

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

Facultad de Ingeniería en
Electricidad
y Computación



PROYECTO INTEGRADOR

Previo a la obtención de título de:

INGENIERO ELÉCTRICO

COMPROBACIÓN DE LA ETAPA DE POTENCIA
DE UN SISTEMA DE PROPULSIÓN HÍBRIDO
ELÉCTRICO PARA AERONAVES

AUTORES: Carlos David Sánchez Ronquillo

DIRECTOR: MSc. Johnny Wladimir Rengifo Santana

Guayaquil - Ecuador
2020

Agradecimiento

A Dios, por permitirme llegar hasta esta meta alcanzada.

Un profundo agradecimiento al profesor Manuel Rendón y a su grupo de trabajo de la Universidad Federal Juiz de Fora, quienes me permitieron colaborar junto a ellos en la investigación de nuevas tecnologías, que sin ellos, este trabajo no fuera posible, así mismo a mi tutor de proyecto, al MSc. Johnny Wladimir Rengifo Santana, quien con su guía y consejos fue posible el desarrollo de la presente tesis, alentándonos a no rendirnos y dar nuestro mayor esfuerzo.

Asimismo, mi sincero agradecimiento a MSc. Fernando A. Vaca Urbano, profesor de la materia integradora, a MSc. Jimmy J. Córdova Villagómez, director de la carrera, quienes me guiaron y ayudaron durante la elaboración del proyecto.

Un profundo agradecimiento a nuestra universidad, profesores y compañeros que fueron partícipes de este proceso.

Este es un momento muy especial que espero, perdure en el tiempo, no solo en la mente de las personas a quienes agradecí, sino también a quienes invirtieron su tiempo para echarle una mirada a mi proyecto de tesis; a ellos asimismo les agradezco con todo mi ser. Además, quiero agradecer a todos quienes nos ayudaron, desde el inicio de nuestra formación profesional.

Dedicatoria

Quiero dedicar este logro alcanzado con mucho empeño, perseverancia y dedicación a mis padres Silvia y Carlos. Con su amor imperecedero, sus consejos, su esfuerzo diario, el ejemplo de su unión, sus sacrificios y sus luchas ganadas han hecho posible mi formación hasta estas instancias. Este trabajo al igual que todos mis logros, son también de mis padres.

Quiero además, compartir este logro con mi hermano menor Allan, espero sea tomado como ejemplo para la formación académica que el decida escoger y pueda llegar hasta llegar a la meta que se haya planteado e ir incluso, mucho más allá. A la memoria de mi abuelo Carlos, A mi abuelo Ernesto y a mis dos abuelas queridas Flor María. A todos mis tios y primos.

Finalmente, quisiera agradecer a todos aquellos quienes me han ayudado en toda mi formación académica hasta ahora, me es muy difícil mencionar a cada uno de forma breve. Comparto y dedico este logro con ellos también.

Declaración expresa

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este trabajo de titulación, me corresponde exclusivamente; y doy mi consentimiento para que la ESPOLE realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

Carlos David Sánchez Ronquillo

Evaluadores

MSc. Fernando Vaca
PROFESOR DE LA MATERIA

MSc. Johnny Rengifo
PROFESOR TUTOR

Índice general

Índice de figuras	3
Acrónimos	6
1. Planteamiento y estructura del proyecto	9
1.1. Planteamiento del proyecto	9
1.2. Descripción del problema	10
1.3. Objetivos del proyecto	10
1.3.1. Objetivo general	10
1.3.2. Objetivos específicos	10
1.4. Justificación del proyecto	10
1.5. Estructura del proyecto	11
2. Marco teórico	13
2.1. Sistema de propulsión híbrida eléctrica	13
2.2. Transistores IGBTs	14
2.3. Rectificador Trifásico	15
2.3.1. Teoría de potencias instantáneas	16
2.4. Conversor DC-DC	18
2.5. Inversor Trifásico	19
2.5.1. Transformada de Park	21
2.6. Banco de Baterías	21
3. Metodología	23
3.1. Turbogenerador	23
3.1.1. Topología del turbogenerador	25
3.2. Control del Rectificador	26
3.3. Banco de baterías	29
3.4. Control del conversor DC-DC	31
3.5. Control del inversor	33
4. Resultados	37
4.1. Simulación del Rectificador	37
4.2. Simulación del Conversor DC-DC	39
4.3. Simulación del Inversor	42
4.4. Simulación del Sistema de propulsión híbrido eléctrico	43

5. Conclusiones y trabajos futuros	49
5.1. Conclusiones	49
5.2. Trabajos Futuros	49
Bibliografía	51
Apéndice	52
6. Modelos de Simulink	55
6.1. Modelo del Sistema de Propulsión Híbrido Eléctrico en Simulink - MATLAB	56
6.2. Modelo del Rectificador y Control en Simulink - MATLAB	57
6.3. Modelo del Convertor Bidireccional y Control en Simulink - MATLAB	58
6.4. Modelo del Inversor y Control en Simulink - MATLAB	59

Índice de figuras

2.1.	Diagrama esquemático del sistema de propulsión híbrido eléctrico [1]. . .	14
2.2.	Circuito equivalente del transistor IGBT [2].	14
2.3.	IGBT modelo SKiiP39AC12F4V19 de la empresa Semikron [3].	15
2.4.	Diseño del Rectificador para el sistema de propulsión híbrida eléctrica realizado en el software Matlab-Simulink.	15
2.5.	Diagrama de control del Rectificador para el sistema de propulsión híbrida eléctrica realizado en el software Matlab-Simulink [4].	16
2.6.	la grafica (a) corresponde a las tensiones trifásicas instantenas, mientras que la gráfica (b) al vector espacial de tensión [5].	17
2.7.	En la figura se muestran las proyecciones espacial del vector de tensión, en los ejes α y β [5].	18
2.8.	Diseño del Conversor DC-DC para el sistema de propulsión híbrida eléctrica realizado en el software Matlab-Simulink.	19
2.9.	Diagrama de control del Conversor DC-DC para el sistema de propulsión híbrida eléctrica realizado en el software Matlab-Simulink [1].	19
2.10.	Diseño del Inversor para el sistema de propulsión híbrida eléctrica realizado en el software Matlab-Simulink.	20
2.11.	Diagrama de control del inversor para el sistema de propulsión híbrida eléctrica realizado en el software Matlab-Simulink [6].	20
2.12.	Bateria modelo WB-LYP40AHA utilizada para formar el banco de baterías del sistema de propulsión Híbrido Eléctrica [7].	22
3.1.	Curva aproximada del comportamiento del voltaje de acuerdo a la velocidad de giro del generador.	24
3.2.	Curva aproximada del comportamiento de la velocidad de giro de acuerdo a la potencia que se encuentra entregando el generador.	24
3.3.	Topología del funcionamiento del Turbogenerador Capson implementado en simulink.	25
3.4.	Esquema simplificado de la generación de voltaje y corriente del turbogenerador.	26
3.5.	Topologías de los bloques de control utilizados en el rectificador.	27
3.6.	Control PI de voltaje del rectificador.	27
3.7.	Cambio de coordenadas de la corriente y voltaje utilizando la transformada de Clarke.	28
3.8.	Subsistema para la obtención de las corrientes de refrencia y controladores resonantes para las señales m_α y m_β	28
3.9.	Obtencion de las señales de disparo para los IGBTs del rectificador. . .	29
3.10.	Bloque <i>Battery</i> de la librería de Simulink.	29

3.11. Curva <i>Voltage vs. Discharge capacity</i> de la batería WB-LYP40AHA [7].	30
3.12. Curva aproximada <i>Voltage vs. Discharge capacity</i> de la batería WB-LYP40AHA, utilizando el bloque <i>Battery</i> con el que cuenta la librería de Simulink.	30
3.13. Curva <i>Voltage [V] vs. Discharge capacity [%]</i> utilizando 78 bloques <i>Battery</i> colocados en serie para simular el banco de baterías del sistema.	31
3.14. Conversor DC-DC en cascada con sus respectivas señales de entradas y salidas.	31
3.15. Lógica para obtener la corriente de generaciámiento según las señales recibidas por el conversor DC-DC.	32
3.16. Control de voltaje del conversor Dc-Dc para la barra Dc del sistema, cuando esta lo requiera.	32
3.17. Lógica para obtener la corriente de referencia para los controladores de corriente.	33
3.18. Generación de señales para los IGBTs del conversor Dc-Dc.	33
3.19. Cambio de coordenadas de las corrientes a la salida del inversor utilizando la transformada de Park.	34
3.20. Control de la corriente de eje directo I_d mediante un controlador IP.	34
3.21. Control de la velocidad del motor mediante un controlador IP para obtener la corriente de referencia del eje de cuadratura I_{qRef}	34
3.22. Control de la corriente de eje de cuadratura I_q mediante un controlador IP.	35
3.23. Cambio de las señales a las coordenadas de operación a, b y c, para su posterior procesamiento del bloque PWM encargado de enviar las señales de pulso a los IGBTs	35
4.1. Simulación del turbogenerador operando en conjunto con el rectificador para suplir la potencia de las resistencias en cualquier instante de tiempo.	38
4.2. Comportamiento del voltaje a la salida del rectificador durante la simulación.	38
4.3. Simulación del conversor operando en conjunto a una fuente de voltaje para la respectiva carga y descarga del banco de baterías.	39
4.4. Comportamiento de la corriente del banco de baterías durante la simulación.	40
4.5. Comportamiento de la capacidad de carga del banco de baterías durante la simulación.	40
4.6. Comportamiento del voltaje a la salida del conversor Dc - Dc durante la simulación.	41
4.7. Simulación del inversor operando en conjunto al motor eléctrico para el respectivo control de su velocidad.	42
4.8. Comportamiento de la velocidad del motor y velocidad de referencia durante la simulación.	43
4.9. Configuración para la simulación del sistema de propulsión híbrido eléctrico, utilizando, los convertidores electrónicos como Rectificador, Conversor DC-DC e Inversor.	44
4.10. Descripción de operación de cada uno de los elementos que conforman el sistema de propulsión híbrido eléctrico para distintos intervalos de tiempo.	45

4.11. Comportamiento del voltaje en la barra DC del sistema durante el tiempo de simulación.	46
4.12. Comportamiento de la potencia del turbogenerador y banco de baterías a lo largo de toda la simulación y comportamiento del porcentaje de carga del banco de baterías.	47
4.13. Velocidad del motor eléctrico en cualquier instante de tiempo de simulación y gráfica del torque de carga de la hélice de la aeronave.	48
6.1. Simulación completa del sistema de propulsión híbrido eléctrico.	56
6.2. Simulación del rectificador del sistema con su respectivo control de voltaje.	57
6.3. Simulación del convertidor en cascada del sistema con su respectivo control de voltaje y corriente.	58
6.4. Simulación del inversor del sistema con su respectivo control de velocidad para el motor eléctrico.	59

Acrónimos

IPCC:	Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático).
UFJF:	Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil.
EMBRAER:	Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A.
PMSG:	Permanent magnet synchronous generator (Generador Síncrono de imanes permanentes).
MSIP:	Motor Síncrono de imanes permanentes.
PI:	Controlador Proporcional - Integral.
IP:	Controlador Integral - Proporcional.
SiC:	Silicio de carbono.
SRC:	Series Resonant Converter (Conversor Resonante Serie).
TAB:	Triple Active Bridge (Conversor de puente activo triple).
QAB:	Quadruple Active Bridge (Conversor de puente activo cuadruple).

PLANTEAMIENTO Y ESTRUCTURA DEL PROYECTO

1.1. Planteamiento del proyecto

El mayor gasto que tienen las compañías aéreas, se debe a la compra del combustible kerosén utilizado por las aeronaves en sus distintos vuelos comerciales, llegando a representar, hasta más de un 30 % del total de sus costos, las compañías, han hecho un gran esfuerzo en reducir y optimizar el combustible utilizado en las diferentes rutas de vuelo, con la finalidad de obtener menores gastos en la compra de este combustible, pero ha llegado un punto en que la optimización y la eficiencia los motores están llegando a su límite, por lo cual, se está empezando a recurrir a nuevas alternativas para que el uso del kerosén se vea reducido.

En los últimos 15 años, la eficiencia energética de la aviación comercial mundial, medida en términos de combustible consumido por tonelada-kilómetro transportada de pasajeros y carga, ha aumentado a razón de un 2 % anual. Sin embargo, con un crecimiento medio del sector del 4-5 %, se produce un aumento de las emisiones de CO₂ de un 2-3 % cada año[8].

Desde la creación de las aeronaves, el uso de las mismas, sobre todo de manera comercial, ha crecido exponencialmente, hasta llegar a convertirse en el transporte que más contaminación causa a nivel mundial, entre los años 1994 y 2004, la emisión de estos gases de efecto invernadero han aumentado en un 85 % según la estimación realizada por el IPCC, por lo cual, el uso de nuevas tecnologías menos contaminantes y eficientes, será de gran contribución en la reducción de los efectos negativos ambientales causados por los aviones. La empresa brasileña EMBRAER, el cual actualmente es uno de los fabricantes internacionales más importantes a nivel mundial de aeronaves, ha designado a la universidad UFJF, del mismo país, para desarrollar un proyecto de innovación y tecnología en la industria aeronáutica, el mismo, busca mejorar la optimización del uso del kerosén en los aviones y, por ende, mejorar el problema del impacto ambiental que este medio de transporte causa por el uso de este combustible. Este trabajo pretende enfocarse en el área de la electrónica de potencia que se está desarrollando para este proyecto, el cual consta de un sistema híbrido conformado por un generador síncrono de imanes permanentes y un banco de baterías, los cuales serán los encargados de suplir la carga de la hélice durante todo el trayecto del vuelo de una aeronave. Estos

sistemas son muy útiles en lo que respecta a la reducción del uso de combustibles fósiles, ya que, en su mayoría de aplicaciones, se encuentran operando en conjunto con energías renovables, pero para este caso, la eficiencia variable del generador para distintos valores de potencias, es la que nos va a permitir el ahorro del combustible haciendo uso únicamente del banco de baterías.

1.2. Descripción del problema

Actualmente el proyecto de EMBRAER se encuentra en fase de desarrollo, pero ya se tiene a disposición los modelos de los equipos de electrónica de potencia, como son, rectificador trifásico, convertor en cascada DC-DC y el inversor trifásico para el motor de la hélice, estos se encuentran modelados individualmente, y se requiere tener un modelo total de todo el sistema para observar el comportamiento de ciertas variables en ciertas condiciones de operación o detectar fallos que puedan tener las estrategias de control en cada uno de estos componentes

1.3. Objetivos del proyecto

1.3.1. Objetivo general

Implementar la simulación del sistema de propulsión híbrido eléctrica, empleando los modelos individuales electrónicos obtenidos previamente por el grupo de trabajo, con la finalidad de observar la operación del sistema para distintos escenarios.

1.3.2. Objetivos específicos

- Lograr la operación en conjunto de todos los convertidores electrónicos.
- Adaptar el convertor DC- DC, para que opere de acuerdo a las condiciones establecidas previamente por el proyecto.
- Simular los convertidores electrónicos individualmente, para observar el correcto funcionamiento de las estrategias de control utilizadas en cada uno de ellos.
- Obtener la curva equivalente, *Voltaje vs. Capacidad de descarga*, del banco de baterías que va ser utilizado en el sistema
- Analizar el comportamiento y estabilidad del sistema, variando la potencia de carga del motor.

1.4. Justificación del proyecto

El presente trabajo será de gran utilidad para analizar el comportamiento de todo el sistema híbrido y los componentes que lo conforman, antes de ser implementado de manera física en el primer laboratorio de propulsión híbrido eléctrica de la universidad UFJF de Brasil que, actualmente, se encuentra en construcción y la obra está próxima a finalizar. En este documento se analizarán las diferentes técnicas de control utilizadas en cada uno de los componentes electrónicos y su operación en conjunta, se perturbará

el sistema frente a diversas anomalías que puedan ser presentadas en la operación y se observará la respuesta del sistema frente a las mismas. A futuro, cualquier modificación o mejora física que se le requiera realizar al proyecto, tendrá primero que ser simulado previamente para ver cómo afecta al sistema en general o ver el comportamiento de alguna variable en específico.

1.5. Estructura del proyecto

Para lograr cumplir con los objetivos planteados dentro de este proyecto, la estructura de este trabajo consta de los siguientes capítulos con una breve descripción de los mismos.

En el capítulo 2, se detallan cada uno de los convertidores electrónicos que van a ser implementados en el sistema híbrido eléctrico, además, se describen cuáles fueron las estrategias de control que se utilizaron en cada uno de ellos, y cuáles son las funciones principales que deberán llevar a cabo para el respectivo funcionamiento del sistema. También, se da a conocer el modelo de la batería que va a ser utilizado en la implementación del proyecto para formar el banco, así como la curva característica dada por el fabricante. Finalmente, se describe el modelo del motor a usar y sus principales parámetros, los cuales son de gran utilidad para tener un correcto control, en la velocidad de la máquina.

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta la revisión del estado del arte sobre el sistema de propulsión híbrido eléctrico en desarrollo.

Como primer punto, se tiene la definición de lo que es un sistema híbrido eléctrico y la diferencia que tiene este proyecto con respecto a sistemas similares ya conocidos. Posteriormente se procede a describir cada uno de los convertidores electrónicos utilizados y la función que van a tener que cumplir en la operación del sistema, además se recalcan las teorías de control utilizadas en cada uno de ellos para lograr cumplir con sus objetivos específicos, como el uso de la teoría potencias instantáneas para el control del voltaje en el rectificador, los controladores PI con los que cuenta el convertidor en cascada DC-DC para el control de corriente o voltaje, el uso del inversor para el control de velocidad del Motor Síncrono de Imanes Permanentes(MSIP) haciendo uso de controladores Integral-Proporcional(IP) en vez de los comúnmente utilizados controladores PI, y para finalizar, se da una breve descripción del banco de baterías a ser utilizado con su respectiva curva característica , así también como del PMSM que se empleara para hacer rotar la hélice de la aeronave.

2.1. Sistema de propulsión híbrida eléctrica

Cuando se habla de un sistema híbrido eléctrico, generalmente se refieren a sistemas los cuales están conformados por uno o varios motores de combustión interna, trabajando en conjunto con motores o generadores eléctricos, con la finalidad, de tener un ahorro en el uso de los combustibles fósiles. En caso actual, se trata de un sistema híbrido combinado, se tiene como fuentes un PMSG, el cual va a usar combustible kerosén para su funcionamiento, un banco de baterías y un PMSM, el cual en su eje tendrá acoplada la hélice de la aeronave, la finalidad de este sistema es el mismo que los anteriores, obtener un ahorro de combustible y por ende menor contaminación provocado el uso del mismo. Si se tuviera solamente al PMSG operando, para bajos valores de potencias, la eficiencia de la maquina es muy baja, por lo cual, en esas condiciones, utilizaría más combustible para suplir la potencia de carga, pero adicionando un banco batería y haciéndola operar a estos valores de potencias, se logra un ahorro considerable en el uso del combustible fósil.

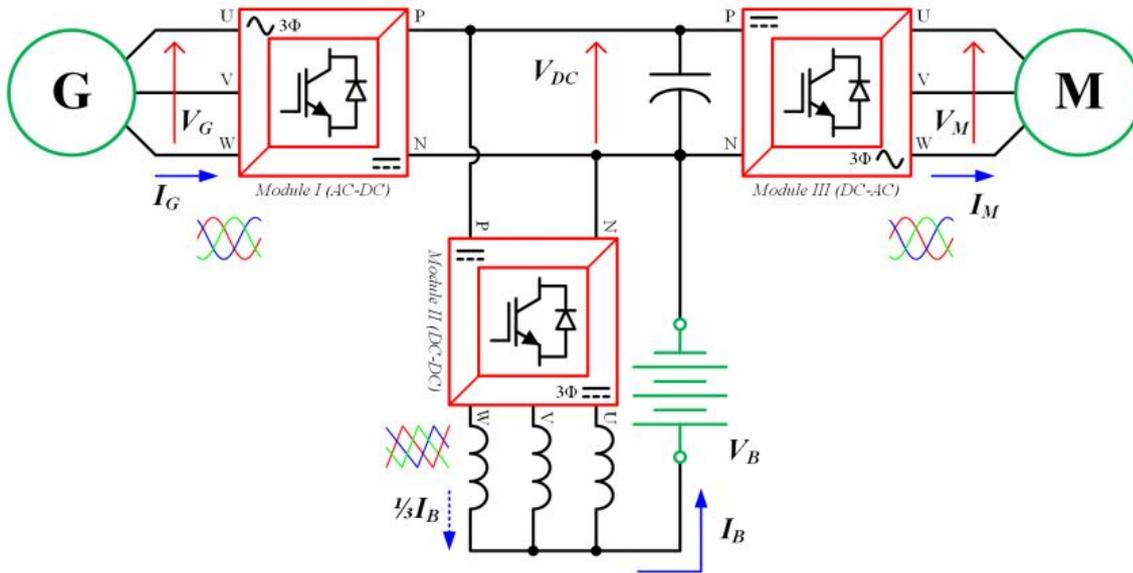


Figura 2.1 – Diagrama esquemático del sistema de propulsión híbrido eléctrico [1].

2.2. Transistores IGBTs

Estos transistores son muy especiales debido a que se trata de una combinación de los transistores MOSFET con los transistores BJT, es decir poseen un voltaje de saturación pequeño y un gran manejo de la corriente, además de eso, su puerta o gate tiene las mismas características que los transistores FET. Con el uso de estos transistores se han diseñado grandes aplicaciones útiles en las industrias como lo son, dispositivos de control, variadores, sistemas de optimización y sobre todo para conversión y manejo de la energía [2].

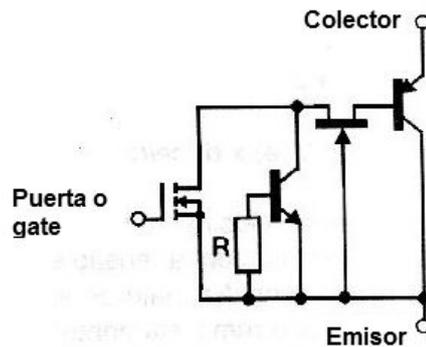


Figura 2.2 – Circuito equivalente del transistor IGBT [2].

Los transistores IGBT utilizados en el laboratorio de propulsión híbrido eléctrico, serán los de la empresa Semikron, específicamente el modelo SKiiP39AC12F4V19. Estos transistores cuentan con una resistencia interna máxima de $10 \text{ m}\Omega$ a temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y una resistencia máxima de $14 \text{ m}\Omega$ a una temperatura de $150 \text{ }^\circ\text{C}$. Para los voltajes de saturación, que son uno de los parámetros más importantes debido a que son los que van a producir las pérdidas en los elementos, tenemos que para una temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ el voltaje máximo de saturación del dispositivo será de 2.40 V , mientras que, a una

temperatura de $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, el voltaje de saturación máximo será de 2.85 V , por otro lado el diod cuenta con un voltaje de saturación de máximo de 1.60 V a una temperatura de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y con un voltaje de saturación máximo de 2.10 V a una temperatura de $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

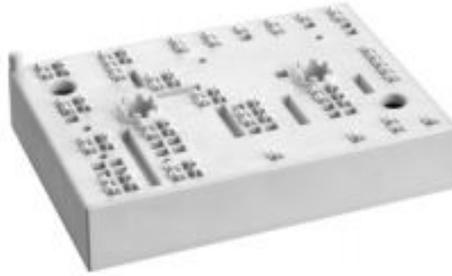


Figura 2.3 – IGBT modelo SKiiP39AC12F4V19 de la empresa Semikron [3].

2.3. Rectificador Trifásico

El rectificador que fue utilizado, se diseñó para obtener a la salida un voltaje continuo de 670 V , el generador trifásico, que está conectado a la entrada del rectificador, tiene frecuencia y voltaje variable dependiendo de la potencia que se encuentre entregando, frente a estas condiciones el rectificador tiene que ser capaz de mantener el voltaje previamente establecido a la salida, frente a valores de potencias que van hasta por lo menos 30 kW , esto lo logra haciendo uso de la teoría de potencia instantánea, y utilizando un control PI para el control de voltaje, más un controlador proporcional resonante para el control de la corriente [4]-[9].

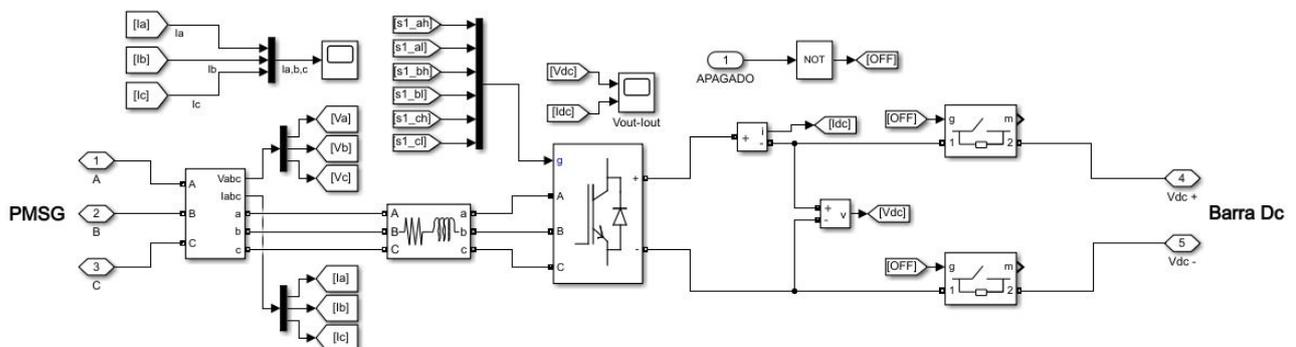


Figura 2.4 – Diseño del Rectificador para el sistema de propulsión híbrida eléctrica realizado en el software Matlab-Simulink.

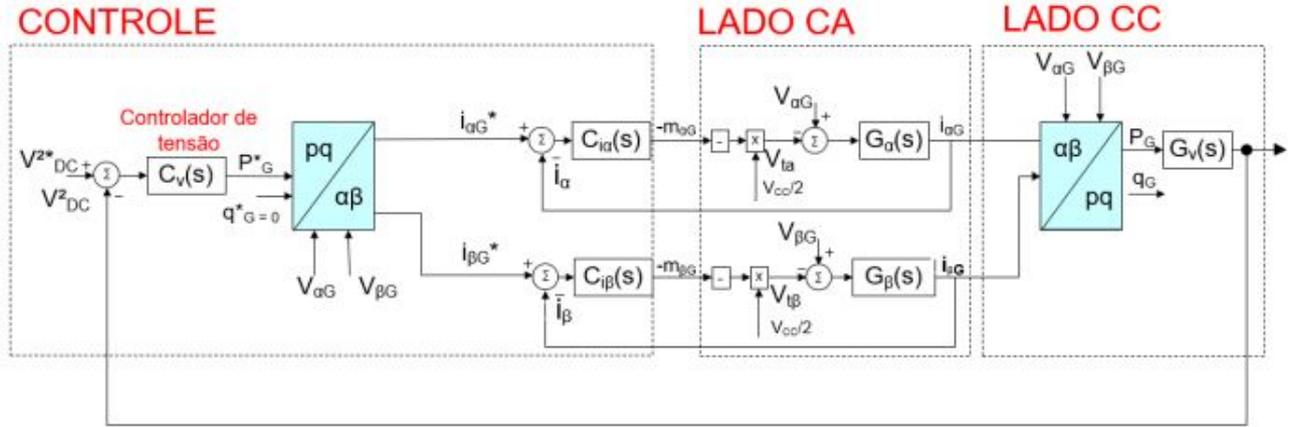


Figura 2.5 – Diagrama de control del Rectificador para el sistema de propulsión híbrida eléctrica realizado en el software Matlab-Simulink [4].

Los controlares de corriente (2.1) y voltaje (2.2) estan definidas en las siguientes ecuaciones [4]:

$$C_{i\alpha\beta}(s) = \frac{K_{pc}s^2 + 2\omega_C(K_{pc} + K_{ic})s + \omega_0^2 K_{pc}}{s^2 + 2\omega_C s + \omega_0^2} \quad (2.1)$$

$$C_v(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (2.2)$$

Tabla 2.1 – Ganancia de los controladores [4].

Descripción	Símbolo	Valor
Ganancia proporcional de malla interna	K_{pc}	0,1
Ganancia resonante de malla interna	K_{ic}	1,5
Banda del controlador resonante	ω_C	10 rad/s
Margen de fase de la malla interna	MF	83
Ganancia proporcional de la malla externa	K_p	0,0655
Constante de tiempo de la malla externa	τ	0,00888 s

2.3.1. Teoría de potencias instantáneas

Esta teoría nos menciona que, el conjunto de voltajes o corrientes trifásicas instantáneas, pueden pasar de las coordenadas a, b, c a las coordenadas $\alpha, \beta, 0$ y viceversa, esto se lo logra haciendo uso de la siguiente matriz conocida como transformada directa 2.3 o inversa de Clarke 2.4.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Estas componentes V_α y V_β , de manera gráfica pueden ser vistas como las proyecciones de un vector espacial, con dirección en los ejes α y β .

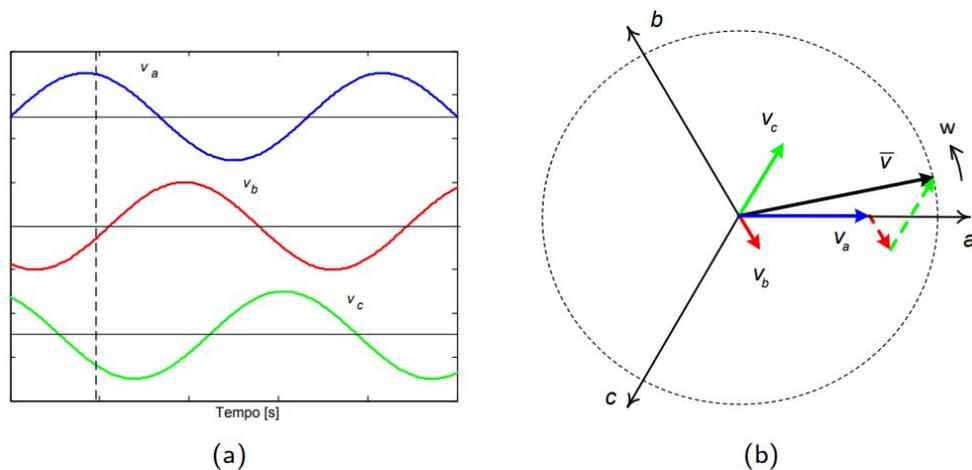


Figura 2.6 – la grafica (a) corresponde a las tensiones trifásicas instantenas, mientras que la gráfica (b) al vector espacial de tensión [5].

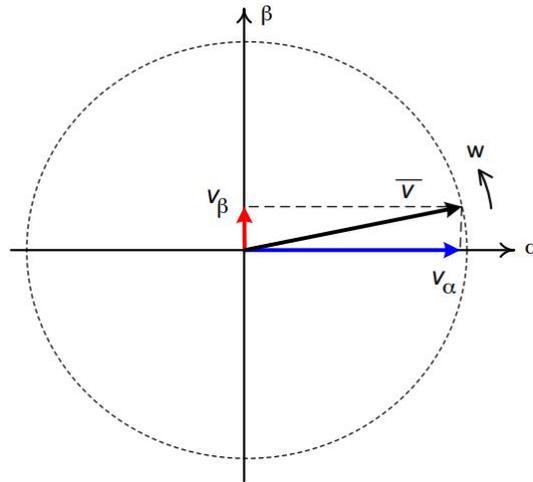


Figura 2.7 – En la figura se muestran las proyecciones espacial del vector de tensión, en los ejes α y β [5].

Teniendo los voltajes y corrientes en las coordenadas α , β y 0, podemos obtener tanto la potencia activa, reactiva y de secuencia cero en cualquier instante de tiempo, mediante la ecuación matricial 2.5.

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_0 & 0 & 0 \\ 0 & V_\alpha & V_\beta \\ 0 & V_\beta & -V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Cabe recalcar que, para los sistemas de ecuaciones matriciales presentados con anterioridad, todos los valores de secuencia 0 puede ser eliminados, siempre y cuando se considere un sistema trifásico balanceado, debido a que en estos sistema esta secuencia no interviene.

2.4. Conversor DC-DC

El conversor DC-DC se lo diseñó para actuar en dos modos diferentes, *Buck-mode* para la carga del banco de baterías que se va a encontrar conectado a la entrada del rectificador, y el *Boost-mode*, que se va encargar de enviar la potencia proveniente del banco de baterías, hacia el sistema. Además, su estructura cuenta con tres ramales intercalados en vez de uno, esta topología se la realizó así con la finalidad de dividir la corriente en tres partes iguales, lo cual se traduce a costos más bajos debido a que a una menor corriente, conlleva a IGBTs de menor potencia.

La función principal que tiene el conversor, es controlar la corriente de carga y descarga del banco de baterías, esto lo logra haciendo uso de controladores PI en su circuito de control y como segunda función, está encargado de mantener el voltaje en la barra DC a 670 V cuando el sistema lo requiera, este control de voltaje también se encuentra diseñado haciendo uso de un control PI, el cual, establece la corriente de referencia necesaria para obtener a la salida el voltaje deseado. Cabe recalcar que la secuencia de conmutación de cada uno de los ramales, van a estar desfasados 120° [1]-[10].

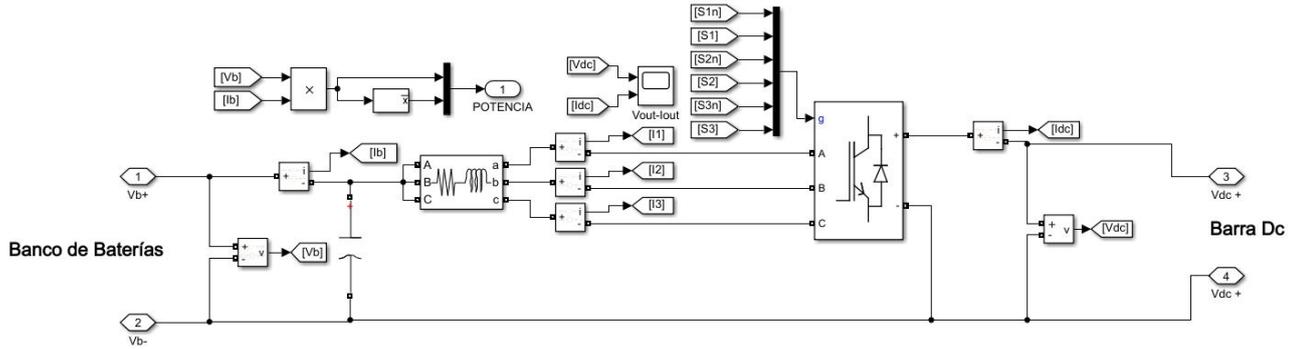


Figura 2.8 – Diseño del Conversor DC-DC para el sistema de propulsión híbrida eléctrica realizado en el software Matlab-Simulink.

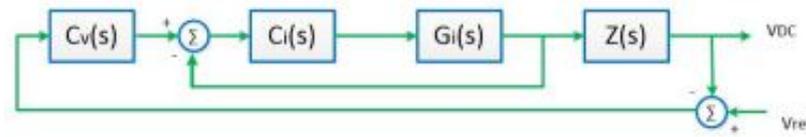


Figura 2.9 – Diagrama de control del Conversor DC-DC para el sistema de propulsión híbrida eléctrica realizado en el software Matlab-Simulink [1].

El controlador de corriente de bucle interno (2.6) y de control externo de voltaje (2.7) se describen mediante funciones de transferencia [1]:

$$C(i) = \frac{50,456(0,00041s + 1)}{s} \quad (2.6)$$

$$C(v) = \frac{200}{s} \quad (2.7)$$

2.5. Inversor Trifásico

El inversor en este proyecto tiene como función principal, enviar la potencia que suministra el generador y las baterías desde la barra DC hasta el motor eléctrico, el cual es el encargado de hacer rotar el eje de la hélice. Sin embargo, lo que se va a controlar el inversor en el motor, es su velocidad dada una velocidad de referencia en cualquier instante de tiempo, por lo cual se ha diseñado un control de las corrientes de eje cuadratura para lograr este objetivo, para este control, a diferencia de los controles vistos anteriormente en los equipos de electrónica de potencia, en el inversor se usan controladores IP en vez de los comúnmente utilizados controladores proporcional-integral PI, estos son de gran ayuda debido que para funciones de transferencia de primer orden, los controladores PI agregan ceros a la función de transferencia de lazo cerrado, lo cual se traduce a una aceleración en su respuesta que provoca oscilaciones en el régimen transitorio, mientras que los controladores IP no agregan estos ceros a la función, lo cual hace que el sistema en régimen transitorio no tenga muchas perturbaciones [6]-[11].

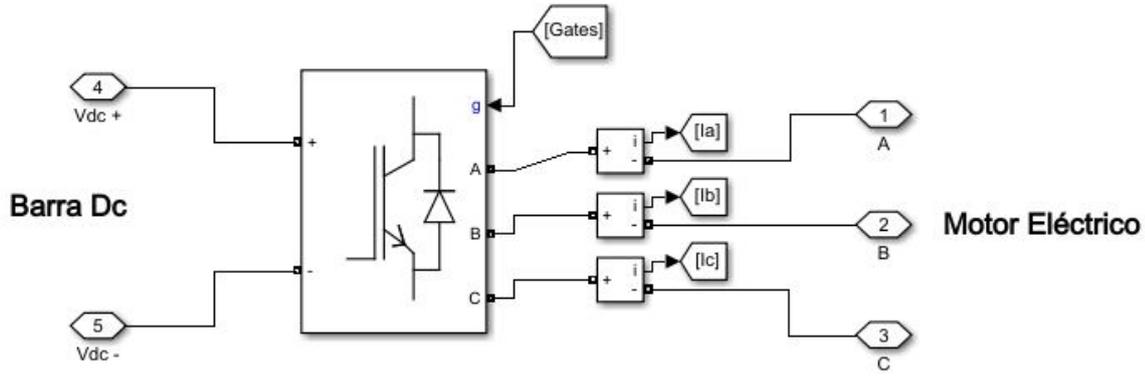


Figura 2.10 – Diseño del Inversor para el sistema de propulsión híbrida eléctrica realizado en el software Matlab-Simulink.

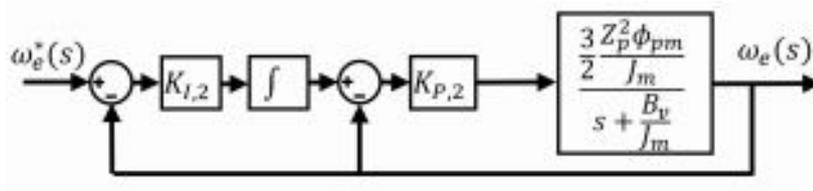


Figura 2.11 – Diagrama de control del inversor para el sistema de propulsión híbrida eléctrica realizado en el software Matlab-Simulink [6].

Los controlares de corriente de la malla IP (2.8) y control de velocidad de la malla IP (2.9) están definidas en las siguientes ecuaciones [6]:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}. \tag{2.8}$$

$$G_{MF,\omega} = \frac{K_{P,2}K_{I,2}b}{s^2 + (a + K_{P,2}b)s + K_{P,2}K_{I,2}b}, \tag{2.9}$$

Donde $a = \frac{B_v}{J_m}$ e $b = \frac{3 Z_p^2 \phi_{pm}}{2 J_m}$.

Tabla 2.2 – Parámetros de los controladores [6].

Constante	Valor
ζ	0,8
T_s	1 ms
ω_n	5000 rad/s
$K_{P,1}$	1,42 V/A
$K_{I,1}$	4500 s ⁻¹
$K_{P,2}$	0,2065 A.s
$K_{I,2}$	10,03 rad ⁻¹

Tabla 2.3 – Parametros del motor eléctrico [6].

Descripción	Símbolo	Valor
Resistencia de fase	R_s	18 $m\Omega$
Inductancia de eje directo	L_d	175 μH
Inductancia de eje de cuadratura	L_q	180 μH
Numero de pares de polos	Z_p	10
Inercia de la máquina	J_m	0,0421 $Kg.m^2$
Coefficiente de viscosidad	B_v	0,005 $N.m.s$
Flujo magnético axial	ϕ_{pm}	0,0542 $V.s$
Barrimiento CC	V_{CC}	670 V
Frecuencia de conmutación	f_{ch}	16000 Hz

2.5.1. Transformada de Park

Esta transformada nos permite pasar de un sistema trifásico de referencia fijo, de cierta magnitud (A, B, C), a un sistema de referencia ortogonal giratorio con coordenadas (0, D, Q), conociendo la medida del desfase del Angulo en los sistemas.

Este cambio de variables consiste en referenciar las variables de sistemas trifásicos, tanto de estator o de rotor, en un mismo sistema de coordenadas compuestos de dos ejes en cuadratura y otro eje, conocido como eje de secuencia cero. Las variables del nuevo sistema de coordenadas son distinguidas por los índices d, q y o representando los ejes directos, de cuadratura y de secuencia cero, respectivamente. Este nuevo sistema de coordenadas es conocido como sistema de coordenadas arbitrario.

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_q \\ f_d \\ f_0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\begin{bmatrix} f_q \\ f_d \\ f_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

2.6. Banco de Baterías

Un banco de baterías como definición se puede decir que es un conjunto de baterías conectadas entre sí en paralelo o en serie que sirven para proveer de electricidad en el momento en que otras fuentes de energía primarias o no funcionan, o no están disponibles. En el presente proyecto, para el diseño del banco de baterías, se usaron 78 unidades puesta en serie del modelo WB-LYP40AHA , la cual tiene una capacidad nominal de 40 Ah, peso aproximado de 1.6 kg y un voltaje de operación que va de los

2.8 V a los 3.5 V , dependiendo del porcentaje en que estas se encuentren cargadas.



Figura 2.12 – Bateria modelo WB-LYP40AHA utilizada para formar el banco de baterías del sistema de propulsión Híbrido Eléctrica [7].

Capítulo 3

METODOLOGÍA

En este capítulo se ha pretendido aclarar los controles y diseños que tienen cada uno de los componentes electrónicos implementados en la simulación, así también como una breve explicación de cómo van a funcionar cada uno de los controladores. Por otro lado, también se explica cómo se modeló el banco de baterías para que tenga un comportamiento similar a la gráfica dada por el fabricante.

3.1. Turbogenerador

El turbogenerador a ser utilizado en el laboratorio de propulsión híbrido eléctrica de la universidad Juiz De Fora, corresponde a una turbina Capstone de vapor acoplada al eje de un generador síncrono de imanes permanentes, por lo cual, para tener una simulación más precisa y ver su comportamiento en el sistema, se obtuvieron datos reales de $V_G =$ Voltaje (V_{RMS}) y $N =$ Frecuencia (rad/s) del turbogenerador operando a diferentes valores de potencia entregada P_G (W), obteniendo las siguientes gráficas:

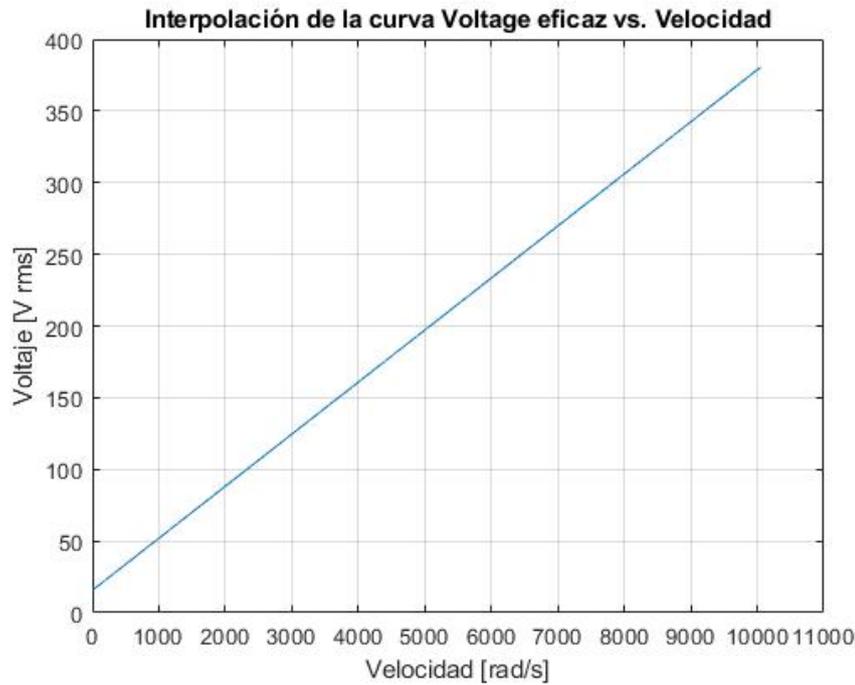


Figura 3.1 – Curva aproximada del comportamiento del voltaje de acuerdo a la velocidad de giro del generador.

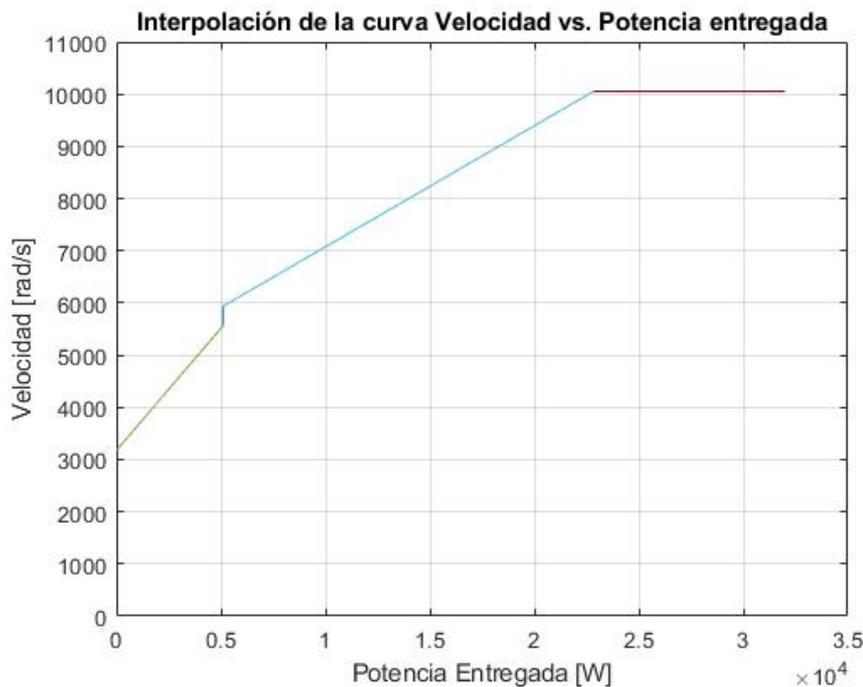


Figura 3.2 – Curva aproximada del comportamiento de la velocidad de giro de acuerdo a la potencia que se encuentra entregando el generador.

Con los datos obtenidos se procedió a interpolar y obtener dos curvas aproximadas, $V_g = f(N)$ y $N = f(P_G)$, las cuales van a ser útiles para observar el comportamiento aproximado que va a tener el turbogenerador en las distintas etapas de vuelo.

$$V_G = 0,03631N + 15,609 \quad (3.1)$$

Donde:

V_G : Voltaje Rms en los terminales del generador.

N : Velocidad de la máquina en rad/s.

$$\left\{ \begin{array}{l} N = 0,4676P_G + 3175,63 \quad ; \quad 0 \leq P_G \leq 5100 \\ N = 0,2321P_G + 4753 \quad ; \quad 5100 < P_G \leq 22831 \\ N = 10053 \quad ; \quad P_G > 22831 \end{array} \right. \quad (3.2)$$

Donde:

P_G : Potencia entregada por el generador en vatios.

N : Velocidad de la máquina en rad/s.

3.1.1. Topología del turbogenerador

Para la implementación del turbogenerador en la simulación del sistema híbrido eléctrico, se usaron varios bloques de la librería de MATLAB-SIMULINK[®] obteniendo el esquema presentado a continuación, donde se detallan las diferentes etapas del proceso de generación de las señales de voltaje y corriente enviadas por el generador hacia el sistema.

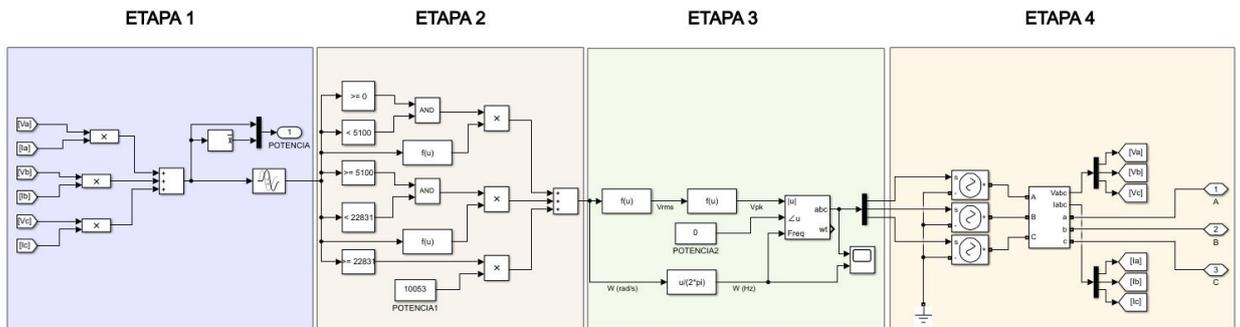


Figura 3.3 – Topología del funcionamiento del Turbogenerador Capson implementado en simulink.

En la **Etapa 1** del esquema, se realiza el cálculo de la potencia activa que está enviando el generador hacia el sistema, para ello se mide el voltaje línea-neutro y corriente a la salida de cada una de las líneas del generador para obtener la potencia individual y, al final sumarlas para obtener la potencia activa total en la que se encuentra operando la máquina. Cabe recalcar que antes de ingresar a la etapa dos, se tiene un bloque de retraso conocido como *Transport Delay*, el cual nos ayuda a evitar errores debido a la falta de convergencia que los solucionadores presentan al momento de simular sistemas de tipo bucle.

Luego de calcular la potencia enviada al sistema, este valor se envía a la **Etapa 2**, la cual tiene un esquema de lógica para obtener la velocidad, en rad/s, a la cual el rotor del generador se va a encontrar operando, esta velocidad será establecida dependiendo

del valor de potencia que se encuentre entregando la máquina al sistema, siguiendo lo establecido en las 3.2 que se obtuvieron en las pruebas experimentales.

Al obtener la velocidad en rad/s de la máquina, se pasa a la **Etapa 3**, donde se realizan dos cálculos para obtener las señales sinusoidales trifásicas con la ayuda del bloque *Three-Phase Sine Generator*. El primero de ellos es el cálculo de la magnitud del voltaje eficaz, para lo cual se evalúa el valor de velocidad obtenida en la etapa anterior, en 3.7 obtenida experimentalmente, posteriormente, se realiza otro cálculo adicional para transformar el voltaje eficaz en voltaje pico, que es una de las entradas que requiere el bloque para generar las señales. El segundo cálculo que se realiza, es una conversión de unidades para pasar de la velocidad en rad/seg a Hz, que es otra entrada la cual requiere el bloque para obtener la frecuencia de cada una de las señales a generar, finalmente la última entrada que necesita el bloque es el desfase de la fase A, la cual, para este caso tendrá un valor de 0° . Una vez obtenidos los valores de magnitud, frecuencia y desfase, el bloque *Three-Phase Sine Generator* procede a generar las señales sinusoidales trifásicas de cada una de las líneas con un desfase de 120° entre ellas.

Finalmente, en la **Etapa 4**, las señales generadas, se las envía a los bloques *Controlled Voltage Source* conectados en Y, para transformar cada una de ellas, a señales trifásicas eléctricas, obteniendo así en los terminales del generador, las señales de voltaje y corrientes que van a ser enviadas hacia el sistema. También se aprecia que existe un medidor trifásico, el cual mide estas señales para el cálculo de la potencia en la **Etapa 1**, repitiendo así todo el proceso de manera continua.

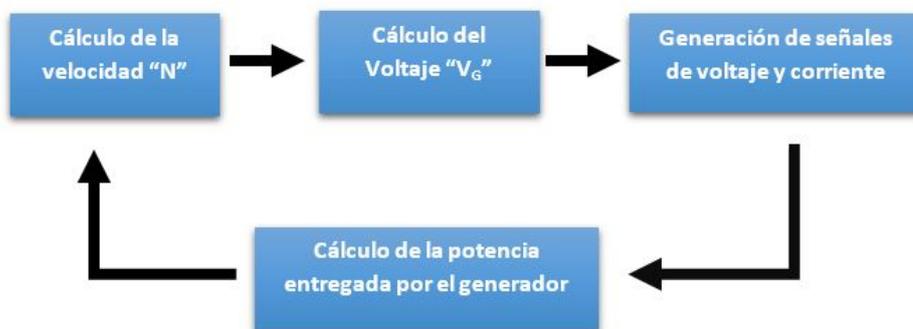


Figura 3.4 – Esquema simplificado de la generación de voltaje y corriente del turbogenerador.

3.2. Control del Rectificador

Para el diseño del rectificador y su control, se utilizaron bloques de la librería de MATLAB-SIMULINK (®), los cuales nos permitieron replicar el modelo que se obtuvo en el trabajo investigativo *Projeto de Controladores Ressonantes para Condicionamento de Potência em Geradores de Alta Freqüência* realizado en colaboración por los estudiantes de la universidad de Brasil involucrados en el proyecto EMBRAER.

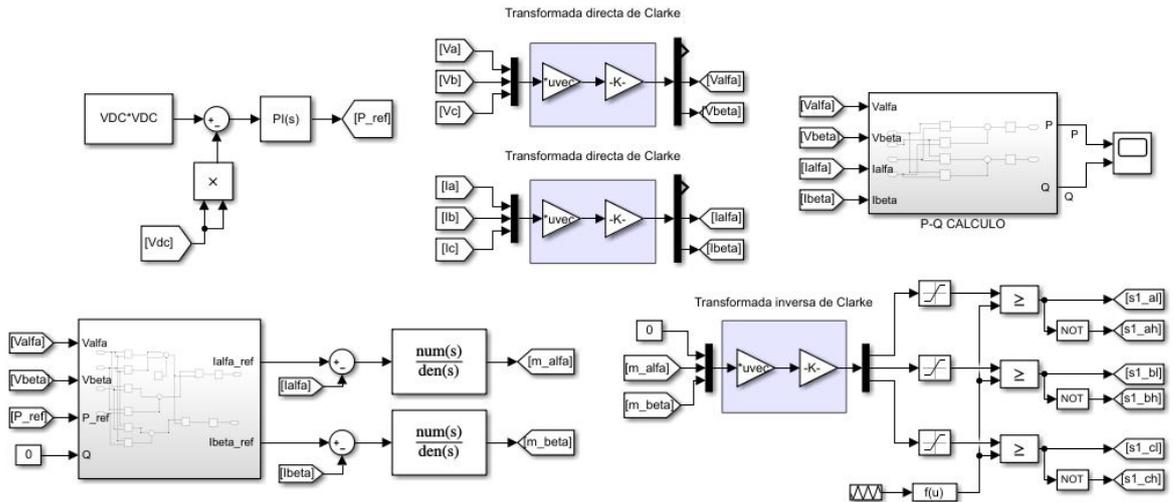


Figura 3.5 – Topologías de los bloques de control utilizados en el rectificador.

Inicialmente, en la simulación se implementó el control de tensión del rectificador, para ello se colocó un voltímetro en el lado Dc para obtener el voltaje cuadrático, y un bloque PI de la librería de MATLAB-SIMULINK [®], el cuál va a tomar el error cuadrático del voltaje dada por la lectura del voltímetro y el valor de referencia, para obtener en la salida una potencia de referencia útil para el control de corriente.

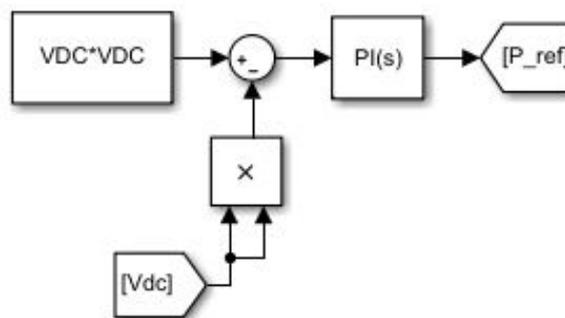


Figura 3.6 – Control PI de voltaje del rectificador.

Antes de implementar el control de corriente en la simulación, se tuvo que transformar los voltajes y corrientes dados por el generador, a las coordenadas α y β , para ello, se usó la transformada directa de Clarke utilizando dos bloques de ganancia, en donde en uno de ellos se colocó la matriz de la transformada de Clarke y en el otro bloque de ganancia, la constante que multiplica a la matriz.

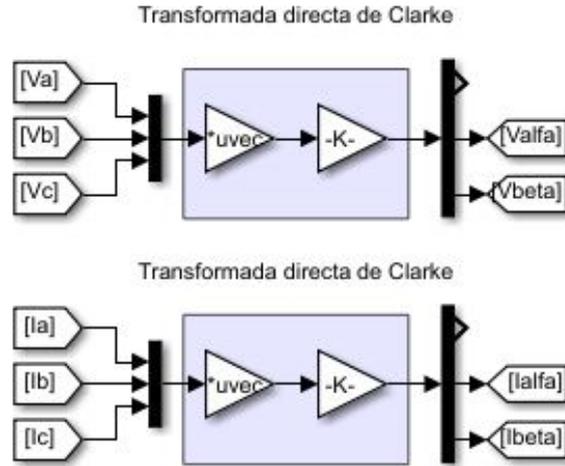


Figura 3.7 – Cambio de coordenadas de la corriente y voltaje utilizando la transformada de Clarke.

Para el control de la corriente, primero debemos obtener las corrientes i_α e i_β de referencia, para ello se necesitó la potencia activa de referencia, dada por el control de tensión, los voltajes alfa y beta, provenientes de la transformada de Clarke y por último la potencia de referencia reactiva, que para este caso tendrá un valor de cero dado que queremos que el factor de potencia este cercano a la unidad, todos estos datos son procesados en un bloque de subsistema, el cual, realiza la siguiente operación matemática.

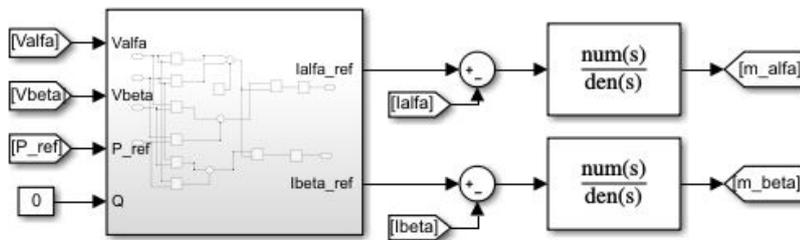


Figura 3.8 – Subsistema para la obtención de las corrientes de refrencia y controladores resonantes para las señales m_α y m_β .

Una vez obtenidas las señales $i_{\alpha Ref}$ e $i_{\beta Ref}$, se las comparó con las corrientes i_α e i_β respectivamente, para obtener los respectivos errores de las señales, los cuales van a ser procesado por el controlador resonante para obtener así las señales moduladas m_α y m_β . Las señales obtenidas tuvieron que pasar por la transformada inversa de Clarke para obtener las coordenadas de operación a,b y c y luego se las comparó con una señal tipo diente de sierra con un *Duty cycle* del 50% para así obtener las señales de los disparos de los IGBTs encargados de mantener el voltaje constante a la salida del rectificador.

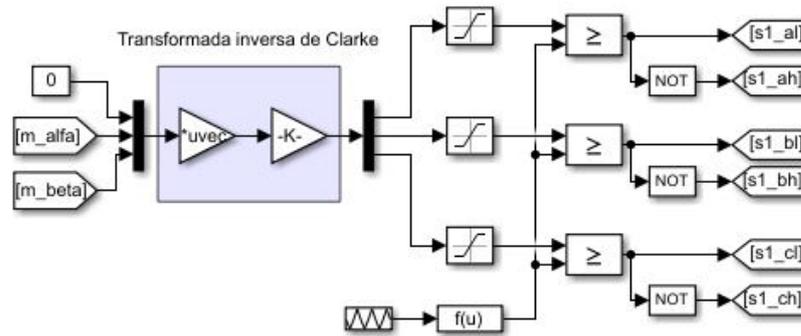


Figura 3.9 – Obtencion de las señales de disparo para los IGBTs del rectificador.

3.3. Banco de baterías

Para la implementación del banco de baterías en la simulación del sistema de propulsión híbrido eléctrico, se utilizó el bloque *Battery* de la librería de Simulink y el grafico *Voltage vs. Discharge capacity* dado por el fabricante de las baterías.

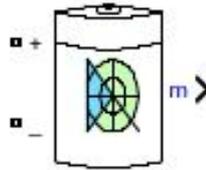


Figura 3.10 – Bloque *Battery* de la librería de Simulink.

Las baterías se consideraron a través del modelo de carga (3.3) y descarga (3.4) [referencia]:

$$f_1(it, i^*, Exp) = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} i^* - K \frac{Q}{Q - it} it + A \exp(-Bit), i^* > 0 \quad (3.3)$$

$$f_2(it, i^*, Exp) = E_0 - K \frac{Q}{it + 0,1Q} i^* - K \frac{Q}{Q - it} it + A \exp(-Bit), i^* < 0 \quad (3.4)$$

Donde:

E_0 : Voltaje constante en voltios.

K : Resistencia de polarización en Ohms.

Q : Capacidad máxima de la batería en Ah.

i^* : Corriente dinámica de baja frecuencia, en A..

A : Voltaje exponencial, en V.

it : Capacidad extraída, en Ah

B : Capacidad exponencial, en Ah.

A : Voltaje exponencial, en V.

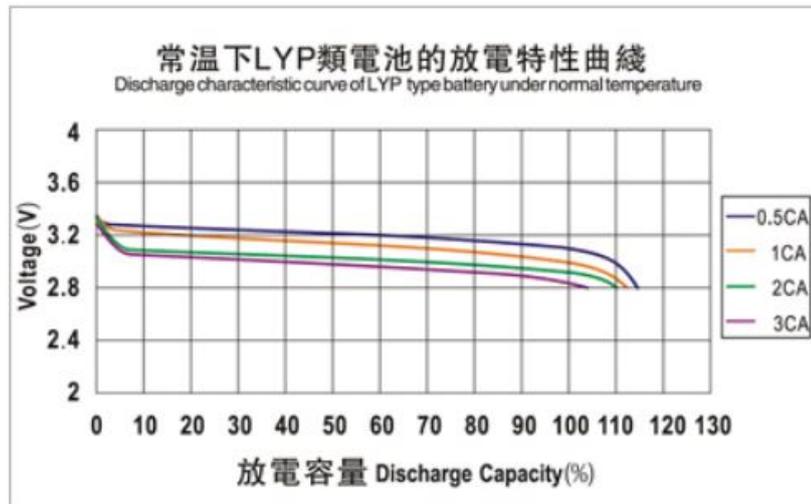


Figura 3.11 – Curva *Voltage vs. Discharge capacity* de la batería WB-LYP40AHA [7].

Con esta curva, podemos ajustar los valores del bloque de batería de Simulink, con la finalidad de obtener una curva aproximada que simule el comportamiento de la curva real. Ajustando los valores de la pestaña *Discharge* para obtener la curva 3CA, correspondiente a 120 A, se obtuvo la siguiente gráfica, la cual tiene un comportamiento similar a la gráfica dada por el fabricante.

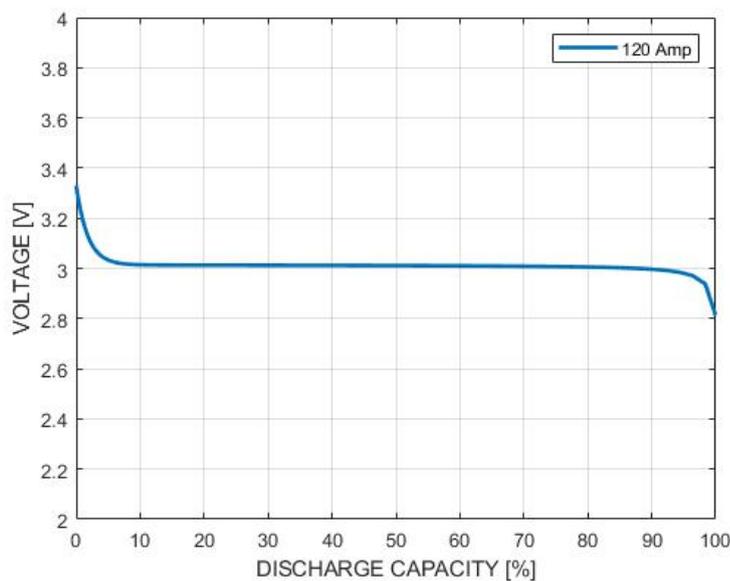


Figura 3.12 – Curva aproximada *Voltage vs. Discharge capacity* de la batería WB-LYP40AHA, utilizando el bloque *Battery* con el que cuenta la librería de Simulink.

Para el diseño final del banco de baterías y su implementación en la simulación del sistema, se colocó 78 de estos bloques puesto en serie, con la finalidad de obtener una curva equivalente *Voltage [V] vs. Discharge capacity [%]* para simular el comportamiento de estas baterías operando en conjunto. Una vez obtenida esta curva, se tomó nuevamente un bloque *Battery* para modelar la curva equivalente que se obtuvo con la operación en conjunto de las baterías, teniendo así, un solo bloque que simulé el

comportamiento total del banco de baterías que se va encontrar conectado al convertor DC-DC.

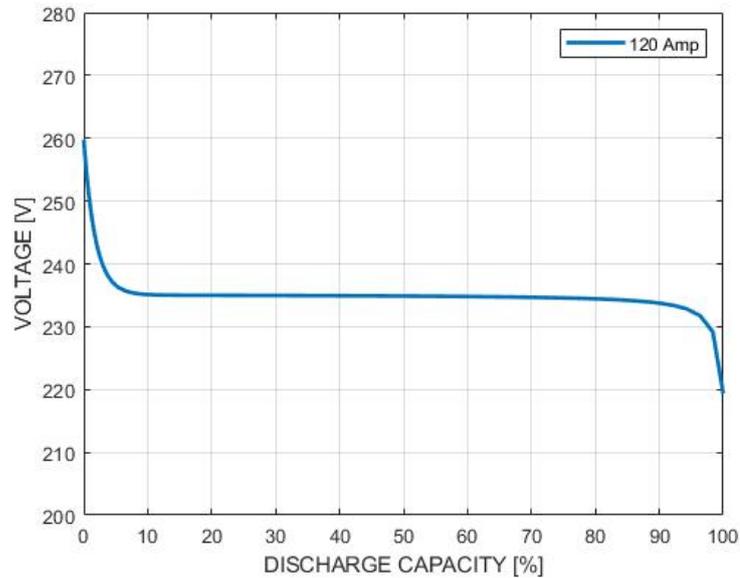


Figura 3.13 – Curva *Voltage [V] vs. Discharge capacity [%]* utilizando 78 bloques *Battery* colocados en serie para simular el banco de baterías del sistema.

3.4. Control del convertor DC-DC

Para la implementación de la simulación del control del convertor DC-DC en cascada, se tuvo que realizar algunos ajustes al modelo que los estudiantes de la Universidad Federal Juiz de Fora obtuvieron previamente, esto debido a que el sistema de gerenciamiento, enviaba señales de operación que el convertor debía utilizar para su correcto funcionamiento. El sistema de gerenciamiento enviaba cuatro señales hacia el convertor en cascada, estas son, corriente de descarga, corriente de carga, señal de activación para la carga del banco de baterías y la señal de activación para el control del voltaje del convertor.

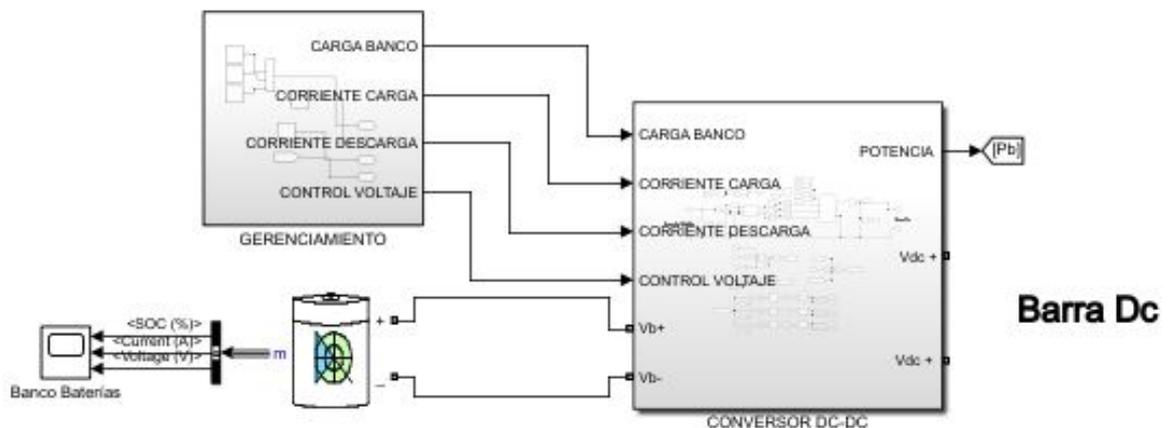


Figura 3.14 – Convertor DC-DC en cascada con sus respectivas señales de entradas y salidas.

Para el diseño de todo el control, se empezó por trabajar con la señal de corriente de carga, corriente de descarga y la señal de carga del banco de baterías, esta última señal de tipo booleano, con la ayuda del bloque *Switch* de la librería de Simulink, es la encargada de dejar pasar la corriente de carga o descarga de las baterías, si esta señal toma el valor de 1 , deja pasar el valor de la corriente de carga de las baterías, caso contrario pasa el valor de la corriente de descarga, debido a que el diseño del conversor Dc-Dc cuenta con tres ramales, la señal de corriente que pase deberá ser dividida para la misma cantidad, debido a que cada ramal va a contar con su respectivo control.

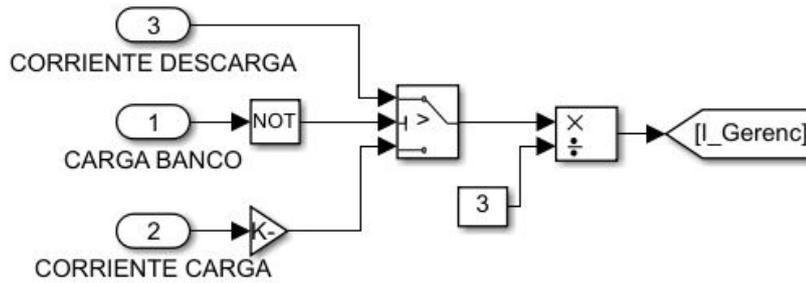


Figura 3.15 – L3gica para obtener la corriente de generaci3n seg3n las se1ales recibidas por el conversor DC-DC.

Por otro lado, se tiene un control de voltaje para la barra Dc, este se encuentra midiendo la tensi3n a la salida del conversor para compararlo con el valor de referencia y obtener un error, el cual, va a ser procesado por un control PI para obtener la corriente de descarga de las baterías necesaria, para mantener la tensi3n a la salida del conversor al valor de referencia fijado.

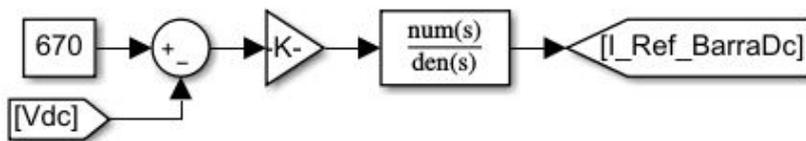


Figura 3.16 – Control de voltaje del conversor Dc-Dc para la barra Dc del sistema, cuando esta lo requiera.

La se1al de activaci3n para el control de voltaje, de tipo booleano, va a ser la encargada de dejar pasar la corriente de descarga calculada por el control de voltaje $I_{Ref\ Barra\ Dc}$ o la se1al de corriente de carga o descarga dada por el gerenciamiento I_{Gerenc} . Si esta se1al toma el valor de 1 , quiere decir que se requiere que el voltaje a la salida del conversor debe ser controlado, por lo tanto, va a dejar pasar el valor de corriente de descarga calculada por el controlador de voltaje, caso contrario cuando esta se1al tome el valor de 0 , va a dejar pasar el valor de corriente dada por el gerenciamiento ya sea corriente de carga o descarga, recordar que la selecci3n de esta corriente la define la se1al de carga del banco de baterías.

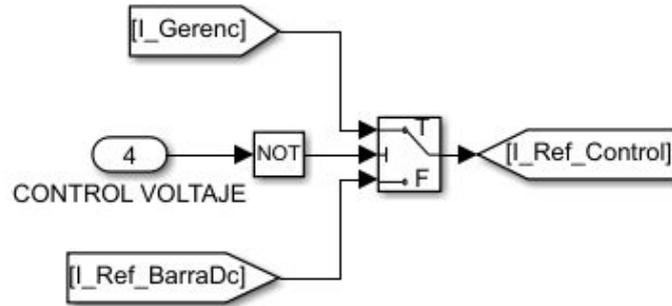


Figura 3.17 – Lógica para obtener la corriente de referencia para los controladores de corriente.

La corriente que logre pasar $I_{Ref_Control}$, va a servir como señal de referencia en los tres ramales para los controladores PI, estos controladores realizan la misma función, toman el error calculado entre la corriente de referencia y la corriente en su respectivo ramal, para obtener las señales moduladas, las cuales pasan por un bloque *PWM Generator (DC-DC)*, y así adquirir las señales de disparos para los IGBTs del convertor en cascada para su respectivo control. Hay que tomar en cuenta que en los bloques *PWM Generator (DC-DC)* se definió el desfase de 120° que existe en el generador de las señales en cada ramal.

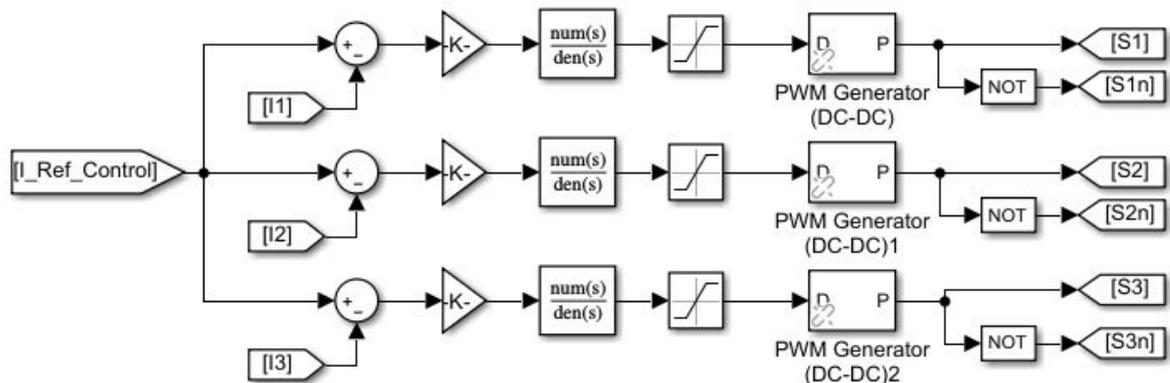


Figura 3.18 – Generación de señales para los IGBTs del convertor Dc-Dc.

3.5. Control del inversor

Para que el inversor pueda tener control sobre la velocidad del motor, primeramente, se tiene que trabajar en coordenadas d, q y 0 , para ello transformamos las corrientes a la salida del inversor, a las ya mencionadas utilizando la transformada de Park, por lo cual tendremos corriente de cuadratura I_q y corriente de eje directo I_d de las cuales una de ellas será la responsable de controlar la velocidad del motor.

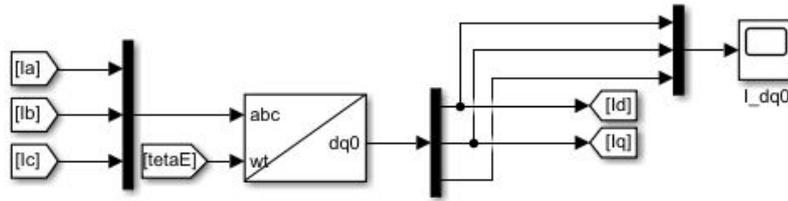


Figura 3.19 – Cambio de coordenadas de las corrientes a la salida del inversor utilizando la transformada de Park.

Para el control de la corriente I_d , necesitamos que ésta tome siempre un valor de cero, para ello utilizamos el control IP ya antes mencionado, el cual nos dará una mayor estabilidad y precisión al momento de controlar la corriente de eje directo I_d .

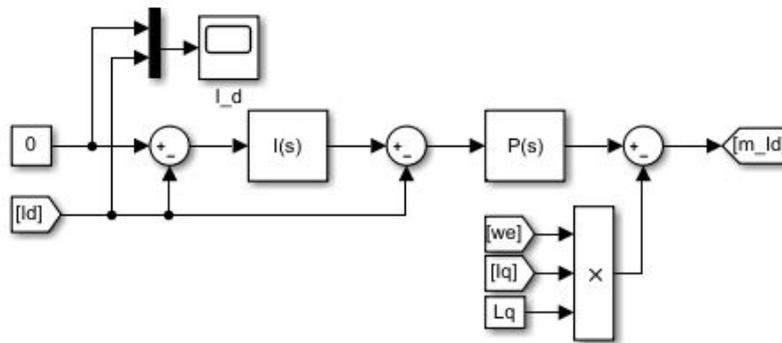


Figura 3.20 – Control de la corriente de eje directo I_d mediante un controlador IP.

Para el control de corriente de cuadratura I_q , primero debemos obtener el valor de referencia debido a que esta corriente va a ser la encargada de llevar el motor a su velocidad asignada, para ello, se utiliza la velocidad de referencia a la cual se requiere que gire el motor, transformamos la velocidad de referencia de rpm a rad/seg y luego esta velocidad mecánica a eléctrica multiplicando por los pares de polos de la máquina. Seguidamente, esta velocidad eléctrica que se tiene, se la compara con la velocidad real de la máquina para obtener un error el cual va a ser procesado nuevamente por un control IP para obtener así la referencia de la corriente de cuadratura I_q .

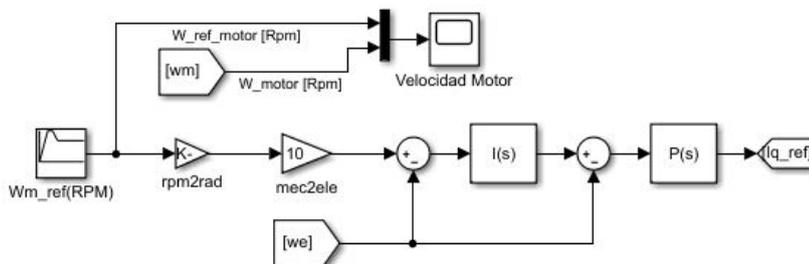


Figura 3.21 – Control de la velocidad del motor mediante un controlador IP para obtener la corriente de referencia del eje de cuadratura I_{qRef} .

Con este valor de referencia de la corriente de cuadratura, se lo compara con la corriente de cuadratura real de la máquina para obtener un error, el cual pasa por un

control IP y multiplicando por las variables correspondientes, se obtiene el control de la misma.

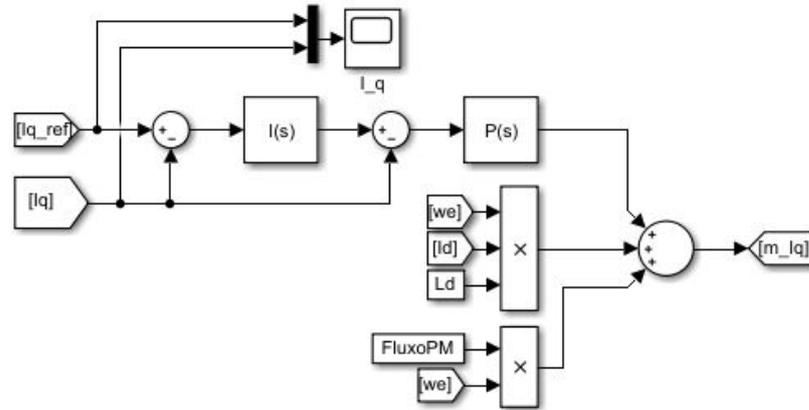


Figura 3.22 – Control de la corriente de eje de cuadratura I_q mediante un controlador IP.

Teniendo los módulos de las corrientes de eje directo y de cuadratura, se tendría que volver a las coordenadas de operación a, b y c, para ello se utilizó la transformada inversa de Park para obtener los valores en estas coordenadas, y seguidamente estas señales pasan al bloque PWM donde se van a generar las señales de disparos para los IGBTs, teniendo así el control de la velocidad de giro del motor.

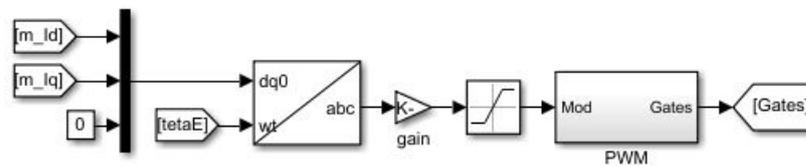


Figura 3.23 – Cambio de las señales a las coordenadas de operación a, b y c, para su posterior procesamiento del bloque PWM encargado de enviar las señales de pulso a los IGBTs.

El motor eléctrico se consideró a través del modelo que se expresan en el sistema de coordenadas solidario con el motor (dq0).

$$\frac{d}{dt}i_d = \frac{1}{L_d}v_d - \frac{R}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}p\omega_m i_q \quad (3.5)$$

$$\frac{d}{dt}i_q = \frac{1}{L_d}v_q - \frac{R}{L_d}i_q + \frac{L_q}{L_d}p\omega_m i_d - \frac{\lambda p\omega_m}{L_q} \quad (3.6)$$

$$T_e = 1,5p[\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (3.7)$$

Donde:

L_q, L_d : Inductancia de los ejes q y d.

R : Resistencia del bobinado del estator en Ohms.

i_q, i_d : Corriente de los ejes q y d.

V_q, V_d : Voltajes de los ejes q y d

ω_m : Velocidad angular del rotor.

λ : Amplitud del flujo inducido por los imanes permanentes del rotor en las fases del estator.

p: Numero de pares de polos.

T_e : Torque electromagnético.

RESULTADOS

Considerando la metodología usada para el diseño del control de cada uno de los convertidores y elementos electrónicos, en este capítulo se van a poner a prueba cada uno de esos diseños realizados, con la finalidad de evaluar posibles fallas o por otro lado si el elemento funciona como corresponde. Por último, se simulará todo el sistema de propulsión híbrido eléctrico, en donde se presentará la operación en conjunto de todos los elementos y convertidores electrónicos desarrollados anteriormente, durante la simulación se pondrán a prueba todas las etapas de vuelo de una aeronave, en donde cada parte que conforma el sistema, tendrá una función en específico durante cada cierto intervalo de tiempo. Para finalizar, se evaluarán si los parámetros más importantes del sistema cumplen con su objetivo a lo largo del tiempo y si se logran estabilizar rápidamente frente a perturbaciones que se presenten en la operación.

4.1. Simulación del Rectificador

Para comprobar la simulación del rectificador y su correcto funcionamiento como controlador de voltaje de la barra DC del sistema de propulsión híbrido eléctrico, se lo puso a prueba junto al turbogenerador, conectado en su entrada, y en su salida, además del capacitor de la barra DC de $250 \mu\text{F}$, se conectaron dos resistencias en paralelo de 30Ω cada una, que actuarán como carga del sistema.

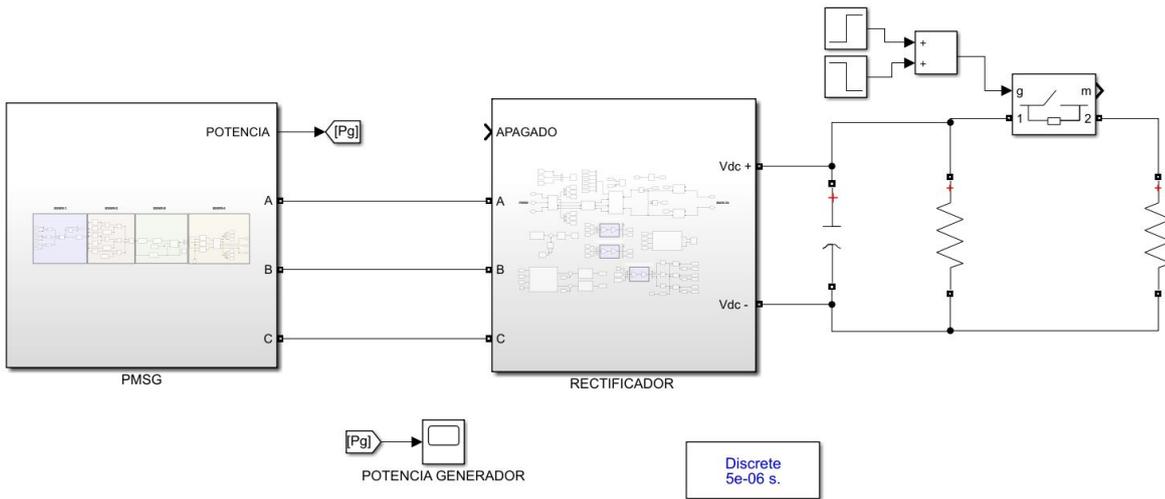


Figura 4.1 – Simulación del turbogenerador operando en conjunto con el rectificador para suplir la potencia de las resistencias en cualquier instante de tiempo.

Cuando las dos resistencias se encuentren en operación, debido a su configuración en paralelo, se tendrá una carga total de sistema de 15Ω , mientras que, si sólo una de ellas se encuentra en operación, se tendrá una carga total del sistema de 30Ω . La simulación tendrá en total un tiempo de 6, de los cuales en los primeros 2 se van a encontrar en operación solamente una de las resistencias, a partir del 2 s hasta los 4 s, se cerrará un interruptor que coloca en operación la segunda resistencia, simulando una entrada de carga al sistema, luego en los dos últimos segundos, se abre el interruptor volviendo a las condiciones iniciales de operación, es decir, solamente se encuentra en operación una de las resistencias.

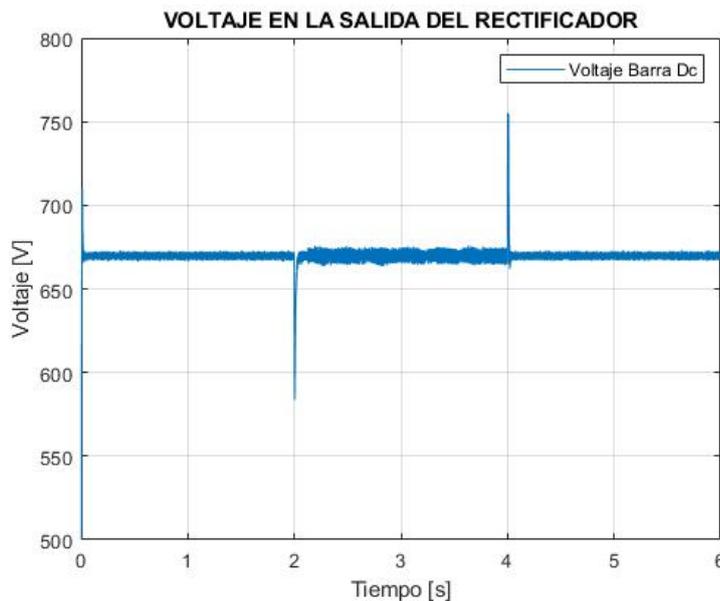


Figura 4.2 – Comportamiento del voltaje a la salida del rectificador durante la simulación.

Como se observa en los resultados de la simulación, el voltaje en la barra DC o salida del inversor, se mantiene en todo momento controlado en su valor de referencia asignado

de 670 V. En los primeros 2 s se muestra que el rectificador alcanza su valor de referencia casi de manera instantánea, seguidamente en el segundo 2 de la simulación, se aprecia como entra en operación la segunda resistencia, provocando que el turbogenerador envíe más potencia hacia la carga, esto se aprecia en el rizado del voltaje, en este intervalo de tiempo es mayor debido al incremento de la potencia, pero con un margen de error menor al 5 %, al segundo 4 se aprecia como este rizado vuelve a sus condiciones iniciales debido a que la segunda resistencia salió de operación, tanto en el segundo 2 y 4 , se puede apreciar que la estabilización del sistema actúa de manera rápida, llegando al estado estable en un aproximado de 20 ms , ratificando que el control de voltaje de rectificador actúa de manera satisfactoria.

4.2. Simulación del Convertor DC-DC

Para probar el funcionamiento de los controladores del convertor DC-DC, se van a presentar varios escenarios dentro de una misma simulación, debido a que se debe comprobar tanto el control de corriente como el control de voltaje con los que cuenta. Para ello se conecta a la entrada del convertor el banco de baterías y las respectivas señales que van a simular los comandos del gerenciamiento, por otro lado, en la salida se va a tener el capacitor de la barra DC , dos resistencias en paralelo de 35Ω cada una y una fuente de voltaje Dc de 670 V, simulando el voltaje a la salida del rectificador.

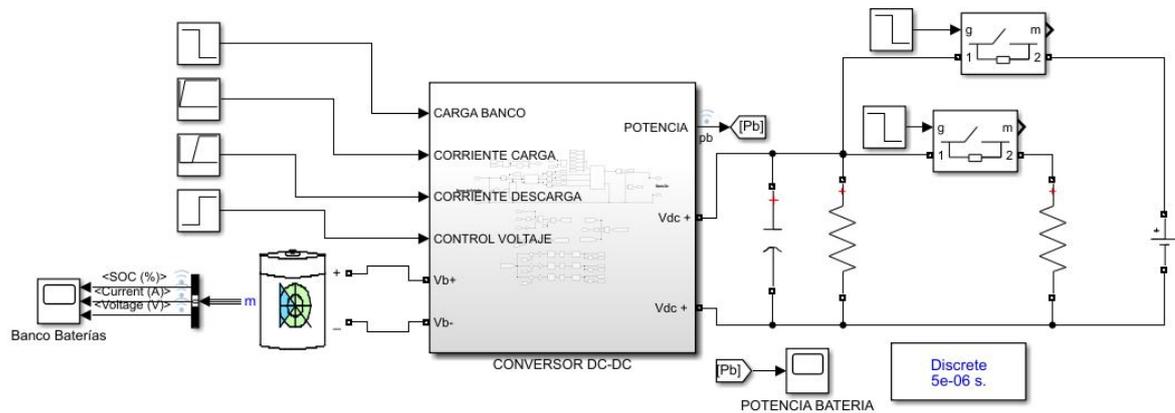


Figura 4.3 – Simulación del convertor operando en conjunto a una fuente de voltaje para la respectiva carga y descarga del banco de baterías.

La simulación tiene una duración total de 6 en donde, para esta simulación las señales de sistema de gerencia se ingresan manualmente. En los primeros 2 las señales son ajustadas para que el banco de baterías cargue con una corriente que va a ir en aumento desde los 0 A hasta mantenerse en un valor constante de 10 A, cabe recalcar que la potencia para la carga del banco de baterías la suministra la fuente de voltaje DC, seguidamente a partir de los 2 s hasta los 4 s, el banco va a comenzar su descarga, entregando una corriente a las resistencias en paralelo, que va desde los 0 A hasta mantenerse en un valor constante de 10 A, a partir de los 4 s hasta los 6 s , la fuente de voltaje DC se va a desconectar , dando paso ahora, a que sea el convertor DC-DC sea el que regule el voltaje a 670 V, por último a los 5 s de la simulación, un interruptor va dejar sin operación una resistencia provocando una alteración del sistema, el cuál el mismo control de voltaje que se encuentra en operación va a tener regular.

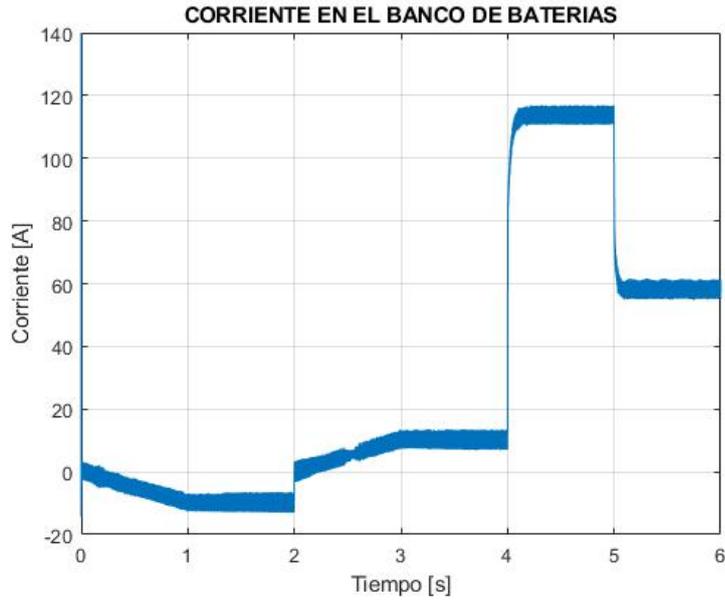


Figura 4.4 – Comportamiento de la corriente del banco de baterías durante la simulación.

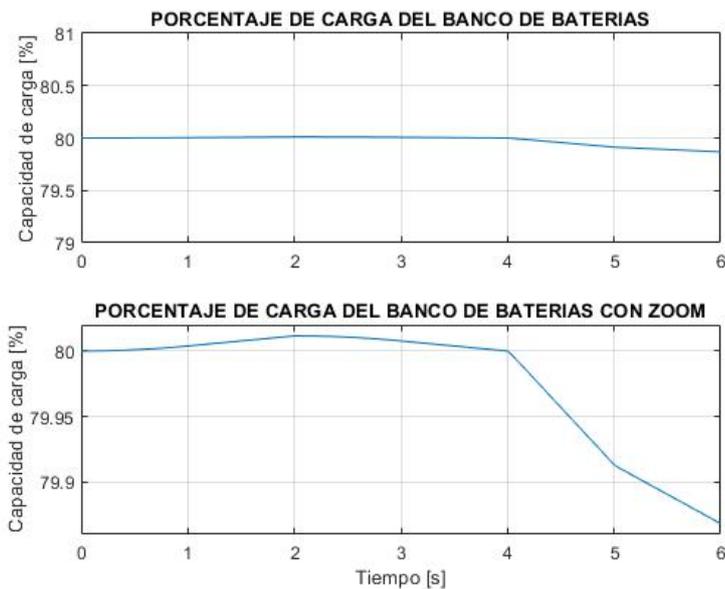


Figura 4.5 – Comportamiento de la capacidad de carga del banco de baterías durante la simulación.

Observando los resultados del comportamiento de la corriente durante toda la simulación, se tiene que, de 0 a 2 la corriente toma un valor de negativo, esta empieza incrementar hasta que se estabiliza en el primer segundo de la simulación en un valor de -10 A, la corriente negativa nos indica que efectivamente el banco de baterías se encuentra cargando con ese valor de corriente, si observamos también el comportamiento del porcentaje de carga del banco de baterías vemos que este empezó en 80 % de carga y fue aumentando hasta el segundo 2 , lo cual se aprecia de mejor manera la carga de las baterías en ese intervalo de tiempo. A partir del segundo 2 en adelante, el comportamiento de la corriente es el mismo, pero en sentido inverso, es decir la corriente

empieza a aumentar desde 0 A hasta mantener en un valor constante de 10 A a partir del segundo 3, lo que se traduce a que un valor de corriente positivo indica que el banco de baterías se encuentra entregando potencia a la carga, se tiene una mejor noción de lo que está ocurriendo en el banco de baterías si observamos la gráfica del porcentaje de carga, apreciamos que ahora a partir del segundo 2 , el banco de baterías se empieza a descargar. En el segundo 4, tenemos la salida de la fuente de voltaje DC , por lo cual para mantener el voltaje constante a 670 V en la barra DC, se enciende el control de voltaje del conversor, y pasa el banco de baterías a entregar toda la potencia que requiera la carga, esto se ve reflejado en la gráfica de la corriente del banco de baterías, se tiene un aumento de la corriente hasta un valor de casi 120 A a partir del segundo 4, en el segundo 5 , un switch saca de funcionamiento una de las resistencias, aligerando la carga y por ende la corriente se ve disminuida hasta un valor aproximado de 60 A. Esto mismo se puede apreciar en la gráfica del porcentaje de carga, donde vemos que a partir del segundo 4, la curva de descarga es más pronunciada, lo cual indica que el banco de baterías se encuentra entregando una mayor potencia.

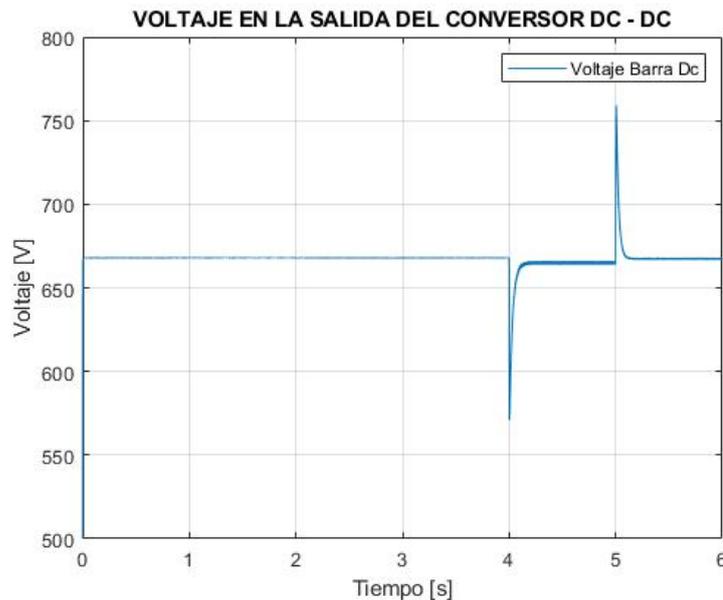


Figura 4.6 – Comportamiento del voltaje a la salida del conversor Dc - Dc durante la simulación.

Si vemos el comportamiento del voltaje en la barra DC , tenemos el comportamiento esperado, es decir, mientras la fuente de voltaje se encuentre en operación el voltaje siempre debe mantenerse en un valor de 670 A, como observamos en la gráfica del voltaje a la salida del conversor DC-DC , el voltaje es constante hasta el segundo 4 en donde sale de operación la fuente DC y entra en funcionamiento el control de voltaje del conversor, vemos que logra mantener el voltaje en la barra sin que se caiga en el segundo 5 , ocurre una pérdida de carga lo cual, el control del conversor logra corregir casi de manera instantánea, cabe recalcar que en ambos picos el tiempo de estabilización se encuentra en torno a los 100 ms.

4.3. Simulación del Inversor

Para poner a prueba el funcionamiento del inversor, primeramente, tenemos que colocar los parámetros correspondientes al motor eléctrico, utilizando el bloque *Permanent Magnet Synchronous Machine* de la librería de simulink. Este bloque de simulink, requiere de entrada el torque de carga del motor, para ello el área de mecánica del proyecto facilitó dos ecuaciones del comportamiento del par mecánico de acuerdo a la velocidad del motor y la etapa de vuelo en la que se encuentra, una ecuación para la etapa de subida (4.1) y otra ecuación de torque para la etapa de crucero o descenso (4.2).

$$T_{subida} = 1,51576 \times 10^{-5} N^3 - 7,1729 \times 10^{-3} N^2 + 1,08154 N - 22,96 \quad (4.1)$$

$$T_{Cruc/Desc} = 8,24233 \times 10^{-6} N^3 - 4,90159 \times 10^{-3} N^2 + 0,94087 N - 12,979 \quad (4.2)$$

Donde:

N: Velocidad de la máquina en rad/s.

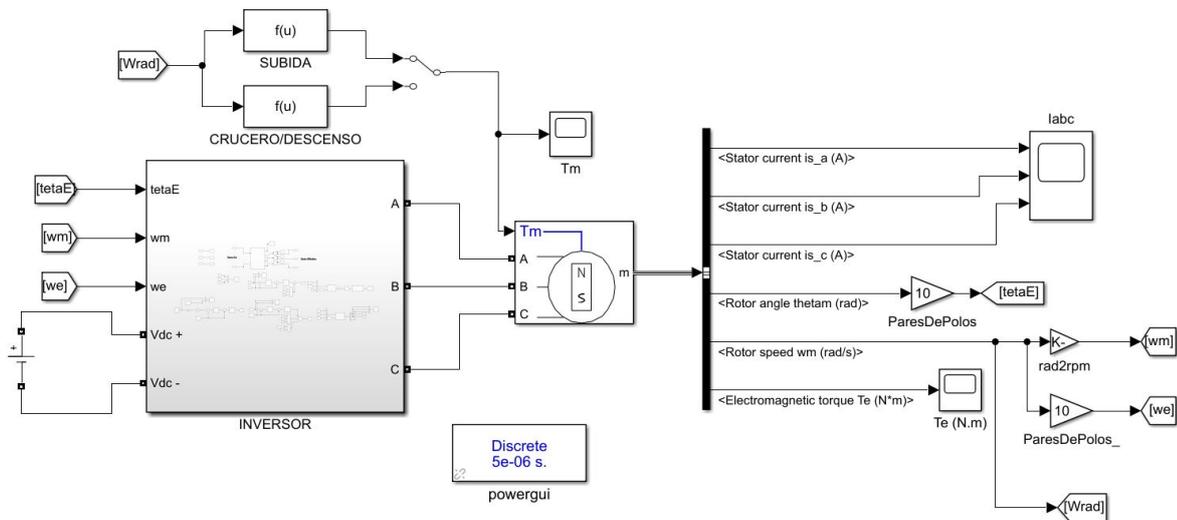


Figura 4.7 – Simulación del inversor operando en conjunto al motor eléctrico para el respectivo control de su velocidad.

En la entrada del inversor irá conectada una fuente de voltaje DC, simulando la barra DC del sistema de propulsión híbrido eléctrico, aparte de ello, el inversor también recibirá algunos parámetros del motor los cuales le ayudaran al control de la velocidad. Por otro lado, en la salida del inversor irá conectado únicamente el motor eléctrico que será la carga del sistema. Para la simulación, tendremos un tiempo total de 6 segundos en donde se usará únicamente el par de subida, que es el que presenta mayor carga, y se variará la velocidad de referencia, simulando diferentes etapas de vuelo del avión.

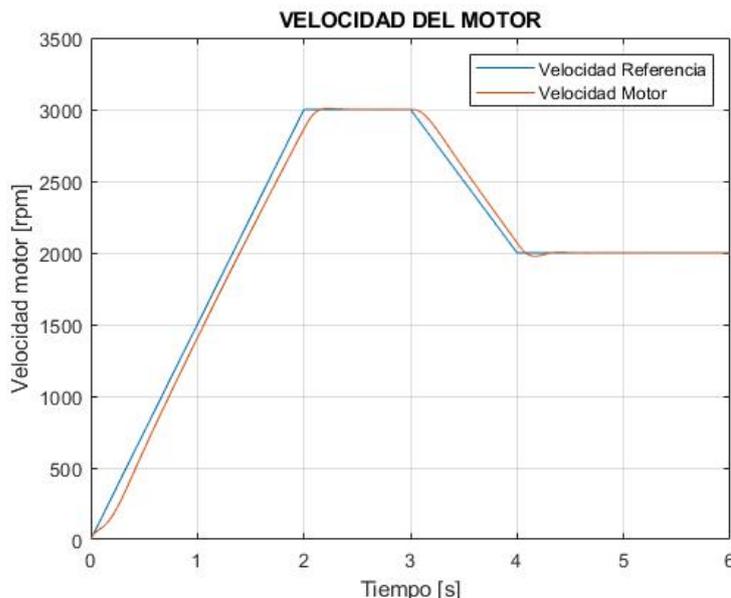


Figura 4.8 – Comportamiento de la velocidad del motor y velocidad de referencia durante la simulación.

Como se observa en la gráfica, la velocidad del motor eléctrico sigue a la velocidad de referencia en cualquier instante de tiempo, se puede apreciar un ligero desfase cuando la velocidad no se encuentra constante, debido a que existe un error de estado estacionario en su entrada, pero una vez que la velocidad de referencia es constante, no existe desfase alguno entre esta velocidad y la velocidad real del motor, ratificando así el correcto funcionamiento del control de velocidad del inversor.

4.4. Simulación del Sistema de propulsión híbrido eléctrico

Finalmente se probó el sistema completo de propulsión híbrido eléctrico en la simulación, haciendo operar en conjunto los convertidores electrónicos descritos anteriormente, para que actúen en sincronía según las diferentes etapas de vuelo de una aeronave, con la finalidad de observar el posible comportamiento de los parámetros más importantes del sistema.

Para ello, se conecta la salida del rectificador con la salida del convertidor DC-DC formando la barra DC de todo el sistema, cabe recalcar que en la barra DC está conectado el capacitor previamente diseñado con $250\mu\text{F}$. El voltaje en la barra DC va a ser el parámetro más importante a medir, debido a que esta se debe mantener constante y estable frente a cualquier perturbación que exista en el sistema, así mismo desde la barra DC se envía toda la potencia necesaria que requiera la hélice en cualquier instante de tiempo por medio del inversor, este será el encargado de manejar esa potencia para mantener la velocidad del motor a la velocidad deseada.

También se tiene, en el convertor DC-DC, señales de entrada las cuales fueron colocadas manualmente con la finalidad de simular las señales del sistema de gerenciamiento que el convertor va a recibir.

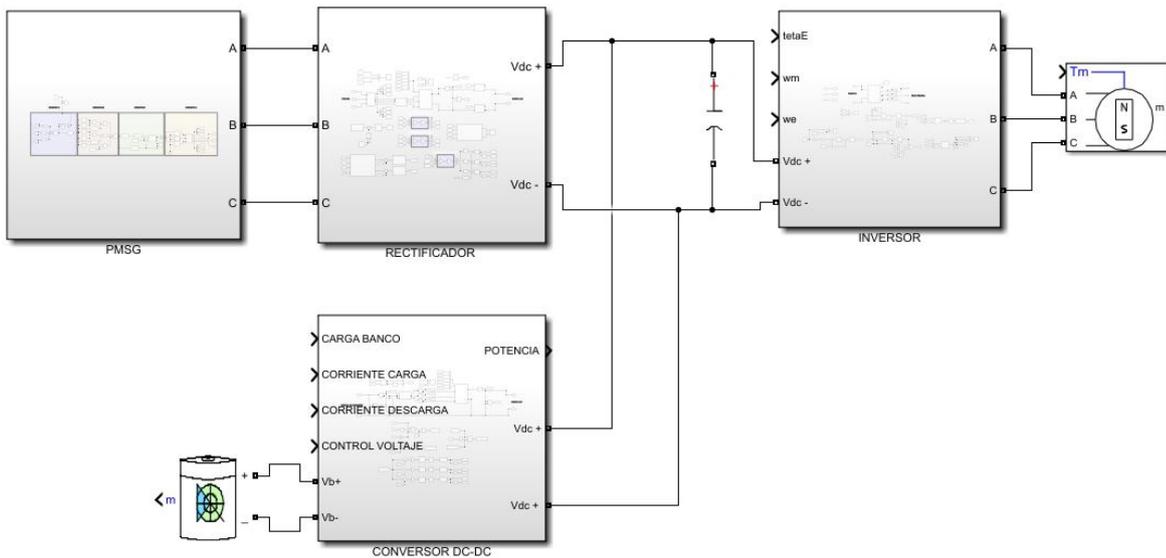


Figura 4.9 – Configuración para la simulación del sistema de propulsión híbrido eléctrico, utilizando, los convertores electrónicos como Rectificador, Conversor DC-DC e Inversor.

La simulación tiene una duración total de 10 s, en donde se analizan varias etapas de vuelo de una aeronave, como el despegue, crucero y descenso, cada dos segundos el sistema tendrá que realizar una acción diferente. En los primeros dos segundos, ocurre etapa de despegue de la aeronave, en la cual se acelera de 0 rpm hasta los 3000 rpm, seguidamente se mantiene esta velocidad por dos segundos más, para luego iniciar la etapa de crucero en donde la velocidad pasa de 3000 rpm hasta los 2000 rpm, esta transición de velocidad inicia desde el segundo 4 hasta el 6, luego, esta velocidad se mantiene constante hasta el segundo 8, donde a partir de este tiempo, la aeronave inici su etapa de descenso para culminar con la simulación en el segundo 10.

En la figura 4.10, se muestra la respectiva operación de todo el sistema durante el tiempo de 10 s de simulación, en ella se tiene la respectiva operación que se encuentra realizando cada elemento del sistema en los diferentes fracciones de tiempo y etapas de vuelo, de manera general se puede decir que, cada vez que el turbogenerador se encuentra en operación, este va a esta supliendo la carga del sistema y cargando el banco de baterías , por el otro lado, cada vez que el turbogenerador se encuentre fuera de servicio el banco de baterías junto el conversor DC-DC , serán los encargados de regular el voltaje en la barra DC y por ende suplir la totalidad de la carga del sistema.

	TIEMPO DE SIMULACIÓN				
	0 seg. – 2 seg. [Despegue]	2 seg. – 4 seg. [Despegue]	4 seg. – 6 seg. [Crucero]	6 seg. – 8 seg. [Crucero]	8 seg. – 10 seg. [Descenso]
TURBO GENERADOR	Se encuentra fuera de operación	Se encuentra en operación supliendo toda la carga del sistema y a la vez, cargando el banco de baterías	Se encuentra supliendo parte de la carga del sistema.	Se encuentra fuera de operación	Se encuentra en operación supliendo toda la carga del sistema y a la vez, cargando el banco de baterías
BANCO DE BATERÍAS	Se encuentra supliendo la totalidad de la carga del sistema. Actúa el control de voltaje de conversor Dc-Dc	Se encuentra en estado de carga recibiendo potencia del generador, con la corriente de carga asignada por el gerenciamiento	Se encuentra supliendo parte de la carga del sistema con la corriente de descarga asignada por el gerenciamiento	Se encuentra supliendo la totalidad de la carga del sistema. Actúa el control de voltaje de conversor Dc-Dc	Se encuentra en estado de carga recibiendo potencia del generador, con la corriente de carga asignada por el gerenciamiento
MOTOR ELÉCTRICO	Se encuentra acelerando de 0 rpm hasta 3000 rpm	Se encuentra con una velocidad constante de 3000 rpm	Se encuentra desacelerando de 3000 rpm hasta los 2000 rpm	Se encuentra con una velocidad constante de 2000 rpm	Se encuentra desacelerando de 2000 rpm hasta los 0 rpm

Figura 4.10 – Descripción de operación de cada uno de los elementos que conforman el sistema de propulsión híbrido eléctrico para distintos intervalos de tiempo.

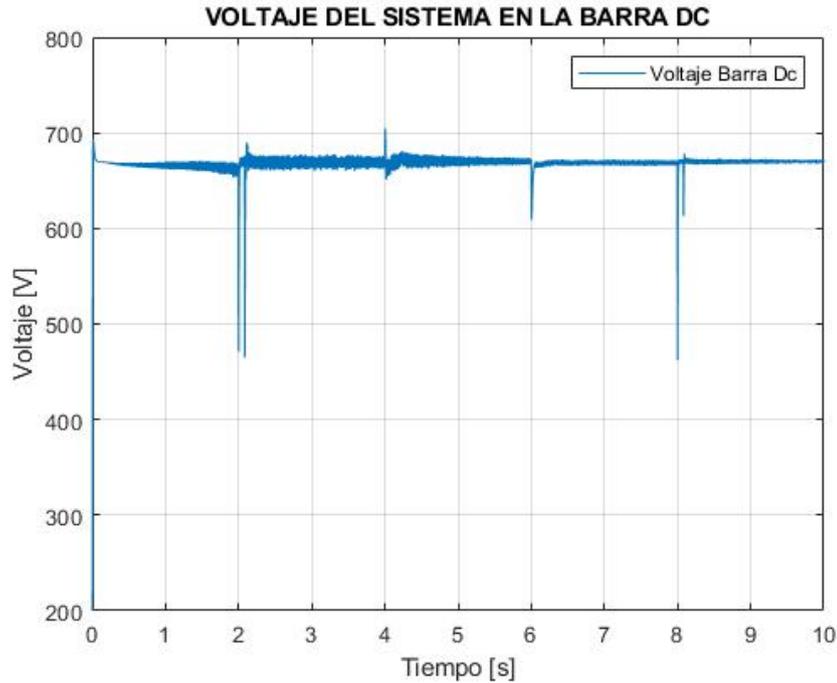


Figura 4.11 – Comportamiento del voltaje en la barra DC del sistema durante el tiempo de simulación.

Una vez concluida la simulación, se aprecia que en ciertos sectores existen mayores rizados de voltajes que en otros, además se tiene instantes de tiempo en donde se observan pulsos de voltajes, sin embargo, el voltaje en la barra DC, en todo instante se mantiene en un valor promedio de 670 V. En los dos primeros segundos de simulación están actuando solamente el banco de baterías, el rizado del voltaje en la barra Dc va en aumento, y esto se debe a que el motor se encuentra incrementando su altura en la etapa de despegue, y por ende va necesitando cada vez una mayor potencia, la cual se ve reflejado en el aumento del rizado del voltaje, a partir del segundo 2 hasta el segundo 4, entra en operación el turbogenerador y por esta razón vemos un pulso en la señal de voltaje en ese instante de tiempo, 80 ms después de los 2 s, el control de voltaje del convertor DC-DC sale de operación, y entra en modo de carga del banco de baterías, por esta razón vemos un segundo pulso en la señal del voltaje durante este intervalo de tiempo, el rizado en este intervalo de tiempo es el mayor de toda la simulación, debido a que la carga es máxima durante esta etapa. A partir del segundo 4 hasta el 6, se inicia la etapa de crucero, durante este intervalo de tiempo, la potencia de carga irá disminuyendo, y esto se ve reflejado en la disminución en el rizado del voltaje, en el segundo 4 se aprecia también un pulso de voltaje, y esto se debe a que el banco de baterías entra en su modo de descarga con la corriente de descarga asignada, supliendo cierta parte de la carga. En el segundo 6, aparece otro pulso de voltaje, y es debido a que el turbogenerador en ese instante de tiempo, sale de operación y entra nuevamente el control de voltaje del convertor Dc-Dc, este control en la barra Dc del sistema, se mantiene hasta el segundo 8 de simulación. Finalmente, en los dos últimos segundos de la simulación, la aeronave entra en etapa de descenso, y el generador entra en operación, por lo cual, se aprecia un primer pulso de voltaje a los 8 segundos, indicando que el generador entra al sistema, y 80 ms después, otro pulso de voltaje indicando que el control de voltaje del convertor Dc-Dc ha salido de operación y su vez, entra en modo

de carga para el banco de baterías, en este intervalo de tiempo, la potencia es mínima por lo cual el rizo de voltaje en la barra Dc se reduce.

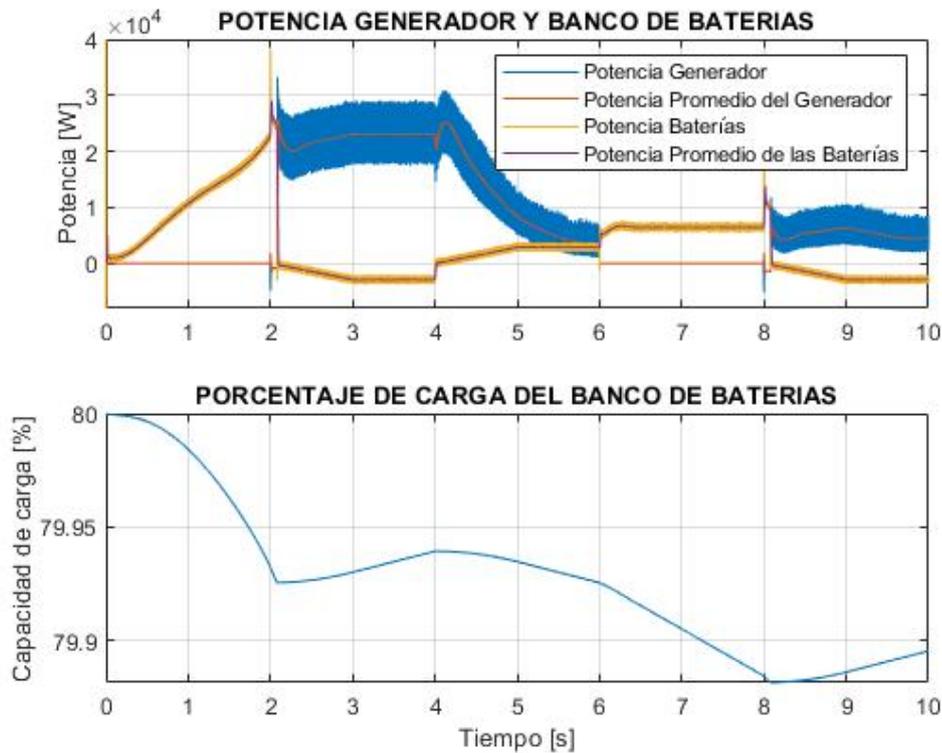


Figura 4.12 – Comportamiento de la potencia del turbogenerador y banco de baterías a lo largo de toda la simulación y comportamiento del porcentaje de carga del banco de baterías.

Para analizar los resultados de las potencias del turbogenerador y banco de baterías, lo haremos así mismo en intervalos de 2 s. Primeramente, en la etapa del despegue notamos como la potencia del banco de baterías va en aumento hasta los 2 s, así mismo si vemos el gráfico del porcentaje de carga del banco, vemos como este va disminuyendo debido a que se están descargando las baterías, cabe recalcar que para el despegue que corresponde a este intervalo de tiempo, el turbogenerador se encuentra fuera de servicio y por esa razón su potencia se mantiene en un valor de cero. En el intervalo de 2 a 4 s, el generador entra en operación y por ende va a ser el encargado de suplir la carga y cargar el banco de baterías, esta acción se ve refleja en la gráfica de potencia en ese intervalo de tiempo, donde se observa que el generador pasó a entregar una potencia de próximamente 25 kW, de los cuales, 5 kW son para la carga del banco de baterías y el resto para suplir la carga del sistema, se aprecia que la potencia del banco de baterías tiene un valor negativo, lo cual indica que se encuentra en estado de carga. A partir del segundo 4 hasta el 6, ambos elementos, tanto el banco de baterías como el turbogenerador, están entregando potencia a la carga, en este intervalo de tiempo se observa como el banco de baterías pasa de tener una potencia negativa a ir incrementando de manera positiva, mientras que esta potencia aumenta, la potencia del turbogenerador disminuye paulatinamente debido al apoyo de del banco para suplir la carga del sistema. En el siguiente intervalo de tiempo de dos segundos, solamente se va a encontrar en operación el banco de baterías, teniendo activo su control de voltaje,

debido a que el turbo generación salió de operación, por tal motivo en la gráfica se aprecia como toda la potencia está siendo entregada por las baterías, mientras que la potencia del turbogenerador se mantiene en cero. En el último tramo de tiempo, es decir a partir de los 8 s, se encuentra la etapa de descenso, donde entra nuevamente en operación únicamente el turbogenerador, cargando a su vez el banco de baterías. Todos los estados de carga y descarga de las baterías, pueden ser visto de una mejor manera en el grafico del porcentaje de carga del banco, donde, si se ve una pendiente positiva significa que se encuentra en estado de carga y una pendiente negativa indica un estado de descarga de las mismas.

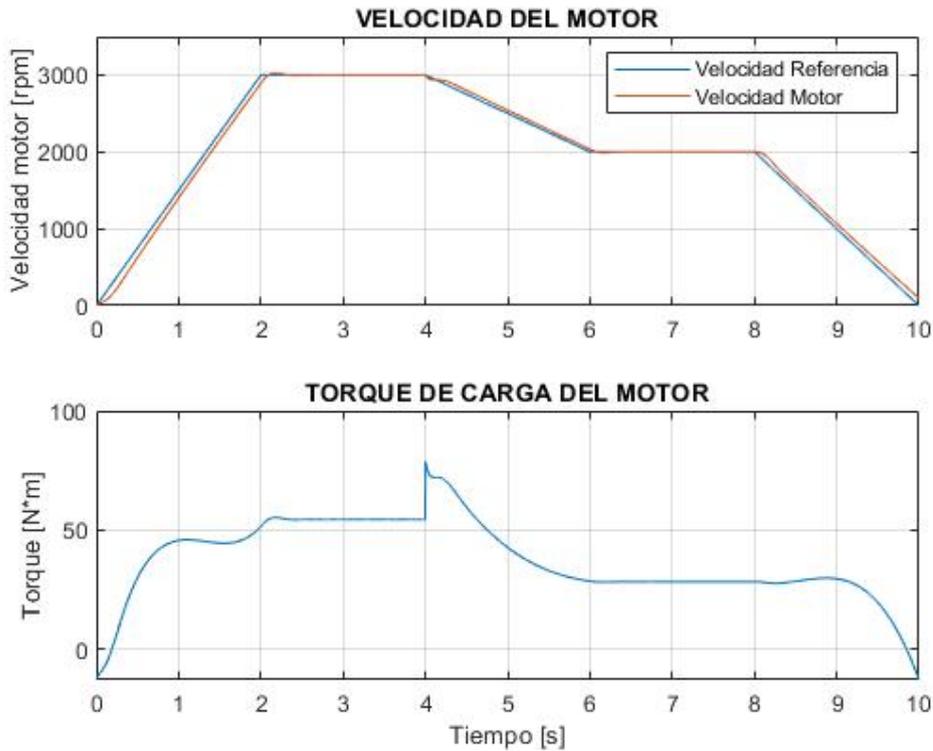


Figura 4.13 – Velocidad del motor eléctrico en cualquier instante de tiempo de simulación y gráfica del torque de carga de la hélice de la aeronave.

En la gráfica de la velocidad del motor eléctrico, vemos que, durante toda la simulación, la velocidad del motor sigue a la velocidad de referencia, lo que indica que se mantiene el control durante todo el tiempo de operación de la aeronave, también vemos como varia el torque de carga a través del tiempo, y vemos el cambio de etapa en el segundo 4, donde el torque pasa de su ecuación de despegue, a su ecuación de crucero y descenso en donde presenta menor carga para el sistema.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. Conclusiones

En este trabajo se presenta la simulación del sistema de propulsión híbrido eléctrica como parte una colaboración con la Universidad Federal Juiz de Fora (UfJf). Esta simulación permite evaluar las dimensiones de los equipos necesarios, la simulación fue realizada tomando en cuenta varios parámetros con los que cuentan estos elementos y máquinas a utilizarse en el laboratorio de la UfJf, y una vez este haya finalizado su construcción y se empiecen a desarrollar pruebas del sistema híbrido propuesto, se espera que el comportamiento real del sistema, sea similar al mostrado en la simulación para los distintos escenarios. Los convertidores electrónicos implementados tuvieron un comportamiento satisfactorio frente a diversas perturbaciones presentadas a lo largo de la simulación, logrando el objetivo más importante del sistema que es de mantener la barra DC regulada en un voltaje de 670 V, lo cual, ratifica el correcto funcionamiento de los controladores desarrollados, logrando manejar una potencia de hasta 35 kW por parte del rectificador y hasta 40 kW por parte del convertor DC-DC. Se cumplió con todos los objetivos propuestos al inicio de este documento con la finalidad de obtener los mejores resultados posibles, para el turbogenerador, se logró obtener, mediante datos estadísticos tomados con anterioridad, dos ecuaciones que fueron de gran ayuda para determinar el voltaje y frecuencia en los terminales del turbogenerador de acuerdo a la potencia que se encuentre enviando, también se modeló con mucha precisión el comportamiento del banco de baterías a ser utilizado, tomando como referencia datos del fabricante y graficas dadas por el mismo para una sola batería, con lo cual juntando varios modelos de una sola batería, se obtuvo el modelo completo del banco con una gran similitud al que se tendrá implementado una vez se empiecen las pruebas en el laboratorio.

5.2. Trabajos Futuros

Teniendo el sistema simulado en su totalidad, se podrán realizar modificaciones en el mismo con la finalidad de observar cómo afectan a los parámetros más importantes del sistema, y así poder analizar si las modificaciones realizadas, benefician o perju-

dicen al sistema de manera general, antes de ser implementado de manera real en el laboratorio. Como trabajo futuro, una de las posibles modificaciones que se podría realizar al sistema, es el reemplazo de los convertidores electrónicos, con los que cuenta actualmente, por convertidores tipo SRC o TAB/QAB, los cuales operando con IGBTs de silicio de carbono (Sic) , son capaces de controlar de una mejor manera el voltaje en la barra DC , ya que manejan potencia elevadas sin perder mucho control y reduciendo de manera significativa el rizado del voltaje en la barra DC y a la vez aumentando la eficiencia de los convertidores hasta un 97% [12] . También, con un convertidor multipuerto se pueden mejorar los picos de voltaje que existen en la transición entre el turbogenerador y el banco de baterías, haciendo así, la barra DC más estable y confiable frente a perturbaciones o fallas que se puedan presentar.

Bibliografía

- [1] V. Torres, V. Albuquerque, M. Rendón, and M. Rodrigues, “Interleaved bidirectional dc-dc converter for application in hybrid propulsion system: Modeling and control,” 12 2019.
- [2] V. K. Khanna, *Insulated gate bipolar transistor IGBT theory and design*. John Wiley & Sons, 2004.
- [3] SEMIKRON, *SKiiP39AC12F4V19*, 2016.
- [4] S. Nascimento, A. Silva, C. Sánchez, J. Oliveira, M. Rendón, M. Rodrigues, and P. Almeida, “Projeto de controladores ressonantes para condicionamento de potência em geradores de alta frequência,” 08 2020.
- [5] P. G. Barbosa, *Teoria das Potencias Instantaneas*. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2019.
- [6] O. Gomes, E. Campos, S. Nascimento, M. Rendón, M. Rodrigues, P. Almeida, and J. Oliveira, “Controle ip de velocidade de uma máquina síncrona de Ímãs permanentes aplicada à propulsão aeronáutica,” 08 2020.
- [7] GWL, *Winston LYP40AHA cell*, 2017.
- [8] G. A. Rodrigo and A. B. R. de Villa, “El impacto ambiental del transporte aéreo y las medidas para mitigarlo,” 2013.
- [9] S. Devassy and B. Singh, “Modified p-q theory based control of solar pv integrated upqc-s,” in *2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2016, pp. 1–8.
- [10] G. Balen, A. R. Reis, H. Pinheiro, and L. Schuch, “Modeling and control of interleaved buck converter for electric vehicle fast chargers,” in *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, 2017, pp. 1–6.
- [11] A. Bouchakour, A. Borni, L. Zaghba, M. Brahami, and H. Idriss, “Performance comparison of pi and ip controllers used to control a dc machine powered by a photovoltaic generator,” *Proceedings of Engineering & Technology (PET)*, vol. 9, 01 2015.
- [12] G. Buticchi, L. Costa, and M. Liserre, “Improving system efficiency for the more electric aircraft: A look at dc-dc converters for the avionic onboard dc microgrid,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 11, no. 3, pp. 26–36, 2017.

Apéndice

Cap. 6

MODELOS DE SIMULINK

6.1. Modelo del Sistema de Propulsión Híbrido Eléctrico en Simulink - MATLAB

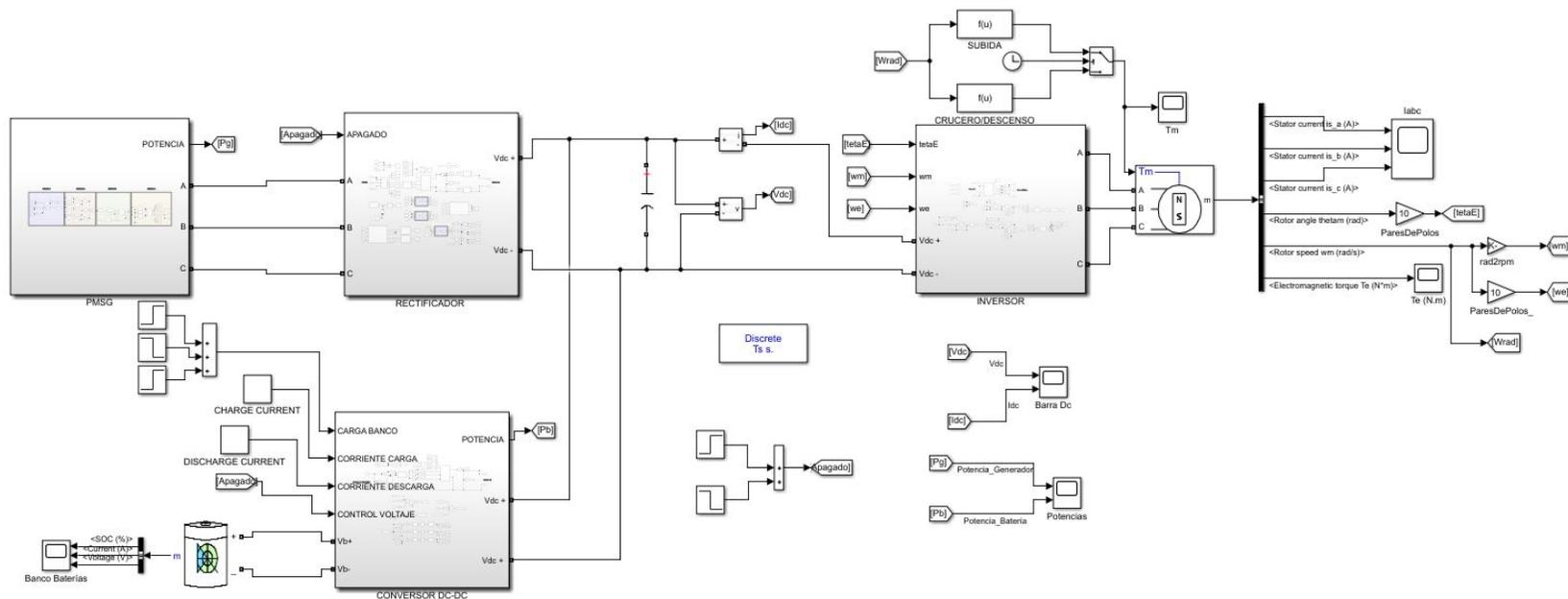


Figura 6.1 – Simulación completa del sistema de propulsión híbrido eléctrico.

6.2. Modelo del Rectificador y Control en Simulink - MATLAB

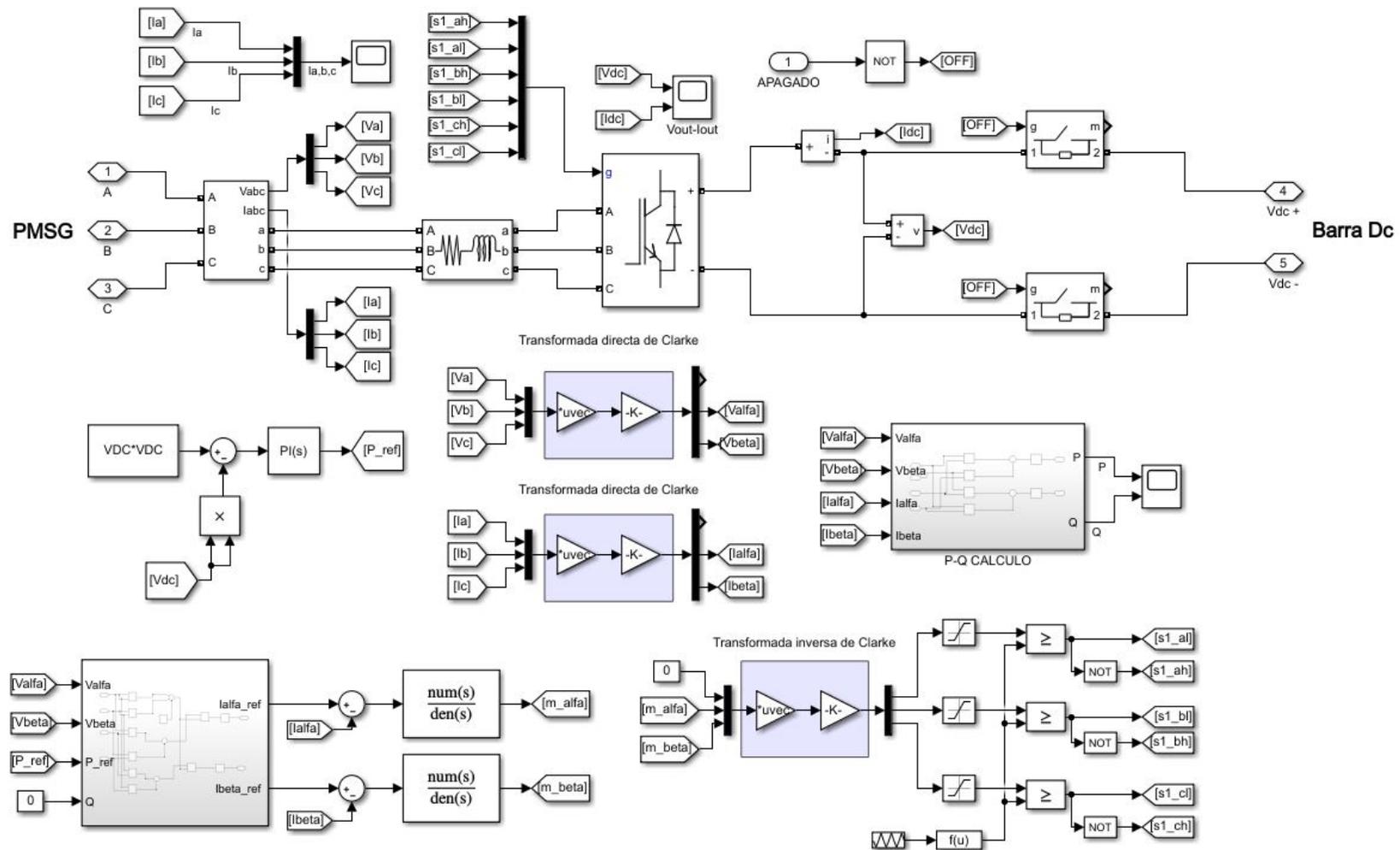


Figura 6.2 – Simulación del rectificador del sistema con su respectivo control de voltaje.

6.3. Modelo del Conversor Bidireccional y Control en Simulink - MATLAB

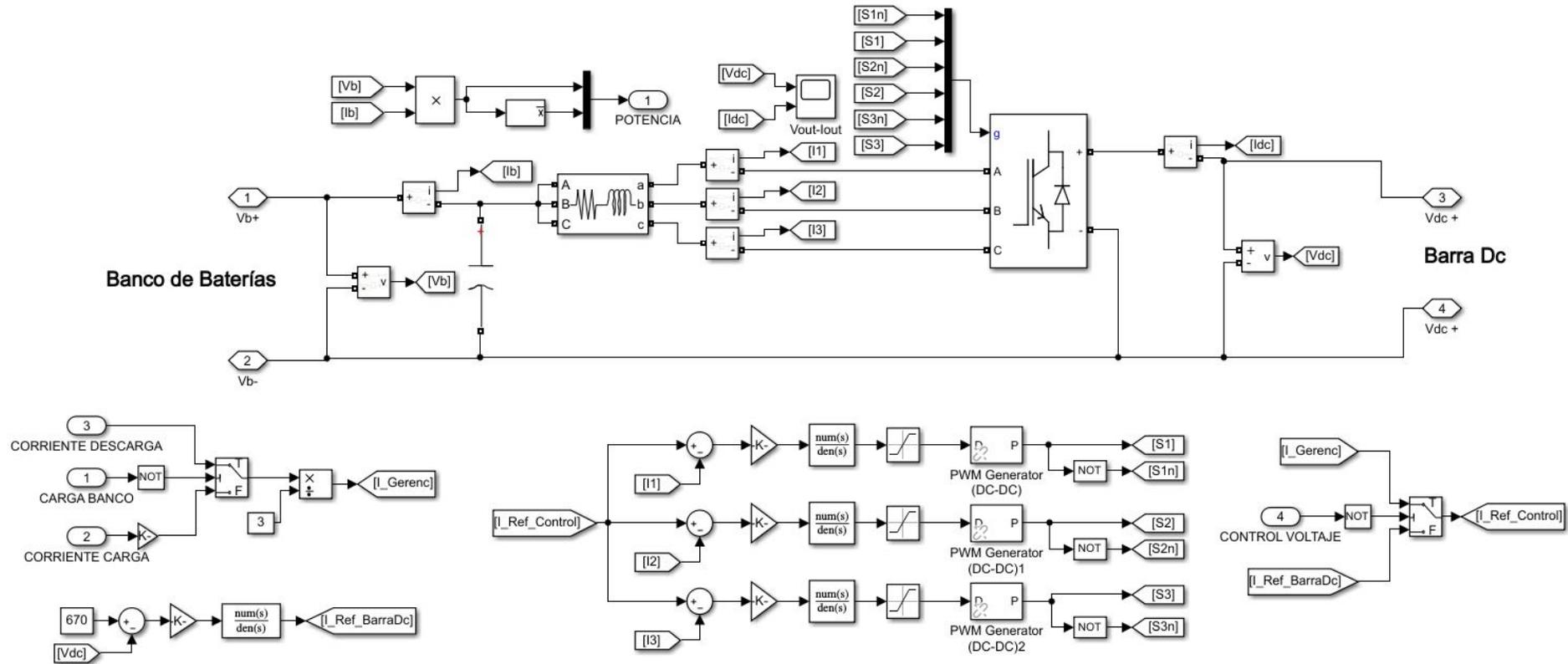


Figura 6.3 – Simulación del conversor en cascada del sistema con su respectivo control de voltaje y corriente.

6.4. Modelo del Inversor y Control en Simulink - MATLAB

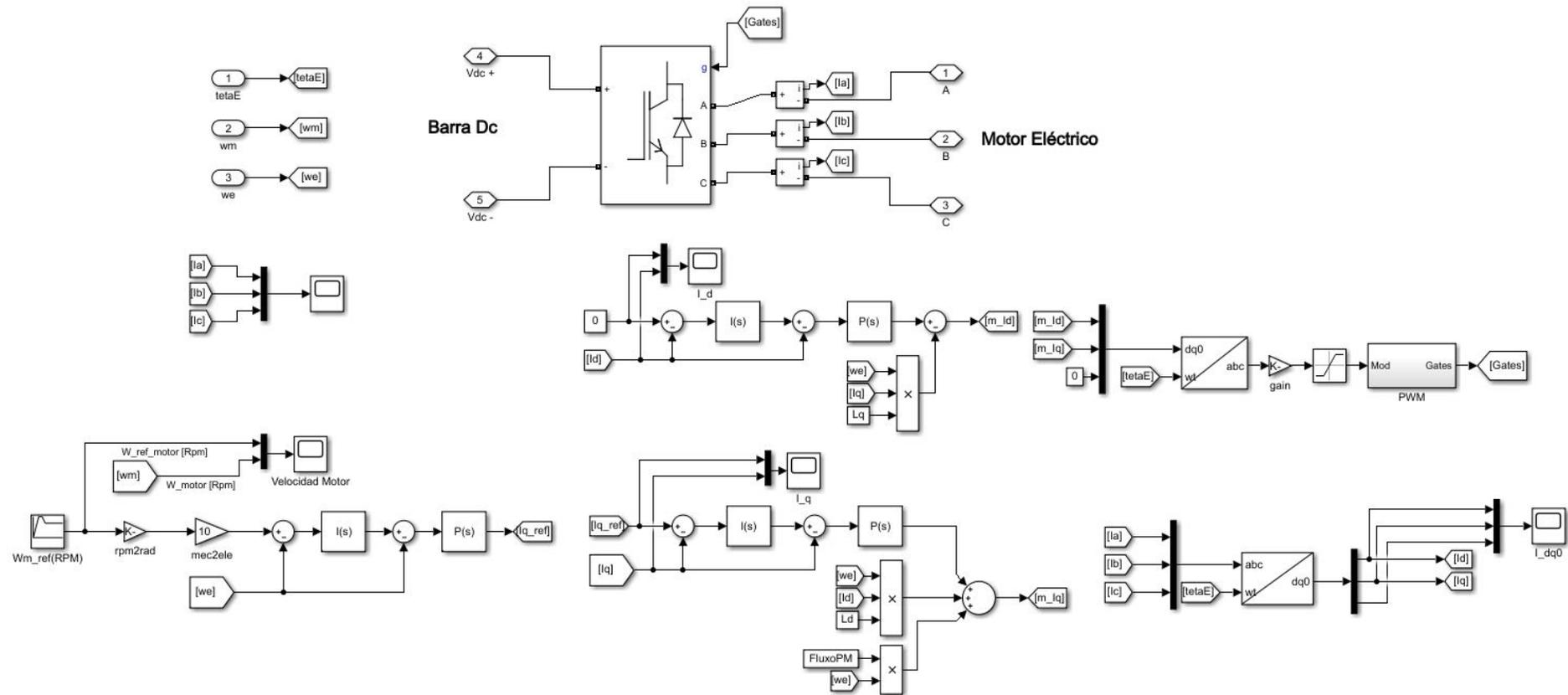


Figura 6.4 – Simulación del inversor del sistema con su respectivo control de velocidad para el motor eléctrico.