

**ANÁLISIS, MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE LA
DINÁMICA LONGITUDINAL DE UN VEHICULO
ELÉCTRICO CON CELDAS DE COMBUSTIBLE COMO
FUENTE DE POTENCIA**

ELKIN YESID VALBUENA PÉREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2015

**ANÁLISIS, MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE LA
DINÁMICA LONGITUDINAL DE UN VEHÍCULO
ELÉCTRICO CON CELDAS DE COMBUSTIBLE COMO
FUENTE DE POTENCIA**

ELKIN YESID VALBUENA PÉREZ

Trabajo de grado para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Director del proyecto:
JORGE LUIS CHACÓN VELASCO
Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2015

DEDICATORIA

A mi Madre Graciela Pérez, por todos sus esfuerzos, dedicación y sacrificios, a mi Padre Norberto Valbuena, por toda su confianza, trabajo y sacrificio y a mi Hermana Julieth F. Valbuena, por toda la ayuda que me ha brindado.

A mis abuelos, tíos, primos, amigos y demás personas que han creído en mí.

Al Ing. Hernando Rodríguez, por toda su confianza, enseñanza y ayuda.

A Andrés Escobar por su ayuda, motivación y su amistad.

Y a Luz M. Amador Grass, por ser la luz que ilumino mi vida y mi inspiración.

Elkin Yesid Valbuena Pérez

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Jorge Luis Chacón Velasco, Director del Proyecto, por su confianza,
colaboración y apoyo.

A toda mi Familia, compañeros y amigos por sus buenos deseos y la ayuda
brindada.

Elkin Yesid Valbuena Pérez

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	19
1 ANÁLISIS DE LA DINÁMICA LONGITUDINAL DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO	20
1.1 <i>MODELAMIENTO DINÁMICO DE LAS FUERZAS DE UN VEHÍCULO</i>	20
1.1.1 Fuerzas resistivas aplicadas al vehículo	22
1.2 <i>MODELAMIENTO DINÁMICO DE LAS RUEDAS</i>	26
1.2.1 Cálculo del coeficiente de deslizamiento	27
1.3 <i>MODELAMIENTO DINÁMICO DE UN MOTOR ELÉCTRICO DC</i>	28
1.3.1 Análisis eléctrico del motor	28
1.3.2 Análisis mecánico del motor	29
1.3.3 Análisis de la transmisión de engranajes	30
1.3.4 Análisis de un convertidor de voltaje dc/dc tipo boost.....	31
1.4 <i>CARACTERIZACIÓN DE LOS ULTRACAPACITORES</i>	34
1.4.1 Análisis matemático de un ultracapacitor.....	35
1.5 <i>MODELO MATEMÁTICO DE LAS BATERÍAS.....</i>	38
2 PRINCIPIOS TÉRMICOS Y ELÉCTRICOS DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM	41
2.1 PRINCIPIOS TERMODINÁMICOS DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE	41
2.1.1 Primera ley de la termodinámica	41
2.1.2 Segunda ley de la termodinámica	42
2.1.3 Termodinámica química	43
2.1.4 Potencial eléctrico de una celda de combustible	43
2.1.5 Influencia de la presión y la temperatura	44
2.1.6 Eficiencias de las celdas de combustible	44

2.2	PRINCIPIOS ELÉCTRICOS DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE	45
2.2.1	Pérdidas cinéticas o de activación	45
2.2.2	Pérdidas resistivas u óhmicas.....	49
2.2.3	Pérdidas por transporte de masa o por concentración	52
2.3	BALANCE DE MASA	56
2.3.1	Análisis de las masas entrantes	57
2.3.2	Análisis de las masa salientes	58
2.4	BALANCE DE ENERGÍA	59
2.4.1	Conducción de calor por convección	60
2.4.2	Conducción de calor por radiación.....	61
2.5	TRANSFERENCIA DE CALOR.....	62
2.5.1	Método numérico (diferencias finitas).....	63
2.5.2	Conducción unidimensional de calor en estado transitorio de las celdas de combustible.....	64
3	<i>DESCRIPCION DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN DEL VEHICULO ELECTRICO CON CELDAS DE COMBUSTIBLE SIDVEC</i>	<i>71</i>
3.1	<i>REQUERIMIENTOS DE DISEÑO DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN.....</i>	<i>71</i>
3.2	<i>INTERFAZ DEL PROGRAMA Y SUS PARTES</i>	<i>79</i>
3.2.1	<i>Sección de simulación del vehículo eléctrico</i>	<i>80</i>
3.2.2	<i>Sección de simulación de la celda de combustible</i>	<i>83</i>
3.2.3	<i>Visualización de gráficas y resultados.....</i>	<i>86</i>
3.3	<i>MODELAMIENTO EN SIMULINK</i>	<i>90</i>
3.3.1	<i>Modelo simulink: sección vehículo</i>	<i>90</i>
4	<i>PRUEBAS, ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO - SIDVEC</i>	<i>98</i>
4.1	<i>SIMULACION DEL MODELO DE FCEV Y SUS COMPONENTES.....</i>	<i>100</i>
4.1.1	<i>Configuración del vehículo y cálculo de los parámetros del motor</i>	<i>100</i>
4.1.2	<i>Simulación dinámica del vehículo eléctrico.....</i>	<i>102</i>
4.1.3	<i>Caracterización y parametrización del stack de celdas de combustible</i>	<i>104</i>

4.1.4	Simulación dinámica del stack de celdas de combustible	108
4.1.5	Modelamiento y simulación del convertidor de voltaje dc/dc	110
4.1.6	Análisis y simulación del comportamiento del vehículo con frenado regenerativo	114
4.1.7	Parametrización del banco de ultracapacitores	119
4.1.8	Simulación y análisis del stack de celdas de combustible en combinación con el banco de ultracapacitores.....	122
4.1.9	Parametrización de las baterías y simulación en combinación con el stack de celdas de combustible	125
4.2	<i>SIMULACION DEL VEHICULO EN DIFERENTES SITUACIONES DE OPERACIÓN</i>	127
4.2.1	Variación del ángulo de inclinación del terreno.....	128
4.2.2	Modificación de las condiciones de la superficie	132
4.2.3	Efectos de la velocidad del viento	134
4.2.4	Comparación de las diferentes configuraciones de tracción de un vehículo eléctrico	135
4.2.5	Comportamiento del vehículo según el ciclo de operación	136
4.2.6	Análisis del consumo de combustible y la autonomía del modelo de vehículo	141
5	CONCLUSIONES.....	144
6	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	148
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	149
	BIBLIOGRAFÍA.....	155
	ANEXOS.....	157

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema de las fuerzas que actúan sobre un vehículo	21
Figura 2. Deformación de la rueda causante de la resistencia por rodadura.....	25
Figura 3. Gráfica del comportamiento del coeficiente de deslizamiento en función de la relación de deslizamiento a diferentes condiciones de la superficie.....	28
Figura 4. Esquema eléctrico de un motor eléctrico dc.....	28
Figura 5. Esquema de torques aplicados sobre el eje del motor	30
Figura 6. Esquema de un convertidor de voltaje boost dc-dc	32
Figura 7. Esquema convertidor boost en estado on	32
Figura 8. Esquema convertidor boost en estado off	33
Figura 9. Formas de onda del convertidor boost.....	34
Figura 10. Circuito equivalente de un ultracapacitor ideal	37
Figura 11. Circuito equivalente del modelo rse-rpe para un ultracapacitor	37
Figura 12. Curva característica de descarga de una batería.....	39
Figura 13. Fenómeno de histéresis en una batería	40
Figura 14. Representación de un volumen de control	42
Figura 15. Curva característica de una celda de combustible.....	46
Figura 16. Representación de la conducción eléctrica y la conducción iónica.	50
Figura 17. Esquema de la diferencia de concentración de agua.....	51
Figura 18. Esquema descriptivo de diferentes fenómenos de transporte	55
Figura 19. Diagrama de conducción unidimensional en una pared plana con el método de diferencias finitas.....	62

Figura 20. Diagrama de balance de energía en la placa del extremo.....	65
Figura 21. Diagrama de balance de energía en la placa colectora	65
Figura 22. Diagrama de balance de energía en la placa bipolar	66
Figura 23. Diagrama de balance de energía en el campo de flujo	67
Figura 24. Diagrama de balance de energía en la membrana polimérica.....	69
Figura 25. Esquema completo del balance de energía de la celda de combustible con todas las placas que la constituyen	70
Figura 26. Diagrama de flujos general del simulador sidvec	73
Figura 27. Diagramas de datos de entrada y salida de los subsistemas.....	74
Figura 28. Interfaz principal del programa de simulación desarrollado.....	79
Figura 29. Interfaz de la sección de simulación del vehículo eléctrico.....	80
Figura 30. Comportamiento teórico torque y potencia del motor eléctrico en función de la velocidad angular	82
Figura 31. Interfaz de la sección de simulación de la celda de combustible.....	84
Figura 32. Panel de datos de entrada y de propiedades	85
Figura 33. Panel de multigráficas	86
Figura 34. Gráficas de velocidad obtenidos por el programa.....	87
Figura 35. Curva característica graficada por el programa.....	88
Figura 36. Visualización de todas las gráficas de forma simultánea.....	88
Figura 37. Área de visualización de resultados de la simulación en estado transitorio	89
Figura 38. Diagrama general en simulink del programa completo	91
Figura 39. Diagrama de bloques global del modelo de la celda de combustible.....	92
Figura 40. Diagrama de balance de masas.....	93
Figura 41. Diagrama esquemático del volumen de control de una celda de combustible	94
Figura 42. Diagrama de balance de energía.....	95

Figura 43. Diagrama de transferencia de calor en simulink.....	96
Figura 44. Vehículo a hidrógeno mirai de toyota	98
Figura 45. Vista interior de los componentes del auto mirai de toyota.....	99
Figura 46. Configuración elegida del modelo, según el vehículo mirai de toyota	101
Figura 47. Comportamiento del modelo simulado: velocidad.....	103
Figura 48. Comportamiento del modelo simulado: aceleración	103
Figura 49. Comportamiento del motor: torque, corriente y velocidad angular	104
Figura 50. Panel de multigráficas con las especificaciones para el primer análisis comparativo	105
Figura 51. Comparación de potencia de la celda en tres valores temperatura de operación	105
Figura 52. Comparación de potencia de la celda con otros valores de temperatura de operación.	106
Figura 53. Curva característica y de potencia de la celda de combustible utilizada por nuestro modelo.....	108
Figura 54. Temperatura del stack en estado transitorio ($i=448.156$ a)	109
Figura 55. Esquema eléctrico del convertidor de voltaje boost en simulink.....	111
Figura 56. Comportamiento del convertidor dc/dc.....	113
Figura 57. Comportamiento de las fases del convertidor de voltaje de 4 fases	114
Figura 58. Gráficas de desempeño de velocidad y aceleración para la desaceleración por inercia del vehículo simulado	116
Figura 59. Gráficas de desempeño de velocidad y aceleración para la desaceleración por aplicación del torque de frenado del vehículo simulado.....	117
Figura 60. Gráficas de desempeño de velocidad y aceleración para la desaceleración por aplicación del freno y apagado del motor del vehículo simulado.....	117
Figura 61. Efecto de la corriente por el frenado regenerativo	118
Figura 62.gráfica de operación del stack de celdas y el ultracapacitor operando en combinación.	123
Figura 63. Comportamiento de voltaje del banco de ultracapacitores	124
Figura 64. Comportamiento operacional de la batería con frenado regenerativo	126

Figura 65. Estado de carga de la batería.....	127
Figura 66. Gráfica de velocidad máxima del vehículo para diferentes ángulos de inclinación del terreno	131
Figura 67. Gráfica del torque de arranque máximo del motor eléctrico para diferentes valores de ángulos de inclinación del terreno	132
Figura 68. Perfil del ángulo de inclinación del terreno	137
Figura 69. Resultados del comportamiento del vehículo con el angulo del terreno variable.....	138
Figura 70. Resultados del comportamiento del vehículo aplicando ciclos de aceleración y frenado	140
Figura 71. Estado de carga de la batería durante el frenado cíclico	141
Figura 72. Flujo másico de combustible y oxidante consumidos	142
Figura 73. Subsistema para el cálculo de la fuerza normal de la ruedas	219
Figura 74. Subsistema para modelamiento de la ruedas.....	220
Figura 75. Subsistema para el modelamiento de la caja de transmisión de los motores	220
Figura 76. Subsistema del modelamiento de un motor eléctrico dc	221
Figura 77. Subsistema del modelamiento de las fuerzas que actuan sobre el vehiculo	222
Figura 78. Subsistema para la modelación equivalente del convertidor de voltaje dc/dc tipo boost	223
Figura 79. Subsistema para modelación del ultracapacitor	224
Figura 80. Subsistema para la modelación de las baterías	225
Figura 81. Subsistema para el modelamiento de la unidad de control	226
Figura 82. Diagrama simulink para el cálculo del voltaje	227
Figura 83. Diagrama de efectos por concentración y temperatura.....	228
Figura 84. Diagrama de pérdidas de activación	228
Figura 85. Diagrama de pérdidas óhmicas.....	229
Figura 86. Diagrama de pérdidas de transporte	229

Figura 87. Variación de la densidad del hidrógeno con la presión a 20°C.....	230
Figura 88. Comparación de la densidad de energía por unidad de masa del hidrógeno con otras fuentes de energía	231
Figura 89. Comparación de la densidad de energía del hidrógeno por unidad de volumen con otras fuentes de energía	232
Figura 90. circulación del electrolito y suministro de hidrógeno y aire en una afc:	235
Figura 91. Celda de combustible de óxido sólido (sofc) tipo tubular	242
Figura 92. Baterías de zinc-aire.	247
Figura 93. Celda de combustible zinc-aire	247
Figura 94. Comparación entre una celda tipo sofc y una pcfc.	249
Figura 95. Esquema de una celda de combustible microbiana.....	251
Figura 96. Esquemas de los principales tipos de celdas de combustible.....	253

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Parámetros de la formula de pacejka de modelos equivalentes	27
Tabla 2. Modelos matemáticos según el tipo de batería	38
Tabla 3. Valores aproximados de algunos coeficientes de convección.....	61
Tabla 4. Valores obtenidos para la parametrización del motor requerido en el toyota mirai.....	101
Tabla 5. Resultados numéricos obtenidos de la simulación del modelo de vehículo	102
Tabla 6. Resultados de la potencia máxima alcanzada para el rango de temperaturas (65 - 75 °c)	107
Tabla 7. Resultados la simulación del stack del modelo en estado estable	109
Tabla 8. Resultados de simulación del stack en el punto de operación configurado	110
Tabla 9. Parámetros de simulación convertidor de voltaje boost.....	112
Tabla 10. Valores promedio medidos de la simulación del convertidor de voltaje	113
Tabla 11. características del ultracapacitor serie k2-2.85v/3400f de maxwell technologies.....	119
Tabla 12. Parámetros de baterías	125
Tabla 13. Desempeño del vehículo en variación del angulo de inclinación del terreno	130
Tabla 14. Resultados de las simulaciones con la variación de la condición del terreno	133
Tabla 15. Velocidad máxima del vehículo según las condición del terreno lograda en t=30 s	133
Tabla 16. Efectos de la velocidad del viento sobre la velocidad del vehículo.....	134
Tabla 17. Resultados de simulación para distintas configuraciones del vehículo	136
Tabla 18. Autonomía del vehículo en relación con la velocidad	143
Tabla 19. Propiedades termodinámicas de gas ideal del hidrógeno (h ₂)	233
Tabla 20. Lista de microbios utilizados en las celdas de combustible microbianas.....	252

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Parámetros del vehículo toyota mirai fcv.....	157
Anexo B. Parámetros utilizados en el modelamiento y la simulación	160
Anexo C. Manual de instalación.....	161
Anexo D. Manual de usuario del programa de simulacion sidvec	163
Anexo E. Manual científico.....	178
Anexo F. Deducciones matemáticas de la celda de combustible	203
Anexo G. Bloques de simulink de los subsistemas del programa	219
Anexo H. Propiedades del hidrógeno.....	230
Anexo I. Tipos de celdas de combustible	234

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS, MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE LA DINÁMICA LONGITUDINAL DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO CON CELDAS DE COMBUSTIBLE COMO FUENTE DE POTENCIA*

AUTOR: ELKIN YESID VALBUENA PÉREZ**

Palabras claves: celdas de combustible, Vehículo eléctrico, Simulación, modelamiento integral, Dinámica longitudinal, Matlab.

En el presente trabajo se desarrolló un programa de simulación del comportamiento de un vehículo eléctrico impulsado con celdas de combustible tipo membrana polimérica, nombrado como SIDVEC, creado en el entorno de programación de simulink del software de programación matemática Matlab, analizando conjuntamente la dinámica y el comportamiento de varios de los componentes que constituyen de manera operacional un vehículo eléctrico, tales como el motor eléctrico, convertidor de voltaje tipo boost, fuente de potencia secundaria como las baterías y los ultra capacitores, etc., basados en los modelos matemáticos encontrados en la literatura.

Para realizar su validación, solo de forma general, se recopiló los datos de un vehículo real, el modelo de vehículo eléctrico con celdas de combustible Mirai de la compañía automotriz Japonesa Toyota, caracterizando previamente la celda de combustible y realizando un análisis de comportamiento en relación con la variación de algunos de sus parámetros, como la temperatura y la presión de operación. Ingresando todos los valores de los parámetros requeridos, se realizó una simulación y se analizó desde varios puntos de vista operacionales, el desempeño del vehículo y de varios de sus componentes, realizando una comparación de los resultados obtenidos solo de forma general con algunos de los datos disponibles del modelo real.

*Proyecto de grado.

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánicas, Director: Ing. Jorge Luis Chacón Velasco.

ABSTRACT

TITLE: ANALISYS, MODELING AND SIMULATION OF THE LONGITUDINAL DYNAMIC OF THE A ELECTRIC VEHICLE WITH FUEL CELLS AS POWER SOURCE.*

AUTHOR: ELKIN YESID VALBUENA PEREZ**

Key words: Fuel cells, Electric vehicle, Simulation, Integral dynamic, Matlab.

In the present work was developed a simulating program of the behavior of an electric vehicle powered by fuel cells type polymeric membrane, named as SIDVEC, created in environment programming of Simulink of the mathematic programming software MATLAB, analyzing jointly the dynamics and behavior of the various components that constitute operational an electric vehicle, such as electric motor, voltage converter type boost, secondary power source as ultra-capacitors bank and batteries pack, etc., based on mathematical models found in the literature.

For perform its validation, only in general way, was collated the data of a real vehicle, the model fuel cell electric vehicle Mirai of Japanese automotive company Toyota, previously characterizing the fuel cell and performing an analysis of behavior in relation to the variation of some parameter, such as temperature and pressure operating. Entering all the values of the required parameters, was performed a simulation and was analyzed from various points of operational view, the vehicle performance and several of the it's components, making a comparison of the results obtained only in general way with some of the data available real model.

*Thesis

**Physical-Mechanical Engineer Faculty, Mechanical Engineer School, Director: Jorge Luis Chacón Velasco.

INTRODUCCIÓN

El deseo que motivo la realización de este proyecto, fue el de investigar sobre el extenso tema del desarrollo de tecnologías innovadoras que aprovecharán eficientemente la energía como lo son las celdas de combustible y sus aplicaciones en diversas áreas del requerimiento energético, como en este caso utilizada como fuente de potencia en vehículos eléctricos. El estudio y comprensión de los principios físicos, químicos y eléctricos que describen el funcionamiento operacional de esta tecnología aplicada al área automotriz, permitirá en un futuro solucionar varios de los problemas de transporte, medio ambientales y energéticos que actualmente tenemos que sobrellevar día a día, no solo nosotros como responsables directos del origen de estas dificultades, sino también de los demás seres vivos que dependen de la estabilidad de un medio ambiente apto para sobrevivir y con los cuales dependemos de manera directa o indirecta para la supervivencia de nuestra propia especie.

1 ANÁLISIS DE LA DINÁMICA LONGITUDINAL DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO

En este capítulo definiremos las ecuaciones que describen el comportamiento dinámico de un vehículo, solo tomando en cuenta las fuerzas longitudinales que actúan sobre este, para nuestro propósito de calcular el desempeño y los requerimientos de potencia de la celda de combustible que va a manejar el vehículo, el análisis se realizará siguiendo el modelo de *tracción de dos ruedas*. Las fuerzas laterales no serán tomadas en cuenta, dado que estas son requeridas para analizar la dinámica del vehículo cuando la trayectoria de este describe una curva, la mayor parte del tiempo del vehículo se maneja en línea recta y los períodos que actúan las fuerzas laterales son cortos e intermitentes (considerando un vehículo de pasajeros normal) además son innecesarias para nuestro propósito y por el mismo motivo tampoco se analizará por el modelo de tracción de cuatro ruedas. Para que el vehículo inicie su movimiento y continúe en este movimiento, requiere superar una serie de fuerzas que se resisten a su movimiento (Fuerzas resistivas aerodinámicas, resistivas por rodadura, por inclinación del camino, por inercia y otras fuerzas de fricción mecánicas). Nuestra simulación se basará en el comportamiento del vehículo en estado transitorio durante los períodos de aceleración y frenado.

1.1 MODELAMIENTO DINÁMICO DE LAS FUERZAS DE UN VEHÍCULO

A continuación se describirá el modelo matemático que representa el comportamiento de un vehículo. En la siguiente figura se muestra las fuerzas que interactúan con el vehículo cuando se mueve en dirección x [2,4]:

Dónde:

m : Masa del vehículo

V : Velocidad del vehículo

g : Fuerza gravitacional

α : Ángulo de inclinación del terreno

F_{aer} : Fuerza de resistencia de arrastre aerodinámico

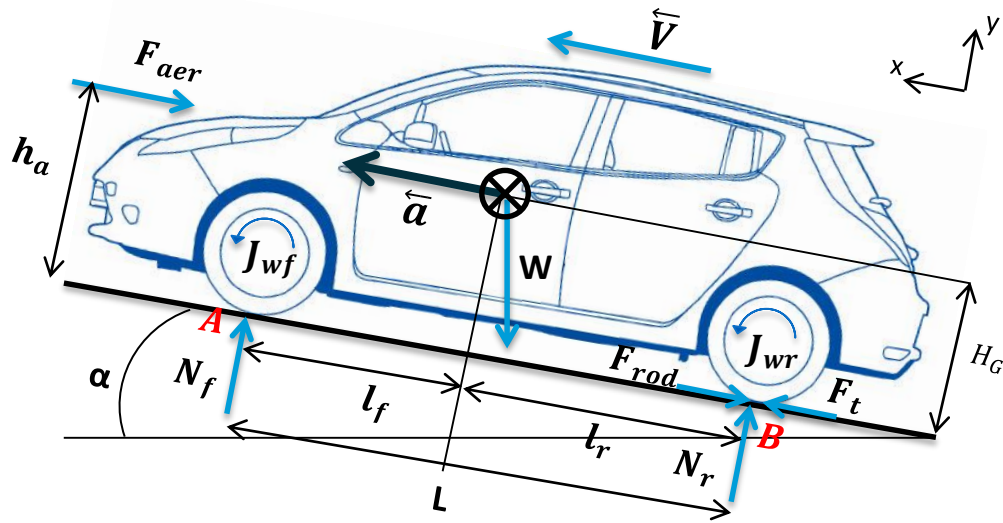
F_{rod} : Fuerza de resistencia por rodadura

F_t : Fuerza de tracción

N_r : Fuerza normal sobre una rueda trasera

N_f : Fuerza normal sobre una rueda delantera
 L : Distancia entre los ejes
 l_r : Distancia del centro de gravedad al eje trasero
 l_f : Distancia del centro de gravedad al eje delantero
 H_G : Altura del centro de gravedad
 h_a : Altura de la aplicación de la fuerza aerodinámica

Figura 1. Esquema de las Fuerzas que Actúan sobre un Vehículo



Fuente: http://www.motor.es/fotos-noticias/2013/03/nissan-leaf-lineas-generales-del-compacto-100-electrico-201313152_12.jpg (modificada)

La fuerza que permite al vehículo acelerar y desplazarse, es la fuerza de tracción (F_t) aplicada en el área de contacto entre las ruedas y el camino, aplicadas por el torque transmitido por el motor. Comúnmente en un vehículo el sistema de motor-propulsión, envía la potencia al eje trasero, haciendo que la fuerza de tracción se aplique solo en las ruedas traseras del automóvil. Para realizar un modelamiento del vehículo de forma más general, distribuiremos la potencia en los dos ejes, aplicando la fuerza de tracción en las cuatro ruedas, por tal motivo se agregan a nuestro modelo las siguientes fuerzas:

F_{tr} : Fuerza de tracción de las ruedas traseras
 F_{tf} : Fuerza de tracción de las ruedas delanteras

Realizando una sumatoria de fuerzas y de momentos encontraremos las ecuaciones de nuestro modelo.

Sumatoria de fuerzas en dirección x:

$$m_{tot} \frac{dV}{dt} = F_{tr} + F_{tf} - F_{aer} - F_{rod} - mg \sin \alpha \quad (1)$$

Sumatoria de momentos en el punto A:

$$m \frac{dV}{dt} H_G = n_r N_r L - F_{aer} h_a - mg \cos \alpha l_f - mg \sin \alpha H_G \quad (2)$$

Sumatoria de momentos en el punto B:

$$m \frac{dV}{dt} H_G = -n_f N_f L - F_{aer} h_a + mg \cos \alpha l_r - mg \sin \alpha H_G \quad (3)$$

Donde n_r y n_f representan el número de ruedas traseras y delanteras respectivamente. La fuerza de tracción depende de la fuerza normal que se ejerce sobre la rueda y por supuesto del coeficiente de deslizamiento " μ_d " (posteriormente se habrá más detalladamente del cálculo de esta variable), por lo tanto tenemos que:

$$F_{t_i} = \mu_{d_i} N_i \quad (4)$$

$$i = r, f$$

Se debe aclarar que la fuerza de tracción total es la sumatoria de las fuerzas de tracción ejercidas por cada rueda motriz. La potencia del vehículo puede ser calcula de la siguiente manera, la cual debe ser suministrada por el motor:

$$P_v = \sum F_t * V \quad (5)$$

1.1.1 Fuerzas resistivas aplicadas al vehículo. Como se mencionó antes existen varias fuerzas a considerar que impiden que el vehículo se mueva libremente, todas estas fuerzas son dependientes de la velocidad del vehículo a excepción de la componente de la fuerza gravitacional, producida por la inclinación de la superficie, a continuación se describirá las cuatro fuerzas resistivas que debe vencer el motor:

- Fuerza Inercial

- Fuerza por Arrastre Aerodinámico
- Fuerza Resistiva por Rodadura
- Fuerza por Inclinación del Terreno

1.1.1.1 Fuerza inercial. La fuerza inercial es la fuerza que se opone a cada cambio de estado de movimiento de un cuerpo, esta definición viene directamente de la segunda ley de Newton de la mecánica clásica. Es posible distinguir dos componentes de esta fuerza: [49]

2. Por Aceleración Lineal
3. Por Aceleración Rotacional

Tenemos que:

$$F_i = F_{AL} + F_{AR} \quad (6)$$

$$F_{AL} = ma = (m_v + m_{psj})a \quad (7)$$

$$F_{AR} = \frac{M_i}{r_w} \quad (8)$$

Dónde:

F_i : Fuerza Inercial

F_{AL} : Fuerza de Aceleración Lineal

F_{AR} : Fuerza de Aceleración Rotacional

La fuerza de aceleración lineal, es el producto de la masa total, que es la suma de la masa del vehículo (m_v) más de los pasajeros (m_{psj}), por la aceleración del vehículo. Por otro lado la fuerza de aceleración rotacional viene dada por el momento inercial (M_i), que podemos expresar de la siguiente forma:

$$M = J \frac{d\omega}{dt} = J\alpha = J \frac{a}{r} \quad (9)$$

Por lo tanto, podemos decir que:

$$F = J \frac{a}{r^2} \quad (10)$$

Considerando los momentos de inercias de las ruedas (J_w) y la del(os) motor(es) (J_m), además de una relación de transmisión de engranajes (G_R) del motor a la rueda, obtenemos la siguiente expresión:

$$F_i = \left(m_v + m_{psj} + \frac{4 * J_w + n_{mot} * J_m * G_R}{r_w^2} \right) * a \quad (11)$$

1.1.1.2 Fuerza resistiva por arrastre aerodinámico. A medida que el vehículo avanza, se ejerce una presión sobre la sección frontal, producida por el choque de las moléculas del aire, que a la vez son re-direccionadas cambiando así su flujo direccional, además se debe considerar el flujo de aire que se genera en la parte posterior del vehículo, si este es turbulento, crea una zona de baja presión que literalmente arrastra el vehículo en dirección contraria a su movimiento.

Para cuantificar que tan aerodinámico es un vehículo, se obtiene así una variable conocida como “coeficiente de arrastre”, que toma un valor entre 0 y 1, siendo 1 el valor de menor eficiencia y 0 el valor ideal de mayor eficiencia. La ecuación que describe la fuerza aerodinámica es la siguiente: [3]

$$F_{aer} = \frac{1}{2} \rho_{air} A_d C_d (V - V_v)^2 \quad (12)$$

Dónde:

ρ_{air} : Densidad del aire

A_d : Área efectiva de arrastre

C_d : Coeficiente de arrastre

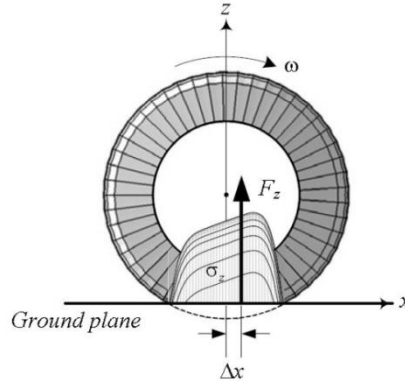
V_v : Velocidad del viento

Debemos considerar que el área efectiva de arrastre depende del diseño que maneje el vehículo, pero se puede aproximar como $A_d = S * d_z * d_y$, donde d_z y d_y , representan las dimensiones de la altura y el ancho del vehículo respectivamente y la variable S, se puede tomar el valor de 0.8.

1.1.1.3 Fuerzas Resistivas por Rodadura. Estas fuerzas son generadas debido la deformación que sufre el neumático al soportar la fuerza normal y transmitirla contra el suelo como consecuencia de los fenómenos de histéresis que

sufre el neumático al rodar y que se acrecientan cuanto mayor es el valor de la velocidad [3], como se representa en la figura 2.

Figura 2. Deformación de la Rueda Causante de la Resistencia por Rodadura



Fuente: http://www.carsimu.com/tire_picture2.png

El cálculo de la fuerza resistiva, la podemos expresar de la siguiente manera:

$$F_{rod} = mgC_r \cos \alpha \quad (13)$$

Donde C_r representa el coeficiente de rodadura, para el cálculo de esta variable se requiere de mediciones experimentales. Esta fuerza puede ser considerada como una fuerza horizontal aplicada en la periferia del neumático. [3]

Pero no podemos conformarnos con solo esta ecuación, debido a que el valor de esta fuerza sería constante durante todo el tiempo, incluso estando el vehículo estático $V = 0$, lo cual sería ilógico, produciría en nuestro modelo una aceleración siempre negativa al inicio de la simulación (en $t=0$), lo cual en la realidad no es posible, por lo tanto podemos adecuar la ecuación para que varíe en relación con la velocidad, utilizando el modelo de coeficiente de resistencia a la rodadura constante, que propone que este coeficiente tome una forma hiperbólica que elimina la discontinuidad cuando $V = 0$, la ecuación modificada toma la siguiente forma:

$$F_{rod} = mg \cos \alpha \left(C_r \tanh \left(\frac{4V}{V_{max}} \right) \right) \quad (14)$$

1.1.1.4 Fuerza gravitacional por inclinación de la superficie. La fuerza debida a la inclinación de la superficie, puede sugerir una fuerza a favor o en contra del movimiento, dependiendo si la inclinación es positiva o negativa, la cual podemos fácilmente describir como:

$$F_{gvd} = mg \sin \alpha \quad (15)$$

1.2 MODELAMIENTO DINÁMICO DE LAS RUEDAS

Las ruedas son un componente importante del vehículo, debido a que estas transmiten la potencia desde el sistema de propulsión al vehículo a través de la fuerza de contacto entre el suelo y el neumático. La fuerza de tracción depende de un coeficiente de deslizamiento. Debido a que se produce una diferencia relativa entre la velocidad del vehículo y la velocidad lineal producida por el giro de la rueda, dado que no existe una adherencia absoluta entre el neumático y el suelo. Por lo tanto podemos decir que el coeficiente de deslizamiento es dependiente de la relación de deslizamiento “ λ_d ” entre la rueda y el suelo.

$$F_t = \mu_d(\lambda_d)N \quad (16)$$

La relación de deslizamiento viene descrita por la siguiente ecuación:

$$\lambda_d = \frac{\omega_w r_w - V}{(\omega_w r_w; V)_{max}} \quad (17)$$

Dónde:

ω_w : Velocidad angular de la rueda

r_w : Radio de la rueda

$$\lambda_d = \frac{\omega_w r_w - V}{V} \quad (\text{aceleración}) \quad (18)$$

$$\lambda_d = \frac{\omega_w r_w - V}{\omega_w r_w} \quad (\text{frenado}) \quad (19)$$

1.2.1 Cálculo del coeficiente de deslizamiento. Ahora debemos relacionar la relación de deslizamiento con el coeficiente de deslizamiento. Existen muchas investigaciones relacionadas con este tema que han permitido obtener muchas correlaciones para el cálculo de esta variable, para nuestro modelo optaremos por tomar la “*Fórmula Mágica*” del modelo de neumáticos de Pacejka [46], descrita por el experto en dinámica de vehículos Hans Bastiaan Pacejka, que modela de manera muy completa el cálculo del coeficiente de deslizamiento, esta fórmula es la siguiente:

$$\mu_{d(\lambda)} = D \sin(C \tan^{-1}(\lambda_d - E(B\lambda_d - \tan^{-1}(B\lambda_d)))) \quad (20)$$

Donde las variables B, C, D y E, son las constantes de ajuste que dependen de la fuerza normal experimentada por la rueda y son identificadas como:

D: Valor Pico o máximo

C: Factor de forma

B: Factor de rigidez

E: Factor de curvatura

El cálculo de estas variables está afuera del análisis de este proyecto, por lo tanto tomaremos unos valores de referencia de acuerdo a unas mediciones de experimentales dependiendo del tipo y condición del terreno como se muestra en la tabla 1:

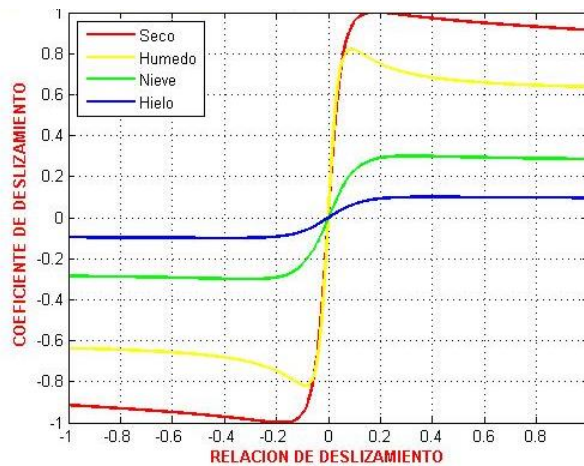
Tabla 1. Parámetros de la Formula de Pacejka de Modelos Equivalentes

Superficie	Constantes de Ajuste de Pacejka			
	D	C	B	E
Suelo Seco	1	1.9	10	0.97
Suelo Húmedo	0.82	2.3	12	1
Suelo con Nieve	0.3	2	5	1
Suelo con Hielo	0.1	2	4	1

Fuente: [47]

En la siguiente gráfica apreciamos el comportamiento del coeficiente de deslizamiento en relación con la relación de deslizamiento de la rueda dependiendo de las condiciones de la superficie.

Figura 3. Gráfica del Comportamiento del Coeficiente de Deslizamiento en Función de la Relación de Deslizamiento a Diferentes Condiciones de la Superficie



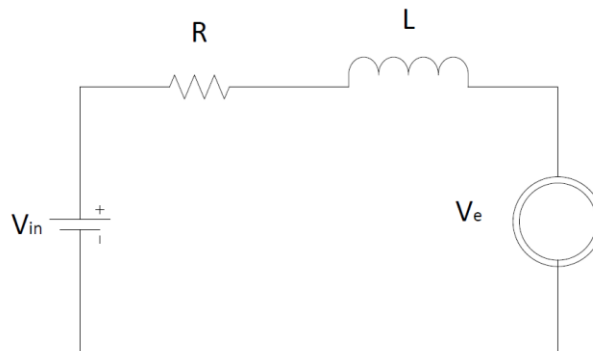
Fuente: El Autor

1.3 MODELAMIENTO DINÁMICO DE UN MOTOR ELÉCTRICO DC

Analizando la dinámica del motor eléctrico que genera el torque para impulsar el vehículo, generando una velocidad de rotación, se debe aplicar al motor un voltaje de corriente directa (DC), que se traduce en una rotación del eje del motor y torque.

1.3.1 Análisis Eléctrico del Motor. En la siguiente imagen se muestra de manera simplificada el circuito eléctrico de un motor eléctrico.

Figura 4. Esquema Eléctrico de un Motor Eléctrico DC



Fuente: El Autor

Aplicando el teorema de voltaje de Kirchhoff al circuito del motor eléctrico obtenemos que:

$$V_{in} = V_e + V_R + V_L \quad (21)$$

Dónde:

V_{in} : Voltaje suministrado al motor

V_e : Voltaje de la fuerza contra-electromotriz

V_R : Voltaje de la resistencia

V_L : Voltaje de la bobina

Sabemos que los voltajes de la resistencia y de la bobina los podemos representar como:

$$V_R = iR \quad y \quad V_L = L \frac{di}{dt} \quad (22)$$

Donde i , R y L son respectivamente la corriente suministrada, la resistencia y la inductancia. El voltaje de la fuerza contra-electromotriz es el que produce el torque y la velocidad angular del motor, el cual puede ser calculado de la siguiente manera:

$$V_e = k_v \omega_m \quad (23)$$

Dónde:

k_v : Constante de la fuerza electromotriz

ω_m : Velocidad angular del eje motor

La ecuación final es la siguiente:

$$V_{in} = k_v \omega_m + iR + L \frac{di}{dt} \quad (24)$$

1.3.2 Análisis Mecánico del Motor. La función de un motor eléctrico es convertir la energía eléctrica en energía mecánica o de movimiento, el flujo de corriente crea una fuerza en el rotor la cual puede ser descrita al realizar una sumatoria de torques en el motor, como se describe en la figura 5.

$$T_e = T_J + T_B + T_C \quad (25)$$

Dónde:

T_e : Torque electromotriz

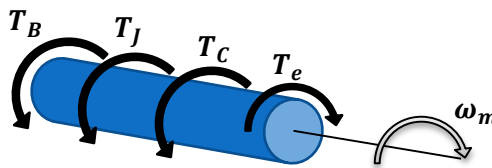
T_J : Torque por inercia

T_B : Torque de amortiguamiento o de viscosidad

T_C : Torque de generado por la carga

Figura 5. Esquema de Torques Aplicados sobre el Eje del Motor

Fuente: El Autor



Estos torques puede ser definidos de la siguiente manera:

$$T_J = J_m \frac{d\omega_m}{dt} ; T_B = B_v \omega_m \quad (26)$$

Donde J_m y B_v , representan la inercia del motor y el coeficiente de fricción viscosa respectivamente. El torque producido por el campo electromagnético del motor, es calculado de la siguiente manera:

$$T_e = k_t i \quad (27)$$

Donde k_t es la constante de torque del motor

Entonces, obtenemos la siguiente ecuación:

$$k_t i = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B_v \omega_m + T_C \quad (28)$$

1.3.3 Análisis de la Transmisión de Engranajes. En los vehículos de motor de combustión se utiliza una caja de transmisión que permite modificar la velocidad y el torque que se transmite a las ruedas motrices, mediante una combinación de relaciones por engranajes. En el caso de los vehículos eléctricos, la modificación de la velocidad se realiza mediante la variación de la corriente y del voltaje, pero existen límites y en varios modelos de vehículos solo existen una o dos relaciones de transmisión.

Realizando un análisis de conservación de energía y sin considerar pérdidas, podemos decir que:

$$P_{entrada} = P_{salida}$$

La potencia P , es el producto del torque por la velocidad angular.

$$P = T_{ent}\omega_{ent} = T_{sal}\omega_{sal}$$

$$T_m\omega_m = T_r\omega_r \quad (29)$$

Donde T_w y ω_w son respectivamente el torque y la velocidad angular de la rueda. La relación de engranajes (G_R) utilizada se describe de la siguiente manera:

$$G_R = \frac{T_w}{T_m} = \frac{\omega_m}{\omega_w} \quad (30)$$

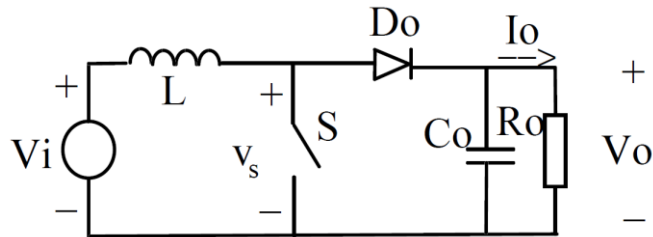
El torque requerido por la rueda, es calculado teniendo en cuenta la fuerza de tracción de la rueda y su radio.

$$T_w = F_t r_w \quad (31)$$

1.3.4 Análisis de un Convertidor de Voltaje DC/DC Tipo Boost. El voltaje requerido por los motores es en la mayoría de los casos muy alto, por lo tanto requiere de una fuente de energía que puede suplir esa necesidad, por lo tanto se integra dentro de los vehículos un sistema electrónico capaz de regular el voltaje de la fuente hacia los motores, disminuyendo así la necesidad de instalar más baterías o celdas, estos dispositivos son conocidos como convertidores de voltaje. [48]

Se distinguen dos estados de operación cuando el interruptor S , se cierra (estado On) y cuando este se abre (estado Off). (ver figuras 6,7 y 8)

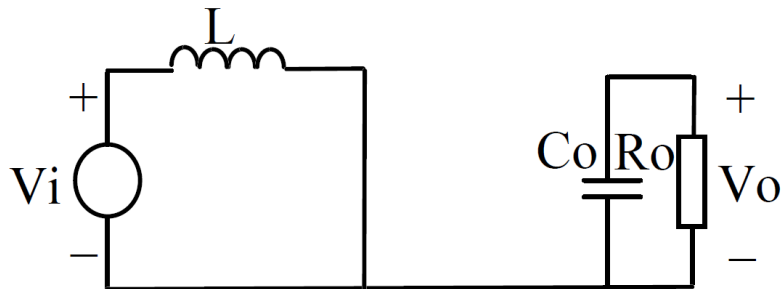
Figura 6. Esquema de un Convertidor de Voltaje Boost DC-DC



Fuente: [48]

1.3.4.1 Estado ON. Cuando el interruptor se encuentra cerrado, la bobina (L) almacena energía de la fuente (V_i) y mientras tanto, el condensador (C) alimenta a la carga. Se considera que el condensador es lo suficientemente grande para considerar constante el voltaje de salida (V_o). Se muestra en la siguiente figura el circuito equivalente en el estado On.

Figura 7. Esquema Convertidor Boost en Estado ON



Fuente: [48]

En estado On la corriente que circula por la bobina crea un campo electromagnético, que a la vez crea una contracorriente, en este caso hay que evitar que las corrientes se anulen por completo. Analizando el circuito por las leyes de Kirchhoff, obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$V_{ent} = L \frac{dI_L}{dt}; \quad \frac{dV_o}{dt} = \frac{I_C}{C} \quad (32)$$

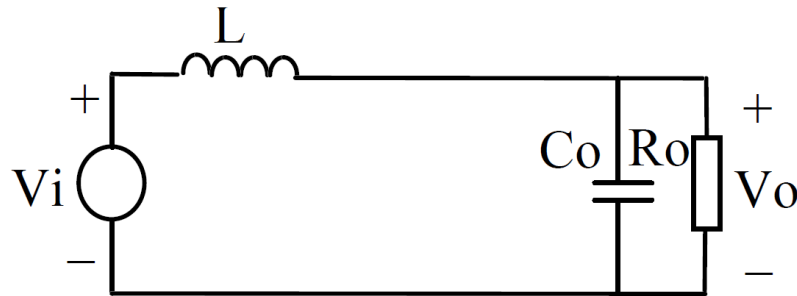
Considerando T como el periodo de tiempo completo de un ciclo, y D el tiempo del ciclo de trabajo (*Duty cycle en inglés*) que permanece en estado On en el

periodo T , podemos calcular las corrientes que pasa por la bobina y el condensador.

$$I_{L_{on}} = \int_0^{DT} \frac{V_i}{L} dt = \frac{V_i DT}{L}; \quad I_{C_{on}} = C \frac{dV_o}{dt} = I_o \quad (33)$$

1.3.4.2 Estado OFF. Cuando el interruptor se abre, la corriente fluye a través del diodo, recargando el condensador y alimentando la carga y así la energía almacenada en la bobina es entregada a la carga.

Figura 8. Esquema Convertidor Boost en Estado OFF



Fuente: [48]

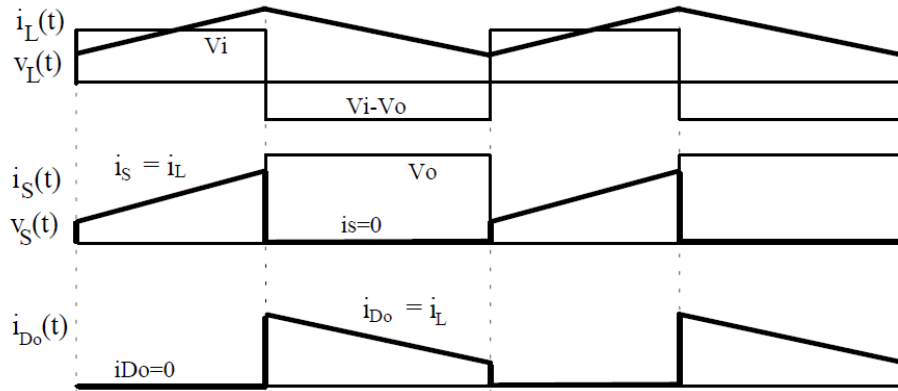
En el estado Off, la corriente fluye por el diodo, considerando este como ideal, no habrá pérdidas de voltaje y podemos analizar el circuito y obtener de igual manera las ecuaciones que describen el circuito en este estado.

$$V_i - V_o = \frac{dI_L}{dt}; \quad \frac{dV_o}{dt} = \frac{I_L - I_o}{C} \quad (34)$$

$$I_{L_{off}} = \int_{DT}^T \frac{V_i - V_o}{L} dt = \frac{(V_i - V_o)(1 - D)T}{L}; \quad I_o = I_L - C \frac{dV_o}{dt} \quad (35)$$

Las Voltajes y corrientes creados en el circuito adquieren formas de onda triangulares, como las mostradas en la figura 9, que aumentan y disminuyen durante un ciclo, como se puede apreciar en la siguiente imagen.

Figura 9. Formas de Onda del Convertidor Boost



Fuente: [48]

Considerando que el circuito se encuentra en estado estable, se puede suponer que la energía en todos sus componentes debe ser igual al principio y final de cada ciclo, en específico la energía que almacena y entrega la bobina, por lo tanto la corriente al principio y al final del ciclo que pasa por la bobina debe ser igual, tal y como se expresa en las siguientes ecuaciones:

$$E_{L_{on}} = E_{L_{off}}$$

$$\frac{1}{2}LI_{L_{on}}^2 = \frac{1}{2}LI_{L_{off}}^2 \quad (36)$$

$$I_{L_{on}} = I_{L_{off}}$$

$$\frac{V_i DT}{L} = -\frac{(V_i - V_o)(1 - D)T}{L}$$

Entonces obtenemos que:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - D} \quad (37)$$

1.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS ULTRACAPACITORES

Un Ultracapacitor o también conocido como Supercapacitor, es un dispositivo de almacenamiento de energía electroquímica caracterizado por una densidad de potencia más alta que las baterías convencionales y una densidad de energía más

alta que los capacitores convencionales. Debido a sus características, los ultracapacitores son capaces de soportar cambios rápidos en el nivel de energía almacenada. [49][50]

1.4.1 Análisis Matemático de un Ultracapacitor. El modelamiento de un Ultracapacitor ideal es muy difícil de realizar, tal y como lo muestra la siguiente imagen. Por lo tanto debemos realizar un circuito equivalente que nos facilite nuestra labor, el modelo que mejor representa el comportamiento de este dispositivo es el modelo RSE-RPE, este está compuesto de una resistencia en serie equivalente (RSE), conectada en serie en un arreglo en paralelo entre un capacitor (C) y una resistencia en paralela equivalente (RPE). La RSE, representa las resistencias internas, C es la capacidad de almacenamiento de la carga y la RPE es usada para representar las pérdidas de carga, que tienen un efecto en el desempeño del ultracapacitor.

Analizando el circuito con el teorema de voltajes de Kirchhoff, podemos obtener la ecuación que define el comportamiento del dispositivo.

$$V_{Ucap} = V_C - I_{Ucap}RSE \quad (38)$$

En esta ecuación el voltaje del capacitor equivalente (V_C), representa el voltaje de circuito abierto. Analizando el circuito por el teorema de corrientes de Kirchhoff y considerando el estado del Ultracapacitor en descarga.

$$I_{Ucap} = I_C - I_L \quad (39)$$

Las corrientes del capacitor (I_C) y de pérdida (I_L), puede ser definidas respectivamente de la siguiente manera:

$$I_C = -C \frac{dV_C}{dt} ; I_L = \frac{V_C}{RPE} \quad (40)$$

Por lo tanto reemplazando y despejando:

$$\frac{dV_C}{dt} = -\frac{1}{C} (I_{Ucap} + \frac{V_C}{RPE}) \quad (41)$$

Integrando la ecuación, pero sin resolver:

$$V_C = V_C^0 - \frac{1}{C} \int (I_{Ucap} + \frac{V_C}{RPE}) dt \quad (42)$$

Reemplazando en la ecuación general, obtenemos la ecuación que define el comportamiento de un Ultracapacitor (ver esquema en la sección 6.2.1.7):

$$V_{Ucap} = V_C^0 - \frac{1}{C} \int (I_{Ucap} + \frac{V_C}{RPE}) dt - I_{Ucap} RSE \quad (43)$$

Dónde:

V_{Ucap} : Voltaje del Ultracapacitor

V_C^0 : Voltaje inicial del Ultracapacitor

I_{Ucap} : Corriente del Ultracapacitor

I_L : Corriente de pérdida por la RPE

I_C : Corriente del capacitor

C : Valor de la Capacitancia equivalente

Los sistemas con ultracapacitores por lo general trabajan con un conjunto de estos conectados entre sí llamado banco de ultracapacitores. El tamaño del banco se define como el producto del ultracapacitores conectados en serie (n_s) por los el número de conectados en paralelo (n_p), los valores de las resistencias y de la capacitancia se modifican dependiendo del número de conexiones y de cómo estén conectados estos dispositivos.

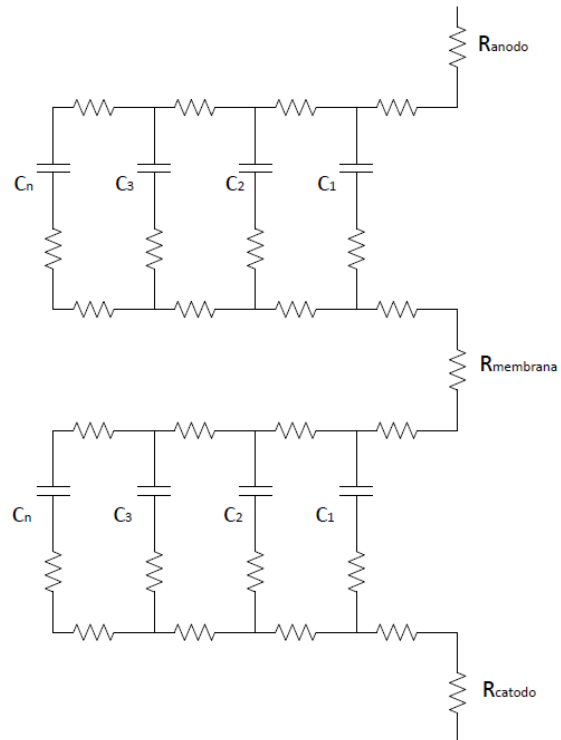
$$RSE_{Ucap} = \frac{n_s}{n_p} RSE ; RPE_{Ucap} = \frac{n_s}{n_p} RPE ; C_{Ucap} = \frac{n_p}{n_s} C \quad (44)$$

El voltaje total del capacitor se define como:

$$V_{Ucap_{tot}} = n_s V_{Ucap} \quad (45)$$

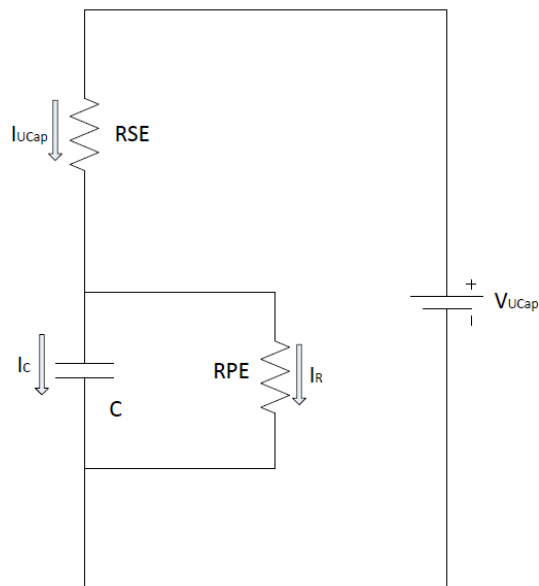
Existen diversos circuitos para representar un banco de ultracapacitores como el mostrado en la figura 10, pero su complejidad hace difícil su modelamiento, por lo tanto se escogió el modelo equivalente mostrado en la figura 11.

Figura 10. Circuito Equivalente de un Ultracapacitor Ideal



Fuente: El Autor

Figura 11. Circuito Equivalente del Modelo RSE-RPE para un Ultracapacitor



Fuente: El Autor

1.5 MODELO MATEMÁTICO DE LAS BATERÍAS

Existen diversos modelos matemáticos que intentan simular el comportamiento dinámico de una batería, tales modelos van desde simples circuitos equivalentes de resistencias y condensadores en serie, hasta modelos más precisos que se asemejan a los descritos por la celda de combustible utilizados en este proyecto. Para nuestro modelo de Baterías, se optó por los modelos descritos a continuación en la tabla 2, en la cual se detalla las ecuaciones de cuatro tipos de baterías (NiCd, NiHM, Lead-Acid y Li-ion) tanto en la fase de carga como en descarga, de forma clara y lo suficientemente básica para nuestro análisis, las ecuaciones son modificaciones de la ecuación de Shepherd [51]:

Tabla 2. Modelos Matemáticos Según el tipo de Batería

Tipo de Batería	Carga	Descarga
Lead-Acid	$V_{bat} = V_{OC} - i_{(t)}R - K \left(\frac{Q}{Q-it} \right) it -$ $K \left(\frac{Q}{it-0.1Q} \right) i_{(t)} + V_{exp}$	$V_{bat} = V_{OC} - i_{(t)}R -$ $K \left(\frac{Q}{Q-it} \right) (it + i_{(t)}) + V_{exp}$
NiCd / NiMH	$V_{bat} = V_{OC} - i_{(t)}R - K \left(\frac{Q}{Q-it} \right) it -$ $K \left(\frac{Q}{ it -0.1Q} \right) i_{(t)} + V_{exp}$	$V_{bat} = V_{OC} - i_{(t)} * R -$ $K \left(\frac{Q}{Q-it} \right) (it + i_{(t)}) + V_{exp}$
Li-ion	$V_{bat} = V_{OC} - i_{(t)}R - K \left(\frac{Q}{Q-it} \right) it -$ $K \left(\frac{Q}{it-0.1Q} \right) i_{(t)} + Aexp(-Bit)$	$V_{bat} = V_{OC} - i_{(t)}R -$ $K \left(\frac{Q}{Q-it} \right) (it + i_{(t)}) + Aexp(-Bit)$

Fuente: [51] modificada

Dónde:

V_{bat} : Voltaje de la Batería (V)

V_{OC} : Voltaje a circuito abierto (V)

R : Resistencia interna de la batería (Ω)

K : Constante de Polarización (V/Ah) o Resistencia de Polarización (Ω)

Q : Capacidad máxima de la batería (Ah)

it : Carga actual de la batería [$it = \int idt$] (Ah)

$i_{(t)}$: Corriente de la batería (A)

V_{exp} : Voltaje exponencial

A: Amplitud de la zona exponencial (V)

B: Constante inversa de tiempo de la zona exponencial (Ah)⁻¹

Como podemos ver en la tabla anterior las ecuaciones que describen los tipos de baterías son similares a excepción de unos o más términos. El término del voltaje exponencial se puede escribir como:

$$\dot{V}_{exp} = B * |it| * (-V_{exp} + A * u) \quad (46)$$

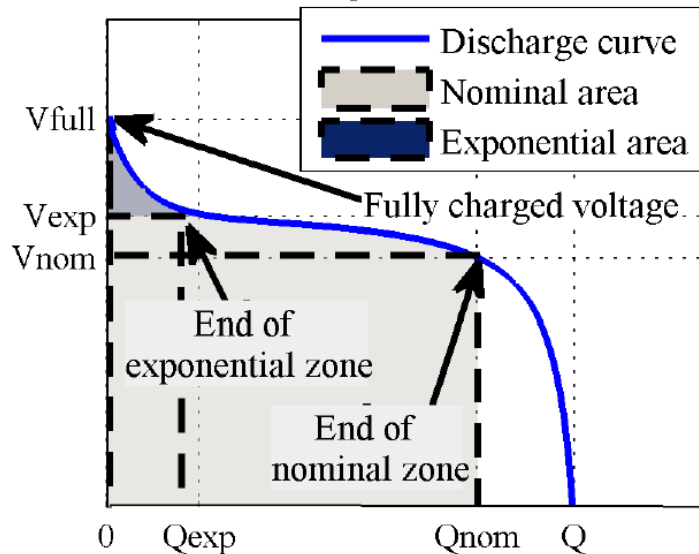
Dónde:

\dot{V}_{exp} : Derivada del voltaje exponencial

u: Modo de carga (u=1) / descarga (u=0)

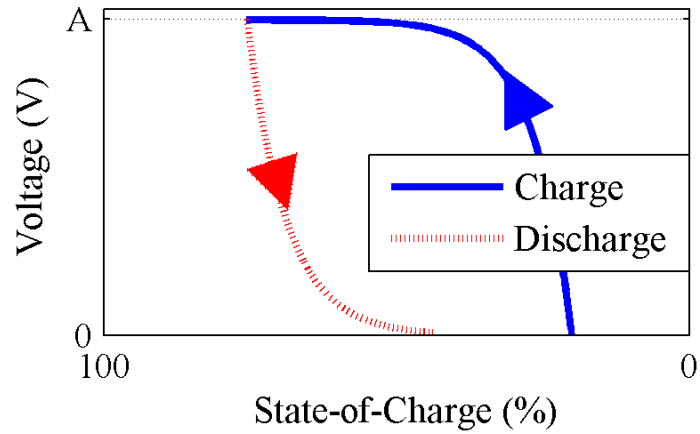
Se debe tener en cuenta que el voltaje exponencial depende de un valor inicial $V_{exp(t=0)}$. El significado físico del término del voltaje exponencial se produce en las baterías Lead-Acid, NiCd y NiMH, debido a que el comportamiento durante la carga es diferente en la descarga, es producido por el fenómeno de histéresis, [51][52], como se aprecia en la figura 12 y 13.

Figura 12. Curva Característica de Descarga de una Batería



Fuente: [52]

Figura 13. Fenómeno de Histéresis en una Batería



Fuente: [52]

El voltaje a circuito abierto (V_{OC}), está dado en función del estado de carga (SOC), la cual puede definirse como la capacidad remanente de una batería y es afectada por las condiciones de operación tales como la corriente de carga y temperatura [53]:

$$SOC_{(t)} = \frac{Q_0 - it}{Q} = \frac{Q_0 - \int i_{(t)} dt}{Q} = -\frac{\int i_{(t)} dt}{Q} \quad (47)$$

Dónde:

$SOC_{(t)}$: Estado de carga

SOC_0 : Estado de carga inicial

Q : Carga Máxima de la batería

Q_0 : Carga inicial de la batería

it : Carga actual de la batería

2 PRINCIPIOS TÉRMICOS Y ELÉCTRICOS DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM

2.1 PRINCIPIOS TERMODINÁMICOS DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE

Una celda de combustible tipo PEM transforma la energía contenida en el interior de un combustible directamente en electricidad. La energía intrínseca total de un combustible (o de cualquier otra sustancia), se puede cuantificar mediante una propiedad conocida con el nombre de Energía Interna (U). Dicha energía está asociada a los movimientos e interacciones de las partículas de un compuesto, a escala molecular. Como se verá en las siguientes secciones, para una Pila de Membrana de Intercambio de Protones, solo una porción de la energía interna contenida en el hidrógeno puede ser convertida en electricidad. Los límites sobre estas conversiones de energía, quedan establecidos por la Primera y la Segunda Ley de la Termodinámica. [21]

2.1.1 Primera Ley de la Termodinámica. La Primera Ley de la Termodinámica conocida también como el principio de la conservación de la energía, que establece que la energía no se puede crear ni destruir durante un proceso, solo puede cambiar de forma. De acuerdo a lo anterior se puede establecer lo que se conoce como Balance de Energía, en la que se puede expresar la primera ley como: el cambio neto (incremento o disminución) en la energía total del sistema durante un proceso es igual a la diferencia de energía total que entra y la energía total que sale del sistema durante el proceso [21] [39]. El balance de energía se expresa como:

$$Energía_{sistema} = Energía_{entra} - Energía_{sale}$$

La energía en forma de calor o de trabajo pasa a través de los límites del sistema y afecta a la energía total del sistema. Para un volumen de control fijo en condiciones de equilibrio de flujo, representado en la siguiente figura, la primera ley se escribe con el cambio de entalpía como: [17]

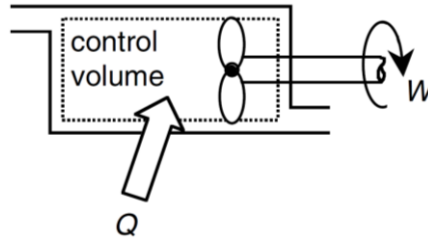
$$dH = dU + d(PV) = \partial Q - \partial W \quad (48)$$

Dónde:

Q : Calor que entra al sistema.

W : Trabajo que sale del sistema

Figura 14. Representación de un volumen de control



Fuente: [17]

2.1.2 Segunda Ley de la Termodinámica. La segunda ley de la termodinámica complementa el análisis termodinámico de un sistema, al establecer que en los procesos de transferencia de energía, no solo existe conservación de la energía, sino que además los procesos ocurren en una dirección y no en la otra. Un proceso no puede ocurrir al menos que se satisfaga tanto la primera como la segunda ley de Termodinámica. [39]

En la segunda ley de la termodinámica se introduce el concepto de **Entropía**, que hace referencia a una propiedad extensiva para cuantificar los efectos de la segunda ley, esta se podría definir como la magnitud de la porción de la energía interna que no puede utilizarse para realizar un trabajo, o también como el grado de desorden que poseen las moléculas que integran un cuerpo [21]; es decir que cuando la energía se transforma de un tipo a otro de energía para realizar un trabajo, no toda la energía es convertida satisfactoriamente, parte de ella se pierde (se transforma en otro tipo de energía que no puede ser aprovechado) debido a las irreversibilidades del sistema después de finalizar el proceso.

El físico alemán R. J. E. Clausius, definió la entropía como: [39]

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad (49)$$

Dónde:

S: entropía

Q: Calor transferido

T: Temperatura del sistema

2.1.3 Termodinámica Química. Las reacciones químicas proceden en la dirección que minimiza la energía de Gibbs. El cambio en la energía de Gibbs es negativo ya que la reacción se aproxima al equilibrio, y en el equilibrio químico el cambio en la energía de Gibbs es cero. El trabajo máximo que una celda electroquímica puede llevar a cabo es igual al cambio en la energía de Gibbs cuando los reactivos pasan a los productos. Este trabajo se realiza por el movimiento de la carga eléctrica a través de un voltaje, y en el equilibrio el voltaje se relaciona con el cambio en la energía de Gibbs,

$$W_{el,max} = -\Delta G \quad (50)$$

La ecuación de Nernst se basa en el cambio de energía de Gibbs. La energía de Gibbs se puede definir como (deducción matemática ver Anexo F):

$$dG = \partial Q - \partial W + PdV + VdP - TdS - SdT \quad (51)$$

2.1.4 Potencial Eléctrico de una Celda de Combustible

A partir de la ecuación general de la energía de Gibbs y considerando el sistema a volumen y temperatura constante ($dV = 0$ y $dT = 0$), obtenemos:

$$dG = dH - TdS \quad (52)$$

El cambio de entalpía de una sustancia puede ser calculada de la siguiente manera:

$$\Delta H = n * (\bar{h}_f^\circ + \Delta \bar{h}) \quad (53)$$

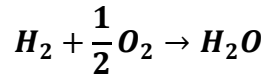
Dónde:

n : numero de moles

\bar{h}_f° : Entalpía molar de formación en el estado de referencia estándar ($T^\circ=25^\circ\text{C}$ y $P^\circ=1\text{atm}$)

$\Delta \bar{h}$: Entalpía molar sensible a la temperatura T

Considerando la reacción química:



El voltaje máximo que puede suministrar una celda de combustible es $E^\circ = 1.23 [V]$, pero considerando el sistema ideal, es decir sin tomar en cuenta las irreversibilidades del sistema ($\Delta S = 0$), se podría obtener el siguiente voltaje:

$$E^\circ_{ideal} = 1.482 [V] \quad (54)$$

Para mayor interés de la obtención de estos valores, ver Anexo H.

2.1.5 Influencia de la Presión y la Temperatura. Recordando la ecuación general (51), para un proceso reversible y a volumen y temperatura constante, además de Considerar los gases de hidrógeno y oxígeno como gases ideales entonces obtenemos la expresión para calcular el voltaje de la celda de combustible a condiciones no estándar.

$$E = E^\circ + \frac{RT}{n * F} * \ln \left(\frac{P_{H2} * P_{O2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H2O} * P^{\circ \frac{1}{2}}} \right) \quad (55)$$

2.1.6 Eficiencias de las Celdas de Combustible. Existen varias eficiencias que nos permiten analizar el desempeño de la celda de combustible.

Eficiencia máxima:

$$\eta_{max} = \frac{W_{el,max}}{\Delta H} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{\Delta H - T\Delta S}{\Delta H} = 1 - \frac{T\Delta S}{\Delta H} \quad (56)$$

Eficiencia Termodinámica:

$$\eta_{term} = \frac{W_{el}}{\Delta H} = \frac{nFE}{\Delta H} \quad (90)$$

Eficiencia Total:

$$\eta_{Total} = \frac{E}{E_{ideal}} = \frac{E}{1.482} \quad (57)$$

Eficiencia Máxima Teórica:

$$\eta_{max.teo} = \frac{E^{\circ}}{E_{ideal}} = \frac{1.23}{1.482} = 0.83 \quad (58)$$

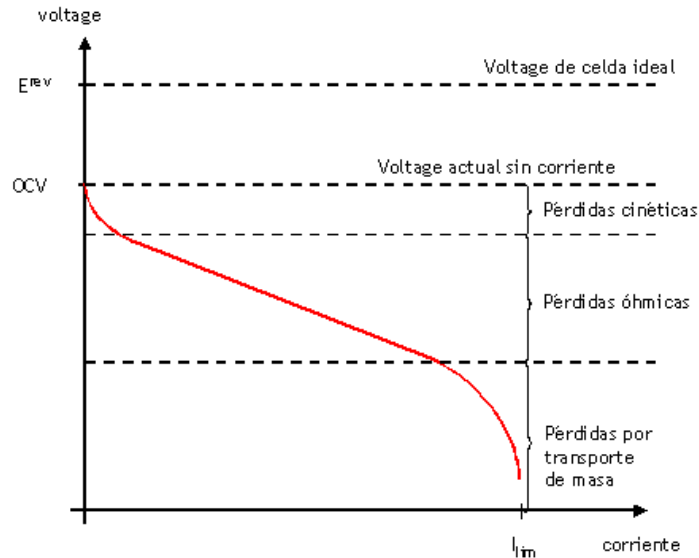
Esto nos indica que la máxima eficiencia que se puede obtener en una celda de combustible en las mejores condiciones, sería del 83%.

2.2 PRINCIPIOS ELÉCTRICOS DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE

La figura 15 se muestra el comportamiento típico de una celda de combustible, a cierta presión y temperatura. Lo que podemos analizar de la gráfica son varios aspectos, uno es que el voltaje producido por la celda de combustible es menor, incluso a circuito abierto, al voltaje teórico (1.23 V). La curva de desempeño se divide en tres zonas, en las cuales en cada una el voltaje es afectado por pérdidas internas producto de los fenómenos físicos y químicos inherentes a las celdas. A continuación se explicara con detalle cada uno de estos fenómenos.

2.2.1 Pérdidas Cinéticas o de Activación. El voltaje a circuito abierto (OCV) es menor que la ideal, y se produce además una caída brusca de la tensión en cuanto empieza a suministrarse corriente. Este comportamiento es típico de las celdas de baja temperatura, siendo este descenso mucho menos pronunciado en las celdas de alta temperatura. Las pérdidas cinéticas, junto con un fenómeno conocido como pérdidas por crossover produce esta rápida caída de tensión al comienzo de su funcionamiento. La curva característica de una celda de combustible es mostrada a continuación.

Figura 15. Curva Característica de una Celda de Combustible



Fuente: http://www.fuelcell.no/fc_losses_es.gif

2.2.1.1 Cinética Electroquímica. Toda reacción electroquímica implica transferencia de carga (electrones), entre un electrodo y una especie química; de hecho, este es el fenómeno que diferencia las reacciones electroquímicas de las reacciones químicas ordinarias, ya que en éstas últimas se produce transferencia de carga directamente entre dos especies químicas, sin liberación de electrones. [21]

Debido a que los electrones se generan o se consumen dentro de una reacción electroquímica, la corriente que se genera viene a ser una medida directa de la velocidad a la que se produce dicha reacción. Está determinada, además, por una barrera energética que la carga debe superar en su movimiento entre el electrodo y el electrolito.

A través de una deducción matemática (la cual no es de completo interés de este proyecto), podemos encontrar la ecuación de Butler-Volmer [21]:

$$i = i_0 * \left(\underbrace{\exp\left(\frac{-n_e \beta F * \eta_{sp}}{RT}\right)}_{\text{Corriente Directa}} - \underbrace{\exp\left(\frac{-n_e (1 - \beta) F * \eta_{sp}}{RT}\right)}_{\text{Corriente Inversa}} \right) \quad (59)$$

La ecuación anterior está considerada como la piedra angular de la cinética electroquímica y, básicamente, establece que la corriente eléctrica producida en una reacción electroquímica aumenta exponencialmente con la tensión de activación.

Dónde:

i_0 : Densidad de corriente de intercambio, que representa la máxima cantidad de corriente que se puede extraer de la celda sin apreciar caída de tensión. Físicamente coincide con la corriente que se establece una vez que se alcanza el equilibrio químico. [21]

β : Factor de simetría, este factor de simetría es apropiado para reacciones simples en las que interviene un solo electrón ($n=1$), y su valor teórico oscila entre 0 y 1, aunque para las reacciones en superficies metálicas suele tomar el valor de 0.5

η_{sp} : Factor conocido como *sobrepotencial*, que es la diferencia entre el voltaje del electrodo y el voltaje reversible, este término es el responsable de la generación de electricidad.

$$\eta_{sp} = E^\circ - E_{cell} \quad (60)$$

Ahora considerando que el sobrepotencial representa el valor de las pérdidas de voltaje y despreciando el término de la corriente inversa, por ser muy pequeña en comparación con la directa, tenemos que:

$$i = i_0 * \left(\exp\left(\frac{-n\beta F * \eta_{sp}}{RT}\right) \right) \quad (61)$$

$$\eta_{sp} = \Delta V_{kinet} = \frac{RT}{n\beta F} * \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (62)$$

2.2.1.2 Pérdidas por Efecto Crossover. Ahora debemos considerar el fenómeno de crossover o de cruce de material. Aunque la membrana polimérica, de una celda PEM, que actúa como electrolito no es conductora de la electricidad, y es prácticamente impermeable a los gases reactantes, siempre ocurre que cierta cantidad de hidrógeno atraviesa el Nafion hasta llegar al cátodo de la celda; del mismo modo, los electrones también pueden desplazarse a través de la membrana polimérica. [21]

Por lo tanto, y dado que cada molécula de hidrógeno contiene dos electrones, cada molécula de hidrógeno que atraviesa el electrolito y que reacciona con el oxígeno en el cátodo, supone dos electrones menos en la generación de corriente eléctrica que atraviesa el circuito externo.

La pérdida de electrones se puede considerar insignificante, pero solo cuando la demanda de potencia es considerable, es decir cuando la demanda de combustible es mucho mayor, al flujo que se pierde al atravesar la membrana polimérica. Pero cuando la demanda de corriente es muy pequeña o cuando el circuito está abierto estas pérdidas se vuelven considerables.

Por lo tanto la corriente neta producida en una celda de combustible es la suma de la corriente que demanda el sistema y la corriente que pierde por el cruce de los gases.

$$i_T = i + i_{cross} \quad (63)$$

Cabe anotar que el cruce de los gases, no solo hace referencia al hidrógeno, sino también al oxígeno, pero en la mayoría de los casos solo se considera el cruce del gas hidrógeno, debido a que el tamaño de la molécula es mucho más pequeño que la del oxígeno y por lo tanto es más probable que este atraviese con más facilidad la membrana polimérica.

La ecuación del cálculo de voltaje producido por la celda de combustible, considerando las pérdidas cinéticas, es la siguiente:

$$E_{cell} = E - \Delta V_{kinet}$$

$$E_{cell} = E^{\circ} + \frac{RT}{n * F} * \left(\ln \left(\frac{\alpha * \beta^{\frac{1}{2}}}{\gamma} \right) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{P}{P^{\circ}} \right) \right) - \frac{RT}{n\beta F} * \ln \left(\frac{i + i_{cross}}{i_0} \right) \quad (64)$$

La ecuación que define la corriente de pérdida por cruce de gases es [21]:

$$i_{cross} = \frac{n * F * P_m * P}{\delta_{NAF}} \quad (65)$$

2.2.2 Pérdidas Resistivas u Óhmicas. Una vez que la demanda de potencia crece lo suficiente, la densidad de corriente de intercambio se estabilizada, la tensión va cayendo lentamente y de forma lineal. La caída de tensión se puede considerar lineal, lo que sugiere que predominan las pérdidas resistivas u óhmicas, por lo tanto las pérdidas cinéticas ya no son tan influyentes. Debido a las imperfecciones de los materiales conductores que llevan asociadas ciertas resistencias intrínsecas al flujo de las cargas, se producen las llamadas pérdidas óhmicas. Estas pérdidas se pueden minimizar utilizando una membrana electrolítica lo más fina posible, así como materiales de elevada conductividad y conexiones de baja resistencia.

Este tipo de pérdidas van directamente asociadas a la resistencia eléctrica en general y contribuyen a ello tanto la parte eléctrica (R_{elec}) como la parte iónica (R_{ionic}). Para poder evaluar correctamente las pérdidas resistivas, hay que tener en cuenta la conductividad de los materiales y, para el caso de las celdas PEM, el contenido en humedad de su membrana de intercambio de protones. [21]

$$\Delta V_{ohm} = I \cdot R_{ohm} = I \cdot (R_{elec} + R_{ionic}) \quad (66)$$

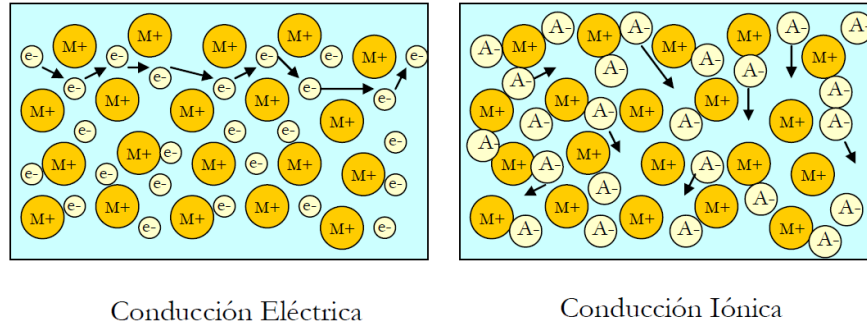
La resistencia es definida de la siguiente manera:

$$R = \frac{L}{A} \cdot \rho \quad (67)$$

Donde la resistencia está en función de la longitud (L) y el área transversal del material (A).

Por otra parte, las diferencias entre la conducción eléctrica y la iónica son bastante notables, como se representa en la figura 16. En la conducción eléctrica, los electrones tienen total libertad para moverse a lo largo y ancho del conductor, mientras que los iones se mueven entre los distintos espacios que quedan vacantes en la estructura cristalográfica, aprovechando así los defectos estructurales del material.

Figura 16. Representación de la Conducción Eléctrica y la Conducción Iónica.



Fuente: [21]

La pérdida resistiva depende en su mayoría de la conductividad iónica del electrolito, con lo que estas pérdidas se pueden expresar mediante la siguiente expresión:

$$\Delta V_{ohm} = I * R_{ohm} = i * A * R_{ohm} = i * ASR \quad (68)$$

Dónde:

ASR: Resistencia específica del área de la celda de combustible ($\Omega \cdot m^2$)

La resistencia total de la membrana (R_m) la podemos calcular como:

$$ASR = R_m = \int_0^\delta \frac{dz}{\sigma_{NAF(\lambda)}} \quad (69)$$

Donde δ es el espesor de la membrana y $\sigma_{NAF(\lambda)}$ es la conductividad en función del contenido del agua en la membrana, esta a su vez varía de acuerdo al espesor. El flujo de agua que atraviesa la membrana polimérica es producido por dos fenómenos conocidos como arrastre electro osmótico y difusión inversa.

2.2.2.1 Arrastre Electro-Osmótico. Este fenómeno consiste en que cada ion de hidrógeno (H^+), arrastra una o más moléculas de agua en su movimiento a través de la membrana polimérica, del ánodo al cátodo, por tal motivo la conductividad del Nafión varía en función de su contenido de agua. El flujo de agua arrastrada ($N_{H2O.arst}$) junto con los protones para una corriente neta demandada, se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$N_{H2O.arst} = 2 * n_{arst} * \frac{i}{nF} \left(\frac{mol}{m^2 * s} \right) \quad (70)$$

Dónde n_{arst} es el coeficiente de arrastre electro-osmótico

2.2.2.2 Difusión Inversa. El arrastre electro osmótico mueve el agua desde el ánodo hasta el cátodo; pero cuando éste está saturado, una cierta cantidad de agua se puede desplazar en dirección inversa del cátodo hacia el ánodo a través de la propia membrana. Esto se conoce como Difusión Inversa, y se debe a que la concentración de agua en el cátodo es generalmente mayor que en al ánodo, sobre todo debido a que ésta se forma químicamente a este lado de la celda de combustible. [21]

La ecuación que expresa la difusión inversa, es la siguiente: [40]

$$N_{H_2O.dif} = \frac{\rho_{NAF.dry}}{M_{NAF}} * D_{\lambda} * \frac{d\lambda}{dz} \left(\frac{mol}{m^2 * s} \right) \quad (71)$$

Dónde:

$N_{H_2O.dif}$: Flujo de agua por difusión inversa (mol/s)

$\rho_{NAF.dry}$: Densidad en seco del Nafión (1970 Kg/m³)

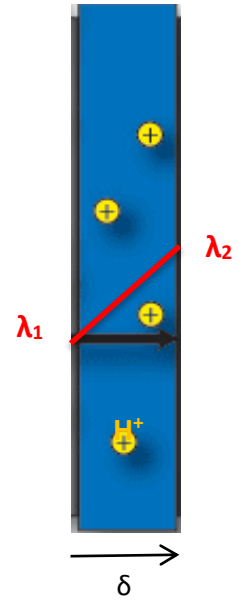
M_{NAF} : Peso molecular equivalente del Nafión (1.1 Kg/mol)

D_{λ} : Difusión del agua en la membrana

λ : Contenido de agua en la membrana

z : Dirección en la que se desplazan las moléculas de agua

Figura 17. Esquema de la Diferencia de Concentración de Agua.



Fuente: El Autor

Resolviendo una serie de ecuaciones podemos encontrar el valor de la resistencia de la membrana, al desarrollar la integral, hecho esto obtenemos lo siguiente:

$$R_m = \int_0^{\delta} \frac{dz}{\sigma_{NAF(\lambda)}} \quad (72)$$

$$R_m = \frac{\ln \left| \left((0.5193 * K_1 * \alpha - 0.326) * \exp\left(-\frac{K_3}{K_1} * z\right) + 0.5193 * C \right) * K_2 \right|}{-\frac{K_3}{K_1} * K_2 * (0.5193 * K_1 * \alpha - 0.326)}$$

$$\alpha = \frac{\lambda_2 - \lambda_1 \cdot \exp(K_1 \cdot K_3 \cdot z)}{K_1 \cdot (1 + \exp(K_1 \cdot K_3 \cdot z))} \quad (132) \quad \text{y} \quad C = \lambda_1 - K_1 \cdot \alpha \quad (73)$$

Dónde:

$$K_1 = 11/n_{arst}^*$$

$$K_2 = \exp\left(1268 \cdot \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right)$$

$$K_3 = \frac{i}{nF} \cdot \frac{M_{NAF}}{\rho_{NAF.dry} \cdot D\lambda}$$

Para una mejor comprensión de la obtención de la resistencia de la membrana, ver Anexo H.

$$E_{cell} = E^{\circ} + \frac{RT}{n \cdot F} \cdot \left(\ln\left(\frac{\alpha \cdot \beta^{\frac{1}{2}}}{\gamma}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{P}{P^{\circ}}\right) \right) - \frac{RT}{n\beta F} \cdot \ln\left(\frac{i + i_{cross}}{i_0}\right) - i \cdot R_m \quad (74)$$

2.2.3 Pérdidas por Transporte de Masa o por Concentración. El término de transporte de masa hace referencia a la alimentación continua de los gases reactantes y a la eliminación de los productos, para asegurar el buen desempeño de la celda de combustible. Estas pérdidas también se conocen por el nombre de pérdidas por concentración, debido a que debe existir un mínimo de concentración de los gases en la superficie de los electrodos, cuando el sistema le exige más potencia a la celda de combustible, la velocidad de la reacción química y por lo tanto el consumo de los gases será mayor, en este caso sino se suministra la cantidad requerida de los gases a la celda, la concentración de estos en los electrodos descenderán a un punto crítico, impidiendo que la celda alcance la potencia requerida.

Las pérdidas por transporte de masa se pueden optimizar mediante la variación en la concentración y en la presión de suministro de los reactantes, modificando las superficies de contacto catalizadas y las estructuras de flujo que tienen que atravesar los gases para llegar al catalizador. [21]

El flujo de los gases reactantes se basa nivel microscópico por el fenómeno de difusión, que se refiere al movimiento de distintas especies debido a su gradiente de concentración. El transporte por difusión depende también de las propiedades físicas y químicas de las especies que intervienen en las reacciones. [21]

Las variaciones en la presión del suministro del combustible y del oxidante influyen en el comportamiento de la celda de combustible. El voltaje varía con las presiones parciales de cada uno de los gases reactivos del siguiente modo:

$$\Delta V_{trans} = \frac{RT}{nF} * \ln\left(\frac{C_B}{C_S}\right) \quad (75)$$

Dónde:

C_B : Concentración del gas a la entrada de la celda. (mol/m³)

C_S : Concentración del gas en la superficie del catalizador del electrodo. (mol/m³)

La relación de concentraciones, se puede expresar:

$$\frac{C_B}{C_S} = \frac{i_L}{i_L - i}$$

Por lo tanto las pérdidas por transporte de masa se pueden escribir de la siguiente manera:

$$\Delta V_{trans} = \frac{RT}{nF} * \ln\left(\frac{i_L}{i_L - i}\right) \quad (76)$$

2.2.3.1 Modos de Transporte en un Medio Poroso. Para un cálculo más aproximado de la densidad de corriente límite, debemos conocer los diferentes mecanismos de transporte de masa presentes en un medio poroso como lo es la capa de difusión de gases (GDL). Hay cuatro modos principales de transporte, dependiendo de la aceleración de la molécula y del medio. Las cuales son: [42]

Flujo de Molécula Libre o Flujo Molar de Knudsen:

Knudsen o el flujo de molécula libre es donde las moléculas de gas colisionan más con las paredes del recipiente que con las otras moléculas de gas.

$$N_K = -D_k * \frac{dc}{dz} \quad (77)$$

El coeficiente de difusión de Knudsen (D_K) es determinado así:

$$D_K = \frac{1}{3} * d_p * \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad (78)$$

Dónde:

d_p : es el diámetro del poro

R : La constante universal de los gases

T : La temperatura

M : La masa molar del gas

$\frac{dc}{dz}$: La rata de cambio de la concentración del gas

Flujo Viscoso de Darcy:

Flujo viscoso de Darcy se refiere a flujo continuo en el régimen laminar que es causado por un gradiente de presión que puede ser definido de manera general como:

$$N_{visc} = \frac{-n_{cf} B_o}{\mu} * \frac{dP}{dz} \quad (79)$$

Dónde:

B_o : Parámetro de flujo viscoso

μ : Viscosidad dinámica del fluido

dP/dz : Cambio de presión del gas

n_{cf} : Comprensibilidad del fluido

$$n_{cf} = \frac{P}{K * T} \quad (80)$$

K , representa la constante de Boltzman ($K=1.3806504*10^{-23}$ J/K)

Flujo de Difusión Ordinaria:

La difusión ordinaria es el mecanismo de difusión más común. Para las mezclas *binarias*, el flujo difusivo de las especies es directamente proporcional a su gradiente de concentración:

$$N_{iD} = -D_{ij} * \frac{dn_i}{dz} \quad (81)$$

Dónde:

D_{ij} : Es el coeficiente de difusión binaria de las especies i y j (m^2/s)

$\frac{dn_i}{dz}$: Cambio de la comprensibilidad del gas.

Se debe tener en cuenta que $D_{ij} = D_{ji}$

Flujo Superficial:

En este mecanismo las moléculas se mueven a lo largo de una superficie sólida en una capa adsorbida. Este mecanismo se supone independiente de los demás.

Se puede integrar en un modelo con los otros tres mecanismos con el fin de dar resultados más precisos. El flujo superficial puede ser definido como:

$$N_{is} = -D_{is} * \frac{dn_i}{dz} \quad (82)$$

Combinación de Mecanismos de Transporte para Mezclas Binarias:

Ahora considerando los cuatro mecanismos de transporte anteriormente vistos, sumando todos los flujos en un flujo total y reorganizando las variables obtenemos la siguiente expresión:

$$N_i = -D_i \left[1 + \frac{D_{is}}{D_i} + x_i \frac{D_{is} - D_{js}}{D_{ij}} \right] \nabla n_i + x_i \delta_{ij} - x_i \gamma_i \frac{n * B_o}{\mu} \nabla P + x_i \frac{D_{js}}{D_{is}} \nabla n_i \quad (83)$$

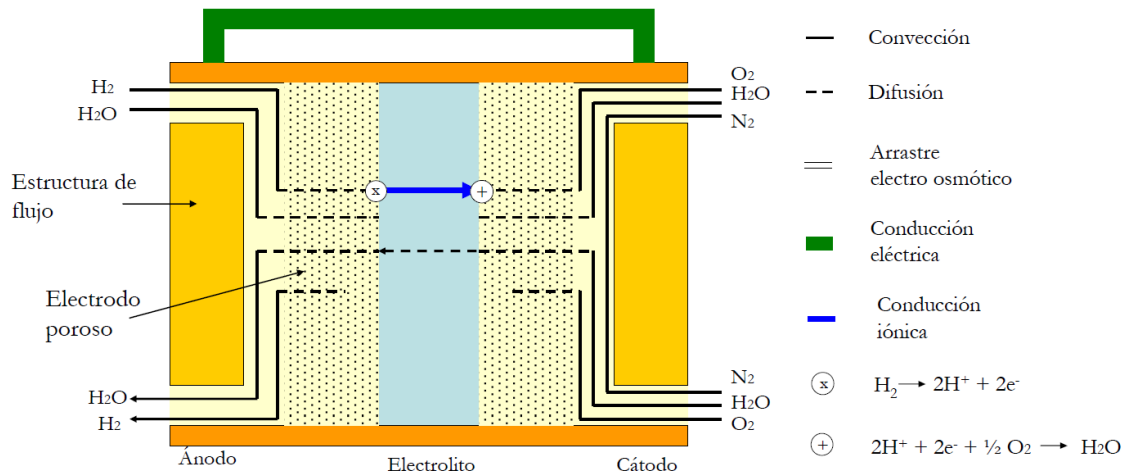
Resolviendo las ecuaciones matemáticas, podemos encontrar la corriente limite al decir que $C_s = 0$,

$$i_L = nF * \varepsilon^{1.5} D_{it} * \frac{C_B}{\delta_{GDL}} \quad (84)$$

$$i_L = nF * \varepsilon^{1.5} D_{it} * \frac{P_i}{\delta_{GDL} * RT} \quad (85)$$

Podemos considerar otro fenómeno de transporte distinto al de difusión conocido como convección, este se presenta en los canales de flujo y no en la capa de difusión. Todos los fenómenos de transporte son resumidos en la figura 18.

Figura 18. Esquema descriptivo de diferentes fenómenos de transporte



Fuente: [21]

Al agregar el fenómeno de convección la ecuación queda de la siguiente manera:

$$i_L = nF * \left(\frac{1}{h_m} + \frac{\delta_{GDL}}{(\varepsilon^{1.5} * D_{it})} \right)^{-1} * \frac{P_i}{RT} \quad (86)$$

Dónde:

h_m : Coeficiente de transferencia de masa

$$E_{cell} = E^\circ + \frac{RT}{nF} \left(\ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O} P^{o1/2}} \right) - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{i + i_{cross}}{i_0} \right) - \ln \left(\frac{i_L}{i_L - i} \right) \right) - iR_m \quad (89)$$

2.3 BALANCE DE MASA

Debemos tener en cuenta que para obtener en constante funcionamiento la celda de combustible, se debe suministrar los gases reactantes a la misma cantidad (o preferiblemente mayor) que se consumen. La cantidad de suministro de los gases depende de la cantidad de corriente demandada por el sistema. Una forma de medir la cantidad de flujo de los gases que se suministran, en comparación con el flujo de gases consumido por la celda de combustible, es a través del denominado número estequiométrico, que se puede expresar de la siguiente manera:

$$S = \frac{M_{sum}}{M_{cons}} = \frac{\dot{m}_{sum}}{\dot{m}_{cons}} \quad (90)$$

Dónde:

S : Numero estequiométrico

M : Peso molecular

\dot{m} : Flujo másico

De acuerdo a la ley de Faraday, el consumo de los gases reactantes y la generación de agua dependen únicamente de la corriente demandada por el sistema. [21]

$$N_{H_2} = \frac{I}{2F}; \quad N_{O_2} = \frac{I}{4F}; \quad N_{H_2O} = \frac{I}{2F} \quad (91)$$

Considerando que $N = \dot{m}/M$, entonces obtenemos que:

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{I}{2F} * M_{H_2}; \quad \dot{m}_{O_2} = \frac{I}{4F} * M_{O_2}; \quad \dot{m}_{H_2O} = \frac{I}{2F} * M_{H_2O} \quad (92)$$

Dónde:

\dot{m} : Flujo másico

M : Peso molecular

A continuación realizaremos el balance de masa para una celda de combustible. [21]

$$\sum (\dot{m}_i)_{entrada} = \sum (\dot{m}_j)_{salida}$$

Por lo tanto,

$$\dot{m}_{H_2} + \dot{m}_{O_2} = \dot{m}_{H_2O} \quad (93)$$

Aunque un análisis más real, sería considerar que el total de los gases reactantes no se consumen y que puede existir cierta cantidad de humedad a la entrada de la celda de combustible. El balance de masa se podría escribir de la siguiente forma:

$$\dot{m}_{H_2}^{ent} + \dot{m}_{O_2}^{ent} + \dot{m}_{H_2O}^{ent} = \dot{m}_{H_2}^{sal} + \dot{m}_{O_2}^{sal} + \dot{m}_{H_2O}^{generado} \quad (94)$$

2.3.1 Análisis de las Masas Entrantes

Antes de continuar debemos considerar varias cosas; como se había mencionado antes, la celda de combustible está constituida por un conjunto de celdas llamado Stack, por lo tanto el flujo másico total por un stack es la sumatoria de todos los flujos másicos de las celdas individuales:

$$\dot{m}_{Stack} = n_{cell} * \dot{m}_{cell} \quad (95)$$

Donde n_{cell} es el número de celdas que constituyen el stack. Por lo tanto:

$$\dot{m}_{Stack} = \frac{n_{cell} * I}{2F} * M \quad (96)$$

Además por lo general los gases suministrados no son completamente puros, como el caso del oxígeno en el aire. A partir de la ley de Faraday,

$$\dot{m}_{aire} = \frac{n_{cell} * I}{2F} * \left(M_{O_2} + \frac{x_{N_2}}{x_{O_2}} * M_{N_2} \right) \quad (97)$$

Y por último agregando el número estequiométrico

$$\dot{m}_{aire} = S_{aire} * \frac{n_{cell} * I}{4F} * \left(M_{O_2} + \frac{x_{N_2}}{x_{O_2}} * M_{N_2} \right) \quad (98)$$

Para el gas combustible se tiene,

$$\dot{m}_{comb} = S_{comb} * \frac{n_{cell} * I}{2F} * \left(M_{H_2} + \frac{x_{CH_4}}{x_{H_2}} * M_{CH_4} + \frac{x_{CO_2}}{x_{H_2}} * M_{CO_2} \right) \quad (99)$$

La expresión que nos permite definir la cantidad de agua que entra a la celda de combustible presente en el aire es:

$$\dot{m}_{H_2O.aire} = \dot{m}_{aire} * \frac{M_{H_2O.aire}}{M_{aire}} * \frac{\phi_{aire} * P^*}{P_{cat} - \phi_{aire} * P^*} \quad (100)$$

Dónde:

$\dot{m}_{H_2O.aire}$: Flujo másico de agua presente en el aire

\dot{m}_{aire} : Flujo másico entrante de aire, definido anteriormente

ϕ_{aire} : Humedad relativa del aire

P_{cat} : Presión en el cátodo

Ahora el agua presente en el gas combustible.

$$\dot{m}_{H_2O.comb} = \dot{m}_{comb} * \frac{M_{H_2O}}{M_{comb}} * \frac{\phi_{comb} * P^*}{P_{and} - \phi_{comb} * P^*} \quad (101)$$

Dónde:

$\dot{m}_{H_2O.comb}$: Flujo másico de agua presente en el combustible

\dot{m}_{comb} : Flujo másico entrante del combustible, definido anteriormente.

ϕ_{comb} : Humedad relativa del combustible

P_{and} : Presión en el ánodo

2.3.2 Análisis de las Masas Salientes. Después que ocurre el proceso químico dentro de la celda de combustible, se deben extraer los gases que no reaccionaron y el agua que fue tanto producida en el proceso como la que entro previamente al sistema. Empezaremos definiendo la masa de gas oxidante que quedo in utilizar.

$$\dot{m}_{saliente} = \dot{m}_{suministrada} - \dot{m}_{consumida}$$

$$\dot{m}_{aire} = \frac{n_{cell} * I}{4F} * \left(M_{O_2} * (S_{aire} - 1) + S_{aire} * \frac{x_{N_2}}{x_{O_2}} * M_{N_2} \right) \quad (102)$$

Para el flujo másico del combustible que no reacciona se puede expresar de la siguiente manera, considerando el combustible es cien por ciento puro:

$$\dot{m}_{H_2} = (S_{H_2} - 1) * \frac{n_{cell} * I}{2F} * M_{H_2} \quad (103)$$

Ahora debemos calcular la cantidad de agua total que se sale de la celda de combustible:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{H_2O}^{sal} &= \dot{m}_{H_2O}^{ent} + \dot{m}_{H_2O}^{gen} \\ \dot{m}_{H_2O}^{gen} &= \dot{m}_{H_2}^{cons} + \dot{m}_{O_2}^{cons} = \frac{n_{cell} * I}{2F} * M_{H_2} + \frac{n_{cell} * I}{4F} * M_{O_2} \\ \dot{m}_{H_2O}^{gen} &= \frac{n_{cell} * I}{2F} * \left(M_{H_2} + \frac{1}{2} M_{O_2} \right) \quad (104) \end{aligned}$$

2.4 BALANCE DE ENERGÍA

En el balance energético de una celda de combustible, podemos empezar utilizando la primera ley de la termodinámica:

$$\sum \dot{E}_{entra} = \sum \dot{E}_{sale}$$

Donde la sumatoria de las energías entrantes es igual a la suma de energía que salientes. Podemos expresar la primera ley de la siguiente manera:

$$\Delta \dot{E} = \Delta \dot{H} = \dot{W}_{el} + \dot{Q} \quad (105)$$

De la anterior ecuación podemos decir que:

$$\dot{W}_{el} = n_{cell} * I * E_{cell} \quad (106)$$

$$\dot{Q} = \dot{Q}_c + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{conv} \quad (107)$$

$$\Delta H = \sum H_{Prod} - \sum H_{React} \quad (108)$$

Donde el cambio de entalpía es la diferencia entre la sumatoria de las entalpías de los productos menos la sumatoria de las entalpías de los reactivos. Cuya ecuación se puede representar como:

$$\Delta H = \frac{n_{cell} I}{2F} \left([M(\Delta h^{T,P} + h_f^\circ)]_{H_2O} - [M(\Delta h^{T,P} + h_f^\circ)]_{H_2} - [M(\Delta h^{T,P} + h_f^\circ)]_{O_2} \right) \quad (109)$$

Para el cálculo del calor producido por la celda, debemos considerar que los gases que no fueron consumidos, al pasar por la celda de combustible, absorbieron parte de ese calor, aumentando así la temperatura de salida de los gases restantes. Este calor puede ser calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = \dot{m} * C_p * \Delta T \quad (110)$$

Dónde:

\dot{m} : Flujo másico

C_p : Calor específico a presión constante

ΔT : Cambio de temperatura, ($\Delta T = T_f - T_i$)

Por consiguiente,

$$\dot{Q}_c = [\dot{m}_{sale} * C_p * \Delta T]_{H_2O} + [\dot{m}_{sale} * C_p * \Delta T]_{H_2} + [\dot{m}_{sale} * C_p * \Delta T]_{O_2} \quad (111)$$

2.4.1 Conducción de Calor por Convección. El proceso de la transferencia térmica de una superficie de un sólido a un líquido se llama intercambio de calor por convección o emisión calorífica. El fenómeno de convección que es segunda forma elemental de propagación del calor tiene otro aspecto. En este caso el proceso de transferencia térmica está ligado inseparablemente con la transferencia de masa fluida. Por eso la convección es posible solamente en los líquidos y gases cuyas partículas son capaces de desplazarse con facilidad.

La transferencia de calor por convección se puede expresar de la siguiente manera:

$$Q_{conv} = h * A * (T_s - T_{ext}) \quad (112)$$

Dónde:

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección ($W/(m^2K)$)

A : Área de Transferencia

Donde T_s es la temperatura superficial del sólido y T_{ext} es la temperatura exterior que representa la temperatura a la cual se encuentra el líquido o gas circundante.

El coeficiente de convección se puede hallar dependiendo de la geometría del cuerpo, la velocidad, viscosidad y régimen (laminar o turbulento) del fluido, de cómo se inicia el fluido (natural o forzada), si el fluido es forzado a pasar de manera interna o externa, entre otros. Ejemplos de valores del coeficiente de convección son mostrados en tabla 3.

Tabla 3. Valores aproximados de algunos coeficientes de convección

Fluido	Coeficiente convectivo de transferencia de calor($W/m^2 \text{ } ^\circ K$)
Aire	
Convección libre	5-25
Convección forzada	10-200
Agua	
Convección libre	20-100
Convección forzada	50-10.000
Agua hirviendo	3.000-100.000
Condensación de vapor de agua	5.000-100.000

Fuente : Singh y Heldman (1984)

Fuente:

<http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4070035/images/Tabla%204.1.gif>

2.4.2 Conducción de Calor por Radiación. La radiación térmica es la radiación electromagnética emitida por un cuerpo asociada a su temperatura absoluta. Todo cuerpo que este a una temperatura superior al cero absoluto ($T > 0$ K), emite energía en forma de radiación. La transferencia de calor por radiación de un cuerpo a otro, puede ser escrita de la siguiente manera:

$$Q_{rad} = \varepsilon_m \sigma A * (T_{alred}^4 - T_s^4) \quad (113)$$

Dónde:

ε_m : Emisividad de las superficies de frontera ($0 < \varepsilon < 1$)

σ : Constante de Stefan-Boltzman ($\sigma = 5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4}$)

A : Área de transferencia de calor

T_{alred} : Temperatura de los alrededores del cuerpo (K)

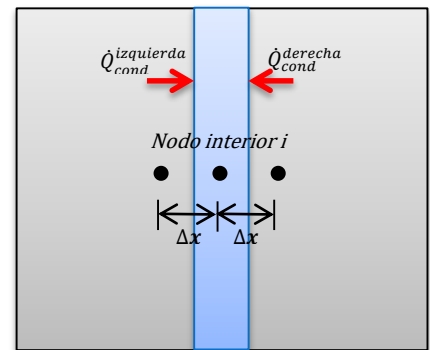
T_s : Temperatura de la superficie (K)

2.5 TRANSFERENCIA DE CALOR

En un nuestro anterior análisis del balance energético consideramos el sistema en estado estable, es decir que la energía interna no sufre cambio alguno y por lo tanto en nuestro caso la temperatura de operación de la celda de combustible es constante en el tiempo, al igual que la temperatura de salida de los gases. Pero la cuestión es ¿cuál es el valor de dicha temperatura?; fácilmente podríamos suponer un valor de operación recomendado para las celdas de combustible tipo PEM, ($60 \leq T < 100^\circ C$ [22]), pero utilizando la ventaja que nos proporciona Simulink, podemos no solo encontrar la temperatura en estado estable de la celda, sino además el cambio de temperatura en función del tiempo.

Para ello, se debe hacer un análisis por elementos finitos, donde podemos dividir la celda en un número finitos de nodos y así obtener un mejor resultado no solo en el cálculo de la temperatura de salida de los gases, sino además encontrar un perfil de temperatura a lo largo de los diferentes componentes de la celda de combustible.

Figura 19. Diagrama de conducción unidimensional en una pared plana con el método de diferencias finitas



Fuente: El autor

2.5.1 Método Numérico (Diferencias finitas). El método de diferencias finitas se basa en la subdivisión del medio en un número suficiente de elementos de volumen y a continuación aplicar un balance de energía en cada elemento. Esto se realiza al seleccionar en principio los puntos nodales (o nodos), en los cuales se va a determinar las temperaturas y a continuación para formar elementos o volúmenes de control sobre los nodos y trazar rectas que pasan por los puntos medios entre los nodos. Las propiedades en el nodo, como la temperatura y la velocidad de generación de calor, representan las propiedades promedio del elemento. [45]

Si se supone que la conducción de calor se lleva a cabo hacia los elementos sobre todas las superficies, un balance energético sobre elemento se puede expresar como:

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \dot{Q}_{cond}^{izquierda} + \dot{Q}_{cond}^{derecha} + \dot{Q}_{gen} \quad (114)$$

Dónde:

$\frac{\Delta E}{\Delta t}$: Razón de cambio del contenido de energía del elemento.

$\dot{Q}_{cond}^{izquierda}$: Flujo de calor en la superficie izquierda.

$\dot{Q}_{cond}^{derecha}$: Flujo de calor en la superficie derecha.

\dot{Q}_{gen} : Flujo de calor generado dentro del elemento.

El flujo de calor en las superficies izquierda y derecha puede escribirse de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_{cond}^{izquierda} = KA * \frac{T_{i-1} - T_i}{\Delta x} \quad ; \quad \dot{Q}_{cond}^{derecha} = KA * \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x}$$

Dónde:

K : Conductividad térmica del material

A : Área de transferencia de calor

T_i : Temperatura del elemento i

T_{i-1} : Temperatura del elemento adyacente al lado izquierdo

T_{i+1} : Temperatura del elemento adyacente al lado derecho

Ahora consideraremos varias condiciones que se pueden presentar, en cada uno de estas, vamos a cambiar las características de uno de los nodos adyacentes:

➤ **Transferencia de calor por conducción (diferente material)**

En el análisis anterior supusimos que todo el material tenía una conductividad constante, pero ahora consideraremos el balance de energía de un elemento en contacto entre otro material distinto.

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{T_{i-1} - T_i}{\frac{\Delta x_{i-1}}{2K_{i-1}A} + \frac{\Delta x_i}{2K_iA}} + K_i A * \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x_i} + \dot{Q}_{gen} \quad (115)$$

➤ **Transferencia de calor por convección**

Ahora si uno de los lados está en contacto con el medio ambiente.

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{T_\alpha - T_i}{\frac{1}{hA} + \frac{\Delta x_i}{2K_iA}} + K_i A * \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x_i} + \dot{Q}_{gen} \quad (116)$$

➤ **Transferencia de calor por radiación**

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \varepsilon \sigma A * (T_{alr}^4 - T_i^4) + K_i A * \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x_i} + \dot{Q}_{gen} \quad (117)$$

➤ **Transferencia de calor por convección y radiación**

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{T_\alpha - T_i}{\frac{1}{hA} + \frac{\Delta x_i}{2K_iA}} + \varepsilon \sigma A * (T_{alr}^4 - T_i^4) + K_i A * \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x_i} + \dot{Q}_{gen} \quad (118)$$

2.5.2 Conducción Unidimensional de Calor en Estado Transitorio de las Celdas de Combustible. En esta sección se hará balances de energía alrededor de cada una de las capas de celdas de combustible aplicando el método de diferencias finitas, para permitir el estudio de la difusión de calor a través de una capa particular, como una función de tiempo o posición. En esta sección se describe el modo de difusión de calor en cada capa y se calcula los balances de energía para las placas de los extremos, las bipolares, las de campo de flujo, las GDL, las catalizadoras, y la membrana polimérica.

Para este análisis tomaremos como volumen de control las capas que componen la celda por separado en lugar de hacerlo todo en conjunto. Además consideraremos el sistema en estado transitorio y en algunos casos con generación de calor.

2.5.2.1 Análisis Placa del Extremo Ánodo. A partir de la primera ley de la termodinámica tenemos que:

$$\frac{dU}{dt} = \dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sal} \quad (119)$$

En este volumen de control, dispondremos por convención la dirección de los flujos de calor hacia el interior. Para las placas de los extremos solo hay dos flujos de calor, el que proviene del medio ambiente y del contacto con la placa colectora. Por lo tanto el balance puede ser escrito de la siguiente manera:

$$mCp * \frac{dT_{ex}}{dt} = \dot{Q}_{\alpha \rightarrow ex} + \dot{Q}_{C \rightarrow ex} \quad (120)$$

Dónde:

T_{ex} : Temperatura de la placa extrema

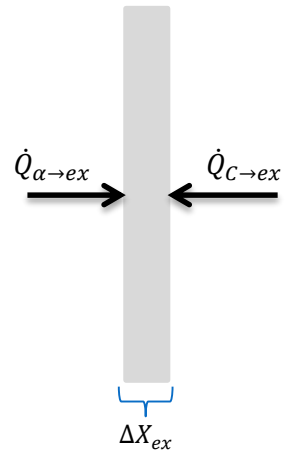
$\dot{Q}_{\alpha \rightarrow ex}$: Flujo de calor desde el ambiente

$\dot{Q}_{C \rightarrow ex}$: Flujo de calor desde la placa colectora

El flujo de calor hacia el ambiente puede ser manejado como calor por convección junto con el calor por radiación. De forma simplificada tenemos:

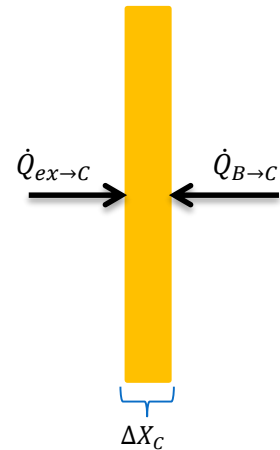
$$\begin{aligned} \Delta X_{ex} * \rho_{ex} * C_{p,ex} * \frac{dT_{ex}}{dt} &= \frac{T_{\alpha} - T_{ex}}{\frac{1}{h_{\alpha}} + \frac{\Delta X_{ex}}{2K_{ex}}} + \varepsilon \sigma (T_{atr}^4 - T_{ex}^4) \\ &+ \frac{T_C - T_{ex}}{\frac{\Delta X_C}{2K_C} + \frac{\Delta X_{ex}}{2K_{ex}}} \quad (121) \end{aligned}$$

Figura 20. Diagrama de balance de energía en la placa del extremo



Fuente: El autor

Figura 21. Diagrama de balance de energía en la placa colectora



Fuente: El autor

2.5.2.2 Análisis Placas Colectoras. Para las placas colectoras el análisis es similar a las placas de los extremos con la característica de que solo existe flujo de calor conducción.

$$mCp * \frac{dT_C}{dt} = \dot{Q}_{ex \rightarrow C} + \dot{Q}_{B \rightarrow C} \quad (122)$$

Dónde:

T_C : Temperatura de la placa colectoras

$\dot{Q}_{ex \rightarrow C}$: Flujo de calor desde la placa del extremo

$\dot{Q}_{B \rightarrow C}$: Flujo de calor desde la placa bipolar

$$\Delta X_c \rho_c C_{p,c} \frac{dT_C}{dt} = 2 \left(\frac{T_{ex} - T_C}{\frac{\Delta X_{ex}}{K_{ex}} + \frac{\Delta X_c}{K_c}} + \frac{T_B - T_C}{\frac{\Delta X_B}{2K_B} + \frac{\Delta X_c}{K_c}} \right) \quad (123)$$

2.5.2.3 Análisis Placas Bipolares. En las placas bipolares, existe la particularidad de que debe ser dividida en dos para su correcto análisis, las cuales corresponden, uno al volumen completamente sólido y el otro al volumen que constituye los canales (campos de flujo) por los cuales los gases son distribuidos en la celda. Primero haremos el análisis al volumen totalmente solido:

En este sistema debemos considerar adicionalmente una pequeña generación de calor debido a la resistencia eléctrica que esta placa le otorga al paso de la corriente. Además debemos tener en cuenta que existen dos flujos de calor proveniente del campo de flujos, uno de ellos por convección de los gases que se transmiten por los canales y el otro por conducción a través del área sólida.

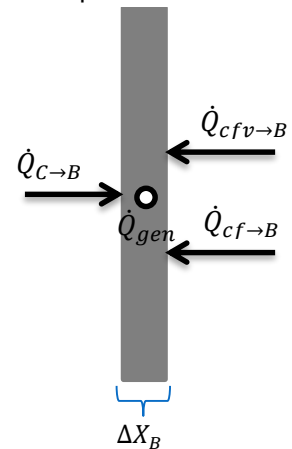
$$mCp * \frac{dT_B}{dt} = \dot{Q}_{C \rightarrow B} + \dot{Q}_{cf \rightarrow B} + \dot{Q}_{cfv \rightarrow B} + \dot{Q}_{gen} \quad (124)$$

Dónde:

T_B : Temperatura de la placa bipolar

$\dot{Q}_{C \rightarrow B}$: Flujo de calor desde la placa colectoras

Figura 22. Diagrama de balance de energía en la placa bipolar



Fuente: El autor

$\dot{Q}_{cf \rightarrow B}$: Flujo de calor desde el campo de flujos por conducción

$\dot{Q}_{cfv \rightarrow B}$: Flujo de calor desde el campo de flujos por convección

\dot{Q}_{gen} : Calor generado por pérdidas resistivas

El calor generado se puede definir como:

$$\dot{Q}_{gen} = I^2 * R = I^2 * \frac{l}{\sigma A} \quad (221)$$

$$A \Delta X_B \rho_B C_{p,B} \frac{dT_B}{dt} = \frac{2(T_C - T_B)}{\frac{\Delta X_C}{K_C A} + \frac{\Delta X_B}{K_B A}} + \frac{2(T_{cf} - T_B)}{\frac{\Delta X_{cf}}{K_{cf} A_R} + \frac{\Delta X_B}{K_B A_R}} + \frac{2(T_{cf} - T_B)}{\frac{2}{h_{cf} A_V} + \frac{\Delta X_B}{K_B A_V}} + \frac{I^2 \Delta X_B}{\sigma_B A} \quad (125)$$

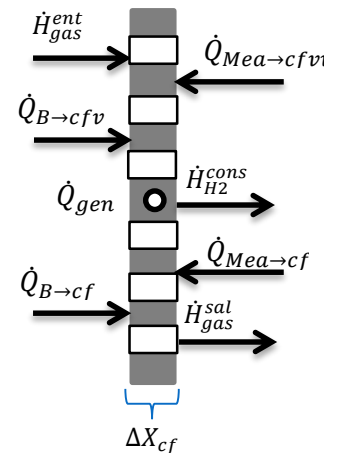
A , es el área total transversal de la placa bipolar, A_R representa la sección del área de contacto sólido con el campo de flujo y A_V es la sección del área vacía del campo de flujo, la cual puede ser determinada por la longitud total de los canales por su ancho.

$$A = A_R + A_V \quad (126)$$

2.5.2.4 Análisis Campo de Flujo. El análisis de este volumen de control es mucho más complejo que los anteriormente vistos, empezando por que posee cuatro flujos de calor, dos por convección y los otros dos por conducción. Además el volumen de control no es completamente sólido, debido a esto se debe hacer el cálculo de la capacidad térmica (mC_p) de la mezcla de gases en los canales de la placa bipolar. Algo especial de este sistema es la entrada y salida de los flujos másicos de los gases y también la difusión del hidrógeno reactante a través de la membrana.

$$mC_p \frac{dT_{cf}}{dt} = \dot{Q}_{B \rightarrow cf} + \dot{Q}_{B \rightarrow cfv} + \dot{Q}_{Mea \rightarrow cf} + \dot{Q}_{Mea \rightarrow cfv} + \sum_{i=1}^N \dot{H}_i^{ent} - \sum_{i=1}^N \dot{H}_i^{sal} - \dot{H}_{H_2}^{cons} + \dot{Q}_{gen} \quad (127)$$

Figura 23. Diagrama de balance de energía en el campo de flujo



Fuente: El autor

Dónde:

T_{cf} : Temperatura del campo de flujo

$\dot{Q}_{B \rightarrow cf}$: Flujo de calor desde la placa bipolar por conducción

$\dot{Q}_{B \rightarrow cfv}$: Flujo de calor desde la placa bipolar por convección

$\dot{Q}_{Mea \rightarrow cf}$: Flujo de calor desde la membrana por conducción

$\dot{Q}_{Mea \rightarrow cfv}$: Flujo de calor desde la membrana por convección

\dot{Q}_{gen} : Calor generado por pérdidas resistivas

La ecuación completa queda expresada de la siguiente forma:

$$\left(A_R \Delta X_{cf} \rho_B C_{p,B} + A_V \Delta X_{cf} \frac{P}{RT_{cf}} \sum_{i=1}^N x_i M_i C_{p,i} + \varepsilon A_V \Delta X_{cf} \frac{P}{RT_{cf}} \sum_{i=1}^N x_i M_i \omega C_{p,H_2O,V} \right) \frac{dT_{cf}}{dt} =$$

$$\frac{T_B - T_{cf}}{\frac{\Delta X_B}{2K_B A_R} + \frac{\Delta X_{cf}}{2K_B A_R}} + \frac{T_B - T_{cf}}{\frac{\Delta X_B}{2K_B A_V} + \frac{1}{h_{cf} A_V}} + \frac{T_M - T_{cf}}{\frac{\Delta X_M}{2K_M A_R} + \frac{\Delta X_{cf}}{2K_B A_R}} + \frac{T_M - T_{cf}}{\frac{\Delta X_M}{2K_M A_V} + \frac{1}{h_{cf} A_V}}$$

$$+ ((\dot{m}Cp)_{H_2} + (\dot{m}Cp)_{H_2O})_{ent} T_{ent} - ((\dot{m}Cp)_{H_2} + (\dot{m}Cp)_{H_2O,L} + (\dot{m}Cp)_{H_2O,V})_{sal} T_{cf} - (\dot{m}Cp)_{H_2}^{cons} T_{cf}$$

$$+ \frac{I^2 \Delta X_{cf}}{\sigma_B A_R} \quad (128)$$

Donde i , representa cada una de las especies que componen el gas reactante (excepto el vapor de agua, donde es evaluada por separado), ω hace referencia a la humedad específica presente en el.

2.5.2.5 Análisis MEA. Para el análisis de la MEA, la forma más exacta es analizar cada uno de los componentes que la conforma por separado, pero por simplicidad se opta por su análisis en conjunto. En esta capa de la celda, se presenta otra fuente de calor producida por:

$$mCp * \frac{dT_M}{dt} = \dot{Q}_{cf1 \rightarrow M} + \dot{Q}_{cfv1 \rightarrow M} + \dot{Q}_{cf2 \rightarrow M} + \dot{Q}_{cfv2 \rightarrow M} + \dot{H}_{H_2,ent}^{cons} - \dot{H}_{H_2,sal}^{cons} + \dot{Q}_{gen}$$

$$+ \dot{Q}_{catz} \quad (129)$$

Dónde:

T_M : Temperatura del campo de flujo

$\dot{Q}_{cf1 \rightarrow M}$: Flujo de calor desde el campo de flujo del ánodo por conducción

$\dot{Q}_{cfv1 \rightarrow M}$: Flujo de calor desde el campo de flujo del ánodo por convección

$\dot{Q}_{cf2 \rightarrow M}$: Flujo de calor desde el campo de flujo del cátodo por conducción

$\dot{Q}_{cfv2 \rightarrow M}$: Flujo de calor desde el campo de flujo del cátodo por convección

Los números 1 y 2 se utilizan para diferenciar entre el campo de flujo del lado ánodo con el del cátodo.

\dot{Q}_{gen} : Calor generado por pérdidas resistivas

\dot{Q}_{catz} : Calor generado por la capa catalizadora

$$\dot{Q}_{catz} = I \frac{T_M \Delta S}{nF} + \eta_{sp} \quad (130)$$

Donde ΔS es el cambio de entropía en estado estándar con catalizador de platino, los cuales pueden tomar los valores de 326.36 y -0.208(J/(mol.K)), para el cátodo y el ánodo respectivamente.

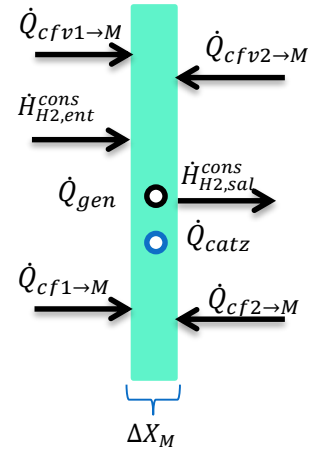
La ecuación completa se muestra a continuación.

$$\left(A_R \Delta X_M \rho_M C_{p,M} + A_V \Delta X_M \frac{P}{RT_M} M_M C_{p,M} \right) \frac{dT_M}{dt} =$$

$$\frac{T_{cf1} - T_M}{\frac{\Delta X_{cf1}}{2K_B A_R} + \frac{\Delta X_M}{2K_M A_R}} + \frac{T_{cf1} - T_M}{\frac{\Delta X_{cf1}}{K_B A_V} + \frac{1}{h_{cf} A_V}} + \frac{T_{cf2} - T_M}{\frac{\Delta X_{cf2}}{K_{cf2} A_R} + \frac{\Delta X_M}{2K_M A_R}} + \frac{T_{cf2} - T_M}{\frac{\Delta X_{cf2}}{K_{cf2} A_V} + \frac{1}{h_M A_V}}$$

$$+ (\dot{m} C_p)_{H_2} (T_{cf1} - T_M) + \frac{I^2 \Delta X_M}{\sigma_M A} + I \left(\frac{T_M}{nF} (\Delta S_{and} + \Delta S_{cat}) + 2\eta_{sp} \right) \quad (131)$$

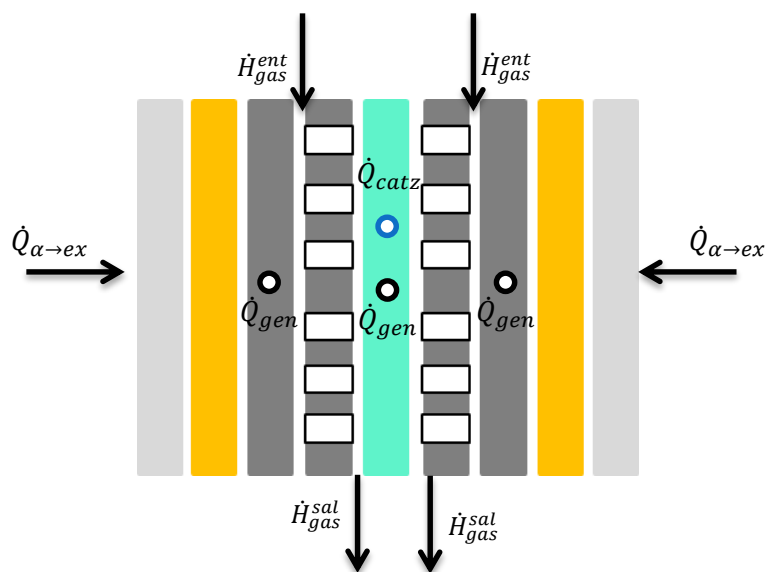
Figura 24. Diagrama de balance de energía en la membrana polimérica



Fuente: El autor

Como notaran el análisis hasta el momento solo constituye la mitad de la celda de combustible, por lo tanto para completar el análisis se debe hacer lo anterior para el resto de las capas de la celda de combustible (excepto la MEA que es una sola por celda) con el fin de complementar la parte restante de la celda (el ánodo o el cátodo), pero se advierte que el análisis es similar y por tanto las ecuaciones son las mismas y por tal motivo se abstiene de mostrar el resto de las expresiones. La figura a continuación muestra el balance de energía de toda la celda de combustible.

Figura 25. Esquema Completo del Balance de Energía de la Celda de Combustible con Todas las Placas que la Constituyen



Fuente: El autor

3 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO CON CELDAS DE COMBUSTIBLE SIDVEC

El programa de simulación desarrollado fue creado en el entorno de **Matlab/Simulink R2014a**, haciendo uso de la interfaz gráfica **Guide**, que permitió la modelación matemática, de las complejas ecuaciones necesarias tanto simples como interrelacionadas entre sí para describir el comportamiento de nuestros modelos de vehículos tanto en condiciones de estado estable como en estado transitorio. En la figura 26, se muestra el diagrama de flujos general del programa desarrollado.

3.1 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN

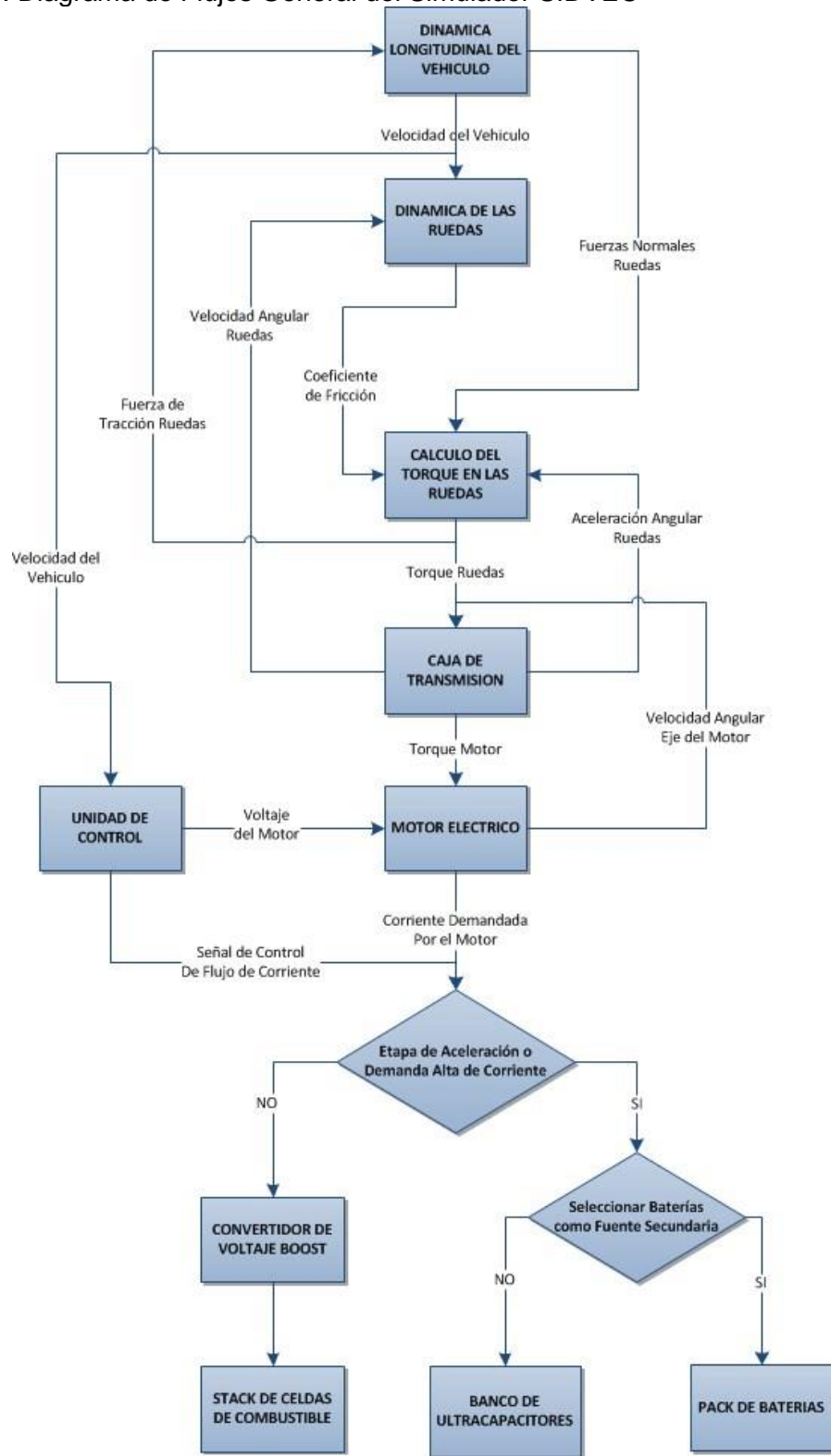
Los parámetros y características establecidas para el desarrollo del programa de modelamiento y simulación, fueron seleccionadas basadas en las necesidades de crear una herramienta analítica que permita el estudio y la investigación de la operación de las celdas de combustible aplicadas al área de transporte al igual que la interrelación operacional de los componentes principales que conforman el sistema de transmisión de potencia de un vehículo eléctrico convencional, para no solo fomentar el interés de la investigación sobre esta tecnología, sino que permita además analizar los efectos sobre el sistema completo de un vehículo al variar los parámetros de caracterización y operación, con el propósito de estudiar tanto modelos reales como modelos conceptuales para futuros desarrollos, siendo así un primer paso para formar un instrumento que facilite el posterior desarrollado de nuevos diseños de vehículos eléctricos a base de esta tecnología.

De acuerdo a lo anterior, se establecieron los siguientes requerimientos para el programa:

- Disponer de una interfaz simple y de forma intuitiva para facilidad del usuario.
- Modelar de forma conjunta los componentes principales para el funcionamiento de un vehículo eléctrico como lo son la fuente de energía secundaria (baterías o ultracapacitores), convertidor de voltaje DC/DC tipo boost, motor eléctrico, ruedas y la dinámica longitudinal del vehículo.

- Tomar un modelo matemático para representar la interacción de las ruedas con la superficie de contacto.
- Simular el sistema tanto en estado estable ($\frac{dV}{dt} = 0$) como en estado transitorio.
- Modificar las variables de las condiciones de operación del sistema para observar los efectos sobre el desempeño de este como la velocidad del automóvil y del viento, potencia máxima del motor, tipo de superficie, ángulo de inclinación del terreno, número de ruedas, número y disposición de los motores, temperatura, presión, flujos de máscicos de consumo de los gases reactantes, corrientes, voltajes, materiales de la celda de combustible y sus propiedades, entre otros, del vehículo.
- Cada componente modelado debe tener su propio modulo o sección de forma independiente a los demás, que permita modificar sus propios parámetros.
- Simular y evaluar de forma independiente la celda de combustible para permitir al usuario establecer las características requeridas, antes de simular el sistema completo y de igual forma permitir un estudio único para este componente. Debido a su gran importancia y su alta complejidad.
- Mostrar los resultados de la simulación de forma gráfica, permitiendo visualizar el comportamiento de parámetros como la velocidad y aceleración del vehículo, el torque, la corriente y velocidad angular del motor, el consumo de corriente y el voltaje aplicado por las fuentes de energía principal y secundaria, la variación de la temperatura de la celda y el consumo de los gases reactantes todo en función del tiempo y a la vez permitir al usuario escoger cuales gráficas visualizar de acuerdo a su interés.
- Mostrar en la interfaz los valores máximos y los últimos alcanzados durante el tiempo de simulación, de los parámetros de velocidad, aceleración, torque, corriente, velocidad angular y además de la masa de combustible consumido.
- Modelar el comportamiento térmico transitorio de la celda de combustible, además de implementar un sistema de control de temperatura, para obtener un simulación más real del desempeño de la celda.
- Generar las curvas de desempeño de la celda de combustible, incluyendo las gráficas de pérdidas para analizar sus respectivos efectos.
- Implementar un sistema de control de velocidad para el vehículo para simular en diferentes valores y analizar sus consecuencias.
- Permitir establecer la configuración del vehículo, de acuerdo al número de ruedas, tipo de tracción y ruedas con motor independiente.

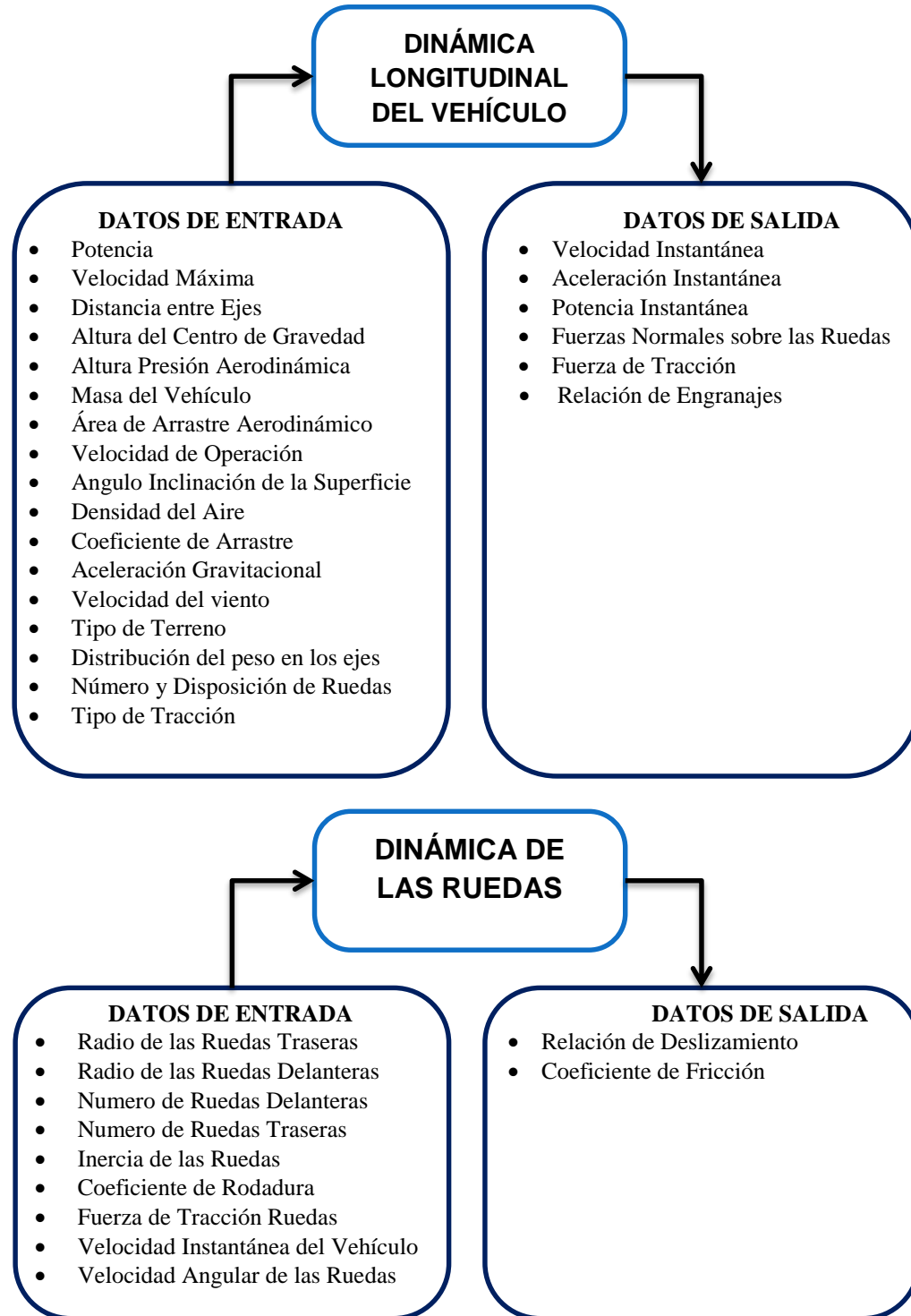
Figura 26. Diagrama de Flujos General del Simulador SIDVEC

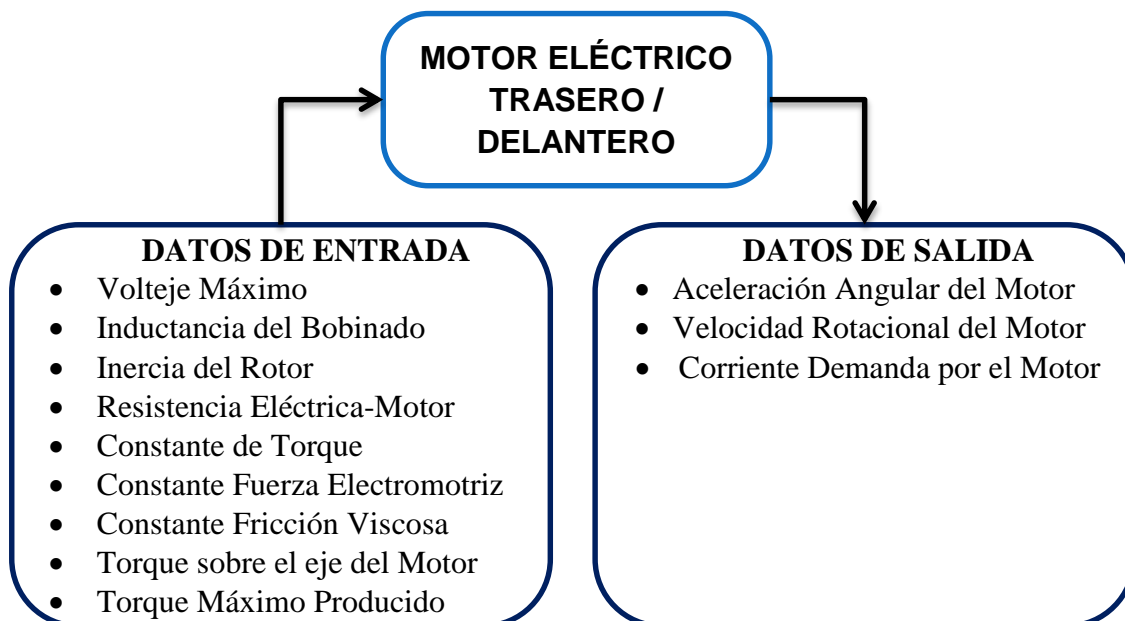
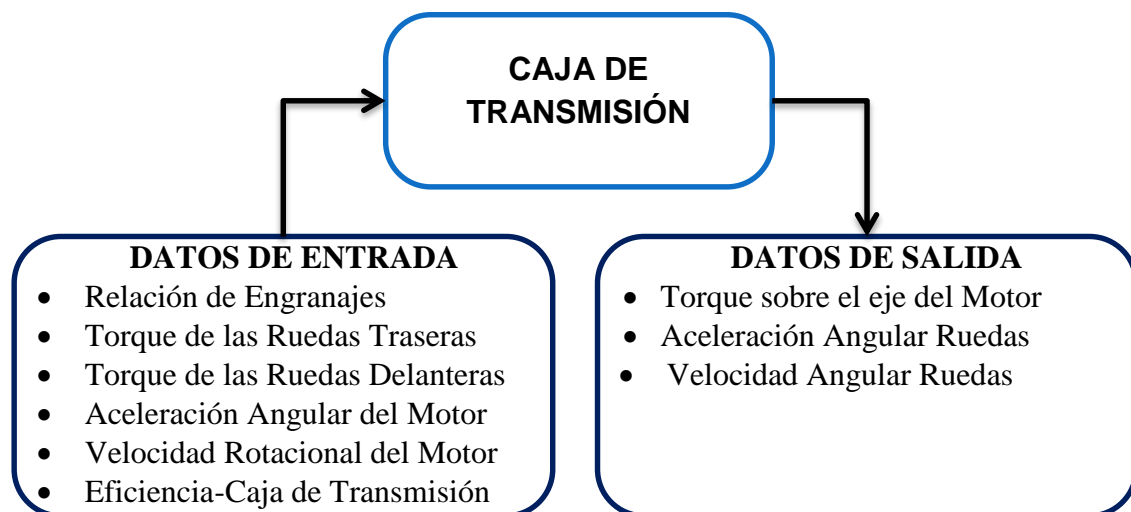
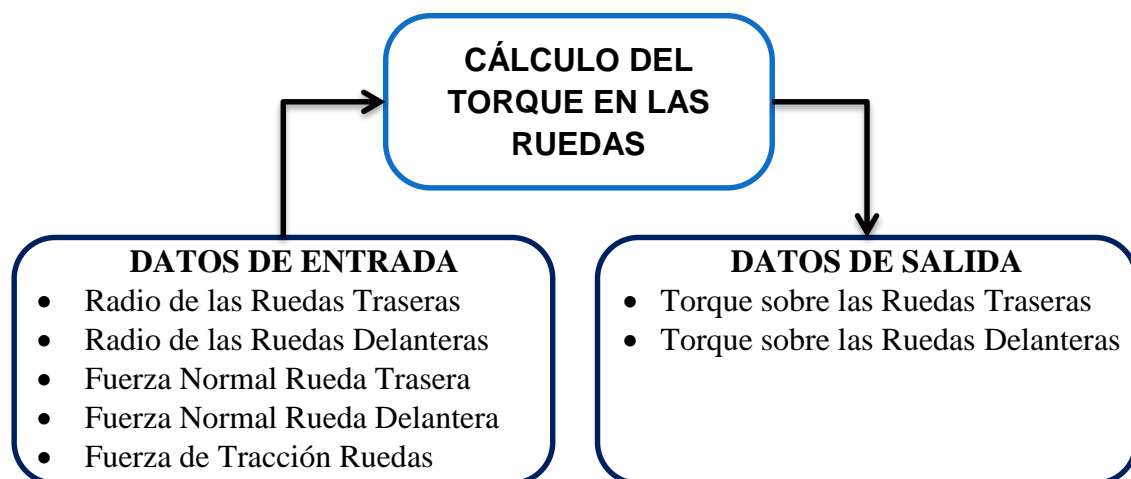


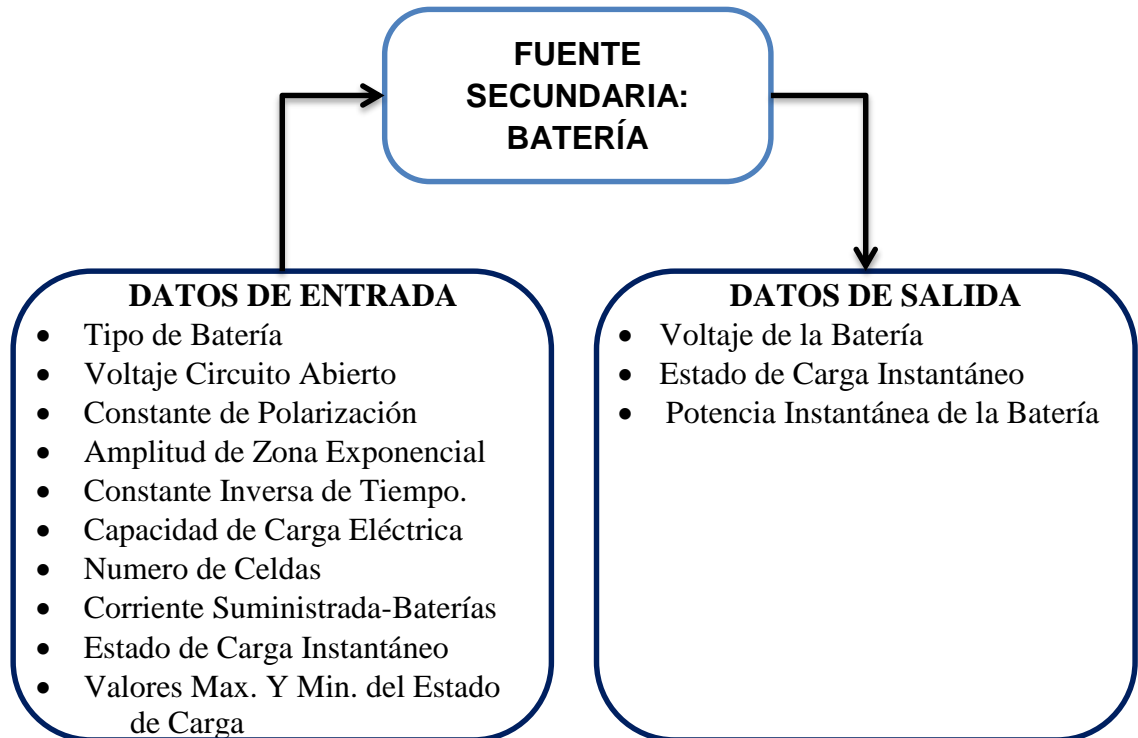
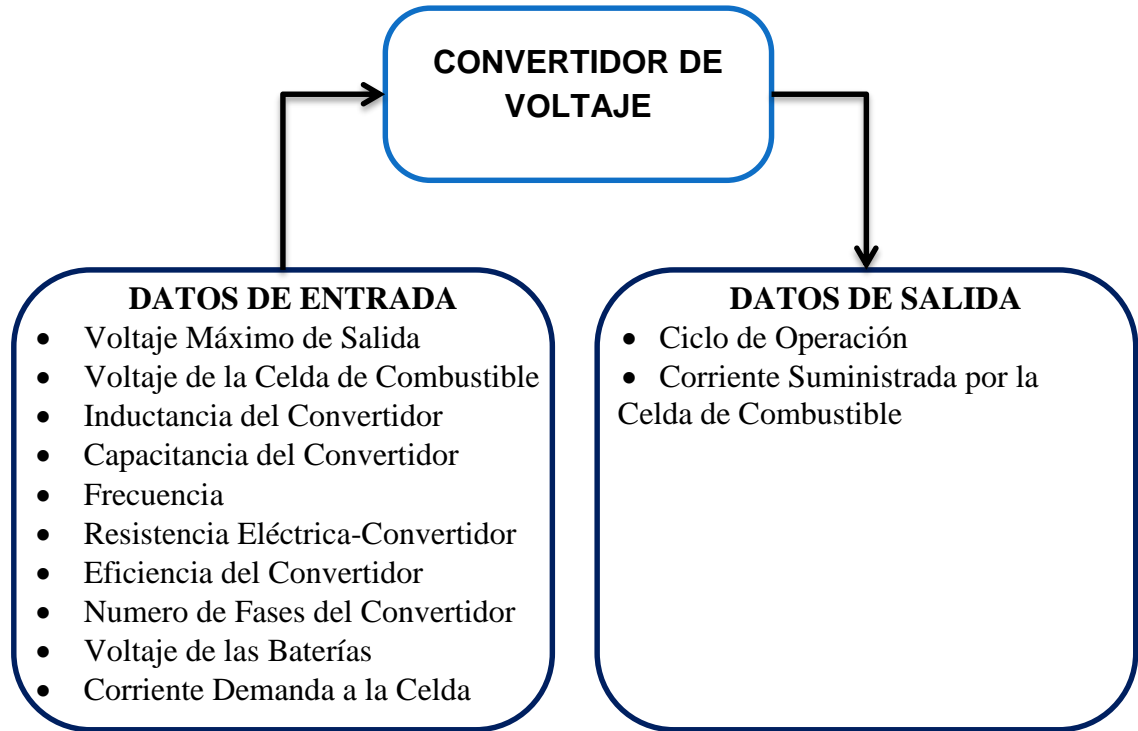
Fuente: El Autor

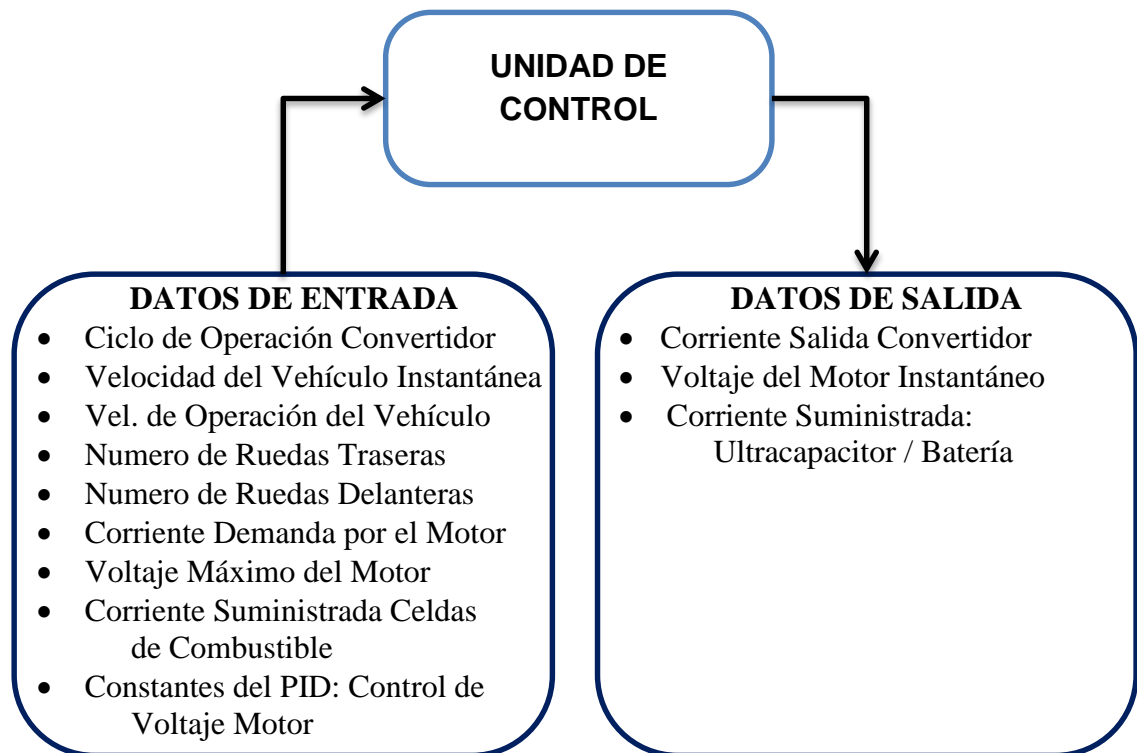
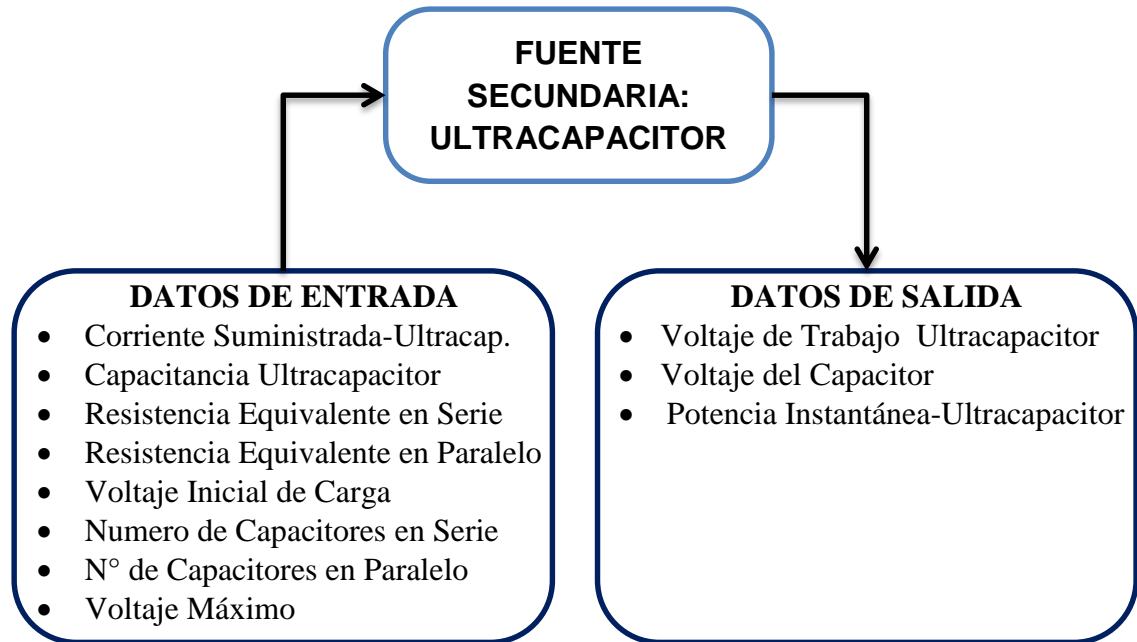
A continuación en la figura 27 se muestran los datos de entrada y de salida de cada uno de los correspondientes subsistemas, mostrados mediante diagramas.

Figura 27. Diagramas de Datos de Entrada y Salida de los Subsistemas











Fuente: El Autor

3.2 INTERFAZ DEL PROGRAMA Y SUS PARTES

La interfaz principal del programa, figura 28, permite al usuario ingresar de manera sencilla a cada uno de los componentes que constituyen el modelo de un vehículo eléctrico con celdas de combustible representados mediante una serie de imágenes creando así un ambiente de trabajo más intuitivo; al dar click en alguna de las imágenes, se despliega el panel correspondiente al lado izquierdo de la pantalla, en el cual se puede modificar los parámetros de operación de dicho componente. Lo anterior es completamente válido para los siguientes comandos:

- Parámetros Ruedas
- Parámetros de los Motores Eléctricos
- Parámetros Ultracapacitor
- Parámetros del Convertidor de Voltaje
- Configuración de Visualización de Resultados

Figura 28. Interfaz Principal del Programa de Simulación Desarrollado



Fuente. El autor

Existen además dos secciones especiales, que corresponden a la mayoría del desarrollo del programa, en los cuales al dar click en la imagen correspondiente

cambia la pantalla de visualización donde nos permite de igual manera introducir o cambiar los parámetros de operación, tales comandos son:

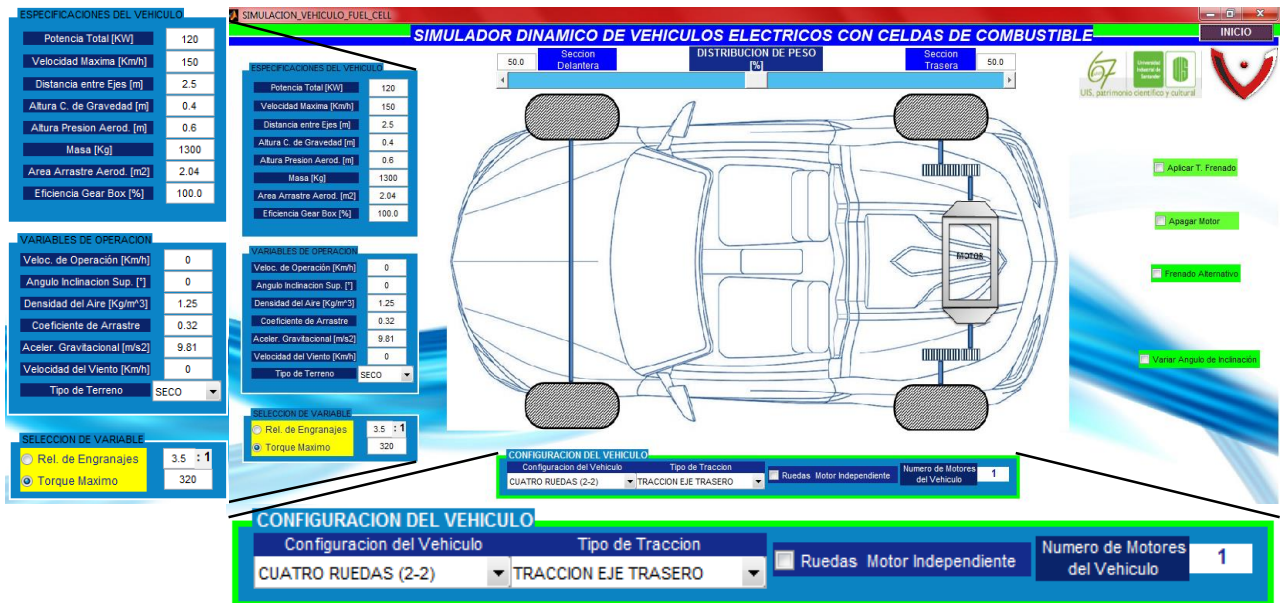
- Parámetros del Vehículo
- Parámetros de la Celda de Combustible

En estas dos secciones se centran las funciones y parámetros de simulación principales.

La interfaz del programa fue de desarrollada con la característica de permitir al usuario relacionar de manera sencilla los resultados obtenidos con el proceso realizado. Se clasifico diferentes parámetros, tanto de entrada como de salida, de acuerdo a su tipología, agrupándolos en paneles de forma separada e incluso se realizó una distinción por colores, como lo notaremos más adelante.

3.2.1 Sección de Simulación del Vehículo Eléctrico

Figura 29. Interfaz de la Sección de Simulación del Vehículo Eléctrico



Fuente: El autor

Como se ha mencionado anteriormente el programa se puede dividir en dos secciones principales prácticamente independientes. La sección de simulación del vehículo eléctrico, figura 29, presenta una agrupación donde se configuran las variables que definen las dimensiones, las características, las condiciones de operación que definen el modelo de vehículo, ubicados en la parte lateral izquierda

de la interfaz. Ubicado en la parte central de la interfaz tenemos un espacio donde podemos visualizar el modelo o configuración del vehículo escogido para su análisis, referente al número y disposición de ruedas y motores a trabajar, esta selección de configuración se puede realizar en la parte inferior de la imagen.

Una característica del programa, es que se deben estipular los requerimientos de potencia y de velocidad máxima al modelo simulado. Para que nuestro modelo alcance dicha velocidad máxima, el motor eléctrico, debe cumplir ciertas características tanto eléctricas como mecánicas (resistencia eléctrica, coeficiente de viscosidad, constante de torque y de fuerza electromotriz).

Tomando las especificaciones de velocidad máxima y de potencia del modelo a simular y recordando las ecuaciones que describen el comportamiento de los motores eléctricos expuestos en las secciones 1.3.1 y 1.3.2, en el estado inicial ($t = 0; V = 0$) y en el estado estable hallamos estas variables, de la siguiente manera:

Tomando las ecuaciones de los motores eléctricos, en estado estable ($\frac{dI}{dt} = 0; \frac{d\omega}{dt} = 0$), tenemos:

$$P_{elect} = P_{mec} ; P = V_{in} * I = T_m * \omega_m \quad (132)$$

$$K_t I = B \omega_m + T_m \quad (235) ; IR = V_{in} - K_v \omega_m \quad (133)$$

Despejando la corriente I e igualando en ambas ecuaciones:

$$\frac{B \omega_m + T_m}{K_t} = \frac{V_{in} - K_v \omega_m}{R} \quad (134)$$

Despejando la velocidad angular:

$$\omega_m = \frac{K_t * V_{in} - R * T_m}{K_t * K_v + R * B} \quad (135)$$

Considerando que la potencia máxima de un motor se obtiene el punto donde:

$$T_{m@P_{max}} = \frac{T_{max}}{2} \quad y \quad \omega_{m@P_{max}} = \frac{\omega_{max}}{2}$$

Entonces:

$$P_{max} = T_{m@P_{max}} * \omega_{m@P_{max}} = \frac{T_{max} * \omega_{max}}{4} \quad (136)$$

Donde las ecuaciones respectivas para T_{max} y ω_{max} son:

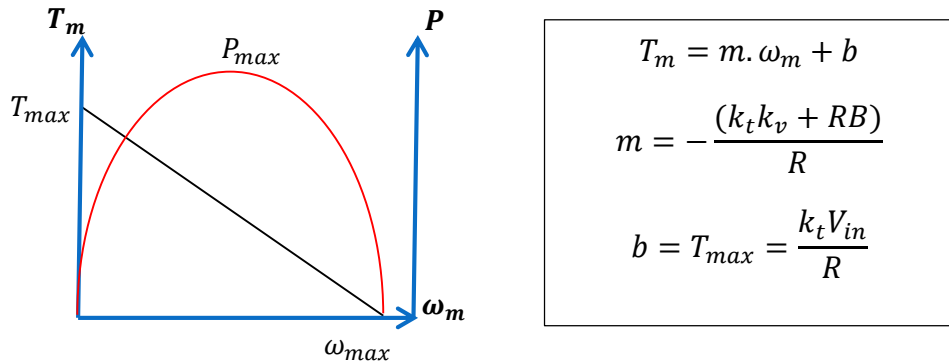
$$T_{max} = k_t * \frac{V_{in}}{R} \quad (240) \quad \text{y} \quad \omega_{max} = \frac{k_t V_{in}}{k_t k_v + RB} \quad (137)$$

Obteniendo así la siguiente ecuación:

$$P_{max} = \frac{(k_t V_{in})^2}{4R(k_t k_v + RB)} \quad (138)$$

Tomando la ecuación 135 de la velocidad angular deducida anteriormente, notamos que tiene una forma lineal, como se aprecia en la figura 30.

Figura 30. Comportamiento Teórico Torque y Potencia del Motor Eléctrico en Función de la Velocidad Angular



Fuente: El Autor

Resolviendo el sistema de ecuaciones, podemos hallar los parámetros técnicos del motor requerido para impulsar el vehículo a las especificaciones dadas.

$$B = T_m \left(\frac{RT_{max}}{V_{in}^2} - \frac{1}{\omega_m} \right); \quad K_v = \frac{V_{in}^2 - T_m \omega_m R}{V_{in} \omega_m}; \quad K_t = \frac{RT_{max}}{V_{in}} \quad (139)$$

$$B > 0 \Rightarrow R > \frac{V_{in}^2}{T_{max}\omega_m} ; K_v > 0 \Rightarrow R < \frac{V_{in}^2}{T_m\omega_m}$$

Por lo tanto el valor de la resistencia del motor debe estar en el rango de:

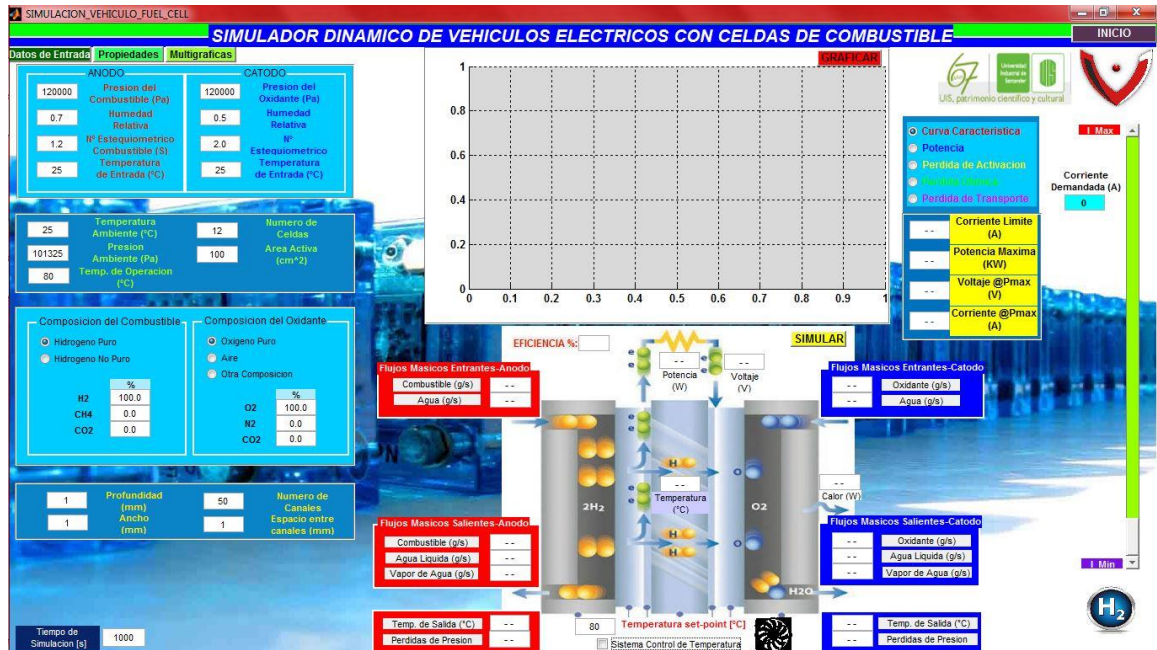
$$\frac{V_{in}^2}{T_{max}\omega_m} < R < \frac{V_{in}^2}{T_m\omega_m} \quad (140)$$

Se implementó en el programa *SIDVEC* la función de calcular estos parámetros, tomando un valor de R promedio del rango permisible, para esto ingresamos al sistema los parámetros requeridos de potencia y velocidad máxima en la sección de simulación de vehículo, después nos dirigimos a los “*Parámetros de los Motores Eléctricos*” desde la interfaz principal y oprimimos el botón “*CALCULAR PÁRAMETROS MOTORES*”, ubicado en dentro del panel correspondiente, e inmediatamente los resultados son visualizados.

Antes de realizar este cálculo necesitamos de un tercer parámetro, que nuestro programa tiene la opción de elegir entre la relación de engranajes (G_r) y el torque máximo del motor (T_{max}), dependiendo del parámetro disponible. A partir de la obtención de estas variables podemos proceder a la simulación respectiva del modelo a evaluar.

3.2.2 Sección de Simulación de la Celda de Combustible. Para salir de la sección del vehículo e ingresar a la de la celda de combustible, oprimimos el botón “*INICIO*” y oprimimos en la interfaz principal la imagen correspondiente. Analizando esta sección, podemos encontrar en su interfaz, figura 31, diversos parámetros de funcionamiento, los cuales están divididos principalmente en tres categorías (datos, propiedades y multigráficas), las cuales podemos acceder mediante una serie de pestañas ubicadas en la parte superior izquierda. Al oprimir algunas de las pestañas, estas nos permitirán visualizar los parámetros correspondientes en la lateral izquierda de la interfaz, figura 32.

Figura 31. Interfaz de la Sección de Simulación de la Celda de Combustible



Fuente: El autor

En la pestaña “*Datos de Entrada*”, se despliega varios paneles que aparecen incluso por defecto al ingresar a esta sección, la cual permite al usuario configurar las condiciones de entradas de los gases reactantes en el ánodo y el cátodo, al igual que unas propiedades en común de la celda como el área, el número de celdas, etc. También se permite la modificación de la composición de los gases reactantes (Hidrógeno puro/no puro, oxígeno puro/no puro, aire u otras combinaciones) para así observar el efecto que causa sobre el desempeño de la celda. También existe una pequeña área que nos permite modificar las dimensiones de los canales del campo de flujo que como se recordara estos se encuentran mecanizados en las placas bipolares.

Accediendo a la pestaña “*Propiedades*” se despliega un panel que permite al usuario modificar las propiedades geométricas, térmicas y químicas de la celda de combustible, más específicamente, nos permite cambiar los materiales de los cuales constituyen cada uno de los componentes o capas de la celda, con el fin de analizar los efectos del diseño sobre la operación de la celda de combustible. Además en la parte inferior de este mismo panel, podemos observar una imagen, la cual nos indica la configuración del campo de flujo en la placa bipolar, los cuales pueden ser modificados al desplegar una lista preestablecida, con el propósito de observar la influencia de la disposición de los canales en el desempeño de la celda.

Figura 32. Panel de Datos de Entrada y de Propiedades

ANODO

120000	Presión del Combustible (Pa)
0.7	Humedad Relativa
1.2	Nº Estequiométrico Combustible (S)
25	Temperatura de Entrada (°C)

CATODO

120000	Presión del Oxidante (Pa)
0.5	Humedad Relativa
2.0	Nº Estequiométrico oxidante (S)
25	Temperatura de Entrada (°C)

Propiedades de entrada Gases reactantes Ánodo/Cátodo

Condiciones de Operación

25	Temperatura Ambiente (°C)	12	Numero de Celdas del stack
101325	Presión Ambiente (Pa)	0.01	Área activa (m²)
80	Temp. de Operación (°C)		

Numero de Celdas y Área Activa del Stack

Composición Química de los gases reactantes

Composición del Combustible

Hidrogeno Puro
 Hidrogeno No Puro

	%
H2	100.0
CH4	0.0
CO2	0.0

Composición del Oxidante

Oxigeno Puro
 Aire
 Otra Composición

	%
O2	21
N2	79
CO2	0

Propiedades de la Celda de Combustible

A continuación se muestra los materiales y sus correspondientes propiedades (geométricas, térmicas, químicas, etc.) que constituye la Celda de Combustible, las cuales fueron utilizadas en la simulación:

Material	X [m]	K [W/(K*m)]	Cp [J/(K*kg)]	p [ohm*m]	dens [Kg/m³]	
Placa Final Anodo	Aluminio	1e-2	237	900	--	2698.4
Placa Colectora Anodo	Cobre	1e-3	400	385	--	8960
Placa Bipolar Anodo	Grafito	1.2e-3	78	711	60e-8	2230
MEA	Nafion ...	50.8e-6	26	864	50.12e-8	1300
Placa Bipolar Catodo	Grafito	1.2e-3	78	711	60e-8	2230
Placa Colectora Catodo	Cobre	1e-3	400	385	--	8960
Placa Final Catodo	Aluminio	1e-2	237	900	--	2698.4

Dimensiones de los canales de Flujo

1	Profundidad (mm)	50	Numero de Canales
1	Ancho (mm)	1	Espacio entre canales (mm)

Selección de los Materiales y de la celda y sus propiedades

Características Varias

Material del Catalizador	Platino	i ₀ [A/m²]	5
Configuración Campo de Flujo	Paralela	Numero de Pasos	1
Espesor GDL [m]	0.0002		
Porosidad Membrana	0.4		
Emisividad	0.85		
Coefficiente de Conveccion ext	12		

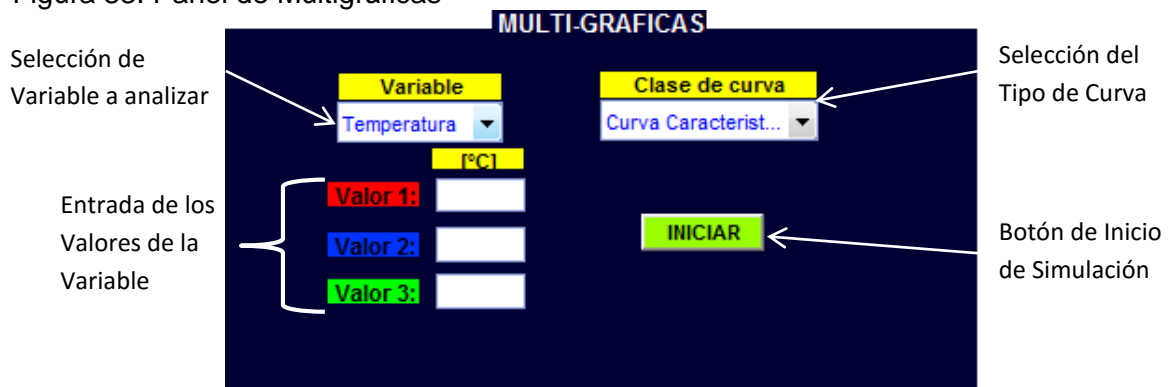
Representación Gráfica del Campo de Flujos

Reestablecer Valores Iniciales

Fuente: El autor

Por último tenemos la pestaña “*Multigráficas*” que despliega un panel especial, ver figura 33, que tiene la función de crear tres curvas del mismo tipo (curva característica, potencia, pérdidas de activación, etc.) en una misma área gráfica para realizar análisis paramétricos, las cuales permiten comparar el comportamiento de la celda al variar uno de sus parámetros (presión, temperatura o humedad relativa) y analizar el efecto que tiene esta variable, la cual puede ser elegida en el mismo panel, el resto de propiedades y parámetros quedan constantes, los cuales son configurados en las pestañas de *Datos de Entrada* y *Propiedades*.

Figura 33. Panel de Multigráficas



Fuente: El autor

3.2.3 Visualización de Gráficas y Resultados. El propósito principal de cualquier programa de simulación es de mostrar mediante valores numéricos y gráficas que muestren de manera de fácil la interpretación de los resultados de la simulación del modelo.

En la sección de “*Configuración de Visualización de Resultados*”, en la se ingresa desde la interfaz principal por la imagen correspondiente, se puede seleccionar las gráficas que deseamos visualizar de manera independiente, las opciones son:

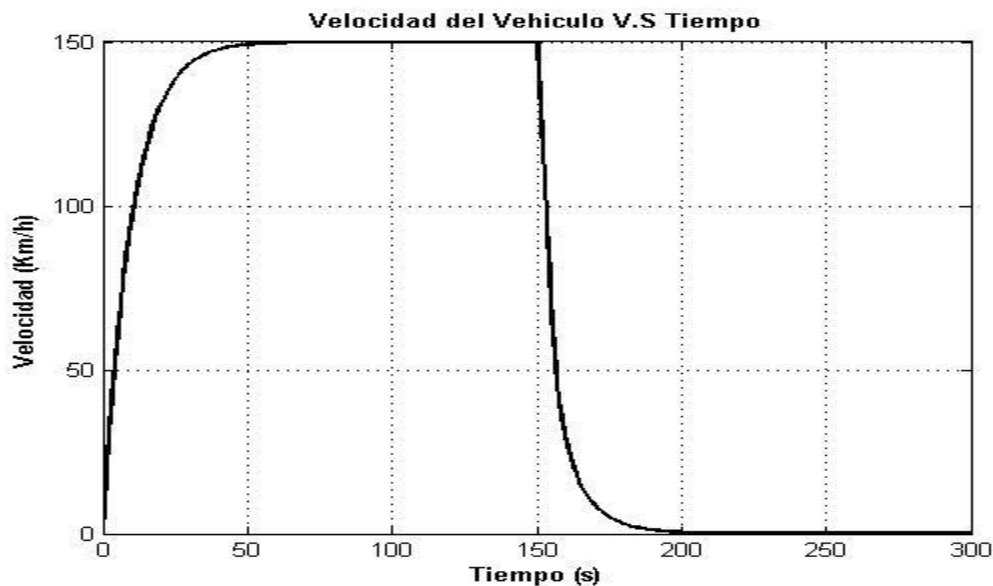
- Velocidad del Vehículo
- Aceleración del Vehículo
- Motor Trasero
- Motor Delantero
- Temperatura de la Celda de Combustible
- Voltaje y Corriente de la Celda de Combustible
- Estado de Voltaje y Corriente del Ultracapacitor

Al finalizar la simulación en este mismo panel podemos observar los resultados obtenidos y las gráficas generadas (si se eligió alguna), los resultados a visualizar incluyen valores máximos durante la simulación y los últimos valores alcanzados al finalizar la simulación. El simulador presenta una característica importante, porque no solo permite simular el desempeño de aceleración del vehículo, sino también el comportamiento de desaceleración, esto se logra de dos maneras:

- **Desaceleración Inercial:** en el cual en un tiempo determinado, los motores son desconectados de su fuente de alimentación, y simplemente el auto disminuye su velocidad progresivamente.
- **Desaceleración por Frenado:** en este caso en un tiempo estipulado es aplicado en sus ruedas un torque de frenado, simulando el sistema de frenado del vehículo, produciendo así una desaceleración del modelo.

Las gráficas obtenidas mostraran el comportamiento del vehículo durante toda la simulación con o sin desaceleración como se observa en la figura 34. Estas gráficas no cuentan con espacio de visualización especial dentro de la interfaz, debido a que se consideró que es más cómodo una visualización por separado para permitir un mejor detalle de esta.

Figura 34. Gráficas de Velocidad Obtenidos por el Programa

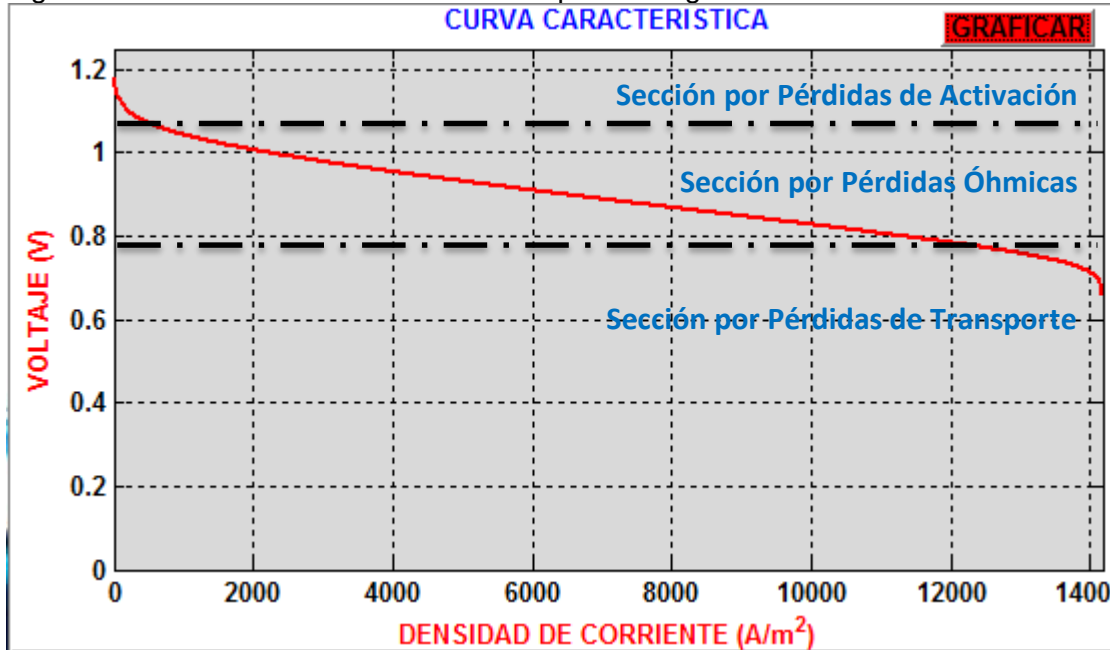


Fuente: El autor

Existen además otros resultados que son de gran importancia dado que son estos los que permiten enlazar con la sección de la celda de combustible, figuras 35 y 34, el programa nos muestra en la parte inferior del panel como resultado los

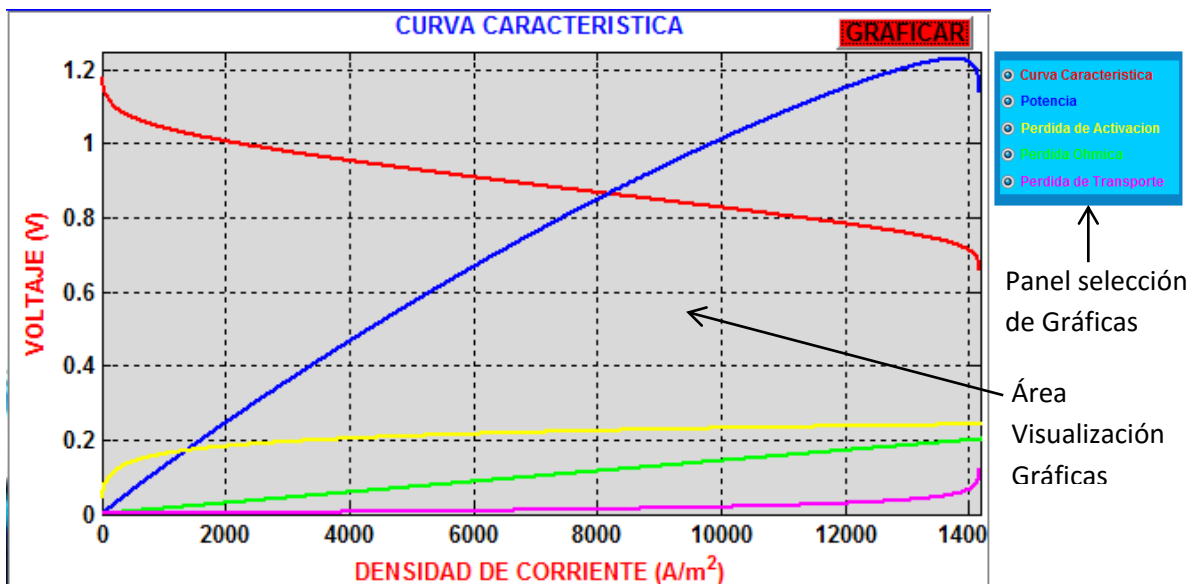
valores de voltaje y de corriente que debe ser suministradas por la celda de combustible a los motores, a partir de allí podemos ingresar a configurar los parámetros operacionales de la celda de combustible y realizar las correspondientes simulaciones.

Figura 35. Curva Característica Graficada por el Programa



Fuente: El autor

Figura 36. Visualización de Todas las Gráficas de Forma Simultánea

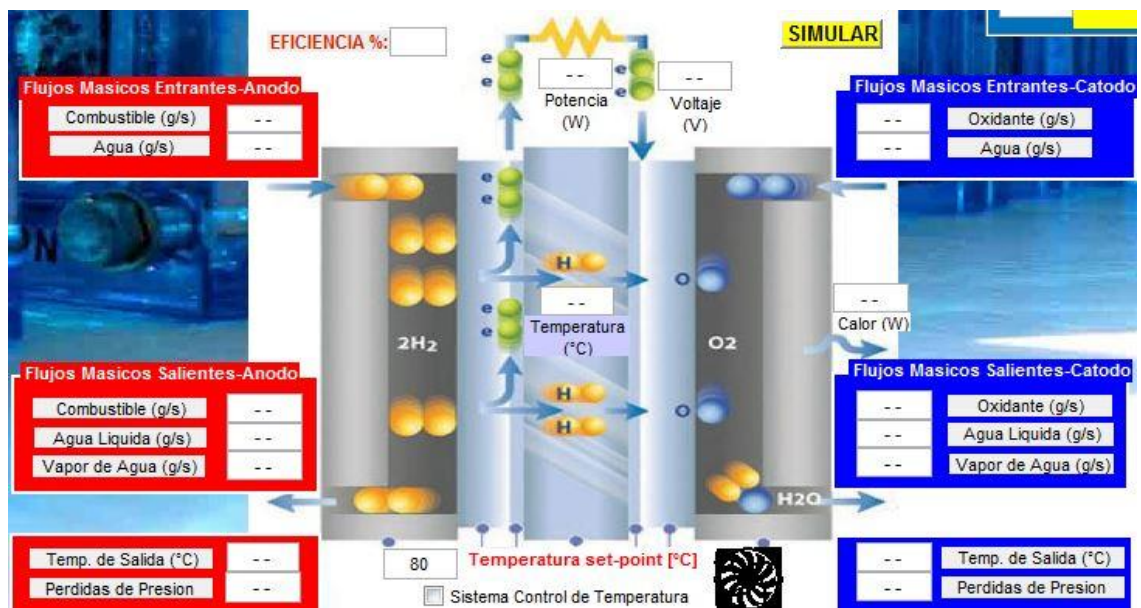


Fuente: El autor

Ubicados en la sección de la celda de combustible, podemos principalmente dos estados de simulación:

- **Simulación en estado estable:** en el cual las condiciones de presión y temperatura se encuentra constantes y se varia el valor de la corriente, para obtener en cada punto los valores de los voltajes que maneja la celda y de esta manera graficar la curva característica, los voltajes de pérdidas y la potencia, las cuales son visualizadas en el área central de la interfaz y pueden ser visualizadas o no según el interés del usuario.
- **Simulación en estado transitorio:** En la parte central inferior de la interfaz, figura 37, podemos observar un esquema de la operación de una celda de combustible, donde se visualizan los valores de los flujos entrantes y salientes de los gases reactantes y del agua en estado líquido o vapor. En este caso la temperatura y la presión de la celda son variantes en el tiempo, mientras la corriente permanece constante. La gráfica obtenida representa el comportamiento de la temperatura de la celda durante el tiempo de simulación. Además se mostrara la potencia, el calor generado y la eficiencia de la celda de combustible con las condiciones alcanzadas.

Figura 37. Área de Visualización de Resultados de la Simulación en estado Transitorio



Fuente. El autor

3.3 MODELAMIENTO EN SIMULINK

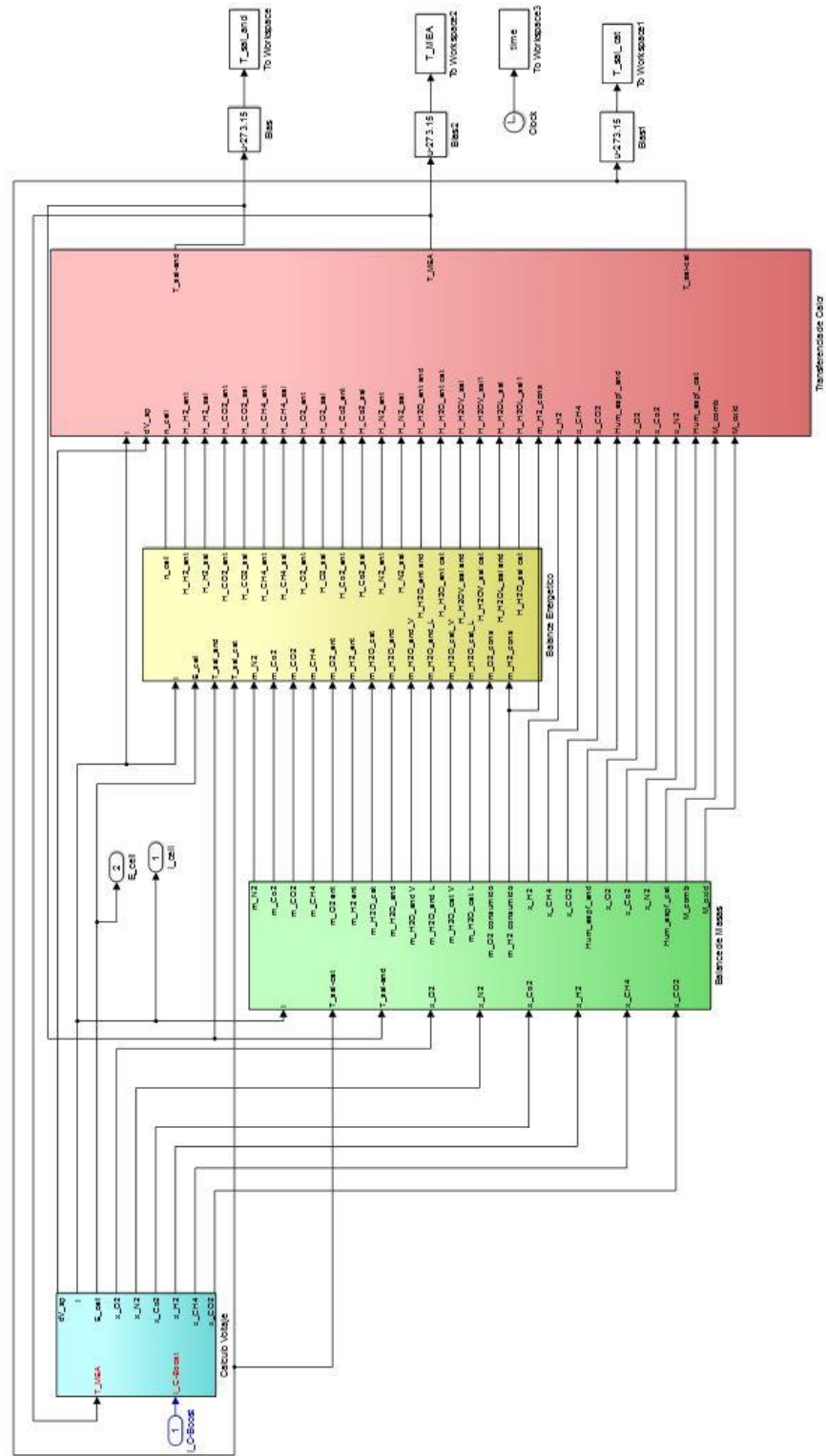
En este capítulo se analizará el proceso del programa desarrollado en *Simulink* de *Matlab*, para el modelamiento y simulación del funcionamiento de un vehículo eléctrico operando con una celda de combustible tipo PEM, utilizando las ecuaciones anteriormente descriptivas en los capítulos previos. Veremos de forma general la programación y la interacción entre los diferentes bloques creados para realizar la simulación tanto en la sección del vehículo como en la sección de la celda de combustible. Para ver todos los bloques completos de los subsistemas ver Anexo G.

3.3.1 Modelo Simulink: Sección Vehículo. La realización de todo el programa fue hecha dentro del archivo nombrado “*DINAMICA_FCEV.mdl*”, a continuación se muestra en la figura 38 el esquema general del programa, el cual está dividido en diversos bloques donde se agruparon las ecuaciones de acuerdo a la variable central a calcular, además fueron diferenciados por dos tonos de colores, los bloques que calculan las variables de la parte frontal y trasera del vehículo.

Los bloques que representan los subsistemas principales son nombrados como:

- Cálculo Fuerza Normal Rueda Delantera
- Cálculo Fuerza Normal Rueda Trasera
- Cálculo Torque Rueda Delantera
- Cálculo Torque Rueda Trasera
- Caja de Transmisión Rueda Delantera
- Caja de Transmisión Rueda Trasera
- Cálculo Corriente y Velocidad Angular Motor Delantero
- Cálculo Corriente y Velocidad Angular Motor Trasero
- Cálculo Aceleración
- Convertidor Boost DC-DC
- Banco Ultracapacitores
- Batería
- Unidad de Control
- Stack Fuel Cell

Figura 39. Diagrama de bloques global del modelo de la celda de combustible

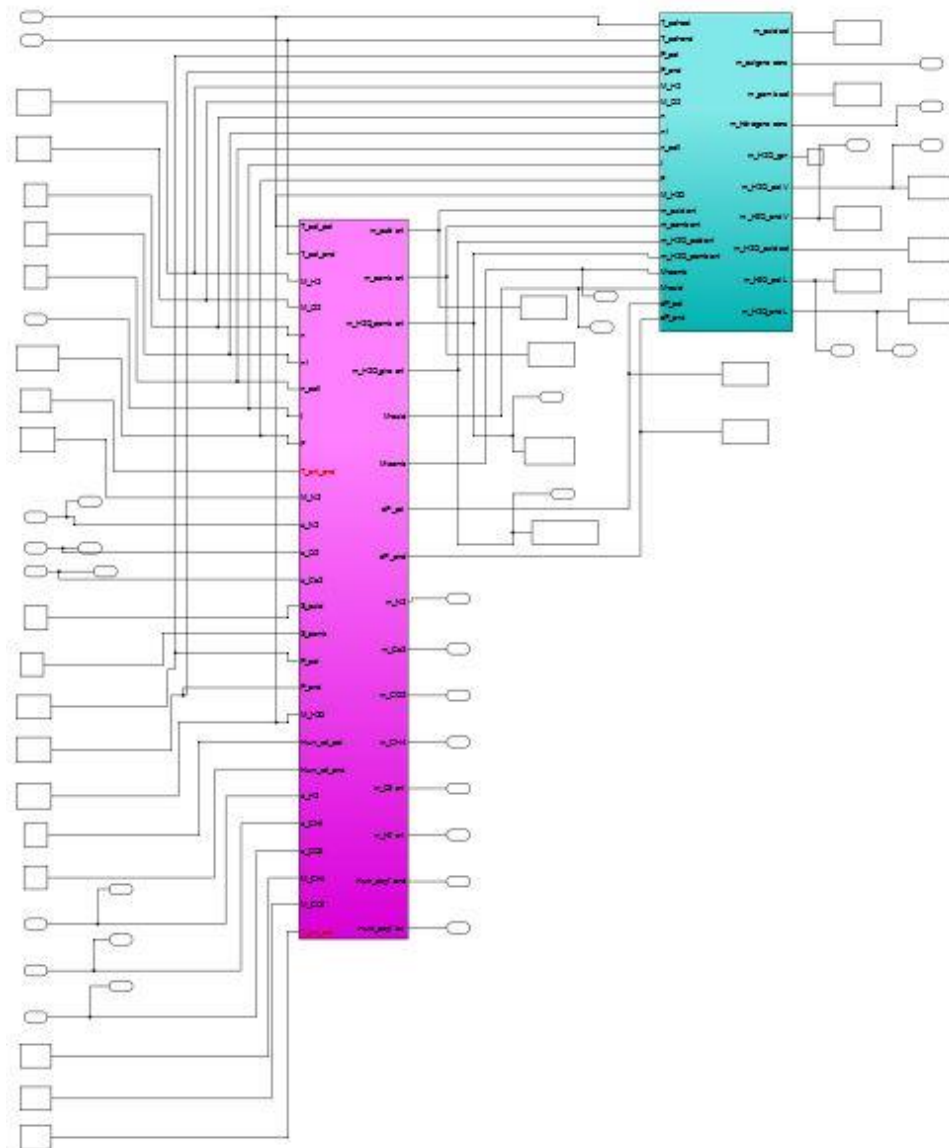


Fuente: El autor

3.3.1.1 Bloque Subsistema: Balance de Masas. Como ya se había mencionado, el programa también permite al usuario conocer el flujo másico necesario a la entrada de los gases para el funcionamiento de la celda de combustible, de acuerdo a los datos de entrada. Además calcula los flujos másicos de salida tanto en el ánodo como del cátodo de los gases que no reaccionaron y la cantidad de agua expulsada (líquido o vapor) de la celda.

En la siguiente figura se muestra el diagrama del balance de masa creado en Simulink, a partir de las ecuaciones manejadas en la sección 2.3.

Figura 40. Diagrama de balance de masas



Fuente: El autor

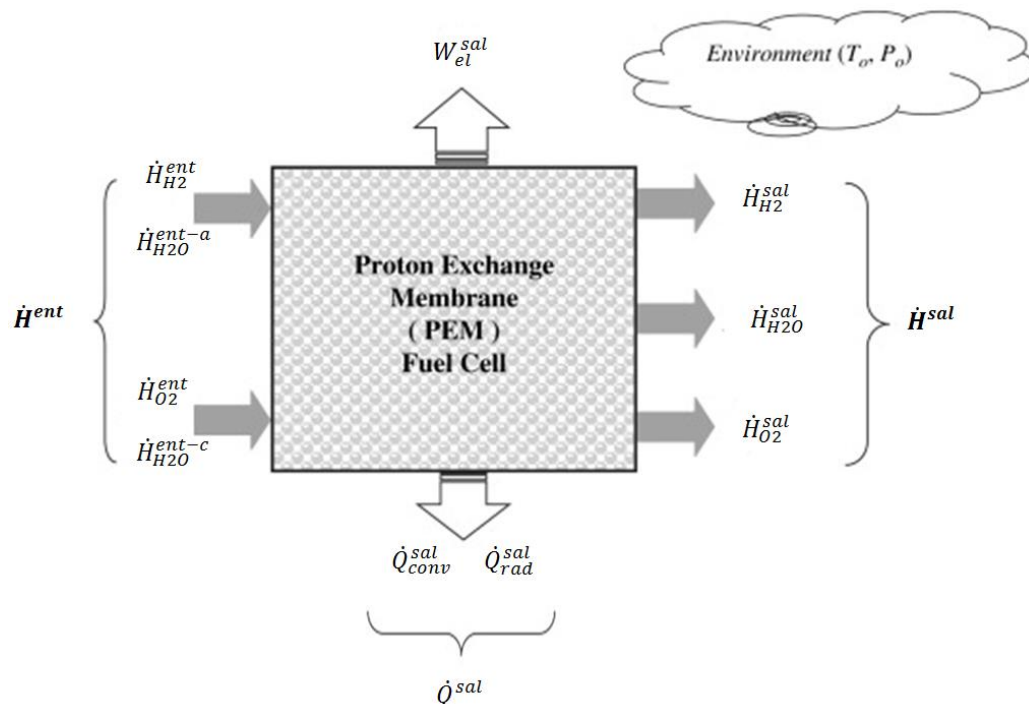
3.3.1.2 Bloque Subsistemas: Balance Energético. El programa tiene la capacidad de hacer un balance de energía, que fue previamente analizada en la sección 2.4 y representado en la figura 41, con el fin de calcular el calor generado por la celda de combustible y por lo tanto conocer la eficiencia con la cual la celda está operando, para lo cual hacemos un análisis utilizando la primera ley de la termodinámica en un volumen de control (ver sección 2.1.1). Todas las contribuciones al balance de energía tienen que ser determinadas. La suma de los flujos de energía debida a los flujos de masas dentro y fuera del volumen de control, la tasa neta de la transferencia de calor y la tasa de trabajo están incluidas. [44]

La primera ley puede ser representada por la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dU}{dt} = \dot{H}_{gases}^{ent} - \dot{H}_{gases}^{sal} - \dot{Q} - W_{el}$$

Si consideramos el sistema en estado estable, $\frac{dU}{dt} = 0$

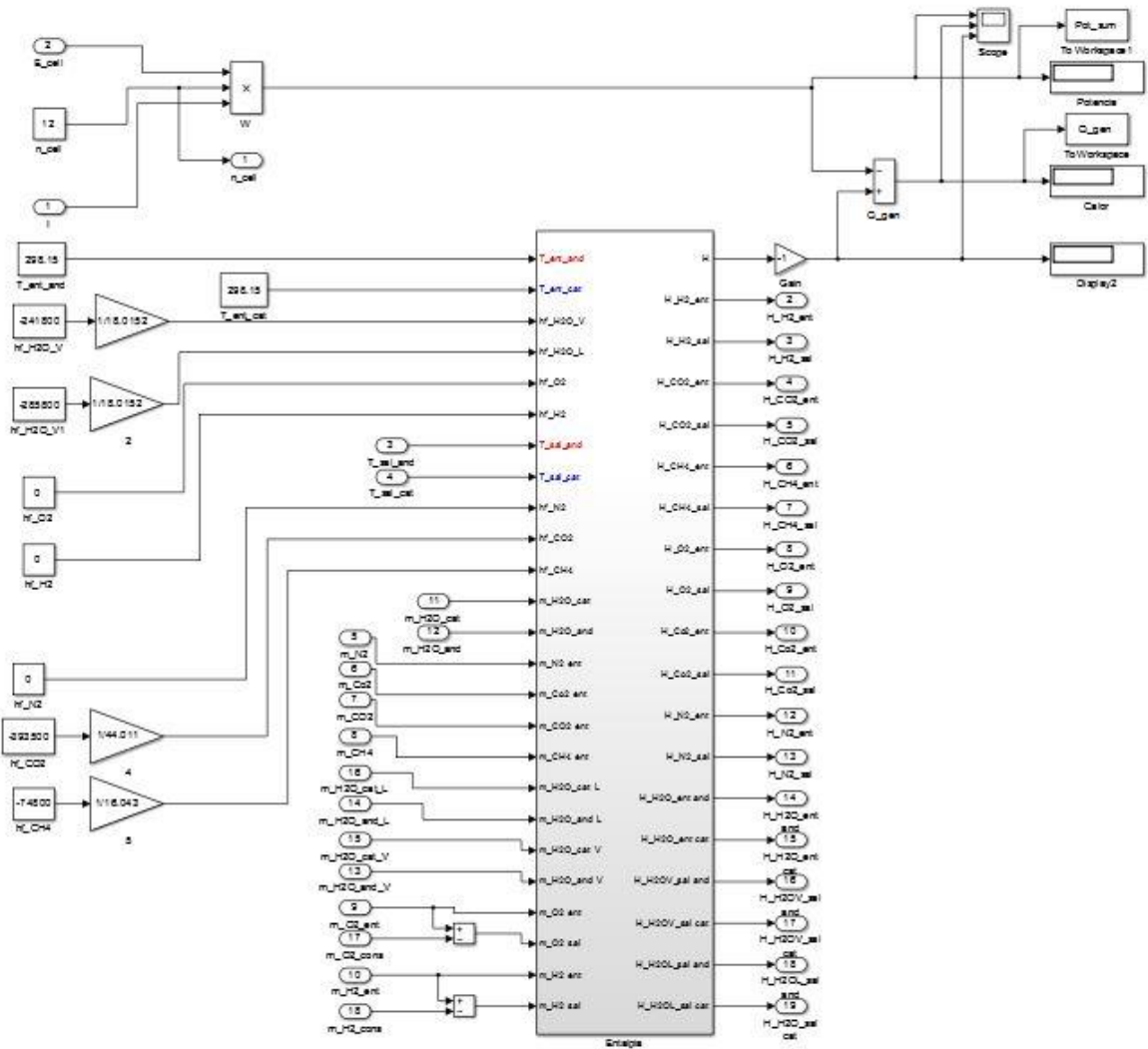
Figura 41. Diagrama esquemático del volumen de control de una celda de combustible



Fuente: <http://origin-ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0360319909003425-gr1.jpg>

En la siguiente figura se muestra el diagrama de bloques creado para el balance energético:

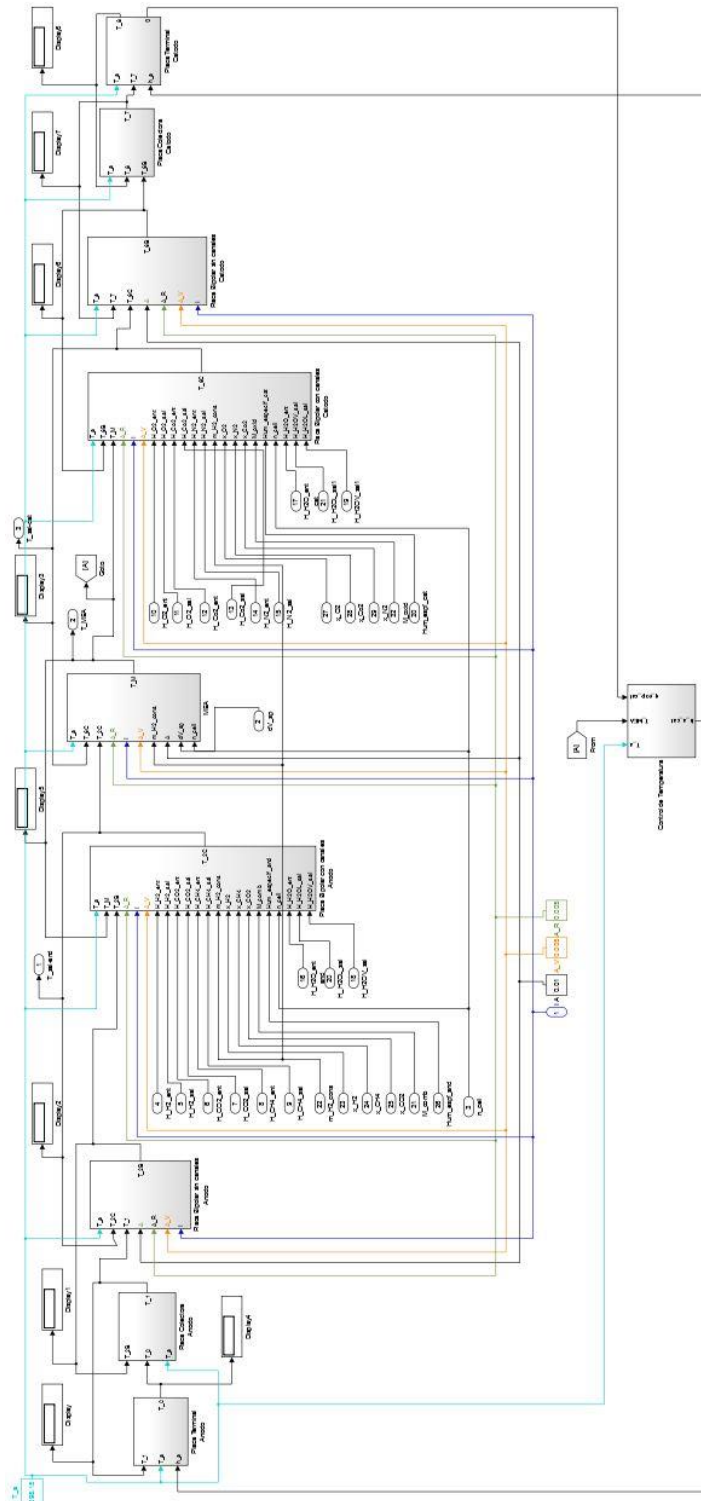
Figura 42. Diagrama de balance de energía



Fuente: El autor

3.3.1.3 Bloque Subsistema: Transferencia de Calor

Figura 43. Diagrama de Transferencia de Calor en Simulink



Fuente: El autor

En este subsistema se encuentran modelados el comportamiento termodinámico de cada una de las placas que conforman una celda de combustible, utilizando los modelos matemáticos por diferencias finitas vistas en la sección 2.5.2, tal modelo nos permite calcular la variación de la temperatura en función del tiempo, de cada una placas en estado transitorio y obtener la temperatura de cada placa cuando alcanza el estado estable. Las placas analizadas como se recordaran son:

- Placa Extremo Ánodo
- Placa Colectora Ánodo
- Placa Bipolar sin Campo de flujos Ánodo
- Placa Bipolar con Campo de flujos Ánodo
- Ensemble de Electrodo-Membrana (MEA)
- Placa Bipolar con Campo de flujos Cátodo
- Placa Bipolar sin Campo de flujos Cátodo
- Placa Colectora Cátodo
- Placa Extremo Cátodo

Además este subsistema cuenta con un Sistema de Control de Temperatura (**STC**), el cual emula el sistema de refrigeración y control de temperatura que poseen los stacks de media y alta potencia, esto nos permite controlar la temperatura, a través de la interfaz, a la cual debe llegar la celda de combustible y así establecer su condición en estado estable.

4 PRUEBAS, ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO - SIDVEC

Para realizar la validación del simulador del comportamiento dinámico de vehículos eléctricos impulsado con celdas de combustible de hidrógeno, (**SIDVEC**), se analizará un modelo real y se comparará los resultados del comportamiento de aceleración y de potencia requeridas del vehículo, con respecto a las características eléctricas de voltaje y de consumo de corriente que debe suministrar la celda de combustible, al igual que el consumo de combustible y la autonomía.

Figura 44. Vehículo a Hidrógeno MIRAI de Toyota

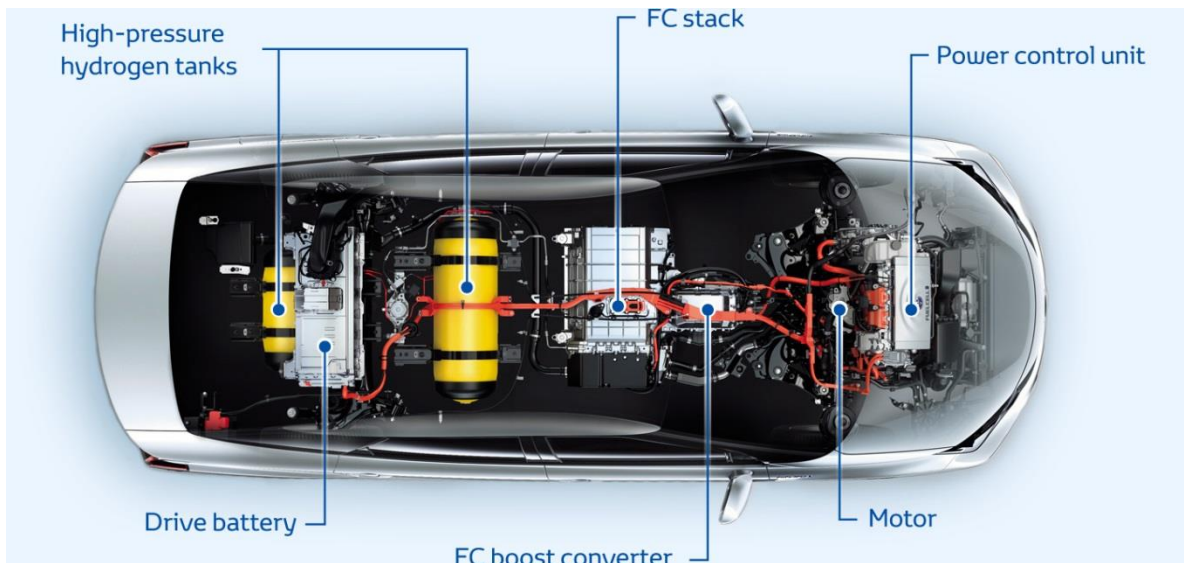


Fuente: http://insideevs.com/wp-content/uploads/2014/11/2016_Toyota_Fuel_Cell_Vehicle_014.jpg

El modelo escogido para nuestro análisis y validación del programa, es el auto *MIRAI*, un vehículo tipo sedán con celda de combustible desarrollado por la compañía Japonesa de Toyota, lanzado al mercado en Diciembre del 2014 y hasta la fecha solo disponible en Japón. El proceso de elección del modelo a simular se

basó primero en la búsqueda de vehículos comerciales completamente desarrollados (no prototipos), que se encontraran disponibles en el mercado y además que sus características de diseño y funcionalidad sean similares a un auto común de combustión interna, para demostrar que el desempeño que se obtiene con estos tipos de autos es igual o superior a los del común, sin sacrificar comodidad y lujo. Otros modelos analizados fueron: el *FCX Clarity* de Honda y el *iX35 FCEV* de Hyundai. Entre los modelos vistos se optó por el MIRAI dado que a pesar de ser actualmente el modelo más reciente de los vehículos a hidrógeno, tanto como para la misma compañía Honda como para muchos expertos, se tienen altas expectativas de que con este modelo se abra el mercado de manera masiva para la producción y venta. Además se debe tener en cuenta que para realizar la modelación de cualquier vehículo, se debe tener a disposición la información para completar todos los parámetros requeridos para la simulación, y muchos de estos parámetros no son de opinión pública, la información suministrada por Honda en su página web de su vehículo, era muy completa y suficiente para realizar la simulación.

Figura 45. Vista Interior de los Componentes del Auto MIRAI de Toyota



Fuente: http://www.toyota-global.com/innovation/environmental_technology/fuelcell_vehicle/

Los parámetros y variables ingresadas en nuestro programa de simulación, gran parte fueron tomadas de las especificaciones técnicas del MIRAI, el complemento de estas se basaron en datos promedios encontrados en diseños de vehículos eléctricos e híbridos eléctricos tales como el *ROADSTER* de Tesla, el *VOLT* de

Chevrolet, el *PRIUS* Híbrido de Toyota, el *BMW i3*, entre otros. Para conocer los detalles completos del modelo MIRAI, ver Anexo A.

4.1 SIMULACIÓN DEL MODELO DE FCEV Y SUS COMPONENTES

La realización de la simulación para un vehículo eléctrico con celdas de combustible (FCEV) en nuestro programa desarrollado, requiere estipular los parámetros de operación no solo de las variables de la física del movimiento del vehículo, sino además de cada uno los componentes principales tanto mecánicos como eléctricos. Los datos recopilados del modelo real en que nos basaremos para nuestra simulación es limitada, para realizar una simulación lo más precisa posible se requiere de muchos parámetros y características que solo el fabricante cuenta.

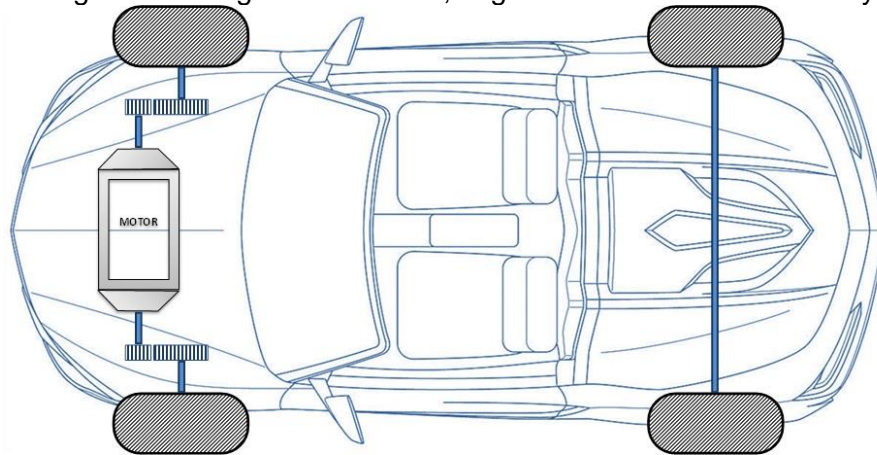
En esta sección se irán definiendo los parámetros de funcionamiento de los elementos como los motores eléctricos, el convertidor de voltaje Boost, la fuente secundaria y principalmente de las celdas de combustible para completar la información necesaria para la simulación, también se analizará el comportamiento del vehículo durante las etapas de arranque, velocidad constante y de frenado.

Es importante aclarar que aunque nuestro modelo se basa en un automóvil real, no podremos realizar una comparación cuantitativa que permita establecer con certeza la exactitud y precisión de la dinámica simulada con nuestro programa, debido al mismo inconveniente de la falta de datos. A pesar de lo anterior se demostrará la viabilidad del desarrollo de sistemas de simulación tanto para la comprensión de la dinámica que define el funcionamiento de los vehículos con celdas de combustible y sus componentes, como para la investigación y desarrollo de futuros diseños, a través del estudio y análisis del desempeño de los modelos a partir de los resultados obtenidos de la simulación.

4.1.1 Configuración del Vehículo y Cálculo de los Parámetros del Motor.

Antes de proceder a la simulación debemos ingresar los valores de los parámetros requeridos, pero ante todo debemos escoger la configuración de nuestro modelo, el cual es un vehículo con cuatro ruedas, con tracción delantera y con un único motor para la propulsión. Al elegir estas características, vemos en la interfaz la siguiente imagen para mostrar la configuración elegida.

Figura 46. Configuración Elegida del Modelo, según el vehículo MIRAI de Toyota



Fuente: El autor

La simulación requiere de muchos parámetros específicos para estipular un modelo lo más real posible y obtener resultados confiables, pero muchos de estos parámetros no se pueden obtener, dado que hacen parte del diseño y especificaciones propios del desarrollo e investigación sobre el vehículo, como por ejemplo los detalles técnicos del motor eléctrico y su sistema de transmisión. Por lo tanto se procede de manera previa a calcular los parámetros faltantes a partir de los requerimientos de desempeño del vehículo.

Tomando las especificaciones de velocidad máxima, torque máximo y de potencia del auto MIRAI, y recordando la función para el cálculo de parámetros de los motores vista en la sección 3.2.1, hallamos las variables (R , B , K_t y K_v). La potencia del vehículo es de 113 KW, con un torque máximo del motor de 335 Nm, alcanza una velocidad máxima de 111 mph ($\approx 180 \text{ Km/h}$), con lo cual obtenemos los siguientes valores documentados en la tabla 4:

Tabla 4. Valores Obtenidos para la Parametrización del Motor Requerido en el Toyota MIRAI

PARÁMETROS	VALORES
Relación de Transmisión de engranajes	5.8858 : 1
Resistencia Eléctrica [Ω]	3.6832
Coefficiente de fricción Viscosa [N.m.s/rad]	0.1047
Constante de Torque [N.m/A]	1.8983
Constante de Fuerza electromotriz [V.s/rad]	0.2031

Fuente: El autor

4.1.2 Simulación Dinámica del Vehículo Eléctrico. Teniendo ahora por completo todas las variables que definen nuestro vehículo, iniciamos la simulación de nuestro modelo, oprimiendo el botón “*INICIAR SIMULACIÓN*”. Por lo cual obtenemos los siguientes resultados tanto en forma numérica, ver tabla 5, como gráfica, ver figuras 47, 48 y 49.

Tabla 5. Resultados Numéricos Obtenidos de la Simulación del Modelo de Vehículo

PARÁMETROS	VALOR			UNIDAD
	Arranque (vel = 0 Km/h)	Vel. constante (vel=180 Km/h)	Valores Máximo	
Torque	334.14	47.7659	335	N.m
Flujo de corriente	176.484	100.82	176.484	A
Vel. de rotación	0.0	13101.6	13101.6	rpm
Velocidad	-	180.02	-	Km/h
Aceleración	4.52594	2.957e-06	-	m/s ²

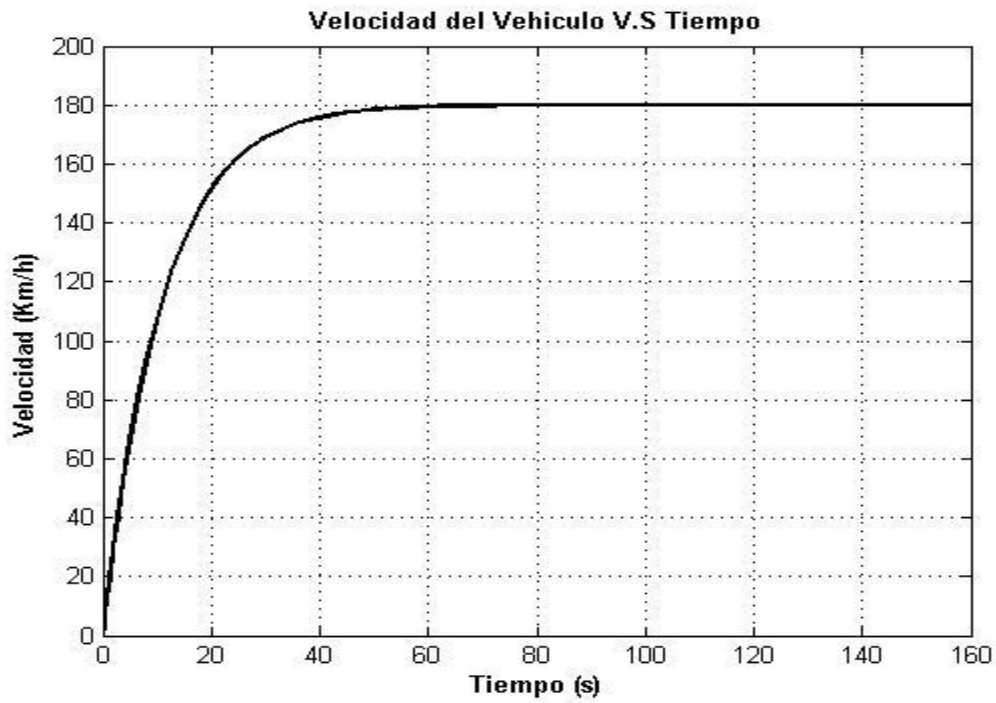
Fuente: El autor

Analizando los datos otorgados por los fabricantes del modelo MIRAI de Toyota, la aceleración que alcanza el automóvil es:

- De 0 a 100 Km/h en 9.6 s, comparando la gráfica de velocidad resultante de la simulación de nuestro modelo vemos que tarda aproximadamente 8.966 s
- De 40 a 70 Km/h en 3.0 s, según nuestro modelo simulado tarda aproximadamente 2.675 s.

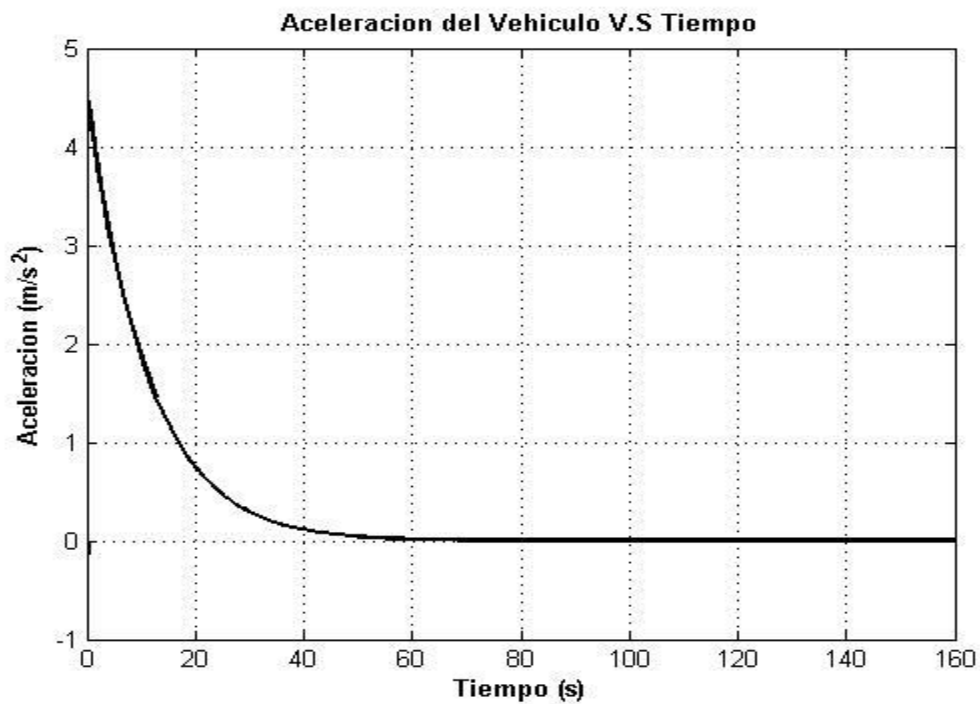
Esta diferencia de valores, puede deberse a la falta de información que maneja los fabricantes, para poder establecer los parámetros reales del vehículo MIRAI en el programa de simulación, para realizar así un modelamiento lo más preciso posible.

Figura 47. Comportamiento del Modelo Simulado: Velocidad



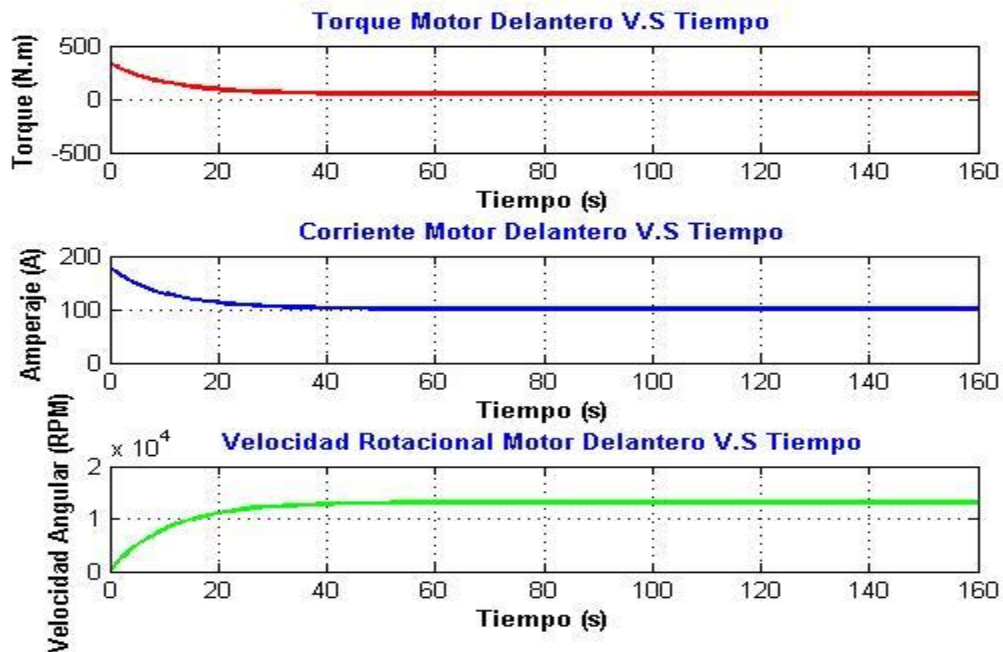
Fuente: El autor

Figura 48. Comportamiento del Modelo Simulado: Aceleración



Fuente: El autor

Figura 49. Comportamiento del Motor: Torque, Corriente y Velocidad Angular



Fuente: El autor

4.1.3 Caracterización y Parametrización del Stack de Celdas de Combustible.

Finalizado la simulación de la dinámica del vehículo, procedemos a analizar las características requeridas de la celda de combustible, para suministrar la energía y potencia necesaria a nuestro vehículo y observar su comportamiento. Nos cambiamos a la sección de celdas de combustible a través del botón "IR A FUEL CELL", ingresamos los valores necesarios de los parámetros. Conocemos el valor de la potencia que debe suministrar el stack de 114 KW, pero desconocemos tanto el voltaje y la corriente de salida, por lo tanto debemos variar las condiciones de operación hasta obtener los resultados requeridos.

Existen muchas variables a configurar en una celda de combustible, pero para nuestro análisis solo variaremos la temperatura de operación y el área activa. Por lo tanto procedemos de la siguiente manera, vamos a utilizar la herramienta "Multigráficas" creada en nuestro programa y explicada en la sección 3.2.2. Ingresando a este panel a través de la pestaña correspondiente, elegimos en Tipo de Variable, Temperatura y en Clase de Gráfica, Potencia, Como primer intento asignamos un valor de 100 cm² al área activa de la celda.

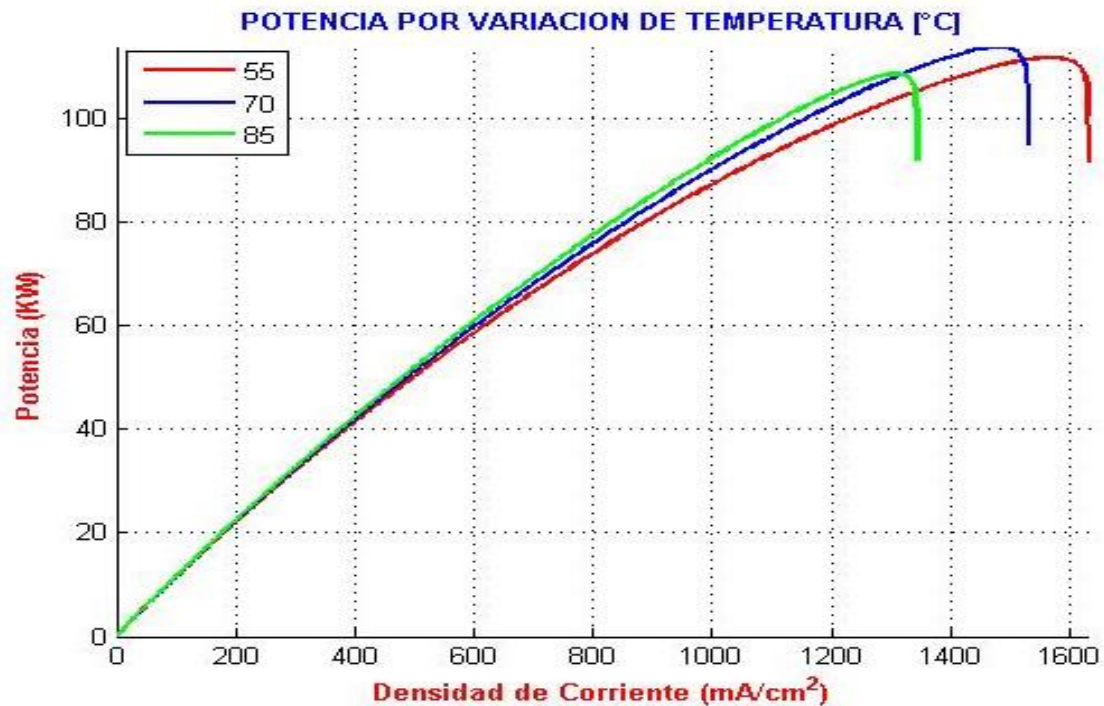
El programa nos pide ingresar tres valores de temperatura que vamos a comparar, las cuales por primer intento escogemos 55, 70 y 85 °C, ver figura 50. Oprimimos el botón “*INICIAR*”, y el programa nos muestra en una sola gráfica las curvas de potencia de la celda de combustible en tres diferentes temperaturas de operación, ver figura 51. Debemos aclarar que lo estamos buscando son los parámetros de operación que permita a la celda de combustible alcanzar una potencia máxima igual a la requerida para nuestro modelo.

Figura 50. Panel de Multigráficas con las Especificaciones para el Primer Análisis Comparativo



Fuente: El autor

Figura 51. Comparación de Potencia de la Celda en Tres Valores Temperatura de Operación



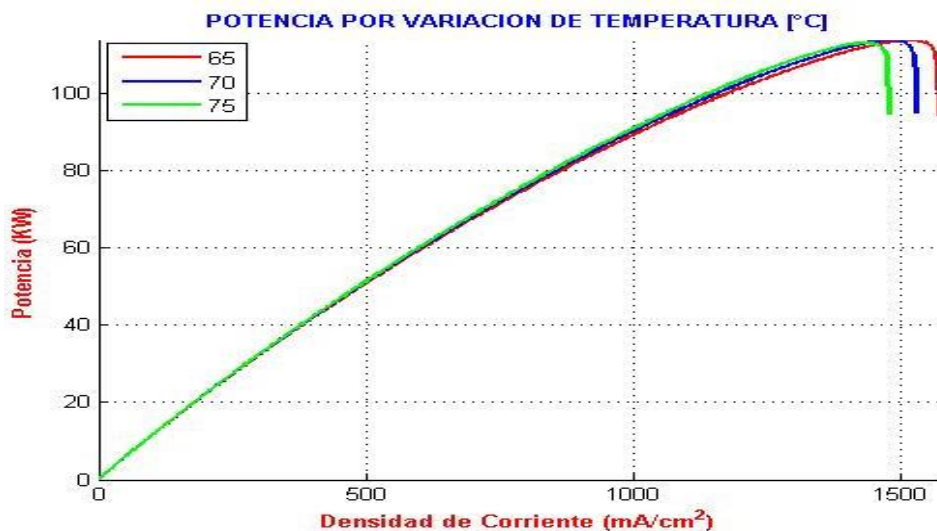
Fuente: El autor

Analizando las gráficas obtenidos por esta herramienta, podemos concluir que:

- Para estas condiciones de trabajo al aumentar la temperatura de operación, la corriente límite disminuye.
- No se obtiene una relación clara con la potencia máxima alcanzada, consiguiendo el máximo valor con $T_{cell_{ope}} = 70^{\circ}C$, el valor medio con $T_{cell_{ope}} = 55^{\circ}C$ y el valor más bajo con $T_{cell_{ope}} = 85^{\circ}C$
- Los valores de temperatura que más nos beneficia son los que alcanza un mayor de corriente límite, debido a que al disminuir la temperatura, para alcanzar el punto de potencia máxima, se requiere una mayor densidad de corriente, lo cual quiere decir que mayor densidad de corriente menor es el área activa requerida para un determinado valor de amperaje.

En este punto del análisis, aun no nos interesa que nuestra celda alcance el valor de potencia requerida, solo buscamos aquella que nos proporcione la máxima energía con la mínima área activa posible, es decir buscamos las condiciones para que nuestra celda de combustible sea la más eficiente posible. Hasta el momento hemos realizado el análisis para tres valores de temperatura, dejando como mejor opción hasta el momento una temperatura de operación de $70^{\circ}C$. El siguiente paso a realizar es continuar realizando este mismo análisis comparativo para otros puntos, para determinar en concreto el comportamiento de la potencia con respecto a la temperatura. Realizando el anterior procedimiento para $T_{cell_{ope}} 65, 70$ y $75^{\circ}C$, obtenemos los resultados mostrados en la figura 52.

Figura 52. Comparación de Potencia de la Celda con Otros Valores de Temperatura de Operación



Fuente: El autor

Analizando las gráficas obtenidas concluimos que la potencia máxima para estos nuevos tres valores se consigue aun a $T_{cell_{ope}} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$, con lo cual hemos reducido aun nuestra búsqueda aun rango más pequeño, pero debido que no existe una forma directa de encontrar las condiciones para alcanzar la máxima potencia del stack, debemos realizar los cálculos para cada temperatura. A continuación se registra los resultados obtenidos para el rango de temperaturas entre 65 a 75 °C:

Tabla 6. Resultados de la Potencia Máxima Alcanzada para el Rango de Temperaturas (65 - 75 °C)

Temperatura [°C]	Potencia máxima [KW]
65	38.0060
66	38.0277
67	38.0397
68	38.0422
69	38.0348
70	38.0170
71	37.9887
72	37.9498
73	37.8995
74	37.8376
75	37.7638

Fuente: El autor

Finalmente encontramos que nuestra celda según los parámetros de funcionamiento establecidos, alcanza su máxima potencia a **68 °C**, el cual se consigue con un valor de potencia máxima de 38.042 KW a un densidad de corriente igual a 463.6 A. Ahora procedemos a manipular el área activa para obtener la potencia máxima requerida. Teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$P_{stack} = V_{stack}I_{stack} = n_{cell}V_{cell}i_{cell}A_{act}$$

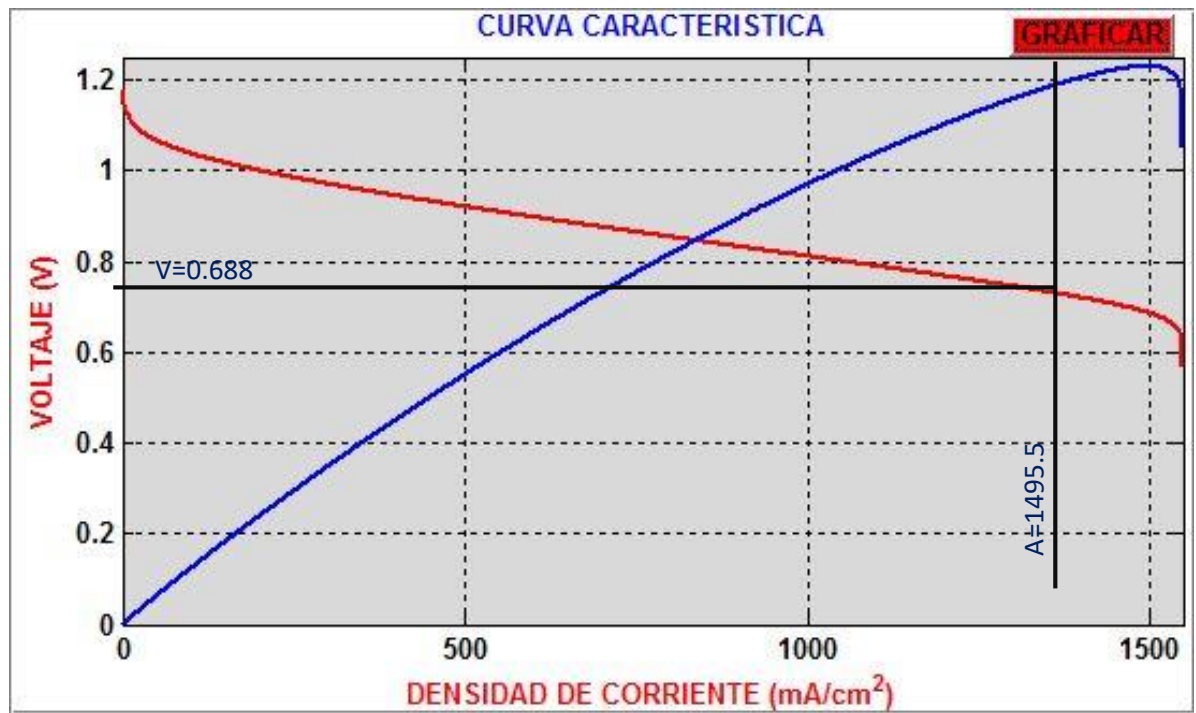
Manteniendo constante el número de celdas (n_{cell}), el voltaje por celda (V_{cell}) y la densidad de corriente (i_{cell}), vemos que la potencia es directamente proporcional al área activa de la celda (A_{act}), entonces realizando una regla tres hallamos el área buscada.

Para $T_{cell_{ope}} = 68^{\circ}\text{C}$ y $A_{act} = 100\text{ cm}^2 \Rightarrow P_{stack} = 38.042\text{ @}$, entonces:

$$A = 100 * \frac{114.0}{38.0422} = 299.67\text{ cm}^2$$

4.1.4 Simulación Dinámica del Stack de Celdas de Combustible. Ahora debemos comprobar, el área y la temperatura sean las adecuadas, para esto gráficaremos la curva tanto de potencia como la de desempeño de la celda, utilizando el gráficator disponible en centro superior de la interfaz, visto en la sección 3.2.3. Primero vamos a la pestaña “*DATOS DE ENTRADA*” e ingresamos el valor de la temperatura de operación asignada y el área activa calculada, después seleccionamos en el panel ubicado al lado derecho del gráficator, las curvas a visualizar y por ultimo presionamos el botón “*GRÁFICAR*” y obtenemos el siguiente resultado mostrado en la figura 53 y en la tabla 7.

Figura 53. Curva Característica y de Potencia de la celda de combustible Utilizada por nuestro Modelo



Fuente: El autor

La gráfica de color azul representa la curva de potencia y la de color rojo la curva característica de la celda de combustible.

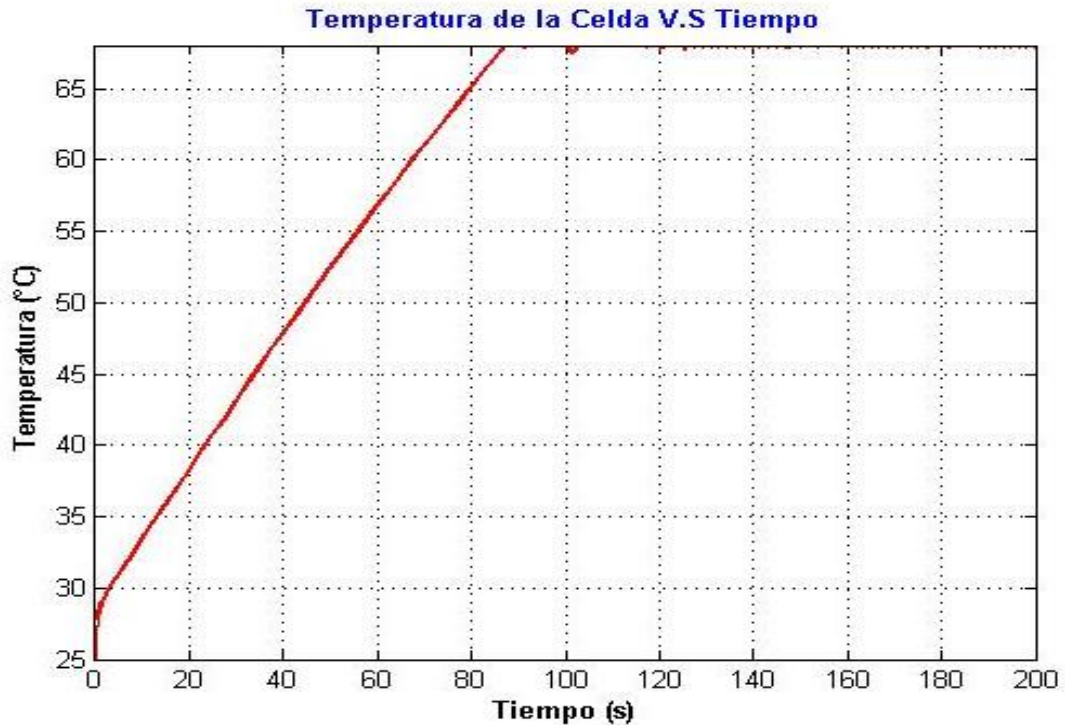
Tabla 7. Resultados la Simulación del Stack del Modelo en Estado Estable

CARACTERÍSTICA	VALOR
Corriente Limite [A]	463.619
Densidad de Corriente @P _{max} [mA/cm ²]	1495.5
Corriente @P _{max} [A]	448.156
Voltaje @P _{max} [V]	254.378
Potencia Máxima [KW]	114.001

Fuente: El autor

Para completar nuestro estudio, simularemos el comportamiento del stack en estado transitorio. Nos dirigimos a la barra deslizante ubicada en lateral derecha de la interfaz y movemos el cursor hasta obtener el valor de corriente deseado, en este caso el valor para la potencia máxima, activamos el sistema de control de temperatura (SCT) y nos aseguramos que el set-point corresponda a la temperatura de operación obtenida anteriormente (68 °C), por ultimo oprimimos el botón "SIMULAR". A partir de dicha simulación obtenemos la figura 54 y resultados numéricos de la tabla 8.

Figura 54. Temperatura del Stack en Estado Transitorio (I=448.156 A)



Fuente: El autor

Tabla 8. Resultados de Simulación del Stack en el Punto de Operación Configurado

PÁRAMETRO	ANODO	CATODO
Flujo másico entrada de gas [g/s]	2.07859	118.051
Flujo másico entrada de agua [g/s]	0.41991	1.11982
Flujo másico salida de gas [g/s]	0.346431	104.303
Flujo másico salida de agua Liq. [g/s]	0.0000	0.0000
Flujo másico salida de vapor [g/s]	0.41991	16.6001
Temperatura de salida del gas [°C]	67.0253	67.9806
Pérdidas Presión del gas [Pa]	10952.8	817.383
Temperatura Promedio del Stack [°C]	68.0393	
Voltaje [V]	254.378	
Potencia suministrada [W]	114.001	
Calor expulsado [W]	59203.7	
Eficiencia [%]	65.819	

Fuente: El autor

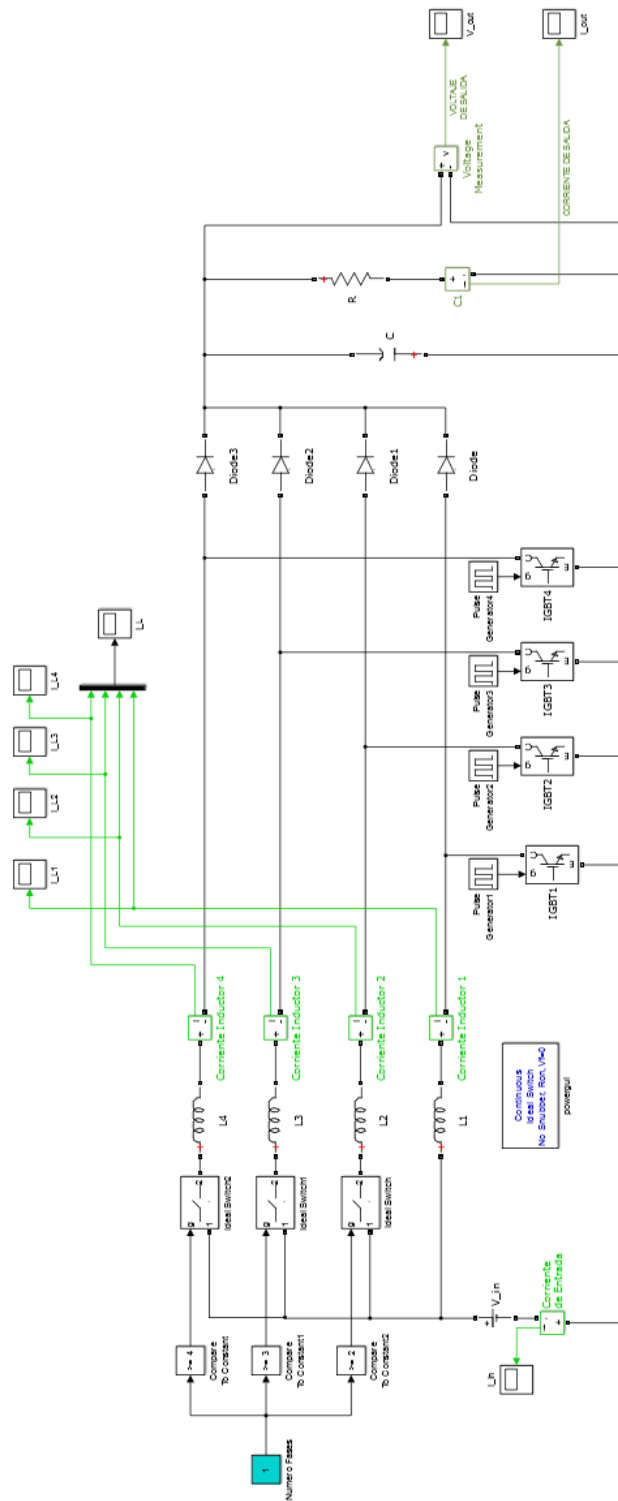
4.1.5 Modelamiento y Simulación del Convertidor de Voltaje DC/DC. Ya teniendo caracterizado tanto el vehículo eléctrico como el stack de celdas de combustible, tomaremos los valores obtenidos de voltaje y corriente suministrados por el stack y los requeridos por el motor, notamos que estos son diferentes, pero su producto deben dar potencias similares, esta diferencia de valores nos permite adecuarla con un convertidor de voltaje Boost, ver sección 1.3.4, aplicando la ecuación 37 obtenemos la relación de tiempo de operación del convertidor (D):

$$D = 1 - \frac{V_{cell}}{V_{motor}} = 1 - \frac{254.378}{650}$$

$$D = 0.6086$$

Recordando la función que desempeña el convertidor de voltaje dentro del sistema, ver sección 1.3.4, este dispositivo permite elevar el voltaje que suministra el stack de celdas de combustible al motor eléctrico y mantenerlo a un nivel más estable y controlable, dando como ventaja la disminución del número de celdas necesarias y por lo tanto implica disminución de peso y ahorro de espacio. En nuestras simulaciones anteriores, poco interviene este dispositivo, pero al momento de diseñar, su análisis es importante, por tal motivo se realiza su respectiva modelación y simulación. Basándonos en las ecuaciones y el esquema básico de un convertidor tipo Boost, tenemos el siguiente modelo en la figura 55 realizado en Simulink de Matlab.

Figura 55. Esquema Eléctrico del Convertidor de Voltaje Boost en Simulink



Fuente: El autor

Para propósitos de versatilidad el programa permite modelar diferentes convertidores de acuerdo al número de fases, dentro de rango de 1 a 4.

Los convertidores de voltaje utilizados en muchas aplicaciones son multifásicos, lo que quiere decir que manejan múltiples fases de señales eléctricas a través de circuitos en paralelo, cada uno de estos debe manejar un ángulo de desfase diferente y dependiendo del número de fases. El propósito de incrementar el número de fases en un dispositivo como este es el de conseguir una señal más estable, a mayor número de fases mayor es la estabilidad, teóricamente hablando y el de disminuir la corriente que pasa por el inductor, permitiendo así instalar inductores de menor tamaño.

Nuestro modelo real utiliza un convertidor de voltaje de cuatro fases, del cual su respuesta de corriente y voltaje se muestran en las figuras 56 y 57.

Este modelamiento fue realizado de manera independiente al programa de simulación desarrollado, debido a inconvenientes de velocidad de simulación que se presentan al intentar simular señales de frecuencias altas como los manejados en un convertidor de voltaje. Los datos utilizados en este modelo se muestran a continuación en la tabla 9:

Tabla 9. Parámetros de Simulación Convertidor de Voltaje Boost

PARÁMETROS	VALOR
Voltaje de entrada [V]	254.378
Inductancia [H]	0.0005
Capacitancia [C]	0.001
Resistencia de la carga [R]	3.7356
Frecuencia del pulso [KHz]	90
Ancho de pulso [% de periodo]	60.86
Numero de Fases	4

Fuente: El autor

Realizando la simulación obtenemos los siguientes resultados gráficos y numéricos:

Tabla 10. Valores Promedio Medidos de la Simulación del Convertidor de Voltaje

PARÁMETROS	VALOR
Corriente Promedio por Inductor [A]	111.50
Voltaje de Salida Promedio [V]	650.03
Corriente de Salida Promedio [A]	174.01

Fuente: El autor

Los datos medidos de la simulación, concuerdan con los requerimientos que debe otorgar el convertidor de voltaje cuando alcanza estabilizar la señal correspondiente, el cual teóricamente debe entregar un voltaje de 650 V y un flujo de corriente de 173.89 A, además la corriente que pasa por cada inductor es de 111.5 A, para un total de 446.0 A, que provienen de la celda de combustible. A continuación se muestra en la figura 57 una ampliación de la figura 56c, donde se puede notar el comportamiento de cada fase del convertidor.

Figura 56. Comportamiento del Convertidor DC/DC

a) Corriente del Inductor, b) Voltaje de Salida, c) Corriente de Salida

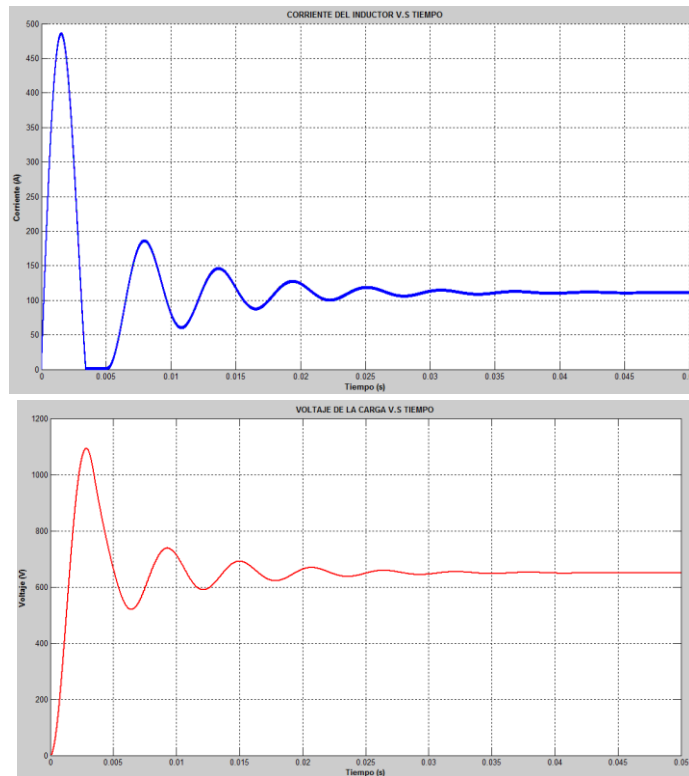
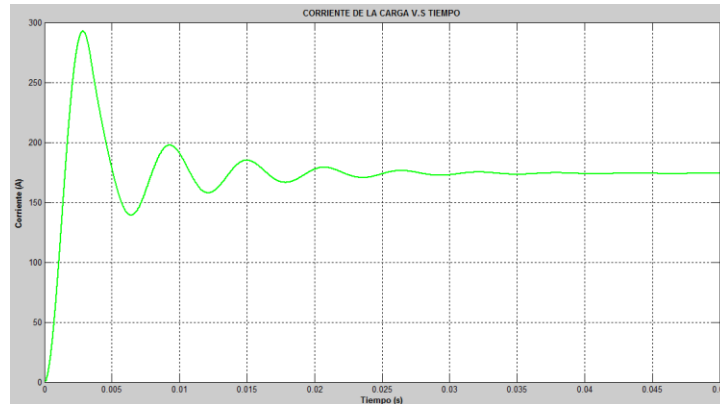
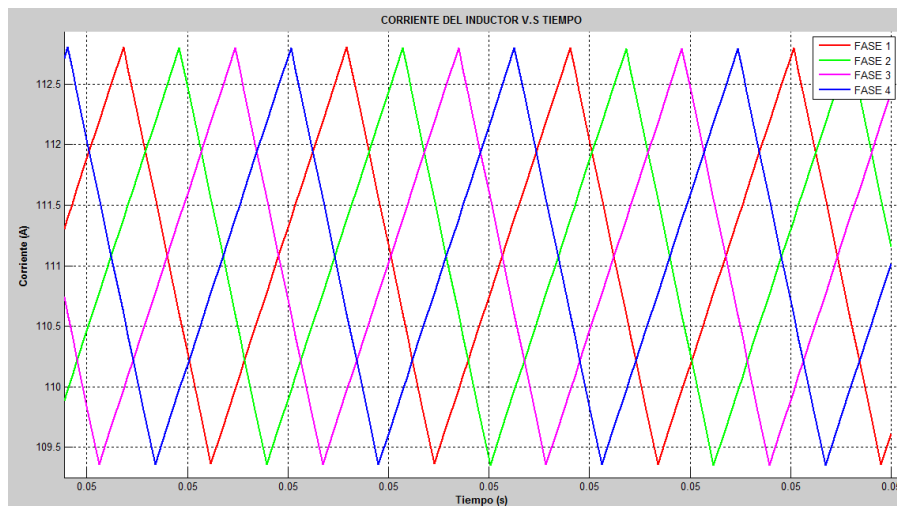


Figura 56. (Continuación)



Fuente: El autor

Figura 57. Comportamiento de las Fases del Convertidor de Voltaje de 4 Fases



Fuente: El Autor

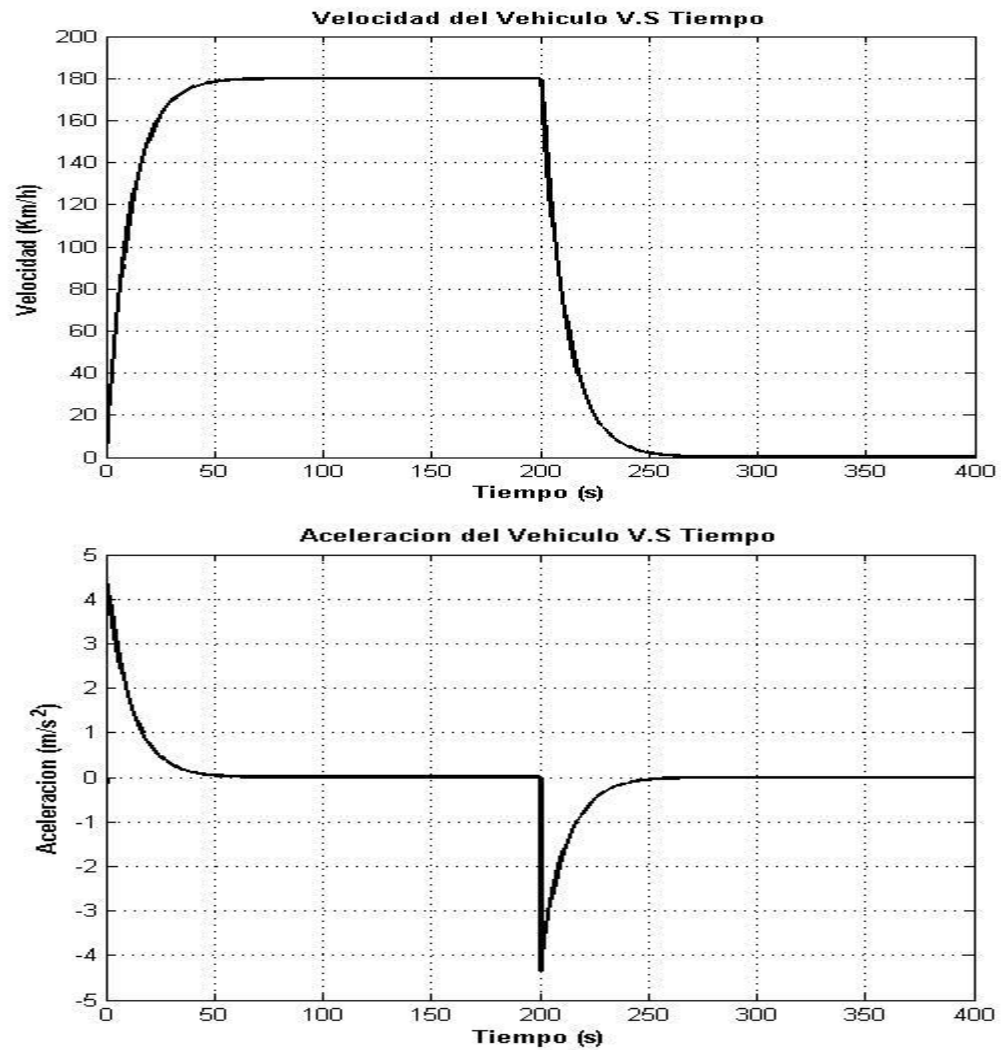
4.1.6 Análisis y Simulación del Comportamiento del Vehículo con Frenado Regenerativo. Una característica importante de los vehículos híbridos eléctricos o completamente eléctricos, como el caso del automóvil analizado MIRAI, es que pueden presentar “Frenado Regenerativo”, esto representa una ventaja significativa para la disminución del consumo de combustible, por lo tanto es importante analizar el comportamiento del vehículo en la etapa de desaceleración o frenado. Esto es posible al utilizar el mismo motor eléctrico que impulsa el vehículo, como generador eléctrico. Un componente importante para realizar esta función es el ya mencionado Ultracapacitor, que permitirá almacenar la energía

cinética del frenado, para después usarlo en la próxima aceleración del vehículo, pero antes se realizara el análisis de comportamiento del vehículo en el frenado. Para aplicar este proceso el programa permite aplicar un torque de frenado necesario para detener el vehículo sin causar derrape de las ruedas y de manera independiente apagar el motor en esta etapa. Cabe resaltar que para estos sistemas no se pueden disponer de embragues para transmitir la potencia del motor a la transmisión, debido a que el motor debe permanecer siempre conectado a las ruedas, inclusive en el frenado, para así transmitir la energía del frenado.

En el programa desarrollado se puede establecer los tiempos de aplicación del torque de frenado, apagado de motores y de la simulación completa. Analizaremos el comportamiento del vehículo para tres escenarios de desaceleración, cuyos resultados son vistos en las figuras 58, 59 y 60, respectivamente:

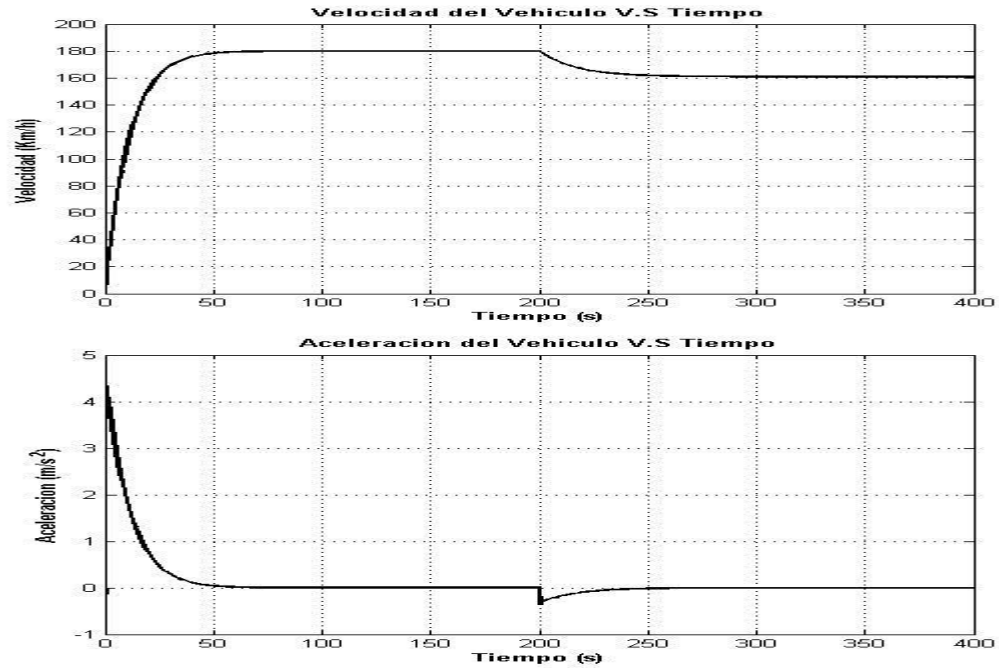
- Por inercia al apagar el motor.
- Por aplicar el freno con motor encendido.
- Por aplicar el freno y apagar el motor.

Figura 58. Gráficas de Desempeño de Velocidad y Aceleración para la Desaceleración por Inercia del Vehículo Simulado



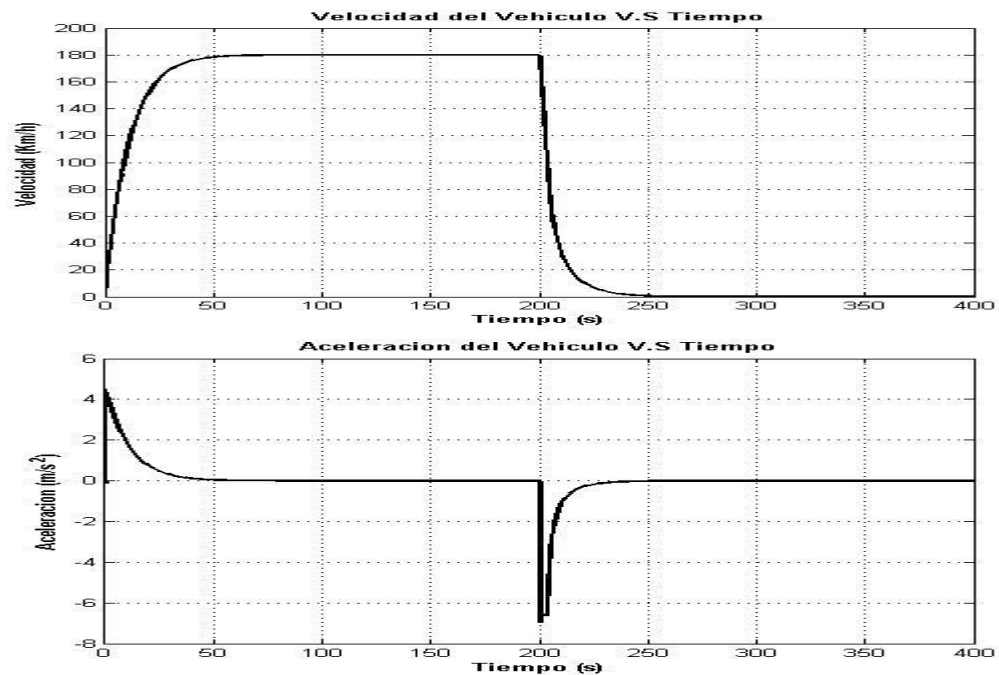
Fuente: El autor

Figura 59. Gráficas de Desempeño de Velocidad y Aceleración para la Desaceleración por Aplicación del torque de frenado del Vehículo Simulado



Fuente: El autor

Figura 60. Gráficas de Desempeño de Velocidad y Aceleración para la Desaceleración por Aplicación del freno y apagado del motor del Vehículo Simulado



Fuente: El autor

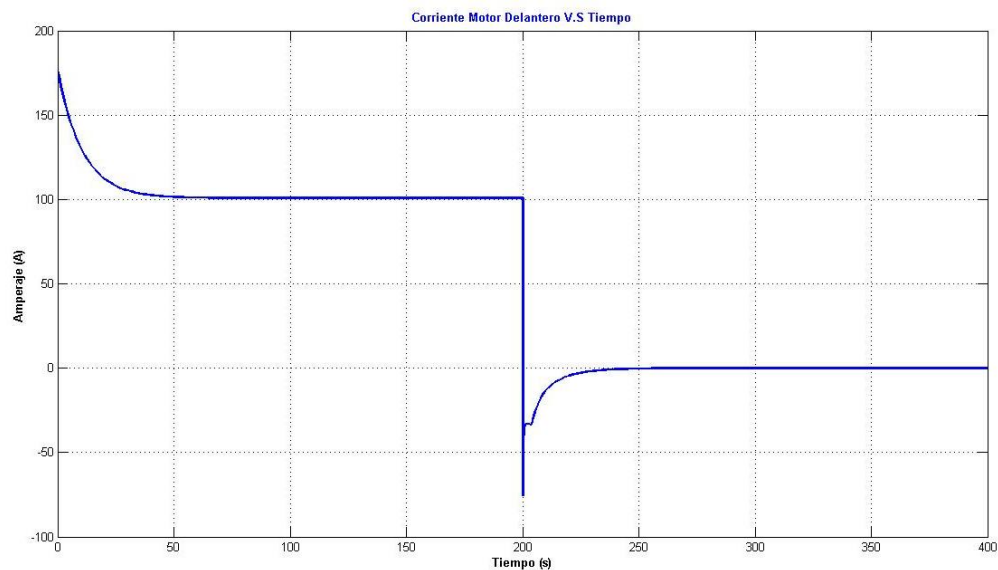
Los parámetros utilizados para la simulación, son los mismos manejados anteriormente, con un tiempo de simulación total de 400 s, tiempos de aplicación de frenado y de apagado de motores en 200 s.

Para el primer caso con solo apagar los motores se disminuyó la velocidad hasta $6.837e-06$ Km/h, al final de la simulación, y una desaceleración máxima de 4.3301 m/s^2 , comparando con el caso número tres donde además se aplicó el torque de frenado se obtuvo una velocidad final de $4.752e-06$ Km/h y una desaceleración máxima de 6.9603 m/s^2 . Se concluye que los resultados obtenidos concuerdan con la lógica esperada, aplicando el freno la velocidad disminuyo más rápido, que con solo desconectar el motor.

Observando el segundo caso donde se aplicó el torque de frenado con el motor encendido, se nota una reducción de la velocidad a tan solo 161.014 Km/h, una desaceleración máxima de hasta 0.365 m/s^2 , esta reducción pequeña de velocidad es de esperarse si se mantiene en operación el motor. Un sistema de control de frenado adecuado permite manejar el voltaje y la corriente suministrada al motor, para adquirir una mejor respuesta durante la aceleración y/o desaceleración y controlar mejor la velocidad del automóvil.

Para el caso tres podemos analizar el cambio de sentido del flujo de corriente del motor, mostrado en la figura 61, cuando es aplicado el torque de frenado, este fenómeno es lo implica el frenado regenerativo:

Figura 61. Efecto de la Corriente por el Frenado Regenerativo



Fuente: El autor

4.1.7 Parametrización del Banco de Ultracapacitores. En la gráfica anterior podemos apreciar que durante la desaceleración la corriente adquiere valores negativos, indicando una inversión en el sentido del flujo de la misma, lo cual comprueba el fenómeno de generación eléctrica al convertir el motor en un generador, alcanzando un valor máximo de flujo de carga de -307.32 A, y un valor de torque máximo de -239.27 Nm. Este flujo de corriente es enviado al ultracapacitor, donde la almacena para aprovechar esta energía en el momento cuando el stack de celdas no pueda dar la potencia requerida.

El automóvil MIRAI, en el cual se basa nuestro modelo, presenta como fuente de energía secundaria una batería de NiMH, pero para continuar con nuestro análisis, supondremos que se dispone de un Ultracapacitor, tomando las especificaciones del Ultracapacitor 2.85V/3400F Cell-K2, modelo BCAP3400 diseñado por la compañía *MAXWELL TECHNOLOGIES*, el cual es recomendado para aplicaciones móviles, en específico es utilizado en los vehículos híbridos eléctricos. A continuación modelaremos nuestro dispositivo a partir de las características de este modelo mostradas en la tabla 11:

Tabla 11. Características del Ultracapacitor Serie K2-2.85V/3400F de Maxwell Technologies

ULTRACAPACITOR MAXWELL MODELO BCAP3400-P285	
Característica	Valor
Voltaje nominal [V]	2.85
Capacitancia nominal [F]	3400
RSE nominal [mΩ]	2.2
Máxima corriente de pérdida a 25°C [mA]	18
Máximo Voltaje [V]	3.0
Máxima Corriente [A]	2000

Fuente: <http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/k2-2-85-series>

Primero definiremos el número de ultracapacitores que conformaran nuestro banco, de acuerdo a los requerimientos y el comportamiento de nuestro modelo simulado, para ello realizaremos la simulación con un solo Ultracapacitor, durante los periodos de arranque y frenado para conocer su repuesta dinámica y a medida e iremos adecuando la cantidad según los resultados. En el arranque, el voltaje inicial del banco de ultracapacitores, podemos suponer que el mismo que debe entregar el stack de celdas, que es igual a 254.28 V, por lo tanto basándonos en las ecuaciones vistas en la sección 1.4.1, tenemos que el número de capacitores conectados en serie son:

$$n_p = \frac{V_{max}}{V_{UC,i}} = \frac{254.28}{2.85} = 89.26 \approx 90$$

Escogemos de forma arbitraria el valor de V_{min} igual a 100 V.

Para aplicar nuestra formula de caída de voltaje en el ultracapacitor, requerimos el valor mínimo y máximo de flujo de corriente, durante la descarga, para ello utilizaremos el valor de corriente máxima que demanda el motor en el arranque (176.484 A) y la corriente límite que puede dar la celda de combustible, es decir que durante el arranque, el stack no puede proporcionar toda la potencia necesaria, es en este periodo donde requiere la colaboración de la fuente secundaria. Procediendo de la siguiente manera:

Calculando la corriente a la entrada del convertidor de voltaje en el arranque:

$$I_{in} = \frac{176.484}{(1 - D)} = \frac{176.484}{(1 - 0.6086)} = 450.904 \text{ A}$$

Tomando la corriente límite del stack calculada para una temperatura de operación de 68 °C, ver tabla 7, notamos que es mayor a la requerida por el motor, lo que indica que la celda de combustible a estas condiciones puede cumplir con la demanda

$$I_{Lm} = 463.619 > I_{in} @ T = 68^\circ C$$

Ahora analizaremos la corriente límite del stack, pero con la temperatura de operación más baja, temperatura ambiente, supuesta a 25 °C, realizando la simulación, obtenemos los siguientes datos: $I_{Lm} = 509.993 \text{ (A)}$, $V @ P_{max} = 201.184 \text{ (V)}$, recalculando el ciclo de trabajo, obtenemos un valor de $D = 0.6905$ y un corriente de entrada al convertidor máxima de $I_{in} = 570.197 \text{ (A)}$; en este caso cuando la celda de combustible empieza a trabajar, aun no puede suministrar la corriente necesaria.

$$I_{Lm} < I_{in} @ T = 25^\circ C$$

Mediante un proceso interactivo, utilizando los pasos anteriores, se determinó que a partir de una temperatura de operación aproximada de **49.5°C**, la celda de

combustible tiene la capacidad para responder a la demanda del motor con los valores obtenidos ($I_{Lm} = 496.064 \text{ A}$, $V@P_{max} = 231.351 \text{ V}$ y $I_{in} = 495.85 \text{ A}$)

Se calcula el valor de corriente a la salida del convertidor:

$$I_{out} = I_{Lm} * (1 - D) = 496.064 * (1 - 0.6441) = 176.56 \text{ A}$$

Nos remitimos a la gráfica mostrada en la figura 54, buscamos el tiempo en que tarda la celda de combustible en alcanzar esta temperatura de $49.5 \text{ }^\circ\text{C}$, lo cual nos da un valor de 43.57 s , tomaremos este valor como el tiempo de descarga (t_d) del Ultracapacitor en el cual el stack puede manejar la potencia requerida por el motor sin ayuda de la energía entregada de la fuente secundaria. El ultimo valor requerido es el de la corriente promedio, para este valor volveremos a la figura 49, y tomando el valor medio del tiempo de descarga $t_{prom} = 43.57/2 = 21.785 \text{ s}$, con este tiempo buscamos el valor de la corriente, la cual nos da un aproximado de 110.57 A

Finalmente aplicando la fórmula de caída de voltaje del UC, hallamos el número de capacitores conectados en paralelo.

$$\Delta V = V_{max} - V_{min} = \frac{I_{UCprom}}{n_p} n_s \left(\frac{t_d}{C_{UC,i}} - RSE \right) \quad (141)$$

Despejando:

$$n_p = \frac{I_{UCprom}}{\Delta V} n_s \left(\frac{t_d}{C_{UC,i}} - RSE \right) = \frac{110.57}{254.378 - 100} * 90 * \left(\frac{43.57}{3400} - 0.0022 \right) = 0.684$$

$$n_p \approx 1$$

Ya tenemos el tamaño de nuestro banco de ultracapacitores, compuesto en total por 90, en un arreglo de un grupo de 90 conectados en serie. Los valores respectivos de la capacitancia, resistencias en paralelo y en serie equivalentes totales son:

$$C_{UCtot} = 1 * \frac{3400}{90} = 37.778$$

$$RSE_{tot} = 90 * \frac{0.0022}{1} = 0.198 \Omega; \quad RPE_{tot} = 90 * \frac{158.33}{1} = 14250 \Omega$$

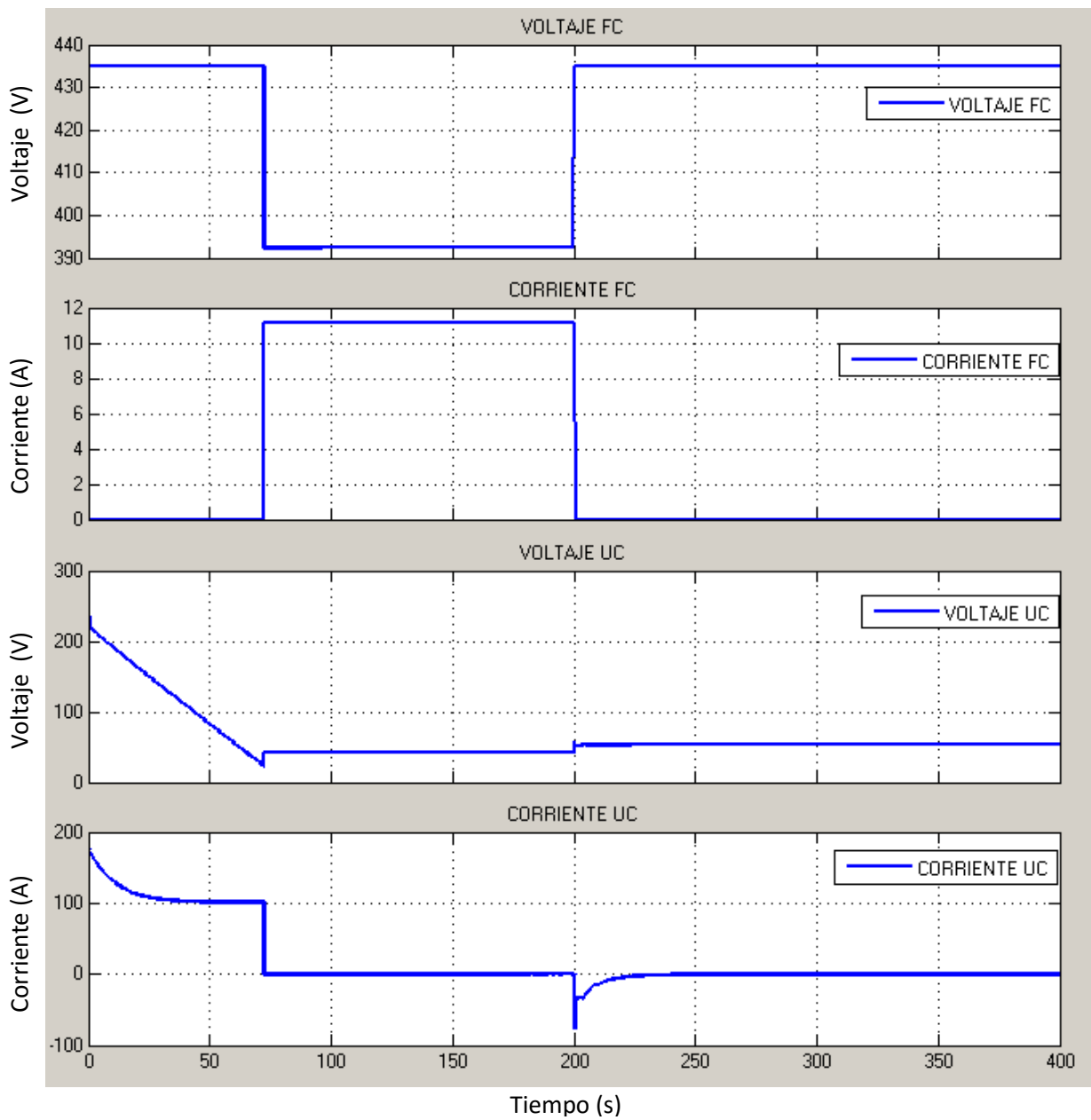
$$V_{inicial} = 2.85 * 90 = 256.5 V \quad y \quad V_{max} = 3.0 * 90 = 270 V$$

Ingresando estos valores en nuestro modelo de banco de ultracapacitores, el comportamiento de este se muestra en la figura 63.

4.1.8 Simulación y Análisis del Stack de Celdas de Combustible en Combinación con el Banco de Ultracapacitores. Hasta ahora, hemos descrito el comportamiento de un modelo de vehículo eléctrico, basándonos en las características del automóvil *MIRAI*, describimos su velocidad y aceleración, calculamos los parámetros de operación de sus componente eléctricos principales, como el motor eléctrico, el convertor de voltaje y el ultracapacitor, además del análisis del comportamiento del motor durante la aplicación del torque de frenado. Para la fuente de energía, analizamos el comportamiento del stack de celdas de combustible en función de su temperatura de operación y encontramos el punto de operación de la celda de combustible y el área activa requerida, en base a las características del modelo real, analizamos además la evolución de la temperatura del stack en estado transitorio, y los valores de parámetros alcanzados durante su estado estable. Ya definido en lo mayor posible el sistema de nuestro modelo, nos disponemos para finalizar nuestro análisis ver el desempeño del vehículo en conjunto con la celda de combustible, durante el periodo de aceleración, velocidad constante y desaceleración. Simulando el modelo de vehículo en el programa desarrollado obtenemos los siguientes resultados gráficos en la figura 62.

Podemos apreciar claramente los periodos respectivos de aceleración, velocidad estable y desaceleración del vehículo, en el comportamiento de las fuentes de potencia tanto primaria como secundaria. Notamos que durante los primeros 52 s aproximadamente, el stack de celdas entrega el máximo de corriente y el ultracapacitor proporciona la corriente restante al motor, hasta alcanzar un valor mínimo estable, donde su voltaje no decae más (terminación de descarga), en este punto la celda de combustible es la única que le proporciona energía al motor, para finalizar la aceleración y continuar el vehículo a velocidad constante. En la gráfica de voltaje de la celda, se nota la transición del paso del apoyo de la fuente auxiliar a sin esta ayuda, donde el voltaje de la celda sufre una considerable elevación.

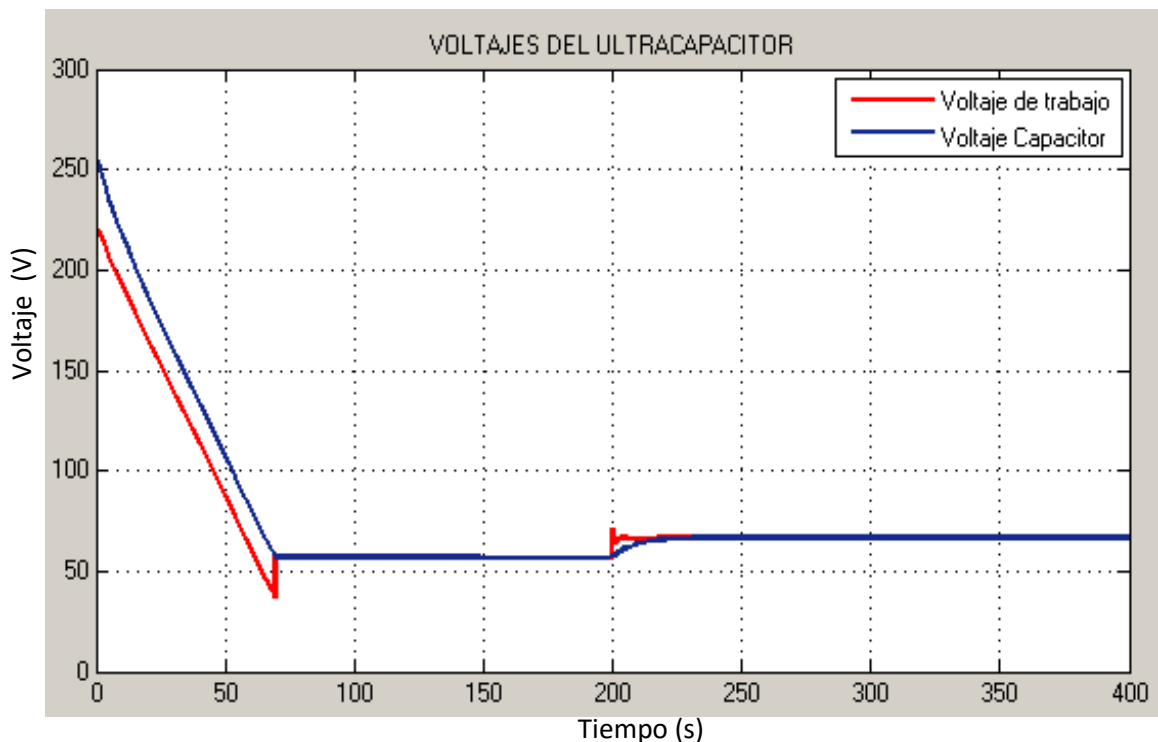
Figura 62. Gráfica de Operación del Stack de Celdas y el Ultracapacitor Operando en Combinación.



Fuente: El autor

Cuando se procede a aplicar el torque de frenado en el tiempo de simulación $t=200s$, el flujo de la corriente del motor se invierte, claramente el stack no puede recibir esta corriente, por lo tanto toda es desviada al banco de ultracapacitores, como lo podemos apreciar en la respectiva gráficas, a partir de ahí el voltaje del ultracapacitor se eleva levemente (proceso de recarga) hasta un estado estable, donde motor no genera más corriente, y el de la celda de combustible también se incrementa, hasta alcanzar el valor de voltaje a circuito abierto, donde las pérdidas tanto óhmicas como de transporte son cero, al no existir flujo de corriente. En la siguiente imagen vemos más claramente el comportamiento del ultracapacitor.

Figura 63. Comportamiento de Voltaje del Banco de Ultracapacitores



Fuente: El autor

La gráfica representada de color rojo indica el voltaje de trabajo del ultracapacitor teniendo en cuenta las pérdidas resistivas, la línea de color azul nos muestra el voltaje del capacitor equivalente. Como podemos apreciar el voltaje mínimo de descarga tiende a alcanzar los 100V, tal y como lo planeamos para los cálculos respectivos, lo que comprueba la certeza del procedimiento utilizado.

4.1.9 Parametrización de las Baterías y Simulación en Combinación con el Stack de Celdas de Combustible. La otra fuente secundaria que nos permite simular el programa, es un pack de baterías, que en el modelo MIRAI, utiliza una batería de tipo NIMH, en el programa se cuenta con la opción de elegir entre los tipos de baterías mencionados en la sección 1.5, utilizando los parámetros de operación dados en la siguiente tabla, se realiza de nuevo la simulación obteniendo así el comportamiento de la batería con el número de baterías en serie para tipo NIMH:

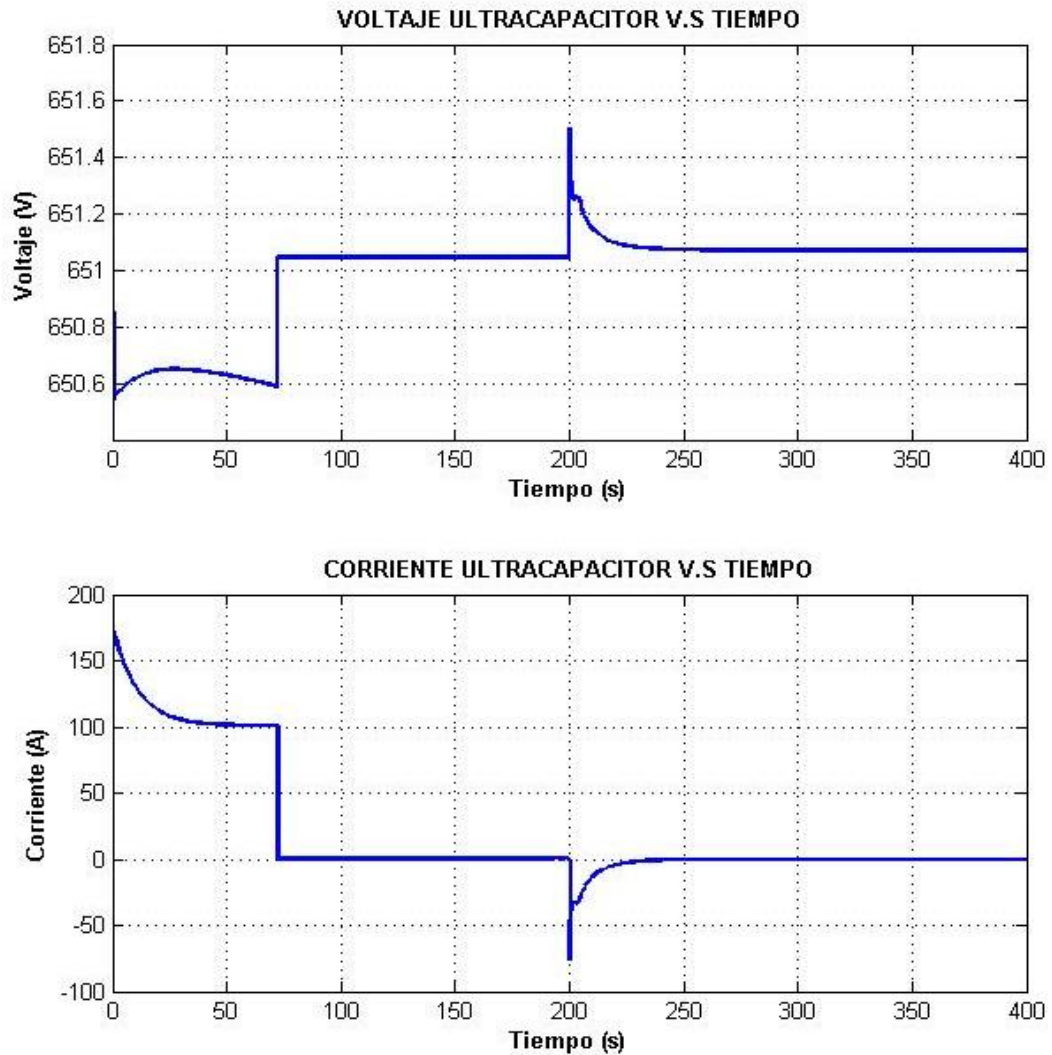
$$n_{bat} = \frac{V_{motor}}{V_{OC}} = \frac{650}{1.2816} = 507.18 \approx 508 \text{ baterías}$$

Tabla 12. Parámetros de Baterías

Tipo	Lead-Acid	NiCd	Li-Ion	NiMH
Parámetros	12V – 7.2Ah	1.2V – 2.3Ah	3.3V – 2.3Ah	1.2V - 6.5Ah
V_{OC} [V]	12.4659	1.2705	3.366	1.2816
R [Ω]	0.04	0.003	0.01	0.002
K [Ω o V/Ah]	0.047	0.0037	0.0076	0.0014
A [V]	0.83	0.127	0.26422	0.111
B [Ah ⁻¹]	125	4.98	26.5487	2.3077

Fuente: [52]

Figura 64. Comportamiento Operacional de la Batería con Frenado Regenerativo



Fuente: El Autor

En la figura 64 se puede apreciar que cuando ocurre el frenado en $t=200$ s, el voltaje de la batería aumenta, debido a que se encuentra en estado de carga, como lo confirma el valor de la corriente negativa, pero inmediatamente sufre un descenso, que es provocado por la disminución de la misma corriente de carga, hasta aproximarse al valor de voltaje de circuito abierto, según el estado de carga (SOC) el cual se puede apreciar en la figura 65.

Figura 65. Estado de Carga de la Batería



Fuente: El autor

La batería se simuló con un estado inicial de carga de 0.90, la cual disminuyó durante la aceleración donde la batería era la encargada de suministrar la energía, no la celda de combustible, hasta un valor de 0.556 y durante el frenado regenerativo se cargó hasta un valor de 0.573.

4.2 SIMULACIÓN DEL VEHÍCULO EN DIFERENTES SITUACIONES DE OPERACIÓN

Para completar nuestro análisis dinámico, procederemos a realizar la simulación de nuestro modelo de vehículo eléctrico, anteriormente parametrizado, para analizar la respuesta de su comportamiento a diferentes condiciones de operación, modificando los ángulos de inclinación del terreno, las condiciones de la superficie, la velocidad del viento, la configuración de la disposición de los motores eléctricos y el ciclo de operación. Todas estas variables el programa de simulación permite ser modificadas para realizar los respectivos estudios y análisis, este es un agregado que se decidió implementar para permitir un estudio más completo del comportamiento del modelo analizado.

4.2.1 Variación del Ángulo de Inclinación del Terreno. El programa nos permite modificar los ángulos de inclinación del terreno con el propósito de estudiar el comportamiento del vehículo, en esta sección se analizara el desempeño del motor y la velocidad máxima que se puede alcanzar, en distintos grados de pendientes, pero antes debemos preguntarnos, ¿Cuál es el ángulo máximo que puede alcanzar nuestro modelo simulado?, para obtener esta respuesta podríamos realizar una búsqueda experimental, probando ángulo por ángulo en el simulador, hasta hallar este valor. Otra forma más rápida es describir una ecuación que nos permita realizar este cálculo de forma directa, para lo cual analizaremos el sistema en estado estable. Tomaremos la ecuación 1 de sumatoria de fuerzas sobre el vehículo, analizada en la sección 1.1.

$$m \frac{dV}{dt} = n_r F_{tr} + n_f F_{tf} - F_{aer} - F_{rod} - mg \sin \alpha$$

Para $\frac{dV}{dt} = 0$, $V = 0$, $F_{tr} = 0$; tenemos que:

$$F_{tf} = \frac{mg \sin \alpha}{n_f}$$

La fuerza de tracción debe ser siempre mayor o igual que esta fuerza resistiva para para evitar retroceso del vehículo durante la subida:

$$F_{tf} \geq \frac{mg \sin \alpha}{n_f} \quad (142)$$

Ahora analizando el torque en el motor podemos decir que para un torque máximo del motor $\frac{d\omega}{dt} = 0$, $\omega = 0$:

$$T_{m_{max}} = \frac{n_f T_{w_{max}}}{n_{m_{eje}} * G_r} = \frac{n_f F_{tf} r_w}{n_{m_{eje}} * G_r} \quad (143)$$

Donde se considera el número de motores por eje ($n_{m_{eje}}$). Recordando la desigualdad para F_{tf} hallada anteriormente:

$$T_{m_{max}} > \frac{n_f mg \sin \alpha r_w}{n_{m_{eje}} * G_r n_f} = \frac{mg \sin \alpha r_w}{n_{m_{eje}} * G_r} \quad (144)$$

Finalmente obtenemos que para el ángulo de inclinación máximo del vehículo puede ser definida:

$$\alpha \leq \alpha_{max} = \sin^{-1} \left(\frac{T_{max} G_r * n_{m_{eje}}}{m g r_w} \right) \quad (145)$$

Procedemos a calcular el máximo valor del ángulo de la pendiente, con los valores obtenidos de los análisis anteriores:

$$\alpha_{max} = \sin^{-1} \left(\frac{335 * 5.8858 * 1}{1850 * 9.81 * 0.216} \right) = 30.198^\circ$$

El anterior cálculo es para el máximo valor de pendiente que el motor puede permitir, pero también debemos considerar la interacción rueda-camino, es decir la fuerza de fricción, para esto se ha deducido la siguiente ecuación:

$$\alpha \leq \alpha_{max} = \tan^{-1} \frac{\mu_0 * l_r}{\mu_0 * H_G + L} \quad (146)$$

Dónde: H_G es la altura del centro de gravedad y μ_0 es el coeficiente de fricción en el arranque ($t=0$, $V=0$), hallada con la ecuación de Pacejka, tomando como $\lambda=1.$, de esta forma el ángulo máximo obtenido es:

$$\alpha_{max} = \tan^{-1} \frac{0.9145 * 1.485}{0.9145 * 0.4 + 2.7} = 23.892^\circ$$

Por lo tanto el ángulo máximo crítico lo obtenemos por la fuerza de fricción, es decir que el motor puede proporcionar la suficiente fuerza para subir una cuesta de mayor pendiente, pero el agarre de las ruedas es el limitante.

Continuando con nuestro análisis, la fuerza de tracción está relacionada con el coeficiente de deslizamiento, por lo tanto también podemos conocer el valor que debe alcanzar μ según el ángulo de inclinación para que el vehículo no pierda tracción.

$$F_{tf} = \mu N_f \geq \frac{m g \sin \alpha}{n_f}$$

Ahora requerimos definir la fuerza normal de la rueda motriz en función de α , para ello tomaremos la ecuación de la sumatoria de momentos realizada sobre el vehículo y la analizaremos en estado estable:

$$n_f N_f = \frac{1}{L} (m g \cos \alpha l_r - m g \sin \alpha H_G)$$

Reemplazando este término en anterior ecuación:

$$\frac{mg \sin \alpha}{n_f} \leq \mu \frac{1}{n_f L} (mg \cos \alpha l_r - mg \sin \alpha H_G)$$

Despejando y simplificando:

$$\mu \geq \frac{L \sin \alpha}{l_r \cos \alpha - H_G \sin \alpha} \quad (147)$$

Calculando ahora el valor de μ para α_{max} :

$$\mu_{min} = \frac{2.7 \sin 23.892}{1.485 \cos 23.892 - 0.4 \sin 23.892}$$

$$\mu_{min} = 0.9145$$

Variando el ángulo de inclinación hasta el ángulo máximo se analizara el efecto de este sobre la velocidad máxima.

Tabla 13. Desempeño del Vehículo en Variación del Angulo de Inclinación del Terreno

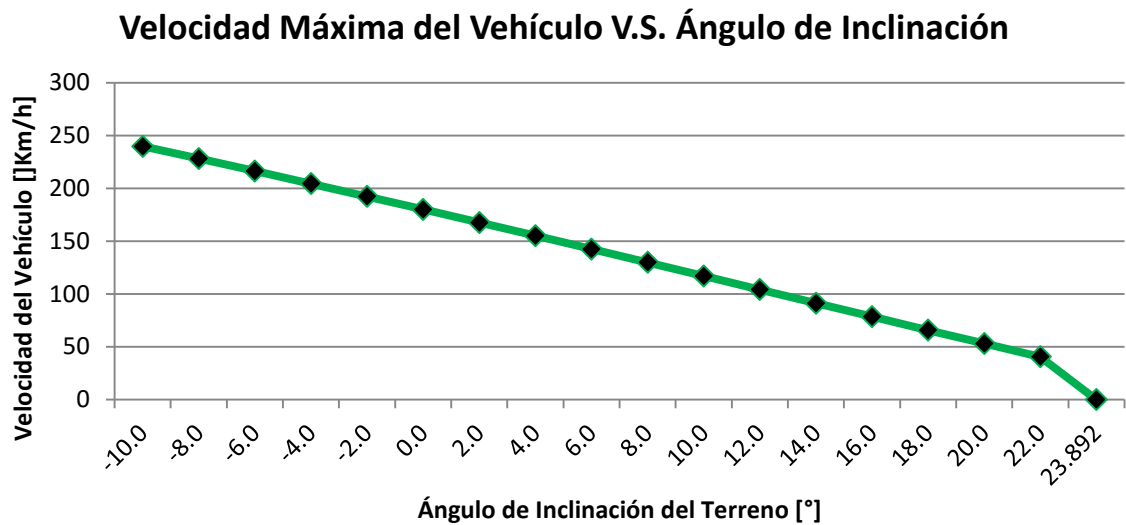
Ángulo de Inclinación [°]	Velocidad Máxima [Km/h]	Torque de Arranque del Motor [Nm]	μ min. Teórico
-10.0	239.745	332.966	-0.3061
-8.0	228.110	333.028	-0.2462
-6.0	216.314	334.140	-0.1858
-4.0	204.363	334.231	-0.1248
-2.0	192.262	334.308	-0.0629
0.0	180.020	334.133	0.0000
2.0	167.645	334.133	0.0641
4.0	155.147	334.264	0.1296
6.0	142.539	334.309	0.1967
8.0	129.835	334.363	0.2655
10.0	117.051	334.458	0.3366
12.0	104.21	334.36	0.4099
14.0	91.341	334.241	0.4860
16.0	78.486	334.091	0.5650
18.0	65.699	333.929	0.6474
20.0	53.052	333.759	0.7337
22.0	40.614	333.556	0.8243
23.892	0.00573	335.639	0.9145

Fuente: El autor

Se realizó el análisis variando cada dos grado el ángulo de la pendiente y se tomaron los valores de la velocidad máxima alcanzada por el vehículo y el torque máximo que genera el motor eléctrico al inicio de la aceleración, también se

decidió calcular el valor del coeficiente mínimo requerido para que el auto tenga la suficiente tracción para moverse y fue comparada con el valor máximo obtenido de la simulación después de pasar por un periodo turbulento y antes de tomar un comportamiento descendente uniforme. Como podemos ver en la tabla 13 se analizaron además cinco valores de ángulos negativos con el propósito de conocer el comportamiento para estos ángulos.

Figura 66. Gráfica de Velocidad Máxima del Vehículo para Diferentes Ángulos de Inclinación del Terreno

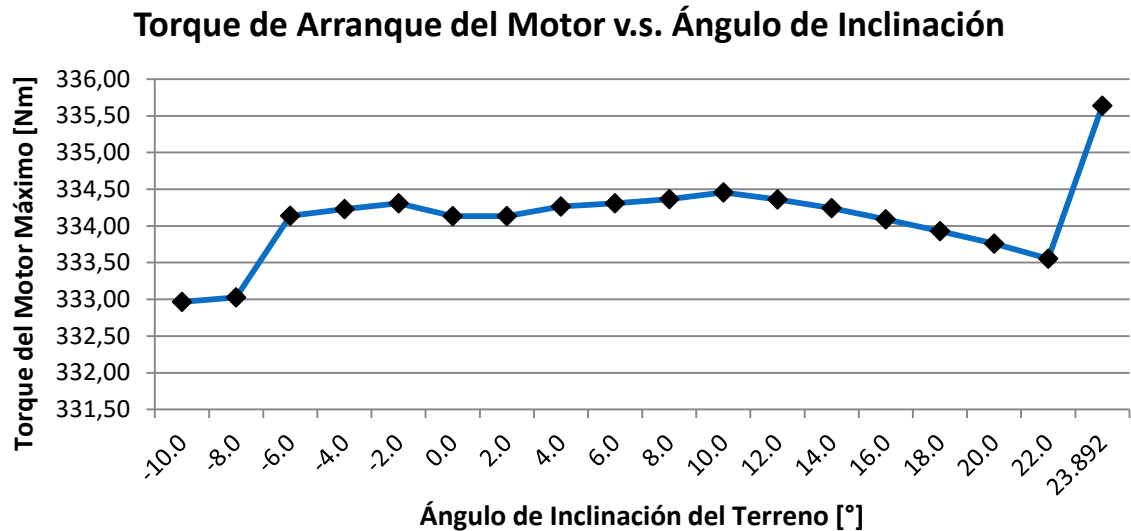


Fuente: El autor

En la figura 66 observamos el comportamiento de la velocidad máxima del vehículo al variar el ángulo, se puede concluir que adquiere un comportamiento lineal descendente y alcanza un valor aproximado a cero cuando alcanza el ángulo máximo calculado, comprobando así la eficacia de la ecuación definida anteriormente.

Analizando los torques alcanzados por el motor, primero debemos recordar que las características del motor fueron calculadas basándonos en el torque máximo de 335 Nm según el modelo real del MIRAI. Se observa tanto en la figura 67 como en la tabla 13 que el comportamiento del torque de arranque tiende a ser constante, a excepción de los valores más grandes y los valores mínimos, cabe aclarar que esto es debido a varios fenómenos durante la aceleración que fuerzan al motor en estos ángulos, a superar el límite, pero estos valores solo son tomadas por unos instantes hasta que se estabilizan las fuerzas de aceleración sobre el vehículo.

Figura 67. Gráfica del Torque de Arranque Máximo del Motor Eléctrico para Diferentes Valores de Ángulos de Inclinación del Terreno



Fuente: El autor

4.2.2 Modificación de las Condiciones de la Superficie. En esta sección veremos el efecto que tiene las condiciones del terreno sobre el comportamiento del vehículo. En la Interfaz del programa se puede seleccionar cuatro diferentes tipos de suelos (seco, húmedo, con nieve y con hielo), dependiendo el terreno escogido para la simulación, se establece el comportamiento del coeficiente de deslizamiento en relación con la relación de deslizamiento como se explicó en la sección 1.2.1, en la cual se estableció para el cálculo la conocida ecuación “Mágica de Pacejka”.

A continuación en las tablas 14 y 15 se resume los resultados obtenidos de las respectivas simulaciones, en las cuales obtuvimos la aceleración máxima de arranque del vehículo, el torque de arranque del motor eléctrico y la máxima velocidad de rotación que adquiere el motor. Además se deseó conocer la velocidad máxima alcanzada por el auto en un tiempo determinado, en este caso para tres minutos. La simulaciones fueron realizadas bajo los mismos valores de parámetros utilizados anteriormente, con un ángulo de inclinación igual a cero, solo fue variada la condición del terreno.

Tabla 14. Resultados de las Simulaciones con la Variación de la Condición del Terreno

Condición de la Superficie	Aceleración de Arranque del Vehículo [m/s ²]	Torque de Arranque [Nm]	Vel. Angular del Motor Máxima [rpm]
Seco	4.526	334.133	13101.6
Húmedo	3.923	329.605	13098.7
Con Nieve	1.548	323.925	13201.7
Con Hielo	0.523	320.692	13643.6

Fuente: El autor

En esta tabla se puede concluir que con el terreno húmedo se consiguen los valores máximos de aceleración y de torque, superando incluso en condiciones secas y toma de una menor velocidad de rotación al alcanzar la velocidad estable. En condiciones con suelo cubierto de nieve y hielo, como era de esperarse, muestran el peor comportamiento, adquiriendo las aceleraciones y torques más bajos y las rotaciones más altas para el caso con hielo., esto se puede explicar debido al bajo coeficiente de deslizamiento que se presenta en estas condiciones.

Tabla 15. Velocidad Máxima del Vehículo Según las Condición del Terreno lograda en t=30 s

Condición de la Superficie	Vel. del Vehículo a t=30s [Km/h]
Seco	168.987
Húmedo	168.416
Con Nieve	136.450
Con Hielo	46.872

Fuente: El autor

En esta última tabla apreciamos que la máxima velocidad adquirida se da en condición de suelo seco, lo cual concuerda con los valores altos de aceleración, también observamos que para la condición con presencia de hielo se adquiere una menor velocidad, debido alto nivel de deslizamiento entre la rueda y el terreno. Estos resultados concuerdan con la gráfica mostrada en la figura 3, donde se puede ver que para los mismos valores de la relación de deslizamiento, se obtienen coeficientes altos para la condición seco y los bajos para con hielo (solo válido para valores altos de λ , para valores más pequeños en terreno húmedo se adquiere mayores coeficientes de deslizamiento que en seco).

4.2.3 Efectos de la Velocidad del Viento. Una variable que se toma en cuenta en la fuerza resistiva aerodinámica, es la velocidad del viento, por tal motivo el programa de simulación permite modificar dicha variable a través de la interfaz, lo cual nos da la oportunidad de estudiar su influencia en la dinámica del vehículo. Se realizó una serie de simulaciones donde se varió la velocidad del viento y se tomó la velocidad máxima que alcanza el vehículo, a continuación se muestran los resultados obtenidos en la tabla 16:

Tabla 16. Efectos de la Velocidad del Viento sobre la Velocidad del Vehículo

Velocidad del Viento [Km/h]	Velocidad Máxima del Vehículo [Km/h]
15	183.146
10	182.123
8	181.708
6	181.290
4	180.870
2	180.191
0	180.020
-2	179.591
-4	179.159
-6	178.724
-8	178.286
-10	177.845
-15	176.731
-20	175.600
-25	174.452

Fuente: El autor

En la tabla de resultados se observa la influencia que tiene el viento longitudinal con la velocidad del vehículo, según nuestra convención de signos un valor negativo a la velocidad indica que va en dirección contraria al movimiento del vehículo (viento en contra), y un valor positivo favorece al desplazamiento del vehículo, por lo cual podemos notar en la tabla, que con valores negativos la velocidad descende y con positivos aumenta. Para las demás variables durante las simulaciones no se encuentra un efecto de interés, se nota que de igual manera aumenta y disminuye la velocidad de rotación del motor, el consumo de corriente y el torque de aceleración máximo no varía demasiado.

4.2.4 Comparación de las Diferentes Configuraciones de Tracción de un Vehículo Eléctrico. El programa de simulación desarrollado presenta una característica única, la cual permite al usuario establecer el tipo de tracción que puede presentar el vehículo modelado, no solo permite elegir si es de tracción delantera, trasera o ambas, sino también se puede decidir darle a cada rueda motriz un motor independiente, esta es una ventaja que solo se presenta para vehículos con motores eléctricos, el poder manipular electrónicamente e independientemente la velocidad y el torque de cada rueda. También ofrece la posibilidad de seleccionar el número y la disposición de las ruedas, por ejemplo un vehículo con tres ruedas, una delantera y dos traseras, se realizó esta característica con el propósito de evaluar diferentes diseños de automóviles.

Para nuestro siguiente análisis se establecieron seis configuraciones, las cuales se enumeran a continuación:

1. Tracción delantera - un motor
2. Tracción delantera – dos motores
3. Tracción trasera - un motor
4. Tracción trasera – dos motores
5. Doble Tracción – un motor
6. Doble Tracción – dos motores

Para la simulación de cada configuración se debe establecer de nuevo las características de los motores (R, B, K_t y K_v), con el propósito de que sean los adecuados para cumplir con las especificaciones dadas. De la tabla 17 de resultados podemos concluir varias cosas:

- Utilizando un motor para cada rueda se obtiene una menor aceleración en comparación con un solo motor por eje.
- Se obtiene los mejores resultados en la configuración de doble tracción con un solo motor por eje y la peor con la tracción trasera con dos motores por eje, esto es debido a que se dispuso el centro de gravedad situado más adelante del vehículo para lograr mejor desempeño con tracción delantera.
- Los valores de torque máximos son similares en todos los casos, debido a que no se modificó el valor máximo del modelo real de 335 Nm,
- En los consumos de corriente máximos, primero debemos aclarar que en los casos donde se presentan dos motores por eje, los valores de corriente

mostrados es la suma de los dos, dicho esto podemos decir que el menor consumo de corriente es en la configuración n° 4 y la de mayor en la n°5.

- El consumo de corriente se relaciona con la aceleración, a mayor aceleración, se requiere mayor flujo de corriente.
- Durante las simulaciones para las configuraciones de doble tracción, se presentaron en ambos casos, que el vehículo no alcanzaba la velocidad estipulada de 180 Km/h, obteniendo valores de 165.579 Km/h con un solo motor y de 165.578 Km/h con dos motores. Esto se puede explicar debido a que no se modificó en ningún caso la potencia del vehículo de 113 KW, la cual fue dividida para todos los motores con el mismo valor y como vemos el torque permanece intacto, con lo cual a menor potencia la velocidad de rotación de las ruedas disminuye.

Tabla 17. Resultados de Simulación para Distintas Configuraciones del Vehículo

CONFIGURACIÓN		Velocidad en t=20s [Km/h]	Aceleración de Arranque [m/s ²]	Torque de Arranque [Nm]	Corriente Max. [A]	Corriente Max. Total [A]
1	Motor Delantero	151.557	4.51306	333.302	176.490	176.490
	Motor Trasero			0	0	
2	Motor Delantero	149.174	4.31817	334.596	88.240	179.480
	Motor Trasero			0	0	
3	Motor Delantero	140.582	3.71681	0	0	171.728
	Motor Trasero			334.467	171.728	
4	Motor Delantero	137.794	3.54804	0	0	171.724
	Motor Trasero			334.754	85.8621	
5	Motor Delantero	161.706	9.73503	334.437	100.731	186.969
	Motor Trasero			338.580	86.2378	
6	Motor Delantero	160.441	8.89847	334.583	50.365	186.968
	Motor Trasero			335.180	43.1189	

Fuente: El autor

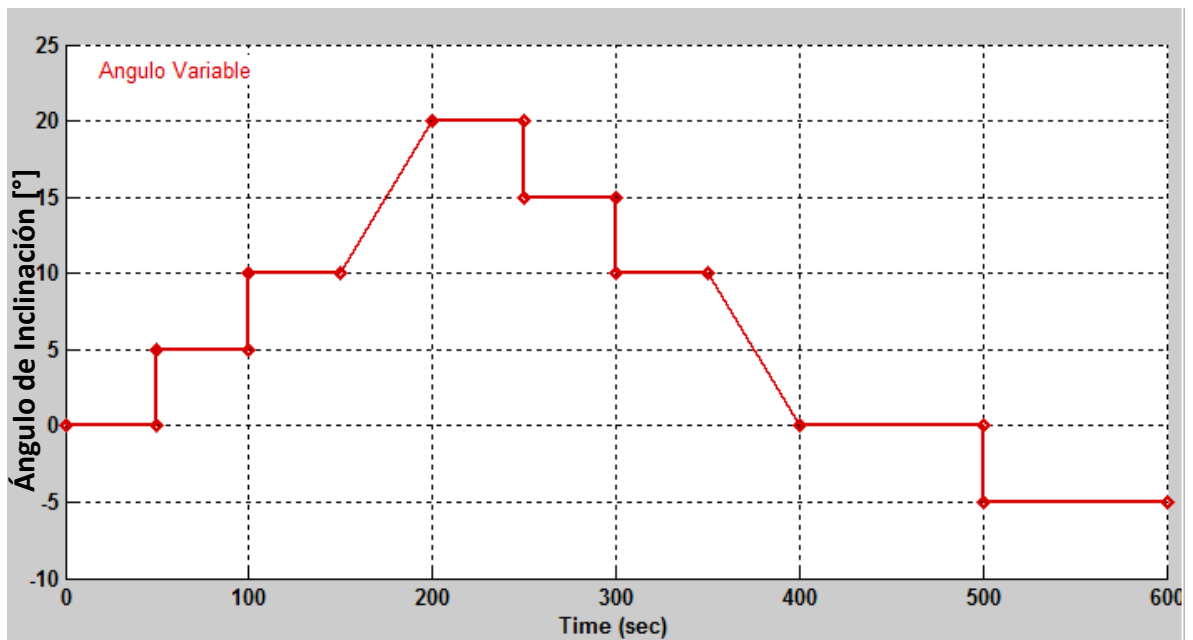
4.2.5 Comportamiento del Vehículo Según el Ciclo de Operación. Hasta el momento se han observado el comportamiento del vehículo modificando las condiciones de operación de un valor por cada simulación, en los análisis reales de los vehículos a escala real, se realizan pruebas que permitan observar su respuesta, frente a ciclos de operación, durante periodos largos, para analizar su desempeño al cambio de las variables durante su recorrido, con el fin de emular estas pruebas, el programa desarrollado, permite, modificar algunas variables,

como el ángulo de inclinación y el tiempo de aplicación torque de freno, durante una recorrido de prueba:

- **Variación del Ángulo de Inclinación del Terreno:**

Esta herramienta permite al programa situar al modelo de vehículo en un terreno donde cambia las pendientes del terreno. Primero, se establece el perfil de la inclinación del terreno, el cual es de manera arbitraria, como se observa en la figura a continuación:

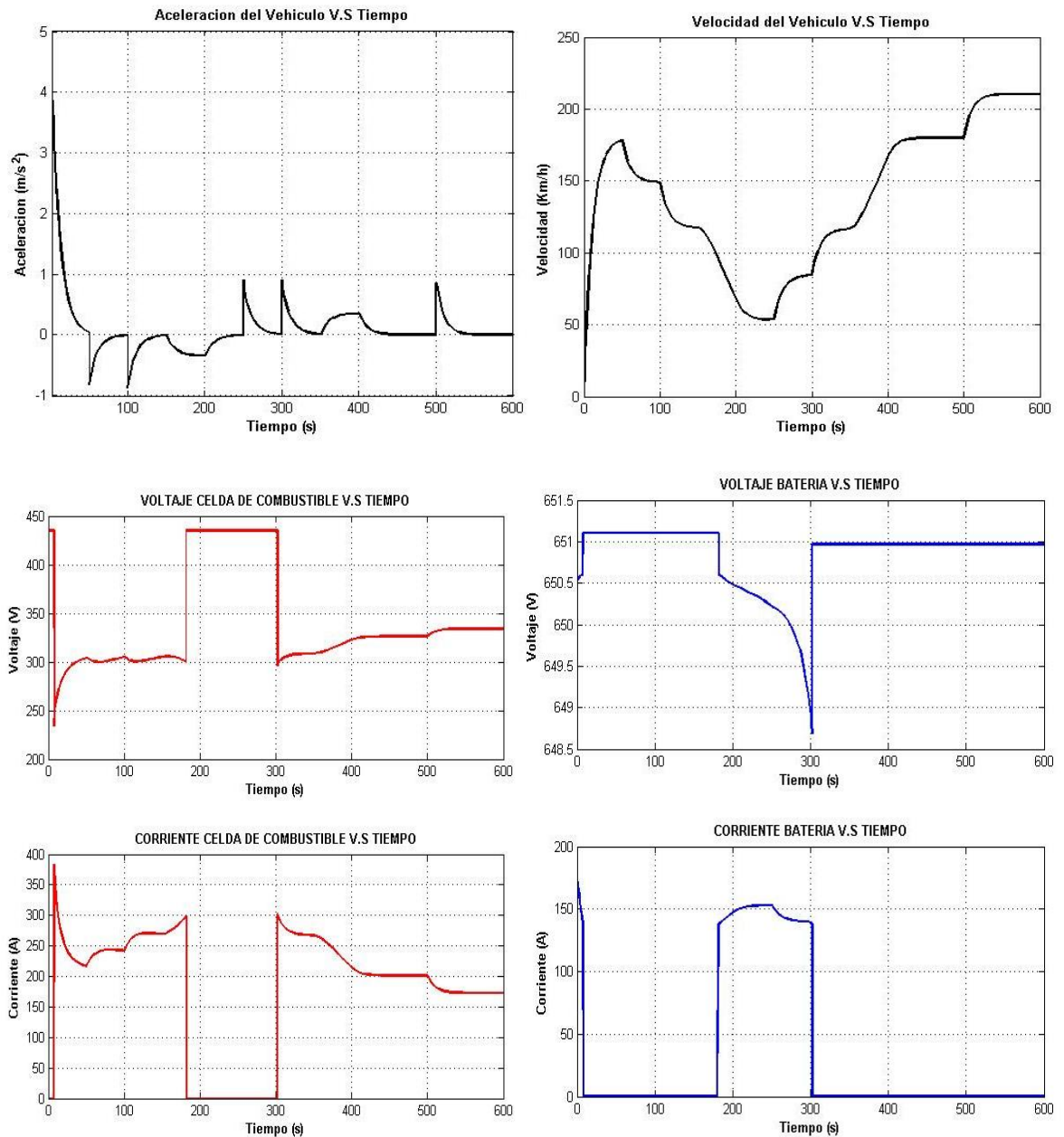
Figura 68. Perfil del Ángulo de Inclinación del Terreno



Fuente: El Autor

Iniciando la simulación, podemos obtener diferentes resultados, pero el interés se centra en la velocidad, aceleración, voltaje y consumo corriente de las fuentes de potencia del vehículo.

Figura 69. Resultados del Comportamiento del Vehículo con el Angulo del Terreno Variable



Fuente: El Autor

En la figura 69 se puede apreciar la variaciones de la velocidad, a medida que aumenta cuando el ángulo disminuye y viceversa, en cuanto la aceleración, notamos picos aceleración positivos cuando el ángulo disminuye, negativos

cuando disminuye y tiende a tomar un valor de cero cuando el ángulo permanece constante y la velocidad intenta estabilizarse. Para las fuentes de suministro de potencia, se observa cuando la celda de combustible no suministra o no puede suministrar corriente al motor, la batería entra en acción como fuente auxiliar, en especial en las etapas de mucha aceleración o cuando el ángulo de inclinación es muy alto.

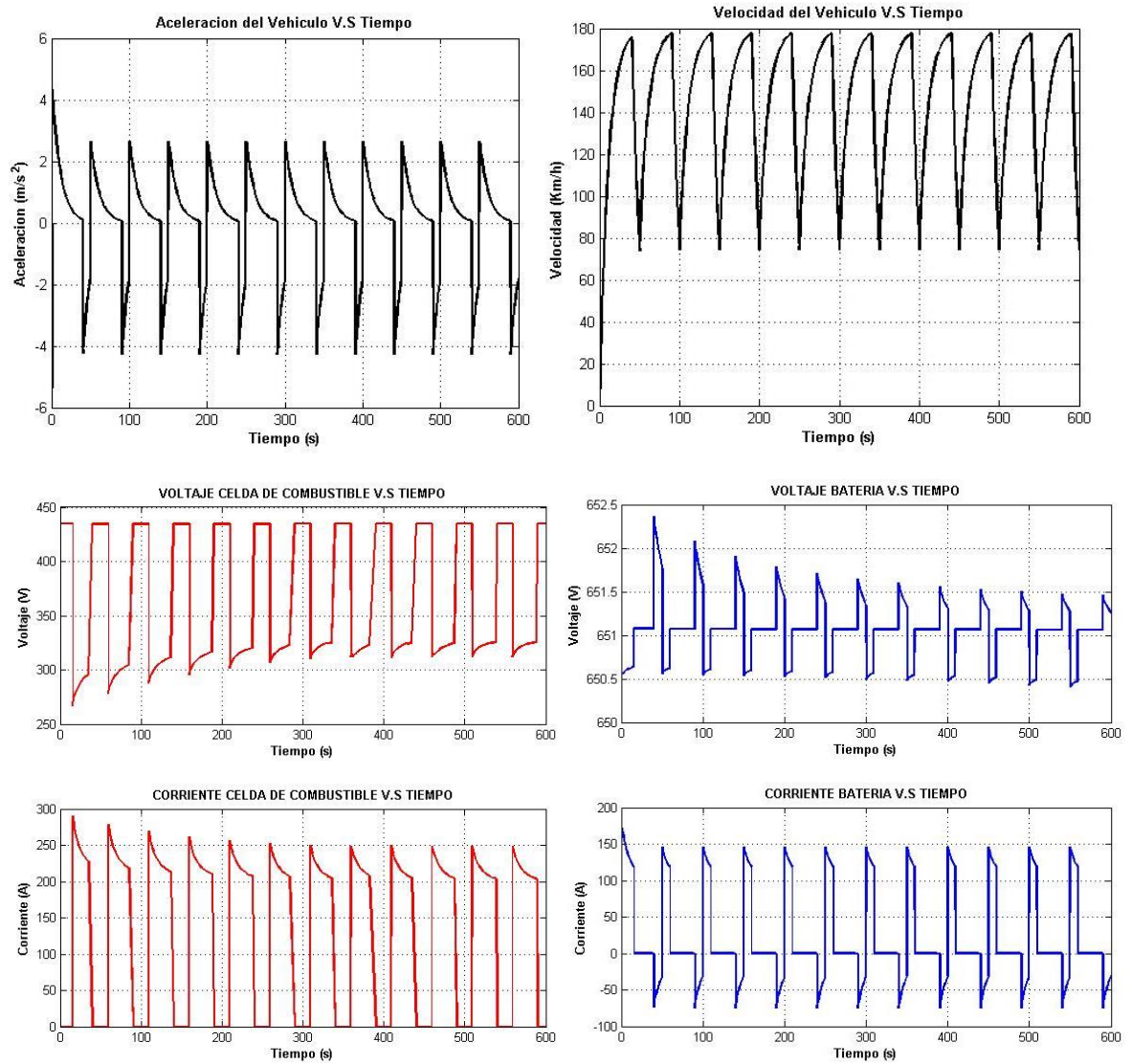
- **Ciclo de Aceleración y Frenado:**

Otra herramienta de análisis cíclica, es la operación del vehículo durante periodos cíclicos de aceleración y frenado, el programa aplica una serie de torque de frenados al vehículo (incluyendo el apagado del motor) para observar su respuesta de aceleración y consumo de corriente y en el casos de la batería el estado de carga por el frenado regenerativo. En el programa se modifican el periodo del ciclo y el porcentaje del tiempo de frenado, los cuales se le dieron los valores de 50 s y 20%, respectivamente.

En las gráficas de la figura 70 correspondientes a la velocidad y aceleración se puede observar un patrón cíclico correspondiente al indicado en el programa. Para las fuentes de energía, se observa que al igual que en el análisis anterior, cuando la celda de combustible no está operando, la batería entra a trabajar y en las etapas de frenado, la batería entra en estado de carga.

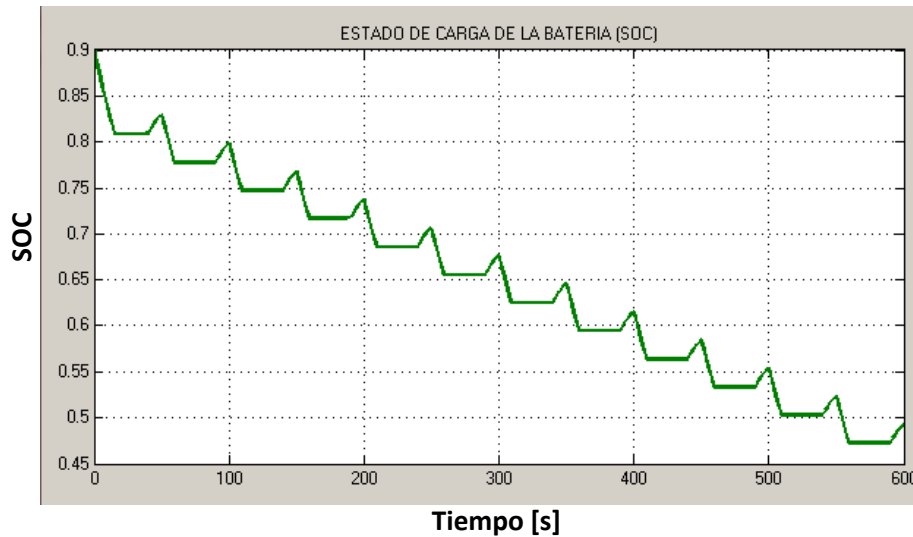
Además se puede apreciar el comportamiento variante que adquiere el voltaje de las fuentes de potencia, en el caso de la batería, el voltaje máximo de carga disminuye con cada ciclo, debido a la disminución del estado de carga como se observa en la figura 71, y en la celda de combustible, la caída del voltaje tiende a disminuir en cada ciclo debido a la disminución en la demanda de corriente.

Figura 70. Resultados del Comportamiento del Vehículo Aplicando Ciclos de Aceleración y Frenado



Fuente: El Autor

Figura 71. Estado de Carga de la Batería durante el Frenado Cíclico



Fuente: El Autor

4.2.6 Análisis del Consumo de Combustible y la Autonomía del Modelo de Vehículo. Un aspecto importante cuando se evalúa un vehículo, ¿Cuánto combustible consume? Y ¿Cada cuánto se tendrá que recargar el tanque de combustible? Para ello se analizará a continuación los resultados de varias simulaciones donde se observará el consumo de combustible por hora y la autonomía total del vehículo, suponiendo una velocidad constante y el tanque de hidrógeno completamente lleno. Primero debemos calcular la cantidad de masa de hidrógeno que almacenar el automóvil, mirando las especificaciones del auto MIRAI de Toyota, nos indica que este cuenta con dos tanques con capacidades de 60 y 62.4 L, para un total de 122,4 L, donde su Presión de almacenamiento nominal es igual a 70 MPa, considerando el hidrógeno como un gas ideal, calculamos la masa que estos pueden almacenar.

La densidad del hidrógeno para una presión de 70 MPa (figura 87), es:

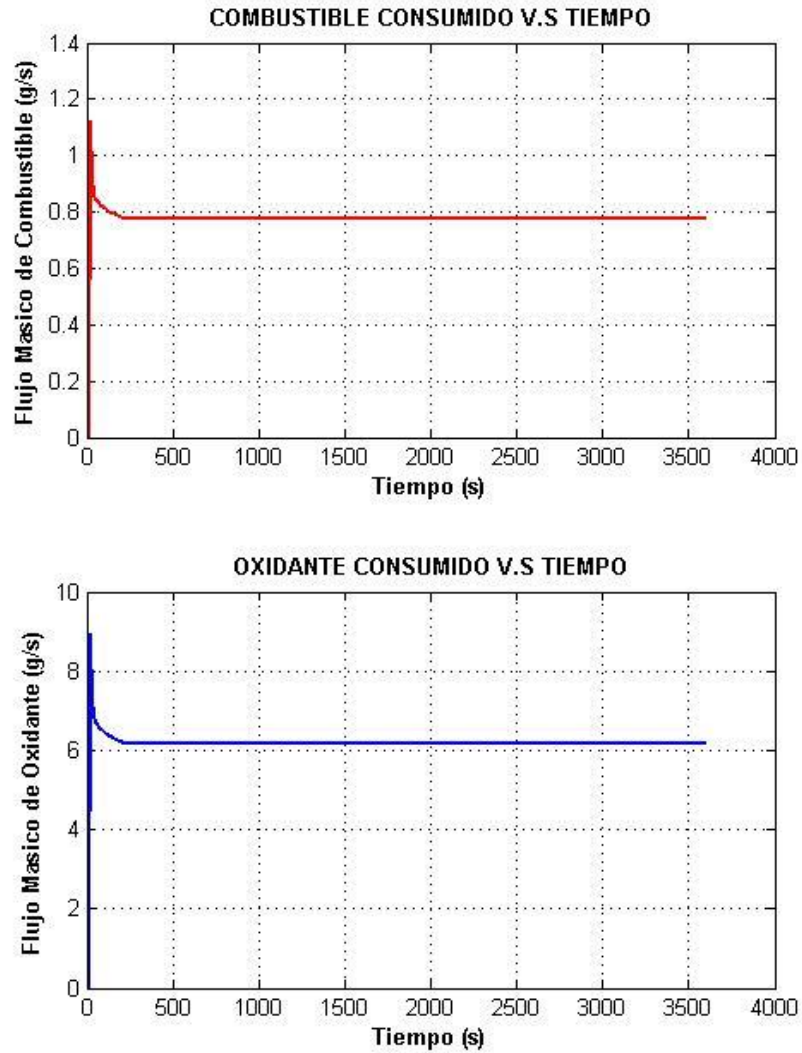
$$\rho_{H_2}@P=70MPa,T=20^{\circ}C = 39.7 \frac{Kg}{m^3}$$

$$C_{H_2} = \rho_{H_2} * V = 39.7 * 122.4 * 10^{-3} = 4.859 Kg \quad (148)$$

A partir de este valor y el consumo horario de combustible, encontramos la autonomía del vehículo modelado. Generando la gráfica correspondiente, vemos

en la figura 72, el consumo a velocidad máxima de 180 Km/h para un tiempo de simulación de 3600s.

Figura 72. Flujo Másico de Combustible y Oxidante Consumidos



Fuente: El Autor

El programa indica que el consumo de combustible total durante la simulación fue $m_{H_2} = 2797.73 [g]$, con un tiempo total de 3600 s, el flujo de combustible es 2797.73 g/h, para hallar la autonomía, procedemos de la siguiente manera.

$$X = Vel * \frac{C_{H_2}}{m_{H_2}} = 180 * \frac{4859}{2797.73} = 312.6 Km \quad (149)$$

Según los fabricantes del auto Mirai de Toyota, este puede alcanzar una autonomía de entre 300 a 750 millas (482.8 a 1207.0 Km), dependiendo de la

exigencia de la conducción. Como podemos notar, el valor calculado se encuentra por debajo del rango estimado del vehículo real, pero hay que considerar que estamos simulando el vehículo a máxima velocidad. Realizando el mismo procedimiento anterior, obtenemos los siguientes resultados tabulados en la tabla 18.

Tabla 18. Autonomía del Vehículo en Relación con la Velocidad

VELOCIDAD [Km/h]	FLUJO DE COMBUSTIBLE [g/h]	AUTONOMIA [Km]
180.020	2797.73	312.60
170.108	2423.6	341.04
160.089	2087.9	372.56
150.075	1788.77	407.66
140.063	1522.07	447.13
130.052	1284.45	491.98
120.043	1073.16	543.52
110.036	885.881	603.54
100.029	718.849	676.14
90.024	574.417	761.51
80.019	448.84	866.25
70.015	340.823	998.19
60.012	248.619	1172.94
50.010	171.512	1416.79

Fuente: El Autor

Apreciando los resultados de las simulaciones tabulados anteriormente, se concluye que al disminuir la velocidad el consumo de combustible disminuye y por lo tanto su autonomía aumenta, esto se puede explicar debido a que la potencia requerida por el vehículo disminuye con la velocidad, si consideramos que a velocidad constante la fuerza de tracción del vehículo no varía considerablemente a medida que se varia la velocidad, según la ecuación de potencia:

$$Pot = F_{traccion} * Vel \quad (150)$$

Finalmente podemos concluir que el modelo simulado por el programa desarrollado en este proyecto, cumple con el rango de las especificaciones de autonomía del vehículo real.

5 CONCLUSIONES

- Se desarrolló un programa de simulación, nombrado como SIDVEC, en el entorno de Matlab utilizando la herramienta de Simulink, para simular el comportamiento de la dinámica de un vehículo eléctrico que utiliza como fuente de potencia principal la tecnología de celdas de combustible de hidrógeno tipo PEM, con el propósito de disponer de una herramienta de estudio, comprensión e investigación de las celdas de combustible aplicadas al área automotriz.
- Como estudio base se utilizó la dinámica longitudinal de los vehículos, considerando varios factores, como el coeficiente aerodinámico, el coeficiente por rodadura, el efecto de la velocidad del viento, la masa del vehículo, las fuerzas de tracción del vehículo, la inclinación del terreno, etc.
- Utilizando los modelos matemáticos encontrados en la literatura, se logró modelar dentro del programa creado, varios de los componentes esenciales para la operación del sistema de transmisión de potencia como el motor eléctrico, el convertidor de voltaje, la interacción de las ruedas con el camino y la fuente de energía secundaria (Ultracapacitores o Baterías).
- Para el modelamiento de la celda de combustible se utilizó igualmente los modelos matemáticos encontrados en la literatura, que permitieran de tal forma modelar su operación lo más completa y precisa posible, considerando los fenómenos termodinámicos, electroquímicos y de transporte de fluidos.
- El programa dispone la posibilidad de elegir, desde la interfaz, las gráficas de comportamiento de los parámetros del sistema que se deseen visualizar según el interés del usuario, tales como la velocidad y aceleración del vehículo, torque y corriente del motor, el voltaje y corriente de la fuente secundaria y la temperatura, el consumo de combustible, el voltaje y la corriente de la celda de combustible.

- Al simular diferentes velocidades de operación se obtuvo, el flujo de consumo de los gases reactantes para cada valor, de esta forma calculando una capacidad de carga de hidrógeno de 4859 g, según los valores de condiciones de almacenamiento del modelo real, se determinó la autonomía del vehículo, teniendo como resultado que menor velocidad se adquiere mayor autonomía. Comparando la autonomía del vehículo real de 482.8 a 1207.0 Km, nuestro vehículo simulado obtuvo un rango de 312.6 a 1416.79 Km, lo cual se puede considerar que dependiendo de las condiciones de manejo el rango de autonomía es cercano al real.
- El tiempo obtenido para acelerar de 0 a 100 Km/h en nuestro modelo simulado fue de 8.966s, el del modelo real para las mismas condiciones es de 9.6s, pero no es correcto afirmar que nuestro modelo posee un mejor desempeño, dado que no consideramos muchos factores de pérdidas de potencia presentes en el sistema de transmisión del modelo real y otros posibles factores que podrían afectar su desempeño.
- Debido a la falta de datos suministrados por el fabricante fue imposible modelar de forma completa y exacta el modelo de vehículo eléctrico escogido y por lo tanto los datos obtenidos por el proceso de simulación del programa manejan un amplio margen de error con respecto a la versión original, dicho lo anterior, la validación del programa SIDVEC se restringió solo a evaluar de forma aproximada el comportamiento lógico de un vehículo con las características especificadas. Sin embargo ante esta dificultad se obtuvo buenos resultados de la simulación y lo suficientemente aproximados para expresar que el comportamiento del modelo simulado se acerca bastante al modelo real.
- Se logró caracterizar el desempeño de la celda de combustible de forma aproximada a la versión real, teniendo en cuenta diversos parámetros, tales como las temperaturas y presiones de entrada y de salida, la demanda de corriente, características geométricas y de materiales constituyentes y la composición química de los gases reactantes, además de considerar los efectos de pérdidas de voltaje y la transferencia de calor al ambiente.

- El modelo simulado alcanzo durante el tiempo de simulación de 200 s una velocidad máxima de 180.02 Km/h, estableciendo su velocidad de operación de 180 Km/h, es decir, se obtuvo un error de 0.011%, siendo la velocidad de prueba de 170 Km/h, con el valor de error más alto de 0.064%, al obtenerse una velocidad de simulación de 170.108 Km/h. Con lo cual se puede mencionar que nuestro sistema de control de velocidad, junto con el método del cálculo de los parámetros del motor, son correctos.
- Se logró determinar la temperatura de operación nominal de acuerdo al valor máximo de corriente demandada por el motor, para obtener la potencia más alta, hallada a 68°C, obteniendo durante el análisis termodinámico una eficiencia de 65.82% y temperatura final de 68.04°C, lo que significa un error del 0.059% para nuestro sistema de control de temperatura.
- Se realizó un modelo matemático para calcular el ángulo máximo de inclinación posible que nuestro vehículo simulado puede superar, cuyo valor fue de 23.892°, a partir de este punto el programa, en muchos casos, es incapaz de realizar una buena simulación, dado que la velocidad toma valores negativos, indicando que el vehículo va en retroceso, lo cual es cierto, pero produciendo error de lógica para el software.
- Al variar el ángulo de inclinación del terreno hasta su valor máximo, obtuvimos un comportamiento inversamente lineal de la velocidad máxima alcanzada por el vehículo, con los mismos parámetros del motor.
- Al simular diferentes condiciones del terreno, utilizando la fórmula de Pacejka y sus parámetros respectivos para la interacción de las ruedas con el camino, se obtuvo que las mejores condiciones fueron en terreno seco al lograr una velocidad de 168.987 Km/h en un tiempo de 30s, seguida por el terreno húmedo con una velocidad de 168.416 Km/h y siendo la peor condición el terreno con presencia de hielo con una velocidad de 46.872 Km/h.

- Se analizó la influencia de la velocidad del viento longitudinal sobre el desempeño del vehículo, dando como resultado un efecto lineal, disminuyendo la velocidad final del vehículo cuando este va en contra y viceversa.
- Se comparó el desempeño del vehículo simulado en las diferentes configuraciones permitidas por el programa, obteniendo como resultado que la mejor configuración es un vehículo de cuatro ruedas, de doble tracción con un único motor. Al alcanzar la mayor velocidad en un tiempo de simulación de 20s con un valor de 161.708 Km/h y una aceleración de arranque de 9.74 m/s^2 , siendo superior a las demás, excepto que se obtuvo el mayor consumo de corriente de 186.969 A.
- Se simuló el vehículo modelado en condiciones del ángulo de inclinación variable, demostrando como resultado de las gráficas un buen desempeño de respuesta de la dinámica del vehículo y de las fuentes de potencia tanto principal como secundaria. De igual forma el vehículo modelado, fue simulado bajo condiciones cíclicas de frenado donde de forma gráfica se observó el comportamiento del frenado regenerativo y su influencia sobre el estado de carga de las baterías y la operación cíclica de las celdas de combustible, concluyendo que el comportamiento general del sistema concuerda de forma lógica con el esperado.

6 RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- Se propone la continuación del desarrollo y el mejoramiento del programa SIDVEC, involucrando en este un modelamiento más completo, como agregar la dinámica lateral del vehículo, para ampliar el cubrimiento de las necesidades de investigación de las celdas de combustibles aplicadas al área automotriz.
- Se aconseja desarrollar el software independiente del programa de Matlab, al programarlo bajo un lenguaje como C, C++, java, Python o según sea la mejor opción.
- Mejorar el análisis del transporte de fluidos en los campos de flujos de las placas bipolares, para estudiar más profundamente la dinámica de los gases reactantes a través de la celda de combustible y la influencia sobre la temperatura, las pérdidas de presión y el desempeño de las reacciones electroquímicas.
- Adquirir un sistema real que opere con celdas de combustible, en lo posible un automóvil eléctrico pequeño, para realizar una adquisición de datos del desempeño del vehículo en tiempo real y compararlo con el modelo virtual y así permitir una mejor evaluación y mejoramiento del software desarrollado.
- Fortalecer e Incentivar en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS, el estudio de las energías alternativas y de tecnologías en desarrollo para ser aplicadas en sistemas, equipos o elementos como futuras alternativas de solución para la optimización del consumo energético y la preservación del medio ambiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] ENRIQUEZ HARPER, Gilberto. Tecnologías de Generación de Energía Eléctrica. México: Editorial Limusa, 2009. 386 p.

[2] MAJDOUB, Khalid et al. Vehicle Longitudinal Motion Modeling for Nonlinear Control. Control Engineering Practice, International Federation of Automatic Control. Ene 2012. P. 69-81. <hal-00638489>

[3] MOHAN REDROUTHU, Bharat y DAS, Sidharth. Tyre Modelling for Rolling Resistance. Göteborg, Suecia. Tesis de Maestría en Ingeniería Automotriz, Universidad Tecnológica de Chalmers. Departamento de Mecánica Aplicada. 2014. p. 18-21

[4] DI MARTINO, Raffaele. Modelling and Simulation of the Dynamics Behaviour of the Automobile. Salerno, Italia: Tesis de Grado (Curso de grado en Ingeniería Mecánica). Universidad de Estudios de Salerno. Facultad de Ingeniería, 2012. p. 15-74

[5] TOBON OROZCO, David; SANCHEZ GANDUR, Andrés Felipe y CARDENAS LONDOÑO, María Victoria. Regulación Ambiental sobre la Contaminación Vehicular en Colombia: ¿hacia dónde vamos?. Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia, sep. 2006. 25 p. Disponible en internet: <http://www.udea.edu.co/portal/page/portal/bibliotecaSedesDependencias/unidadesAcademicas/FacultadCienciasEconomicas/ElementosDiseno/Documentos/BorradoresEconomia/BorradCIE_17.pdf>

[6] Automobiles: Pollution & Energy Use. Jul. 1999. Disponible en internet: <<http://bicycleuniverse.info/cars/pollutionpaper.html>>

[7] SMITH, Meghan E. ¿What Percentage of Air Pollution is Due to Cars? [en línea]. Disponible en internet: <<http://auto.howstuffworks.com/percentage-of-air-pollution-due-to-cars.htm>>

[8] JACKALYNE PFANNENSTIEL, Chairman y JAMES BOYD, Vice Chair. Alternative Fuel Vehicles (AFVs) and High-Efficiency Vehicles [en línea]. California, Estados Unidos: CALIFORNIA ENERGY COMMISSION, Disponible en internet: <<http://energyarchive.ca.gov/afvs/index.html>>

[9] ACUÑA GARRIDO, Francisco y MUÑOZ YI, Ventura. Celdas de Combustible: una alternativa amigable con el medio ambiente para la generación de potencia y su impacto en el desarrollo sostenible de Colombia en el siglo XXI. Barranquilla, Colombia: Ingeniería de Desarrollo Universidad del Norte, abr. 2001. 11 p.

[10] GUTIÉRREZ JODRA, Luis .El Hidrógeno: Combustible del Futuro. Madrid, España: Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2005. p.49-67.

[11] CANO CASTILLO, Ulises. Las celdas de combustible: verdades sobre la generación de electricidad limpia y eficiente vía electroquímica. México: Instituto de Investigaciones Eléctricas, 2001. 8 p.

[12] EHSANI, Mehdrad; GAO, Yimin; GAY, Sebastien y EMADI, Ali. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory and Design. Estados Unidos: CRC Press LLC, 2005. 384 p. ISBN 0-8493-3154-4

[13] LARMINIE, James y LOWRY, Jhon. Electric Vehicle Technology Explained. Inglaterra: Editorial Jhon Wiley & Sons, 2003. p.81-138. ISBN 0-470-85163-5

[14] LARMINIE, James y DICKS, Andrew. Fuel Cell Systems Explained. Segunda Edición, Inglaterra: Editorial Jhon Wiley & Sons, 2003. p.67-305. ISBN 0-470-84857-X

[15] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies, modulo 1, Hydrogen Properties [en línea]. California, Estados Unidos: College of the Desert and SunLine Transit Agency, dic. 2001. p.1-1. Disponible en internet: < <http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-fuel-cell-engines-and-related-technologies-course-manual>>

[16] Hidrógeno como una Alternativa del Futuro: Todavía Lejos de Ser una Alternativa Real [en línea]. Revista Consumer, 2005. 2 p. Disponible en internet: <<http://revista.consumer.es/web/es/20050101/medioambiente/>>

[17] HOOGERS, Gregor. Fuel Cell Technology-Handbook. Estados Unidos: CRC Press LLC, 2003. p.138-159. ISBN 0-8493-0877-1

[18] MENDOZA SEGARRA, Mario. Potencia y Energía de las Celdas de Combustible [en línea]. Lima, Perú. Disponible en internet:

<<http://www.minpetel.com/proyectos/hidrogeno/Potencia%20y%20Energ%EDa%20de%20las%20Celdas%20de%20Combustible.pdf> >

[19] TIBAQUIRA G., Juan y POENER, Jonathan. Diseño Y Construcción de Una Celda De Combustible Tipo Membrana De Intercambio Protónico. Revista Scientia et Technica, Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira. ago. 2009. 6p. ISSN 0122-1701

[20] MARTINEZ SANCHEZ, José Javier. Análisis y Sensibilidad de los Parámetros de Diseño de la Placa Bipolar de una Pila de Combustible tipo PEM. Sevilla, España: Proyecto Fin de Carrera (Ingeniería Energética y Mecánica), Universidad de Sevilla, Escuela Superior de Ingenieros, sep. 2005. p.25-42.

[21] MAYANDIA AGUIRRE, Antonio. Descripción y Modelado de una Pila de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico. Madrid, España: Proyecto Fin de Carrera (Ingeniería Eléctrica), Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Eléctrica, oct. 2009. 194p.

[22] GUERVOS SANCHEZ, María Esther. Dimensionado Básico de un Automóvil de Hidrógeno [en línea]. Disponible en internet:<<http://estherguervos.galeon.com> >

[23] Set-te: Pilas de Combustible [en línea]. Disponible en internet: <http://www.kimerius.com/pilas-de-combustible-1/> >

[24] Observatorio tecnológico de la Energía. Mapa Tecnológico: Movilidad Eléctrica. España: IDEA-Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 12 de ene. 2012, 80p. Disponible en internet: <http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Movilidad_Electrica_ACC_c603f868.pdf >

[25] SAENZ GONZALO, Alberto y TRESACO VIDALLER, Javier. KERS: Sistema para la Recuperación de la Energía Cinética pérdida durante la Frenada en la Fórmula 1. Zaragoza, España: Proyecto de Asignatura (ingeniería Informática), Universidad de Zaragoza, ene. 2010. 42p.

[26] MARTIN PEREZ, Ana. Guía del Vehículo Eléctrico. Madrid, España: Fundación de la Energía de la Comunidad De Madrid. 234p.

[27] MEDINA GONZALEZ, Purificación. Motor del Futuro. España: 2010. 76p.

[28] SOLANS, J. M. Vehículo Eléctrico ¿Tan sencillo como Plug & Play?. España: Seminario de Eficiencia Energética en el V Barcelona Tech Summer Sessions, jul. 2010. 34p. Disponible en internet: <<http://eventos.schneiderelectric.es/evento/documentacion/497>>

[29] GARCIA CAMUS, Juan Manuel y GARCIA LABORDA, José Ángel. Biocarburantes Líquidos: Biodiesel y Bioetanol. Madrid, España: Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía (CITME), Universidad Rey Juan Carlos, Elecé Industria Gráfica, 2006. 122p.

[30] CANTILLO CUELLO, Nelly Margareth. Estudio Cinético de la Oxidación de Etanol en electrodos de Platino-Estaño-Níquel. Medellín, Colombia: Tesis de Grado (Maestría en ingeniería Química), Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, 2012. p. 9-28

[31] LOURENS, D; CASE, MJ y PIENAAR, HCvZ. Design and development of a Zinc-Air Fuel Cell for Telecommunication Systems. Sudáfrica: the Southern Africa Telecommunication Networks and Applications Conference (SATNAC), 2006. 5p. Disponible en internet: <<http://www.satnac.org.za/proceedings/2006/papers/No%20323%20-%20Lourens.pdf>>

[32] TAHIL, William. The zinc Air Battery and the Zinc Economy: A Virtuous Circle. Francia: Meridian International Research, 2007. 9p.

[33] THOREL, Alain S. Ceramics Materials- cap 3: Tape Casting Ceramics for High Temperature Fuel Cell Applications. Paris, Francia: Instituto Tecnológico de Paris (ParisTech), sep. 2010. p.50-65. ISBN 978-953-307-145-9. Disponible en internet: <<http://www.intechopen.com/books/ceramic-materials>>

[34] Microbial fuel Cells Q&A. Pensilvania, Estados Unidos: College of Engineering. Disponible en internet: <http://www.research.psu.edu/capabilities/documents/MFC_QandA.pdf/view >

[35] ZHAO, Feng; SLADE, Robert C. y VARCOE, John R. Techniques for the Study and Development of Microbial Fuel Cells: an Electrochemical Perspective. Guilford, Reino Unido: Universidad de Surrey, Ciencias Químicas, jul. 2009. 54p.

- [36] DU, Zhuwei; LI, Haoran y GU, Tingyue. A State of the Art Review on Microbial Fuel Cells: A Promising Technology for Wastewater Treatment and Bioenergy. Beijing, China: Elsevier Editorial, Instituto de Procesos de Ingeniería, Academia de Ciencias Chinas, may. 2007. p.465-470.
- [37] AELTERMAN, P.; RABAEY, K.; CLAUWAERT, P. y VVERSTRAETE, W. Microbial Fuel Cells for Wastewater Treatment. Gent, Bélgica: Universidad de Gent, 2006. p. 9-15.
- [38] RABAEY, Korneel; LISSENS, Geert y VERSTRAETE, Willy. Biofuels for Fuel Cells: Renewable Energy from Biomass Fermentation- cap. 20: Microbial Fuel Cells: Performances and Perspectives. Gent, Bélgica: Universidad de Gent, 2005. p. 377-399. ISBN 9781843390923
- [39] MARADEY CHARRIS, Juan Francisco. Termodinámica Aplicada-cap.4: Combustión. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, jun. 2002. p. 286-352. ISBN 978-958-8187-05-1
- [40] SPRINGER, T. E.; ZAWODZINSKI, T. A. y GOTTESFELD, S. Polymer Electrolyte Fuel Cell Model. Los Alamos, Nuevo México: The Electrochemical Society, ago. 1991. p. 2334-2341.
- [41] JEONGWOO, Han y PANOS, Papalambros. Optimal Design of Hybrid Electric Fuel Cell Vehicles Under Uncertainty and Enterprise Considerations. Estados Unidos: ASME (American Society and Mechanical Engineering), revista Journal of Fuel Cell Science and Techonology-April 2010, ene. 2010. 9p.
- [42] SPIEGEL, Colleen. PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab. Estados Unidos: Academic Press, Elsevier, 2008. 456p. ISBN: 978-0-12-374259-9
- [43] LABORDE, Miguel Angel y RUBIERA GONZALEZ, Fernando. La Energía del Hidrógeno. Buenos Aires, Argentina: CYTED (Ciencia y Tecnología para el Desarrollo), 2010. p. 23-115. ISBN -978-9287-26261-0-5
- [44] MÜLLER, Erick y STEFANOPOULOU, Anna. Analysis, Modeling, and Validation for the Thermal Dynamics of a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell System. Estados Unidos: ASME (American Society and Mechanical Engineering), revista Journal of Fuel Cell Science and Techonology-May 2006. Sep. 2005. 12p.

- [45] CENGEL, Yunus A. Transferencia de Calor, Segunda Edición. México: McGraw-Hill, 2004. p. 266-304. ISBN 970-10-4484-3
- [46] MOHAMMAD SAFWAN, Burhaumudin; PAKHARUDDIN MOHD, Samin ; HISHAMUDDIN, Jamaluddin; ROSLAN ABD, Rahman y SYABILLAH, Sulaiman. Modeling and Validation of Magic Formula Tire Model. Penang, Malasia: International Conference on Automotive, Mechanical and Materials Engineering, 2012. p. 113-117
- [47] SHORT, Michael; PONT, Michael J. y HUANG, Qiang. Simulation of Vehicle Longitudinal Dynamics. Leicester, Reino Unido: Universidad de Leicester, oct. 2004. 17p.
- [48] UTURBEY, W. Convertidores DC-DC. Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, 1996. 12p.
- [49] BERTINI, Lorenzo. Modeling and Optimization of the Fuel Cell Hybrid System. Estocolmo, Suecia: Tesis de Maestría, KTH Royal Institute of Technology, División de Electroquímica Aplicada. p. 7-22
- [50] R., Kötz; M., Bäertschi; F., Büchi; R., Gallay. HY.POWER - A Fuel Cell Car Boosted with Supercapacitors. Rossens, Suiza: Instituto Paul Scherrer, dic. 2002. 12p.
- [51] WIJEWARDANA, S. New Dynamic Battery Model for Hybrid Vehicles. Londres, Reino Unido: Escuela de Ingeniería y Ciencia de los Materiales, Universidad Queen Mary de Londres, Volumen 4, Issue 4, abr. 2014. p. 624-629
- [52] TREMBLAY, Olivier y DESSAINT, Louis A. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications. Montreal: Departamento de Ingeniería Eléctrica, Escuela de Tecnología Superior. May. 2009. p. 2-4
- [53] YOUNG, Kwo; WANG, Caisheng; WANG, Le Yi y STRUNZ, Kai. Electric Vehicle Integration into Power Network, Power Electronics and Power Systems, cap. 2. Electric Vehicle Battery Technologies. New York 2003. p. 17-22. ISBN: 978-1-4614-0133-9

BIBLIOGRAFÍA

- BERTINI, Lorenzo. Modeling and Optimization of the Fuel Cell Hybrid System. Estocolmo, Suecia: Tesis de Maestría, KTH Royal Institute of Technology, División de Electroquímica Aplicada. p. 7-22
- DI MARTINO, Raffaele. Modelling and Simulation of the Dynamics Behaviour of the Automobile. Salerno, Italia: Tesis de Grado (Curso de grado en Ingeniería Mecánica). Universidad de Estudios de Salerno. Facultad de Ingeniería, 2012. p. 15-74
- MAYANDIA AGUIRRE, Antonio. Descripción y Modelado de una Pila de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico. Madrid, España: Proyecto Fin de Carrera (Ingeniería Eléctrica), Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Eléctrica, oct. 2009. 194p.
- MARTINEZ SANCHEZ, José Javier. Análisis y Sensibilidad de los Parámetros de Diseño de la Placa Bipolar de una Pila de Combustible tipo PEM. Sevilla, España: Proyecto Fin de Carrera (Ingeniería Energética y Mecánica), Universidad de Sevilla, Escuela Superior de Ingenieros, sep. 2005. p.25-42.
- MOHAN REDROUTHU, Bharat y DAS, Sidharth. Tyre Modelling for Rolling Resistance. GÖteborg, Suecia. Tesis de Maestría en Ingeniería Automotriz, Universidad Tecnológica de Chalmers. Departamento de Mecánica Aplicada. 2014. p. 18-21
- MOHAMMAD SAFWAN, Burhaumudin; PAKHARUDDIN MOHD, Samin ; HISHAMUDDIN, Jamaluddin; ROSLAN ABD, Rahman y SYABILLAH, Sulaiman. Modeling and Validation of Magic Formula Tire Model. Penang, Malasia: International Conference on Automotive, Mechanical and Materials Engineering, 2012. p. 113-117

- MÜLLER, Erick y STEFANOPOULOU, Anna. Analysis, Modeling, and Validation for the Thermal Dynamics of a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell System. Estados Unidos: ASME (American Society and Mechanical Engineering), revista Journal of Fuel Cell Science and Technology-May 2006. Sep. 2005. 12p.
- SAENZ GONZALO, Alberto y TRESACO VIDALLER, Javier. KERS: Sistema para la Recuperación de la Energía Cinética perdida durante la Frenada en la Fórmula 1. Zaragoza, España: Proyecto de Asignatura (ingeniería Informática), Universidad de Zaragoza, ene. 2010. 42p.
- SPRINGER, T. E.; ZAWODZINSKI, T. A. y GOTTESFELD, S. Polymer Electrolyte Fuel Cell Model. Los Alamos, Nuevo México: The Electrochemical Society, ago. 1991. p. 2334-2341.
- TIBAQUIRA G., Juan y POENER, Jonathan. Diseño Y Construcción de Una Celda De Combustible Tipo Membrana De Intercambio Protónico. Revista Scientia et Technica, Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira. ago. 2009. 6p. ISSN 0122-1701

ANEXOS

ANEXO A. PARÁMETROS DEL VEHÍCULO TOYOTA MIRAI FCV



2016 Mirai Product Information

MECHANICAL	
FUEL CELL SYSTEM	
Name	Toyota Fuel Cell System (TFCS)
FUEL CELL STACK	
Name	Toyota FC Stack
Fuel Cell Stack Type	Solid polymer electrolyte fuel cell
Humidification System	Internal circulation system (humidifier-less)
Power Output	153 HP (114 kW) MAX
Output Density	By Volume: 3.1 kW/L By Weight: 2.0 kW/kg
Cell	Number of cells in one stack: 370 (single-line stacking) Thickness: 1.34 mm Weight: 102 g Flow Channel: 3D fine-mesh flow field (cathode)
Emission Rating	Zero Emissions Vehicle (ZEV)
ELECTRIC MOTOR	
Motor Type	AC synchronous electric generator
Power Output	151 HP (113 kW) MAX
Peak Torque	247 lb-ft (335 N-m)
HYDROGEN TANKS	
Storage Method	Carbon fiber high-pressure tanks
Number of Tanks	2
Type	Type-4
Material	Three layer structure: Inner layer: plastic liner (prevents hydrogen leakage) Middle layer: carbon fiber reinforced plastic (structural element) Surface layer: glass fiber reinforced plastic (protects outer surface from abrasion)
Fuel	Compressed hydrogen gas
Maximum Filling Pressure	87.5 MPa
Normal Operating Pressure	70 MPa (approx. 10,000 psi)
Storage Density (Capacity)	5.7 weight %
Internal Volume	122.4 L Front: 60.0 L Rear: 62.4 L
Hydrogen Storage Mass	Approx. 5.0 kg
Refueling Time	About 5 minutes

DRIVE BATTERY	
Type	Nickel-metal hydride
FUEL CELL BOOST CONVERTER	
Number of Phases	4 phases
Voltage	650V (MAX)
Volume	13 L
POWER TAKE OFF OPTION	
DC Power Output	9 kW (MAX)
Energy Output	Approx. 60 kWh
EPA ESTIMATES	
Fuel Consumption	TBD
VEHICLE	
Cruising Range	Up to 300 miles
Maximum Speed	111 mph
Acceleration Performance	0 – 60 miles: 9.0 seconds
Coefficient of Drag (C _D)	0.29
Cold Start Capability	-22°F (-30°C)

CHASSIS AND BODY	
Drivetrain	Front-wheel drive
Body Construction	Unitized body
Suspension	Independent MacPherson strut front suspension with stabilizer bar and hydraulic shock absorbers; double wishbone rear suspension with coil springs, trailing arms, stabilizer bar and hydraulic shock absorbers (TBD)
Starting System	Electronic Push-Button Start System
Steering	Electric Power Steering (EPS) Power-assisted rack-and-pinion
Brakes	Power assisted ventilated front disc brakes and solid rear disc brakes and Star Safety System™ (TBD)

EXTERIOR DIMENSIONS	
Wheelbase	109.4 in.
Overall Length	192.5 in.
Overall Width	71.5 in
Overall Height	60.4 in
Track (front/rear)	60.4 in. / 60.8 in.
Minimum Running Ground Clearance	5.1 in.
Tires	P215/55R17
Tire Repair Kit (no spare)	

INTERIOR DIMENSIONS - TBD	
----------------------------------	--

WEIGHTS AND CAPACITIES	
Curb Weight (lbs.)	4078.5
Seating capacity	4
Passenger volume (cu. ft.)	TBD (FR/RR: TBD / TBD)
Cargo Volume (cu. ft.)	TBD / TBD (behind front / second row)
Gross Vehicle Weight Rating (lbs.)	TBD
Battery Weight (lbs.)	TBD
Fuel Cell Stack Weight (lbs.)	123.5
Hydrogen Tank Weight (lbs.)	192.9

WARRANTY COVERAGE	
--------------------------	--

- 8-year/100,000-mile Fuel Cell System
(FC Battery Pack, Battery ECU, FC Air Compressor, FC Boost Converter, FC ECU, H2 tanks, FC PCU (Power Control Unit), FC Stack, HF ECU (H2 Fueling ECU), and Power Management ECU (HV ECU))
- 5-year/60,000-mile Other Powertrain Components
- 3-year/36,000-mile Basic

Fuente: 2016 Toyota Mirai Fuel Cell Sedan Production Information

<http://pressroom.toyota.com/releases/2016+toyota+mirai+fuel+cell+product.htm>

ANEXO B. PARÁMETROS UTILIZADOS EN EL MODELAMIENTO Y LA SIMULACIÓN

Tabla B1. Parámetros de Modelamiento y Simulación

PÁRAMETROS DE MODELAMIENTO				
VEHÍCULO				
Potencia Total	113	KW	Constante Inversa de Tiempo	2.3077 Ah ⁻¹
Velocidad Máxima	180	Km/h	Capacidad de Carga	6.5 Ah
Distancia entre ejes	2.7	m	Numero de Celdas	508 -
Altura del Centro de Gravedad	0.4	m	CONVERTIDOR DE VOLTAJE BOOST DC/DC	
Altura de Presión Aerodinámica	0.6	m	Voltaje Máximo Salida	650 V
Masa	1850	Kg	Voltaje de la fuente	254.378 V
Área de Arrastre Aerodinámico	2.23	m ²	Inductancia	0.5*10 ⁻³ H
Eficiencia de la Caja de Cambios	97.0	%	Capacitancia	1*10 ⁻³ C
Velocidad de Operación	180	Km/h	Frecuencia del Pulso	90 KHz
Ángulo de Inclinación Superficie	0.0	°	Resistencia de la Carga	2.7356 Ω
Densidad del Aire	1.225	Kg/m ³	Porcentaje del Periodo de Operación	60.86 %
Coef. de Arrastre Aerodinámico	0.29	-	Eficiencia	99.12 %
Aceleración Gravitacional	9.81	m/s ²	Numero de Fases	4 -
Velocidad del Viento	0.0	m/s	STACK DE CELDAS DE COMBUSTIBLE	
Tipo de Terreno	Seco	-	Presión Entrada Combustible	120 KPa
Relación de Engranajes	5.8858	-	Presión Entrada Oxidante	120 KPa
Torque Máximo	335	Nm	Hum. Relativa Combustible	0.7 -
Distribución de peso: (Delante / Atrás)	55 / 45	%	Hum. Relativa Oxidante	0.5 -
Configuración del Vehículo	Cuatro Ruedas (2-2)	-	N° Estequiométrico Comb.	1.2 -
Tipo de Tracción	Delantera	-	N° Estequiométrico Oxid.	2 -
Numero Total de Motores	1	-	Temp. Entrada Combustible	25 °C
RUEDAS			Temp. entrada Oxidante	25 °C
Radio Rueda Trasera	17" (0.216)	pulg (m)	Temperatura Ambiente	25 °C
Radio Rueda Delantera	17" (0.216)	pulg (m)	Presión Ambiente	101325 Pa
Momento de Inercia	4.25	Kg.m ²	Temp. de Operación	68 °C
Coeficiente de Rodadura	0.015	-	Numero de Celdas	370 -
MOTOR ELECTRICO			Área Activa por Celda	299.67 cm ²
Voltaje Motor	650	V	Composición Combustible	100% H ₂
Inductancia	1.2*10 ⁻⁵	H	Composición Oxidante	21%O ₂ 79%N ₂
Momento de inercia del Rotor	0.00635	Kg.m ²	Profundidad Canal	1 mm
Resistencia Eléctrica	3.6832	Ω	Ancho canal	1 mm
Constante F.E.M	0.2031	V.s/rad	Numero de Canales	50 -
Constante de Fricción Viscosa	0.1047	N.m/rad/s	Espacio entre Canales	1 mm
Constante de Torque	1.8983	N.m/A	Material Placas Finales	Aluminio -
Ángulo Max. de Inclinación	23.892	°	Material Placa Colectora	Cobre -
FUENTE AUXILIAR			Material Placa Bipolar	Titanio -
Tipo	Pack de Baterías	-	Material MEA	Nafion NRE-212 -
Tipo de Batería	NiMH	-	Material Catalizador	Platino -
Voltaje a Circuito Abierto	1.2816	V	Densidad de Corriente de Intercambio	5 A/m ²
Resistencia Interna	0.002	Ω	Configuración Campo de Flujo	Paralela -
Constante de Polarización	0.0014043	V/Ah	Espesor GDL	0.2 mm
Amplitud Zona Exponencial	0.11104	V	Porosidad Membrana	0.4 -
			Coefic. De Emisividad	0.85 -
			Coefic. De Convección	12 W/(m ² K)

Fuente: El Autor

ANEXO C. MANUAL DE INSTALACIÓN

El programa de simulación de la dinámica de vehículos eléctricos con celdas de combustible, “*SIDVEC*”, fue desarrollado en el entorno del software matemático de Matlab de la versión R2014a, que cuenta con las siguientes características:

- Lenguaje de alto nivel para cálculo técnico
- Entorno de desarrollo para la gestión de código, archivos y datos
- Herramientas interactivas para exploración, diseño y resolución de problemas iterativos
- Funciones matemáticas para álgebra lineal, estadística, análisis de Fourier, filtraje, optimización e integración numérica.
- Funciones gráficas bidimensionales y tridimensionales para visualización de datos
- Herramientas para crear interfaces gráficas de usuario personalizadas
- Funciones para integrar los algoritmos basados en MATLAB con aplicaciones y lenguajes externos, tales como C/C++, FORTRAN, Java, COM y Microsoft Excel.

Requerimientos del Sistema para la Instalación del Software Matlab R2014a

- **Sistema Operativo:** Windows 8, Windows 7 Service Pack 1, Windows Vista Service Pack 2, Windows XP Service Pack 3, Windows XP x64 Edition Service Pack 2, Windows Server 2012, Windows Server 2008 R2 Service Pack 1, Windows Server 2008 Service Pack 2, Windows Server 2003 R2 Service Pack 2
- **Procesador:** Intel o AMD x86 processor supporting SSE2 instruction set*
- **Espacio en Disco:** 1 GB para solo MATLAB, 3–4 GB para una instalación típica.
- **RAM:** 1024 MB (recomendado 2048 MB)

Iniciar el Programa *SIDVEC*

Para empezar a trabajar en el programa *SIDVEC*, después de haber instalado debidamente el software de Matlab, el cual se procede primeramente a ejecutar,

una vez iniciado el programa Matlab, vamos al cuadro *Abrir (Open)*, una vez hecho esto se desplegara una ventana, que permitirá buscar el archivo deseado, en este caso el archivo del código del programa SIDVEC.

Buscamos la ubicación de la carpeta con el nombre SIDVEC (nombre predeterminado) o el nombre que le haya otorgado el usuario, dentro de esta carpeta localizamos el archivo de Matlab con el nombre *SIMULACION_VEHICULO_FUEL_CELL.m*, lo seleccionamos y damos click en el botón abrir de la ventana desplegada, después de algunos segundos el archivo se abrirá.

El archivo que se ha abierto es en el cual se ha realizado el código de programación. Luego nos dirigimos a la parte superior de este archivo abierto y damos clic en el icono *RUN*, u oprimimos la tecla *F5*. En un par de segundos se abrirá una ventana para confirmar el enlace del software Matlab con el archivo deseado y su correspondiente ubicación, damos clic en el botón *Cambiar Carpeta (Change Folder)*.

El proceso para abrir el programa *SIDVEC* tardara un tiempo considerable, dependiendo de la velocidad del procesador. Finalmente se abrirán dos archivos, uno es el archivo de programación en Simulink (mientras se encuentre trabajando No lo cierre), el otro es la parte interactiva del programa donde el usuario podrá empezar a trabajar.

ANEXO D. MANUAL DE USUARIO DEL PROGRAMA DE SIMULACION SIDVEC

El Simulador Dinámico de Vehículos Eléctricos con Celdas de Combustible (*SIDVEC*), fue desarrollado con el propósito de modelar, simular, analizar y evaluar el comportamiento dinámico de modelos de automóviles eléctricos, impulsados por un stack de celdas de combustible como fuente principal de suministro de energía, al igual que analizar la interacción y el desempeño de los componentes, que conforman el sistema de transmisión de potencia del vehículo, como el motor eléctrico, la fuente auxiliar, la dinámica de las ruedas, el convertidor de voltaje, etc.

El programa consta de una interfaz principal, en la cual se puede divisar e ingresar por medio de iconos, a las 7 secciones que lo conforman, seis de estas permiten configurar y parametrizar uno de los componentes de todo el sistema y uno permite visualizar los resultados de la simulación de forma numérica y elegir las gráficas a generar para ser analizadas, tales secciones son:

Tabla D1. Secciones del Programa SIDVEC y su Icono

SECCION	ICONO BOTON
VEHICULO	
FUEL CELL	
MOTOR ELECTRICO	
RUEDAS	
CONVERTIDOR DE VOLTAJE	
FUENTE AUXILIAR	
CONFIGURAR RESULTADOS	

Fuente: El Autor

Al oprimir el icono de las secciones de Vehículo y Fuel Cell, se despliega en cada uno una interfaz secundaria e independiente, debido a que estos representan los elementos principales del modelamiento, en las cuales se permiten modificar los parámetros tanto del automóvil como de la celda de combustible respectivamente.

Figura D1. Interfaz Principal del Programa SIDVEC



Procedimiento de Parametrización del Modelo a Simular

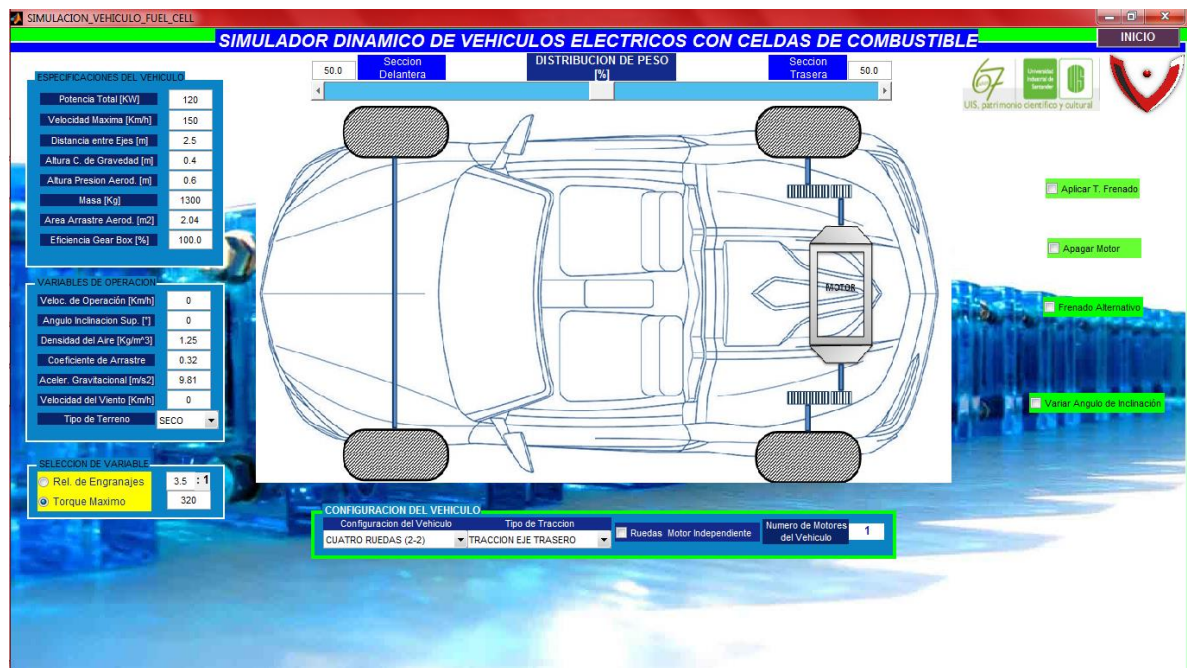
Para simular un vehículo, se requiere previamente, ingresar varias parámetros y características del mismo al programa permitiéndolo modelar de manera virtual. Antes de iniciar, se debe tener claro los parámetros de operación que tendrá el modelo, como la potencia, la velocidad máxima, el torque del motor, tipo de transmisión, las dimensiones generales del vehículo, entre otros. El programa fue desarrollado en el entorno de **Matlab/Simulink R2014a**, haciendo uso de la interfaz gráfica **Guide**, abriendo primero el programa de Matlab, se busca la carpeta donde se guardó el programa desarrollado y se abre el archivo con el nombre de "SIMULACION_VEHICULO_FUEL_CELL.m", donde abre el archivo tipo script en el cual el contiene el código del programa. Después dando click en el botón RUN u oprimiendo la tecla F5 del teclado, se da apertura a la operación del programa, en la cual se abre el archivo "DINAMICA_FCEV.mdl", donde se desarrolló el programa en Simulink y continuación se abre la interfaz del programa.

Para empezar a ingresar los datos, damos click sobre el icono de la sección Vehículo, como se mencionó anteriormente, se despliega una interfaz propia para la caracterización vehículo. En la parte izquierda se ingresan los datos correspondientes, en el centro de la interfaz, se puede visualizar, una imagen que representa la configuración del sistema de tracción del modelo, el cual puede ser modificado, en la parte inferior, donde se puede elegir de una series de listas el tipo de tracción del vehículo e incluso el número de ruedas que dispone y su disposición, cada vez que se realice una modificación, la imagen cambiara de acuerdo a la opción elegida, también, se puede dar la opción de cada rueda sea impulsada por un motor independiente, al seleccionar el cuadro .

Ruedas Motor Independiente

En la parte superior de la imagen de la configuración del vehículo, la interfaz posee una barra deslizante, en la cual se puede ajustar de forma simbólica la ubicación del centro de gravedad o distribución del peso del vehículo, en relación con la distancia de los ejes de las ruedas, al deslizar la barra se modifica el valor del porcentaje de la distribución del peso automáticamente, pero también estos valores se pueden manejar de forma manual, teniendo en cuenta que la suma de los valores debe corresponder al 100%.

Figura D2. Interfaz de la Sección del Vehículo



Fuente: El Autor

Configurados todos los parámetros del vehículo, damos click en el botón *INICIO* ubicado en la parte superior derecha de la interfaz, el cual nos remitirá a la sección principal del programa.

Después se procede a caracterizar las ruedas, al ingresar al menú por el icono de la sección Ruedas, en el cual se anotaran los valores de los radios de las ruedas, el momento de inercia y el coeficiente de rodadura.

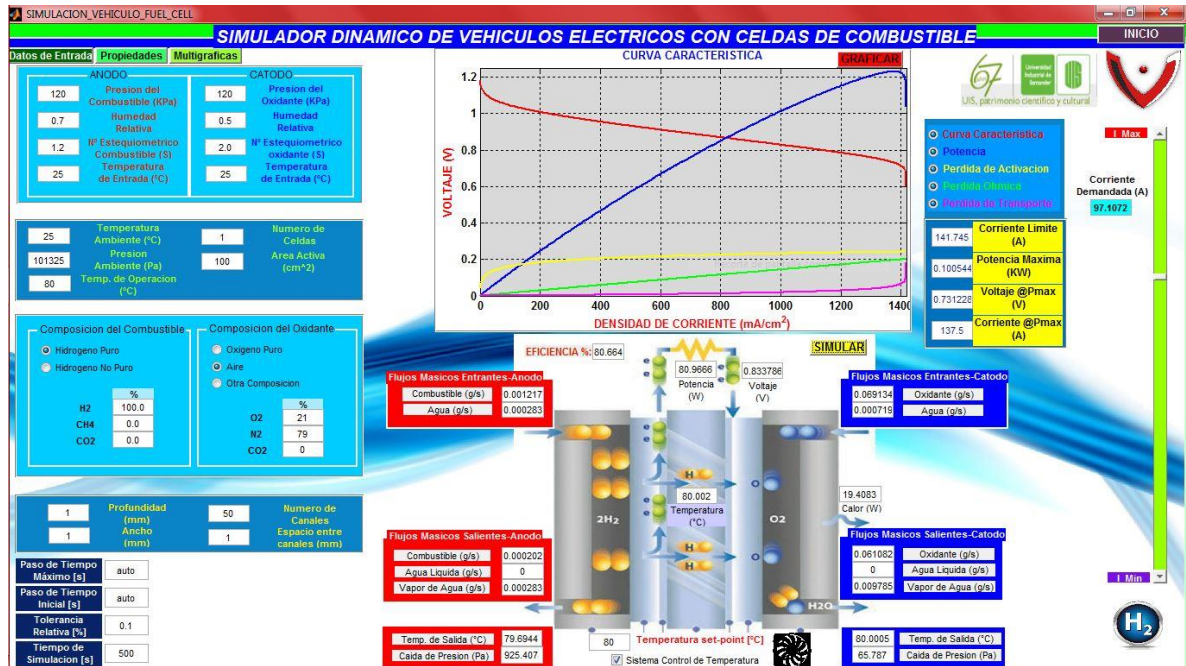
A continuación se debe configurar el motor o los motores eléctricos, para ello oprimimos el icono de la sección Motor eléctrico, en el cual se abrirá un menú donde se establecerán los datos del motor, primero ingresamos los siguientes valores, Voltaje máximo de operación del motor, Inductancia y el Momento de inercia del rotor. Después de ello, se procede a calcular los valores de caracterización del motor como, la resistencia, la constante electromotriz, de fricción y de torque, al dar clic en el botón "*Calcular Parámetros Motores*", con el cual el programa de manera autónoma calcula estos parámetros de acuerdo a las especificaciones de operación del vehículo, dadas anteriormente.

Posteriormente podemos configurar la fuente de energía auxiliar, ingresando a través del icono, cuando se despliega el menú correspondiente, se puede elegir la clase de fuente entre un banco de ultracapacitores y una pila de baterías, de acuerdo a la elección se ingresaran los datos correspondientes. En el caso de las baterías, se dispone de una opción en la cual se permite elegir entre cuatro tipos de baterías, las cuales son: Lead-Acid, NiCd, NiMH y Li-Ion, automáticamente los parámetros se ajustaran de acuerdo a la elección, pero puede ser modificados a voluntad del usuario.

Ahora procedemos a configurar el convertidor de voltaje tipo boost a través del icono, aunque su configuración no influye en la simulación, a excepción de los parámetros del voltaje máximo y la eficiencia, debido a que su comportamiento fue modelado de manera independiente, en el archivo de simulink "*MODELO_CONVERTIDOR_BOOST_DCDC.mdl*", debido a la dificultad en proceso de simulación que este constituye.

Finalmente procedemos a configurar el elemento más complejo del programa, el Stack de celdas de combustible, para ello se ingresa a su respectiva interfaz mediante el icono Fuel Cell, en esta se encontrara en la parte izquierda-superior, tres pestañas o módulos, Datos de Entrada, Propiedades y Multigráficas.

Figura D3. Interfaz de la Sección de la Celda de Combustible



Fuente: El Autor

En el módulo de Datos de Entrada, se ingresan los valores de operación de la celda de combustible, tales como, la temperatura y la presión de entrada, la humedad relativa y la composición de los gases reactantes, tanto en el lado ánodo como el cátodo, además del número de celdas, el área activa, etc.

Al ingresar al módulo de Propiedades, se puede seleccionar los materiales de los cuales esta conformados cada uno de las capas o componentes de una celda individual, al desplegar en cada opción una lista de materiales comúnmente utilizados, para cada capa:

- Placas Finales: Aluminio / Acero.
- Placas Colectoras: Cobre / Aluminio.
- Placas Bipolares: Grafito / Acero Inoxidable / Titanio
- Membrana-Electrodo Ensamble (MEA): Nafion NRE 212 / NR 50 / N115 / N117 / N117 al 95% / N1110.

Al seleccionar el material, automáticamente se actualiza las propiedades de acuerdo al material escogido, propiedades que son consideradas para el programa para el respectivo análisis de la transferencia de calor, tales como, la conductividad térmica, el calor específico a presión constante, resistividad eléctrica y densidad.

También en este módulo, se puede elegir el material del catalizador, que el programa cuenta con las siguientes opciones: Plomo, Zinc, Plata, Níquel, Platino y Paladio, al seleccionar el catalizador, automáticamente el programa modifica el valor de la *densidad de corriente de intercambio* (i_0), que varía según el material a utilizar.

Además en este módulo se puede elegir entre una lista, la configuración del campo de flujo de las placas bipolares, entre las cuales están:

- ✓ Paralela
- ✓ Serpentin simple
- ✓ Serpentin doble
- ✓ Serpentin triple
- ✓ Serpentin cuádruple

Al seleccionar la configuración deseada, de forma automática, se establecen los valores de las dimensiones (Ancho x Largo) de la placa bipolar, las cuales son establecidas preliminarmente de acuerdo al valor del área establecido en el módulo de *Datos de Entrada*, pero pueden ser modificados manualmente. Además se cuenta con la opción de modificar valores como:

- ✓ El espesor de la capa de difusión de gases (GDL, por sus siglas en ingles).
- ✓ La porosidad de la membrana.
- ✓ El Coeficiente de Emisividad.
- ✓ El Coeficiente de Convección

El último modulo, *Multigráficas*, permite realizar estudios paramétricos, donde se puede observar la influencia de tres parámetros en el comportamiento de la celda de combustible, al obtener cualquiera de las siguientes gráficas, a partir de la lista, *Clase de Gráfica*:

- ✓ Curva Característica o de Desempeño.
- ✓ Potencia de la Celda.
- ✓ Curva de Pérdidas de activación.
- ✓ Curva de Pérdidas Óhmicas.
- ✓ Curva de Pérdidas por Transporte.

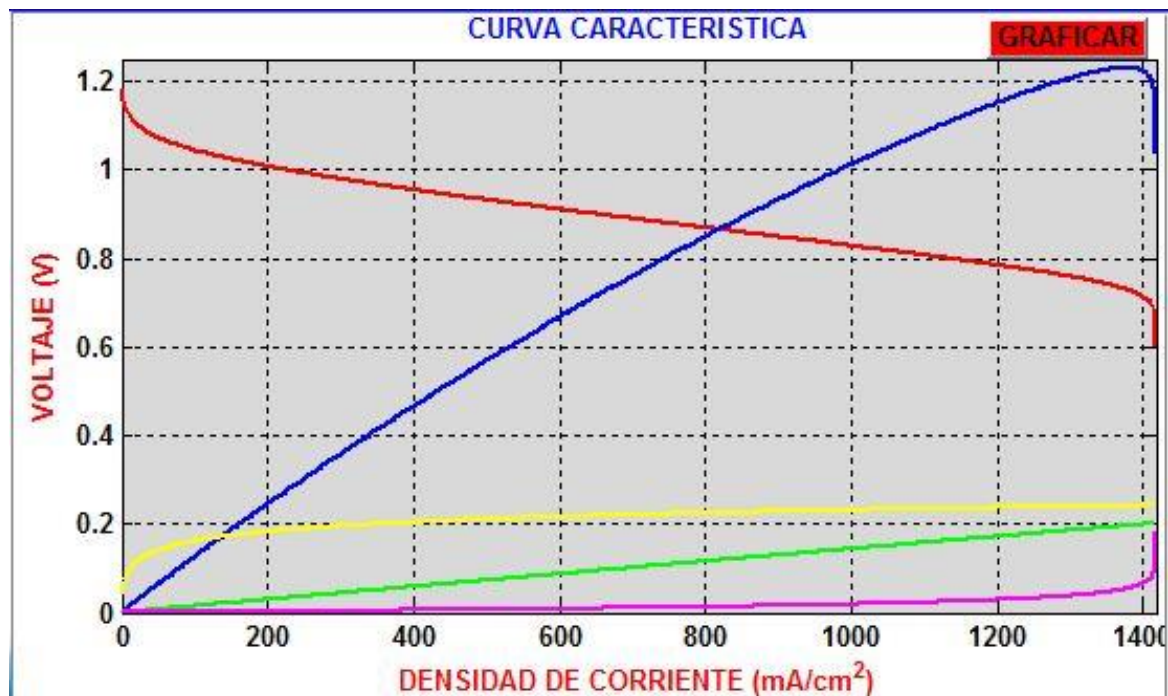
Se puede seleccionar la variable a analizar, al desplegar la lista, *Tipo de Variable*, donde se puede encontrar las siguientes opciones:

- ✓ Temperatura de la Celda.
- ✓ Presión de Entrada de los Gases Reactantes.
- ✓ Humedad Relativa a la entrada de los Gases Reactantes.

Debido a la complejidad del programa y largo tiempo de simulación para realizar las gráficas, solo se permite darle tres valores a la variable, es decir que el máximo de gráficas a comparar al mismo tiempo son 3. Después de seleccionar el tipo de variable, la gráfica a visualizar y los tres valores para la respectiva variable, se oprime el botón INICIAR, y el programa comenzara a calcular los respetivos valores para generar las gráficas correspondientes, el proceso podría tardar algunos minutos.

Gráficar Curvas de Desempeño de la Celda de Combustible

Figura D4. Área Gráfica de las Curvas de Desempeño de la Celda de combustible



Fuente: El Autor

En el centro-superior de la interfaz de la sección Fuel Cell, podemos apreciar una ventana donde se pueden visualizar las gráficas del comportamiento de la celda de combustible, previamente caracterizada, al ingresar los datos de las variables mencionadas anteriormente. En el lado derecho de la ventana, se puede seleccionar el tipo de gráfica que se desea estudiar, las opciones son las mismas que se puede dar en las herramienta de *Multigráficas*, con la diferencia que las variables solo tiene un valor preestablecido y se cuenta con la posibilidad de generar desde uno hasta las cinco opciones de gráficas en la misma ventana.



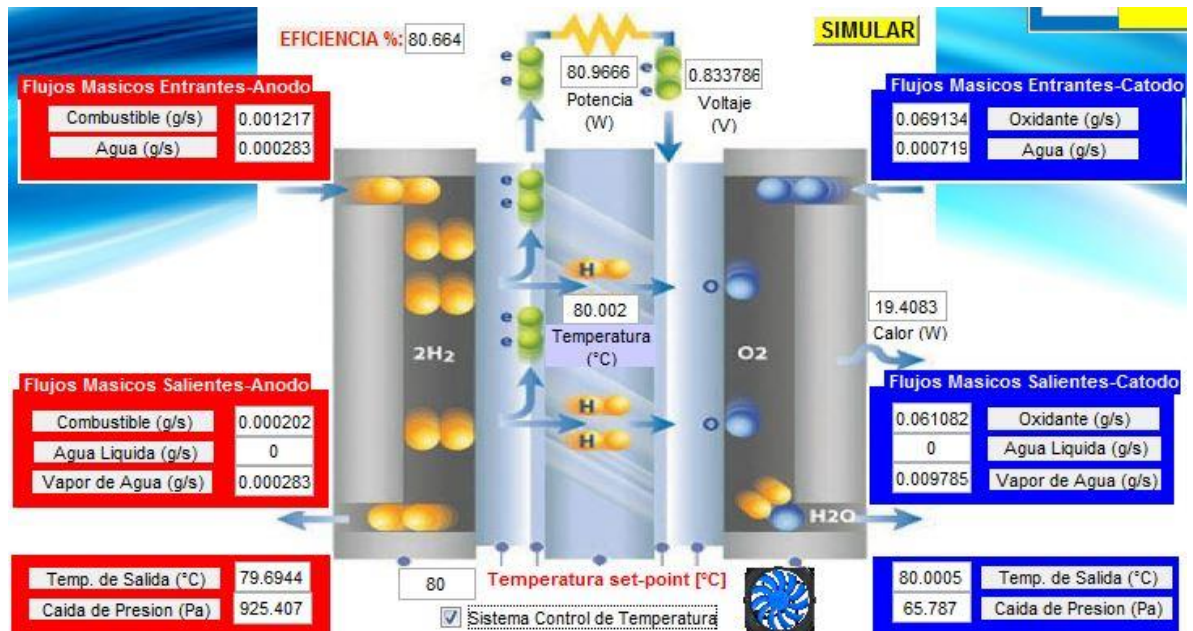
Se establecen los parámetros de la celda de combustible y escogen las gráficas a visualizar, después se oprime el botón GRÁFICAR, ubicado en la parte superior-derecha de la ventana, esperar por algunos minutos hasta que se visualice las curvas en el área gráfica. Al finalizar el proceso, en el lado izquierdo del área de la gráfica, el programa muestra los siguientes valores de importancia.

- ✓ Corriente Límite.
- ✓ Potencia Máxima.
- ✓ Voltaje a Potencia Máxima.
- ✓ Corriente a Potencia Máxima.

Modelar Comportamiento Térmico de la Celda de Combustible

El programa SIDVEC, permite modelar el comportamiento de la temperatura de la celda de combustible, considerando una demanda de corriente constante por parte del sistema. Para ello en la parte central-Inferior de la interfaz, se encuentra una imagen de una celda de combustible, con el propósito de ser más intuitiva la interacción con el programa. Al lado derecho de la interfaz se presenta una barra deslizante que permite modificar el valor de la corriente que debe suministrar la celda, con un valor mínimo de cero, hasta un valor máximo igual a la corriente limite, calculado al crear la curva característica, también se puede modificar este valor de manera manual, al ingresar el valor en la correspondiente casilla.

Figura D5. Sección de Análisis Térmico de la Celda de Combustible



Fuente: El Autor

Una característica importante del programa SIDVEC, es la emulación de un Sistema de Control de Temperatura (SCT), que permite controlar la temperatura de la celda en un valor determinado e impidiendo a la vez que esta sobrepase valores altos que puedan perjudicar su funcionamiento, por lo tanto, se puede establecer un valor de set-point de temperatura en la parte inferior de la imagen de la celda y chequear la casilla, Sistema de Control de Temperatura, para mantener activado el controlador.

En caso que el valor de la corriente no sea lo suficientemente alto como para provocar un aumento de la temperatura tal que llegue a superar el valor del set-point, el sistema trabajara con transferencia de calor por convección natural con un valor de coeficiente de convección igual al estipulado en el módulo de *Propiedades*, mencionado anteriormente.

Para iniciar la simulación después de haber dado el valor de la corriente, se le da un valor al tiempo total de simulación ubicado en la casilla

Tiempo de Simulación (s)	500
--------------------------	-----

 inferior-izquierda de la interfaz, después se oprime el botón *SIMULAR*, en la parte superior-derecha de la imagen, esperar por unos minutos hasta que se genera una gráfica con el comportamiento de la temperatura. Al finalizar el proceso el programa mostrara una serie de valores como consecuencia de la simulación tales como:

- ✓ Flujo másico de entrada de combustible y oxidante.
- ✓ Flujo másico de entrada de agua en el cátodo y ánodo.
- ✓ Flujo másico de salida de combustible y Oxidante que no reaccionaron.
- ✓ Flujo másico de salida de agua en estado líquido y vapor en el cátodo y ánodo.
- ✓ Temperaturas de salida de los gases.
- ✓ Caída de presión en el cátodo y ánodo.
- ✓ Potencia de la Celda.
- ✓ El voltaje alcanzado.
- ✓ El calor generado.
- ✓ La temperatura final alcanzada.
- ✓ La eficiencia de la Celda de combustible.

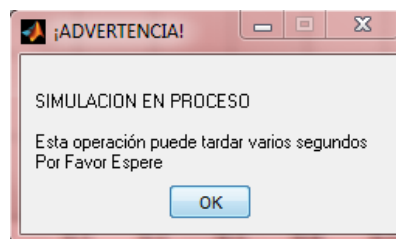
Después de parametrizar la celda de combustible, según los requerimientos, vamos al botón INICIO, en la esquina superior-derecha, para regresar a la interfaz principal del programa.

Iniciar Simulación del Vehículo Eléctrico Modelado y Visualización de Resultados

Para iniciar el proceso de simulación del programa SIDVEC, nos ubicamos en la interfaz principal, en la parte inferior-izquierda podemos modificar el tiempo de simulación al ingresar el valor deseado en la casilla mostrada. Finalmente buscamos el icono ubicado en medio de los demás iconos explicados anteriormente, al oprimir este botón, se da inicio al proceso de simulación y a continuación aparecerá una ventana emergente, indicando el inicio de este proceso.



Figura D6. Mensaje de Advertencia de Inicio del Proceso de Simulación



Cuando el proceso de simulación termina, aparecerá una gráfica en la que se muestra la variación de la velocidad lineal del vehículo en función del tiempo. Si se desea conocer más resultados, el programa SIDVEC cuenta con la sección de

Configuración de Resultados, en la cual se puede observar diferentes resultados del proceso, al ingresar por el correspondiente icono, desde la interfaz principal del programa. Los datos que suministra esta sección son:

Torque máximo del motor.

- ✓ Torque ultimo alcanzado del motor.
- ✓ Valor de corriente máxima del motor.
- ✓ Corriente ultima del motor.
- ✓ Velocidad de rotación máxima del eje del motor.
- ✓ Velocidad de rotación ultima del eje del motor.
- ✓ Aceleración máxima o de arranque del vehículo.
- ✓ Aceleración final del vehículo.
- ✓ Velocidad lineal final del vehículo.
- ✓ Temperatura máxima de la celda de combustible.
- ✓ Masa de combustible consumido.
- ✓ Valor de voltaje último de la celda de combustible.
- ✓ Valor de corriente último de la celda de combustible.

Figura D7. Menú de la Sección Configuración de Resultados

CONFIGURACION DE VISUALIZACION DE RESULTADOS			
VALORES ALCANZADOS FIN DE SIMULACION			
	Rueda Frontal	Trasera	
Torque Motor [Nm]	0	49.343	Aceleracion del Vehiculo [m/s^2]
Corriente Suministrada [A]	0	58.0689	5.13649e-
Vel. Rotacion [rpm]	0	7302.28	Velocidad Final [Km/h]
COMBUSTIBLE CONSUMIDO [g]	0		149.966
CORRIENTE FUEL CELL (A)	0		
VOLTAJE FUEL CELL (V)	1.1758		
VALORES MAXIMOS DE SIMULACION			
Torque Maximo [Nm]	0	322.133	Aceleracion Maxima [m/s^2]
Corriente Maxima [A]	0	100.622	5.80756
Vel. Rotacion Maxima [rpm]	0	7302.28	Temperatura Max. de la Celda [°C]
			25
SELECCION DE GRAFICAS			
<input checked="" type="radio"/> Velocidad Vehiculo	<input type="radio"/> Temperat. Fuel Cell		
<input type="radio"/> Aceleracion Vehiculo	<input type="radio"/> Volt / Corr Fuel Cell		
<input type="radio"/> Motor Trasero	<input type="radio"/> Volt / Corr Fuente Aux		
<input type="radio"/> Motor Delantero	<input type="radio"/> Consumo de Gases		

Fuente: El Autor

En la parte inferior de los valores de resultados de la simulación, se encuentra el área de selección de gráficas, que tiene por defecto seleccionada la gráfica de velocidad del vehículo, pero si se desea se puede generar otras gráficas, se puede escoger solo una o todas aquellas que sea del interés del estudio. Tales opciones de gráficas son:

- ✓ Velocidad del vehículo.
- ✓ Aceleración del vehículo.
- ✓ Motor trasero (torque, corriente y velocidad angular).
- ✓ Motor delantero (torque, corriente y velocidad angular).
- ✓ Temperatura de la celda de combustible
- ✓ Voltaje y corriente de la celda de combustible.
- ✓ Voltaje y corriente de la fuente auxiliar.
- ✓ Flujo másico de los gases consumidos (combustible y oxidante).

Funciones de Análisis de Ciclos de Operación

El análisis de ciclos operación, permite evaluar el comportamiento del vehículo, modificando sus condiciones de operación de manera cíclica. Las funciones que permite el programa SIDVEC son:

- Frenado Alternativo: permite aplicar un torque de frenado, estableciendo el periodo de cada ciclo y el porcentaje del tiempo de ciclo, que el vehículo opera sin aplicar el torque de frenado.
- Variar Ángulo de Inclinación: permite modificar el ángulo de inclinación del terreno por el cual se movilizara el vehículo.

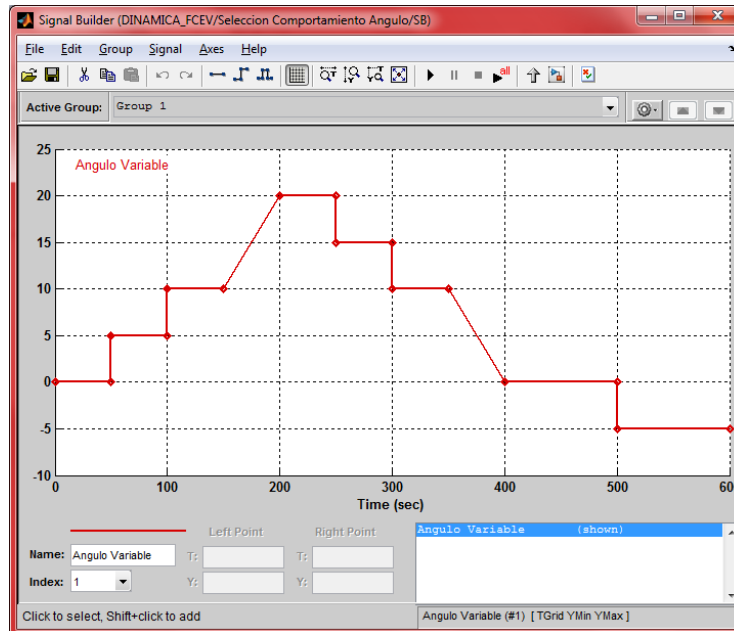
Estas funciones se pueden activar en la sección Vehículo, en la interfaz respectiva al lado derecho, se puede observar las casillas correspondientes a estas funciones. En el Frenado alternativo, al momento de aplicar el torque de frenado, el motor del vehículo es apagado y este se convierte como un generador, produciendo así el frenado regenerativo y se puede observar sus efectos en la gráfica de comportamiento del voltaje y la corriente de la fuente auxiliar.

En el caso de la Variación del Ángulo de Inclinación, al seleccionar la casilla correspondiente, aparece un botón, que al oprimirlo, abre el perfil de la variación del ángulo del terreno, el cual puede ser modificado, de acuerdo a la necesidad del usuario.

Figura D8. Activación de las Funciones Cíclicas de Operación



Figura D9. Perfil Predeterminado del Ángulo de Inclinación del Terreno



Fuente: El Autor

Después de establecer alguna de las funciones, de igual manera se procede a la simulación, dirigiéndose al botón INICIO, de la interfaz, estableciendo primero las gráficas a generar en la sección Configuración Resultados, damos clic en el icono Iniciar Simulación y esperamos hasta visualizar los resultados del proceso de simulación.

Simulación del Convertidor de Voltaje Boost DC/DC

El programa SIDVEC, permite simular de manera independiente el comportamiento del convertidor de voltaje, para facilitar el estudio de su comportamiento de forma más eficaz, para ello se realiza el siguiente procedimiento:

Nos ubicamos en la interfaz principal, dando clic en el icono correspondiente a la sección Convertidor de Voltaje, se despliega en el centro de la pantalla el menú donde se puede insertar los valores para caracterizar el componente, tales como:

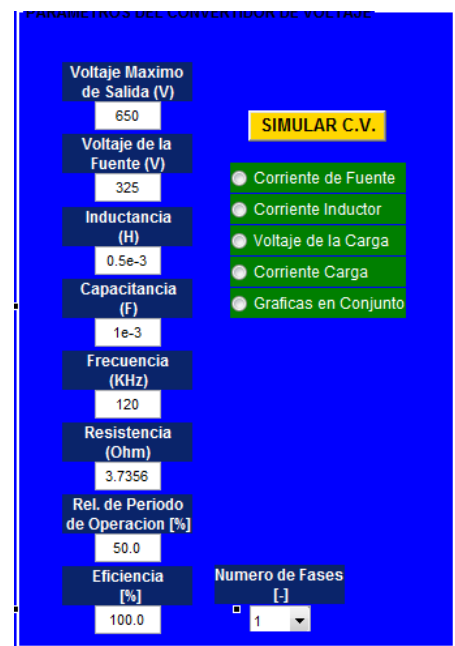
- Voltaje máximo de salida
- Voltaje de la fuente
- Inductancia

- Capacitancia
- Frecuencia de los pulsos
- Resistencia eléctrica de la carga (resistencia eléctrica total del motor)
- Porcentaje del periodo de trabajo
- Eficiencia
- Numero de Fases del convertidor (máx. 4)

Cuando los valores de los parámetros son ingresados, dentro del mismo menú se visualiza una lista de las gráficas que puede generar el programa, seleccionando aquellas que se desean evaluar su comportamiento. Tales opciones de gráficas son:

- Corriente de entrada desde la fuente principal (celda de combustible).
- Corriente a través del inductor.
- Voltaje de salida hacia la carga (motor).
- Corriente de salida hacia la carga (motor).
- Gráficas en conjunto (muestra las anteriores gráficas en una sola).

Figura D10. Menú de la Sección Convertidor de Voltaje



Fuente: El Autor

Si el número de fases del convertidor es igual a uno (1), la corriente de la fuente es igual a la corriente del inductor.

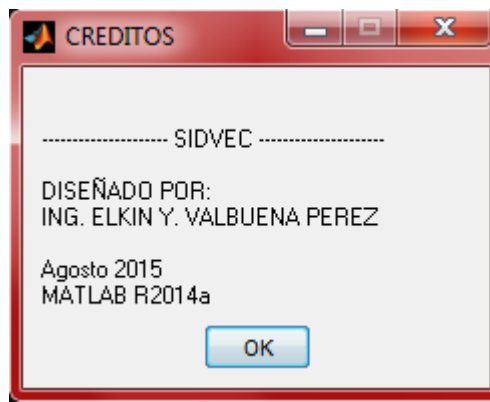
Para iniciar el proceso de simulación, se oprime el botón SIMULACION C.V., ubicado dentro de la misma sección, a continuación se abrirá automáticamente el archivo de programación en simulink "MODELO_CONVERTIDOR_BOOST_DCDC.mdl", e iniciara el proceso, esperar unos segundos hasta que se generen las respectivas gráficas escogidas.

Derechos de Autor

En la parte superior – derecha de cualquiera de las interfaces (principal y secundarias), se encuentra el icono de autoría, que al oprimir despliega un mensaje indicando el nombre del autor y la fecha de producción del programa.



Figura D11. Mensaje por Derechos de Autoría

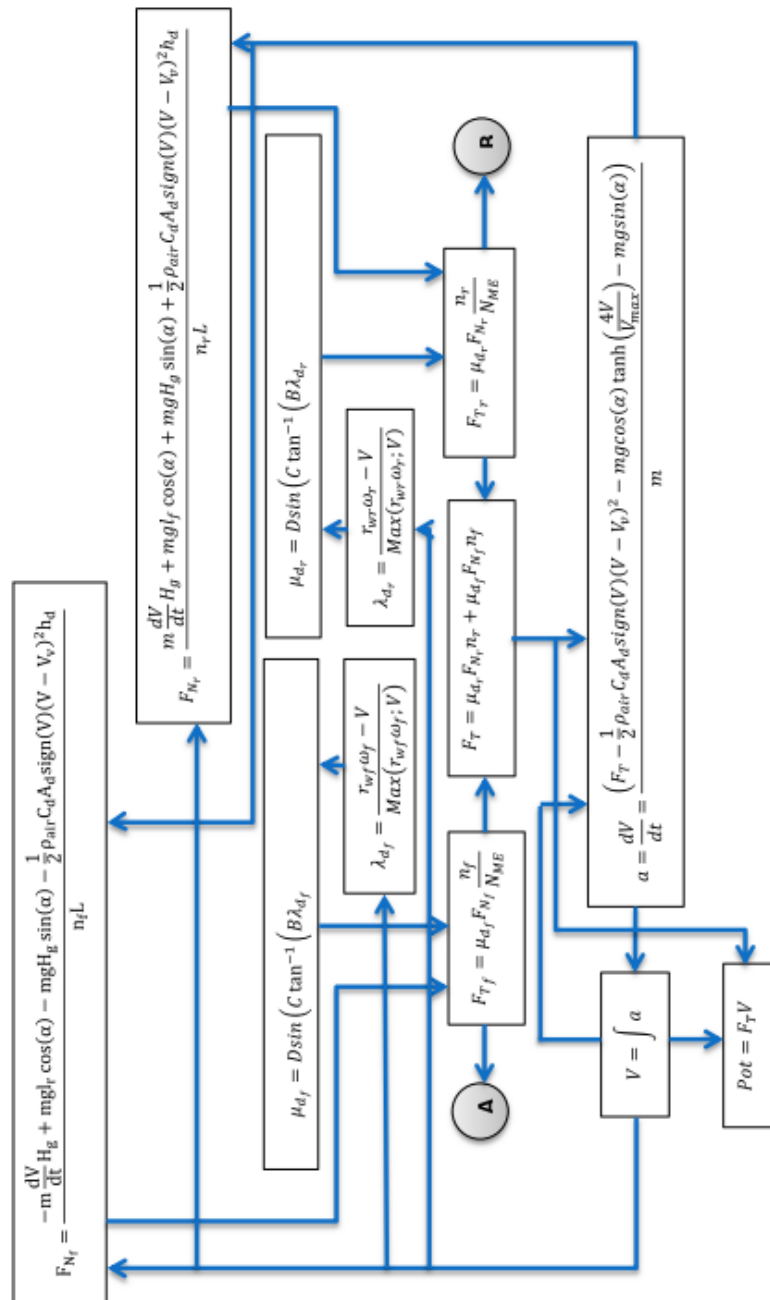


Fuente: El autor

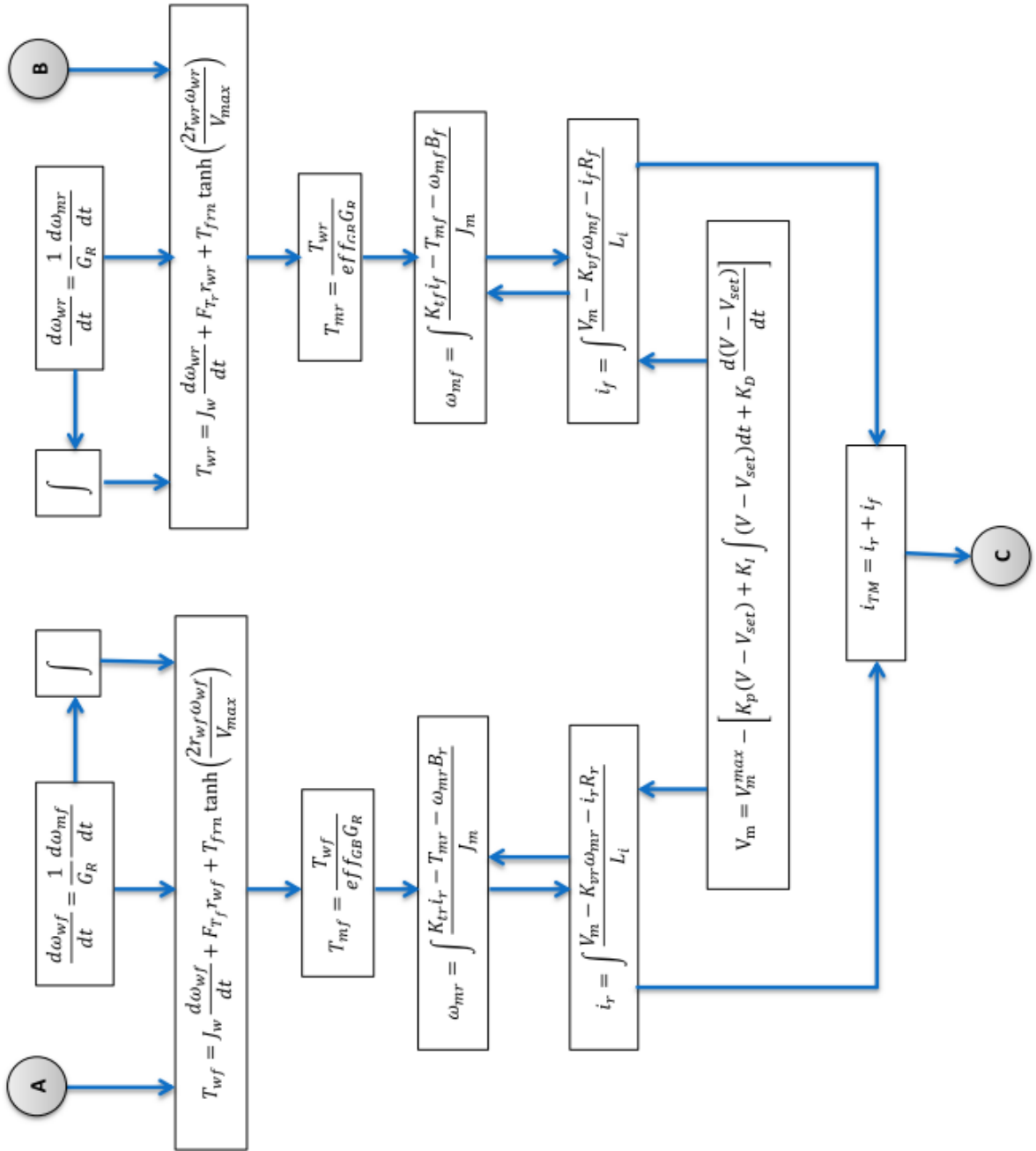
ANEXO E. MANUAL CIENTÍFICO

En este manual se muestran la interrelación de las ecuaciones utilizadas para el modelamiento del vehículo eléctrico con celdas de combustible. Todas las imágenes corresponden a un único diagrama, pero para mayor comodidad fue dividido, la primera imagen hace referencia principalmente al cálculo de la velocidad y la aceleración instantánea del vehículo.

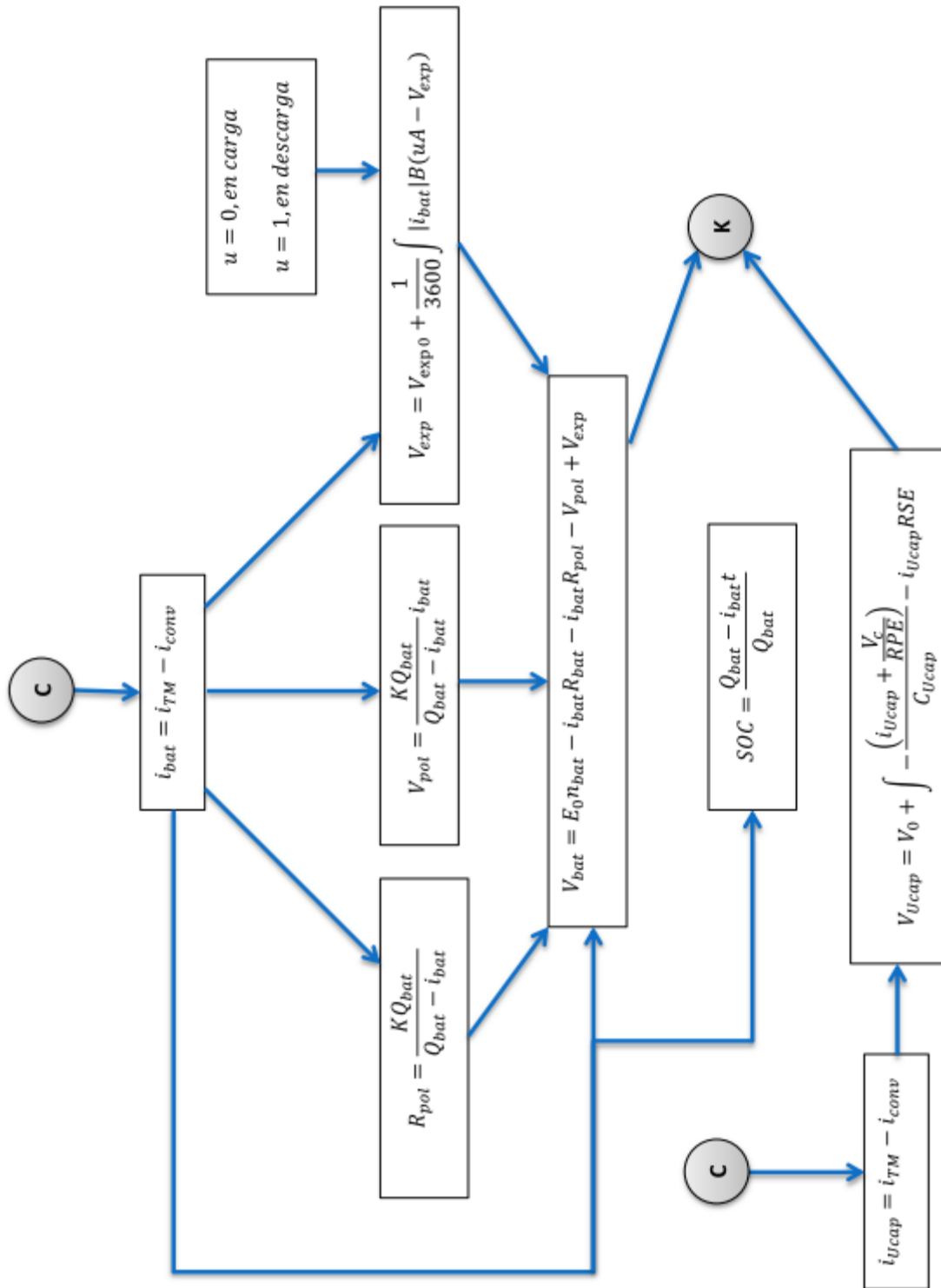
Figura E1. Diagramas del Manual Científico



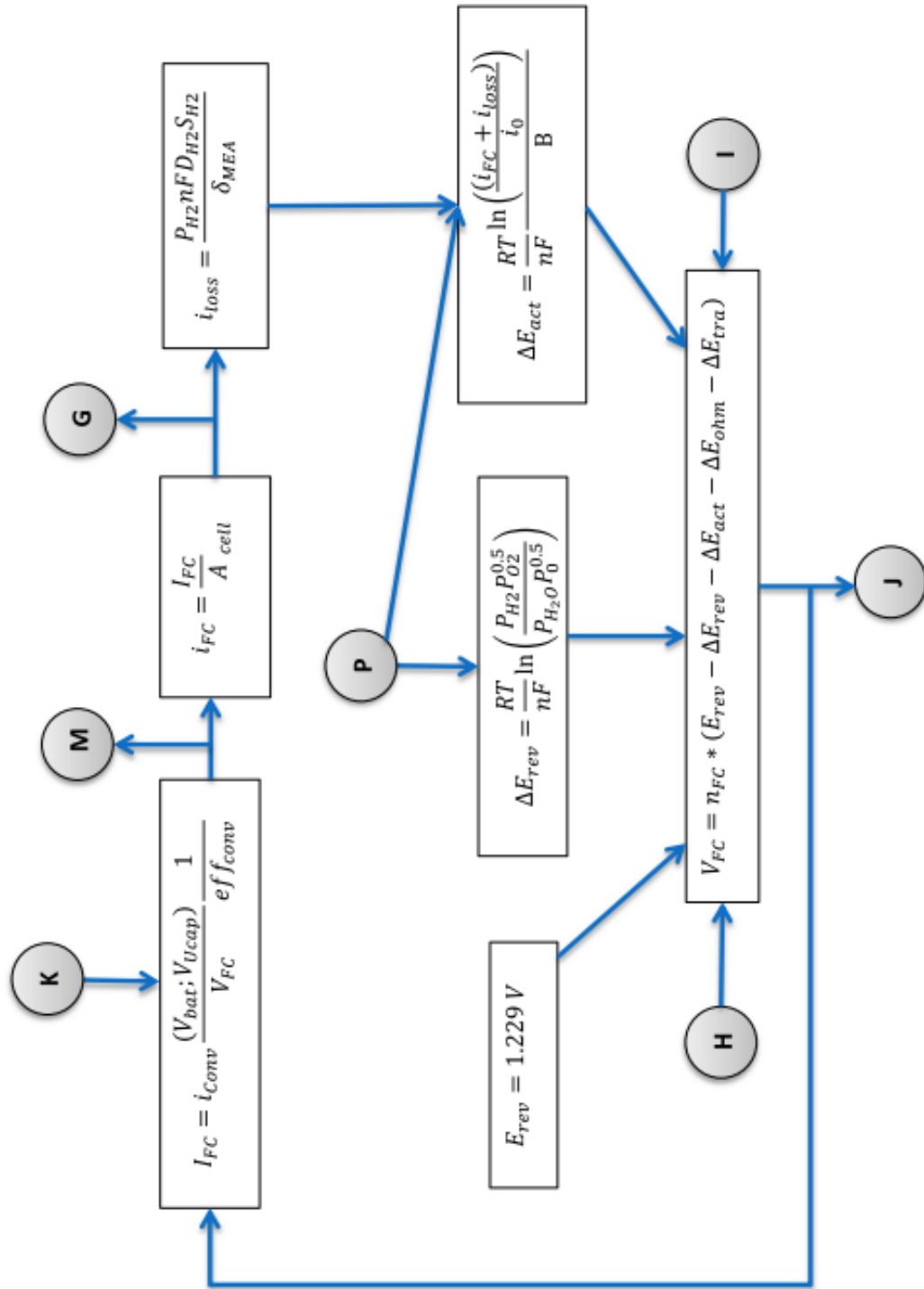
En esta sección del diagrama se muestra el cálculo de las corrientes de los motores eléctricos.



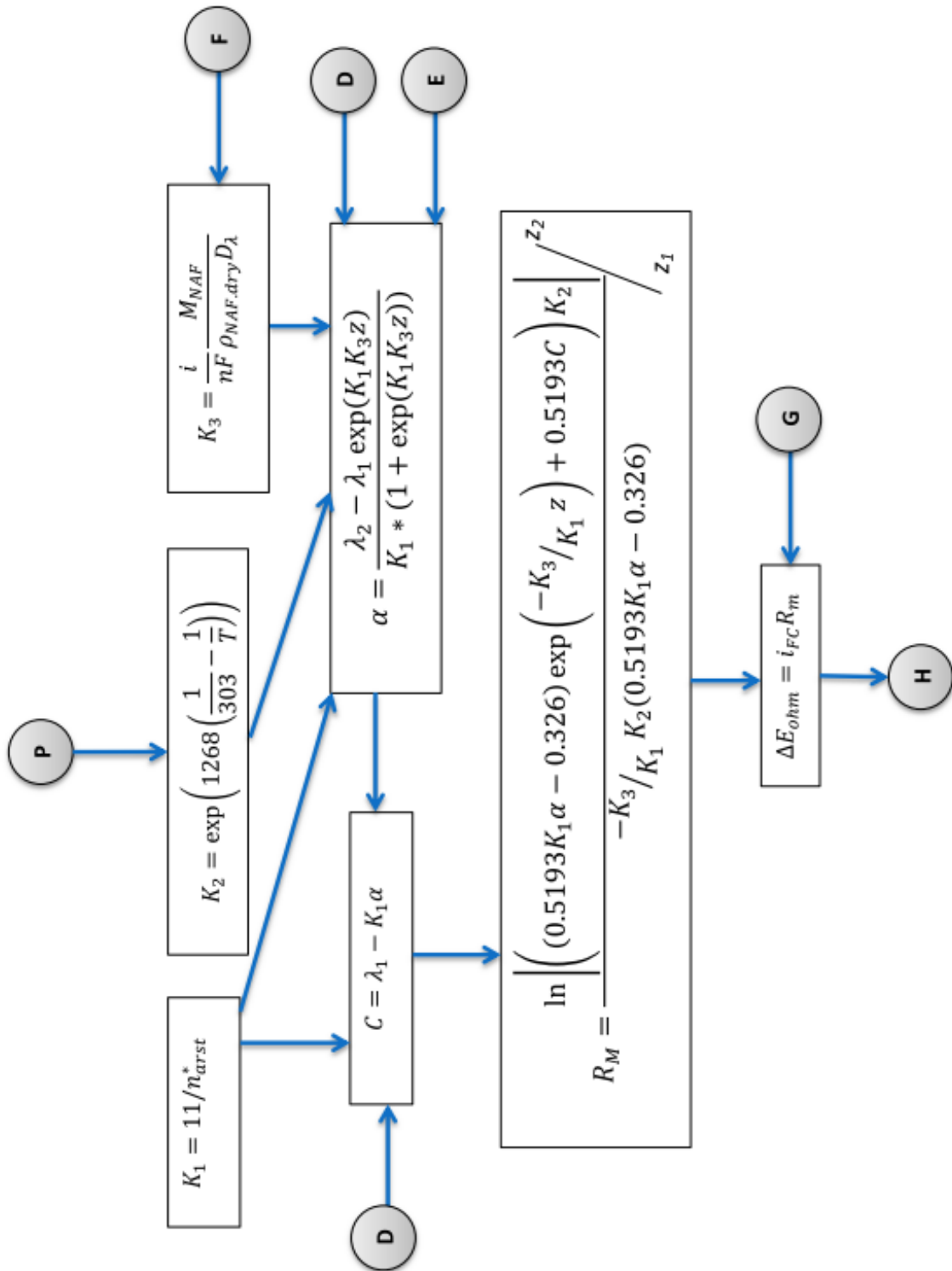
Para seccion del diagrama se observa el cálculo para el voltaje de la batería como del ultracapacitor .



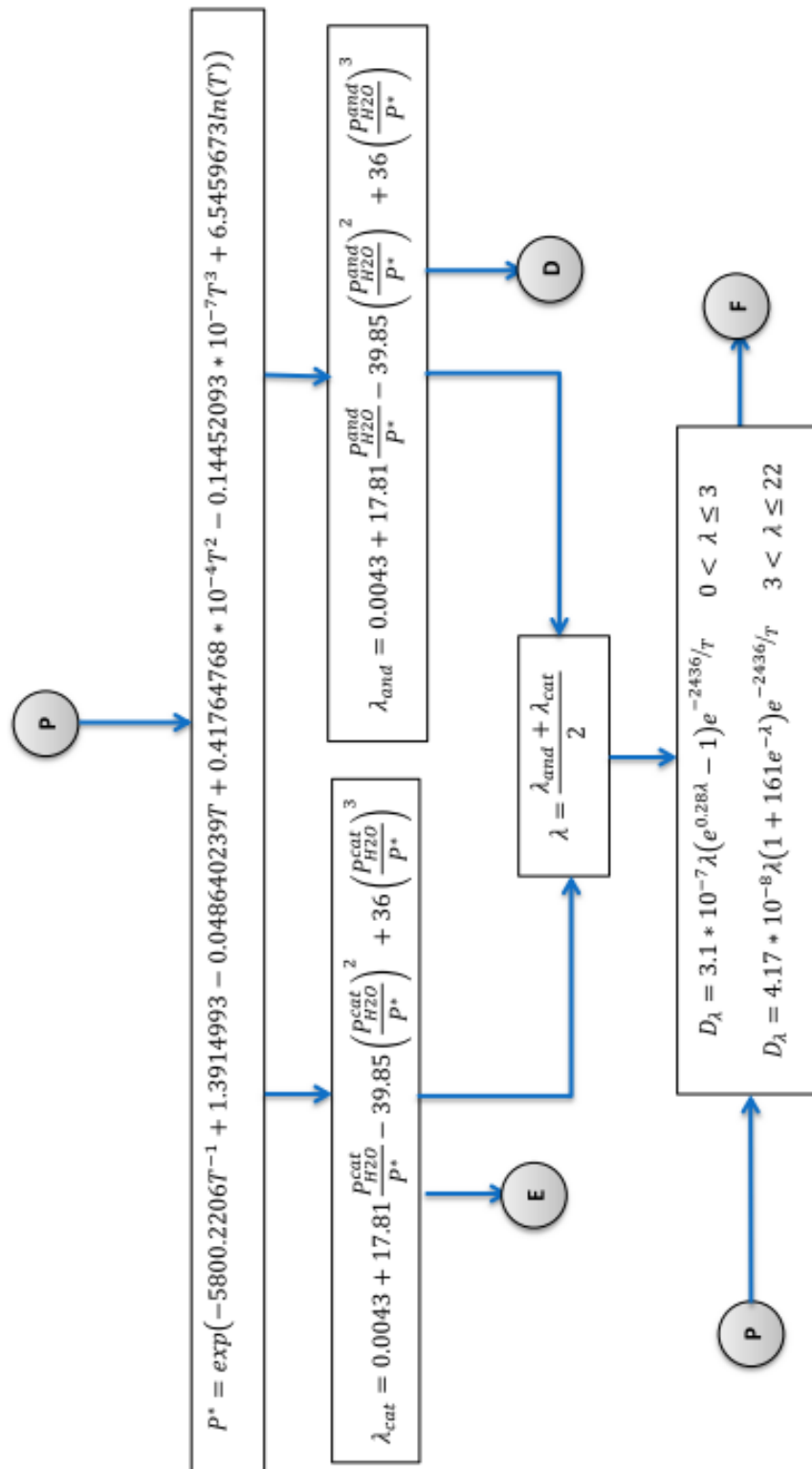
En esta sección se muestra el cálculo correspondiente al voltaje de la celda de combustible.



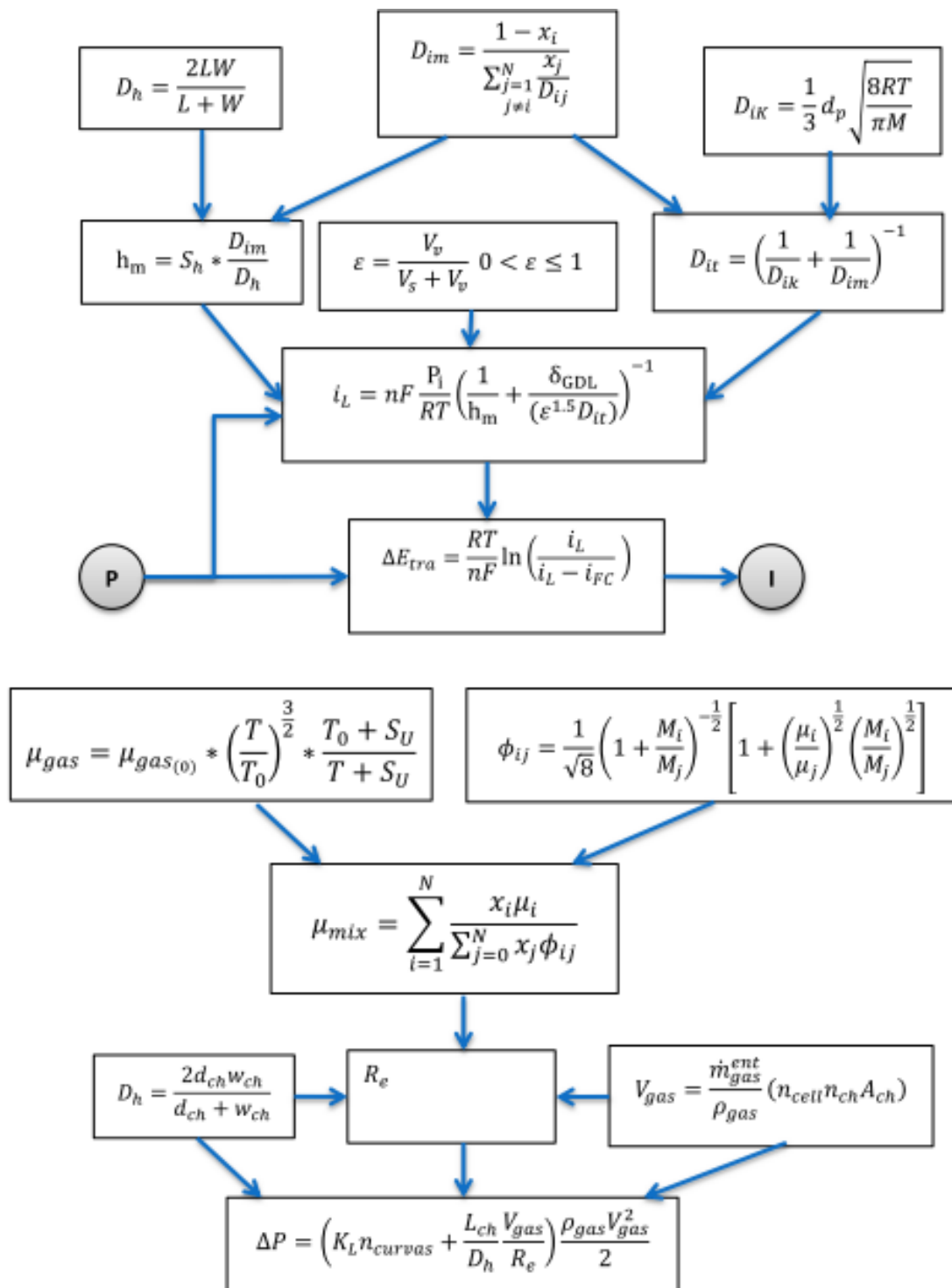
Para esta sección se muestra el cálculo específico de la pérdida de voltaje por la resistencia óhmica de la celda de combustible.



Para esta sección del diagrama se observa el cálculo de la difusividad de la membrana polimérica por efectos de transporte de masa.



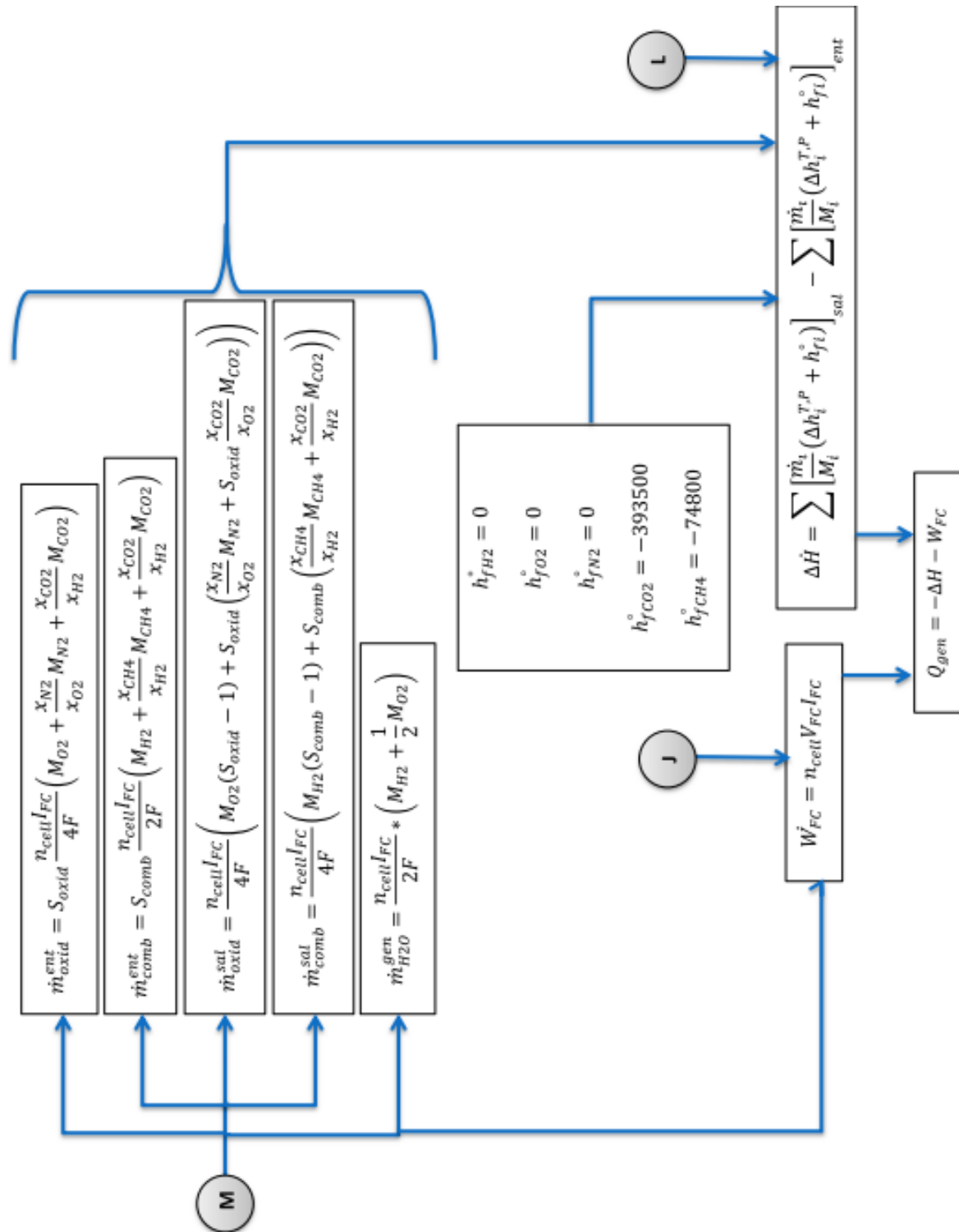
Para el cálculo de las pérdidas de presión dentro de los canales del campo de flujo se usan las siguientes relaciones de fórmulas.



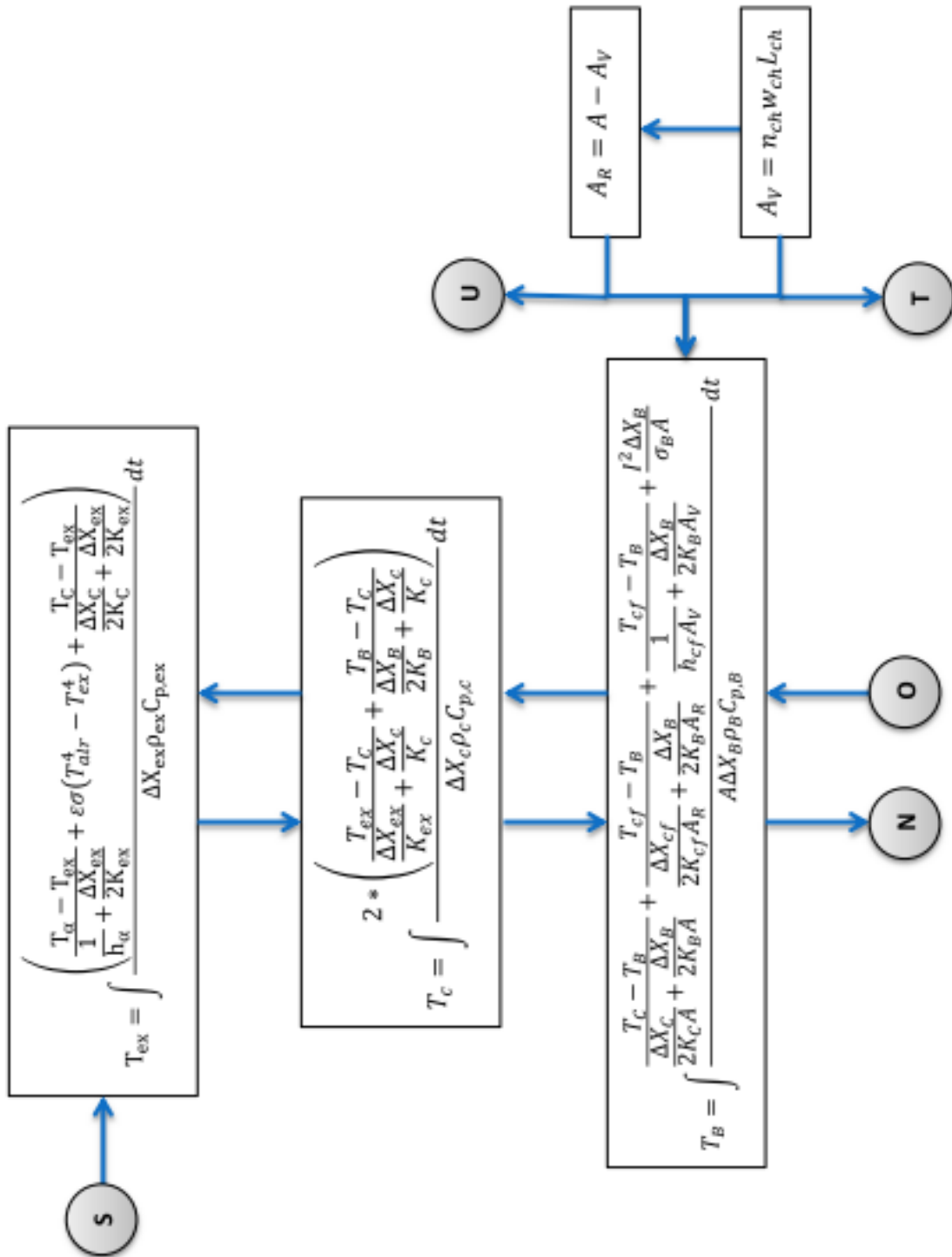
En esta sección del diagrama se muestra el cálculo de las entalpías de cada uno de los elementos que entran y salen de la celda de combustible.

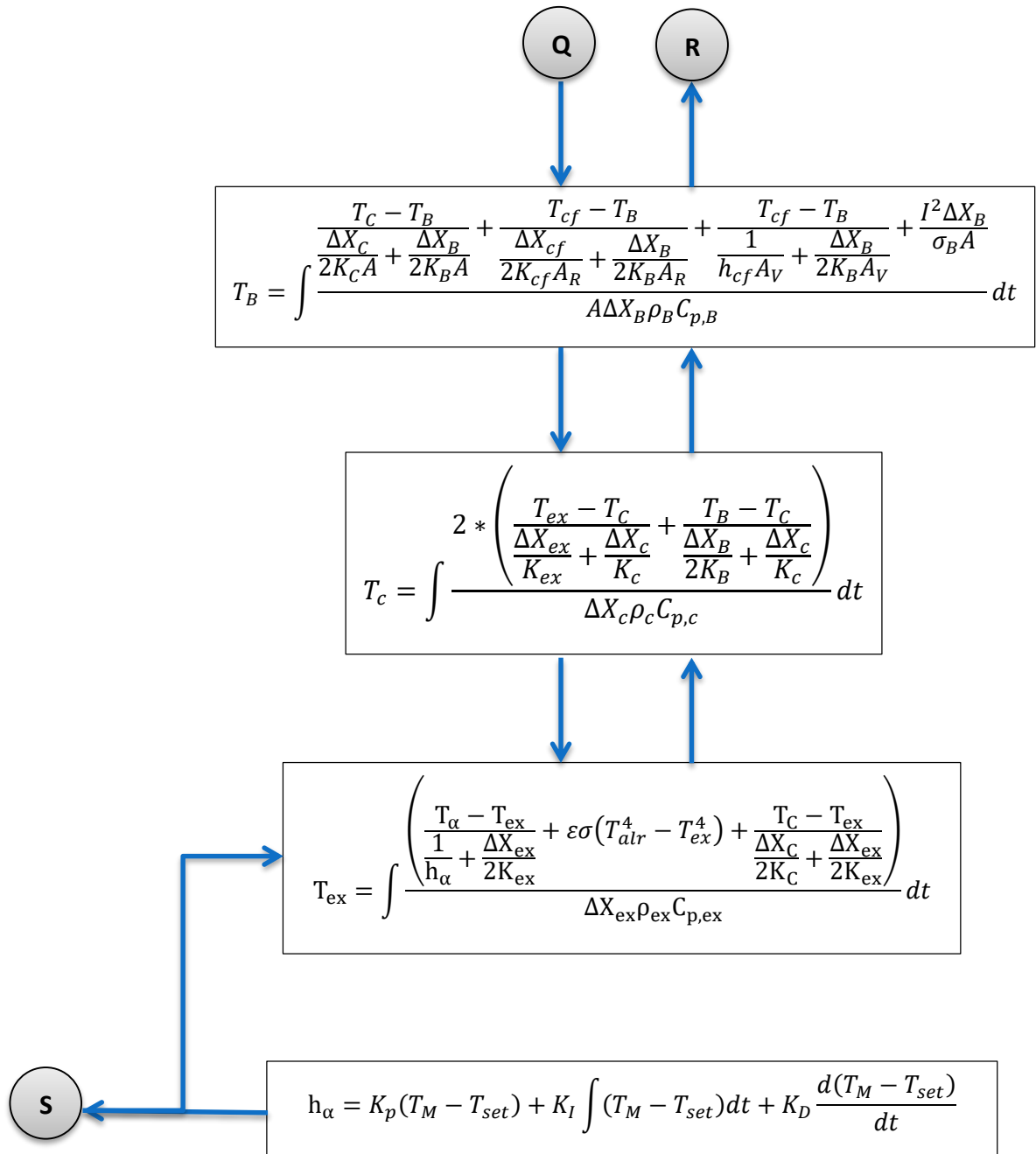


Para esta sección se muestra el balance de energía, calculando el trabajo eléctrico y el cambio de entalpía de la celda de combustible, al igual que el calor generado.



Las siguientes secciones del diagrama muestran el cálculo de la temperatura instantánea para cada una de las capas que conforman el análisis por diferencias finitas de la celda de combustible.



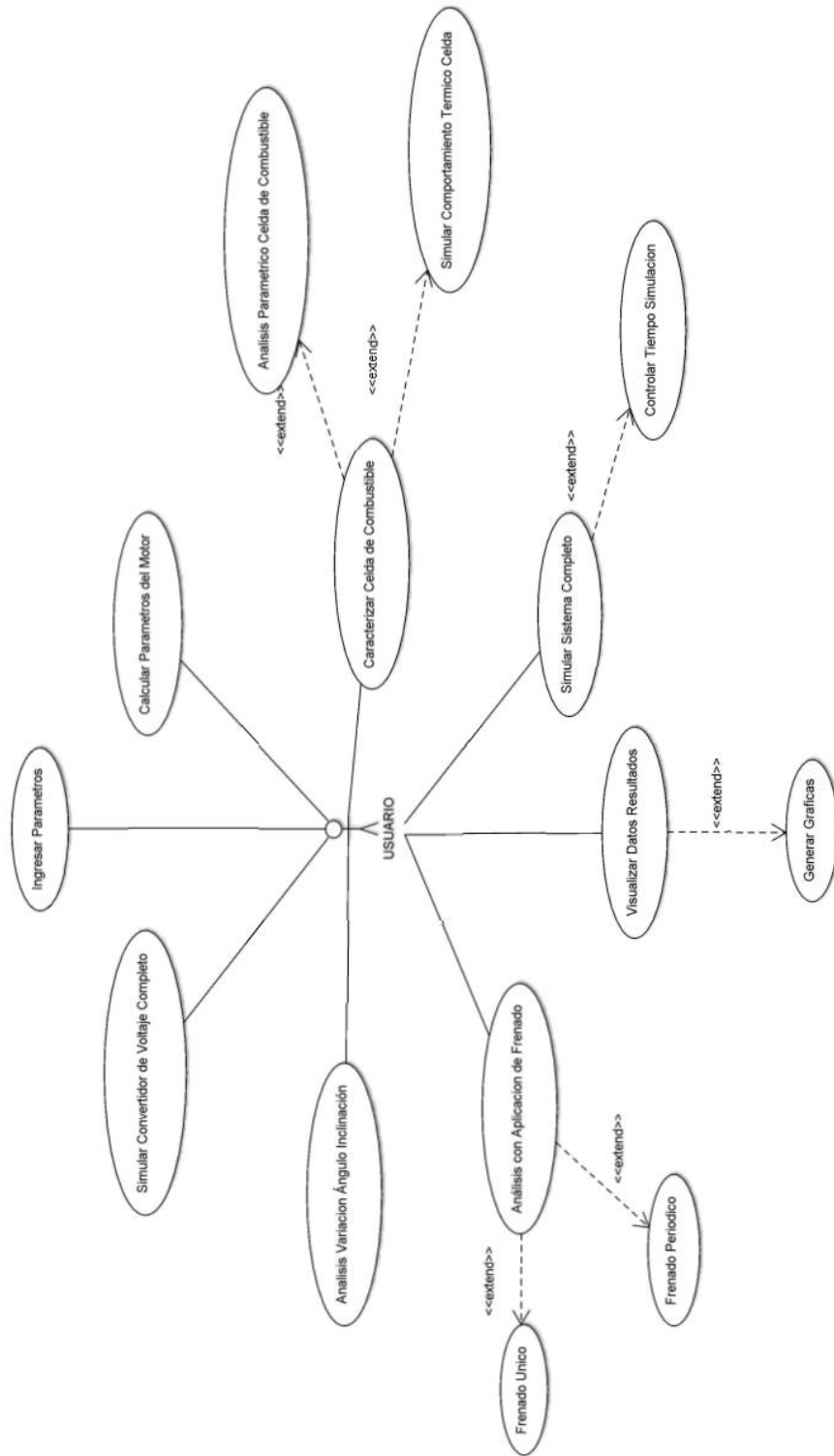


Fuente: El Autor

Diagramas de Lenguaje Unificado de Modelado UML

Se muestra a continuación, para una mayor comprensión del programa SIDVEC, los diagramas UML, utilizados con mayor frecuencia, para este tipo de descripción.

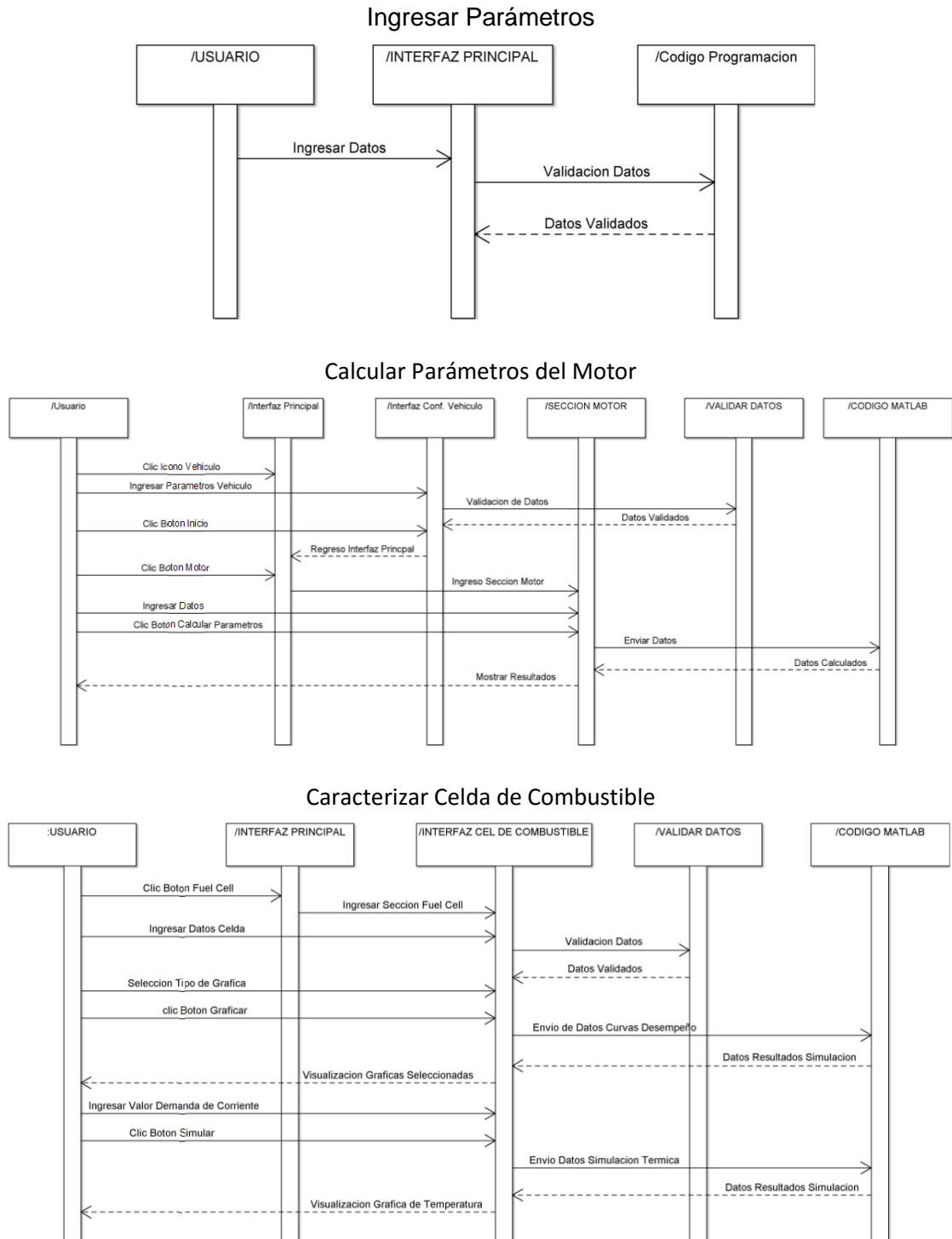
Figura E2. Diagrama de Casos de Uso – Programa SIDVEC



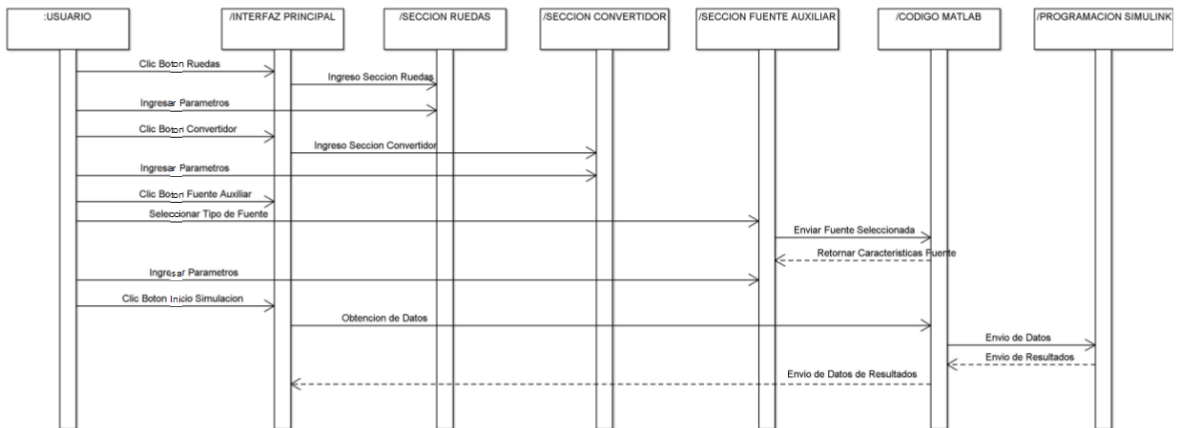
Fuente: El Autor

En la siguiente secuencia de figuras se muestran los diagramas de secuencia, donde se describe con mayor detalle cada uno de los casos de uso del programa.

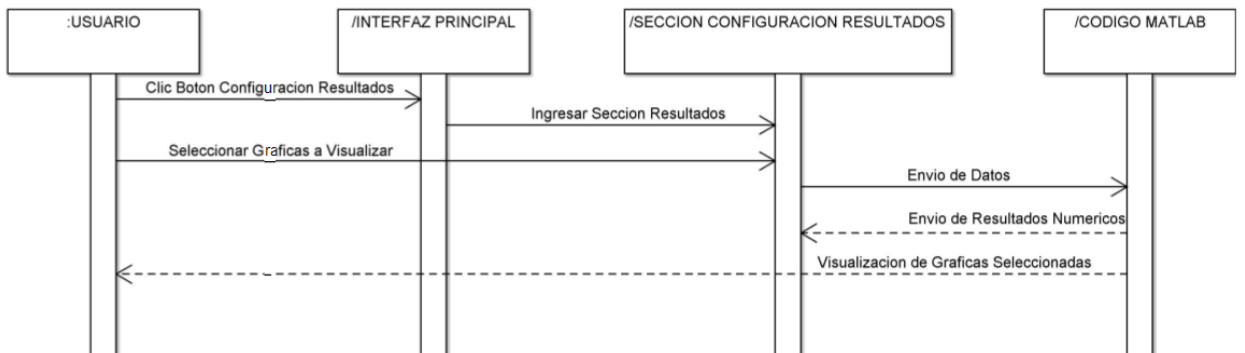
Figura E4. Diagrama de Secuencias – Programa SIDVEC



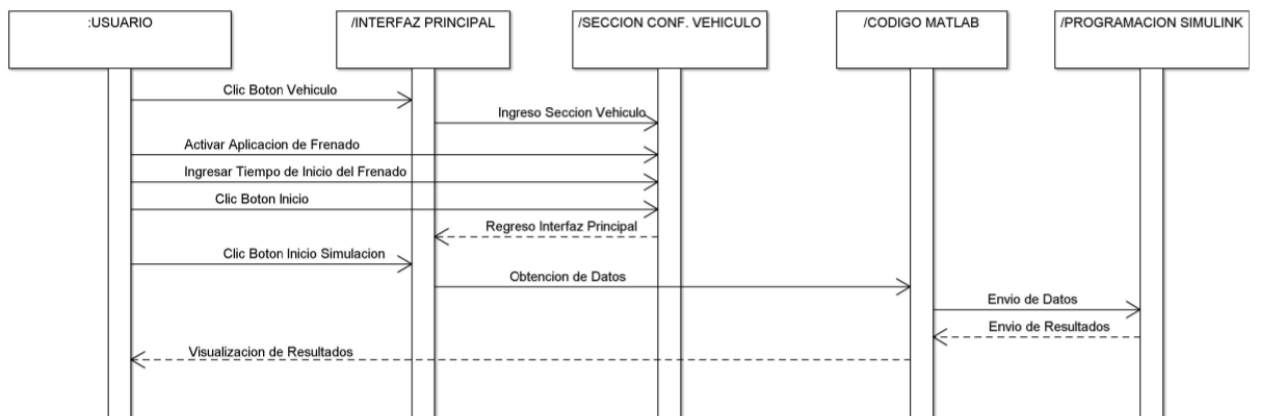
Simular Sistema Completo



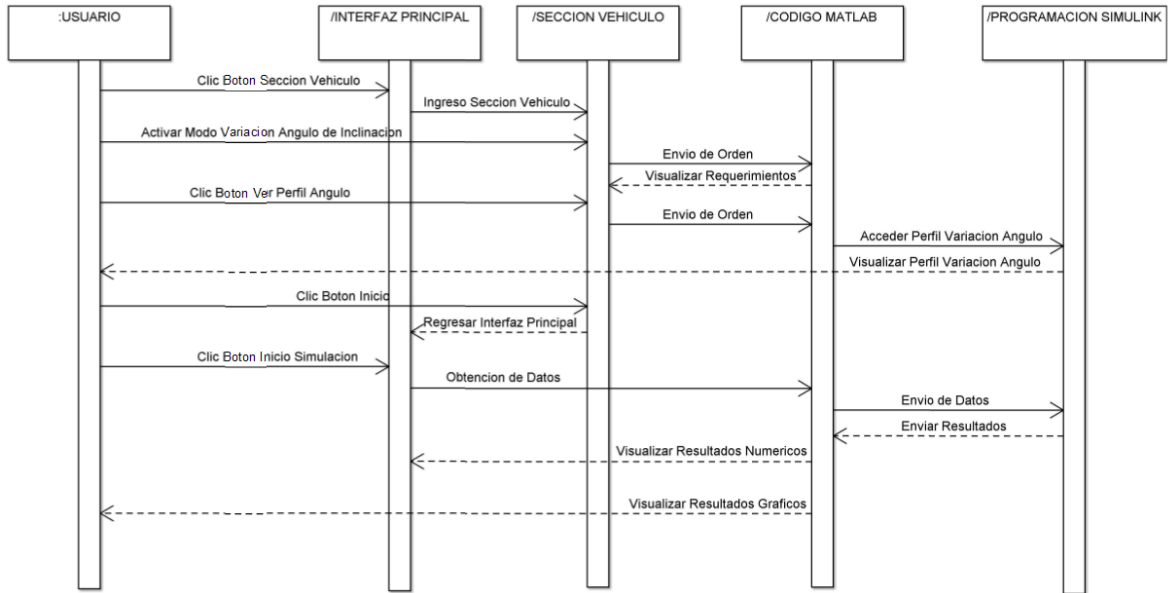
Visualizar Datos Resultados



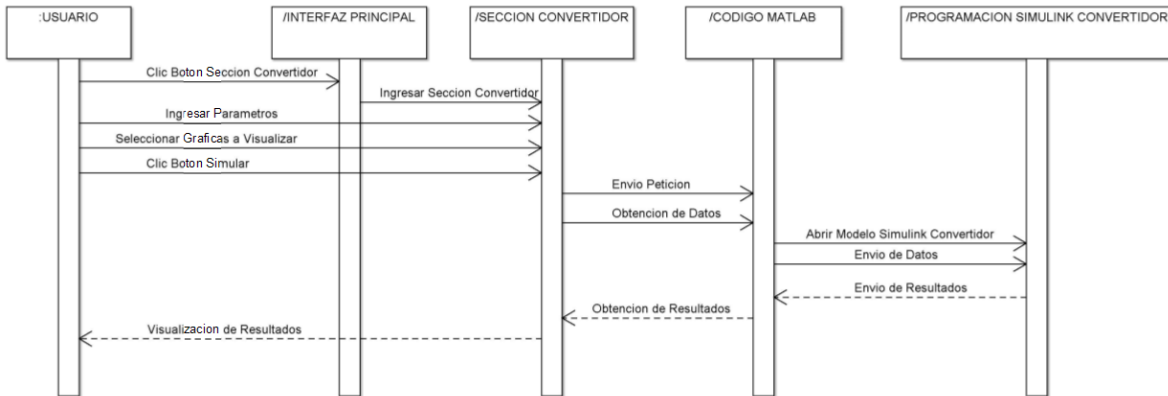
Análisis con Aplicación de Frenado



Análisis con Variación Angulo de Inclinación



Simular Convertidor de Voltaje Completo

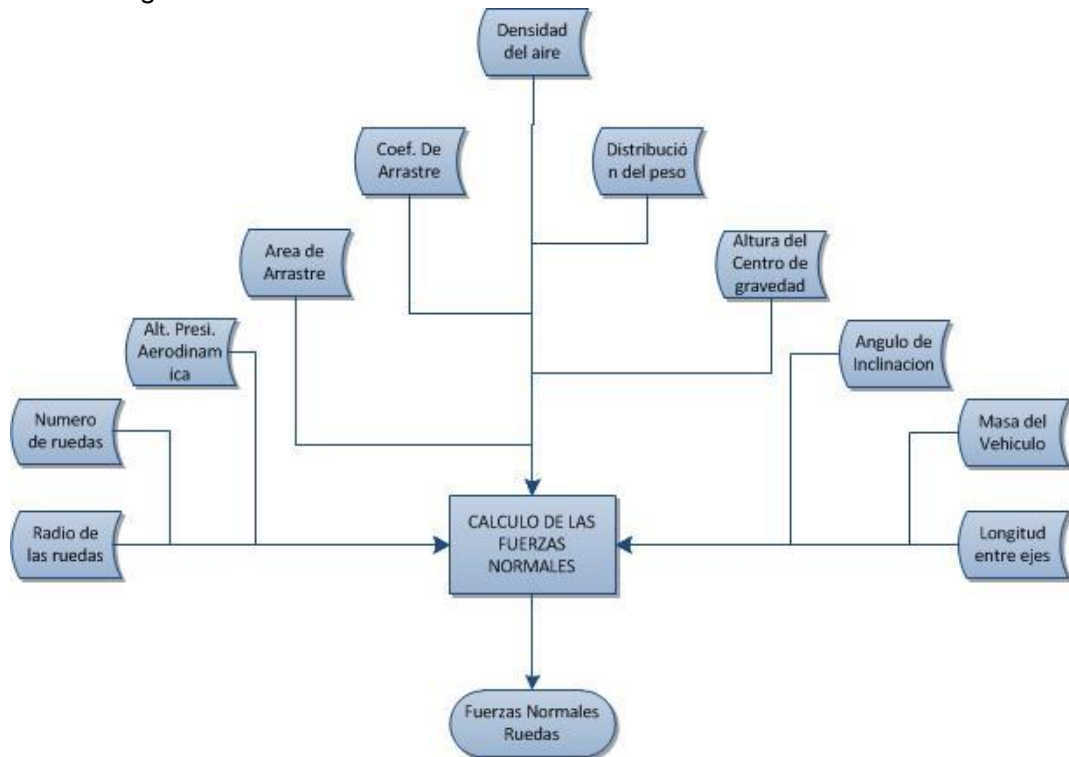


Fuente: El Autor

Diagramas de Flujos Específicos del Simulador SIDVEC

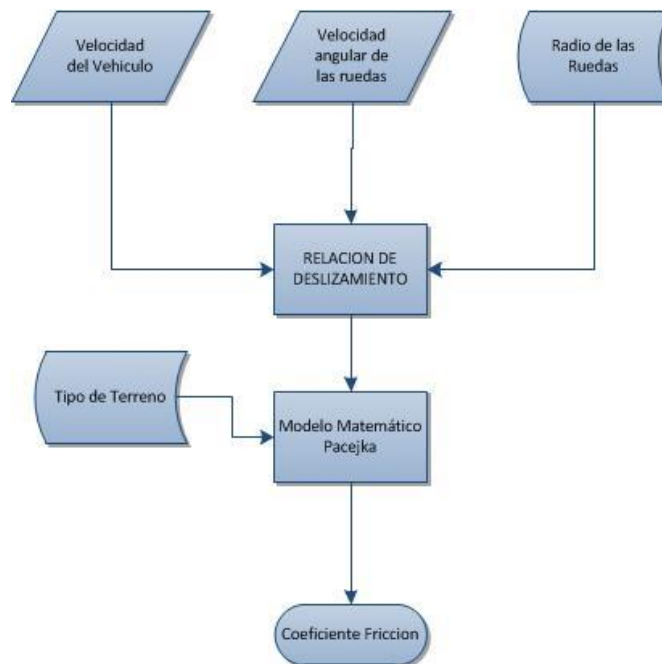
En esta última parte del manual científico se muestran los diagramas de flujos específicos a partir del diagrama general mostrado en la figura 26.

Figura E5. Diagrama de Fuerza Normales



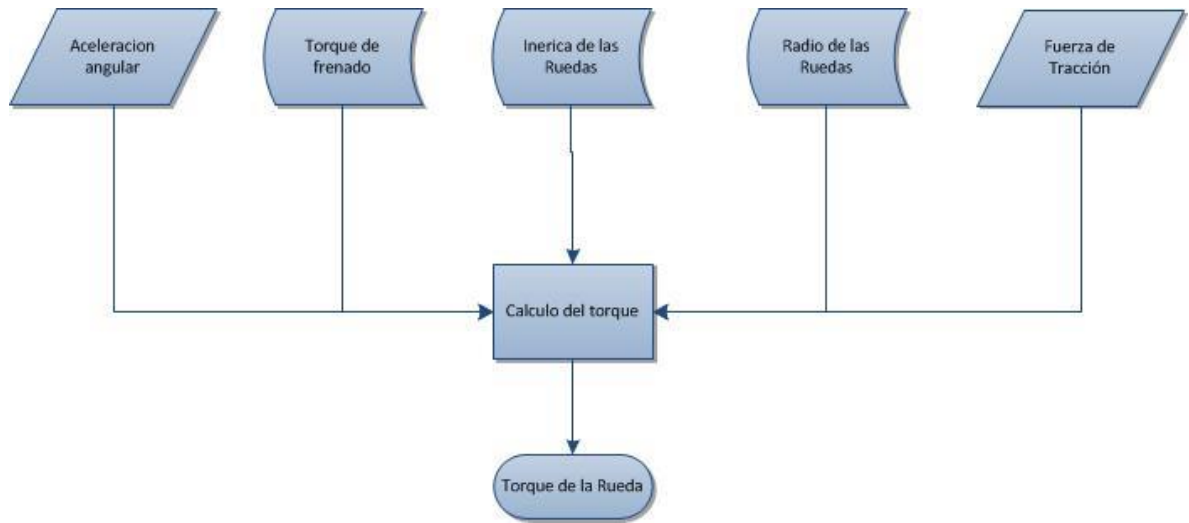
Fuente: El Autor

Figura E6. Diagrama de las Ruedas



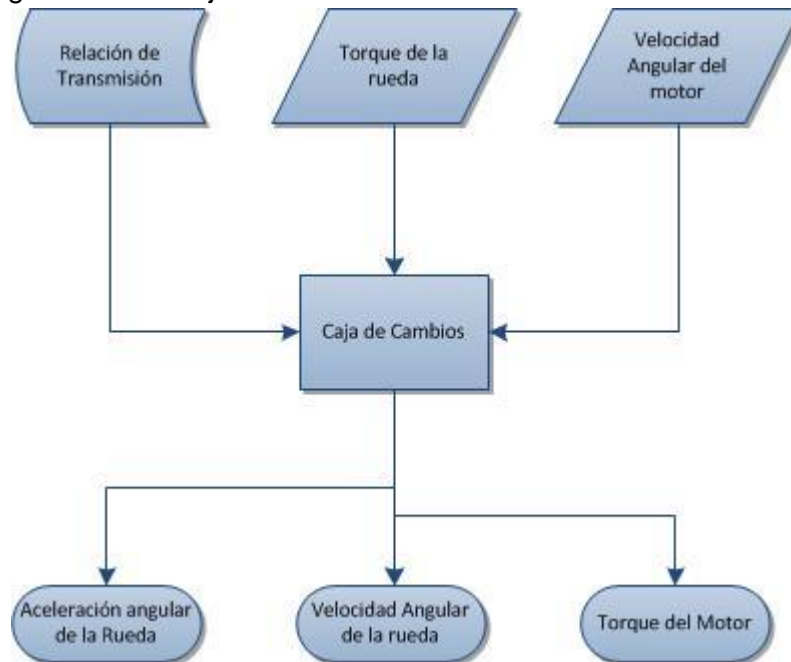
Fuente: El Autor

Figura E7. Diagrama Torque de las Ruedas



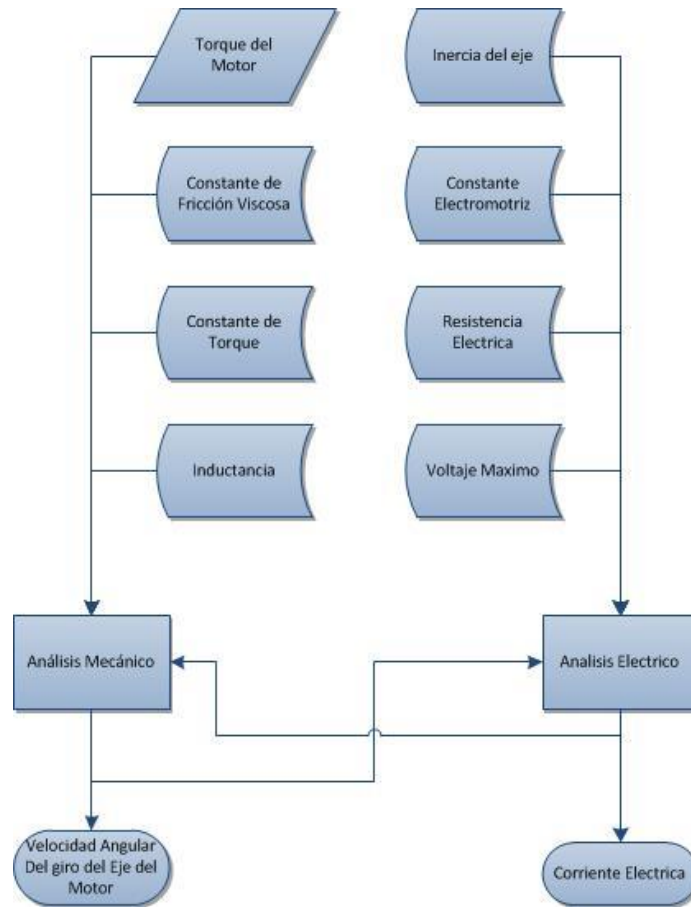
Fuente: El Autor

Figura E8. Diagrama de la Caja de Transmisión



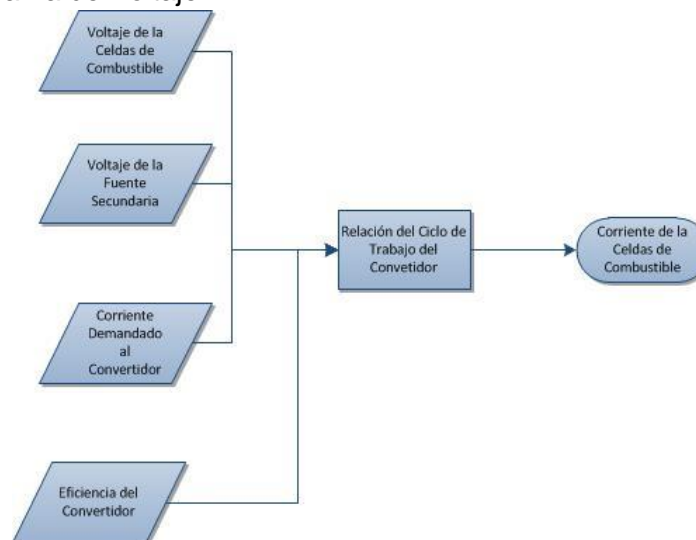
Fuente: El Autor

Figura E9. Diagrama Motor Eléctrico



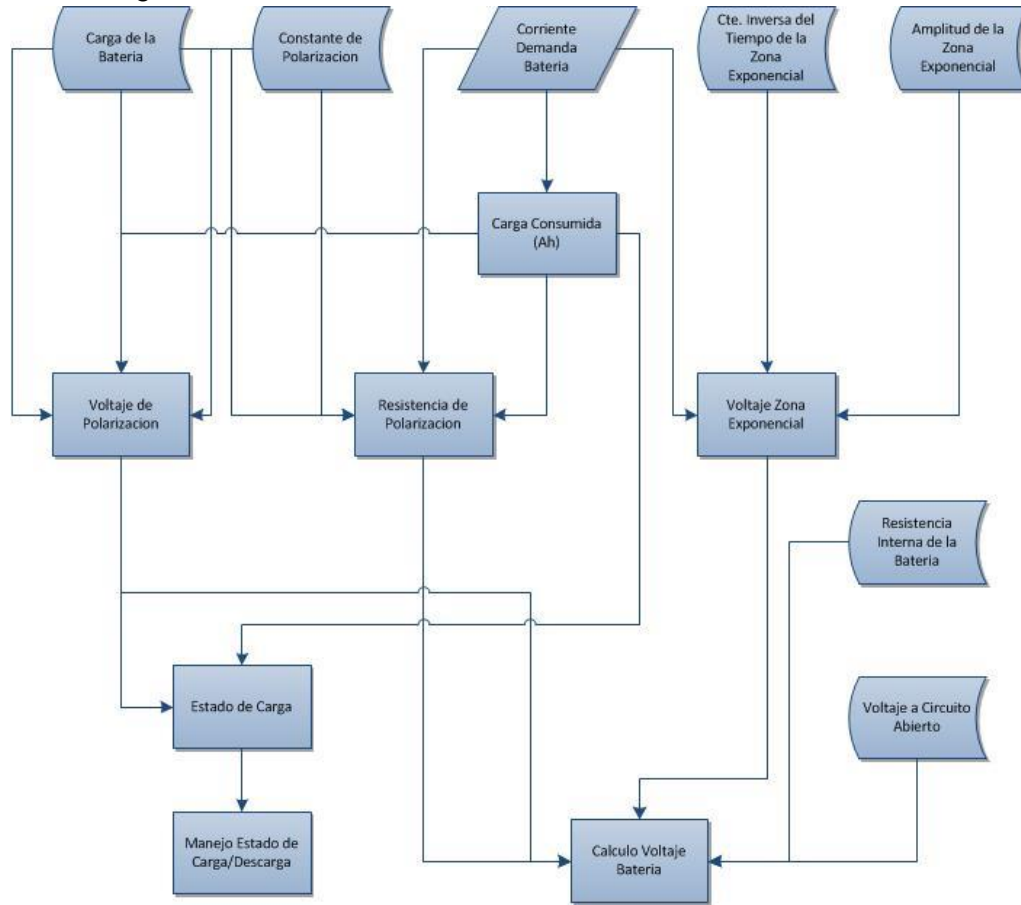
Fuente: El Autor

Figura E10. Diagrama de Voltaje



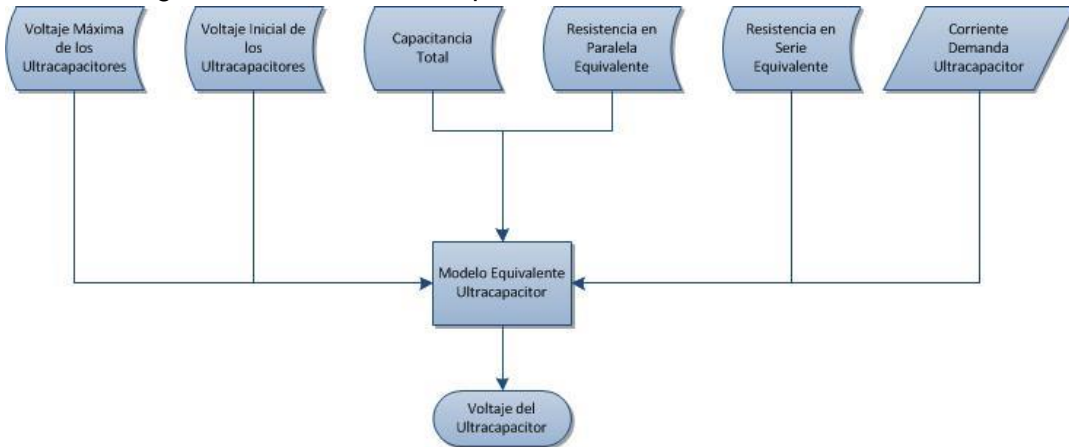
Fuente: El Autor

Figura E11. Diagrama Pack de Baterías



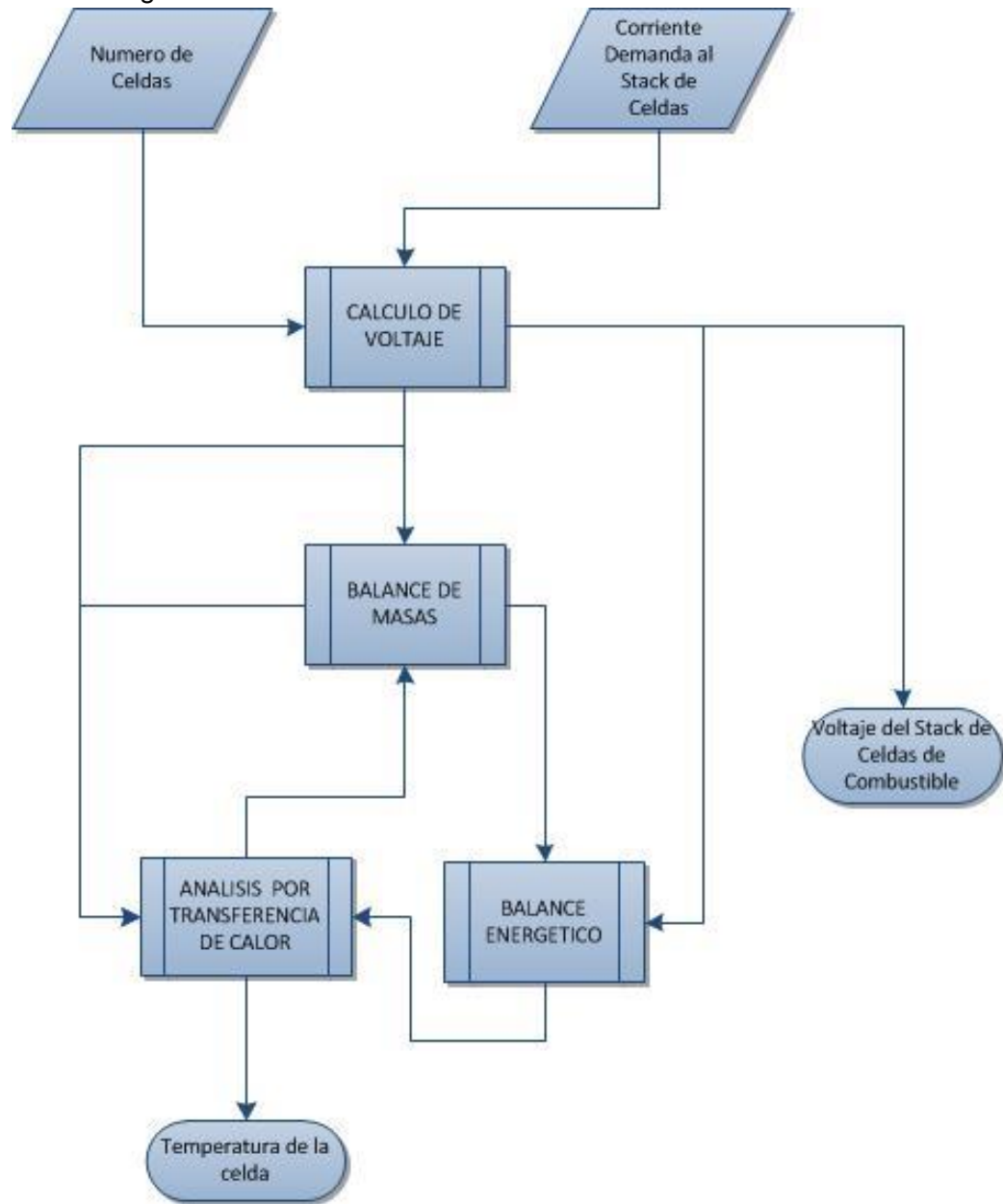
Fuente: El Autor

Figura E12. Diagrama Banco de Ultracapacitores



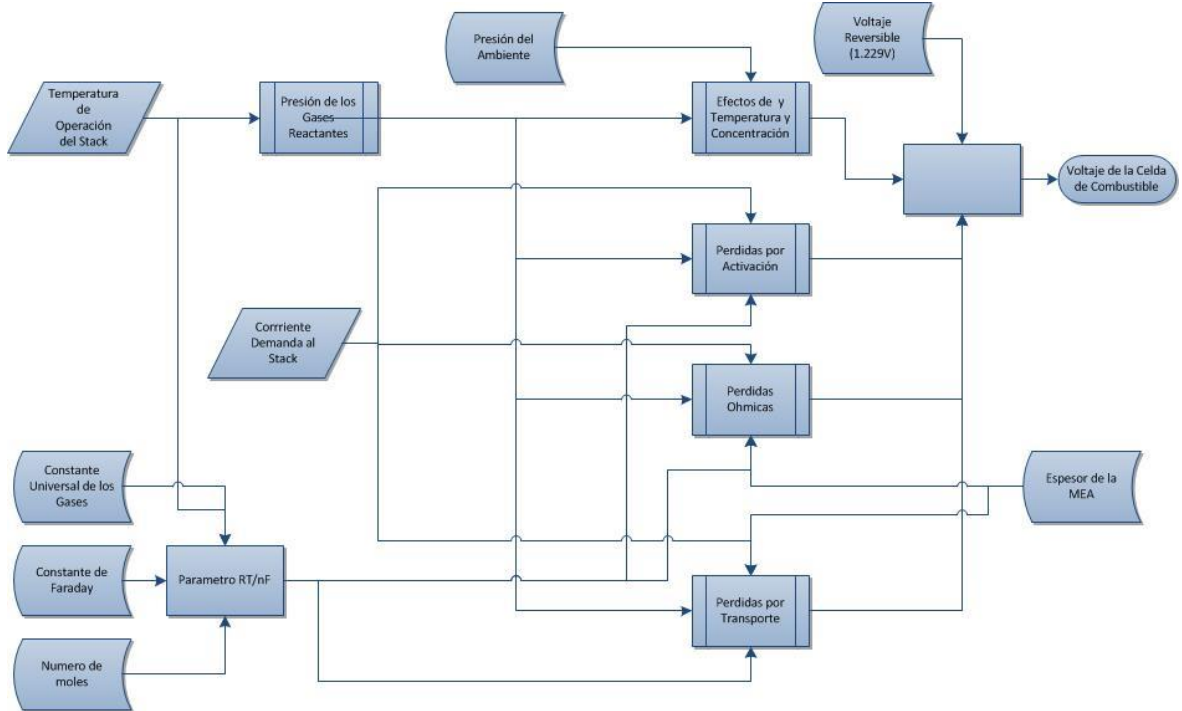
Fuente: El Autor

Figura E13. Diagrama General Celda de Combustible



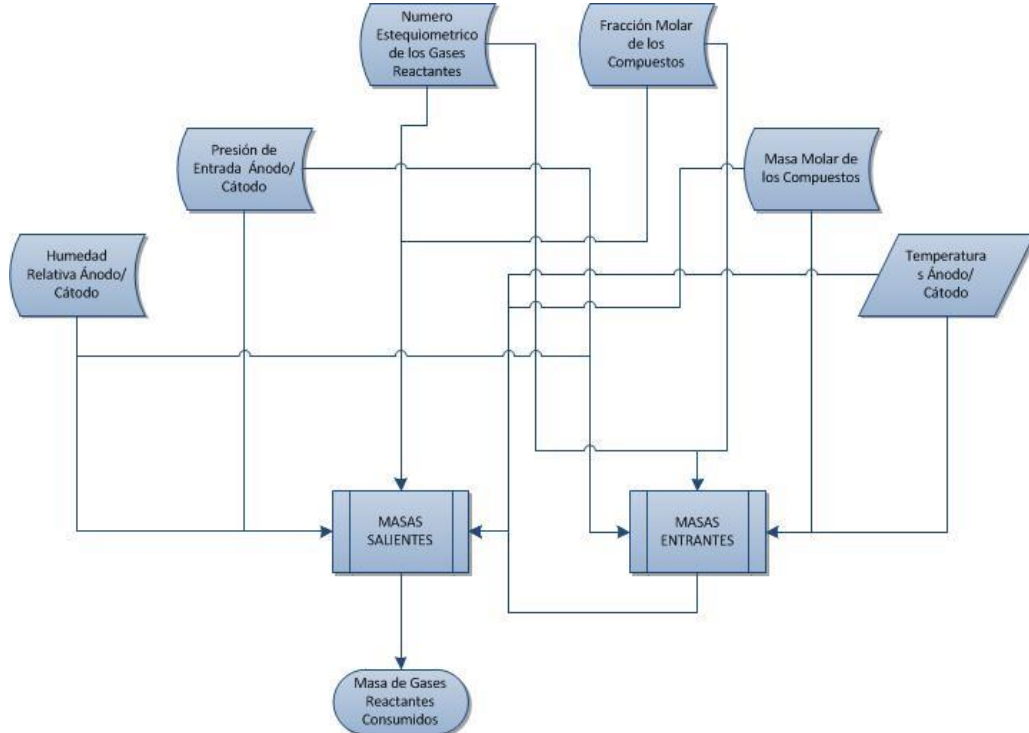
Fuente: El Autor

Figura E14. Diagrama Cálculo de Voltaje de la Celda de Combustible



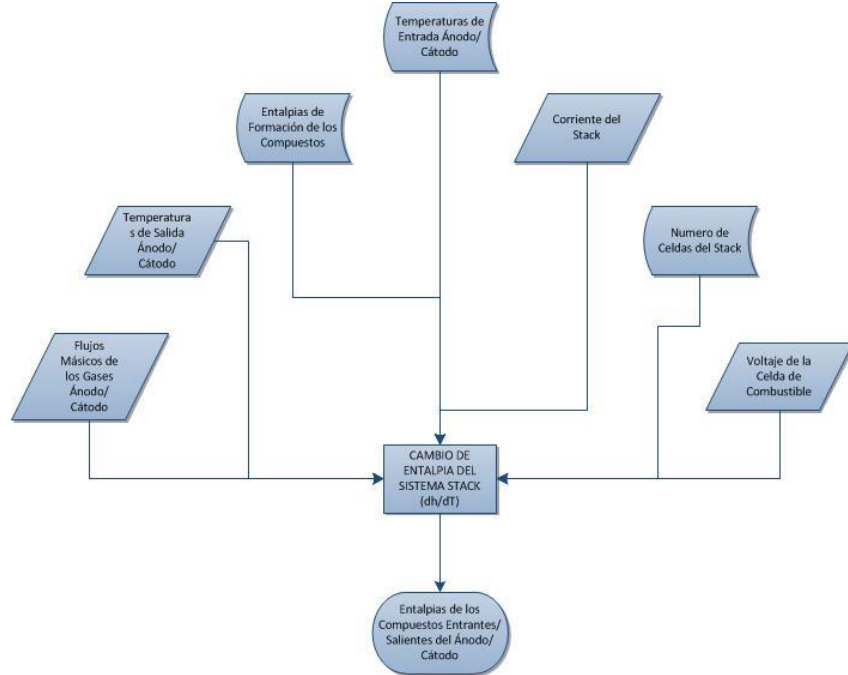
Fuente: El Autor

Figura E15. Diagrama de Balances de Masas Celda de Combustible



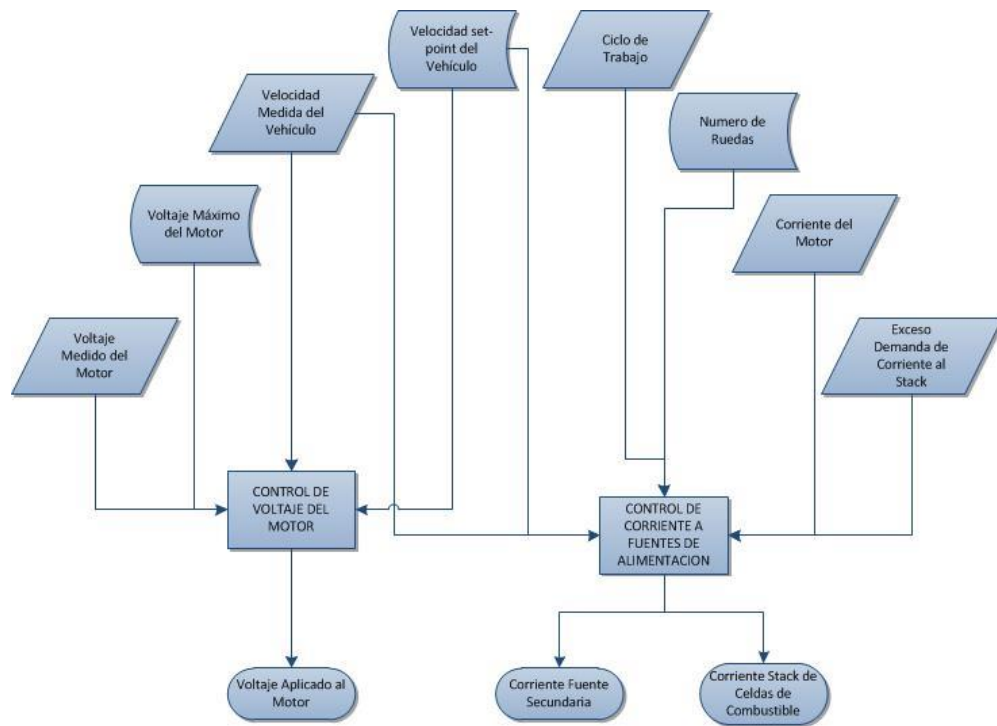
Fuente: El Autor

Figura E16. Diagrama de Balance de Energía



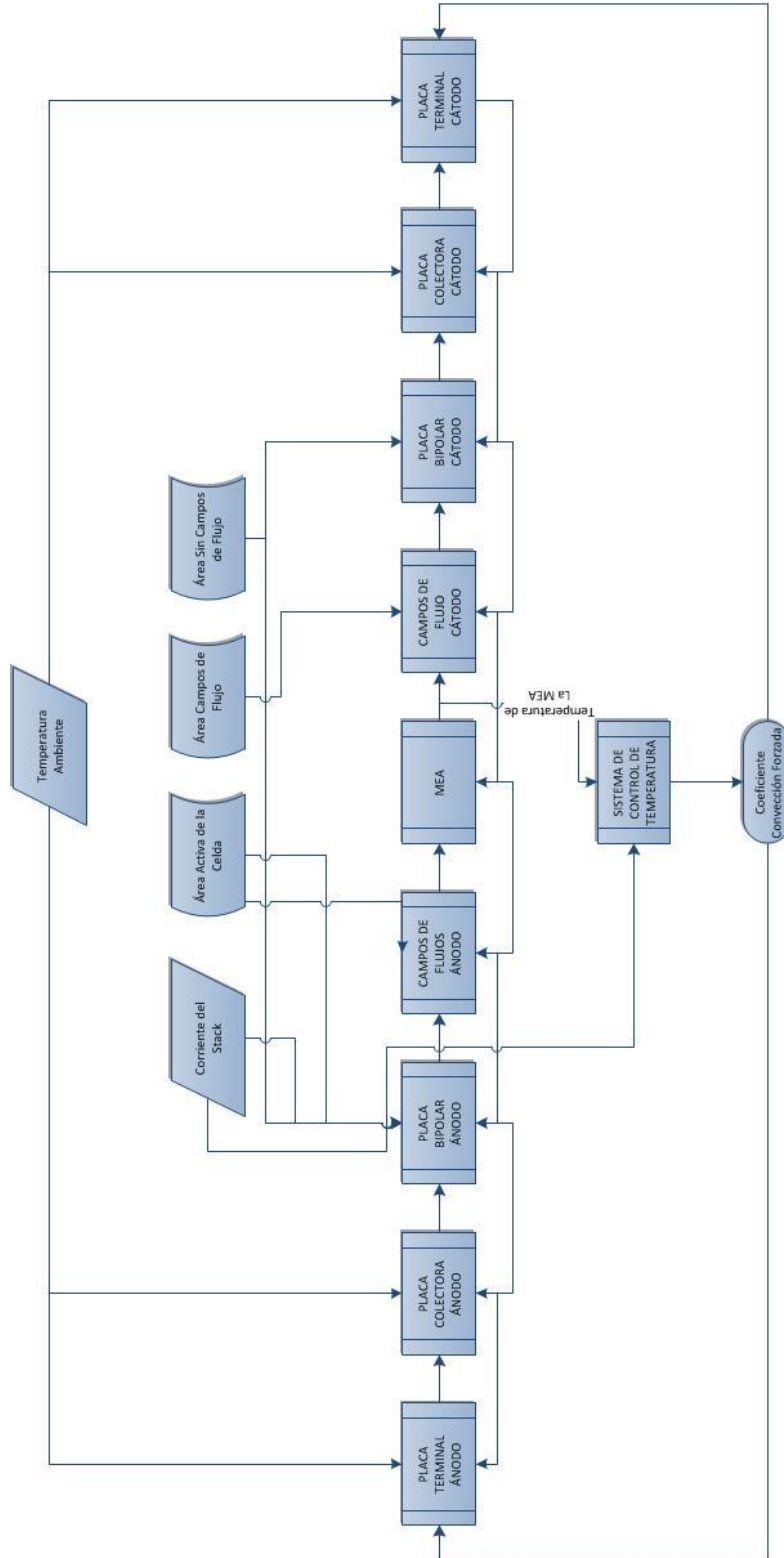
Fuente: El Autor

Figura E17. Diagrama de Unidad de Control



Fuente: El Autor

Figura E18. Diagrama de Transferencia de Calor Celda de Combustible



Fuente: El Autor

ANEXO F. DEDUCCIONES MATEMÁTICAS DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE
Ecuación General de Gibbs y Potencial Eléctrico de la Celda de Combustible

$$G = H - TS \quad (\mathbf{h1})$$

En la forma diferencial,

$$dG = dH - TdS - SdT \quad (\mathbf{h2})$$

De la definición de la entalpía, donde $H = U + PV$ (h3)

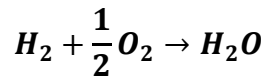
$$dG = d(U + PV) - TdS - SdT \quad (\mathbf{h4})$$

$$dG = dU + PdV + VdP - TdS - SdT \quad (\mathbf{h5})$$

A partir de la primera ley de la termodinámica, podemos reemplazar el término la energía interna por, $dU = \partial Q - \partial W$ (h6)

$$dG = \partial Q - \partial W + PdV + VdP - TdS - SdT \quad (\mathbf{h7})$$

Tomando la siguiente reacción química:



$$\begin{aligned} \Delta H &= \Delta H_{prod} - \Delta H_{reac} \\ &= n_{H_2O} * (\bar{h}_f^\circ + \Delta \bar{h})_{H_2O} - n_{H_2} * (\bar{h}_f^\circ + \Delta \bar{h})_{H_2} - n_{O_2} * (\bar{h}_f^\circ + \Delta \bar{h})_{O_2} \quad (\mathbf{h8}) \end{aligned}$$

Si consideramos que la temperatura tanto de los reactivos como de los productos se encuentra a 25°C, es decir a la temperatura de referencia, por lo tanto el cambio de entalpía sensible es cero.

$$\Delta H^\circ = n_{H_2O} * h_{f_{H_2O}}^\circ - n_{H_2} * h_{f_{H_2}}^\circ - n_{O_2} * h_{f_{O_2}}^\circ \quad (\mathbf{h9})$$

A partir de las tablas termodinámicas encontramos que los valores de las entalpías de formación para el agua, el hidrógeno y el oxígeno son -286, 0 y 0 [KJ/mol] respectivamente. Entonces tenemos que:

$$\Delta H^\circ = 1 * (-286) - 1 * (0) - \frac{1}{2} * (0) \quad (\mathbf{h10})$$

$$\Delta H^\circ_{@T=25^\circ C, P=1atm} = -286 \frac{KJ}{mol}$$

Ahora para el cálculo de la entropía a las mismas condiciones tenemos que:

$$\Delta S = \Delta S_{prod} - \Delta S_{reac} = n_{H_2O}(\bar{s}_f^\circ + \Delta \bar{s})_{H_2O} - n_{H_2}(\bar{s}_f^\circ + \Delta \bar{s})_{H_2} - n_{O_2}(\bar{s}_f^\circ + \Delta \bar{s})_{O_2} \quad (\mathbf{h11})$$

A condiciones estándar $\Delta \bar{s} = 0$

$$\Delta S^\circ = n_{H_2O} * s_{f_{H_2O}}^\circ - n_{H_2} * s_{f_{H_2}}^\circ - n_{O_2} * s_{f_{O_2}}^\circ \quad (\mathbf{h12})$$

Tomando los valores de las tablas de termodinámica,

$$\Delta S^\circ = 1 * (0.06996) - 1 * (0.13066) - \frac{1}{2} * (0.20517)$$

$$\Delta S^\circ = -0.16329 \text{ KJ/mol}$$

Por lo tanto

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T^\circ \Delta S^\circ = -286 - 298.15 * (-0.16329)$$

$$\Delta G^\circ = -237.317 \text{ KJ/mol}$$

Ahora tomando en cuenta que el trabajo eléctrico de la celda de combustible (W_{el}) se define como:

$$W_{el} = Q * E \quad (\mathbf{h13})$$

Donde Q es la carga eléctrica y puede ser calculada como:

$$Q = n_e * N_a * e \text{ [C]} \quad (\mathbf{h14})$$

Dónde:

n_e : numero de electrones por mol o número de valencia de la sustancia.

N_a : Número de Avogadro ($6.023 * 10^{23}$ [mol⁻¹])

e : Carga de un electrón ($1.602176 * 10^{-19}$ [C])

Pero considerando la constante de Faraday es:

$$F = N_a * e = 6.023 * 10^{23} * 1.602 * 10^{-19} = 96488.5 \frac{C}{mol} \quad (\mathbf{h15})$$

Entonces,

$$W_{el} = n_e * F * E \quad (\mathbf{h16})$$

También podemos definir el trabajo eléctrico como

$$W_{el} = -\Delta G^\circ = n * F * E^\circ \quad (\mathbf{h17})$$

Entonces:

$$E^\circ = \frac{-\Delta G^\circ}{n_e * F} = \frac{-\Delta H + T\Delta S}{n_e * F} = \frac{237.317}{2 * 96488.5} \quad (\mathbf{h18})$$

$$E^\circ = \mathbf{1.23 [V]} \quad (\mathbf{h19})$$

Este es el voltaje máximo que puede suministrar una celda de combustible, pero si consideramos el sistema ideal, es decir sin tomar en cuenta las irreversibilidades del sistema, se podría obtener el siguiente voltaje:

Con $\Delta S = 0$;

$$E^\circ_{ideal} = \frac{-\Delta H}{n_e * F} = \frac{286}{2 * 96488.5} = \mathbf{1.482 [V]} \quad (\mathbf{h20})$$

Potencial de la Celda de Combustible Según la Presión y Temperatura

Recordando la ecuación general (g7), para un proceso reversible y a volumen y temperatura constante, entonces:

$$dG = VdP \quad (\mathbf{h21})$$

Considerando los gases de hidrógeno y oxígeno como gases ideales, se cumple que:

$$PV = nRT,$$

$$dG = VdP = nRT * \frac{dP}{P} \quad (\mathbf{h22})$$

Integrando,

$$\int_{G1}^{G2} dG = nRT \int_{P1}^{P2} \frac{dP}{P} \quad (\mathbf{h23})$$

$$G_2 - G_1 = nRT * \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (\text{h24})$$

Si consideramos que G_1 , se calcula para las condiciones estándar, entonces $G_1=G^\circ$ y $P_1=P^\circ=1 \text{ atm}$

$$G_2 = G^\circ + nRT * \ln\left(\frac{P_2}{P^\circ}\right) \quad (\text{h25})$$

Dividiendo toda la expresión por número de moles n , obtenemos que:

$$\bar{g}_2 = \bar{g}^\circ + RT * \ln\left(\frac{P_2}{P^\circ}\right) \quad (\text{h26})$$

Si: $\Delta G = \Delta G_{prod} - \Delta G_{reac} = n_{H_2O} * \bar{g}_{H_2O} - n_{H_2} * \bar{g}_{H_2} - n_{O_2} * \bar{g}_{O_2}$

Entonces,

$$\Delta G = n_{H_2O} * \left(\bar{g}^\circ_{H_2O} + RT * \ln\left(\frac{P_{H_2O}}{P^\circ}\right) \right) - n_{H_2} * \left(\bar{g}^\circ_{H_2} + RT * \ln\left(\frac{P_{H_2}}{P^\circ}\right) \right) - n_{O_2} * \left(\bar{g}^\circ_{O_2} + RT * \ln\left(\frac{P_{O_2}}{P^\circ}\right) \right) \quad (\text{h27})$$

Simplificando:

$$\Delta G = \left(\bar{g}^\circ_{H_2O} - \bar{g}^\circ_{H_2} - \frac{1}{2} \bar{g}^\circ_{O_2} \right) + RT * \ln\left(\frac{P_{H_2O} * P^{\circ \frac{1}{2}}}{P_{H_2} * P_{O_2}^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (\text{h28})$$

Donde $\Delta G^\circ = \bar{g}^\circ_{H_2O} - \bar{g}^\circ_{H_2} - \frac{1}{2} \bar{g}^\circ_{O_2}$, entonces,

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT * \ln\left(\frac{P_{H_2O} * P^{\circ \frac{1}{2}}}{P_{H_2} * P_{O_2}^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (\text{h29})$$

Los términos P_{H_2O} , P_{H_2} y P_{O_2} , corresponden a las presiones parciales de la correspondiente sustancia.

Recordando que:

$$E = \frac{-\Delta G}{n * F} = \frac{-\Delta G^\circ}{n * F} - \frac{RT}{n * F} * \ln \left(\frac{P_{H2O} * P^{o\frac{1}{2}}}{P_{H2} * P_{O2}^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (\mathbf{h30})$$

Finalmente obtenemos la expresión para calcular el voltaje de la celda de combustible a condiciones no estándar.

$$E = E^\circ + \frac{RT}{n * F} * \ln \left(\frac{P_{H2} * P_{O2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H2O} * P^{o\frac{1}{2}}} \right) \quad (\mathbf{h31})$$

Pérdida de Voltaje por Activación

De acuerdo con la Ley de Faraday: [21]

$$I = \frac{dQ_e}{dt} \quad (\mathbf{h32})$$

Dónde:

I : Corriente [A]

Q_e : Carga del electrón [C]

t : Unidad de tiempo [s]

Además $Q_e = n_e FN$, donde N es el número de moles que participan en la reacción. Entonces:

$$I = n_e F * \frac{dN}{dt} \quad (\mathbf{h33})$$

En este caso $\frac{dN}{dt}$, representa la velocidad de reacción electroquímica. Ahora integrando a ambos lados de la ecuación.

$$\int I dt = n_e F \int dN \quad (\mathbf{h34})$$

Obtenemos que:

$$I = n_e FN/t \quad (\mathbf{h35})$$

A continuación dividimos la expresión en el área transversal efectiva de la MEA (ver sección 3.6.6)

$$i = \frac{n_e F N}{A t} \quad (\text{h36})$$

Donde i es la densidad de corriente por unidad de área.

A través de una deducción matemática (la cual no es de completo interés de este proyecto), podemos encontrar la ecuación de Butler-Volmer:

$$i = i_0 * \left(\underbrace{\exp\left(\frac{-n_e \beta F * \eta_{sp}}{RT}\right)}_{\text{Corriente Directa}} - \underbrace{\exp\left(\frac{-n_e (1 - \beta) F * \eta_{sp}}{RT}\right)}_{\text{Corriente Inversa}} \right) \quad (\text{h37})$$

La ecuación anterior está considerada como la piedra angular de la cinética electroquímica y, básicamente, establece que la corriente eléctrica producida en una reacción electroquímica aumenta exponencialmente con la tensión de activación.

Dónde:

i_0 : Densidad de corriente de intercambio, que representa la máxima cantidad de corriente que se puede extraer de la celda sin apreciar caída de tensión. Físicamente coincide con la corriente que se establece una vez que se alcanza el equilibrio químico. [21]

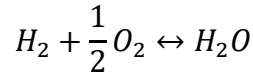
β : Factor de simetría, este factor de simetría es apropiado para reacciones simples en las que interviene un solo electrón ($n=1$), y su valor teórico oscila entre 0 y 1, aunque para las reacciones en superficies metálicas suele tomar el valor de 0.5

η_{sp} : Factor conocido como *sobrepotencial*, que es la diferencia entre el voltaje del electrodo y el voltaje reversible, este término es el responsable de la generación de electricidad.

$$\eta_{sp} = E^\circ - E_{cell} \quad (\text{h38})$$

Analizando la ecuación de Butler-Volmer, los términos que indican las corrientes directas e inversas, hacen referencia, a las corrientes eléctricas, producidas en los electrodos en una celda de combustible PEM. La corriente eléctrica producida en la celda, viaja del ánodo al cátodo, al igual que lo hacen los iones H^+ , es lo que se conoce como corriente directa; pero realmente esto no es del todo cierto, al mismo

tiempo en que se produce este flujo de electrones del ánodo al cátodo, se crea una corriente en sentido inverso (corriente inversa), que es producido por la disociación del agua en oxígeno e hidrógeno. Por lo tanto la reacción química se puede considerar de la siguiente manera:



En la que reacción química sucede en ambos sentidos, por lo tanto la corriente eléctrica producida por la celda de combustible (i), es la resultante entre la diferencia de las corrientes directas e inversas. Este fenómeno puede explicar en parte el por qué cuando incluso no existe demandan de corriente en la celda, el voltaje producido es inferior al teórico; esto es debido a que realmente si existe transferencia de electrones de un electrodo a otro, pero las corrientes tanto directa como inversa, se están produciendo al mismo tiempo y a la misma velocidad, alcanzando un equilibrio. [21]

Ahora considerando que el sobrepotencial representa el valor de las pérdidas de voltaje y despreciando el término de la corriente inversa, por ser muy pequeña en comparación con la directa, tenemos que:

$$i = i_0 * \left(\exp\left(\frac{-n\beta F * \eta_{sp}}{RT}\right) \right) \quad (\mathbf{h39})$$

$$\eta_{sp} = \Delta V_{kinet} = \frac{RT}{n\beta F} * \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (\mathbf{h40})$$

Corriente de Pérdida por Cruce de Gases

El flujo de gas que atraviesa la membrana (N_{cross}), está en función de la permeabilidad de los gases, la presión y el espesor de la membrana.

$$N_{cross} = P_m * \frac{A * P}{\delta_{NAF}} \quad (\mathbf{h41})$$

Dónde:

P_m : Permeabilidad

A : Área activa

P : Presión del gas

δ_{NAF} : Espesor de la membrana de nafión

Recordando la ley de Faraday:

$$I_{cross} = n * F * N_{cross}$$

$$I_{cross} = n * F * P_m * \frac{A * P}{\delta_{NAF}} \quad (\mathbf{h42})$$

Dividiendo sobre el Área,

$$i_{cross} = \frac{n * F * P_m * P}{\delta_{NAF}} \quad (\mathbf{h43})$$

Para el cálculo de la permeabilidad tenemos que:

$$P_m = D^m * S_b \quad (\mathbf{h44})$$

Dónde:

D^m : Difusividad del gas en la membrana

S_b : Solubilidad del gas en la membrana

En el caso del Hidrógeno la solubilidad de este en el nafión es $S_{b_{H_2}}^{naf} = 2.2 * 10^{-4} \left[\frac{mol}{m^3 * Pa} \right]$ [21], en cuanto a la difusividad, esta es dependiente de la temperatura, y se expresa como:

$$D_{H_2}^{naf} = 4.1 * 10^{-7} * e^{\left(\frac{-2602}{T} \right)} \quad (m^2/s) \quad (\mathbf{h45})$$

Si deseamos encontrar la permeabilidad del oxígeno en la membrana, podemos considerar las siguientes ecuaciones,

$$S_{b_{O_2}}^{naf} = 7.43 * 10^{-6} * e^{\left(\frac{666}{T} \right)} \quad \left(\frac{mol}{m^3 * Pa} \right) \quad (\mathbf{h46})$$

$$D_{O_2}^{naf} = 3.1 * 10^{-7} * e^{\left(\frac{-2768}{T} \right)} \quad (m^2/s) \quad (\mathbf{h47})$$

Resistencia de la Membrana

Para determinar la conductividad o la resistividad de la membrana Nafión, debemos relacionarla con la humedad presente en esta.

$$\phi = \frac{m_v}{m_v^*} = \frac{P_v}{P^*} \quad (\mathbf{h48})$$

Dónde:

ϕ : Humedad relativa

P_v : Presión parcial del vapor de agua en el sistema.

P^* : Presión de saturación del vapor de agua a la temperatura de operación.

Existe una relación que permite expresar la presión de saturación para cualquier temperatura entre 0 °C y 100 °C [21]

$$P^* = \exp(aT^{-1} + b + cT + dT^2 + eT^3 + f \ln(T)) \quad (\mathbf{h49})$$

Dónde:

a : -5800.2206

b : 1.3914993

c : -0.048640239

d : $0.41764768 \cdot 10^{-4}$

e : $-0.14452093 \cdot 10^{-7}$

f : 6.5459673

El contenido en agua del Nafión (λ) se define como la relación entre humedad relativa y el contenido en agua de la membrana polimérica. [40]

$$\lambda = 0.0043 + 17.81 * \phi_{NAF} - 39.85 * \phi_{NAF}^2 + 36 * \phi_{NAF}^3; \text{ para } 0 < \phi_{NAF} \leq 1 \quad (\mathbf{h50})$$

$$\lambda = 14 + 1.4 * (\phi_{NAF} - 1); \text{ para } 1 < \phi_{NAF} \leq 3 \quad (\mathbf{h51})$$

Donde ϕ_{NAF} , es la humedad relativa presente en la membrana polimérica de Nafión.

La conductividad iónica y la temperatura (K) están fuertemente relacionadas. [21]

$$\sigma_{NAF} = (0.5193 * \lambda - 0.326) * \exp\left(1268 * \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (\Omega^{-1} \cdot m^{-1}) \quad (\mathbf{h52})$$

La resistencia total de la membrana (R_m) la podemos encontrar mediante la siguiente expresión:

$$ASR = R_m = \int_0^\delta \frac{dz}{\sigma_{NAF(\lambda)}} \quad (\mathbf{h53})$$

Donde δ es el espesor de la membrana y $\sigma_{NAF(\lambda)}$ es la conductividad en función del contenido del agua en la membrana.

Arrastre Electro-Osmótico

$$n_{arst} = n_{arst}^* * \frac{\lambda}{22} \quad (\mathbf{h54})$$

Dónde:

n_{arst} : Coeficiente de arrastre electro-osmótico

n_{arst}^* : Arrastre electro-osmótico

λ : Contenido de agua en la membrana

El arrastre electro osmótico puede tomar el valor de 2.5, pero experimentalmente se ha encontrado que puede variar entre 2.3 y 2.7 para un λ que varía entre 0 y 22, con agua líquida a una temperatura de entre 30 °C y 50 °C. [21] [40]

El flujo de agua arrastrada ($N_{H_2O.arst}$) junto con los protones para una corriente neta demandada, se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$N_{H_2O.arst} = 2 * n_{arst} * \frac{i}{nF} \left(\frac{mol}{m^2 * s} \right) \quad (\mathbf{h55})$$

El número 2 en la ecuación indica que el flujo de iones H^+ , es el doble del flujo de las moléculas H_2 .

Difusión Inversa

La ecuación que expresa la difusión inversa, es la siguiente: [40]

$$N_{H_2O.dif} = \frac{\rho_{NAF.dry}}{M_{NAF}} * D_\lambda * \frac{d\lambda}{dz} \left(\frac{mol}{m^2 * s} \right) \quad (\mathbf{h56})$$

Dónde:

$N_{H_2O.dif}$: Flujo de agua por difusión inversa (mol/s)

$\rho_{NAF.dry}$: Densidad en seco del Nafión (1970 Kg/m³)

M_{NAF} : Peso molecular equivalente del Nafión (1.1 Kg/mol)

D_λ : Difusión del agua en la membrana

z : Dirección en la que se desplazan las moléculas de agua

El término D_λ enfatiza la fuerte dependencia que tiene la difusividad del agua sobre el contenido en humedad de la membrana.[41].

$$D_\lambda = 3.1 * 10^{-7} * \lambda * (e^{0.28*\lambda} - 1) * e^{-2436/T} \quad 0 < \lambda \leq 3 \quad (\mathbf{h57})$$

$$D_\lambda = 4.17 * 10^{-8} * \lambda * (1 + 161 * e^{-\lambda}) * e^{-2436/T} \quad 3 < \lambda \leq 22 \quad (\mathbf{h58})$$

Los fenómenos de arrastre electro osmótico y de difusión inversa se contrarrestan el uno al otro, por lo que el flujo neto de agua a través de la membrana se expresa como combinación de ambos fenómenos: [40]

$$N_{H_2O} = N_{H_2O.arst} - N_{H_2O.dif} = \alpha * \frac{i}{nF} \quad (\text{h59})$$

$$N_{H_2O} = \alpha * \frac{i}{nF} = 2 * n_{arst}^* * \frac{\lambda}{22} * \frac{i}{nF} - \frac{\rho_{NAF.dry}}{M_{NAF}} * D_{\lambda} * \frac{d\lambda}{dz} \quad (\text{h60})$$

Donde α se puede describir como la relación de flujo de neto de agua en la membrana con el flujo de hidrógeno.

A partir de esta ecuación podemos obtener la relación de la cantidad de agua con el espesor de la membrana:

$$\frac{d\lambda}{dz} = \frac{i}{nF} * \left(2 * n_{drag}^* * \frac{\lambda}{22} - \alpha \right) * \frac{M_{NAF}}{\rho_{NAF.dry} * D_{\lambda}} \quad (\text{h61})$$

Integrando y resolviendo la ecuación anterior tenemos que: [21]

$$\lambda_{(z)} = \frac{11\alpha}{n_{arst}^*} + C * \exp\left(\frac{i}{22 * F} * \frac{M_{NAF} * n_{arst}^*}{\rho_{NAF.dry} * D_{\lambda}} * z\right) \quad (\text{h62})$$

Donde C es una constante que obtiene a partir de las condiciones límite de funcionamiento, al igual que el valor de α .

Las condiciones límites para el cálculo de α y C es de la siguiente manera. Tomemos en cuenta únicamente la membrana polimérica, en donde la cantidad de agua dentro de ella varía en la longitud de su espesor.

$$z_1 = 0 \Rightarrow \lambda_1 = \frac{11\alpha}{n_{arst}^*} + C \exp\left(\frac{i}{22 * F} * \frac{M_{NAF} * n_{arst}^*}{\rho_{NAF.dry} * D_{\lambda}} * z_1\right) \quad (\text{h63})$$

Entonces,

$$\lambda_1 = \frac{11\alpha}{n_{arst}^*} + C \quad (\text{h64})$$

$$z_2 = \delta \Rightarrow \lambda_2 = \frac{11\alpha}{n_{arst}^*} + C \exp\left(\frac{i}{22 * F} * \frac{M_{NAF} * n_{arst}^*}{\rho_{NAF.dry} * D_{\lambda}} * z_2\right) \quad (\text{h65})$$

Dónde:

λ_1 : Cantidad de agua presente en el lado del ánodo.

λ_2 : Cantidad de agua presente en el lado del cátodo.

Resolviendo esas ecuaciones podemos encontrar los valores correspondientes a α y C , y encontrar el valor de la resistencia de la membrana, debemos sustituir los valores y desarrollar la integral:

$$R_m = \int_0^{\delta} \frac{dz}{\sigma_{NAF(\lambda)}} \quad (\mathbf{h66})$$

$$R_m = \frac{\ln \left| \frac{((0.5193 * K_1 * \alpha - 0.326) * \exp(-K_3 / K_1 * z) + 0.5193 * C) * K_2}{-K_3 / K_1 * K_2 * (0.5193 * K_1 * \alpha - 0.326)} \right|}{z_1 \quad z_2} \quad (\mathbf{h67})$$

$$\alpha = \frac{\lambda_2 - \lambda_1 * \exp(K_1 * K_3 * z)}{K_1 * (1 + \exp(K_1 * K_3 * z))} \quad (\mathbf{h67}) \quad \text{y} \quad C = \lambda_1 - K_1 * \alpha \quad (\mathbf{h68})$$

Dónde:

$$K_1 = 11 / n_{arst}^*$$

$$K_2 = \exp \left(1268 * \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right)$$

$$K_3 = \frac{i}{nF} * \frac{M_{NAF}}{\rho_{NAF.dry} * D_{\lambda}}$$

Corriente Límite

El voltaje varía con las presiones parciales de cada uno de los gases reactantes

$$\Delta V_{trans} = \frac{RT}{nF} * \ln \left(\frac{C_B}{C_S} \right) \quad (\mathbf{h69})$$

Dónde:

C_B : Concentración del gas a la entrada de la celda. (mol/m³)

C_S : Concentración del gas en la superficie del catalizador del electrodo. (mol/m³)

Estas concentraciones se puede expresar en función de las presiones parciales:

$$C = \frac{n}{V} = \frac{P}{RT} \quad (\mathbf{h70})$$

Entonces:

$$\frac{C_B}{C_S} = \frac{\frac{P_B}{RT}}{\frac{P_S}{RT}} = \frac{P_B}{P_S} \quad (\text{h71})$$

El flujo de reactantes en los canales de flujo es proporcional a su gradiente de concentración: [21]

$$N = \frac{D * (C_B - C_S) * A}{\delta} \quad (\text{h72})$$

Dónde:

N : es el flujo de reactantes

D : Coeficiente de difusión de las especies reactantes

A : Área activa del electrodo

δ : La distancia de difusión.

En este caso la distancia de difusión es el espesor de la capa de difusión de gas, $\delta = \delta_{GDL}$

Recordando que:

$$N = \frac{I}{nF} = \frac{i * A}{nF} \quad (\text{h73})$$

Reemplazando obtenemos que:

$$i = \frac{nFD * (C_B - C_S)}{\delta_{GDL}} \quad (\text{h74})$$

Podemos notar que, cuanto mayor sea la densidad de corriente demandada, menor será la concentración de los reactantes en la superficie del catalizador. Incluso se puede llegar al caso de tener una concentración que tiende a cero si su demanda supera la velocidad de suministro. La densidad de corriente a la que se produce este fenómeno de tendencia a cero se denomina Densidad de Corriente Limite, de manera que cuando se alcanza este valor, una celda de combustible no puede producir más corriente simplemente porque no hay reactantes en las superficies catalizadas. [21]

$$\text{si } C_S = 0 \Rightarrow i = i_L:$$

$$i_L = \frac{nFD * C_B}{\delta_{GDL}} \quad (\text{h75})$$

Donde i_L es la corriente limite. Ahora reemplazando estas ecuaciones:

$$\frac{C_B}{C_S} = \frac{i_L * \delta / nFD}{C_B - i * \delta / nFD} = \frac{i_L * \delta / nFD}{i_L * \delta / nFD - i * \delta / nFD} \quad (\text{h76})$$

$$\frac{C_B}{C_S} = \frac{i_L}{i_L - i}$$

Por lo tanto las pérdidas por transporte de masa se pueden escribir de la siguiente manera:

$$\Delta V_{trans} = \frac{RT}{nF} * \ln\left(\frac{i_L}{i_L - i}\right) \quad (\text{h77})$$

Combinación de Mecanismos de Transporte para Mezclas Binarias:

Ahora considerando los cuatro mecanismos de transporte, sumando todos los flujos en un flujo total y reorganizando las variables obtenemos la siguiente expresión:

$$N_i = -D_i \left[1 + \frac{D_{is}}{D_i} + x_i \frac{D_{is} - D_{js}}{D_{ij}} \right] \nabla n_i + x_i \delta_i J - x_i \gamma_i \frac{n * B_o}{\mu} \nabla P + x_i \frac{D_{js}}{D_{is}} \nabla n_i \quad (\text{h78})$$

Dónde:

$$\frac{1}{D_i} = \frac{1}{D_{ik}} + \frac{1}{D_{ij}} \quad (\text{h79})$$

$$\delta_i = \frac{D_{ik}}{D_{ik} + D_{ij}} \quad (\text{h80})$$

$$\gamma_i = 1 - \delta_i \quad (\text{h87})$$

y J es el flujo neto a través de la membrana.

Si despreciamos la difusión superficial, tenemos:

$$N_i = -D_i * \nabla n_i + x_i * \delta_i * J - x_i * \gamma_i * \frac{n * B_o}{\mu} \nabla P \quad (\text{h88})$$

Si despreciamos el término de Knudsen y el flujo viscoso,

$$N_i = -D_i * \nabla n_i + x_i * J \quad (\text{h89})$$

Pero si finalmente consideramos que el flujo total es cero tenemos:

$$N_i = -D_i * \nabla n_i = -\left(\frac{1}{D_{ik}} + \frac{1}{D_{ij}}\right)^{-1} * \nabla n_i \quad (\text{h90})$$

La anterior expresión es conocida como la fórmula de *Bosanquet*. De la ley de Faraday podemos relacionar la ecuación con la densidad de corriente:

$$\frac{i}{nF} = - \left(\frac{1}{D_{ik}} + \frac{1}{D_{ij}} \right)^{-1} * \nabla C_i \quad (\mathbf{h91})$$

$$i = -nF * \left(\frac{1}{D_{ik}} + \frac{1}{D_{ij}} \right)^{-1} * \frac{C_B - C_S}{\delta_{GDL}} \quad (\mathbf{h92})$$

La anterior ecuación está formulada bajo la condición de una mezcla de gases binarios, para una mezcla multi-compuesta, debemos hallar el coeficiente de difusividad multi-componente de la especie *i* en la mezcla, el cual es obtenida a partir de la ecuación de Stefan-Maxwell y se expresa de la siguiente manera:

$$D_{im} = \frac{1 - x_i}{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \frac{x_j}{D_{ij}}} \quad (\mathbf{h93})$$

Dónde:

x_i : Fracción molar del componente *i*

N: Número total de componentes en la mezcla.

D_{ij} : Coeficiente de difusión binaria entre el componente *i* y *j*

Ahora la ecuación queda de la siguiente manera:

$$i = nF \underbrace{\left(\frac{1}{D_{ik}} + \frac{1}{D_{im}} \right)^{-1}}_{D_{it}} * \frac{C_B - C_S}{\delta_{GDL}} \quad (\mathbf{h94})$$

Pero debido a que estamos trabajando con un medio poroso, debemos reemplazar el coeficiente de difusión por el coeficiente de difusión efectiva.

$$D_i^{eff} = \frac{\varepsilon}{\tau} * D_i \quad (\mathbf{h95})$$

Dónde:

τ : Turtuosidad

ε : Porosidad del medio que se define como:

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_s + V_v} \quad 0 < \varepsilon \leq 1 \quad (\mathbf{h96})$$

Donde V_v es el volumen del espacio vacío y V_s el volumen de fracción sólida. En cuanto a la turtuosidad es una característica que representa lo tortuoso o difícil de

atravesar un trayecto, es decir es el grado de dificultad que tiene el gas para difundirse en el medio.

$$\tau = \varepsilon^{-0.5} \quad (\mathbf{h97})$$

Por lo tanto la ecuación queda de la siguiente manera:

$$i = nF * \varepsilon^{1.5} D_{it} * \frac{C_B - C_S}{\delta_{GDL}} \quad (\mathbf{h98})$$

Finalmente podemos encontrar la corriente limite al decir que $C_S = 0$,

$$i_L = nF * \varepsilon^{1.5} D_{it} * \frac{C_B}{\delta_{GDL}} \quad (\mathbf{h99})$$

$$i_L = nF * \varepsilon^{1.5} D_{it} * \frac{P_i}{\delta_{GDL} * RT} \quad (\mathbf{h100})$$

Podemos considerar otro fenómeno de transporte conocido como convección, este se presenta en los canales de flujo y no en la capa de difusión.

$$i_L = nF * \left(\frac{1}{h_m} + \frac{\delta_{GDL}}{(\varepsilon^{1.5} * D_{it})} \right)^{-1} * \frac{P_i}{RT} \quad (\mathbf{h101})$$

Dónde:

h_m : Coeficiente de transferencia de masa

$$h_m = S_h * \frac{D_{ij}}{D_h} \quad (\mathbf{h102})$$

S_h es el número de *Sherwood* para este caso puede tomar el valor de 5.39 o 4.86
 D_h es el diámetro hidráulico que dependiendo de la sección transversal existe diferentes cálculos.

$$D_h = \frac{2LW}{L + W} \quad \text{para seccion retangular} \quad (\mathbf{h103})$$

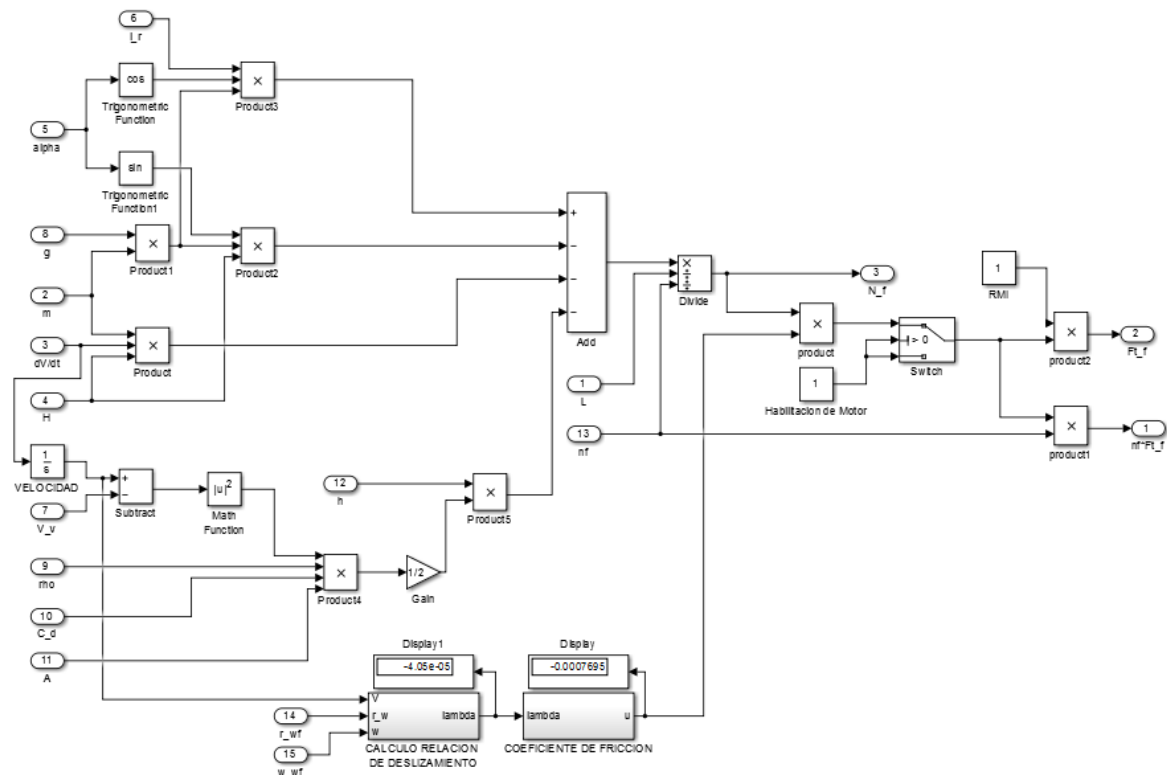
$$D_h = 2W \quad \text{si } L \ll W$$

ANEXO G. BLOQUES DE SIMULINK DE LOS SUBSISTEMAS DEL PROGRAMA

Bloque Subsistema: Cálculo Fuerza Normal Rueda Delantera y Trasera

En este subsistema se modela las ecuaciones desarrolladas al realizar la sumatoria de momentos, vista sección 1.1, la cual nos permite calcular la fuerza normal que experimenta la rueda y la fuerza de tracción que ejerce dado que también en este subsistema se calcula tanto la relación de deslizamiento como el coeficiente de deslizamiento, cuyas ecuaciones fueron vistas en la sección 1.2. A continuación se muestra el diagrama del subsistema que es similar tanto para las ruedas delanteras como traseras.

Figura 73. Subsistema para el Cálculo de la Fuerza Normal de la ruedas

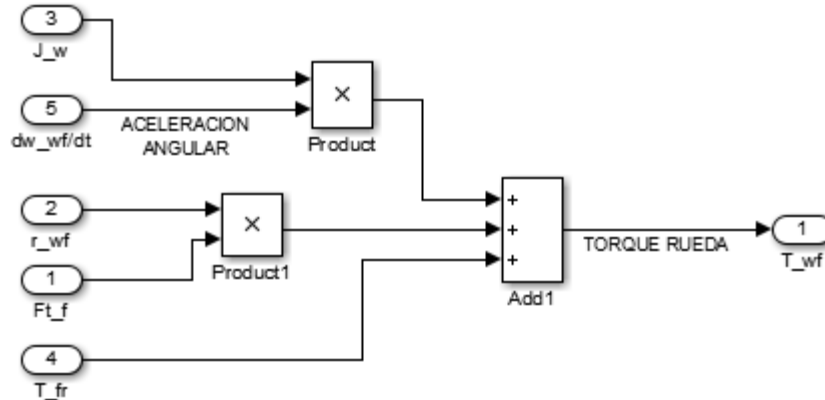


Fuente: El autor

Bloque Subsistema: Cálculo Torque Rueda Delantera y Trasera

En este subsistema se modela las fuerzas que actúan sobre las ruedas, con el objetivo de calcular el torque correspondiente. En la siguiente figura se muestra el diagrama utilizado para las ruedas delanteras y traseras.

Figura 74. Subsistema para Modelamiento de la Ruedas

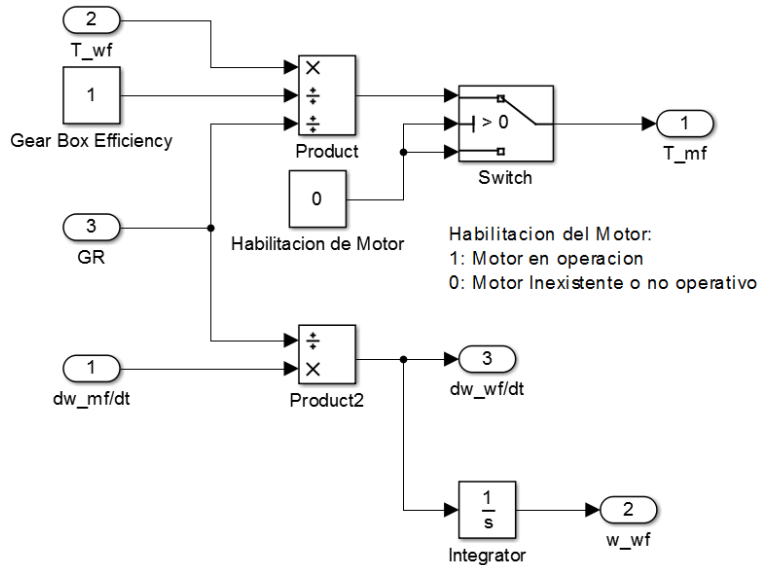


Fuente. El autor

Bloque Subsistema: Caja de Transmisión Rueda Delantera y Trasera

Recordando que en muchos diseños de vehículos con motores eléctricos suelen utilizar una caja transmisión por engranajes de un solo cambio de velocidad para ayudar a la operación del motor, se simula por tanto este componente importante, como se observa en la imagen siguiente, incluyendo un valor de eficiencia de este.

Figura 75. Subsistema para el modelamiento de la Caja de Transmisión de los Motores

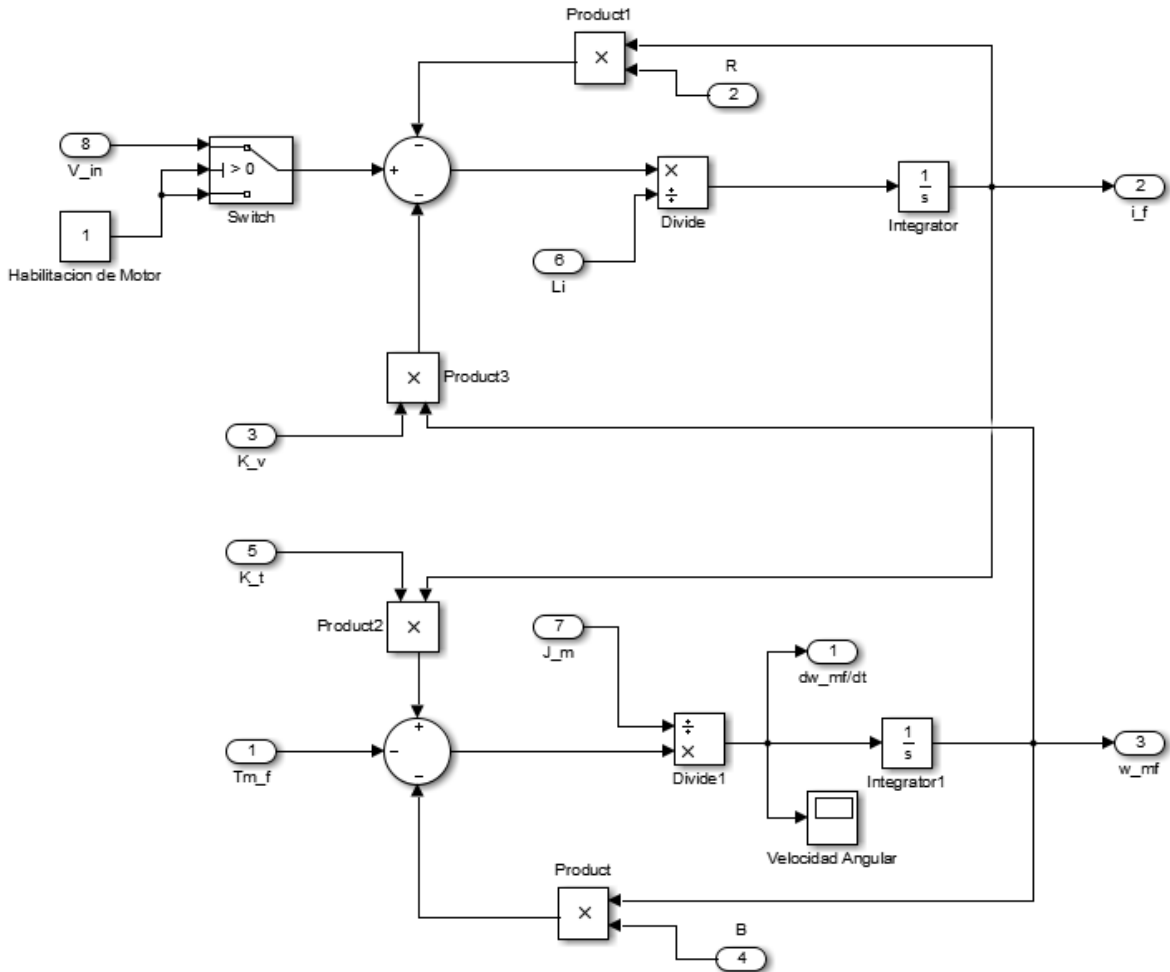


Fuente: El autor

Bloque Subsistema: Cálculo Corriente y Velocidad Angular Motor Delantero y Trasero

En este Subsistema se modela las ecuaciones que definen el comportamiento de un motor eléctrico DC. Se establecen dos ecuaciones, una modela el sistema eléctrico y la otra el sistema mecánico, las cuales fueron descritas en las secciones 1.3.1 y 1.3.2, respectivamente, y como se pueden llegar analizar, ambas ecuaciones se relacionan entre sí mediante variables comunes, por lo tanto el diagrama derivado de esta unión se muestra a continuación.

Figura 76. Subsistema del Modelamiento de un Motor Eléctrico DC



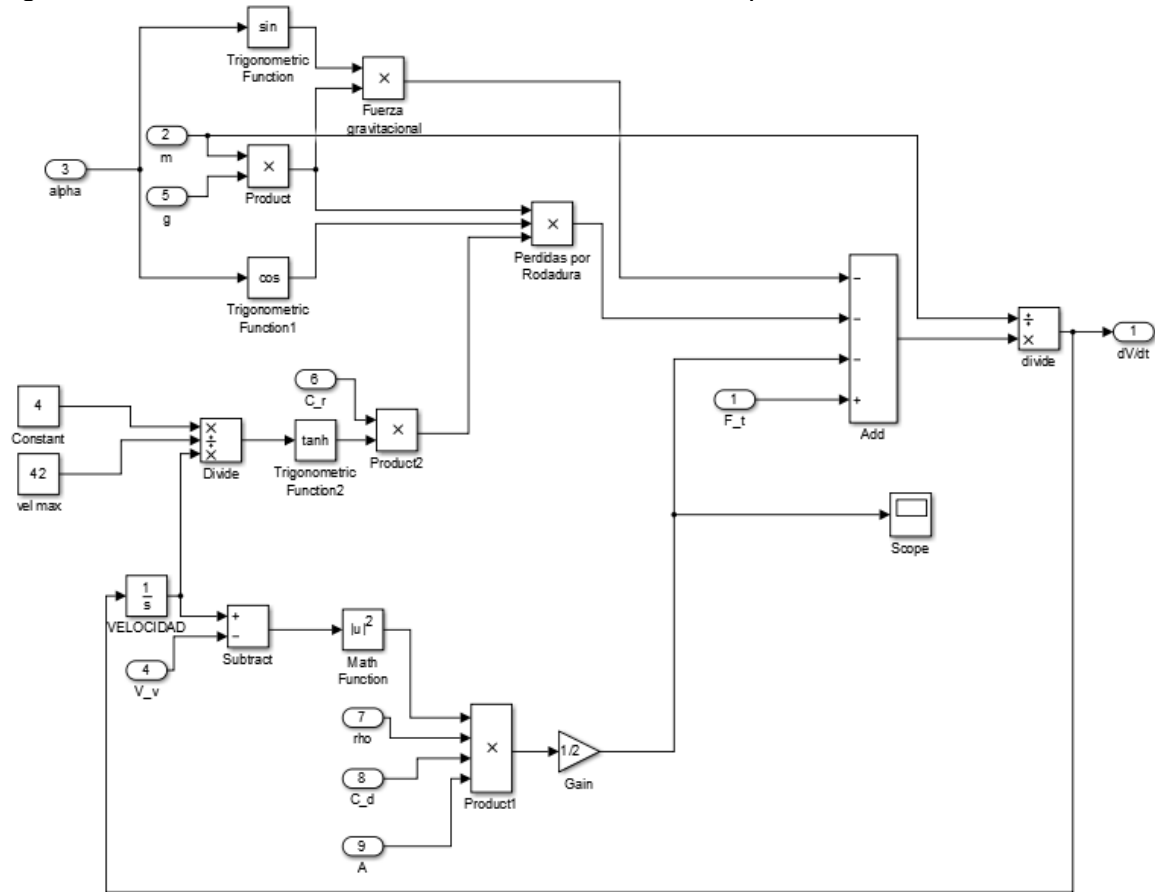
Fuente: El autor

Bloque Subsistema: Cálculo Aceleración

Para el cálculo de la aceleración que adquiere el vehículo, se utiliza la ecuación obtenida con el análisis de la sumatoria de fuerzas que actúan sobre el automóvil,

la cual fue vista en la sección 1.1, y fue modelada en este subsistema, donde se calculan las correspondientes fuerzas resistivas.

Figura 77. Subsistema del Modelamiento de las Fuerzas que Actúan sobre el Vehículo



Fuente: El autor

Bloque Subsistema: Convertidor Boost DC-DC

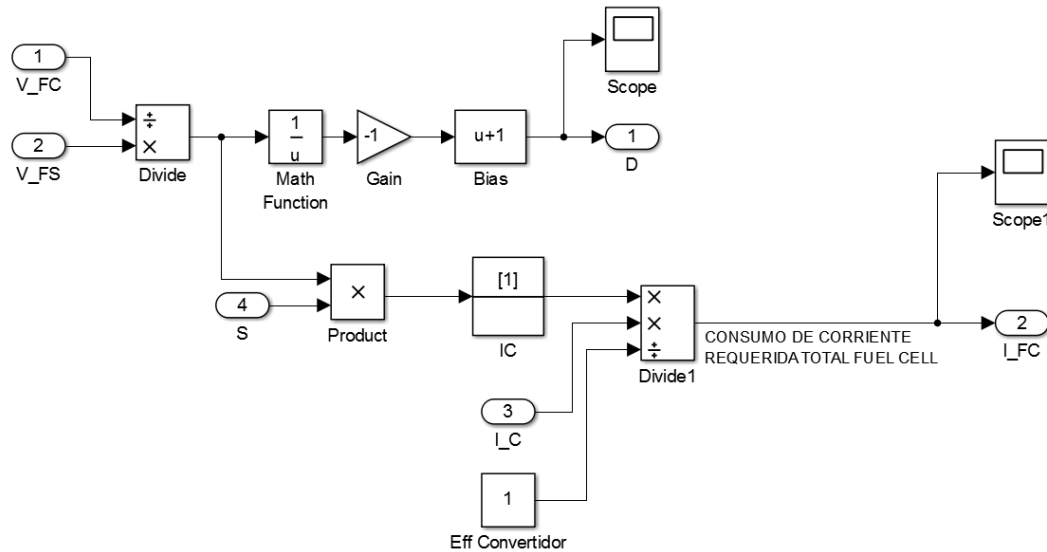
La modelación de un convertidor de voltaje Boost no presenta mayor dificultad, pero su simulación trae consigo la desventaja, que provoca que el simulador se vuelva lento, debido las altas frecuencias de conmutación que maneja el interruptor, el tiempo aceptable para una simulación del circuito del convertidor puede ser de 1 o 2 segundos. Si lo simulamos en conjunto con todos los modelos y el tiempo total de varios minutos, el programa tardaría demasiado tiempo en obtener resultados, por tal motivo se opta por modelar un esquema eléctrico

simplificado, para así calcular la corriente y el voltaje que requiere suministrar la celda de combustible, considerando que no hay pérdidas eléctricas, tenemos:

$$Pot_{FC} = V_{FC} * I_{FC} = V_{conv} * I_{conv} = Pot_{conv}$$

$$\frac{V_{conv}}{V_{FC}} = \frac{1}{1 - D} = \frac{I_{FC}}{I_{conv}} \quad (I1)$$

Figura 78. Subsistema para la Modelación Equivalente del Convertidor de Voltaje DC/DC tipo Boost

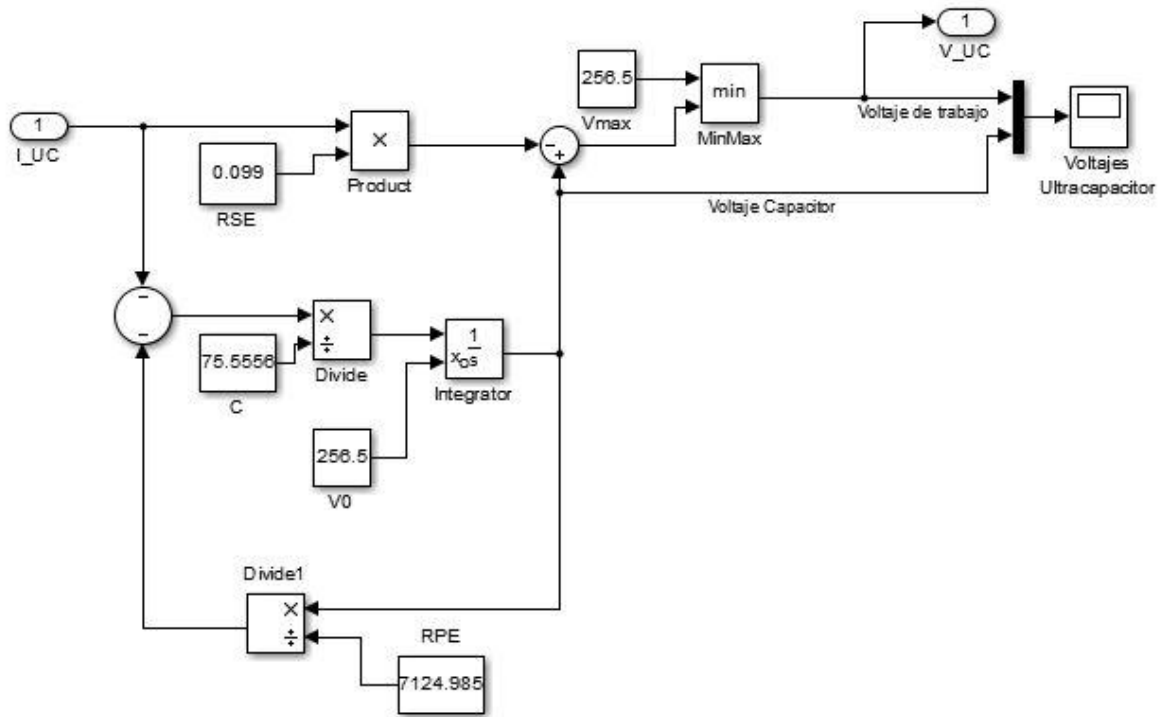


Fuente: El autor

Bloque Subsistema: Ultracapacitor

En este bloque representa el esquema equivalente desarrollado en simulink a partir de la ecuación desarrollada en la sección 1.4.1, En el cual las variables utilizadas ya son respectivamente calculadas de acuerdo al tamaño del banco de ultracapacitores, es decir al número de dispositivos conectados tanto en serie como paralelo, cuyos valores son ingresados a través del correspondiente panel "Parámetros Ultracapacitor" que se despliega en la interfaz.

Figura 79. Subsistema para Modelación del Ultracapacitor

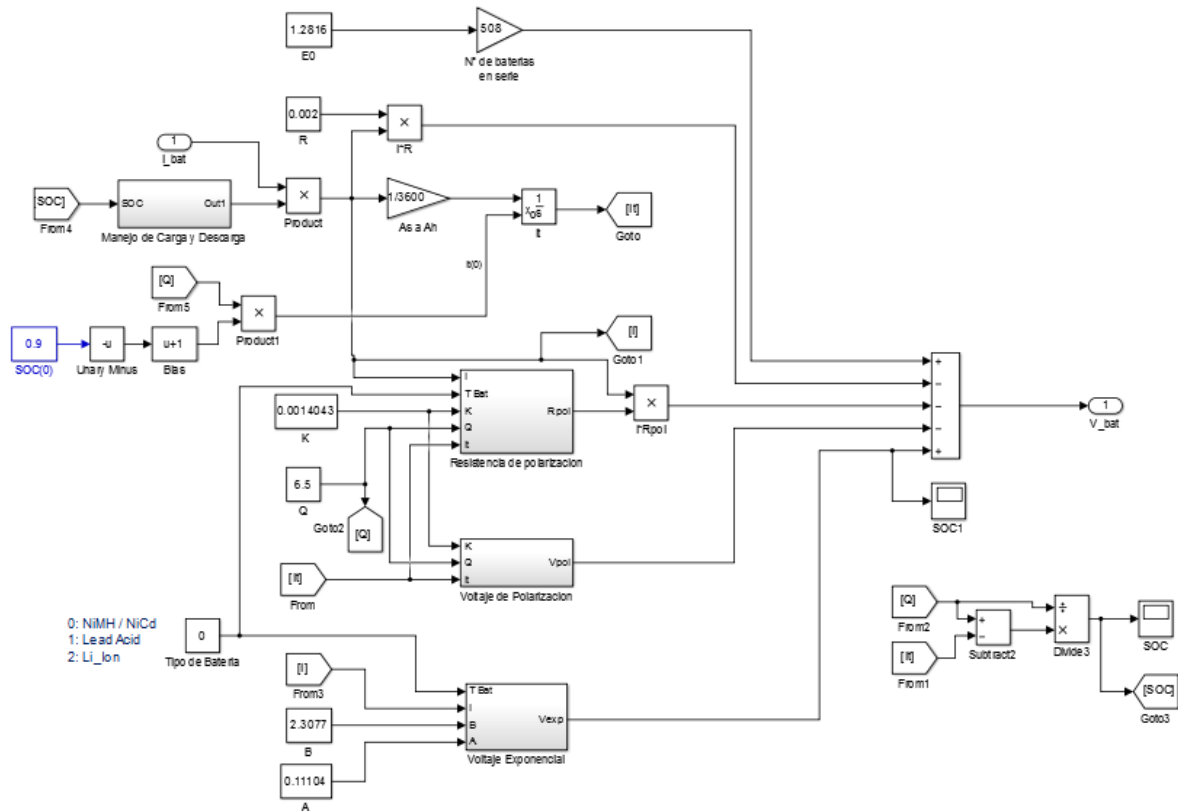


Fuente: El autor

Bloque Subsistema: Baterías

Para la modelación de la otra fuente de potencia secundaria se creó el bloque baterías, donde se puede modelar el comportamiento de los cuatro tipos de baterías mencionados en la sección 1.5, donde también se muestra las ecuaciones manejadas para tal fin. De acuerdo a los parámetros establecidos en la interfaz y el tipo de batería escogido el programa modifica la ecuación requerida, para el cálculo del voltaje y el estado de carga (SOC). Internamente se puede establecer el rango de operación de la batería de acuerdo a valores límites del SOC, con el fin de evitar en un modelo real una sobrecarga o descarga completa de las baterías, modelado en el sub-bloque “*Manejo de Carga y Descarga*”.

Figura 80. Subsistema para la modelación de las Baterías



Fuente: El Autor

Bloque Subsistema: Unidad de Control

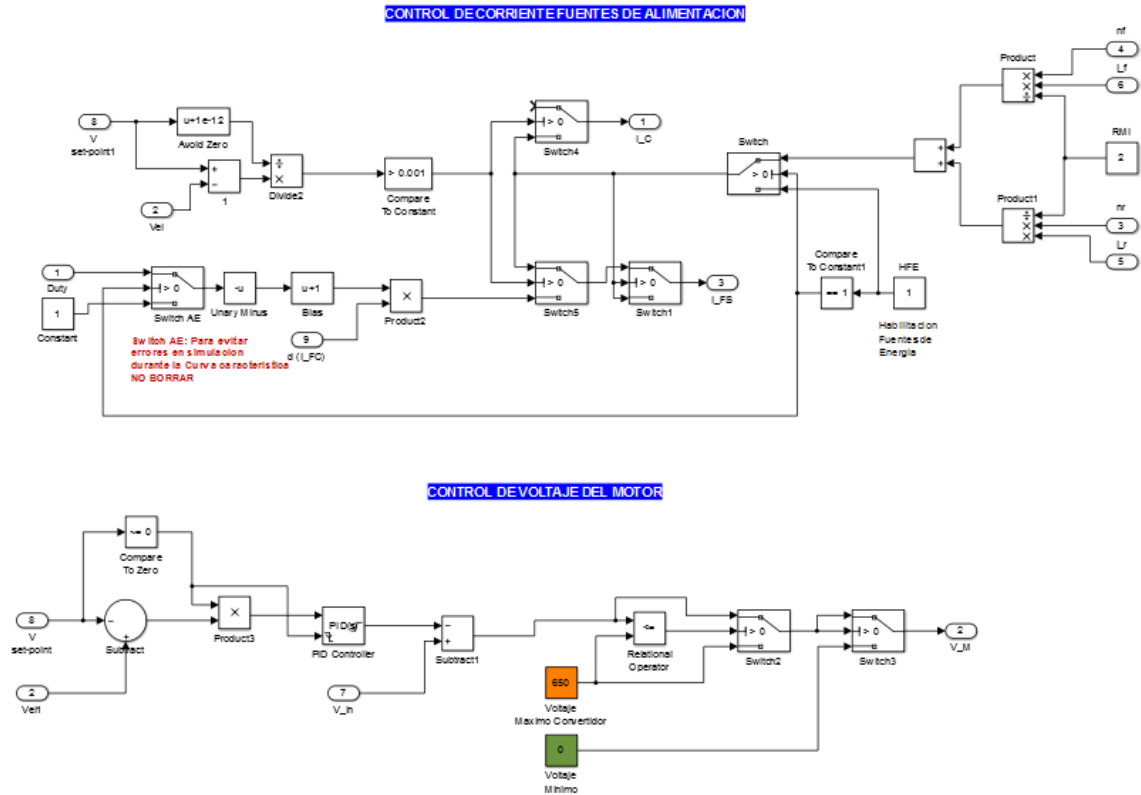
Actualmente todo vehículo tiene integrado una computadora que maneja y registra varios datos de operación del vehículo para aumentar su desempeño, de igual manera el programa se diseñó un sistema de control que emula el comportamiento de una unidad de control básica, que es la responsable de dos funciones:

- Selecciona la fuente de potencia que suministra la energía al motor de acuerdo al régimen de operación del vehículo (aceleración, desaceleración y velocidad constante), además controla el flujo de corriente, cuando el motor funciona como generador, enviando la corriente generada únicamente a la fuente secundaria y no a la celda de combustible.
- Ajusta el valor del ciclo de trabajo (Duty) del convertidor de voltaje, de acuerdo a los valores de requerimiento de voltaje del motor durante todo el tiempo de la simulación, de esta forma reduce el consumo de corriente cuando no la

demanda de potencia es baja, permitiendo un mejor rendimiento del combustible de hidrógeno en la celda.

- Varía el Voltaje que se le suministra al motor, mediante un control PID, con el propósito de controlar la velocidad de operación a la cual deseamos analizar.

Figura 81. Subsistema para el Modelamiento de la Unidad de Control



Fuente: El Autor

Modelo de Simulink: Sección Celdas de Combustible

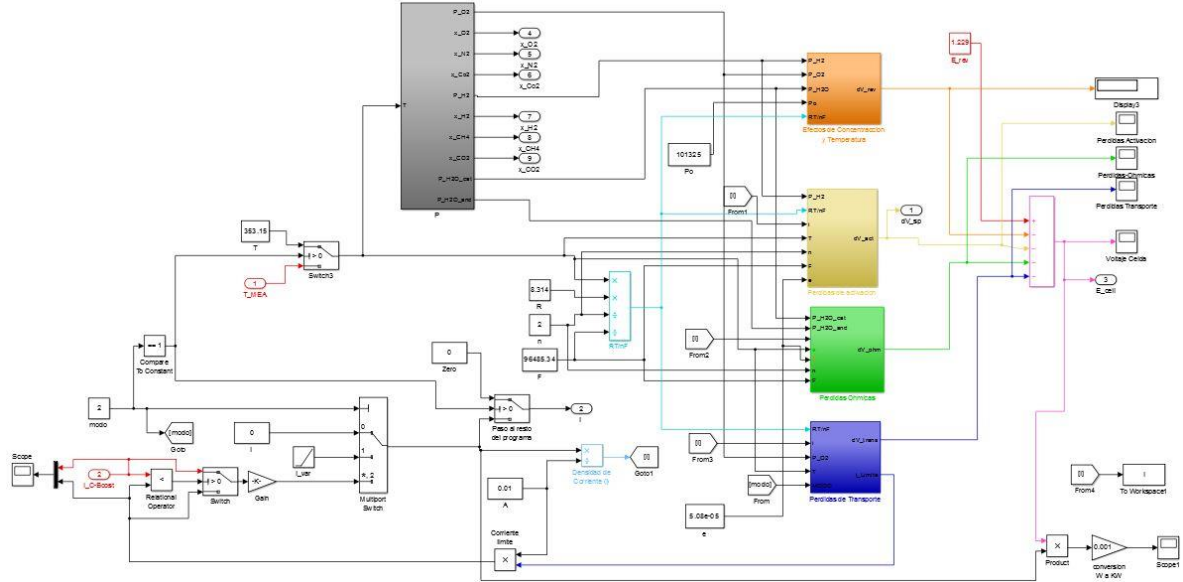
Para la modelación de las operaciones de la simulación en esta sección se creó en el mismo archivo de simulink un bloque de subsistema nombrado como "STACK FUEL CELL", en el cual se diseñó otros cuatro subsistemas que trabajan de manera conjunta para modelar el comportamiento completo de la celda de combustible, cabe resaltar que este representa el sistema más complejo que tiene el programa. Los modelos desarrollados tienen el propósito de modelar respetivamente:

- ✓ El cálculo de voltaje producido, con el manejo de pérdidas
- ✓ Balance de Masas

- ✓ Balance de Energías
- ✓ Cálculo de Transferencia de Calor

El diagrama de simulink completo creado para el cálculo del voltaje de la celda de combustible con sus respectivas pérdidas es el siguiente:

Figura 82. Diagrama simulink para el cálculo del voltaje



Fuente: El autor

En este diagrama de bloques se encuentra la ecuación completa obtenida al final de la sección 2.2.3.1, donde se puede apreciar el manejo de las pérdidas de activación, óhmicas y de transporte.

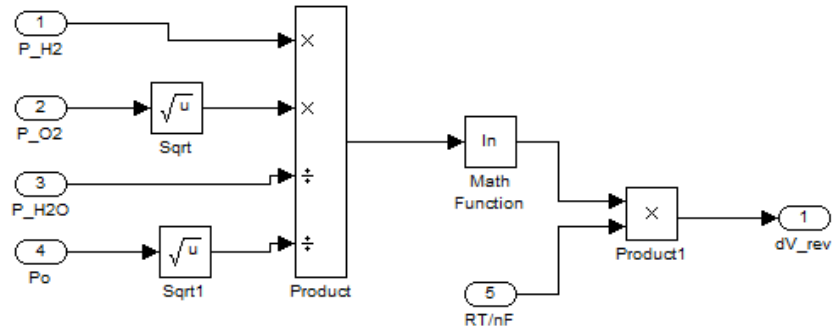
Cada uno de los subsistemas se encarga de calcular los valores de voltajes determinados, uno calcula el voltaje de suministrado por la celda y los otros tres los voltajes de pérdidas, además de un quinto que calcula las fracciones molares de los gases entrantes de acuerdo a la presión y temperatura, para así graficar cada una de las curvas correspondientes.

Bloque Subsistema: Efectos de Concentración y Temperatura

En este subsistema se calcula el voltaje de la celda de combustible asociado con las presiones y temperaturas de los gases reactantes, el cual aún no presenta pérdidas y toma un valor constante por que no depende de la corriente demandada,

pero su valor es inferior al de la celda en condiciones de temperatura y presión estándar de 1.23 V.

Figura 83. Diagrama de efectos por concentración y temperatura

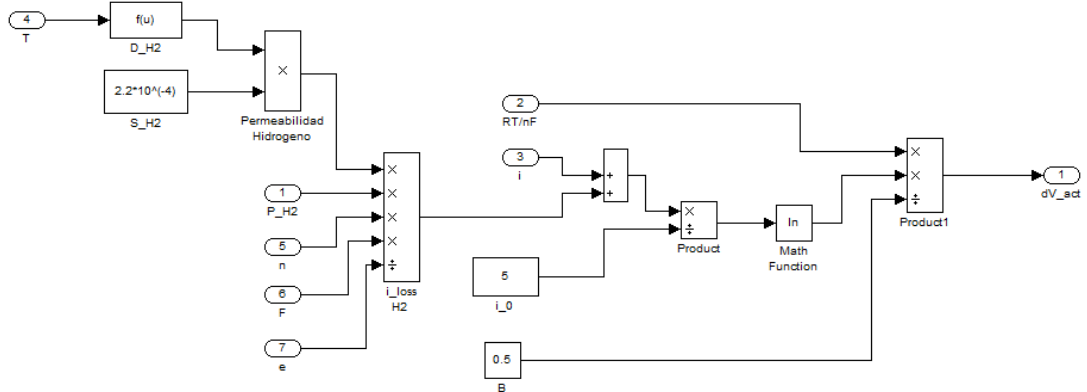


Fuente: El autor

Bloque Subsistema: Pérdidas de Activación

En este bloque se modela las pérdidas que se derivan por el flujo de corriente que atraviesa la membrana de la celda debido al efecto crossover, al conectarla a la carga. Ver Sección 2.2.1.

Figura 84. Diagrama de pérdidas de activación

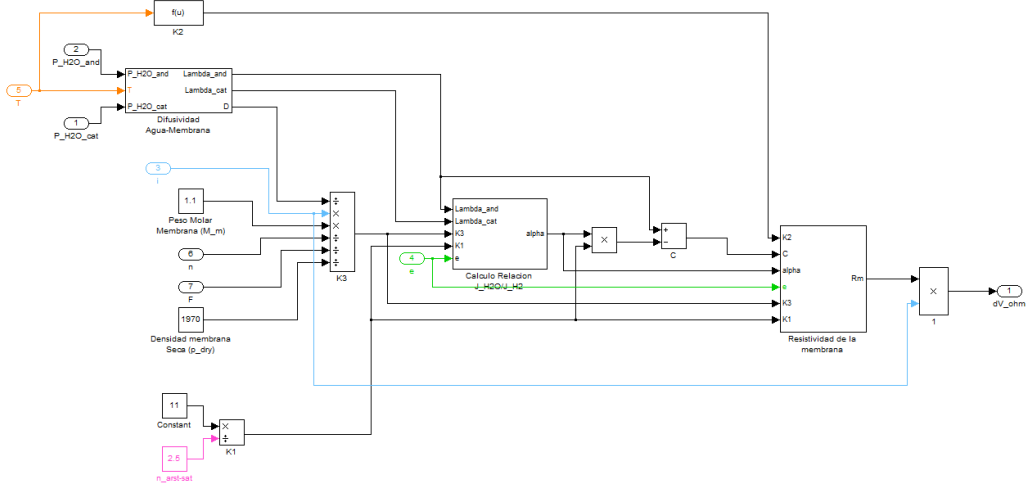


Fuente: el autor

Bloque Subsistema: Pérdidas Óhmicas

Las pérdidas óhmicas, vistas en la sección 2.2.2, se producen por la resistencia iónica interna del material que restringe el paso de los iones por la membrana.

Figura 85. Diagrama de pérdidas óhmicas

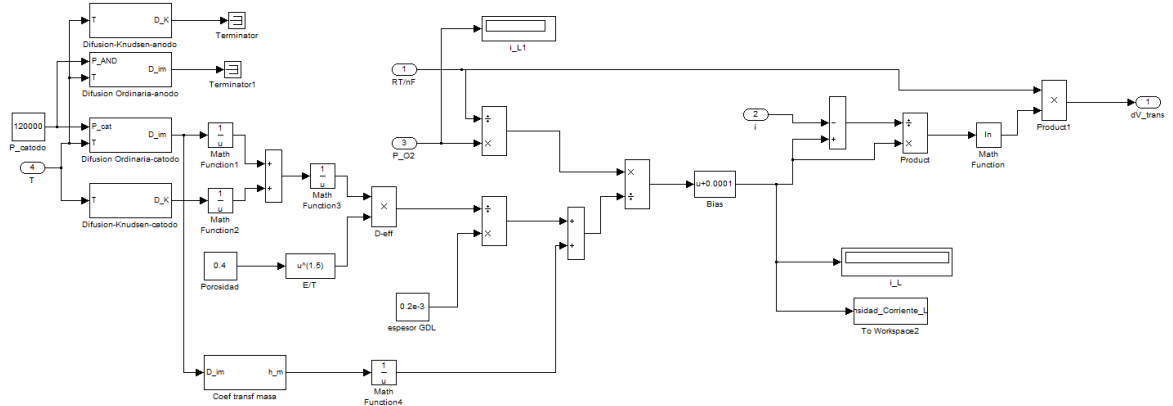


Fuente: El autor

Bloque Subsistema: Pérdidas de Transporte

Como se recordara en la sección 2.2.3, Estas pérdidas son producidas debido a que la membrana no es completamente impermeable al paso de los gases, los cuales pueden pasar de un lado y reaccionar con el otro gas sin liberar su energía en las placas colectoras. El diagrama que modela este fenómeno se ve a continuación.

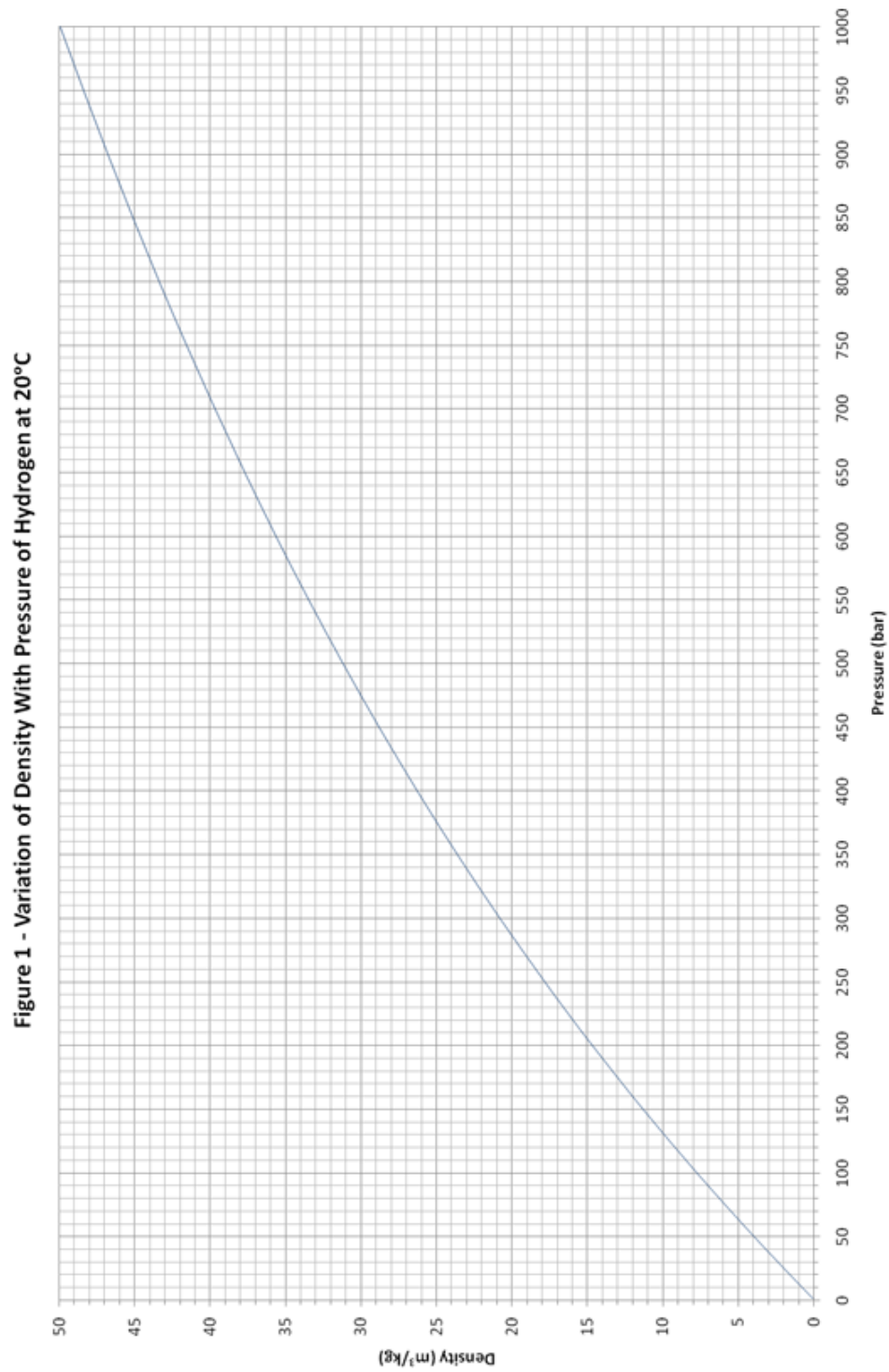
Figura 86. Diagrama de pérdidas de transporte



Fuente: El autor

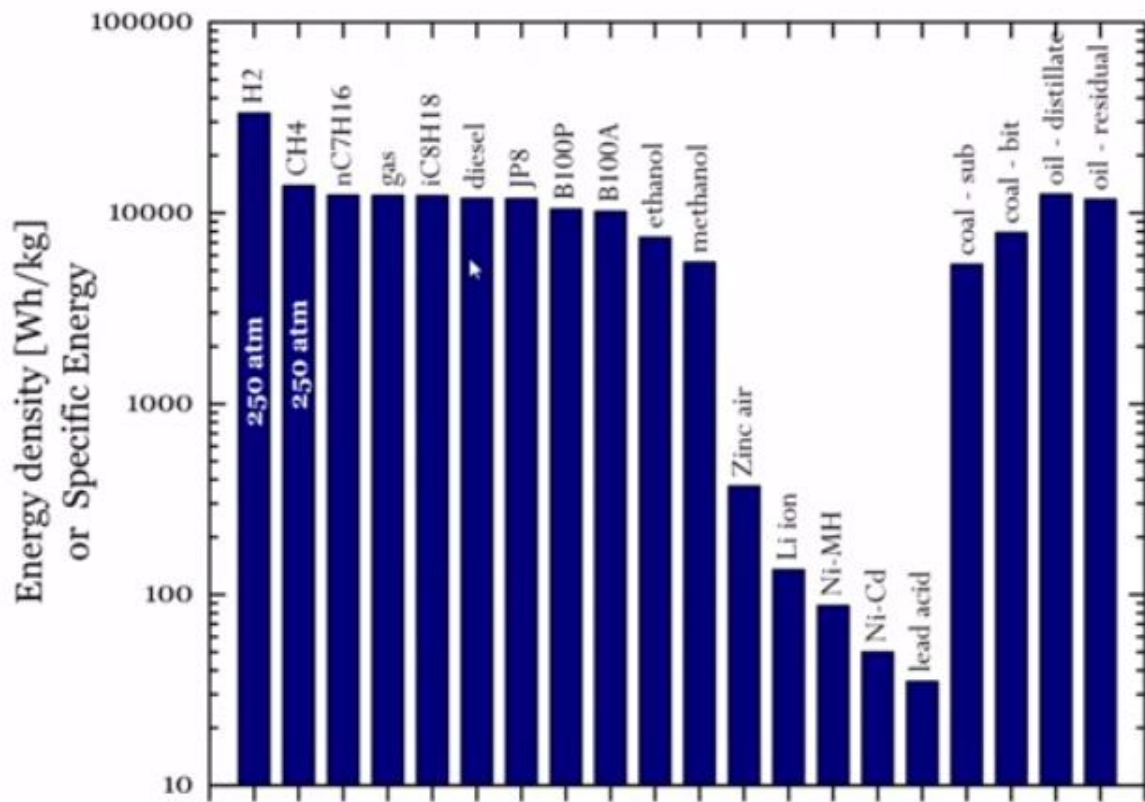
ANEXO H. PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO

Figura 87. Variación de la Densidad del Hidrógeno con la Presión a 20°C



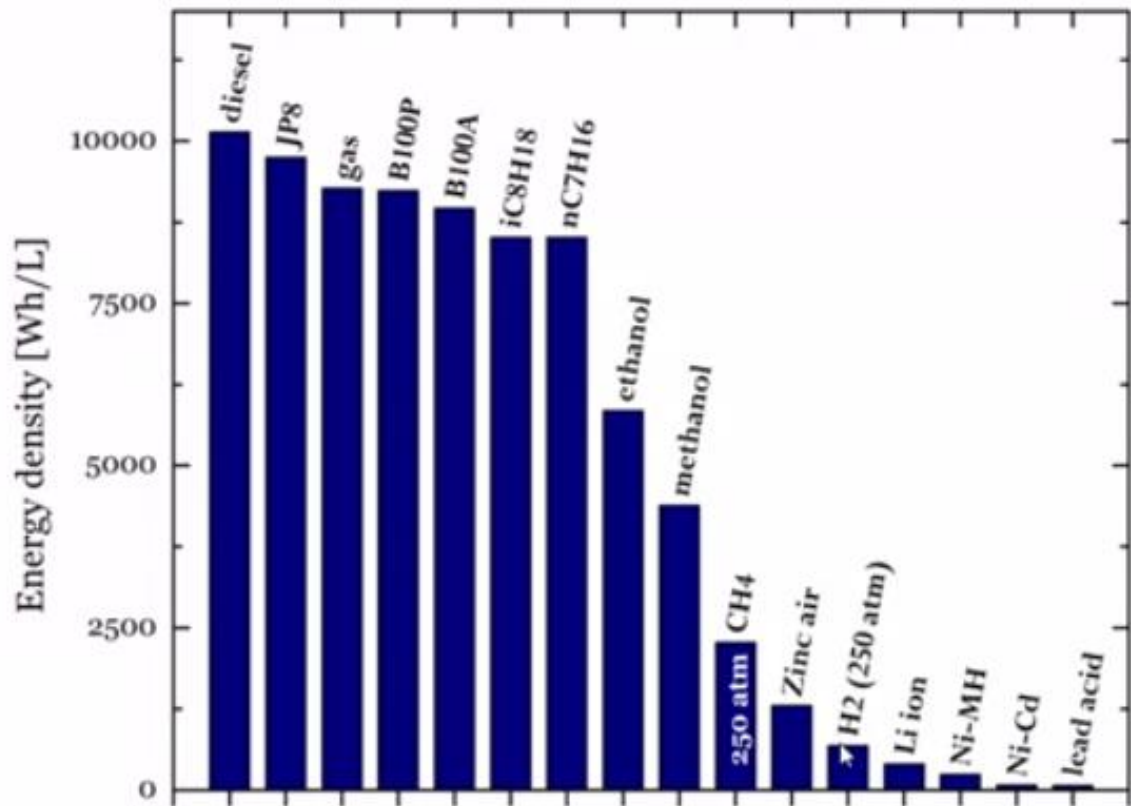
Fuente: <http://www.40fires.org/Wiki.jsp?page=Density%20of%20Hydrogen>

Figura 88. Comparación de la Densidad de Energía por Unidad de Masa del Hidrógeno con otras Fuentes de Energía



Fuente: WOOLDRIDGE, Margaret and THURNAU, Arthur F. Introduction to Thermodynamics: Moving Energy From Here To There. Unit 08.05 Setting the Bar for Performance. Michigan University, Julio 2015.

Figura 89. Comparación de la Densidad de Energía del Hidrógeno por unidad de Volumen con Otras Fuentes de Energía



Fuente: WOOLDRIDGE, Margaret and THURNAU, Arthur F. Introduction to Thermodynamics: Moving Energy From Here To There. Unit 08.05 Setting the Bar for Performance. Michigan University, Julio 2015.

Tabla 19. Propiedades Termodinámicas de Gas Ideal del Hidrógeno (H₂)

T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol-K	T K	\bar{h} kJ/kmol	\bar{u} kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol-K
0	0	0	0	1440	42,808	30,835	177.410
260	7,370	5,209	126.636	1480	44,091	31,786	178.291
270	7,657	5,412	127.719	1520	45,384	32,746	179.153
280	7,945	5,617	128.765	1560	46,683	33,713	179.995
290	8,233	5,822	129.775	1600	47,990	34,687	180.820
298	8,468	5,989	130.574	1640	49,303	35,668	181.632
300	8,522	6,027	130.754	1680	50,622	36,654	182.428
320	9,100	6,440	132.621	1720	51,947	37,646	183.208
340	9,680	6,853	134.378	1760	53,279	38,645	183.973
360	10,262	7,268	136.039	1800	54,618	39,652	184.724
380	10,843	7,684	137.612	1840	55,962	40,663	185.463
400	11,426	8,100	139.106	1880	57,311	41,680	186.190
420	12,010	8,518	140.529	1920	58,668	42,705	186.904
440	12,594	8,936	141.888	1960	60,031	43,735	187.607
460	13,179	9,355	143.187	2000	61,400	44,771	188.297
480	13,764	9,773	144.432	2050	63,119	46,074	189.148
500	14,350	10,193	145.628	2100	64,847	47,386	189.979
520	14,935	10,611	146.775	2150	66,584	48,708	190.796
560	16,107	11,451	148.945	2200	68,328	50,037	191.598
600	17,280	12,291	150.968	2250	70,080	51,373	192.385
640	18,453	13,133	152.863	2300	71,839	52,716	193.159
680	19,630	13,976	154.645	2350	73,608	54,069	193.921
720	20,807	14,821	156.328	2400	75,383	55,429	194.669
760	21,988	15,669	157.923	2450	77,168	56,798	195.403
800	23,171	16,520	159.440	2500	78,960	58,175	196.125
840	24,359	17,375	160.891	2550	80,755	59,554	196.837
880	25,551	18,235	162.277	2600	82,558	60,941	197.539
920	26,747	19,098	163.607	2650	84,368	62,335	198.229
960	27,948	19,966	164.884	2700	86,186	63,737	198.907
1000	29,154	20,839	166.114	2750	88,008	65,144	199.575
1040	30,364	21,717	167.300	2800	89,838	66,558	200.234
1080	31,580	22,601	168.449	2850	91,671	67,976	200.885
1120	32,802	23,490	169.560	2900	93,512	69,401	201.527
1160	34,028	24,384	170.636	2950	95,358	70,831	202.157
1200	35,262	25,284	171.682	3000	97,211	72,268	202.778
1240	36,502	26,192	172.698	3050	99,065	73,707	203.391
1280	37,749	27,106	173.687	3100	100,926	75,152	203.995
1320	39,002	28,027	174.652	3150	102,793	76,604	204.592
1360	40,263	28,955	175.593	3200	104,667	78,061	205.181
1400	41,530	29,889	176.510	3250	106,545	79,523	205.765

Fuente: CENGEL, Yonus A. y BOLES, Michael A. Termodinámica, 6^{ta} Edición. Apéndice 1, Tabla A-22. McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A.

ANEXO I. TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

Los dos problemas técnicos fundamentales en una celda de combustible son:

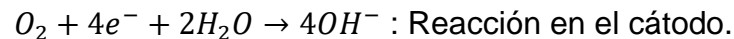
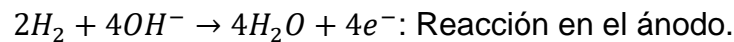
- La velocidad de reacción es lenta, dando lugar a baja corriente y energía.
- El hidrógeno no es un combustible fácilmente disponible.

Para resolver estos y otros problemas existen muchos diferentes tipos de celdas de combustibles que se distinguen generalmente por el electrolito que se utiliza, aunque también siempre existen otras diferencias importantes. La mayoría de estas celdas de combustible tienen reacciones en los electrodos algo diferentes que las dadas anteriormente. [14]

AFC (Alkaline Fuel Cells)

Esta tecnología fue utilizada en los programas Gemini y Apolo de la NASA en los años 60 y también en transbordadores espaciales, donde actualmente sigue utilizándose. El electrolito consiste en una solución de un 35% - 40% en peso de hidróxido de potasio (KOH) en agua. Este puede a su vez encontrarse contenido en una matriz (aplicaciones espaciales) o bien en recirculación, actuando en este caso como refrigerante y transportando el agua fuera del sistema en el caso de funcionamiento inverso. Los electrodos están separados por una membrana de amianto en ambos casos, estando éste absorbido en las paredes en el caso de aplicaciones estáticas. [22]

El hidróxido de potasio es alcalino. Los iones transportados por el electrolito alcalino son iones de hidróxidos (OH^-). Las reacciones químicas medias son: [12]

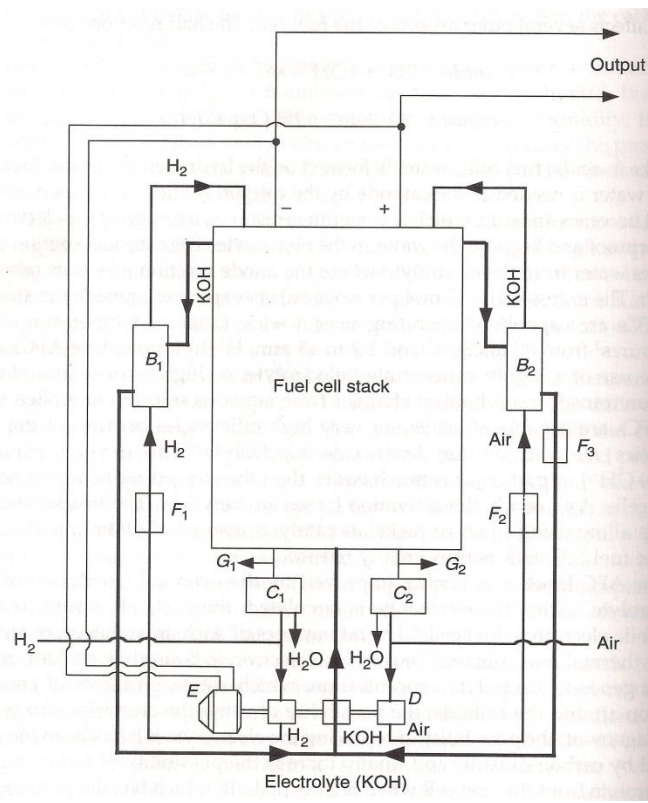


A diferencia de las celdas de combustible en ácido, el agua es formada en el electrodo del hidrógeno. Además, se necesita agua en el cátodo para la reducción del oxígeno. La reacción del cátodo consume el agua desde el electrolito, donde la reacción del ánodo rechaza el agua producida. La gestión del agua se convierte en un problema, que a veces se resuelve al hacer los electrodos a prueba de agua y manteniendo el agua en el electrolito.

Las AFC son capaces de operar sobre una amplia gama de temperaturas (80 a 230°C) y presiones (2.2 a 45 atm). Las AFC son capaces de lograr muy altas

eficiencias debido a la rápida cinética que permite el electrolito hidróxido. La reacción del oxígeno ($O_2 \rightarrow OH^-$) en particulares mucho más fácil que la reducción del oxígeno en celdas de combustible acidas, como resultado las pérdidas de activación son muy bajas. La rápida cinética en las AFC se logran usando plata o níquel como catalizador en lugar de platino. En consecuencia el costo de las celdas de combustible se reduce considerablemente. La gran desventaja de estas celdas es que no se puede utilizar el aire atmosférico como portador de oxígeno, dado que contiene dióxido de carbono y este envenena el electrolito alcalino.

Figura 90. Circulación del electrolito y suministro de hidrógeno y aire en una AFC:
 B1, B2: Intercambiadores de calor; C1, C2: Condensadores; E: Motor; F1, F2, F3: Controles; G1, G2: Salidas.



Fuente: [12]

La cinética de las AFC se mejora aún más por la eventual circulación del electrolito, cuando el electrolito es circulado, la celda de combustible es conocida como celda de combustible de electrolito móvil. Las ventajas de este tipo de arquitectura son: [12]

- Un fácil manejo térmico, porque el electrolito es usado como refrigerante

- Una concentración más homogénea del electrolito, resuelve problemas de concentración alrededor del cátodo
- La posibilidad de utilizar el electrolito para la gestión del agua
- La posibilidad de sustituir el electrolito si ha sido demasiado contaminado por dióxido de carbono
- Existe la posibilidad de retirar el electrolito de la celda cuando está apagada, teniendo la posibilidad de prolongar considerablemente la vida útil del stack.

Sin embargo el uso de una circulación del electrolito, plantea algunos problemas difíciles: [12]

- El problema más grande es el riesgo de incremento de fuga del hidróxido de potasio, este es altamente corrosivo y tiene una tendencia natural a fugarse, incluso a través de los sellos más estrechos.
- Además es complicada la construcción de la bomba de circulación, del intercambiador de calor y el eventual evaporador.
- El riesgo de corto circuito electrolítico interno entre dos celdas si el electrolito es circulado violentamente o si las celdas no son lo suficientemente aisladas.

PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cells)

Las PEMFC o celdas de combustible de membrana de intercambio de protón o también llamada celdas de combustible de polímero sólido, usan membranas de polímero sólido como electrolito. El polímero de membrana es ácido perfluorosulfónico, que es también llamado como Nafión. La membrana de polímero es ácida, por lo tanto los iones transportados son iones de hidrógeno (H⁺) o protones. [12]

No resulta la más eficiente de las pilas de combustible, pero indudablemente aporta una ventaja frente a otras tecnologías: contiene un electrolito sólido y opera a bajas temperaturas. También confiere una alta densidad de potencia al sistema, lo cual las hace ideales para aplicaciones de automoción, donde el espacio y el peso son fuertes condicionantes. Y no les afecta el CO₂, que es la gran desventaja de las AFC. [22]

Las celdas PEM pueden ofrecer una densidad de poder de 0.35 a 0.6 W/cm², la temperatura de operación de estas celdas está entre los 60 a 100 °C. Esto las dota de un arranque rápido y de un enfriamiento también rápido, a la vez que una

respuesta adecuada ante los cambios de demanda de potencia. Todo esto, junto con el estado sólido del electrolito, las hace sumamente adecuadas para su uso en automóviles.

El catalizador es una cuestión crítica en la PEMFC. En un principio para hacer funcionar apropiadamente una celda se requería grandes cantidades de platino como catalizador, pero debido a los grandes avances de la tecnología la cantidad de este material se redujo de 28 a 0.2 mg/cm² de electrodo o menos. Debido a las temperaturas de operación de las celdas de combustible y la naturaleza ácida del electrolito, son necesarios los metales nobles para la capa del catalizador. El cátodo es el electrodo más crítico, porque la reducción catalítica del oxígeno es más difícil que la oxidación catalítica del hidrógeno. [12]

Los aspectos importantes del diseño de las celdas de combustible pueden variar en gran medida dependiendo de la aplicación y las perspectivas del diseñador. La más importante de éstas son las siguientes: [14]

- Gestión del agua.
- El método de enfriamiento de la celda de combustible.
- El método de conexión de celdas en serie.
- La presión a la que debe operar la celda de combustible.
- Los reactivos utilizados es también una cuestión importante (el hidrógeno puro no es el único combustible posible, y el oxígeno se puede utilizar en vez del aire).

En cuanto al manejo del agua en las PEMFC, para operar apropiadamente la membrana de polímero necesita mantenerse húmeda. En efecto, la conducción de los iones de la membrana de polímero requiere humidificación. Si el polímero de la membrana es demasiado seco no habrá suficientes iones de ácido para cargar los protones. Si es demasiado húmedo, los poros de la capa de difusión podrían ser bloqueados y los gases reactantes no podrían ser capaces de alcanzar el catalizador. [12]

La mayor cuestión crítica in una PEMFC es el envenenamiento. El catalizador de platino es extremadamente activo y permite así un gran desempeño. La consecuencia de esta gran actividad es una mayor afinidad por el dióxido de carbono y productos de azufre. Los venenos se unen fuertemente al catalizador e impiden que el hidrógeno o el oxígeno entren en contacto con él. Las reacciones

del electrodo no pueden tener lugar los sitios envenenados y el desempeño de la celda de combustible disminuye.

Las PEMFC no son 100% eficientes, parte de la energía producida por la reacción química del hidrógeno con el oxígeno se convierte en calor, este calor debe ser removido de la celda de combustible y eso depende del tamaño de esta, con celdas de combustible por debajo de 100W, es posible utilizar puramente aire por convección para enfriar la celda y proporcionar suficiente flujo de aire para evaporar el agua, sin recurrir a ningún ventilador. Esto se hace con una construcción de celda abierta con bastante espacio de celda de entre 5 y 10 mm por celda. [14]

Sin embargo, para una celda de combustible más compacta se puede usar pequeños ventiladores para soplar el aire de refrigeración a través del reactante y la celda, aunque una gran parte del calor todavía se pierde por convección natural y radiación. No obstante, cuando la potencia de las células de combustible se incrementa, y una menor proporción del calor se pierde por convección y radiación alrededor de las superficies exteriores de la celda, a partir de ahí, comienzan a surgir los problemas y se requeriría otro sistema de refrigeración más complejo.

Aunque las pequeñas celdas de combustible PEM son operadas a presión de aire normal, las celdas más grandes, de 10 kW o más, a veces son operadas a presiones más altas. Las ventajas y desventajas de operar a una presión más alta son complejos, y los argumentos no son del todo claros. El propósito de aumentar la presión en una celda de combustible es el de aumentar la potencia específica, para obtener más energía. La energía utilizada para accionar el compresor es en gran medida o totalmente usando el preciado poder eléctrico producido por la celda de combustible.

Por lo tanto al momento de diseñar el sistema de compresión de la celda de combustible se debe hacer un balance entre las ventajas y desventajas de aumentar o no la presión de los gases.

Las PEMFC tienen algunas ventajas definitivas a su favor para aplicaciones en vehículos eléctricos y los híbridos eléctricos: [12]

1. Su baja temperatura de operación y por lo tanto su rápido arranque son requeridos para un vehículo eléctrico e híbrido eléctrico.
2. La densidad de potencia es la más alta entre todos los tipos disponibles de celdas de combustible. Cuanto mayor sea la densidad de potencia, menor será

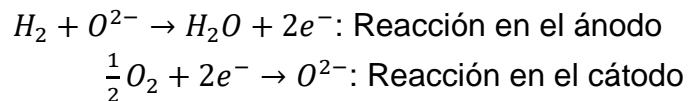
el tamaño de la celda de combustible que necesita ser instalada para la demanda de potencia requerida.

3. Su electrolito sólido no cambia, no se mueve o se evapora desde la celda.
4. Ya que el único líquido en la celda es agua, la posibilidad de corrosión es esencialmente delimitada.

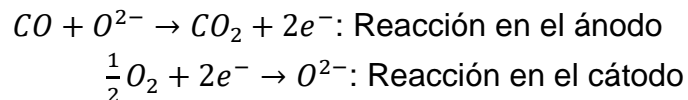
Sin embargo, también tiene algunas desventajas, tales como lo costoso del metal noble necesitado, el costo de la membrana y el fácil envenenamiento de la capa catalizadora y la membrana.

SOFC (Solid Oxide Fuel Cells)

Las celdas de combustible de óxido sólido (SOFC), pueden ser alimentadas por varios tipos de combustibles, entre ellos está el hidrógeno generalmente obtenido por reformado, así como combustibles fósiles como el gas natural [23]. Las SOFC conducen iones en una membrana cerámica a altas temperaturas (1000 a 1200°C). Usualmente el cerámico es un Zirconio estabilizado con itrio (YSZ) como el óxido de Zirconio, dopado de itrio, que puede conducir iones de oxígeno (O^{2-}), pero otros cerámicos conducen iones de hidrógeno. El mecanismo de conducción es similar a lo que se observa en los semiconductores, a menudo llamados dispositivos de estado sólido, de ahí el nombre de estas celdas. Las reacciones medias son: [12]



Aquí otra vez el agua es producida en el electrodo del combustible. Algo a considerar es que las celdas SOFC no son afectadas por envenenamiento del electrolito por monóxido de carbono, además el CO se puede utilizar como combustible, es tan eficiente como el hidrógeno. Aquí vemos las respectivas reacciones para el CO son:



El principio de operación es muy similar para todas las celdas de combustible de óxidos sólidos. Los iones O^{2-} migran del cátodo al ánodo a través del electrolito donde se recombinan con el hidrógeno para formar agua (o en menor medida con el CO para formar CO_2). Los electrones liberados en el proceso pasan a través de

un circuito exterior al cátodo, donde reaccionan con el oxígeno para formar iones O^{2-} . [22]

La más grande ventaja de las SOFC es su electrolítico estático, aquí no hay partes móviles, excepto quizás en los sistemas auxiliares, eliminando así los problemas de los electrolitos líquidos. Las desventajas de estas celdas son mayormente asociadas con sus altas temperaturas de operación (seguridad y economía). Otros problemas surgen porque tanto el electrolito cerámico como sus electrodos son frágiles lo cual crea inconvenientes en aplicaciones vehiculares debido a las vibraciones que se producirían en los vehículos.

Las altas temperaturas permiten un reformado interno y también permiten la utilización de combustibles con relativamente grandes niveles de impurezas, tales como gasóleo o gas de carbón (aunque estos necesitarán un pre-reformado). Las SOFC, reduce la necesidad de reformado con vapor previa a su introducción del combustible. Por ello, los contenidos en azufre permitidos son muy superiores a los de las otras tecnologías, aunque se necesita profundizar en otros temas tales como los efectos producidos por metales pesados.

La temperatura de funcionamiento de una SOFC basado en YSZ es generalmente alta ($> 900\text{ }^{\circ}\text{C}$) con el fin de alcanzar el más alto rendimiento de conducción aniónico. Esto presenta ventajas significativas (estabilidad química con CO y CO_2 , alimentación directa de CH_4 , etc.), pero también dificultades graves (fallas de los componentes termo-mecánicos, vitrificación de los sellos, inestabilidades químicas durante el envejecimiento y esfuerzos cíclicos). Estas dificultades pueden reducirse significativamente si la temperatura de funcionamiento se reduce entre $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, pero entonces la pérdida de conductividad asociada con el descenso de la temperatura debe ser compensado ya sea cambiando el material de electrolito (es decir, el cambio a Cerio) o disminuyendo drásticamente el espesor del electrolito. [33]

Las altas temperaturas alcanzadas por las SOFC son las más altas alcanzadas por esta innovadora tecnología. Sin embargo, a estas temperaturas los materiales deben ser cuidadosamente estudiados, impidiendo el uso de materiales convencionales como el acero inoxidable en la celda y en los equipos auxiliares. Esto ha provocado un resurgimiento del interés en pilas que trabajen a temperaturas por debajo de los 450°C , lo cual puede mejorar los costes de la celda y de la planta en sí misma, además de reducir los problemas estructurales, aumentar el tiempo estimado de vida y suponer la captación de nuevos mercados.

En este caso, se podría utilizar el acero inoxidable para construir placas bipolares que unieran los electrodos a temperaturas inferiores a los 750°C, en lugar de los costosos materiales cerámicos actualmente demandados. [22]

Basándonos en las propiedades de los electrodos y en el comportamiento del material cerámico componente del electrolito, se distinguen tres regímenes de operación en función de la temperatura de operación:

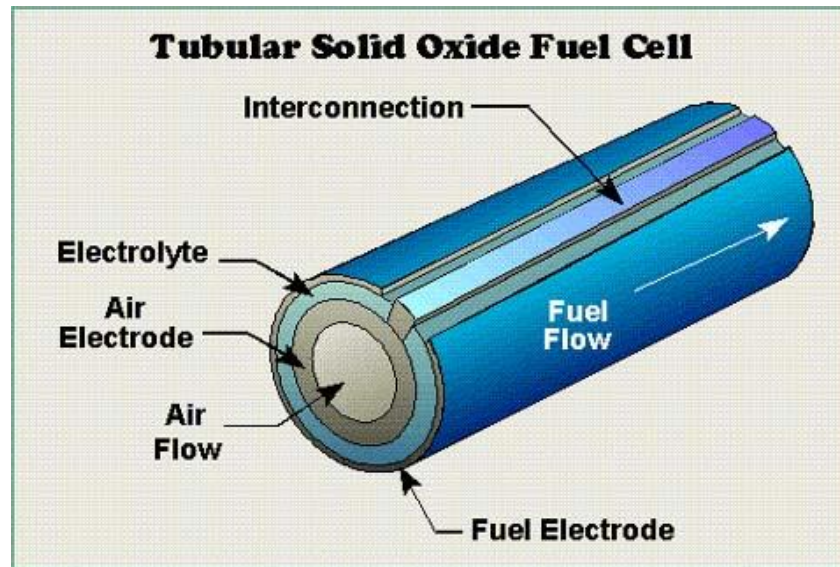
- Alta temperatura (>900°C),
- Temperatura intermedia (700-900 °C)
- Baja temperatura (450- 700°C).

Estas temperaturas de operación evidentemente condicionarán aspectos tales como el tipo de reformado, la operación conjunta con ciclos turbinados o el tipo de equipo requerido.

Sus eficiencias no resultan tan elevadas, debido a las caídas de tensión a lo largo de la celda. Por ello, se les suponen unos rendimientos del 50-55%, aunque la adición de una turbina podría mejorar este término. En efecto, la operación a altas temperaturas, provoca unas temperaturas muy altas de salida de los gases y este calor residual puede dirigirse hacia la mejora de eficiencia en los ciclos térmicos, dando lugar a altísimos rendimientos en el proceso. Se espera que estos rendimientos alcancen un 70% en pilas de combustible combinadas con turbinas de gas y alrededor de un 80% para la integración conjunta con ciclos combinados.

Las SOFC pueden ser de dos clases: plana o tubular. La tipo plana es un stack bipolar es similar a los otros dispositivos ya mencionados. La tecnología tubular tiene la gran ventaja de su facilidad de sellado y la reducción de las limitaciones de la cerámica, pero su mayor desventaja incluye la baja eficiencia y densidad de potencia. [12]

Figura 91. Celda de Combustible de Óxido Solido (SOFC) Tipo Tubular



Fuente: [12]

PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cells)

Las PAFC o celdas de combustible de ácido fosfórico se basan en un electrolito ácido como las PEM para conducir iones de hidrógeno. Las reacciones tanto en el cátodo como en el ánodo son las mismas que una celda de combustible tipo PEM. El ácido fosfórico (H_3PO_4) es un líquido viscoso que es contenida por capilaridad en la celda de combustible en una matriz porosa de carburo de silicio. [12]

El electrolito debe mantenerse mínimo a una temperatura por encima de los $42^{\circ}C$, que es su punto de congelación (su punto de ebullición es $250^{\circ}C$ [23]). Las PAFC suelen trabajar a temperaturas comprendidas entre los $180^{\circ}C$ a $210^{\circ}C$. Para temperaturas por encima de los $190^{\circ}C$ resiste corrientes de entrada de combustible con contenidos de hasta un 1% en CO, contenidos superiores pueden provocar el envenenamiento del catalizador. [22]

Al utilizar un electrolito ácido, le confiere una tolerancia moderada ante la presencia de CO_2 en la corriente de entrada de gas con niveles del 20%. A pesar de ser un componente ácido (puede ocasionar corrosión en la celda), es más fácil de manejar que muchos de los ácidos inorgánicos tales como el sulfúrico o el clorhídrico, y demuestra buena estabilidad térmica, química y mecánica, manteniendo estas propiedades por encima de los $150^{\circ}C$. Como desventaja asociada, y al igual que todos los electrolitos ácidos, requiere un catalizador para mejorar las reacciones cinéticas del proceso electroquímico, siendo adecuado en

este caso el empleo de metales nobles, por lo general platino lo que hace a estas celdas costosas.

La eficiencia de estas celdas suele rondar el 40%, sin embargo debido a la temperatura de operación la cual permite la obtención de vapor, la eficiencia puede alcanzar el 80% o incluso más, si es aprovechado este vapor producido. Con respecto a la operación de estas pilas a presión, el hecho de aumentar la presión incrementará su rendimiento debido al fortalecimiento de las reacciones que tienen lugar en el cátodo (mayores concentraciones de oxígeno). Sin embargo, al igual que en el caso anterior, esto provocará un incremento de la complejidad y también del costo.

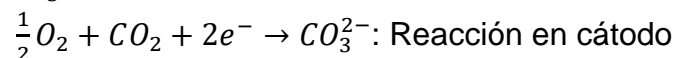
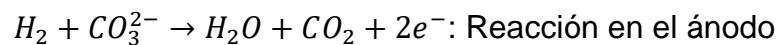
Las aplicaciones más típicas suelen pues destinarse al mercado de cogeneración donde tanto calor como potencia son requeridos hospitales, hoteles, bases militares o lugares de ocio, pero sea trabajado muy poco en aplicaciones en vehículos debido a sus problemas con la temperatura, el alto costo y peso.

Otra desventaja que se presenta por las altas temperaturas de operación es el consumo de energía asociado con el calentamiento del stack. Las ventajas de una PAFC son su uso de un electrolito barato, bajas temperaturas de operación, y razonable tiempo de arranque.

MCFC (Molten Carbonate Fuel Cells)

Las celdas de combustible de carbonatos fundidos (MCFC por sus siglas en inglés) se basan en una sal carbonatada fundida para conducir iones, usualmente consiste en una mezcla de carbonatos de metales alcalinos fundidos de litio-potasio o litio-sodio. El electrolito de carbonato se encuentra en forma de matriz. Consiste en una mezcla de polvos cerámicos y garantiza una estructura sólida, aunque no realiza ninguna función eléctrica o electroquímica en las reacciones que tienen lugar dentro de la celda. Los iones conducidos son iones carbonatados (CO_3^{2-}). El mecanismo de conducción de iones es la de una sal fundida como en la PAFC o en la AFC altamente concentrada.

Las reacciones en los electrodos son diferentes de otras celdas de combustible:
[12]



Las MCFC operan a altas temperaturas entre 500 a 800°C, pero a temperaturas entre 800 a 900°C se consigue su máxima eficiencia, pero en este punto es

resultaría inviable utilizar materiales convencionales de acero inoxidable, lo cual incrementaría el costo de los equipos hasta límites insospechados. Esta temperatura de operación es lo suficientemente alta como para permitir la transformación de combustibles ricos en hidrógeno directamente en el ánodo de la pila de combustible, sin necesidad de utilizar costosos catalizadores adicionales. Estos combustibles incluyen gas natural, gas de refinería, biogás procedente de la degradación biológica de residuos y otros combustibles gaseosos procedentes de la gasificación de la materia derivada del carbón [22]. Esta podría ser una gran ventaja en aplicaciones automotrices debido a la presente disponibilidad de combustibles de hidrocarburos, pero sería inseguro tenerlo en un automóvil debido a sus altas temperaturas de operación y a sus niveles de corrosión.

La mayor diferencia de otras celdas de combustible es la necesidad de provisionar dióxido de carbono al cátodo. No es necesario disponer de una fuente externa ya que puede ser reciclado del ánodo [12]. Pero esta recirculación de CO_2 del ánodo al cátodo debe ser ampliamente investigada con el fin de mejorar el proceso y optimizar el costo del mismo. Por otra parte, destacar que esta cuestión añade una complicación en relación a la tecnología propia de las pilas de óxidos sólidos [22].

Las MCFC poseen muchos problemas debido a la naturaleza de sus electrolitos y a las temperaturas de operación que requieren. El carbonato es alcalino y es extremadamente corrosivo especialmente a altas temperaturas. No solo esto es inseguro, existe también el problema de la corrosión de los electrodos. El consumo de combustible asociado con el calentamiento de la celda de combustible es también un problema, que empeora por las muy altas temperaturas de operación y el calor latente necesario para fundir el electrolito. Estos problemas pueden limitar las celdas de combustible de carbonato fundido para aplicaciones de energía estacionaria o continua como los buques y edificios donde se puede aprovechar tanto la electricidad como la energía térmica. [12]

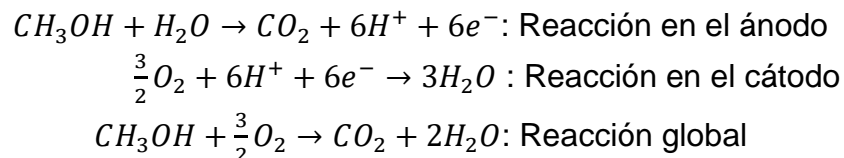
En relación a los electrodos, el cátodo está compuesto por óxido de níquel y el ánodo por una aleación de níquel-cromo, alcanzando un 10% de cromo en peso. La disolución del óxido de níquel en el cátodo durante la operación constituye un problema importante, pues este puede depositarse en el electrolito y en el ánodo y puede provocar un cortocircuito en la celda. Se están investigando materiales alternativos para el cátodo, los cuales podrían permitir la disminución de la temperatura de operación y con ello permitir solventar los problemas de corrosión y disolución del óxido de níquel. Los posibles materiales alternativos están constituidos por sales de litio dopados con elementos tales como cobalto, cobre o manganeso. El deslizamiento del ánodo puede constituir otro posible problema, que tiende a acontecer durante la construcción de la celda, debido a las fuerzas de compresión. En este caso también se están estudiando alternativas en los materiales con el fin de combatir estos efectos, y los ensayados hasta la fecha son las sales de litio y las aleaciones de níquel-aluminio. [22]

DMFC (Direct Methanol Fuel Cells)

Las celdas de combustible de metanol directo es una variante de las PEMFC, pero en lugar de usar hidrógeno puede usar directamente metanol (CH_3OH) como combustible en forma gaseosa o líquida, concretamente suele utilizar una mezcla de un 3% de metanol en agua como combustible y aire u oxígeno como oxidante. Su desarrollo permitiría utilizar este combustible directamente sin implementar el reformador en el sistema porque el metanol se oxida directamente en el ánodo sin ninguna modificación del hidrógeno. [22]

Existen algunos motivos definitivos para aplicar las DMFC en vehículos. Primero el metanol es un combustible líquido que puede ser almacenado fácilmente, distribuido y comercializado para aplicaciones vehiculares; por lo tanto la actual infraestructura de suministro de combustible puede ser usada sin demasiada inversión. Segundo, el metanol es el combustible orgánico más simple, que puede ser producido más económica y eficientemente en gran escala de combustibles fósiles relativamente abundante, conocidos como carbón y gas natural. Además, el metanol puede ser producido a partir de productos agrícolas como la caña de azúcar. [12]

Las reacciones químicas en una DMFC son:



En las DMFC, tanto el ánodo como el cátodo adoptan platino o aleaciones de platino como electrocatalizador. El electrolito puede ser ácido trifluorometano sulfónico o PEM. [12]

La DMFC es relativamente joven entre las celdas de combustibles antes mencionadas. En el estado actual de la tecnología de las DMFC, por lo general funciona entre 50 a 100°C. Comparadas con las celdas de combustible de hidrógeno directo las DMFC tienen baja densidad de potencia, respuesta de potencia lenta y baja eficiencia (cerca del 20% a 90°C, aunque se esperan alcanzar eficiencias del 40% en un breve plazo de tiempo [22]).

ZAFC (Zinc Air Fuel Cells)

Las ZAFC o Celdas de combustible Zinc-Aire, es un tipo especial de celda, dado que por el contrario de la mayoría de las celdas antes vistas, esta no utiliza hidrógeno como combustible. Para la generación de la energía utiliza la reacción de oxidación del zinc con oxígeno puro o con el oxígeno tomado del aire y utilizan un sistema de reabastecimiento de combustible, donde se hacen recircular las partículas de Zn, ZnO y el electrolito compuesto de agua y KOH como catalizador.

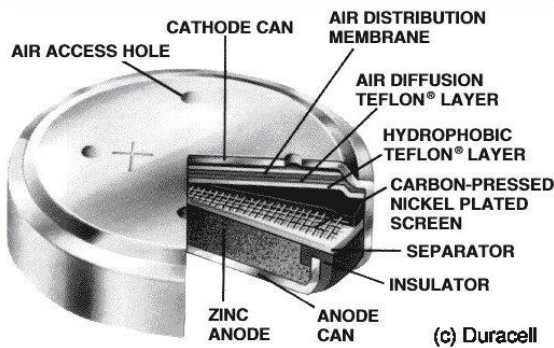
Esta tecnología de celdas también son conocidas como baterías de Zinc-Aire, que son dispositivos de almacenamiento de energía y que además pueden o no tener la propiedad de ser recargables. La diferencia entre las celdas o baterías de Zinc-Aire y las baterías convencionales es que estas celdas obtiene uno de estos principales reactantes (oxígeno) desde el aire exterior [31].

En general los dispositivos de celdas de Zinc-Aire, se pueden clasificar en cuatro tipos: [31]

- 1) Celdas Primarias: están destinados a un solo uso y luego se desechan después de su uso.
- 2) Celdas Secundarias: se devuelve a su estado original forzando corriente en la dirección opuesta a la descarga.
- 3) Celda recargable mecánicamente: el ánodo y el electrolito se reemplazan cuando se descarga de la célula, esta sustitución se continúa hasta que se termina la vida del cátodo.
- 4) Celdas de combustible Zn-Air (ZAFC): A diferencia de las anteriores tres celdas que tienen una cantidad limitada de combustible dentro del dispositivo, la celda de combustible de Zinc-Aire posee un suministro constante de combustible que recircula desde un tanque externo.

Las Celdas de combustible de Zinc-Aire tienen incluso más energía específica que una batería de Zn-Aire. [30]

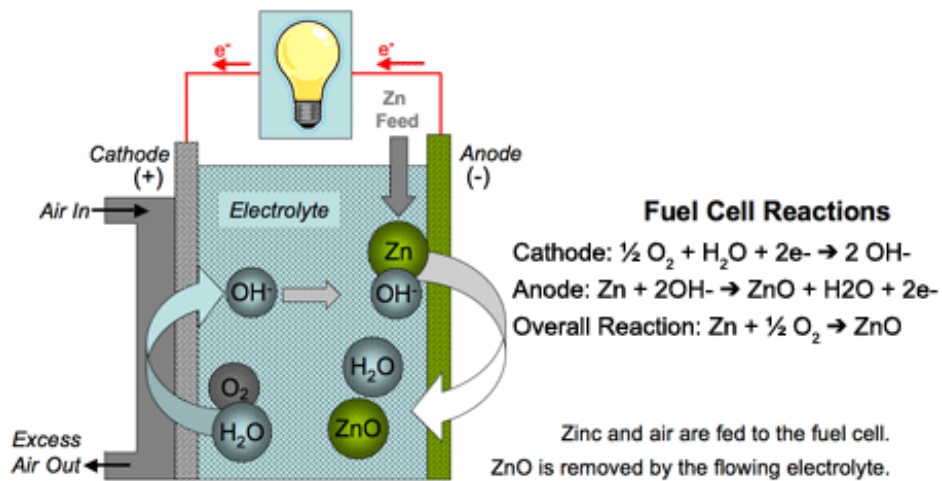
Figura 92. Baterías de Zinc-Aire.



Fuente:

<http://d3969370.u87.websitesource.net/images/zinc%20air%20battery%20cell%20construction.jpg>

Figura 93. Celda de Combustible Zinc-Aire

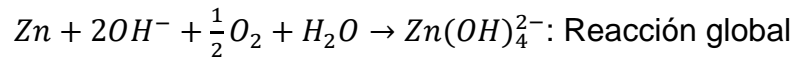
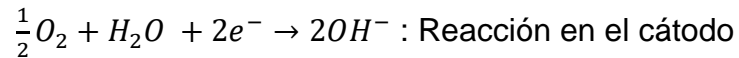
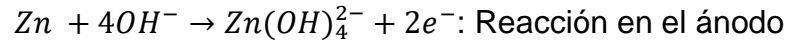


Fuente:

http://thefraserdomain.typepad.com/photos/uncategorized/2007/05/01/pac_zafc_4.gif

La energía eléctrica se genera cuando las moléculas de oxígeno de la atmósfera entran en el electrodo de difusión de gas. Aquí las moléculas de oxígeno se dividieron en átomos individuales de oxígeno y el agua que ya están presentes en los poros del electrodo reacciona con los átomos de oxígeno para formar iones hidroxilo. Los iones hidroxilo migran a través del electrolito y el separador físico para el ánodo de zinc, donde los iones hidroxilo se unen a un átomo de zinc para

producir zincato y dos electrones libres. El zincato divide inmediatamente en dos hidroxilos, uno de agua y una molécula de óxido de zinc. Los electrones libres se mueven del ánodo al cátodo a través de una carga externa.

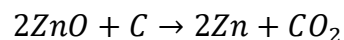


En el cátodo, el oxígeno de la atmósfera entra en la celda a través de una membrana permeable, hidrófoba y catalítica al aire. El agua ya presente en los poros de la membrana reacciona con el oxígeno para formar iones hidroxilo. En el ánodo (2), la oxidación se lleva a cabo como zinc se convierte en óxido de zinc por la reacción con los iones hidroxilo presentes en el electrolito. El electrolito utilizado es una concentración de 28% en peso de hidróxido de potasio (KOH) mezclado con agua destilada.

Producción del Zinc

Algo para considerar en esta tecnología es que la producción del preciado metal, no es completamente limpio. La fundición de minerales para obtener el metal deseado es un proceso muy intensivo en energía y produce grandes cantidades de dióxido de carbono. Para obtener el metal de zinc, se pasa los minerales por un proceso de tostado y producir óxido de Zinc (ZnO), y luego es reducido el óxido a Zinc puro con carbón. El carbón remueve el oxígeno desde el óxido y es convertido en dióxido de carbono. El carbón usado es coque. [30]

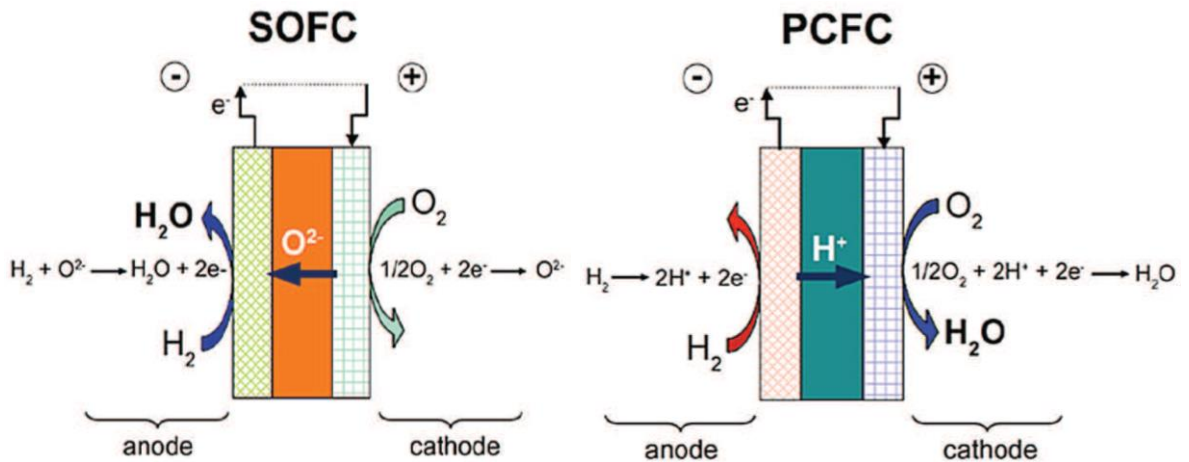
La reacción química para la obtención del Zinc es:



PCFC (Proton Ceramic Fuel Cells)

Las celdas de combustible de cerámica protónica son similares a las SOFC de muchas maneras. La principal diferencia es que los iones de hidrógeno se mueve a través del electrolito de cerámica en lugar de los iones de oxígeno, por lo tanto el agua, en el caso de una SOFC, es producida en el ánodo, en cambio en una PCFC el agua es producida en el cátodo al igual que una tipo PEMFC. Estas celdas de combustible se pueden considerar como un híbrido entre una SOFC y una PEMFC.

Figura 94. Comparación entre una Celda tipo SOFC y una PCFC.



Fuente: [33]

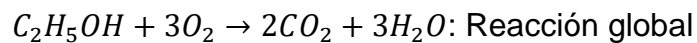
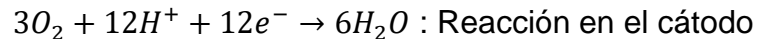
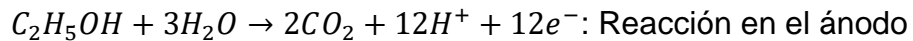
Las celdas de combustible de óxido sólido se basan en conductores aniónicos sólidos en su mayoría Circona Estabilizada con Itria (YSZ por sus siglas en ingles), en cambio las celdas de cerámica protónica utilizan un electrolito que puede ser un cerato de bario dopado con itrio (BCY) o circonato de bario dopado con itrio (BZY).

Las PCFC son alternativas bastante aceptables, aunque están en un estado mucho menos maduro de desarrollo que las SOFC. Entre todos los conductores de protones perovskita basados en 10% de cerato de bario dopado con itria (BCY10) es ampliamente estudiado por su alto nivel de conducción protónica por debajo de 700 °C en atmósfera de hidrógeno y / o agua que contienen atmósferas (10^{-2} S cm^{-1} a 600 °C en atmósfera de hidrógeno húmedo). Pero esta clase de materiales muestra algunas particularidades (alta basicidad, alta sensibilidad al agua y al CO₂, alta refractaridad, descomposición química a altas temperaturas, la conducción de oxígeno residual bajo ciertas condiciones, etc.), que hacen que requieran aun, una cierta cantidad de investigación básica antes de su desarrollo. [33]

DEFC (Direct Ethanol Fuel Cells)

Las DEFC o celdas de combustible de etanol directo se constituyen en una adaptación de las PEMFC, utilizando de igual forma un electrolito polimérico pero alimentadas directamente con etanol (C₂H₅OH), en lugar de utilizar hidrógeno reformado. [30].

Las reacciones químicas de una DEFC son:



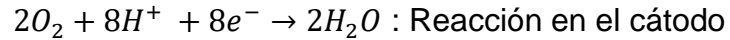
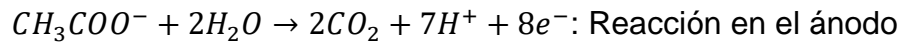
Una DEFC consiste en un electrodo cargado negativamente (ánodo) y un electrodo cargado positivamente (cátodo), los cuales se caracterizan por ser conductores electrónicos separados por un electrolito, que es una membrana de intercambio protónico. En el compartimento anódico se alimenta una solución acuosa de etanol, donde el etanol se oxida para producir dióxido de carbono y liberar simultáneamente protones y electrones. Los protones son transportados al cátodo a través del electrolito y los electrones fluyen a través del circuito externo al cátodo. Los protones en las celdas de combustible permanecen en un estado iónico viajando de molécula a molécula a través del uso de materiales poliméricos especiales, la conducción de los protones se da por migración y difusión a través de la membrana. En el cátodo, el oxidante (ya sea aire u oxígeno puro) reacciona con los protones y los electrones transportados desde el ánodo para producir agua. [30]

MFC (Microbial Fuel Cells)

Las celdas de combustible microbianas, son un tipo de celdas de combustible biológicas o también conocidas como celdas de biocombustible, son dispositivos que transforman la energía química en energía eléctrica a través de reacciones electroquímicas que implican microbios ubicados tanto en ambos compartimientos (ánodo y cátodo) o en un solo compartimiento. Los microbios son utilizados para degradar o convertir substratos orgánicos y/o inorgánicos a través de su metabolismo. [35]

Las bacterias necesitan energía para sobrevivir, de la misma manera que los seres humanos necesitan alimentos para vivir. Las bacterias obtienen esta energía en un proceso de dos pasos. El primer paso requiere la extracción de electrones a partir de alguna fuente de materia orgánica (oxidación), y el segundo paso consiste en dar esos electrones a algo que los acepte (reducción), tal como oxígeno o nitrato. Si ciertas bacterias se cultivan en condiciones anaerobias (sin la presencia de oxígeno), que puede transferir electrones a un electrodo de carbono (ánodo). Los electrones se mueven a continuación a través de un cable debajo de una carga (resistencia) al cátodo donde se combinan con protones y oxígeno para formar agua. Cuando estos electrones de flujo desde el ánodo al cátodo, que generan la corriente y el voltaje para producir electricidad. [34]

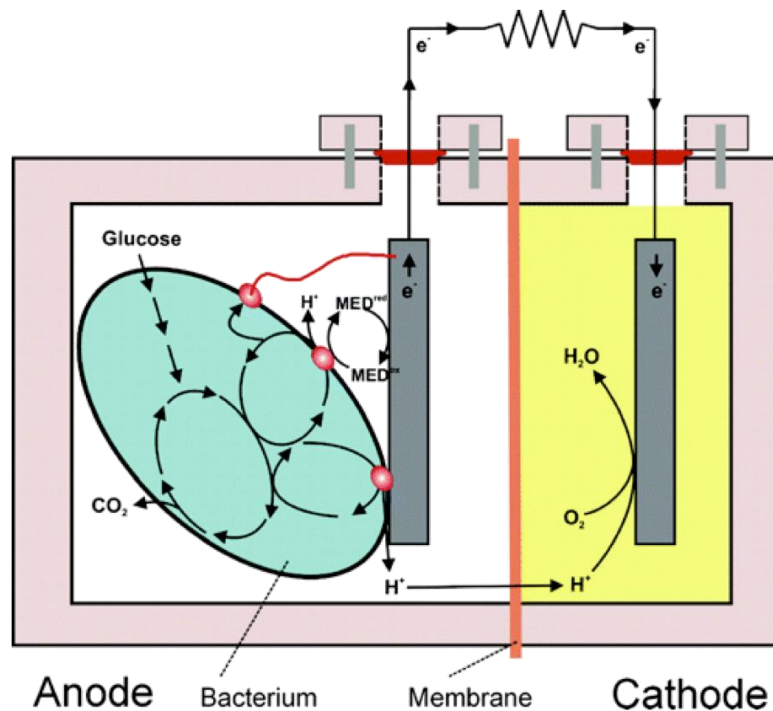
Las reacciones típicas de los electrodos se muestran a continuación usando un sustrato acetato de etilo como ejemplo: [36]



La puesta en marcha de una MFC consiste en la colonización del electrodo con el consorcio microbiano contenido en el inóculo con el fin de formar una bio-película, o una comunidad compleja de microorganismos que se adhieren al electrodo y producir un recubrimiento de polímero celular que les ayuda a retener los nutrientes y protegerse de los agentes tóxicos, y, finalmente, producir electricidad. [37]

Una típica celda de combustible microbiana consiste de una cámara anódica y una cámara catódica separadas por una membrana de intercambio de protones. Una MFC de un solo compartimiento elimina la necesidad de la cámara catódica mediante la exposición del cátodo directamente al aire.

Figura 95. Esquema de una Celda de Combustible Microbiana



Fuente: [http://4.bp.blogspot.com/-](http://4.bp.blogspot.com/-UbWRWYdNYU8/TpfB0_ibS_I/AAAAAAAAADQ/t3m0NEMhs9o/s1600/Microbial%2Bfuel%2Bcells.png)

[UbWRWYdNYU8/TpfB0_ibS_I/AAAAAAAAADQ/t3m0NEMhs9o/s1600/Microbial%2Bfuel%2Bcells.png](http://4.bp.blogspot.com/-UbWRWYdNYU8/TpfB0_ibS_I/AAAAAAAAADQ/t3m0NEMhs9o/s1600/Microbial%2Bfuel%2Bcells.png)

Microbios usados en las MFC

Muchos microorganismos poseen la capacidad de transferir los electrones derivados del metabolismo de la materia orgánica para el ánodo. En la tabla siguiente se muestra los microorganismos utilizados en estas celdas.

Tabla 20. Lista de Microbios Utilizados en las Celdas de Combustible Microbianas

MICROBIOS	SUSTRATO
Actinobacillus succinogenes	Glucosa
Aeromonas hydrophila	Acetato
Alcaligenes faecalis	Glucosa
Clostridium beijerinckii	Almidon, Glucosa, Lactato, Melaza
Clostridium butyricum	Almidon, Glucosa, Lactato, Melaza
Desulfovibrio desulfuricans	Sacarosa
Erwinia dissolven	Glucosa
Escherichia coli	Glucosa, Sacarosa
Geobacter metallireducens	Acetato
Geobacter sulfurreducens	Acetato
Gluconobacter oxydans	Glucosa
Klebsiella pneumoniae	Glucosa
Lactobacillus plantarum	Glucosa
Proteus mirabilis	Glucosa
Pseudomonas aeruginosa	Glucosa
Rhodoferax ferrireducens	Glucosa, Xilosa, Sacarosa, Maltosa
Shewanella oneidensis	Lactato
Shewanella putrefaciens	Lactato, Piruvato, Acetato, Glucosa
Streptococcus lactis	Glucosa

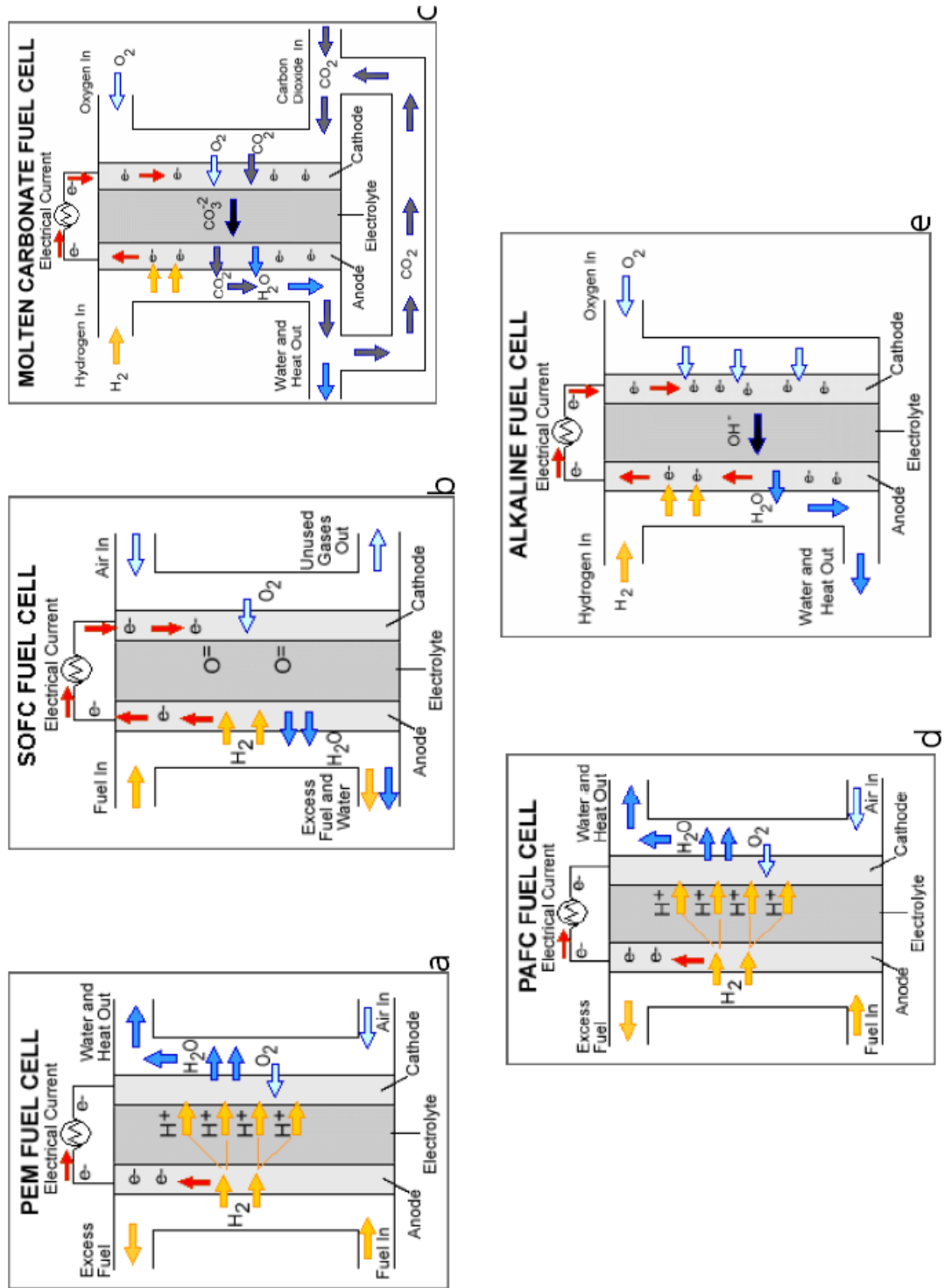
Fuente: [36]

Ventajas de las MFC

Las celdas de combustible microbianas presentan varias ventajas, tanto operacionales y funcionales, en comparación con las tecnologías actualmente utilizadas para la generación de energía fuera de la materia orgánica o el tratamiento de corrientes de residuos: [38]

- La generación de energía a partir de residuos biológicos y material orgánico.
- La conversión directa de la energía del sustrato a electricidad.
- Producción de lodos.
- Omisión de tratamiento de gases.
- Aeración.

Figura 96. Esquemas de los Principales Tipos de Celdas de Combustible.



Fuente: [23]