los datos recogidos de la primera fase del proyecto, y se elabora un plan de trabajo para realizar las simulaciones y el modelado del diseño hasta alcanzar el objetivo.

Tabla 12.-Presupuesto medio para vehículos eléctricos monovolúmenes.

LOTE I: VARIOS SERVICIOS				
Fase A.	COSTES FORMACIÓN			
Ud.	Descripción	Horas	Precio ud.	Total
Ud	Recopilación de datos técnicos, de los diferentes aspectos que aparecen a lo largo del proyecto.	225	10€	2.250,00€
	A. TOTAL COSTES INICIALES			2.250,00€
Fase B.	COSTES TÉCNICOS			
Ud	Tiempo de desarrollo en el modelado del sistema, elaboración de simulaciones y análisis.	375	25€	9.375,00€
	B. TOTAL COSTES INDIRECTOS			9.375,00€
Impuestos	IVA			21%
	TOTAL COSTES DIRECTOS + INDIRECTOS			11.625,00€
	C. TOTAL IVA			2.441,25€
	TOTAL LOTE I			14.066,25€

Bibliografía

1. Zhang, B. y Qiu, D. Ejemplo de control SPWM. En: [en línea]. Springer, Singapore, 2019, p. 1-21. DOI 10.1007/978-981-13-1382-0_1. [consulta: 1 mayo 2021]. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-1382-0_1.
2. Eléctrica, I. y Taltavull, G.A. DISEÑO DE UNA SERIE DE MOTORES SÍNCRONOS DE RELUCTANCIA TFG presentado para optar al título de GRADO en. En: .
3. Arduino en español: Motores Paso a Paso. En: [en línea]. [consulta: 1 mayo 2021]. Disponible en: <http://manueldelgadocrespo.blogspot.com/p/motores-paso-paso.html>.
4. Núñez, J.V. y Pérez, S.V. DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO CINÉTICO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA EDIFICACIÓN C CA AP PÍ IT TU UL LO O 4 4.. M MÁ ÁQ QU UI IN NA AS S D DE E R RE EL LU UC CT TA AN NC CI IA A C CO ON NM MU UT TA AD DA A ((M MR RC C)). En: .
5. Politécnica, U. et al. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES. En: .
6. Lázaro, A.: et al. TRABAJO FINAL DE MASTER. En: . 2010.
7. Fin De Grado, T. et al. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES. En: . 2017.
8. Nick, H. y Gamarra, A. Diseño de un motor síncrono con imanes de ferritas para motocicleta eléctrica. En: .
9. Capacidad de magnetización de los materiales, histéresis magnética. - infootec.net. En: [en línea]. [consulta: 1 mayo 2021]. Disponible en: <https://www.infootec.net/capacidad-magnetizacion-los-materiales-histeresis-magnetica/>.
10. Guía, P. et al. ANÁLISIS DEL DISEÑO Y CONTROL DE UN GENERADOR TRIFÁSICO DOBLEMENTE ALIMENTADO MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRICISTA ERIC ANDRES SIERRA JIMÉNEZ. En: .
11. Harry. TRABAJO FINAL DE GRADO. En: .
12. (PDF) MOTORES ASINCRONOS. En: [en línea]. [consulta: 25 abril 2021]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/235752013_MOTORES_ASINCRONOS.
13. ICMA. En: [en línea]. [consulta: 13 enero 2021]. Disponible en: <http://www.icma.unizar-csic.es/ICMAportal/celdasDeCombustible.do?enlaceMenuDerecha=temas&enlaceMenuIzquierda=divulgacion>.
14. Rendimiento de ánodos a base de titanio y grafito no poroso en pilas de combustible microbianas



| Solicitar PDF. En: [en línea]. [consulta: 13 enero 2021]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/40097044_Performance_of_non-porous_graphite_and_titanium-based_anodes_in_microbial_fuel_cells.

15. Funcionamiento de una pila de combustible. En: [en línea]. [consulta: 1 mayo 2021]. Disponible en: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/6055/PFC_Antonio_Mayandia_V2.pdf;jsessionid=D4C63D9B146B48AEA4C8AC77CF23ED58?sequence=1.

16. Inicio | APPICE. En: [en línea]. [consulta: 14 enero 2021]. Disponible en: <https://appice.es/>.

17. 2. INTRODUCCIÓN A LA TECNOLOGÍA DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE TIPO PEM 2.1 NECESIDAD DE UN VECTOR ENERGÉTICO DIFERENTE. En: .

18. Primera Ley de la Termodinámica. En: [en línea]. [consulta: 2 febrero 2021]. Disponible en: <https://www.fiscalab.com/apartado/primer-principio-termo#diagramas>.

19. Pilas de Combustible - Centro Nacional de Hidrógeno. En: [en línea]. [consulta: 10 enero 2021]. Disponible en: <https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>.

20. Transformadas de Clarke y Park - MATLAB & Simulink. En: [en línea]. [consulta: 25 abril 2021]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/solutions/power-electronics-control/clarke-and-park-transforms.html>.

21. Apéndice B Transformación de Park o D-Q B.1. Expresión de la matriz de transformación. En: .

22. IFOC. En: [en línea]. [consulta: 25 abril 2021]. Disponible en: http://repositorio.concytec.gob.pe/bitstream/20.500.12390/149/1/2016_Moreano_Implementación-del-control.pdf.

23. Capítulo 4 Control de Par y Flujo 4.1. Control vectorial. En: .

24. Control vectorial de la máquina de inducción. - Dialnet. En: [en línea]. [consulta: 25 abril 2021]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4587446>.

25. Cujj, W.D. y Arcos Avilés, D. Control Directo al Par y Control de Campo Orientado para un Motor Síncrono de Imanes Permanentes. En: *Ingeniería* [en línea]. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, 2019, vol. 24, no. 2, p. 143-158. ISSN 0121-750X. DOI 10.14483/23448393.14142. [consulta: 25 abril 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.14483/23448393.14142>.

26. Control selector de flujo. En: [en línea]. [consulta: 25 abril 2021]. Disponible en: https://upaep.mx/micrositios/coloquios/coloquio2013/memorias/Mesa_4_Mec_y_Bio/5.-_Hugo_Ramirez.pdf.

27. Ingeniería En Electrónica, C. DE. DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES. En: .

28. COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA Presentan, I.E. et al. «PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES»

CONTRL DE MOTORES MEDIANTE PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES Que para obtener el grado de. En: .

29. (PDF) Simulación del control por campo orientado y del control directo del par de un servomotor síncrono de imanes permanentes con control inteligente de velocidad. En: [en línea]. [consulta: 25 abril 2021]. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/286313888_Simulacion_del_control_por_campo_orientado_y_del_control_directo_del_par_de_un_servomotor_sincrono_de_imanes_permanentes_con_control_inteligente_de_velocidad.

30. Curvas de funcionamiento del motor de inducción para distintas... | Download Scientific Diagram. En: [en línea]. [consulta: 1 mayo 2021]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Curvas-de-funcionamiento-del-motor-de-induccion-para-distintas-frecuencias-de_fig1_308832260.

31. Carga de Refrigeración. En: [en línea]. [consulta: 31 marzo 2021]. Disponible en: https://ec.europa.eu/programmes/erasmus-plus/project-result-content/7bb473b9-d46e-4d82-b1dd-30067cd9124d/P2_ESP.pdf.

32. Coches eléctricos: un 30% menos contaminación a la atmósfera - Verde y Azul. En: [en línea]. [consulta: 1 mayo 2021]. Disponible en: <https://verdeyazul.diarioinformacion.com/coches-electricos.html>.

Anexo A

A1. Variables definidas en Matlab

```
wheel_radius=0.4;  
v0=0.01;  
Ts_Power=1000;  
Limit_Ireg_motor=[500,-50];  
Ts_Control=1e-3;  
Limit_wreg_motor=[500,-50];  
Ts_PWM=1e-3;  
Fc_motor=10000;  
RateLimit_wref_motor=3000;  
wref_Initial=0;  
RateLimit_Iref_motor=1000;  
LowerLimit=-1;  
Init=0;  
UpperLimit=1;  
ki=80;  
Ki_id=710;  
Ki_ids=207;  
Ki_imr=2790;  
Ki_iq=1061;  
Ki_iqs=210;  
Ki_Ireg_motor=10;  
Ki_wr=100;  
Ki_wreg_motor=220;  
kp=80;  
Kp_id=0.88;  
Kp_ids=1.08;  
Kp_imr=52.22;  
Kp_iq=1.0744;  
Kp_iqs=1.08;  
Kp_Ireg_motor=100;  
Kp_wr=10;  
Kp_wreg_motor=20;
```

A2. Par motor

```
2 component torque
3 % Ideal Torque Source
4 % The block represents an ideal source of torque that
  generates torque
5 % at its terminals proportional to the input physical
  signal. The source is
6 % ideal in a sense that it is assumed to be powerful
  enough to maintain
7 % specified torque regardless of the angular velocity
  at source terminals.
8 %
9 % Block connections R and C are mechanical rotational
  conserving
10 % ports. Port S is a physical signal port, through
  which control
11 % signal that drives the source is applied. Positive
  signal at port S
12 % generates torque acting from C to R.
13
14 % Copyright 2005-2013 The MathWorks, Inc.
15
16 inputs
17     S = { 0, 'N*m' }; % S:bottom
18 end
19
20 nodes
21     C = foundation.mechanical.rotational.rotational;
  % C:bottom
22     R = foundation.mechanical.rotational.rotational;
  % R:top
23 end
24
25 variables (Access = protected)
26     w = { 0, 'rad/s' }; % Angular velocity
27     t = { 0, 'N*m' }; % Torque
28 end
29
30 branches
31     t : R.t -> C.t;
32 end
33
```

```
34 equations
35     w == C.w - R.w;
36     t == -S;
37 end
38
39 end
```


A4. Modelo simulink ampliado

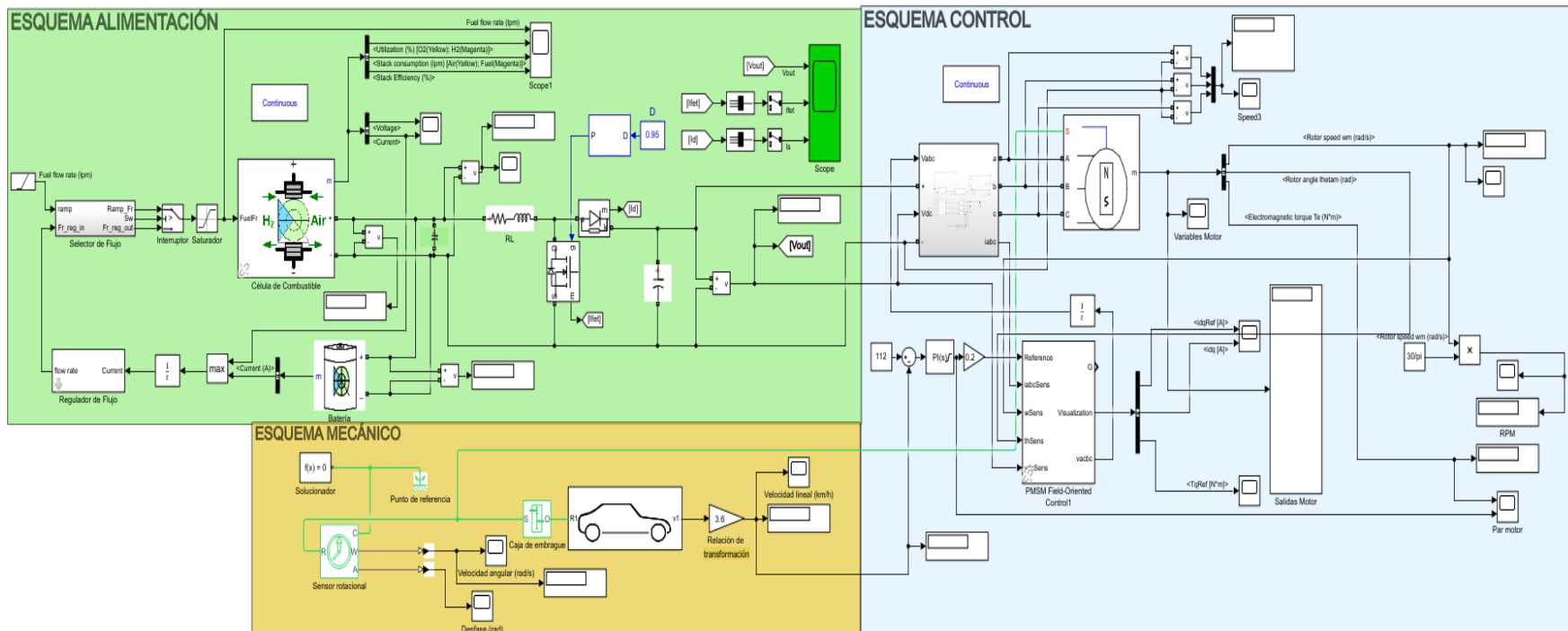


Ilustración 118.- Modelo del diseño ampliado en Simulink.