

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A BASE DE DIÉSEL**

PRESENTADO POR:

DANIEL VLADIMIR JIMÉNEZ ALAS

ELMER ENRIQUE RIVAS CRUZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

MSC. CRISTÓBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERIA ELÉCTRICA

DIRECTOR:

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título:

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A BASE DE
DIÉSEL**

Presentado por :

DANIEL VLADIMIR JIMÉNEZ ALAS

ELMER ENRIQUE RIVAS CRUZ

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. JOSÉ MIGUEL HERNÁNDEZ

SAN SALVADOR, DICIEMBRE DE 2018

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. JOSÉ MIGUEL HERNÁNDEZ

ACTA DE CONSTANCIA DE NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, viernes 30 de noviembre de 2018, en la Sala de Maestrías de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 10:00 horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Armando Martínez Calderón
Director


Firma

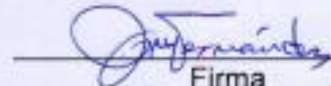
2. MSC. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario


Firma

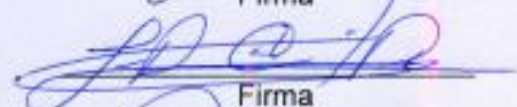


Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

- ING. JOSE MIGUEL HERNÁNDEZ
(Docente Asesor)


Firma

- MSC. LUIS ROBERTO CHÉVEZ PAZ


Firma

- ING. ARMANDO MARTINEZ CALDERON


Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A BASE DE DIÉSEL

A cargo de los Bachilleres:

- JIMÉNEZ ALAS DANIEL VLADIMIR

- RIVAS CRUZ ELMER ENRIQUE

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 8.2

(OCHO PUNTO DOS)

Agradecimientos

Daniel Vladimir Jiménez Alas

Agradezco profundamente a mis padres que siempre han estado para apoyarme especialmente a mi madre Rosa Miriam que ha hecho un tremendo esfuerzo por ayudarme a llegar hasta este punto siempre incondicional y con excelentes consejos y a mi abuela Pastora quien me enseñó a escribir cuando pequeño.

A mis padrinos Edwin, Vicky y a toda la familia Gálvez Jiménez que han sido un apoyo fundamental para mí y que en ocasiones me han cuidado como su fuese su propio hijo; que gracias ejemplo, motivación y cariño me han impulsado en mi vida profesional y personal.

A mi tía Reina que ha sido mi segunda madre.

A todos mis amigos y compañeros con los cuales trabajé durante la carrera sin duda aprendí lecciones muy valiosas de ellos tanto académicas como personales, con su apoyo sin duda la universidad fue una muy buena etapa de mi vida.

Gracias a todos.

La gratitud está vista como una tendencia humana muy extendida en diferentes culturas, casi parece una característica intrínseca en la naturaleza racional del ser humano; es la búsqueda mental de los factores y actitudes que dieron lugar a cierto progreso terrenal de carácter individual o colectivo, es el desapego momentáneo al mérito de partir de un lugar y poder ver el paisaje desde uno diferente.

Agradecer es la acción de reconocer que no se está solo, que se puede confiar en los demás y que de no ser por el apoyo recibido los resultados obtenidos pudieron haber sido completamente diferentes. A partir de aquí se me permite hacer el ejercicio mental de recapitular las personas que me acompañaron en mi efímera etapa universitaria, a las personas que siempre han estado y a las que estuvieron y ya no están; aportes grandes y pequeños, tempranos y tardíos que contribuyeron a mi formación académica; es aquí donde no se me permite citar nombres y acontecimientos, ya que me parece imparcial reconocer ciertos esfuerzos por encima de otros y en honor a los ausentes me limitare a rememorar algunos de estos momentos y personajes pidiendo disculpas si con el tiempo he llegado a olvidar a alguno; de hecho, realmente he llegado a dudar si este manifiesto llegara a los destinatarios correspondientes así que me doy la libertad de establecer un hito personal en nombre de las personas que me brindaron su apoyo, con el objetivo de poder ver hacia el pasado y saber que todo lo acontecido es para bien y me ha permitido llegar hasta donde estoy hoy.

Aún recuerdo algunos de los paradigmas mentales que solía sostener al iniciar la universidad, y agradezco a las personas involucradas en la evolución de estos razonamientos pudiendo argumentar que no solo recibí conocimiento académico de todos ustedes, sino que también aprendí un poco más de cómo vivir la vida.

Si tuviera que nombrar un ejemplo de lo minúsculo que es esta carta de agradecimiento no dudaría en mencionar a mis padres; decir gracias no es suficiente, pero responde positivamente a la necesidad de establecer que la mayoría de cosas que tenemos no nos pertenecen, ya que fueron dadas a nosotros por alguien más.

Todo es para bien.

CONTENIDO

Introducción.....	17
Objetivos.	18
General.	18
Específicos.....	18
Justificación.....	19
Alcances y limitaciones.	20
1 Capítulo I: Antecedentes, Conceptos básicos y generalidades.	21
1.1 Antecedentes.	21
1.2 Modelado y simulación de sistemas en simulink.	23
1.2.1 Introducción a simulink.	23
1.2.2 Bases para el modelado de sistemas.	25
1.2.3 Modelado de generadores.	26
1.2.4 Modelado deL motor Diésel.	26
1.2.5 Modelado del convertidor de potencia	27
1.2.6 Modelado de la carga.	27
1.3 Generación Diésel convencional.	28
1.4 Generación a velocidad variable.	30
1.4.1 Corriente alterna dinámica o DAC.	31
1.5 Comparación entre la generación convencional y la generación Diésel a velocidad variable.	32
1.6 Representación esquemática básica del sistema propuesto.....	34
2 Capítulo II: Teoría, descripción matemática y modelo en simulink del conjunto motor generador.....	35
2.1 Motor Diésel.	35
2.1.1 Conceptos y funcionamiento.	35
2.1.2 Discusión matemática a usar para el modelo.	37
2.1.3 Modelo implementado en simulink.....	43
2.2 Generador síncrono.	44
2.2.1 Conceptos y funcionamiento.	45
2.2.2 Discusión matemática a usar para el modelo.	46
2.2.3 Modelo implementado en simulink.....	53
3 Capítulo III: Teoría, descripción matemática y modelo en simulink del variador de tension y frecuencia trifásico.	57
3.1 Rectificador.	57

3.1.1	Conceptos y funcionamiento.	58
3.1.2	Discusión matemática a usar para el modelo.	59
3.1.3	Modelo implementado en simulink.....	60
3.2	Convertidor Elevador DC a DC.	61
3.2.1	Conceptos y funcionamiento.	61
3.2.2	Discusión matemática a usar para el modelo.	63
3.2.3	Modelo implementado en simulink.....	65
3.3	Convertidor DC-AC.	66
3.3.1	Conceptos y funcionamiento.	66
3.3.2	Discusión matemática a usar para el modelo.	67
3.3.3	Modelo implementado en simulink.....	73
4	Capítulo IV: Descripción de sistemas complementarios.	75
4.1	Modelo de la carga.....	75
4.2	Modelo del sistema de medición de variables eléctricas en la carga.	77
4.3	Diseño del control de velocidad óptimo para el motor Diésel con base en la medición de potencia en la carga.	78
4.3.1	Metodología y algoritmo.	79
4.3.2	Control de velocidad PID para el motor Diésel.	82
4.4	Diseño de sistemas complementarios para el variador de frecuencia y tensión.	83
4.4.1	Control para el convertidor DC/DC.	83
4.4.2	Principio basico de los Filtros implementados.	86
5	Capítulo V: Simulación y Presentación de resultados.	88
5.1	Modelo del sistema de generación.....	88
5.1.1	Implementación en simulink.	88
5.1.2	Resumen de parámetros de máquinas y sistemas complementarios.....	88
5.2	Resultados de simulación de los subsistemas.	90
5.2.1	Motor Diésel.....	90
5.2.2	Generador síncrono.....	92
5.2.3	Convertidor AC/DC/AC.....	95
5.3	Operación del sistema conjunto ante variaciones en la carga.	101
5.4	Estimación del consumo de combustible del motor modelado.....	106
	Conclusiones.....	110
	Recomendaciones.....	111
	Bibliografía.....	112

Anexos	115
A. Parámetros en Matlab para la simulación.	115
B. Descripción de bloques utilizados en simulink.	116
C. Minimos cuadrados para torque maximo y tabla de consumos del motor Diésel. 128	
D. Teorema de Fortescue.	130
E. Transformada DQ0.....	131
F. Uso de la herramienta para el cálculo del control PID en Simulink.....	132
G. Codigos de matlab.	135

Índice de figuras.

FIGURA 1.1 DIAGRAMA COMPARATIVO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA ENTRE DISTINTOS TIPOS DE SISTEMAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA [3].....	22
FIGURA 1.2 SISTEMA DE GENERACIÓN DIÉSEL A VELOCIDAD CONSTANTE [6].....	28
FIGURA 1.3 PERFIL DE CARGA AL QUE ES SOMETIDO EL GENERADOR A VELOCIDAD CONSTANTE [8].	29
FIGURA 1.4 VELOCIDAD ANGULAR DE SALIDA DEL MOTOR RESULTADO DEL PERFIL DE CARGA ESTABLECIDO [8].	29
FIGURA 1.5 TENSIÓN DE SALIDA DEL GENERADOR RESULTANTE DEL PERFIL DE CARGA [8].....	30
FIGURA 1.6 CORRIENTE DEMANDADA POR EL PERFIL DE CARGA [8].....	30
FIGURA 1.7 EJEMPLO DE SEÑAL DE TENSIÓN DE FRECUENCIA VARIABLE Y MAGNITUD CONSTANTE.....	31
FIGURA 1.8 ESQUEMA BÁSICO DE GENERACIÓN A VELOCIDAD VARIABLE MOSTRANDO LAS ISLAS ESTABILIZADORAS DE FRECUENCIA [10].	32
FIGURA 1.9 EFICIENCIA TÍPICA DE UN MOTOR DIÉSEL A PARTIR DE LA POTENCIA DE SALIDA REQUERIDA A VELOCIDAD CONSTANTE[11].	32
FIGURA 1.10 POTENCIA MÁXIMA DE SALIDA DE UN MOTOR DIÉSEL A PARTIR DE LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN DEL SISTEMA A VELOCIDAD CONSTANTE [11].	33
FIGURA 1.11 EJEMPLO DE UN MAPA DE CONSUMO ESPECIFICO DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN DIÉSEL [10].....	33
FIGURA 1.12 EJEMPLO DE UN MAPA DE CONSUMO ESPECIFICO TÍPICO DE UN MOTOR DIÉSEL.	33
FIGURA 1.13 ESQUEMA BÁSICO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN A VELOCIDAD VARIABLE PROPUESTO.....	34
FIGURA 2.1 DIAGRAMA P-V DEL CICLO DIÉSEL [13].....	36
FIGURA 2.2 DIAGRAMA P-V IDEAL DEL CICLO DIÉSEL.	38
FIGURA 2.3 BLOQUE DE FUNCIÓN DEL ACTUADOR.....	41
FIGURA 2.4 BLOQUE DE FUNCIÓN DEL SISTEMA DE COMBUSTIÓN.	41
FIGURA 2.5 BLOQUE DE FUNCIÓN DEL VOLANTE DE INERCIA.	42
FIGURA 2.6 DIAGRAMA DE BLOQUES TÍPICO DEL MOTOR DIÉSEL.....	42
FIGURA 2.7 BLOQUE GENERAL DEL MOTOR DIÉSEL.....	43
FIGURA 2.8 BLOQUE PRINCIPAL DEL MOTOR Y SU RESPECTIVO CONTROL DE VELOCIDAD	44
FIGURA 2.9 COMPARACIÓN DE LA FORMA DEL ROTOR DE UN GENERADOR SÍNCRONO DE POLOS CILÍNDRICOS (A) Y UN GENERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES (B).	46
FIGURA 2.10 DIAGRAMA FASORIAL DE UN GENERADOR SÍNCRONO DE POLOS CILÍNDRICOS (A) Y UN GENERADOR DE POLOS SALIENTES (B)	46

FIGURA 2.11 CIRCUITO QUE REPRESENTA EL ROTOR Y EL ESTATOR DE UN GENERADOR SÍNCRONO.....	47
FIGURA 2.12 REPRESENTACIÓN CIRCUITAL DE DONDE SURGE LA ECUACIÓN 2-67 Y LA ECUACIÓN 2-68.	52
FIGURA 2.13 BLOQUE GENERAL DEL GENERADOR SÍNCRONO.	53
FIGURA 2.14 COMPONENTE INTERNA PARA EL CÁLCULO DE CORRIENTES DINÁMICAS DEL BLOQUE DEL GENERADOR MOSTRADO EN LA FIGURA 2.13.	54
FIGURA 2.15 COMPONENTE INTERNA DEL BLOQUE DEL GENERADOR MOSTRADO EN LA FIGURA 2.13 PARA EL CÁLCULO DE THETA.	54
FIGURA 2.16 COMPONENTE INTERNA DEL BLOQUE DEL GENERADOR MOSTRADO EN LA FIGURA 2.13 PARA EL CÁLCULO DE LAS CORRIENTES DE LÍNEA.	55
FIGURA 2.17 COMPONENTE INTERNA DEL BLOQUE DEL GENERADOR MOSTRADO EN LA FIGURA 2.13 PARA EL CÁLCULO DE LAS TENSIONES EN LOS EJES DQ0.	55
FIGURA 2.18 COMPONENTE INTERNA DEL BLOQUE DEL GENERADOR MOSTRADO EN LA FIGURA 2.13 PARA LA CONVERSIÓN DE SEÑAL DE CORRIENTE A TENSIÓN.	56
FIGURA 3.1 ESQUEMA BÁSICO DE UN VARIADOR DE TENSIÓN Y FRECUENCIA.	57
FIGURA 3.2 CIRCUITO RECTIFICADOR TRIFÁSICO NO CONTROLADO CON LAS INDUCTANCIAS DE REACTOR Y CONMUTACIÓN INCLUIDAS.	58
FIGURA 3.3 CICLO DE CONDUCCIÓN DE LOS DIODOS Y SEÑALES DE CORRIENTE RESPECTIVAS [26].	59
FIGURA 3.4 BLOQUE GENERAL DEL CONVERTIDOR DE CORRIENTE SENOIDAL A CORRIENTE DIRECTA CON CAPACITOR DE FILTRADO A LA SALIDA.....	60
FIGURA 3.5 DIODOS QUE COMPONEN LA ETAPA DE RECTIFICACIÓN NO CONTROLADA DEL BLOQUE MOSTRADO EN LA FIGURA 3.4.....	61
FIGURA 3.6 ESQUEMA BÁSICO DE UN CONVERTIDOR BOOST.	62
FIGURA 3.7 COMPORTAMIENTO DEL CONVERTIDOR BOOST ANTE UN PULSO DE CONTROL INICIAL.	62
FIGURA 3.8 COMPORTAMIENTO DEL CONVERTIDOR BOOST CON EL DISPOSITIVO DE CONMUTACIÓN APAGADO EN ESTADO ESTABLE.	63
FIGURA 3.9 COMPORTAMIENTO DEL CONVERTIDOR BOOST CON EL DISPOSITIVO DE CONMUTACIÓN ENCENDIDO EN ESTADO ESTABLE.	63
FIGURA 3.10 BLOQUE DEL MODELO CONVERTIDOR DC/DC ELEVADOR.....	65
FIGURA 3.11 ESQUEMA INTERNO DEL CONVERTIDOR DE DC/DC ELEVADOR Y SU ESQUEMA DE CONTROL DE PULSOS DE GATE PARA LA ESTABILIDAD DE TENSIÓN.	65
FIGURA 3.12 TOPOLOGÍA MÁS HABITUAL DE UN INVERSOR TRIFÁSICO.	66

FIGURA 3.13 EJEMPLO DE SEÑALES INVOLUCRADAS EN EL PROCESO DE MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO [25].	67
FIGURA 3.14 RAMA DE UN PUENTE INVERSOR.	68
FIGURA 3.15 GRAFICA SUPERIOR LA SEÑAL TRIANGULAR ES LA SEÑAL PORTADORA, LA SEÑAL AZUL ES LA SEÑAL MODULANTE; GRAFICA INFERIOR SE MUESTRAN LOS ANCHOS DE PULSO EN CONJUNTO CON LA SEÑAL SENOIDAL DESEADA A LA SALIDA [28].....	68
FIGURA 3.16 GRAFICA SUPERIOR, SEÑAL PORTADORA TRIANGULAR V_{tri} Y SEÑAL SENOIDAL DE CONTROL $V_a, cont$ COMO SEÑAL MODULANTE; GRAFICA INFERIOR, ANCHOS DE PULSO V_a Y VALOR MEDIO DE CADA SECCIÓN DE ANCHO DE PULSO V_{AO} [28].	69
FIGURA 3.17 TENSIÓN DE SALIDA NORMALIZADA EN FUNCIÓN DE ma [28]	71
FIGURA 3.18 GENERACIÓN DE LAS SEÑALES DE CONTROL PARA UN PUENTE TRIFÁSICO [28].	72
FIGURA 3.19 GENERACIÓN DE LAS SEÑALES TRIFÁSICAS PWM [28].	72
FIGURA 3.20 BLOQUE GENERAL DEL CONVERTIDOR DC/AC (IZQUIERDA), BLOQUE DE GENERADOR DE PULSOS (DERECHA).....	73
FIGURA 3.21 GENERADOR DE PULSOS DE GATE.	73
FIGURA 3.22 CONTENIDO TÍPICO DEL BLOQUE “CONVERTIDOR DC-AC” MOSTRADO EN FIGURA 3.20.....	74
FIGURA 4.1. CICLO DE TRABAJO DE LOS INTERRUPTORES TRIFÁSICOS DEL MODELO DE LA CARGA.	76
FIGURA 4.2 MODELO DE LA CARGA TRIFÁSICA.	76
FIGURA 4.3 MODELO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN Y ESCALONADO DE LA POTENCIA DE LA CARGA TRIFÁSICA CONECTADA.....	77
FIGURA 4.4 POTENCIA APARENTE DE LA CARGA TRIFÁSICA; POTENCIA APARENTE ESCALONADA.	78
FIGURA 4.5 FLUJOGRAMA DEL CÁLCULO DE VELOCIDAD DE REFERENCIA DEL MOTOR DIÉSEL.	81
FIGURA 4.6 RESPUESTA DEL CONTROLADOR PID DEL MOTOR DIÉSEL A UN ESCALÓN UNITARIO.	82
FIGURA 4.7 PARÁMETROS DE CONTROL DEL CONTROLADOR PID DEL MOTOR DIÉSEL.	82
FIGURA 4.8 CONVERTIDOR BOOST IMPLEMENTADO EN SIMULINK.	84
FIGURA 4.9 FRECUENCIA DE OPERACIÓN DEL GENERADOR PWM.....	84
FIGURA 4.10 PARÁMETROS DE CONTROL DEL CONTROLADOR PID DEL CONVERTIDOR BOOST.....	85
FIGURA 4.11 COMPORTAMIENTO REAL DEL CONVERTIDOR BOOST [VERDE], COMPORTAMIENTO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA OBTENIDA MEDIANTE MÉTODOS NUMÉRICOS A TRAVÉS DE SIMULACIÓN DE ENTRADA/SALIDA DEL CONTROL BOOST NUMÉRICOS [AZUL].	85
FIGURA 4.12 RESPUESTA APROXIMADA DEL SISTEMA CONTROLADO.	86

FIGURA 4.13 FILTRO RLC POR LÍNEA PARA EL CONVERTIDOR DC/AC	86
FIGURA 5.1 MODELO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN IMPLEMENTADO EN SIMULINK.....	88
FIGURA 5.2 ENTRADA DE POTENCIA IDEAL PARA EL MOTOR DIÉSEL MODELADO	91
FIGURA 5.3 VELOCIDAD DE REFERENCIA DE SALIDA DEL MOTOR DIÉSEL DEBIDO AL PERFIL DE CARGA DE LA FIGURA 5.2.	91
FIGURA 5.4 SEÑAL IDEAL DE VELOCIDAD EN LA ENTRADA DEL GENERADOR SÍNCRONO.	92
FIGURA 5.5 TENSIÓN Y CORRIENTE DE SALIDA DEL GENERADOR SÍNCRONO ANTE UNA ENTRADA DE VELOCIDAD IDEAL.....	93
FIGURA 5.6 TENSIÓN Y CORRIENTE DE SALIDA DEL GENERADOR SÍNCRONO A 3.4S DE SIMULACIÓN.	94
FIGURA 5.7 TENSIÓN Y CORRIENTE DE SALIDA DEL GENERADOR SÍNCRONO A 10.32S DE SIMULACIÓN.	94
FIGURA 5.8 SEÑALES DE TENSIÓN Y CORRIENTE IDEALES DE ENTRADA PROPORCIONADA POR LA RED EN ESTADO ESTABLE.	95
FIGURA 5.9 SEÑALES DE TENSIÓN Y CORRIENTE A LA SALIDA DEL RECTIFICADOR.	96
FIGURA 5.10 SEÑALES DE TENSIÓN Y CORRIENTE DEL CONVERTIDOR BOOST ANTE UNA SEÑAL IDEAL DE ENTRADA.	97
FIGURA 5.11 CICLO DE TRABAJO DEL CONVERTIDOR DC/DC.	97
FIGURA 5.12 TENSIÓN Y CORRIENTE DE ENTRADA DEL CONVERTIDOR DC/AC.	98
FIGURA 5.13 SALIDA DE CORRIENTE Y TENSIÓN DEL INVERSOR SIN FILTRAR.	98
FIGURA 5.14 PULSOS DE PARA LAS GATE DE LOS IGBT DEL CONVERTIDOR DC/AC.	99
FIGURA 5.15 FILTRO RLC IMPLEMENTADO A LA SALIDA DEL INVERSOR TRIFÁSICO.	99
FIGURA 5.16 DIAGRAMA PARA EL FILTRO PASO BAJO MOSTRADO EN LA FIGURA 5.15.	100
FIGURA 5.17 TENSIÓN Y CORRIENTE DE SALIDA EN EL INVERSOR TRIFÁSICO FILTRADA.	100
FIGURA 5.18 SEÑAL DE POTENCIA ESCALONADA MEDIDA EN LA CARGA.	101
FIGURA 5.19 COMPORTAMIENTO DE LA VELOCIDAD ANGULAR DEL MOTOR DIÉSEL ANTE VARIACIONES EN LA CARGA.	102
FIGURA 5.20 SALIDA DEL GENERADOR SÍNCRONO AL SER ACOPLADO AL MODELO DEL MOTOR DIÉSEL.	102
FIGURA 5.21 TENSIONES Y CORRIENTES A LA SALIDA DEL GENERADOR SÍNCRONO EN ESTADO ESTABLE.	103
FIGURA 5.22 SEÑALES DE TENSIÓN Y CORRIENTE DEL RECTIFICADOR Y CONVERTIDOR BOOST.	103
FIGURA 5.23 TENSIÓN Y CORRIENTE DE SALIDA DEL INVERSOR YA FILTRADA.	104
FIGURA 5.24 TENSIÓN DE LÍNEA A NEUTRO Y CORRIENTE EN LA CARGA PARA UNA CARGA TRIFÁSICA DE 3kW. ..	105

FIGURA 5.25 MEDICIÓN DE THD DE TENSIÓN EN LA CARGA.....	105
FIGURA 5.26 CONSUMO ESPECIFICO DE COMBUSTIBLE.....	106
FIGURA 5.27 PORCENTAJE DE AHORRO DE COMBUSTIBLE CON EL MOTOR OPERANDO A VELOCIDAD VARIABLE RESPECTO A OPERACIÓN A VELOCIDAD CONSTANTE PARA 3kW, 5.5kW Y 8kW RESPECTIVAMENTE.....	107
FIGURA 5.28 SEÑAL DE POTENCIA DE 2 kW A 10 kW.....	108
FIGURA 5.29 CONSUMO ESPECIFICO POR KWH DE ENERGÍA ELÉCTRICA DEMANDA OPERANDO A VELOCIDAD CONSTANTE (ROJO) Y OPERANDO A VELOCIDAD VARIABLE (ÁZUL).....	108
FIGURA 5.30 PORCENTAJE DE AHORRO DE COMBUSTIBLE PARA EL BARRIDO DE POTENCIA DE LA FIGURA 5.28. ..	109

Índice de tablas

TABLA 1.1 FUNCIONES DE USO COMÚN EN SIMULINK.	23
TABLA 2.1 SIMBOLOGÍA Y VARIABLES USADAS PARA LA DESCRIPCIÓN DEL GENERADOR SÍNCRONO.	35
TABLA 2.2 VALORES TÍPICOS DE LOS PARÁMETROS USADOS PARA EL MODELO DEL MOTOR DIÉSEL.	43
TABLA 2.3 SIMBOLOGÍA Y VARIABLES USADAS PARA LA DESCRIPCIÓN DEL GENERADOR SÍNCRONO.	44
TABLA 3.1 SIMBOLOGÍA Y VARIABLES USADAS PARA LA DESCRIPCIÓN DEL RECTIFICADOR.	57
TABLA 3.2 SIMBOLOGÍA Y VARIABLES USADAS PARA LA DESCRIPCIÓN DEL CONVERTIDOR BOOST.	61
TABLA 3.3 SIMBOLOGÍA Y VARIABLES USADAS PARA LA DESCRIPCIÓN DEL INVERSOR.	66
TABLA 4.1 PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DE LAS CARGAS TRIFÁSICAS.	75
TABLA 5.1 PARÁMETROS QUE DEFINEN LA CAPACIDAD DEL MOTOR DIÉSEL PARA EL MODELO PUNTO A PUNTO.	88
TABLA 5.2 PARÁMETROS QUE DEFINEN EL COMPORTAMIENTO DEL MOTOR DIÉSEL PARA EL MODELO DE CONTROL CON GANANCIAS Y RETARDOS.	89
TABLA 5.3 CONTROL PID DE VELOCIDAD.....	89
TABLA 5.4 PARÁMETROS QUE DEFINEN LA CAPACIDAD Y COMPORTAMIENTO DEL GENERADOR SÍNCRONO USADOS PARA EL MODELO PLANTEADO @60HZ [34].	89
TABLA 5.5 PARÁMETROS DEL RECTIFICADOR TRIFÁSICO NO CONTROLADO.	89
TABLA 5.6 PARÁMETROS DEL CONVERTIDOR BOOST DC/DC.	90
TABLA 5.7 PARÁMETROS CONVERTIDOR DC/AC Y FILTROS DE SALIDA.....	90
TABLA 5.8 VALORES DE SALIDA DEL MOTOR DEBIDO A LA ENTRADA DE POTENCIA DE LA FIGURA 5.2.	91
TABLA 5.9 RANGO DE OPERACIÓN DEL MOTOR DIÉSEL.....	92
TABLA 5.10 RANGOS DE OPERACIÓN DEL GENERADOR SÍNCRONO.	92
TABLA 5.11 VALORES DE OPERACIÓN DEL RECTIFICADOR.	95
TABLA 5.12 RANGOS DE OPERACIÓN DEL CONVERTIDOR BOOST.	97
TABLA 5.13 VALORES DE OPERACIÓN DEL CONVERTIDOR DC/AC.	100
TABLA 5.14 VALOR DE SALIDA DEL RECTIFICADOR ANTE LOS CAMBIOS EN LA CARGA DEMANDADA	104
TABLA 5.15 VALORES DE BSFC PARA DIFERENTES VALORES DE POTENCIA A VELOCIDAD CONSTANTE Y VARIABLE EN ESTADO ESTABLE.	106
TABLA 5.16 PORCENTAJES DE AHORRO DE COMBUSTIBLE PARA DIFERENTES VALORES DE POTENCIA	107
TABLA 5.17 CONSUMO DE COMBUSTIBLE PARA DIFERENTES VALORES DE POTENCIA A VELOCIDAD VARIABLE Y CONSTANTE.	107

INTRODUCCIÓN.

El modelado de sistemas físicos en Matlab u otros softwares de simulación cada vez está más presente en la industria ayudando a los diseñadores de sistemas o dispositivos a tener una visión más detallada sobre el comportamiento de sus diseños cuando estos se pongan en marcha mediante la realización previa de modelos de los sistemas a implementar, teniendo la oportunidad de observar los cambios de las variables de interés en la operación a medida cambian las condiciones o parámetros de funcionamiento del sistema, determinar la escalabilidad de un sistema e incluso para hacer evaluaciones económicas y financieras de un proyecto para garantizar la rentabilidad del mismo.

Los modelos de sistemas físicos pueden incluir un gran número de variables e iteraciones para obtener resultados confiables por ello en el presente trabajo de graduación se desarrolla un modelo y simulación en el software Matlab Simulink de un sistema de generación de energía eléctrica a base de diésel operando de forma aislada, enfocándose principalmente en las variables fundamentales que rigen la operación del sistema para que este sea capaz de suplir potencia eléctrica de forma estable una carga lineal de acuerdo a los límites de entrega de potencia del motor diésel, tomando en cuenta parámetros brindados por fabricantes de motores diésel y generadores síncronos.

La particularidad del sistema de generación antes mencionado es que el motor diésel opera a velocidad variable en función de la potencia demandada por la carga y la utilización de electrónica de potencia para estabilizar la tensión en la carga con el fin de establecer una comparación del consumo de combustible con respecto de un sistema de generación diésel clásico a velocidad constante.

OBJETIVOS.

GENERAL.

- Modelar matemáticamente y por medio de software el conjunto de generador síncrono y motor Diésel que actúa como máquina motriz del sistema de velocidad variable y la electrónica de potencia asociada al conjunto para que dicho sistema pueda suplir potencia eléctrica de manera estable a una carga aislada.

ESPECÍFICOS.

- Describir los parámetros fundamentales para el modelado de cada máquina y dispositivo que conforma el sistema de generación de energía eléctrica a base de Diésel.
- Crear el modelo completo por medio de software de un sistema de generación de energía eléctrica de velocidad variable compuesto principalmente por un generador síncrono, un motor de combustión Diésel, convertidores AC-DC-AC.
- Simular el funcionamiento del sistema de generación de velocidad variable bajo diferentes condiciones de operación.
- Analizar las características inherentes que afectan el funcionamiento del sistema de generación durante el estado dinámico y permanente, para establecer los límites de operación seguros del funcionamiento del equipo.
- Determinar el consumo aproximado del motor Diésel para una carga específica.

JUSTIFICACIÓN.

Actualmente la generación de energía eléctrica a base de combustibles fósiles es una de las industrias que está perdiendo terreno frente a la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables, sin embargo, es conveniente realizar un modelo de un sistema de generación a base de Diésel debido a que grandes empresas pueden optar por este tipo de generación a manera de respaldo o para actividades específicas en ciertas zonas de sus naves industriales ante posibles contingencias y falta de confiabilidad en el sistema de distribución de energía eléctrica o en el sistema de generación nacional también puede ser una fuente confiable de energía eléctrica para cargas críticas no necesariamente industriales además de ser ideales en zonas aisladas de la distribución eléctrica o con una muy pobre infraestructura lo que también dejaría un importante antecedente de simulación de un sistema de generación que puede ser continuado incluyendo la consideración de una futura conexión a la red.

ALCANCES Y LIMITACIONES.

Alcances:

- Modelado de un motor Diésel, de un generador síncrono y su funcionamiento como conjunto.
- Modelado de un rectificador trifásico para su incorporación al sistema de generación.
- Modelado de un inversor trifásico para su incorporación al sistema de generación.
- Modelado de carga asociada al sistema.
- Establecimiento del detalle y parámetros para el control de velocidad del motor Diésel y el generador.
- Que el modelo garantice el funcionamiento de la carga cumpliendo con los parámetros de calidad de servicio correspondientes.

Limitaciones:

- El sistema de generación atiende a una carga aislada, esto se justifica debido a que el sistema de generación Diésel es usado como sistema de respaldo o para una carga específica aislada.
- Se limita a que la máquina motriz sea un motor de combustión Diésel.
- Uso del software Simulink con posible uso de librerías de libre acceso de terceros.

1 CAPÍTULO I: ANTECEDENTES, CONCEPTOS BÁSICOS Y GENERALIDADES.

1.1 ANTECEDENTES.

Generación eléctrica en plantas Diésel.

La revolución industrial dada a mediados del siglo XIX, trajo como consecuencias un cambio en el rumbo de la humanidad impulsado por la máquina de vapor, [1] la idea de convertir calor en energía mecánica cambió rotundamente el rumbo de la historia, luego este invento fue sustituido con el paso del tiempo por motores de combustión interna [2] a base de hidrocarburos derivados del petróleo; dependiendo de la aplicación se han utilizado motores de 2 tiempos o de 4 tiempos con el objetivo de lograr maquinas más eficientes con menor peso y volumen.

Al principio se utilizaba combustible destilado el cual era muy barato en esa época, pero surgió un punto de inflexión en los años 60 cuando se dio la llamada crisis por el petróleo, esto propino la búsqueda del aumento de la eficiencia de las maquinas a la vez de la utilización de un combustible más barato, una de las opciones exploradas fue la de utilizar productos residuales de las refinerías como combustible, el cual era mucho más económico, una de las consecuencias de utilizar este combustible menos refinado era que las maquinas no estaban diseñadas especialmente para trabajar con él, lo cual se reflejaba en un mayor gasto en el mantenimiento, mayor uso de nuevos componentes y la utilización de filtros los cuales eran necesarios para trabajar con el nuevo combustible, efecto de esto se realizaron nuevas modificaciones en el motor de combustión interna antes implementado por uno que utilizara exclusivamente Diésel como fuente principal de energía; esto dio como resultado una maquina más eficiente ya que se aprovechó algunas características químicas del Diésel con la idea de reducir su consumo, el cual a su vez es más barato de producir, presentando cierta ventaja ante los motores de combustión interna de fabricación convencional.

En la Figura 1.1 se muestra un gráfico comparativo entre diferentes tipos de plantas de generación eléctrica, donde se toma en cuenta la capacidad de la planta contra el rendimiento energético que esta presenta, a partir de este grafico se deduce que una de las ventajas de la generación Diésel es su alta eficiencia ya que a bajas y medias potencias la maquina presenta mayor rendimiento en comparación con otras metodologías estudiadas, no obstante un de las limitaciones de las plantas de generación Diésel es el tamaño unitario de las máquinas, ya que estas no superan los 50MW, aunque cabe destacar que por los valores de potencia utilizados y su alto rendimiento la generación térmica con motores Diésel es una de las mejores opciones para aplicaciones industriales [3].

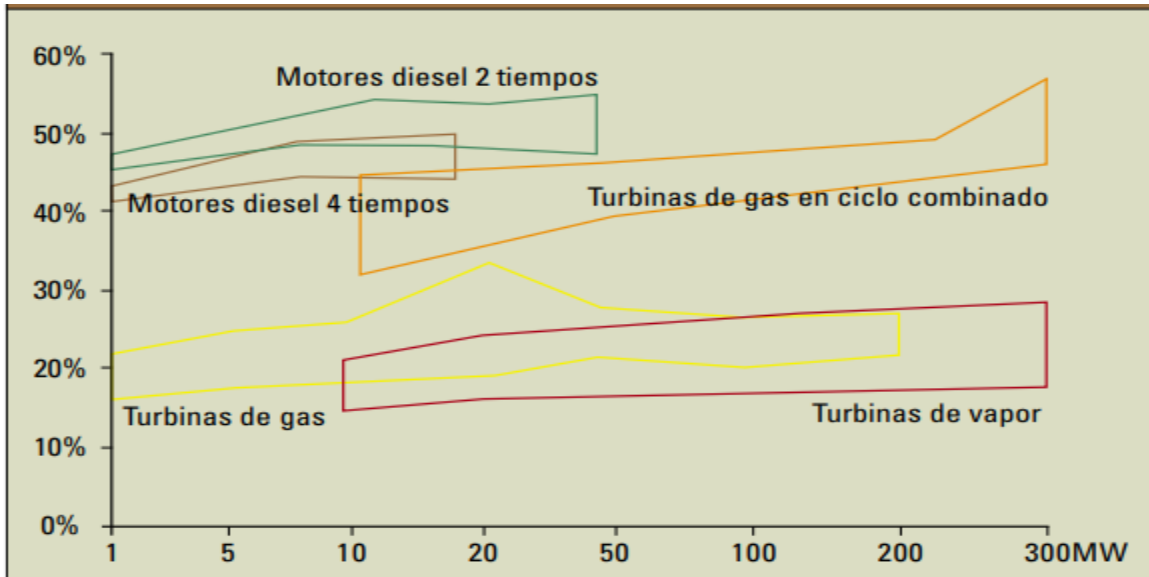


Figura 1.1 Diagrama comparativo de eficiencia energética entre distintos tipos de sistemas de generación eléctrica [3].

En el presente trabajo de graduación se toman como base el paper publicado y presentado por la IEEE en el 38º Seminario Internacional de Primavera en Tecnología Electrónica en 2016 titulado “Fuel Consumption Reduction of a Diésel–Electric Power Generator” [8] traducido al español como “Reducción del consumo de combustible en un generador diésel de energía eléctrica” en donde se evalúan la posibilidad de que el motor ajuste su potencia mecánica en función de la carga eléctrica manteniendo la velocidad del motor constante sin embargo se detalla que la operación a velocidad constante presenta desventajas ante variaciones constantes en la carga, en el paper presentado en la 29ª Conferencia Anual de la Sociedad de Electrónica Industrial IEEE en 2003 titulado “A hybrid generation system using variable speed wind turbines and Diésel units” [9] traducido al español como “Un sistema de generación híbrida que utiliza turbinas eólicas de velocidad variable y unidades Diésel” donde se evalúa la posibilidad de alimentar un generador síncrono a velocidad variable obteniendo una tensión de frecuencia variable a la salida del generador y estabilizándola con electrónica de potencia para suplir energía eléctrica a una carga, y tomando algunos conceptos del artículo publicado por la empresa fabricante de generadores, motores y electrónica de potencia ABB en 2016 titulado “Dynamic AC concept for variable speed power generation” [10] traducido al español como “Concepto de corriente alterna dinámica para generación de energía de velocidad variable”, donde de manera breve se mencionan las ventajas en términos de consumo de combustible al ajustar la velocidad de un motor diésel en función de la potencia demandada por la carga y utilizar electrónica de potencia para convertir la corriente de frecuencia variable generada por este sistema en corriente alterna a 60 Hz.

1.2 MODELADO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS EN SIMULINK.

1.2.1 INTRODUCCIÓN A SIMULINK.




Un sistema es un conjunto de partes u componentes que se relacionan entre sí con un fin específico, cada objeto puede ser en si un sistema o puede formar parte de uno mayor, por lo cual surge la inquietud por determinar cuáles son las partes en las que están compuestos dichos sistemas y de qué manera están relacionadas entre sí.
















Una de las formas en la que se puede abordar esta temática es utilizando un modelado del sistema, un modelo es una abstracción de la realidad que intenta mostrar de la manera más simple posible el funcionamiento de un determinado sistema [4]. El modelado se basa en la construcción conceptual de las partes de un sistema y como se relacionan dentro de este, Si un sistema se modela de forma correcta es posible hacer una simulación de dicho sistema a partir del modelo desarrollado, la simulación consiste en someter el modelo a variables conocidas y que este se comporte como lo haría el sistema que se está modelado con el fin de realizar experimentos y extraer conclusiones de los resultados obtenidos.





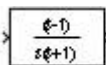
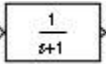
Al modelar sistemas eléctricos se hacen uso de herramientas matemáticas que son de gran ayuda al simplificar ciertos cálculos que podrían ser tediosos para el modelador, una de las herramientas que pueden ser usadas para dicho fin es Matlab, el cual es un software que permite realizar cálculos complejos utilizando su propio lenguaje de programación, dicho software cuenta con una herramienta adicional que puede ser utilizada para realizar modelos de diferentes sistemas, esta herramienta se llama Simulink [5], el cual es un entorno de programación visual, en el cual por medio de diagramas de bloques es posible construir el modelo deseado especificando ciertos parámetros requeridos.

Entre los bloques de Simulink de uso común se encuentran los mostrados en la Tabla 1.1 sin embargo se han utilizado elementos de la librería Simpowersystems de Simulink, la descripción de estos elementos se puede ver en el anexo B.

Tabla 1.1 Funciones de uso común en Simulink.

Nombre	Bloque	Descripción	Librería
Creador de bus multiplexado	 Bus Creator	Combina un conjunto de señales en un bus.	Signal Routing
Multiplexor	 Mux	Combina sus entradas en un vector sencillo de salida.	Signal Routing
Demultiplexor	 Demux	Toma una señal de entrada y la convierte en varias señales de salida.	Signal Routing

Selector de bus	 Bus Selector	Tiene como salida un sub conjunto especificado de elementos del bus de entrada.	Signal Routing
Constante	 Constant	Valor constante.	Sources
Integrador	 Integrator	Su salida es la integral de la señal de entrada con respecto al tiempo.	Continuous
Ganancia	 Gain	Multiplica la entrada por un valor constante.	Math operation
Saturación	 Saturation	Impone límite superior e inferior en una señal de entrada.	Discontinuities
Subsistema	 Subsystem	Contiene un subconjunto de bloques o código dentro de un modelo total o sistema.	Ports & Subsystems
Producto	 Product	Realiza el producto de dos señales de entrada.	Math operations
Adición	 Add	Realiza la suma o resta en sus entradas.	Math operations
División	 Divide	Realiza la división de la entrada superior entre la inferior.	Math operations
Suma	 Sum	Realiza la adición o sustracción en sus entradas.	Math operations
Sustracción	 Subtract	Realiza la suma o resta en sus entradas.	Math operations
Display	 Display	Muestra el valor de la entrada	Sinks
Scope	 Scope	Visualización de señales generadas durante la simulación.	Sinks
Floating scope	 Floating Scope	Visualización de señales generadas durante la simulación.	Sinks
XY graph	 XY Graph	Muestra un gráfico X-Y de las entradas en la	Sinks

		ventana de figura de Matlab.	
Reloj	 Clock	Emite el tiempo de simulación actual en cada paso de la simulación	Sources
Función rampa	 Ramp	Genera una señal que se inicia en un tiempo especificado y con valores específicos de Y.	Sources
Función paso	 Step	Proporciona un paso entre dos niveles definibles en un momento determinado.	Sources
Control PID	 PID Controller	Implementar un controlador de tiempo discreto o continuo.	Continuous
Cero y polo	 Zero-Pole	Crear modelos de un sistema que se definido por los ceros, polos y ganancia de una función de transferencia de Laplace.	Continuous
Función de transferencia	 Transfer Fon	Crear modelos de un sistema lineal por una función de transferencia de la variable de Laplace en el dominio s.	Continuous

1.2.2 BASES PARA EL MODELADO DE SISTEMAS.

Para comenzar a modelar un sistema es necesario establecer las partes en las que será dividido el modelo, un sistema puede estar constituido por un gran número de componentes y variables involucradas, no obstante por efectos prácticos no se consideran todas las variables y partes posibles, si no las de mayor importancia para el fenómeno que se desea modelar, es decir se seleccionan las que generan un mayor efecto en la salida del sistema a modelar; aun el sistema puede tener muchas variables de salida, pero se consideran solo las que presenta valor significativo para el objeto de estudio.

A partir de las variables y componentes del sistema se determinan relaciones matemáticas que describen de alguna manera el comportamiento de cada una de las partes o de las variables involucradas, puede ser de utilidad definir el sistema en secciones principales y

subsecuentes, esto puede disminuir el grado de complejidad del sistema completo ya que al dividir el sistema se reduce el número de relaciones y variables involucradas.

Una vez finalizado el proceso de modelado es necesario unir las partes modeladas del sistema y someterlo a una prueba y simulación, esto es requerido para determinar el grado de confiabilidad del modelo realizado, es necesario establecer un estudio comparativo del modelo realizado y el sistema real definiendo un grado de error aceptable en la simulación realizada, si el grado de error el modelo es superado es necesario realizar ajustes en el modelo que nos lleven a reducir el grado de error al mínimo establecido por los parámetros de confiabilidad, esto llevara un comportamiento optimo del modelo deseado en el Anexo A se pueden consultar las configuraciones necesarias para correr el modelo planteado en este documento.

1.2.3 MODELADO DE GENERADORES.

El modelado del generador puede partir del seccionamiento del sistema en 2 partes fundamentales: el modelo eléctrico y el sistema de excitación. la variable de mayor importancia en el rotor del generador es la velocidad angular ya que es la variable de entrada en el rotor que delimitan la salida final del generador.

Al estudiar el análisis eléctrico del generador es necesario analizar la dinámica de las partes incluidas en esta sección, haciendo uso de teoremas físicos tales como el análisis de circuitos y las leyes del electromagnetismo, a partir de ellos es posible establecer relaciones de flujo entre el rotor y estator de la maquina síncrona, también es necesario hacer uso de teoremas matemáticos relacionados con la teoría de circuitos trifásicos, como la transformada de Park la cual nos permite mostrar un sistema de 3 fases en un equivalente de 2 ejes, en el modelo presentado en el trabajo de graduación para efectos de simplificación y debido al rango de operación ajustado del sistema no se tratan temas de estabilidad síncrona, saturación de la máquina y efectos del devanado de amortiguamiento.

La función del sistema de excitación es proveer de corriente continua al devanado de campo además de proveer de ciertas funciones de control que dotan de un comportamiento más dinámico al modelo del generador, puede ser de 3 tipos AC para los que usan corriente alterna, DC los que usan corriente directa y estáticos los cuales utilizan electrónica de potencia en la etapa de excitación. Es aquí en el sistema de excitación donde se debe regular el valor máximo de tensión en el devanado de campo además de establecer la velocidad de respuesta del generador a cambios bruscos.

1.2.4 MODELADO DEL MOTOR DIÉSEL.

El motor Diésel es el encargado de mover el eje del generador, es la principal fuente de energía de todo el sistema, su estudio puede ser dividido en 4 partes:

- 1) Controlador de velocidad, este dispositivo es el encargado de decirle al motor a qué velocidad de salida debe ir además de limitar los valores máximos de operación con el fin de no dañar el dispositivo, el valor de la velocidad está en función de la potencia requerida y el consumo específico de combustible; por lo cual dichos controladores de velocidad se diseñan con el objetivo de suplir la demanda de potencia con el menor consumo de combustible, dichos controladores pueden modelarse basados en un sistema de control de lazo cerrado ya que miden la velocidad de salida del motor y la ajustan a partir de los parámetros deseados en la salida.
- 2) Actuador, el actuador es el dispositivo encargado de suministrar el flujo específico de combustible en la cámara de compresión.
- 3) Cámara de combustión, en esta parte del motor es donde se transforma el flujo de combustible en torque mecánico.
- 4) Inercia del motor Diésel, en esta sección del motor Diésel se modela la respuesta mecánica del motor producto del torque introducido por los pistones en el eje del motor, es posible modelarlo siguiendo distintos modelos donde también debe tomarse en cuenta la fricción de las partes del motor, así como su resistencia al movimiento.

1.2.5 MODELADO DEL CONVERTIDOR DE POTENCIA

El convertidor de potencia se compone fundamentalmente de una etapa de rectificación, filtrado DC, una etapa de conversión DC a DC, una etapa de conversión DC a AC y una etapa de filtrado.

El modelo toma en cuenta la utilización de dispositivos IGBT como semiconductores de potencia, la implementación de filtros para cada etapa y el diseño de los controles de lazo realimentado para estabilizar las señales en la etapa de conversión DC a DC y la etapa de conversión DC a AC, más sin embargo no se tratan temas de diseños de circuitos adicionales para protección de cortocircuito o sobre voltaje.

1.2.6 MODELADO DE LA CARGA.

Al hacer el modelado del sistema de generación Diésel es necesario incluir la carga que será conectada al generador, ya que el desempeño de la salida del generador está influido por la naturaleza y tamaño de la carga, por lo cual es necesario establecer el impacto de la carga al sistema del generador Diésel. La carga se refiere a potencia real o reactiva entregada por el generador, esta variación depende del tipo de estudio que se desee realizar con el generador Diésel algunos de los modelos a tomar en cuenta son:

- Modelo estático, no se conoce las características de la carga que se va a conectar por lo tanto la carga se sustituye por componentes potencia activa y reactiva en diferentes combinaciones; el análisis se hace a niveles constantes de impedancia corriente y potencia.
- Modelo dinámico, se desea verificar el comportamiento de un sistema ante variaciones en la carga conectada, por lo cual se establecen diferentes valores de carga que se intercalan a diferentes tiempos de operación, la carga puede ser de naturaleza activa o reactiva dependiendo de los parámetros que se desee analizar en el sistema.

En este documento utiliza el modelo dinámico para una carga activa balanceada y no se presenta un análisis para cargas desbalanceadas ni de cargas no lineales.

1.3 GENERACIÓN DIÉSEL CONVENCIONAL.

Una planta generadora de energía eléctrica que utilice combustible fósil como principal fuente de energía, puede funcionar en diferentes configuraciones, dependiendo de los dispositivos asociados al generador y al motor de combustión interna, entre estas configuraciones la más simple de todas es utilizar un generador síncrono a velocidad constante utilizando un controlador de velocidad, dicha configuración es mostrada en la Figura 1.2.

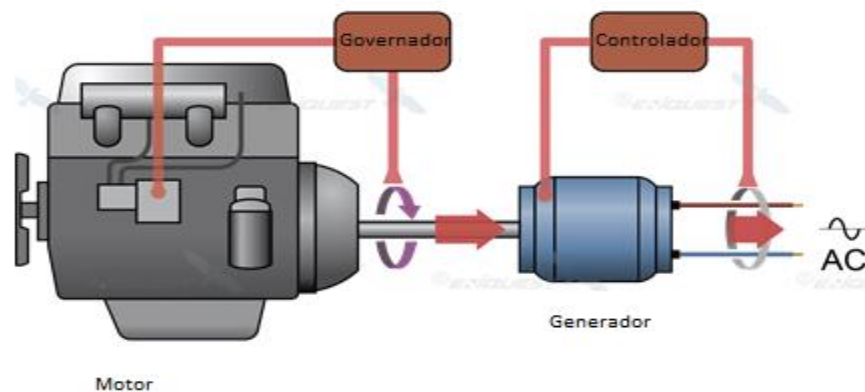


Figura 1.2 Sistema de generación Diésel a velocidad constante [6].

Al utilizar un generador síncrono la frecuencia de la energía generada depende directamente de la velocidad del rotor; por lo cual se opta por mantener una velocidad constante en el motor Diésel la cual es regulada por un controlador de velocidad; este se encarga de medirla y ajustarla dependiendo de la carga conectada, permitiendo que la frecuencia de la señal generada sea siempre 60Hz [7].

Debido a que la velocidad controla directamente la frecuencia de la señal eléctrica, el motor Diésel no puede cambiar la velocidad de operación aun si la carga conectada es menor a la capacidad nominal de la maquina síncrona, esto significa que el motor utiliza más combustible del que necesita, reduciendo la eficiencia energética del generador [6].

Al monitorear el desempeño del generador síncrono a velocidad constante es posible destacar que el controlador de velocidad cumple con las condiciones establecidas, en la Figura 1.3 se muestra el perfil de carga al que será sometido el generador a velocidad constante, el cual da como resultado la velocidad angular mostrada en la Figura 1.4, es posible observar que la velocidad es aproximadamente constante, con la excepción de picos de velocidad cuando se varía de forma abrupta la carga conectada al generador [8], los picos positivos corresponden a una disminución en la carga y los picos negativos a un aumento. Estos picos de velocidad se verán evidenciados en una variación momentánea en la frecuencia y amplitud de salida del generador, lo cual disminuye en cierta medida la calidad de la energía generada, este tipo de variaciones podrían afectar a los dispositivos conectados al generador dependiendo de la naturaleza y robustez de los mismos, por lo cual no se recomienda utilizar generación a velocidad constante si se desea alimentar equipos de electrónica sensible a menos que los problemas de calidad de energía sean tratados con algún dispositivo extra.

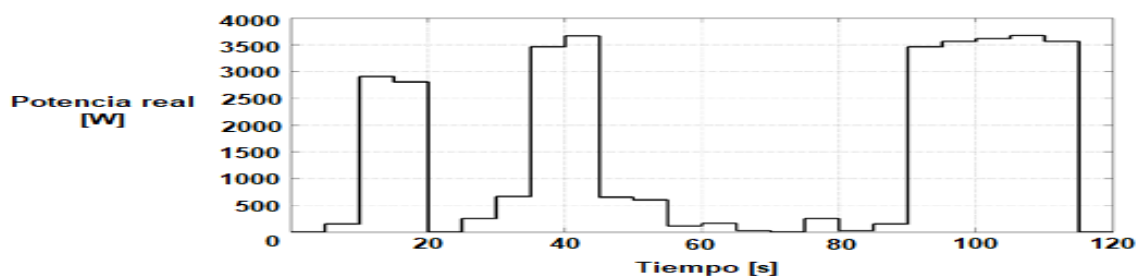


Figura 1.3 Perfil de carga al que es sometido el generador a velocidad constante [8].

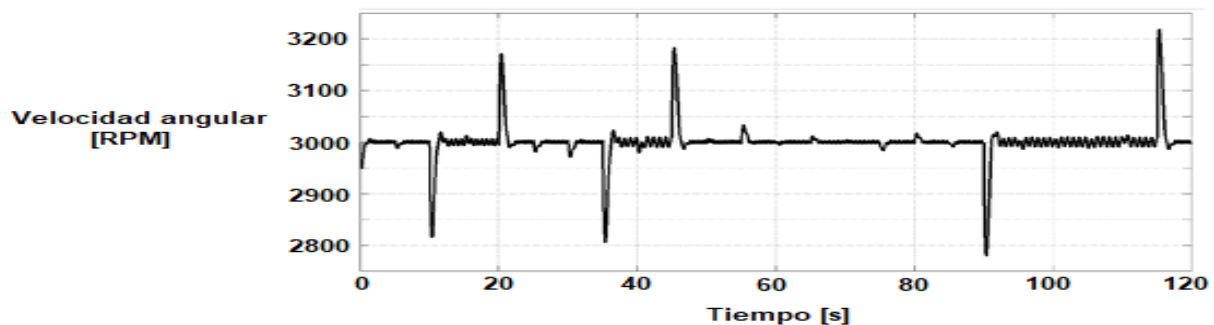


Figura 1.4 Velocidad angular de salida del motor resultado del perfil de carga establecido [8].

Además de la velocidad angular es posible verificar el comportamiento eléctrico del generador al ser sometido al perfil de carga específico de la Figura 1.3, la Figura 1.5 muestra la tensión de salida y la Figura 1.6 muestra la corriente demandada por la carga al generador; cómo es posible observar la tensión se conserva aproximadamente estable a pesar de los cambios abruptos en la carga conectada, por su parte el consumo de corriente varía proporcionalmente a la potencia demandada por la carga.

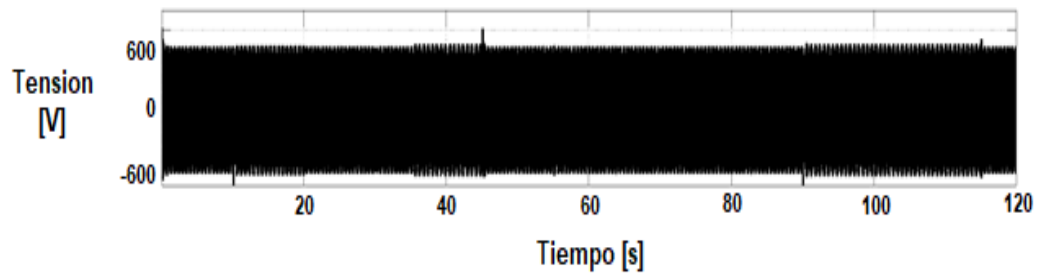


Figura 1.5 Tensión de salida del generador resultante del perfil de carga [8].

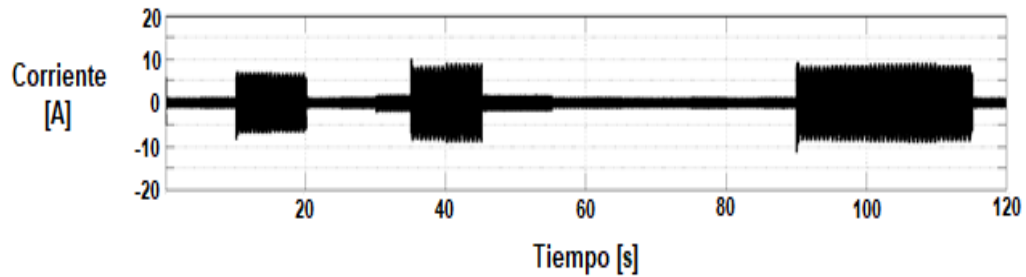


Figura 1.6 Corriente demandada por el perfil de carga [8].

Es importante mencionar que debido a la velocidad constante del motor Diésel este consume altos índices de combustible [8], lo cual es su principal desventaja, la poca eficiencia de la maquina; además de presentar mayor desgaste en el motor Diésel debido a que se mantiene trabajando todo el tiempo a alta velocidad, por lo que también se traduce a mayor generación de ruido durante todo el periodo de operación del generador, asimismo la poca calidad de la energía resultante debido a los cambios abruptos en la carga, no obstante presenta la ventaja de ser un sistema relativamente simple de implementar además de ser barato, por lo cual podría utilizarse para aplicaciones de carga constante que no requieran energía de alta calidad.

1.4 GENERACIÓN A VELOCIDAD VARIABLE.

La generación de energía eléctrica a velocidad variable impulsada por motores Diésel presenta la ventaja de no limitar la velocidad de operación de la máquina, lo cual da la posibilidad de tener distintos puntos de operación para un mismo valor de potencia, aquí el criterio es escoger aquel punto de operación que represente un menor consumo de combustible, lo cual se traduce en ahorro en el consumo debido a las curvas de operación de cada motor, caso especialmente oportuno cuando se atiende una carga que presenta variaciones de potencia requerida.

El ahorro de combustible no es constante para todos los puntos de operación ya que cuando la carga se aproxima al 100% de la capacidad nominal del motor la velocidad de operación más óptima es cercana a la velocidad nominal de la máquina, por lo cual cerca

del punto de capacidad máxima la generación a velocidad constante y la generación a velocidad variable coinciden en la curva de consumo, lo que indica que el mayor ahorro de combustible se da cuando la planta opera en rangos que estén por debajo de la capacidad nominal del conjunto o bien en sistemas donde el perfil de carga varíe frecuentemente durante el día.

En algunos sistemas de generación híbridos (Eólicos - Diésel) donde el motor Diésel cumple la función de compensar la demanda cuando el sistema eólico no puede suplir la totalidad de potencia, es de vital interés que la porción de energía que es suplida por el sistema Diésel tenga una eficiencia óptima para mantener rentable la operación de la planta de generación eólica por lo cual se han hecho diversos estudios [9] para la implementación de sistemas Diésel de velocidad variable para el caso de una deficiencia en la generación de energía y a su vez la implementación de celdas de almacenamiento de energía cuando la generación de la turbina eólica excede la demanda.

1.4.1 CORRIENTE ALTERNA DINÁMICA O DAC.

La corriente alterna dinámica es un concepto propuesto por la empresa ABB [10] que mediante la generación de energía eléctrica con motores diésel permite optimizar el consumo de combustible ajustando la velocidad de rotación en el motor que impulsa el generador síncrono, esto da lugar a que la frecuencia del sistema varíe dentro de un rango específico, un ejemplo a magnitud constante se muestra en la Figura 1.7, esta señal se puede procesar usando dispositivos de electrónica de potencia con el fin de normalizar la frecuencia y la amplitud; la señal de corriente alterna dinámica se convierte en corriente directa irregular o pulsante utilizando un rectificador, a continuación se regula el valor de la tensión por medio de un dispositivo elevador, esto da como resultado obtener un voltaje DC estable preparado para alimentar tableros DC de control o ser la señal de entrada de un inversor trifásico que pueda proveer potencia en corriente alterna a 50 o 60 Hz, incluso dependiendo de las exigencias de la carga se puede decidir operar a otra frecuencia, un ejemplo básico del esquema de generación DAC se puede ver en la Figura 1.8.

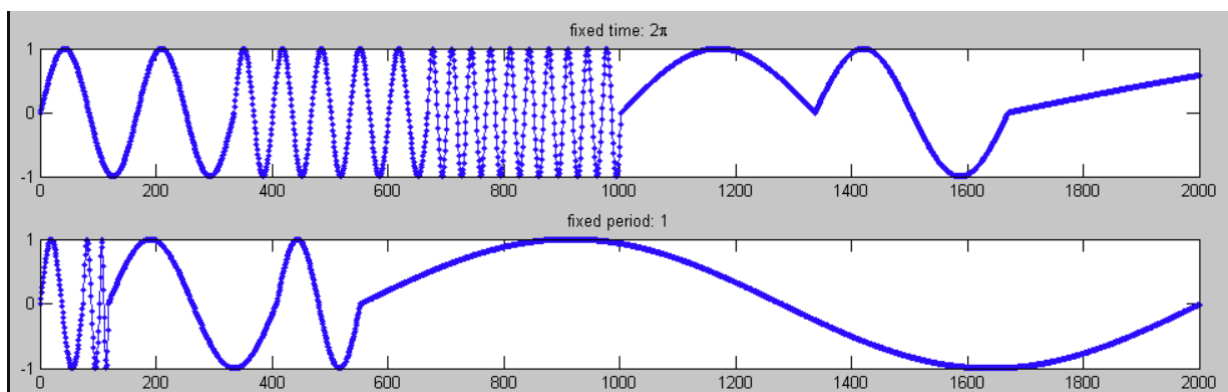


Figura 1.7 Ejemplo de señal de tensión de frecuencia variable y magnitud constante.

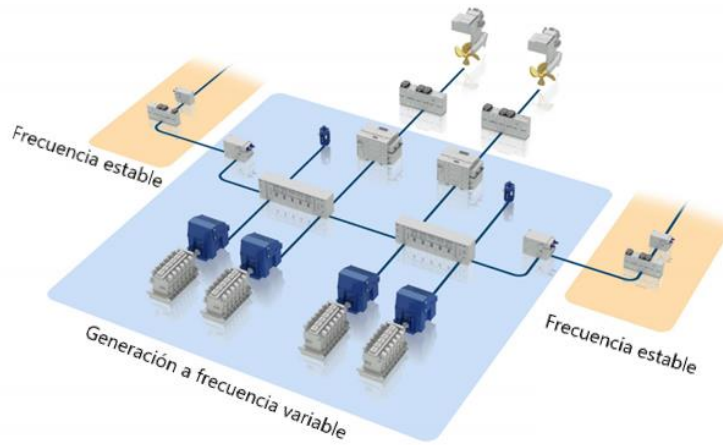


Figura 1.8 Esquema básico de generación a velocidad variable mostrando las islas estabilizadoras de frecuencia [10].

1.5 COMPARACIÓN ENTRE LA GENERACIÓN CONVENCIONAL Y LA GENERACIÓN DIÉSEL A VELOCIDAD VARIABLE.

La mayoría de sistemas de generación Diésel convencional (a velocidad constante) tienen a presentar niveles bajos de eficiencia energética especialmente cuando se atiende una carga que está muy por debajo de la capacidad nominal de la máquina, por lo cual en este modo de operación se sugiere una carga mínima del 30% al 40% de la carga nominal, sin embargo cuando se opera un sistema de generación a velocidad variable este problema se ve corregido mediante la variación del punto de operación del motor Diésel.

La eficiencia del sistema de generación en función de la carga se presenta en la Figura 1.9; esto indica que para una velocidad constante cuanto menor la demanda menor es la eficiencia del sistema; también es importante destacar que dependiendo del valor de la velocidad fija a utilizar se limitará el valor máximo de potencia entregada, esto se ilustra en la figura Figura 1.10 donde se observa que para poder operar la máquina a la máxima potencia es necesario utilizar la velocidad nominal del motor.



Figura 1.9 Eficiencia típica de un motor Diésel a partir de la potencia de salida requerida a velocidad constante [11].

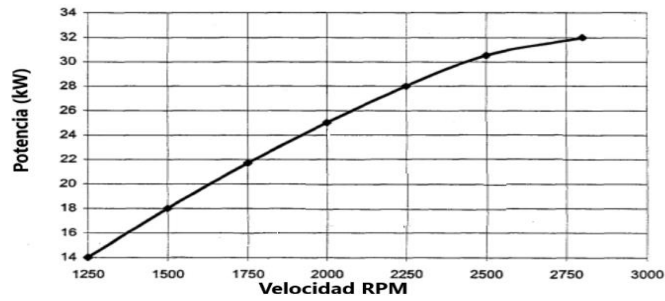


Figura 1.10 Potencia máxima de salida de un motor Diésel a partir de la velocidad de operación del sistema a velocidad constante [11].

Para la operación a velocidad variable se introduce el concepto de mapas de isoconsumo, ejemplos de estos mapas pueden verse en la Figura 1.11 y la Figura 1.12, en dichas figuras se muestran diagramas con zonas de distintos colores, cada zona representa un consumo específico de combustible en un rango de velocidad y carga determinados (En la Figura 1.11 el color azul oscuro representa el menor consumo y el color verde musgo el mayor consumo), se presentan dos curvas de operación en la Figura 1.11 una a velocidad constante y otra a velocidad variable, cada curva está relacionada con la carga del motor, cuanto más al centro se ubique la operación de la maquina menor será su consumo por tanto mayor será su eficiencia, la tendencia mostrada respalda lo mencionado anteriormente ya que se observa que el consumo de combustible es menor operando a velocidad variable y que el ahorro aumenta a medida la carga del motor baja.

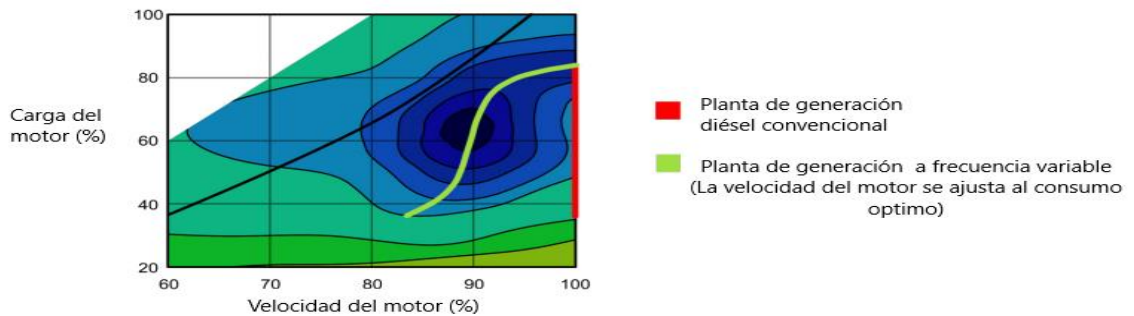


Figura 1.11 Ejemplo de un mapa de consumo específico de una planta de generación diésel [10].

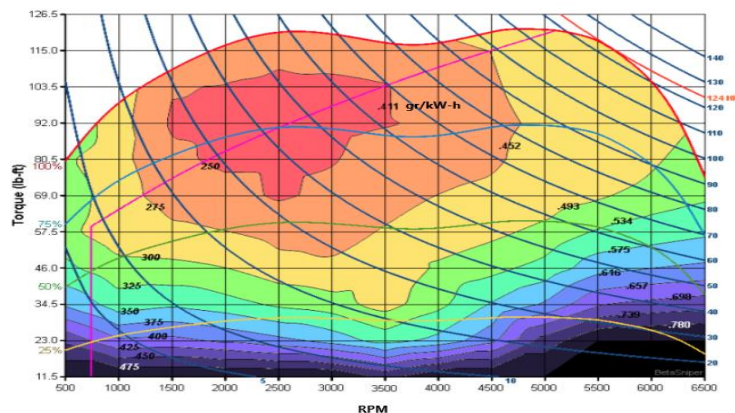


Figura 1.12 Ejemplo de un mapa de consumo específico típico de un motor Diésel.

1.6 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA BÁSICA DEL SISTEMA PROPUESTO.

En la figura Figura 1.13 se presenta el esquema básico del sistema de generación de frecuencia variable compuesto por:

- Set generador y motor Diésel: Compuesto por el bloque del motor Diésel acoplado al generador trifásico síncrono.
- Electrónica de potencia: el dispositivo empleado básicamente es un variador de frecuencia compuesto por un rectificador trifásico para la conversión AC/DC, un convertidor boost (elevador) para estabilizar la tensión DC, un inversor trifásico para la conversión DC/AC además de un filtro pasivo para minimizar las componentes armónicas producto de la no linealidad de los componentes anteriormente mencionados.
- Carga eléctrica: un modelo de carga dinámica de conmutación simple.
- Bloque de medición de potencia en la carga.
- Bloque de cálculo de velocidad de referencia del motor Diésel: dicho elemento implementa un algoritmo que calcula la velocidad óptima de giro del motor Diésel a partir de la medición de potencia en la carga tomando en cuenta el menor consumo de combustible.

Cabe mencionar que cualesquiera de los macro bloques anteriores podrían involucrar bloques de control interno que se detallaran posteriormente en el capítulo IV.

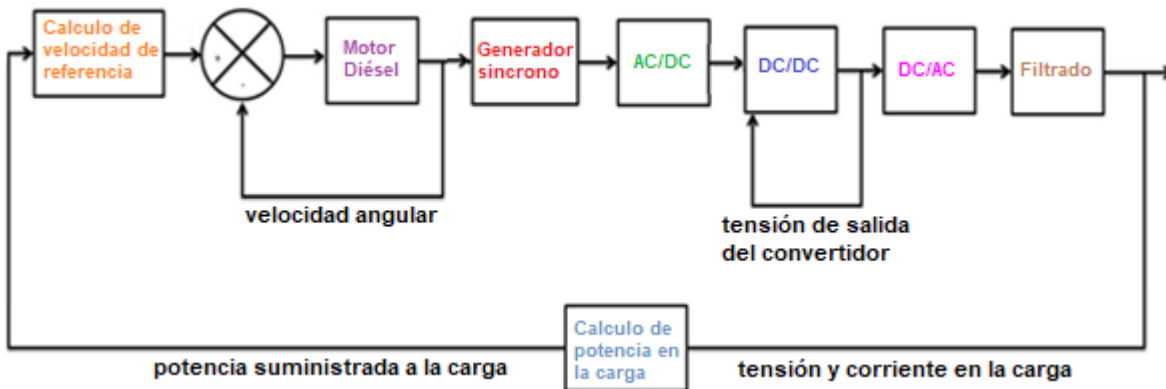


Figura 1.13 Esquema básico del sistema de generación a velocidad variable propuesto.

2 CAPÍTULO II: TEORÍA, DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA Y MODELO EN SIMULINK DEL CONJUNTO MOTOR GENERADOR.

2.1 MOTOR DIÉSEL.

Tabla 2.1 Simbología y variables usadas para la descripción del generador síncrono.

Símbolo	Significado	Unidad del SI
<i>Pot</i>	Potencia.	W
<i>Tor</i>	Torque.	N*m
<i>N</i>	Velocidad angular	rad/s
$\eta_f, \eta_{th}, \eta_{mech}$	Eficiencia del motor, eficiencia térmica, eficiencia mecánica.	-
r_c, r	Coeficiente de corte, coeficiente de compresión del motor.	-
<i>P</i>	Presión.	kPa
<i>T</i>	Temperatura.	K
<i>V</i>	Volumen.	m ³
γ	Coeficiente de dilatación adiabática.	-
<i>IMEP, BMEP, FMEP</i>	Presión promedio efectiva indicada, Presión promedio efectiva de freno, presión promedio efectiva de fricción.	kPa
V_d	Volumen de desplazamiento del motor	m ³
n_R	Numero de vueltas del eje del cigüeñal necesario para completar un ciclo.	-
P_{ind}, P_b, P_f	Potencia indicada, potencia de freno, potencia de fricción.	Ω
<i>BSFC</i>	Consumo específico de combustible.	kg/J
Q_{Hv}	Valor menor de calentamiento del combustible.	J/kg

2.1.1 CONCEPTOS Y FUNCIONAMIENTO.

El motor Diésel al ser una maquina derivada del motor de gasolina muestra muchas similitudes en el funcionamiento y forma de operación que el motor de gasolina, la idea básica que lo diferencia de estas máquinas es que no utiliza sistema de ignición externo para encender el combustible, si no que utiliza inyección a alta presión en una cámara que contiene aire a una temperatura mayor que la temperatura de auto combustión [12], por lo cual hace innecesario el uso de chispas como el motor de gasolina, a este proceso se le conoce como auto inflamación.

El proceso está basado en un ciclo Diésel ideal de 6 pasos el cual es mostrado en la Figura 2.1.

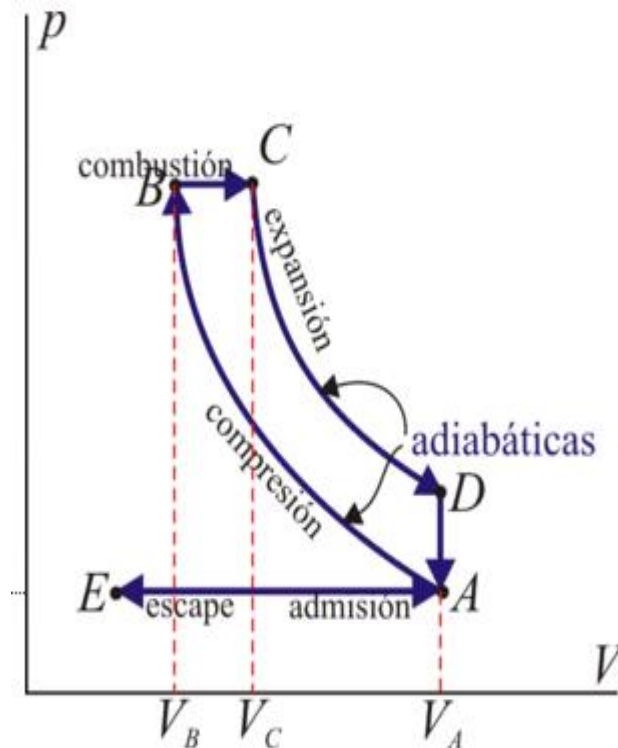


Figura 2.1 Diagrama P-v del ciclo Diésel [13].

En el primer paso E-A el pistón baja con la válvula de admisión de aire abierta [14], al estar abierta la expansión se realiza a presión constante (presión ambiente) en el diagrama P-v se modela como una línea recta en el que el volumen de la cámara aumenta y la presión se mantiene constante.

En segundo paso se cierra la válvula de admisión y el pistón sube comprimiendo el aire dentro de la cámara, este proceso sucede con tal velocidad que se le considera un proceso adiabático [15], ya que el fluido dentro de la cámara no intercambia calor con su entorno, además de tomar dicha compresión como reversible ya que se desprecian los efectos de la fricción; en el diagrama P-v esto se modela como una curva de compresión adiabática como la mostrada por la curva A-B en la Figura 2.1.

En el tercer paso el inyector introduce el combustible en la cámara donde está el aire a alta presión, el combustible al entrar en contacto con el aire presurizado se enciende y genera calor dentro de la cámara, este paso al ser de mayor duración que en un motor de gasolina [13] se modela como una adición de calor a presión constante modelado como una línea recta en el diagrama P-v mostrado como la curva B-C en la Figura 2.1.

En el cuarto paso la alta temperatura del gas empuja el pistón realizando una expansión de alta velocidad en la cámara del pistón, por su corta duración es modelada como una curva de expansión adiabática reversible como es mostrado en la curva C-D en la Figura 2.1 este es el inverso del paso 2 descrito anteriormente.

Los pasos quinto y sexto se denominan escape, estos tienen lugar cuando se abre la válvula de admisión de aire y el pistón llega a su punto más bajo en la expansión de la cámara del cilindro, en este punto el volumen permanece constante pero la presión es liberada al ambiente ocurriendo una despresurización a volumen constante, esto es modelado por la curva D-A de la Figura 2.1, luego cuando el pistón empuja el aire con la válvula abierta el volumen de la cámara se reduce a presión constante (presión ambiente) mostrado por la curva isobárica A-E de la Figura 2.1 la cual cierra el ciclo del motor volviendo al punto inicial del proceso.

2.1.2 DISCUSIÓN MATEMÁTICA A USAR PARA EL MODELO.

Potencia de salida del motor Diésel.

El motor Diésel es una máquina térmica que tiene como principio transmitir la energía generada por la combustión y aprovecharla en forma de energía mecánica, para conocer la respuesta de salida del motor Diésel es necesario determinar las variables involucradas en dicha transformación, para comenzar es necesario estimar la potencia generada por el motor Diésel, la establece la relación entre la potencia de salida, el torque y la velocidad angular [16] mostrada en la Ecuación 2-1.

Ecuación 2-1

$$Pot = Tor * N * \frac{\pi}{30}$$

Donde Pot es la potencia de salida del motor en W, N es la velocidad angular en RPM y Tor es el torque en N*m.

Eficiencia de salida del motor Diésel.

Los combustibles fósiles están caracterizados por su alta densidad de energía, no obstante mucha de esta energía es desperdiciada debido al proceso de combustión, solo una fracción de la energía total del combustible termina siendo aprovechada como energía mecánica, lo cual da lugar a considerar la eficiencia del motor Diésel, esta eficiencia puede ser estimada considerando las pérdidas que representan mayor importancia en el motor, en el caso del motor Diésel las pérdidas más significativas son las pérdidas mecánicas y las pérdidas termodinámicas por lo cual la eficiencia del motor puede ser calculada según la relación mostrada en la Ecuación 2-2.

Ecuación 2-2

$$\eta_f = \eta_{th} * \eta_{mech}$$

Donde η_{th} es la eficiencia termodinámica de la máquina y η_{mech} es la eficiencia mecánica.

Eficiencia termodinámica.

A partir del diagrama P-v para un ciclo ideal del motor Diésel mostrados en la Figura 2.2 Diagrama P-v ideal del ciclo Diésel. la eficiencia térmica puede definirse con la relación mostrada en la Ecuación 2-3 [17].

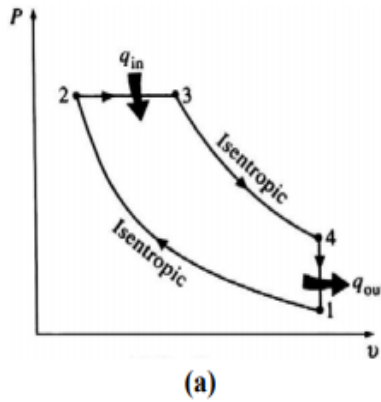


Figura 2.2 Diagrama P-v ideal del ciclo Diésel.

Ecuación 2-3
$$\eta_{th} = 1 - \left(\frac{1}{r^{\gamma-1}} \right) * \frac{(r_c^\gamma - 1)}{\gamma * (r_c - 1)}$$

Donde r es el coeficiente de compresión del motor este representa la relación de volumen inicial y final de los pistones en un proceso de compresión isotrópico es decir entre V_1 y V_2 en el diagrama P-v, este valor es proporcionado típicamente por el fabricante en la hoja de especificaciones del motor y tiene valores típicos entre 12 y 24 dependiendo del diseño del motor; γ es el coeficiente de dilatación adiabática del aire, valor asumido de 1.4 para gases ideales en la atmosfera terrestre y r_c es el coeficiente de corte el cual es la relación del volumen del pistón antes y después del proceso de combustión representado por V_3 y V_4 en el diagrama P-v, este coeficiente tiene valores típicos entre 1.4 y puede ser determinado utilizando la expresión del gas ideal a presión constante en los puntos de operación 2 y 3 de la Figura 2.2 como se muestra en la Ecuación 2-4 y la Ecuación 2-5.

Ecuación 2-4
$$\frac{P_2 * V_2}{T_2} = \frac{P_3 * V_3}{T_3}$$

Ecuación 2-5
$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{V_3}{V_2} = r_c$$

Adicionalmente el proceso a presión constante la compresión isotrópica del punto 1 al 2 da una relación importante como se muestra en la Ecuación 2-6, que al despejar para la temperatura 2 se obtiene la Ecuación 2-7.

Ecuación 2-6
$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}$$

Ecuación 2-7
$$T_2 = T_1 * \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}$$

Al conocer el radio de compresión r definido en la Ecuación 2-8 es posible sustituirlo en la Ecuación 2-7 dando como resultado la Ecuación 2-9.

Ecuación 2-8

$$r = \frac{V_1}{V_2}$$

Ecuación 2-9

$$T_2 = T_1 * r^{\gamma-1}$$

Sustituyendo la Ecuación 2-9 para la temperatura 2 en la Ecuación 2-5 es posible determinar el coeficiente r_c a partir de cantidades conocidas como se muestra en la Ecuación 2-10.

Ecuación 2-10

$$r_c = \frac{V_3}{V_2} = \frac{T_3}{T_2} = \frac{T_3}{T_1 * r^{\gamma-1}}$$

Donde T_3 es definido como la temperatura de la flama del combustible valor cercano a 2000K para combustible Diésel y T_1 es la temperatura de entrada del aire, la cual puede ser aproximada a la temperatura ambiente donde se tomará 300K como un valor aproximado de diseño.

Eficiencia mecánica.

Otro de los parámetros de diseño a tomar en cuenta es el MEP (Mean Effective Pressure) parámetro que representa la presión promedio efectiva, este es un indicador del rendimiento relativo del motor el cual puede ser utilizado para comparar diferentes motores sin importar la capacidad de volumen desplazado de los pistones, este valor puede ser calculado a partir de parámetros de potencia y velocidad angular o bien conociendo previamente el torque del motor, esta relación es establecida en la Ecuación 2-11 [16].

Ecuación 2-11

$$MEP = \frac{P * n_R}{V_d * N} = \frac{6.28 * n_R * T}{V_d}$$

Donde MEP representa la presión promedio efectiva en kPa, V_d representa el volumen desplazado por el motor en L y n_R representa el numero de vueltas del eje del cigüeñal necesarias para terminar un ciclo del motor (el cual vale 2 para un motor de 4 tiempos).

Es necesario destacar que el parámetro MEP se define mediante la ubicación de la medición y el método de cálculo, en la Ecuación 2-12 se detallan los que se utilizaran para el estudio del motor Diésel, dicha relación se basa en conocer el BMEP (Break Mean Effective Pressure) parámetro que representa la presión entregada a la carga por el motor, donde también se toman en cuenta la presión que se pierde en el motor debido a la fricción de cada una de sus partes representada por FMEP (Friction Mean Effective Pressure) la suma de estos 2 parámetros da como resultado la IMEP (Indicated Mean Effective Pressure) valor dado a la presión neta generada por el motor.

Ecuación 2-12

$$IMEP = BMEP + FMEP$$

El máximo BMEP (o torque máximo) para cada velocidad de operación es usualmente provisto por el fabricante y puede ser utilizado como valor límite y aun si este valor no es proporcionado es usual utilizar valores entre 700-900 kPa [16] para propósitos de diseño.

Las pérdidas mecánicas están asociadas a la potencia requerida para superar la fricción de los componentes en el motor esto puede ser definido según la relación mostrada en la Ecuación 2-13 y la Ecuación 2-14

Ecuación 2-13

$$P_{ind} = P_b + P_f$$

Ecuación 2-14

$$\eta_{mech} = \frac{P_b}{P_{ind}} = 1 - \frac{P_f}{P_{ind}} = \frac{P_b}{P_b + P_f}$$

Donde P_{ind} es la potencia neta generada por el motor Diésel, P_f es la potencia que se pierde en el motor debido a la fricción de cada una de sus partes y P_b representa la potencia entregada a la carga por el motor, es posible asociar estos valores a las relaciones de MEP establecidas en la Ecuación 2-13 lo cual resulta en la relación mostrada en la Ecuación 2-15.

Ecuación 2-15

$$\eta_{mech} = \frac{BMEP}{IMEP} = 1 - \frac{FMEP}{IMEP} = \frac{BMEP}{BMEP + FMEP}$$

Aunque las pérdidas por fricción pueden ser difíciles de estimar sin pruebas físicas en el motor es posible tener un comportamiento aproximado utilizando la expresión mostrada en la Ecuación 2-16.

Ecuación 2-16

$$FMEP = 6.89476 * \left(r + 7 * \left(\frac{N}{1000} \right) + 1.5 * \left(\frac{2 * L * N}{1000} \right)^2 \right)$$

Donde r es el coeficiente de compresión del motor N es la velocidad angular en RPM y L es la longitud de la carrera del cilindro del motor Diésel en metros.

A partir de ahí solo es necesario establecer los valores de BMEP los cuales son valores conocidos ya que es la presión entregada por el motor a la carga, es usual trabajar estos valores utilizando la Ecuación 2-11 si los valores de potencia de salida del motor son conocidos.

Consumo específico de combustible.

El consumo específico de combustible (BSFC) está definido como la medida de la eficiencia del combustible en el motor para producir potencia en el eje, es decir la tasa de consumo de combustible dividida por la potencia producida, este valor es usualmente utilizado para comparar la eficiencia de combustible entre diferentes motores y puede ser definido utilizando la expresión mostrada en la Ecuación 2-17.

Ecuación 2-17

$$BSFC = \frac{1}{\eta_f * Q_{Hv}}$$

Donde η_f es la eficiencia de salida del motor Diésel y Q_{Hv} es el valor menor de calentamiento para el combustible, el cual este definido en tablas dependiendo del tipo de combustible a utilizar en el motor.

Actuador.

El actuador es el dispositivo encargado de controlar el flujo de combustible en la cámara de combustión, dependiendo del tipo de actuador este puede recibir una señal hidráulica, neumático o eléctrica en la entrada $I(s)$ y el tendrá como salida un flujo específico de combustible $\phi(s)$; la ecuación de transferencia del actuador está definida por la Ecuación 2-18 [18].

Ecuación 2-18 $\phi(s) = \frac{K_3 * K_2}{(1 + \tau_2 * s)} * I(s)$

La cual es una función de desfase de primer orden donde K_2 es la constante de proporcionalidad del actuador, K_3 es la constante de proporcionalidad de la cantidad de torque mecánico por unidad de flujo de combustible y τ_2 es un retardo que depende de la temperatura del combustible que fluye por el actuador, $\phi(s)$. El bloque de función del actuador se muestra en la Figura 2.3 el cual será utilizado posteriormente para definir el diagrama de bloques del sistema completo.

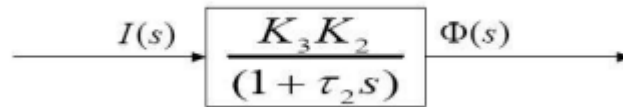


Figura 2.3 Bloque de función del actuador.

Sistema de combustión.

El flujo de combustible $\phi(s)$ es luego convertido a torque mecánico $T(s)$, por lo cual es necesario que este pase por un retardo debido a la combustión del combustible τ_1 y la constante de torque del motor K_1 la función de transferencia del sistema de combustión es definida en la Ecuación 2-19.

Ecuación 2-19 $T(s) = \phi(s) * k_1 * e^{-\tau_1 * s}$

El bloque de función del sistema de combustión está definido en la Figura 2.4.

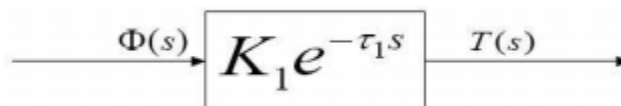


Figura 2.4 Bloque de función del sistema de combustión.

Volante de inercia.

El volante de inercia es una aproximación de los complejos efectos mecánicos en el rotor del motor Diésel, ya que debido a la combustión el pistón produce un torque $T(s)$ que es transformado por el cigüeñal en velocidad angular $\omega(s)$ en el eje, dicho modelo considera la inercia J y el coeficiente de fricción B resultante de la interacción de cada uno de los componentes móviles en el motor Diésel, la función de transferencia del volante de inercia se muestra en la Ecuación 2-20.

Ecuación 2-20
$$\omega(s) = T(s) * \frac{1}{(J*s+B)}$$

El bloque de función del volante de inercia se muestra en la Figura 2.5.

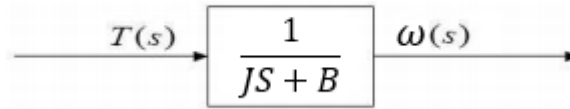


Figura 2.5 Bloque de función del volante de inercia.

El diagrama de bloques y la función de transferencia resultante de la combinación de las secciones mencionadas anteriormente se muestra en la Figura 2.6 y la Ecuación 2-21 respectivamente.

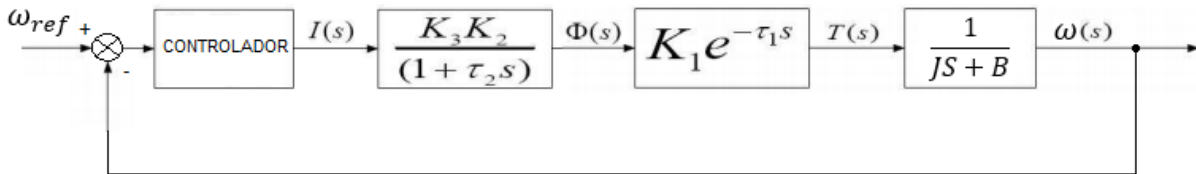


Figura 2.6 Diagrama de bloques típico del motor Diésel.

Ecuación 2-21
$$H(s) = \frac{K_1 * K_2 * K_3 * e^{-\tau_1 * s}}{(J*s+B)*(1+\tau_2*s)}$$

Los valores para cada una de las variables pueden ser especificados a partir de las características específicas del motor, pero las variaciones son despreciables para pequeños intervalos de tiempo [18] por tanto se muestran valores típicos para realizar el modelo, dichos valores se muestran en la Tabla 2.2 aunque la definición de los valores estandarizados de todas las maquinas se definirá en el capítulo 4.

Tabla 2.2 Valores típicos de los parámetros usados para el modelo del motor Diésel.

Parámetro	Valor	Definición
K_1	0.8-1.5	Constante de torque del motor.
K_2	1.0	Constante de proporcionalidad del actuador.
K_3	1.0	Constante de proporcionalidad del controlador.
J	2.5	Coefficiente de inercia.
τ_1	0.0-0.25	Retardo de combustión.
τ_2	0.05-0.2	Retardo del actuador.
B	1.0	Coefficiente de fricción.

2.1.3 MODELO IMPLEMENTADO EN SIMULINK.

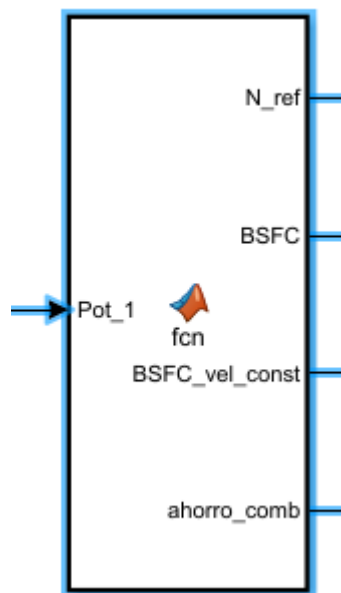


Figura 2.7 Bloque general del motor Diésel.

En la Figura 2.7 las entradas y salidas corresponden respectivamente a:

- Pot_1: Referencia de entrada de potencia demandada por la carga.
- N_ref: Velocidad de referencia de salida.
- BSFC: Consumo de combustible según la potencia demandada por la carga.
- BSFC_vel_const: Consumo de combustible a velocidad constante según la potencia variable demanda por la carga
- ahorro_comb: Diferencia entre el consumo de combustible a velocidad variable con carga dinámica con respecto al funcionamiento a velocidad constante y carga dinámica.

El código de matlab embebido para el bloque de la Figura 2.7 se encuentra en el anexo G como “%Codigo_1_BSFC.” con las ecuaciones desarrolladas en la sección 2.3.

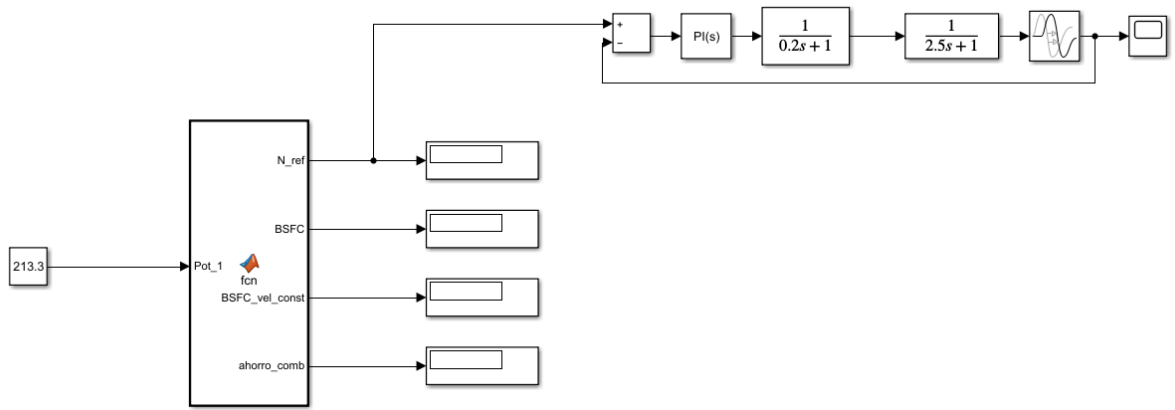


Figura 2.8 Bloque principal del motor y su respectivo control de velocidad

La Figura 2.8 muestra el sistema del motor Diésel propuesto para fines de simulación; una descripción detallada del controlador de velocidad PID para el motor Diésel se expone en el capítulo 4.

2.2 GENERADOR SÍNCRONO.

Tabla 2.3 Simbología y variables usadas para la descripción del generador síncrono.

Símbolo	Significado	Unidad del SI
σ	Angulo de potencia	Rad
ω_r	Velocidad angular del rotor	Rad/s
e_a, e_b, e_c	Tensiones del estator fase- neutro	V
i_a, i_b, i_c	Corrientes del estator en fases a,b y c	A
e_{fd}	Tensión de campo	V
i_{fd}	Corriente del devanado del rotor	A
l_{aa}, l_{bb}, l_{cc}	Inductancias propias del devanado del estator	H
l_{ab}, l_{bc}, l_{ca}	Inductancias mutuas del estator	H
$l_{aa0}, l_{aa2}, l_{ab2}$	Inductancias mutuas referidas a la fase a	H
l_{afd}	Inductancia mutua entre rotor y estator	H
l_{ffd}	Inductancia propia del devanado del rotor	H
l_d	Inductancia del eje q	H
l_q	Inductancia del eje d	H
l_m	Inductancia de magnetización	H
l_l	Inductancia de fuga	H
R_a	Resistencia de armadura por fases	Ω
R_{fd}	Resistencia del devanado del rotor	Ω
ρ	Número de pares de polos del generador	-

2.2.1 CONCEPTOS Y FUNCIONAMIENTO.

Los generadores síncronos son máquinas fundamentales en sistemas de potencia y se usan para la generación de energía eléctrica en centrales hidroeléctricas, termoeléctricas, eólicas entre otras. El generador síncrono consta de dos partes el rotor y el estator, el rotor está compuesto por un devanado de campo el cual genera el flujo magnético que atraviesa el entrehierro y va hacia el estator, para generar dicho flujo es necesario contar una fuente DC variable para propósitos de control al devanado de campo en caso que se necesite, sino se puede excitar de manera constante en su región lineal de operación y utilizar métodos de control por medio de electrónica de potencia; El rotor a su vez puede presentarse en dos tipos: el rotor de polos salientes y polos cilíndricos. Un rotor de polos cilíndricos es aquel que tiene un entre-hierro uniforme al rededor del mismo, están manejados por turbinas de vapor y normalmente diseñados para operar a altas velocidades de 3600 o 1800 RPM, de dos y cuatro polos respectivamente. En cambio, un rotor de polos salientes presenta variación en el entre-hierro que cambia de una saliente a otra. Este tipo de generadores están manejados por turbinas hidráulicas y ubicados en estaciones de generación hidroeléctrica [19].

Los esquemas de los tipos constructivos de rotor de polos cilíndricos y de polos salientes se muestran en la Figura 2.9, la identificación de parámetros del rotor cilíndrico es más simple, ya que este considera un entre-hierro uniforme y el modelo equivalente en estado estable se reduce [20]. El estator está constituido por devanados según el número de fases, en la gran mayoría de casos se utiliza un sistema trifásico con fases a, b y c. La generación de energía tiene lugar cuando el rotor gira lo suficientemente rápido para producir una variación de flujo con respecto al tiempo, lo que induce una tensión en los terminales del estator, conocido como ley de Faraday [21]. En los terminales del generador se obtiene una tensión AC, cuya velocidad o frecuencia angular es igual a la velocidad del rotor multiplicado por la cantidad de pares de polos. La máquina recibe el nombre de generador síncrono debido a que la frecuencia de la señal eléctrica es múltiplo de la frecuencia del rotor.

Cuando un generador síncrono está entregando potencia presenta un ángulo entre el rotor y el estator este es conocido como ángulo de potencia. El ángulo de potencia es directamente proporcional a los incrementos de carga mientras que la frecuencia es inversamente proporcional a dichos aumentos, debido a esto se debe aumentar la potencia mecánica que hace girar el rotor para alcanzar la frecuencia nominal de operación. Cuando el generador se encuentra en vacío (sin carga), el ángulo de potencia es aproximadamente cero. El máximo valor que puede tomar el ángulo de la potencia es de 90 grados, un incremento adicional provoca que el sistema no se pueda balancear ocasionando la pérdida de sincronismo e incrementos en la velocidad del rotor [22]. Los límites de potencia de un generador síncrono están regidos principalmente por la corriente nominal del estator y por esfuerzos mecánicos propios de sus parámetros de construcción mecánica.

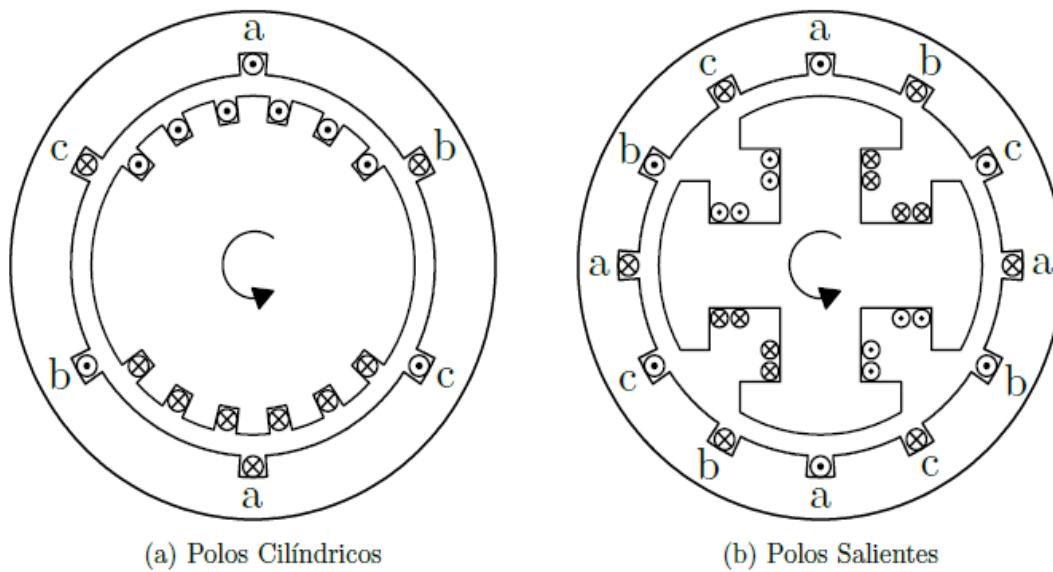


Figura 2.9 Comparación de la forma del rotor de un generador síncrono de polos cilíndricos (a) y un generador síncrono de polos salientes (b).

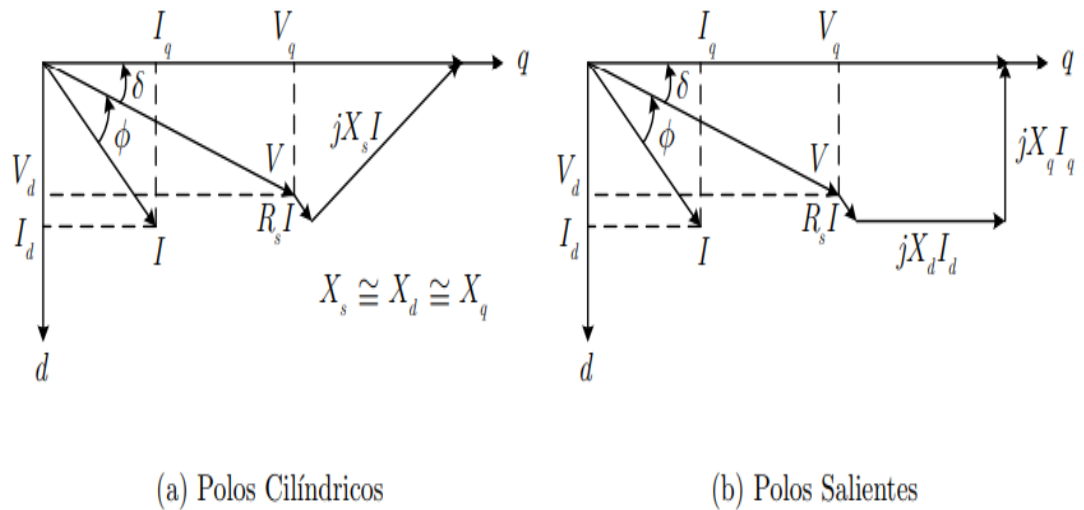


Figura 2.10 Diagrama fasorial de un generador síncrono de polos cilíndricos (a) y un generador de polos salientes (b)

2.2.2 DISCUSIÓN MATEMÁTICA A USAR PARA EL MODELO.

En esta sección parte de la descripción matemática para la implementación del modelo del generador síncrono clásico. El desarrollo analítico de las ecuaciones del generador está basando en el modelo 1.0 del estándar IEEE-1110 [23]. El circuito básico del generador síncrono se muestra en la Figura 2.11.

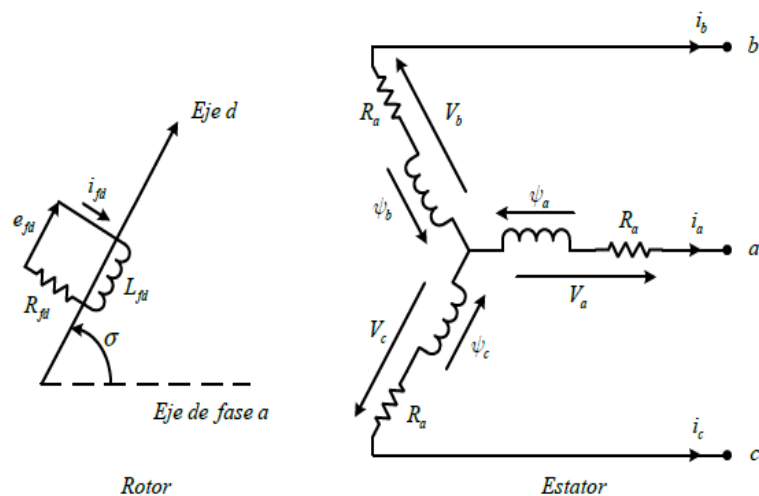


Figura 2.11 Circuito que representa el rotor y el estator de un generador síncrono.

Se muestra el desarrollo de las ecuaciones necesarias para modelar el generador síncrono partiendo de las ecuaciones que relacionan las tensiones del estator con la variación de los flujos con respecto del tiempo:

Ecuación 2-22
$$\frac{d\psi_a}{dt} = V_a + R_a i_a$$

Ecuación 2-23
$$\frac{d\psi_b}{dt} = V_b + R_b i_b$$

Ecuación 2-24
$$\frac{d\psi_c}{dt} = V_c + R_c i_c$$

Los flujos enlazados de los devanados de fase están determinados por las corrientes de fase que circulan por las inductancias de los devanados:

Ecuación 2-25
$$\psi_a = -l_{aa}i_a - l_{ab}i_b - l_{ac}i_c + l_{afd}i_{fd}$$

Ecuación 2-26
$$\psi_b = -l_{ab}i_a - l_{bb}i_b - l_{bc}i_c + l_{bfd}i_{fd}$$

Ecuación 2-27
$$\psi_c = -l_{ca}i_a - l_{bc}i_b - l_{cc}i_c + l_{cfd}i_{fd}$$

Se definen las inductancias como:

Ecuación 2-28
$$l_{aa} = L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2\sigma$$

Ecuación 2-29
$$l_{bb} = L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2(\sigma - \frac{2\pi}{3})$$

Ecuación 2-30
$$l_{cc} = L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2(\sigma + \frac{2\pi}{3})$$

Ecuación 2-31	$l_{ab} = -L_{ab0} - L_{ab2} \cos(2\sigma + \frac{\pi}{3})$
Ecuación 2-32	$l_{bc} = -L_{ab0} - L_{ab2} \cos(2\sigma - \pi)$
Ecuación 2-33	$l_{ca} = -L_{ab0} - L_{ab2} \cos(2\sigma - \frac{\pi}{3})$
Ecuación 2-34	$l_{adf} = L_{afd} \cos \sigma$

Al sustituir de la Ecuación 2-28 hasta la Ecuación 2-34 en la Ecuación 2-25, Ecuación 2-26 y la Ecuación 2-27 se obtiene:

Ecuación 2-35 $\psi_a = -(L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2\sigma)i_a - (-L_{ab0} - L_{ab2} \cos(2\sigma + \frac{\pi}{3}))i_b - (-L_{ab0} - L_{ab2} \cos(2\sigma - \frac{\pi}{3}))i_c + (L_{afd} \cos \sigma)i_{fd}$

Ecuación 2-36 $\psi_b = -(-L_{ab0} - L_{ab2} \cos(2\sigma + \frac{\pi}{3}))i_a - (L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2(\sigma - \frac{2\pi}{3}))i_b - (-L_{ab0} - L_{ab2} \cos(2\sigma - \pi))i_c + (L_{afd} \cos(2\sigma - \frac{\pi}{3}))i_{fd}$

Ecuación 2-37 $\psi_c = -(-L_{ab0} - L_{ab2} \cos(2\sigma - \frac{\pi}{3}))i_a - (-L_{ab0} - L_{ab2} \cos(2\sigma - \pi))i_b - (L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2(\sigma + \frac{2\pi}{3}))i_c + (L_{afd} \cos(2\sigma + \frac{\pi}{3}))i_{fd}$

El flujo del rotor está dado por:

Ecuación 2-38 $\frac{d\psi_{fd}}{dt} = e_{fd} + R_{fd}i_{fd}$

Ecuación 2-39 $\psi_{fd} = l_{ffd}i_{fd} - l_{afd}i_a - l_{bfd}i_b - l_{cfd}i_c$

Las inductancias mutuas entre los devanados de fase y los devanados del rotor se obtienen:

Ecuación 2-40 $l_{afd} = L_{afd} \cos \sigma$

Ecuación 2-41 $l_{bfd} = L_{afd} \cos(\sigma - \frac{2\pi}{3})$

Ecuación 2-42 $l_{cfd} = L_{afd} \cos(\sigma + \frac{2\pi}{3})$

Sustituyendo de la Ecuación 2-40, la Ecuación 2-41 y la Ecuación 2-42 en la Ecuación 2-39 se obtiene:

Ecuación 2-43 $\psi_{fd} = L_{ffd}i_{fd} - L_{afd}(i_a \cos \sigma + i_b \cos(\sigma - \frac{2\pi}{3}) + i_c \cos(\sigma + \frac{2\pi}{3}))$

Transformación de las ecuaciones a las coordenadas dq:

La transformada DQ0 a coordenadas dq0 convierte las expresiones de las componentes “abc” de un sistema trifásico a otro sistema de referencia llamado “dq0”. El objetivo de la transformación consiste en convertir los valores variables sinusoidalmente en el tiempo a valores constantes en régimen permanente el proceso se detalla en el anexo E.

Las anteriores ecuaciones de fase tienen inductancias que varían con el ángulo. Esta transformación introduce nuevas variables para las corrientes del estator:

$$\text{Ecuación 2-44} \quad i_d = kd \left[i_a \cos(\sigma) + i_b \cos\left(\sigma - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cos\left(\sigma + \frac{2\pi}{3}\right) \right]$$

$$\text{Ecuación 2-45} \quad i_q = -kq \left[i_a \sin(\sigma) + i_b \sin\left(\sigma - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \sin\left(\sigma + \frac{2\pi}{3}\right) \right]$$

Con kd y kq igual a 2/3 para condiciones sinusoidales balanceadas, el valor pico de corriente id e iq son iguales al valor pico de las corrientes del estator como se muestra a continuación:

Partiendo de las ecuaciones de corriente alterna de cada fase:

$$\text{Ecuación 2-46} \quad i_a = I_m \sin(\omega_r t)$$

$$\text{Ecuación 2-47} \quad i_b = I_m \sin\left(\omega_r t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$\text{Ecuación 2-48} \quad i_c = I_m \sin\left(\omega_r t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

Reemplazando el sistema de ecuaciones compuesto por la Ecuación 2-46, la Ecuación 2-47 y la Ecuación 2-48 en la Ecuación 2-44 y la Ecuación 2-45 al simplificar se obtiene:

$$\text{Ecuación 2-49} \quad i_d = k_d \left(\frac{3}{2}\right) I_m \sin(\omega_r t - \sigma)$$

$$\text{Ecuación 2-50} \quad i_q = -k_q \left(\frac{3}{2}\right) I_m \cos(\omega_r t - \sigma)$$

Para la componente de secuencia cero se aplica el teorema de Fortescue que se detalla en el anexo E:

$$\text{Ecuación 2-51} \quad i_0 = \left(\frac{1}{3}\right) (i_a + i_b + i_c)$$

En la Ecuación 2-49 y la Ecuación 2-50 para que el valor pico de i_d e i_q sean iguales al valor pico de las fases i_a , i_b e i_c , kd y kq deben ser iguales a 2/3. Por lo tanto, la Ecuación 2-44, la Ecuación 2-45 y la Ecuación 2-51 se pueden expresar de la siguiente forma:

$$\text{Ecuación 2-52} \quad \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\sigma) & \cos\left(\sigma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\sigma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\sigma) & -\sin\left(\sigma - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\sigma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

La Ecuación 2-52 representa la transformación a coordenadas dq0. La transformada inversa está dada por:

$$\text{Ecuación 2-53} \quad \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\sigma) & -\sin(\sigma) & 1 \\ \cos\left(\sigma - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\sigma - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\sigma + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\sigma + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}$$

La matriz de transformación de la Ecuación 2-52 también permite hacer la transformación a coordenadas dq0 de los flujos y tensiones.

Aplicando la matriz de transformación a la Ecuación 2-35, la Ecuación 2-36 y la Ecuación 2-37 obtenemos los flujos en coordenadas dq:

$$\text{Ecuación 2-54} \quad \psi_d = -\left(L_{aa0} + L_{ab0} + \frac{3}{2}L_{aa2}\right)i_d + L_{afd}i_{fd}$$

$$\text{Ecuación 2-55} \quad \psi_q = -\left(L_{aa0} + L_{ab0} + \frac{3}{2}L_{aa2}\right)i_q$$

$$\text{Ecuación 2-56} \quad \psi_0 = -(L_{aa0} - 2L_{ab0})i_0$$

Se definen las nuevas inductancias como:

$$\text{Ecuación 2-57} \quad L_d = L_{aa0} + L_{ab0} + \frac{3}{2}L_{aa2}$$

$$\text{Ecuación 2-58} \quad L_q = L_{aa0} + L_{ab0} - \frac{3}{2}L_{aa2}$$

$$\text{Ecuación 2-59} \quad L_0 = L_{aa0} - 2L_{ab0}$$

Reemplazando la Ecuación 2-57, la Ecuación 2-58 y la Ecuación 2-59 en la Ecuación 2-54, la Ecuación 2-55 y la Ecuación 2-56 se obtiene:

$$\text{Ecuación 2-60} \quad \psi_d = -L_d i_d + L_{afd} i_{fd}$$

$$\text{Ecuación 2-61} \quad \psi_q = -L_q i_q$$

$$\text{Ecuación 2-62} \quad \psi_0 = -L_0 i_0$$

El flujo de campo de la Ecuación 2-43, con una sustitución directa de i_d está dado por:

$$\text{Ecuación 2-63} \quad \psi_{fd} = L_{ffd} i_{fd} - \frac{3}{2} L_{afd} i_d$$

Las ecuaciones que relacionan las tensiones del estator en coordenadas dq0 son:

$$\text{Ecuación 2-64} \quad \frac{d\psi_d}{dt} = V_d + \psi_q \omega_r + R_a i_d$$

$$\text{Ecuación 2-65} \quad \frac{d\psi_q}{dt} = V_q - \psi_d \omega_r + R_a i_q$$

Caso del generador de imán permanente

Para desarrollar las ecuaciones para el caso de generador de imán permanente se considera un flujo magnético constante en el rotor lo cual reduce el número de ecuaciones a considerar.

Para el desarrollo de las ecuaciones [7] del generador síncrono de imanes permanentes se hace la siguiente suposición:

- El circuito magnético es lineal y sin saturación del metal del estator y el rotor, esto se justifica debido al gran espacio del entrehierro que es típico de este tipo de generador.

La ecuación para el flujo en la componente d será:

$$\text{Ecuación 2-66} \quad \psi_d = -L_d i_d + \lambda$$

Las ecuaciones 2-63, 2-64 y 2-65 describen el generador síncrono de imanes permanentes, dichas ecuaciones además describen la maquina en torno a las variaciones de flujo con respecto al tiempo, cabe agregar que conviene tener las ecuaciones en función de la corriente para facilitar la interacción con la carga en Simulink, para realizar el cambio de variable se sustituyen las derivadas de las ecuaciones 2-64 y 2-65 en las ecuaciones 2-60 y 2-61, realizado el proceso anterior las ecuaciones finales son:

$$\text{Ecuación 2-67} \quad \frac{di_d}{dt} = \frac{L_q}{L_d} \omega_r i_q - \frac{R_a}{L_d} i_d - \frac{1}{L_d} V_d$$

$$\text{Ecuación 2-68} \quad \frac{di_q}{dt} = \frac{\lambda \omega_r}{L_q} - \frac{L_d}{L_q} \omega_r i_d - \frac{R_a}{L_q} i_q - \frac{1}{L_q} V_q$$

Para simular la maquina en Simulink se deben expresar la Ecuación 2-67 y la Ecuación 2-68 como una ley de tensiones correspondiente a la representación circuital de la Figura 2.12 que se pueden expresar también como:

$$\text{Ecuación 2-69} \quad V_d = L_q \omega_r i_q - R_a i_d - L_d \frac{di_d}{dt}$$

$$\text{Ecuación 2-70} \quad V_q = \omega_r (\lambda - L_d i_d) - R_a i_q - L_q \frac{di_q}{dt}$$

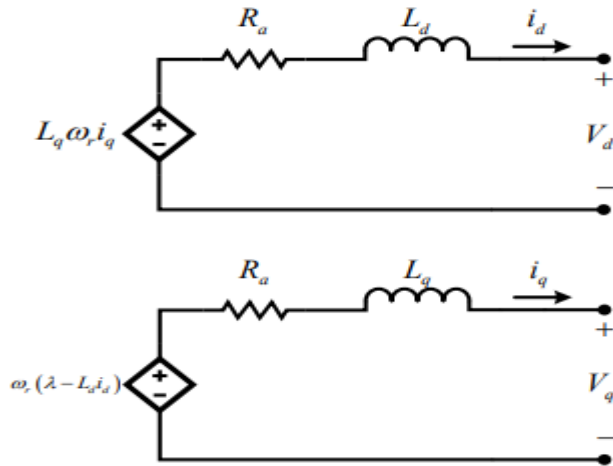


Figura 2.12 Representación circuital de donde surge la Ecuación 2-67 y la Ecuación 2-68.

Potencia y torque:

Las ecuaciones de potencia y torque hacen parte del sistema de ecuaciones necesario para el modelado del generador, ya que permite relacionar la información de la potencia demandada en la carga y la requerida para mantener el sistema estable.

La potencia trifásica instantánea en la salida está dada por:

Ecuación 2-71

$$P_t = V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c$$

En coordenadas dq0 se obtiene:

Ecuación 2-72

$$P_t = \frac{3}{2} (V_d i_d + V_q i_q + 2V_0 i_0)$$

El torque eléctrico a través del entre-hierro es:

Ecuación 2-73

$$T_e = \frac{3}{2} \rho (\psi_d i_q - \psi_q i_d)$$

Reemplazando la Ecuación 2-61 y la Ecuación 2-66 en Ecuación 2-73, se obtiene la ecuación para el torque eléctrico:

Ecuación 2-74

$$T_e = \frac{3}{2} \rho (\lambda i_q + (L_q - L_d) i_d i_q)$$

Ecuaciones utilizadas en el modelo:

A pesar de las ventajas y sencillez que presenta la implementación de un modelo de imanes permanente se decide modelar el generador clásico de polos salientes teniendo en cuenta que se modelara el generador como fuente de corriente para facilitar la interacción de este con la carga en el software Simulink.

Implementando las ecuaciones desde la Ecuación 2-60 a la Ecuación 2-63 en la Ecuación 2-64 y en la Ecuación 2-65 y expresando las inductancias propias de los ejes d y q con sus inductancias de magnetización y de fuga se obtienen en forma matricial las expresiones siguientes:

Ecuación 2-75
$$L = \begin{bmatrix} L_d & 0 & L_{md} \\ 0 & L_q & 0 \\ L_{md} & 0 & L_{lfp} + L_{md} \end{bmatrix}$$

Ecuación 2-76
$$V = \begin{bmatrix} V_d & -R_s I_d & \omega_r \psi_q \\ V_q & -R_s I_q & -\omega_r \psi_d \\ V_{fdp} & -R_{fdp} i_{fdp} & 0 \end{bmatrix}$$

Ecuación 2-77
$$\frac{di}{dt} = L^{-1} * V$$

En el bloque que se muestra en la Figura 2.14 en Matlab realiza la sustitución de las ecuaciones desde la Ecuación 2-60 a la Ecuación 2-63 en la Ecuación 2-64 y en la Ecuación 2-65 y así se obtienen las ecuaciones de la 2.75 a la 2.77 a usar en el modelo.

Ecuación 2-78
$$v_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r i_q L_q$$

Ecuación 2-79
$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r i_d L_d$$

Ecuación 2-80
$$v_0 = R_s i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt}$$

2.2.3 MODELO IMPLEMENTADO EN SIMULINK.

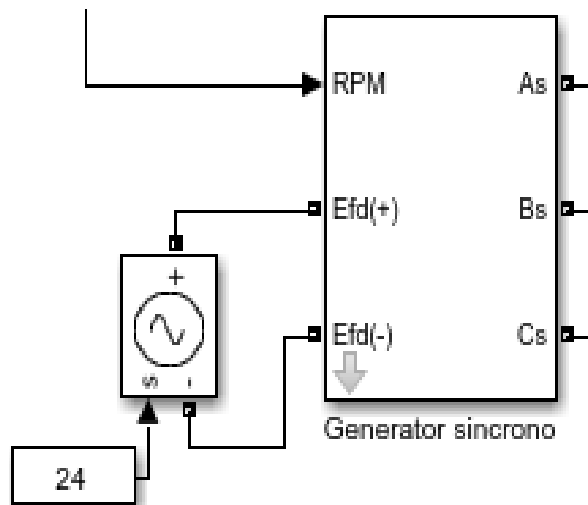


Figura 2.13 Bloque general del generador síncrono.

Las entradas y salidas mostradas en la Figura 2.13 se describen como sigue:

- RPM (1/s): Entrada de la señal de velocidad de giro proporcionada por el motor Diésel.
- Efd(+) y Efd(-): Respectivamente corresponden a los bornes de entrada de tensión de excitación del generador. [Fijo]
- As, Bs, Cs: Corresponden a las líneas de salida de corriente eléctrica que proporciona el generador.

El bloque mostrado en la Figura 2.13 se compone por los elementos mostrados en la Figura 2.14, Figura 2.15, Figura 2.16, Figura 2.17 y Figura 2.18.

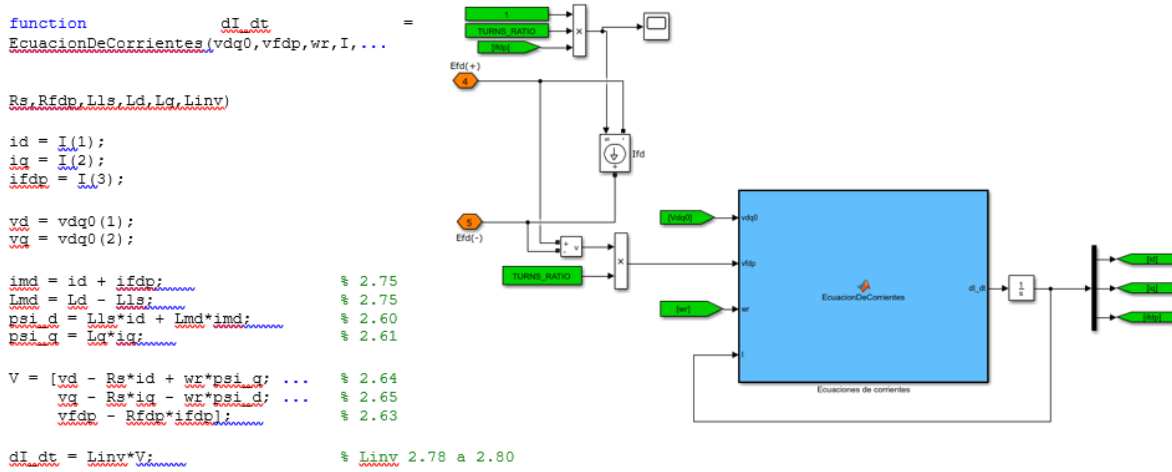


Figura 2.14 Componente interna para el cálculo de corrientes dinámicas del bloque del generador mostrado en la Figura 2.13.

En la Figura 2.14 se muestran principalmente los bornes para la excitación del generador síncrono correspondientes a Efd(+) y Efd(-) y el bloque de código embebido correspondiente a las ecuaciones de corriente para generar las componentes i_d e i_q , el detalle del código comentado con las ecuaciones de la sección 2.2.2 se puede ver en el Anexo G como “%Codigo_2_DinamicasDeCorrienteGenSinc”.

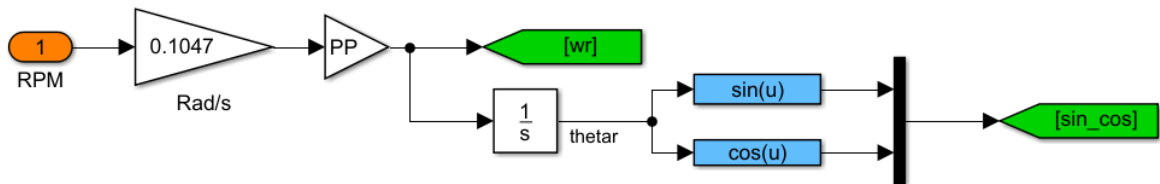


Figura 2.15 Componente interna del bloque del generador mostrado en la Figura 2.13 para el cálculo de theta.

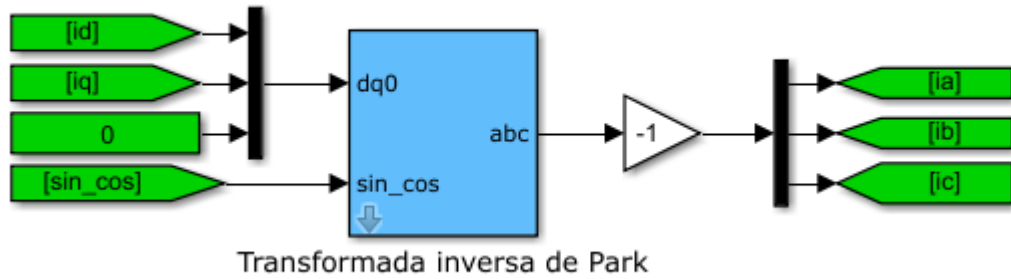


Figura 2.16 Componente interna del bloque del generador mostrado en la Figura 2.13 para el cálculo de las corrientes de línea.

En la Figura 2.16 se realizan los cálculos de las corrientes de línea del generador a partir de sus componentes en los ejes dq0 aplicando la transformada inversa DQ0 del anexo E y su respectiva lógica de bloques se muestra en el anexo G como: [%Lógica_de_bloques_1 Transformada inversa de park.](#)

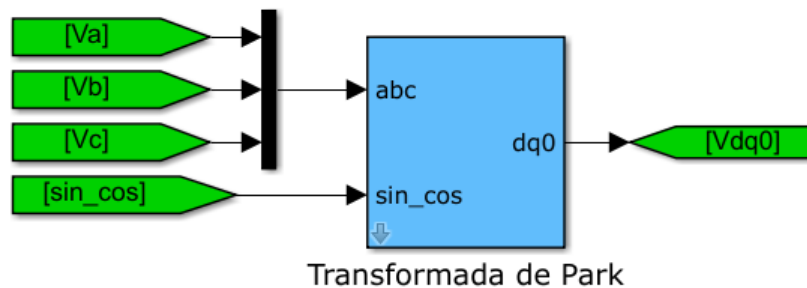


Figura 2.17 Componente interna del bloque del generador mostrado en la Figura 2.13 para el cálculo de las tensiones en los ejes dq0.

En la Figura 2.17 se realizan los cálculos de las tensiones en los ejes dq0 generador a partir de las tensiones de línea Va, Vb y Vc aplicando la transformada DQ0 del anexo E y su respectiva lógica de bloques se muestra en el anexo G como: [%Lógica_de_bloques_2 Transformada de park.](#)

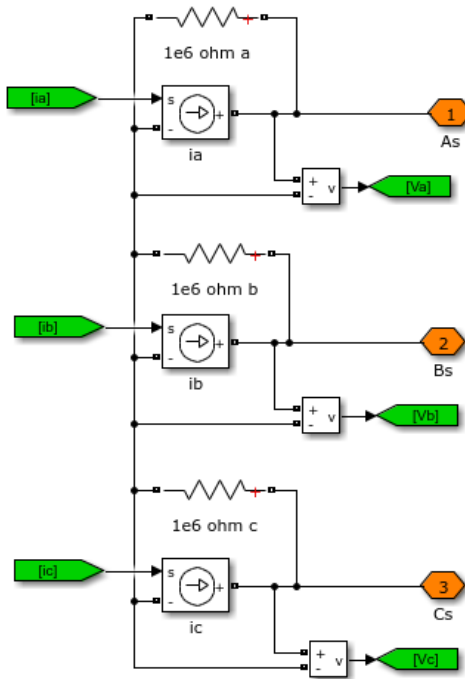


Figura 2.18 Componente interna del bloque del generador mostrado en la Figura 2.13 para la conversión de señal de corriente a tensión.

Es necesario debido a requerimientos de simulación hacer una conversión de una señal matemática de corriente a una señal física de tensión para realimentar el bloque de cálculo de tensiones en los ejes dq0 y proporcionar las salidas de tensiones de línea del generador tal como se mostró en la Figura 2.13.

3 CAPÍTULO III: TEORÍA, DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA Y MODELO EN SIMULINK DEL VARIADOR DE TENSION Y FRECUENCIA TRIFÁSICO.

Un variador de tensión y frecuencia es un dispositivo que permite modificar la amplitud y frecuencia de una señal por medio del uso de electrónica de potencia, la señal de entrada pasa por 3 procesos como se puede ver en la Figura 3.1.

- Rectificación (AC/DC).
- Estabilización de tensión (DC/DC).
- Inversión (DC/AC).

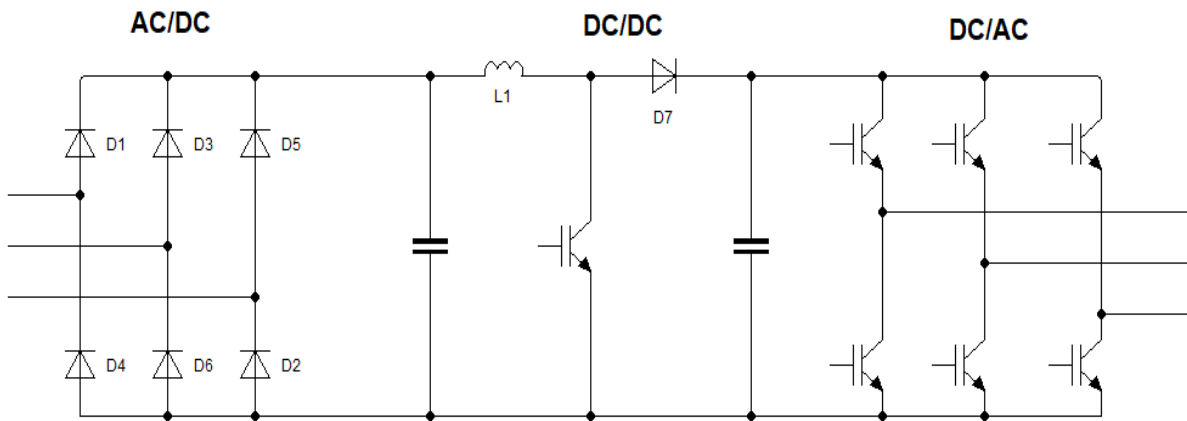


Figura 3.1 Esquema básico de un variador de tensión y frecuencia.

En este capítulo se modela la dinámica general del comportamiento en conjunto de todos los componentes que conforman cada etapa de este dispositivo, sin embargo, no se modelan desde cero los dispositivos semiconductores involucrados en el proceso ya que se usan los ya existentes en la librería SimPowerSystems [24] de Simulink definiendo sus parámetros respectivos en el capítulo 4.

3.1 RECTIFICADOR.

Tabla 3.1 Simbología y variables usadas para la descripción del rectificador.

Símbolo	Significado	Unidad del SI
v_{an}	Tensión fase-neutro	V
v_{ab}, v_{LL}	Tensión línea-línea	V
V_m	Máximo de la señal sinodal variable en el tiempo	V
V_{DC}	Tensión promedio de salida	V
V_{rms}	Valor eficaz de la señal de tensión.	V

3.1.1 CONCEPTOS Y FUNCIONAMIENTO.

En la Figura 3.2 se muestra el esquema circuital de un rectificador trifásico de onda completa, este es un dispositivo capaz de convertir una señal alterna (AC) en una señal continua (DC).

Este tipo de rectificadores están basados en las propiedades físicas de los diodos, estos se caracterizan por no conducir electricidad durante los cambios de polaridad; esto permite fijar una polaridad a partir de los ciclos de conducción del arreglo de diodos; la propuesta de rectificador trifásico se denomina rectificador trifásico no controlado ya que los ciclos de conducción de los diodos están dados solo por los cambios de polaridad de la señal de entrada.

La tensión DC a la salida no es una línea recta perfecta, el rizo de la señal depende del valor de capacitancia usado a la salida del puente de diodos trifásico, el inductor L_{rcom} modela la inductancia de conmutación de armadura del generador al que se conectara el rectificador.

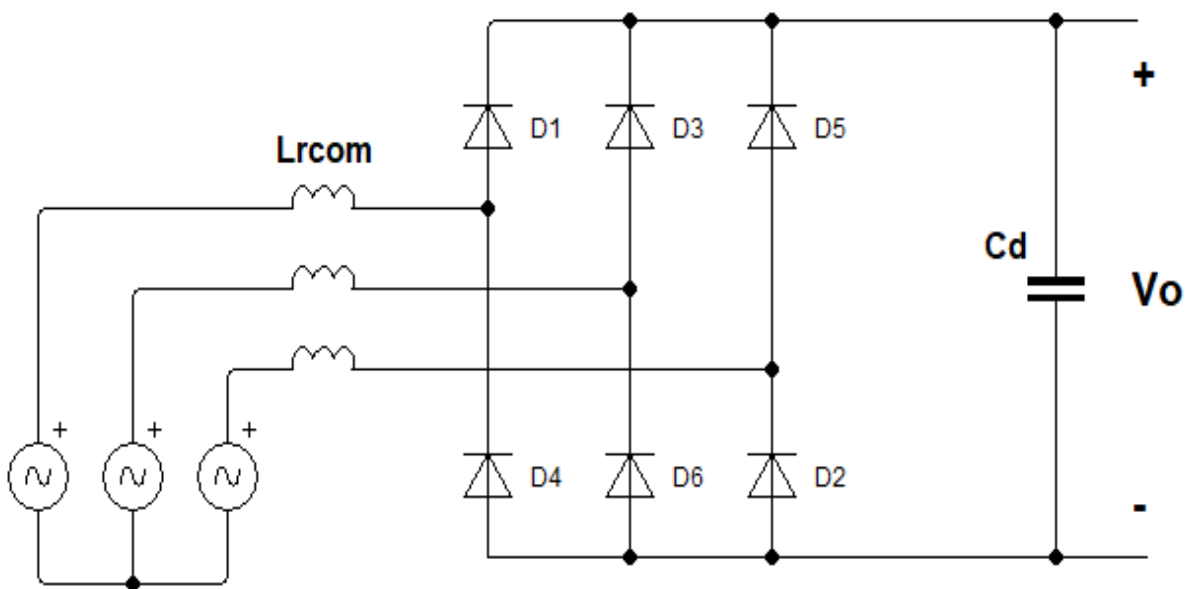


Figura 3.2 Circuito rectificador trifásico no controlado con las inductancias de reactor y conmutación incluidas.

En la Figura 3.3 se muestra la secuencia de diodos que conducen en cada sección de la señal de entrada, esto da como resultado la tensión en la carga v_L , cabe destacar de la gráfica, que los ciclo de rizado en la carga tienen definido un periodo de $\pi/3$ el cual es el periodo de conmutación de los diodos rectificadores. De manera complementaria se muestra el comportamiento de la corriente en la línea de entrada i_a y la corriente del diodo 1 i_{d1} .

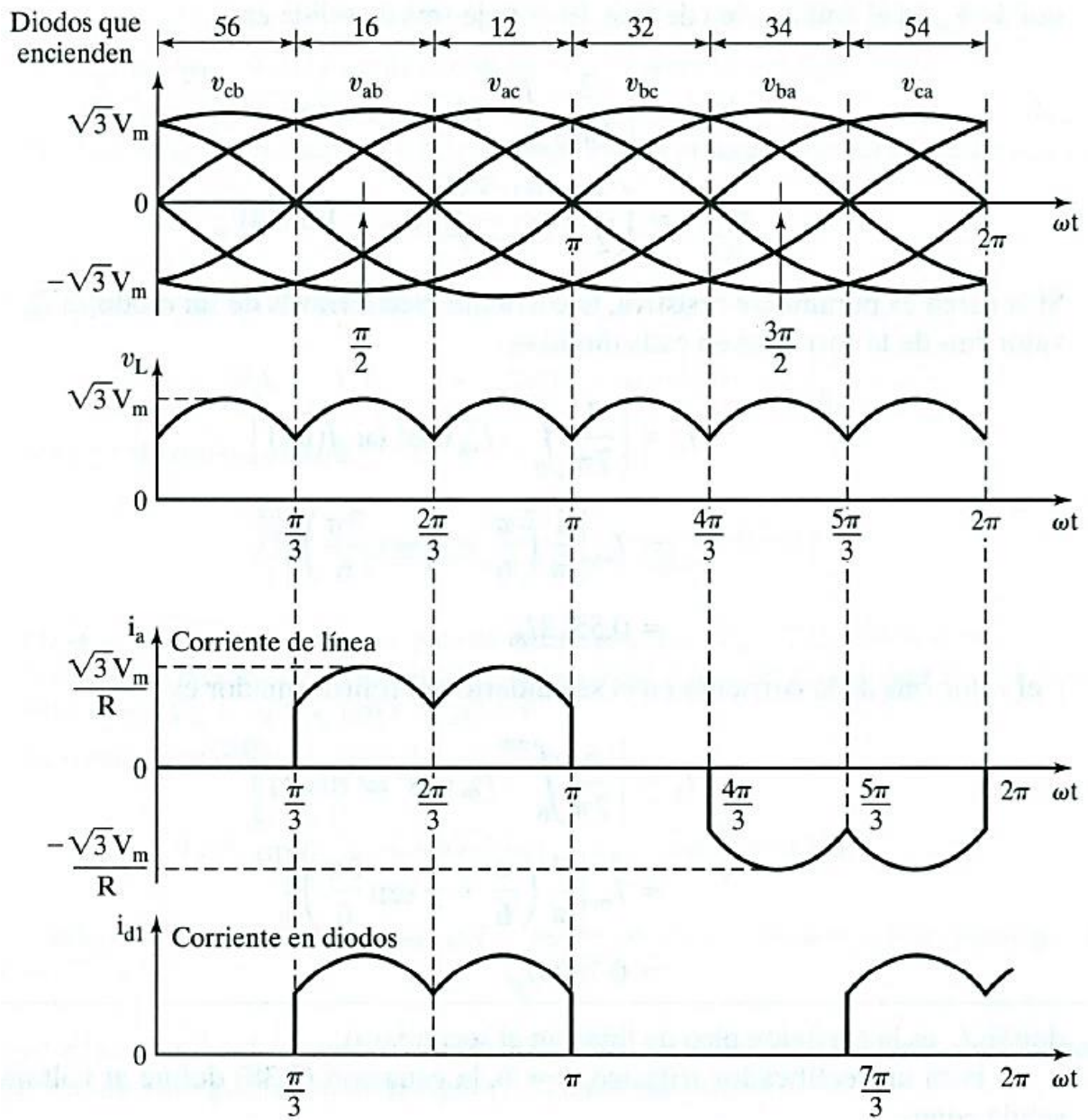


Figura 3.3 Ciclo de conducción de los diodos y señales de corriente respectivas [26].

3.1.2 DISCUSIÓN MATEMÁTICA A USAR PARA EL MODELO.

La señal de tensión de línea en la entrada de un rectificador se puede expresar como se muestra en la Ecuación 3-1.

Ecuación 3-1
$$v_{ab} = \sqrt{3}V_m \sin(\omega t)$$

El teorema de valor promedio de una señal periódica está definido por la Ecuación 3-2.

Ecuación 3-2
$$V_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt$$

La tensión promedio de salida del rectificador se puede determinar sustituyendo la tensión de línea de la Ecuación 3-1 en la Ecuación 3-2 dando como resultado la Ecuación 3-3.

$$\text{Ecuación 3-3} \quad V_{DC} = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} \sqrt{3}V_m \sin(\omega t) d(\omega t)$$

La cual puede expresarse como se muestra en la Ecuación 3-4.

$$\text{Ecuación 3-4} \quad V_{DC} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m = 1.654V_m$$

Así mismo es posible calcular el valor RMS de la señal de entrada utilizando la Ecuación 3-5.

$$\text{Ecuación 3-5} \quad V_{rms}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T y(t)^2 dt$$

El desarrollo del valor RMS para el rectificador trifásico se muestra en la Ecuación 3-6 y Ecuación 3-7

$$\text{Ecuación 3-6} \quad V_{rms} = \sqrt{\left[\frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} \sqrt{3}V_m \sin^2(\omega t) d(\omega t) \right]}$$

$$\text{Ecuación 3-7} \quad V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi}} \sqrt{3}V_m = 1.655V_m$$

Dados estos valores la eficiencia del rectificador se puede expresar por medio de la Ecuación 3-8.

$$\text{Ecuación 3-8} \quad \eta = \frac{P_{DC}}{P_{AC}} = \frac{V_{DC}I_{DC}}{V_{rms}I_{rms}} = \frac{1.654^2}{1.655^2} = 99.87\%$$

3.1.3 MODELO IMPLEMENTADO EN SIMULINK.

Para la implementación del modelo se opta por usar un puente de diodos de 3 ramas disponible en la librería SimPowerSystems [24] de Simulink el cual se muestra en la Figura 3.4, la estructura interna del puente de diodos se muestra en la Figura 3.5.

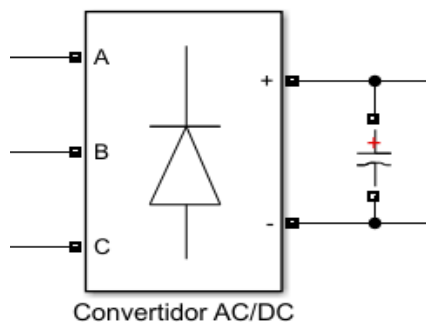


Figura 3.4 Bloque general del convertidor de corriente senoidal a corriente directa con capacitor de filtrado a la salida.

Los terminales de entrada y salida del modelo implementado están definidos como:

- A, B, C: Líneas de entrada de potencia eléctrica provenientes del generador síncrono.
- +, -: Salidas de corriente directa sin filtrado.

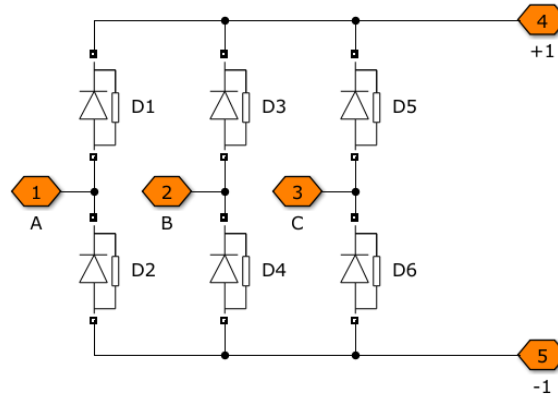


Figura 3.5 Diodos que componen la etapa de rectificación no controlada del bloque mostrado en la Figura 3.4.

3.2 CONVERTIDOR ELEVADOR DC A DC.

Tabla 3.2 Simbología y variables usadas para la descripción del convertidor Boost.

Símbolo	Significado	Unidad del SI
V_i	Tensión DC con variaciones a la entrada	V
V_o	Tensión DC fija y estable a la salida	V
L	Inductancia del circuito	H
I_L	Corriente que circula por el inductor	A
I_D	Corriente que circula por el diodo	A
D	Ciclo de trabajo	-
T	Periodo	s

3.2.1 CONCEPTOS Y FUNCIONAMIENTO.

Existen diversos tipos de convertidores de corriente continua, estos nos permiten elevar o disminuir el valor de tensión presente en la entrada, para el modelo que se desea implementar se utilizara la configuración Boost presentado en la Figura 3.6, este convertidor obtiene a partir de una fuente de corriente directa un valor de tensión mayor que el original, este arreglo hace uso de propiedades físicas de almacenamiento de inductores y capacitores además de propiedades no lineales de dispositivos de electrónica de potencia para regular el valor de tensión obtenido en la salida, el interruptor mostrado en la Figura 3.6 puede ser un MOSFET, IGBT o BJT, dependiendo de las aplicaciones del modelo específico.

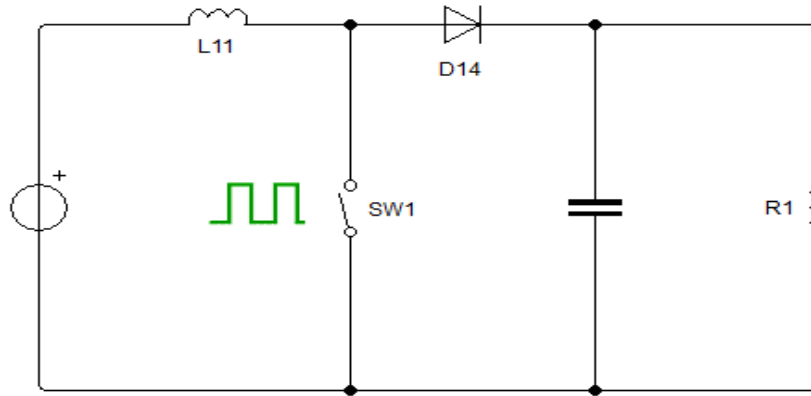


Figura 3.6 Esquema básico de un convertidor Boost.

La operación del convertidor Boost está definida en 3 estados establecidos por la posición del interruptor SW1 mostrado en la Figura 3.6, este interruptor será sometido a una señal de control que determina si este está abierto o cerrado.

Cuando el interruptor SW1 se cierra por primera vez ante un pulso de control inicial, la corriente suministrada por la fuente circula por el inductor almacenando energía en su campo magnético; en este momento inicial no circula corriente por la carga, ya que el dispositivo de conmutación provee de menor resistencia al paso de la corriente, el flujo de corriente y las polaridades resultantes se muestran en la Figura 3.7.

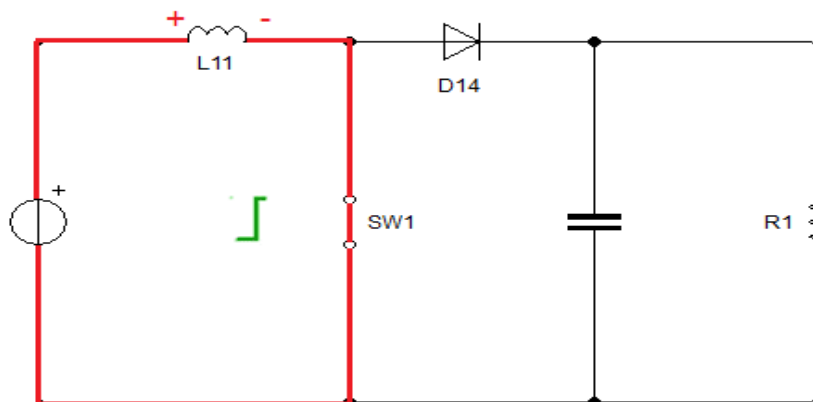


Figura 3.7 Comportamiento del convertidor Boost ante un pulso de control inicial.

La apertura del interruptor SW1 debido al pulso de control ocasiona un cambio en el valor de la corriente que atraviesa el inductor, este cambio produce una tensión inducida en la bobina pero con polaridad invertida al estado inicial del inductor, esto resulta en 2 tensiones conectadas en serie, la tensión de entrada de la fuente y la tensión inducida en la bobina; con el diodo polarizado en directa la corriente que circula a través de él permite cargar el condensador con un valor de tensión equivalente a la suma de la fuente y el inductor cargado, este valor de tensión es transferido de igual manera a la carga; la Figura 3.8 muestra el flujo de corriente y las tensiones resultantes del estado descrito con anterioridad, cabe destacar que en este análisis se despreja la caída de tensión ocasionada por el diodo ya que no es significativa para los valores de tensión que se pretende utilizar en el modelo.

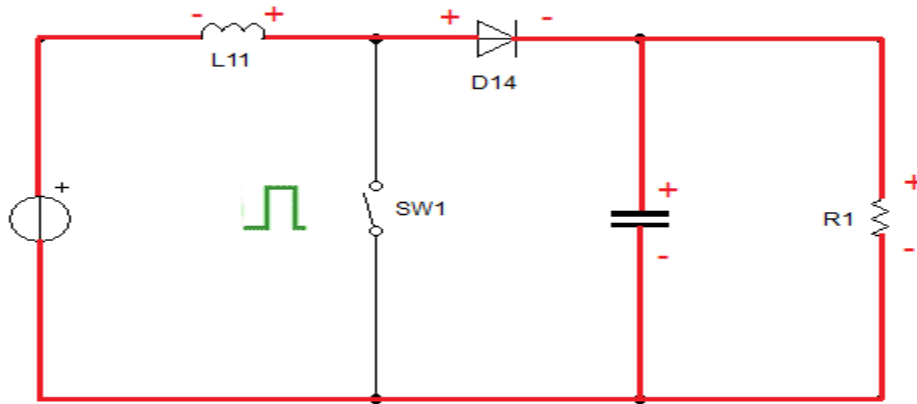


Figura 3.8 Comportamiento del convertidor Boost con el dispositivo de conmutación apagado en estado estable.

El tercer estado de operación está dado cuando el interruptor SW1 vuelve a cerrarse luego de un ciclo de conmutación en estado estable, en este punto el cátodo del diodo es más positivo que su ánodo, lo cual polariza el diodo en inversa y este no conduce, de esta manera la entrada del circuito se encuentra aislada de la salida donde la carga es alimentada por la energía almacenada en el capacitor, este volverá a ser cargado durante el siguiente ciclo de conmutación estableciendo un valor de tensión aproximadamente estable a la salida del circuito, el flujo de corriente y las polaridades resultantes se muestran en la Figura 3.9.

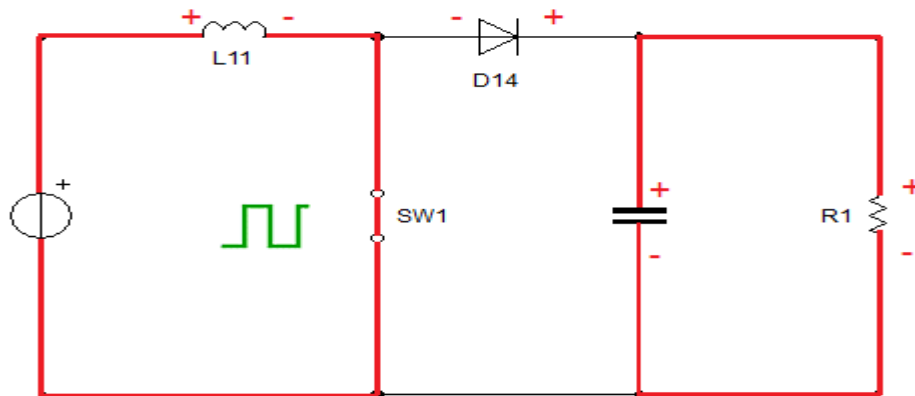


Figura 3.9 Comportamiento del convertidor Boost con el dispositivo de conmutación encendido en estado estable.

3.2.2 DISCUSIÓN MATEMÁTICA A USAR PARA EL MODELO.

Existen 2 modos de operación, el modo continuo y el modo Discontinuo, esta diferencia responde al porcentaje de descarga del inductor ante el ciclo de operación del convertidor Boost, para el modelo a desarrollar se considera el modo continuo de operación ya que la carga es lo suficientemente grande para no descargar prematuramente el inductor, a continuación se presentan las ecuaciones matemáticas que definen el comportamiento del convertidor Boost [26].

Modo Continuo

A partir de la relación teórica de la tensión y la corriente de un inductor mostrada en la Ecuación 3-9, es posible establecer el cambio en la corriente ocasionado por la operación inicial del dispositivo de conmutación SW1 ante el pulso de control mostrado en la Figura 3.7; en este caso la tensión en el inductor V_L es igual a la tensión de entrada de la fuente V_i , por tanto la variación en la corriente esta dado por la integral descrita en la Ecuación 3-10, los límites de integración están dados por el tiempo en el que el dispositivo de conmutación SW1 se encuentra encendido, el límite superior se define por el ciclo de trabajo de la señal de control y el periodo de dicha señal.

$$\text{Ecuación 3-9} \quad V_L = L * \frac{dI_L}{dt}$$

$$\text{Ecuación 3-10} \quad \Delta I_{L_{on}} = \int_0^{D*T} \frac{V_i}{L} dt = \frac{V_i}{L} D * T$$

La tasa de cambio de la corriente del inductor con respecto al tiempo en el segundo estado de operación mostrado en la Figura 3.8 (cuando el dispositivo de conmutación se encuentra apagado) está dado por la Ecuación 3-11, ya que la tensión en el inductor V_L descrita en la Ecuación 3-9 se define como la diferencia de potencial entre la tensión de entrada V_i y la tensión de salida V_o .

$$\text{Ecuación 3-11} \quad V_L = V_i - V_o = L * \frac{dI_L}{dt}$$

Por tanto, la variación de I_L durante el periodo en el cual el dispositivo de conmutación se encuentra apagado se describe según la Ecuación 3-12.

$$\text{Ecuación 3-12} \quad \Delta I_{L_{off}} = \int_0^{(1-D)T} \frac{(V_i - V_o)}{L} dt = \frac{(V_i - V_o)(1-D)}{L} T$$

Dicho esto, se evalúa el tercer estado de operación del convertidor Boost en condiciones estacionarias, en este punto la cantidad de energía almacenada en cada uno de sus componentes, debe ser la misma al principio y al final del ciclo completo de conmutación. Así pues, la corriente de inductor tiene que ser la misma al principio y al final de cada ciclo. Esto puede ser expresado como sigue en la Ecuación 3-13.

$$\text{Ecuación 3-13} \quad \Delta I_{L_{on}} + \Delta I_{L_{off}} = 0$$

Sustituyendo la Ecuación 3-10 y la Ecuación 3-12 en la Ecuación 3-13 se obtiene la Ecuación 3-14.

$$\text{Ecuación 3-14} \quad \Delta I_{L_{on}} + \Delta I_{L_{off}} = \frac{V_i}{L} D * T + \frac{(V_i - V_o)(1-D)}{L} * T = 0$$

Al simplificar la Ecuación 3-14 y despejando la tensión de salida del convertidor da como resultado la Ecuación 3-15.

$$\text{Ecuación 3-15} \quad V_o = \frac{1}{1-D} * V_i$$

La Ecuación 3-15 establece que es posible controlar el valor de tensión de salida V_o ajustando el ciclo de trabajo D en el convertidor dependiendo del valor de entrada V_i , este ajuste será modulado mediante la técnica PWM la cual consiste en controlar los tiempos

de conducción del dispositivo semiconductor de potencia aplicando pulsos de ancho variable en su terminar de control, ya que se pretende fijar el valor de tensión de salida a 600V, esto permitirá estabilizar los valores variables en la entrada del convertidor obteniendo siempre el mismo valor de salida.

3.2.3 MODELO IMPLEMENTADO EN SIMULINK.

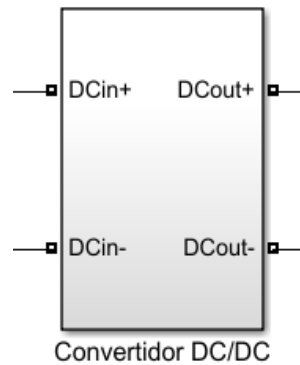


Figura 3.10 Bloque del modelo convertidor DC/DC Elevador.

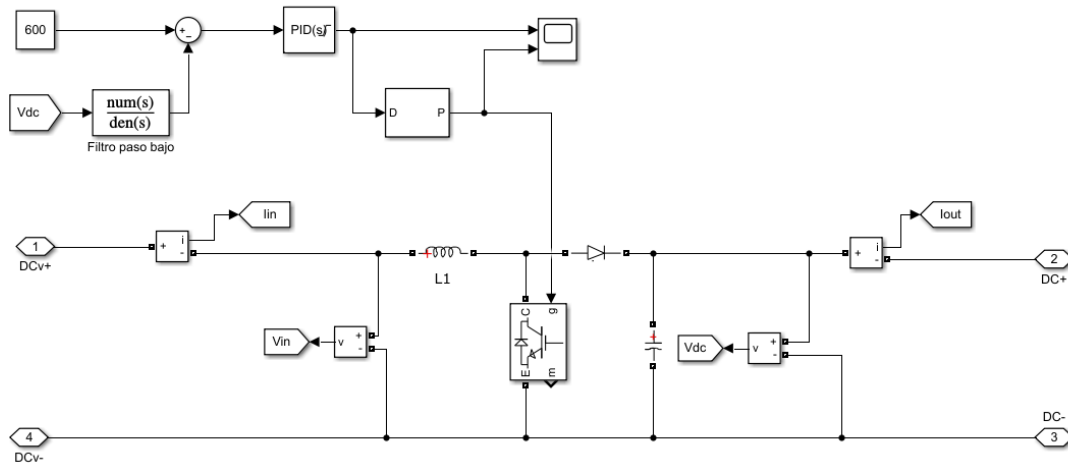


Figura 3.11 Esquema interno del convertidor de DC/DC Elevador y su esquema de control de pulsos de GATE para la estabilidad de tensión.

En la Figura 3.10 se muestra el bloque implementado en Simulink para el convertidor Boost, los elementos que componen el modelo se muestran en la Figura 3.11, en dicha figura es posible observar el esquema de potencia y control propuestos los cuales operan a partir de las ecuaciones establecidas previamente, el valor del ciclo de trabajo será determinado utilizando un controlador PID y un bloque PWM de Simulink para la generación de pulsos; como dispositivo de conmutación se utilizara tecnología IGBT, la especificación de este y otros dispositivos como valores de capacitor e inductor serán detallados en el capítulo IV.

3.3 CONVERTIDOR DC-AC.

Tabla 3.3 Simbología y variables usadas para la descripción del inversor.

Símbolo	Significado	Unidad del SI
m_a	Relación de la amplitud de modulación	-
m_f	Relación de la frecuencia de modulación	-
$V_{control}$	Señal senoidal utilizada como señal modulante	V
V_{trian}	Señal triangular utilizada como señal portadora	V
t_s	Periodo de la señal portadora	s
t_{on}	Porción del periodo de la señal portadora cuando el ancho de pulso es positivo.	S
V_a	amplitud de la señal cuadrada a la salida del inversor sin filtrar.	V
V_d	Valor de tensión DC en la entrada del convertidor.	V
V_{AO}	Valor medio de la onda cuadrada por ancho de pulso.	V

3.3.1 CONCEPTOS Y FUNCIONAMIENTO.

Los convertidores DC-AC conocidos también como inversores son dispositivos que permiten generar una tensión alterna intercambiando la polaridad de un fuente DC a partir de una señal de control específica; el dispositivo a tratar en esta sección es un inversor controlado por modulación de ancho de pulso (PWM) siendo la topología más habitual la mostrada en la Figura 3.12 (Sin especificar los tipos de semiconductores a utilizar).

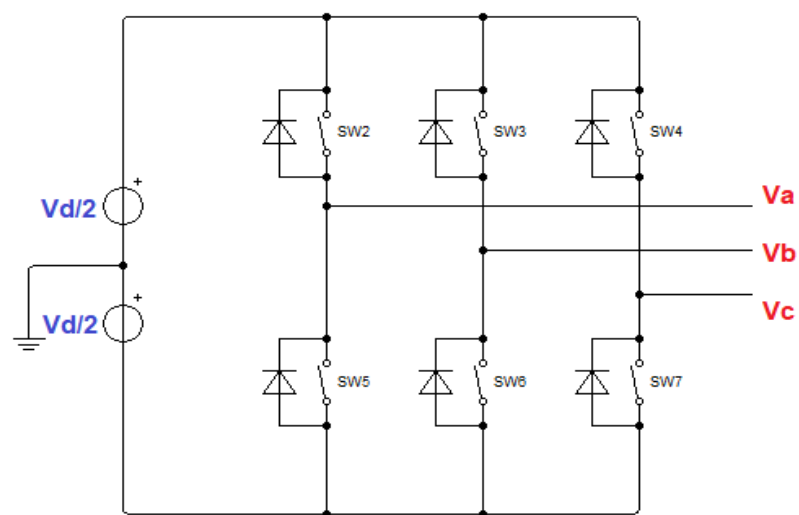


Figura 3.12 Topología más habitual de un inversor trifásico.

Modulación por ancho de pulso para controlar la señal en el convertidor DC-AC.

Un inversor trifásico puede considerarse como tres inversores monofásicos, con la salida de cada inversor monofásico desplazada 120° [25].

Se ha optado por utilizar la técnica de control por generación de señales de excitación con modulación de ancho de pulso tal como se muestra en la Figura 3.13, se realiza una comparación entre una señal portadora y una de referencia con el objetivo de detectar en que partes la señal portadora es menor que la señal de referencia, esto da como resultado los pulsos de control necesarios para los dispositivos de conmutación que componen el inversor trifásico.

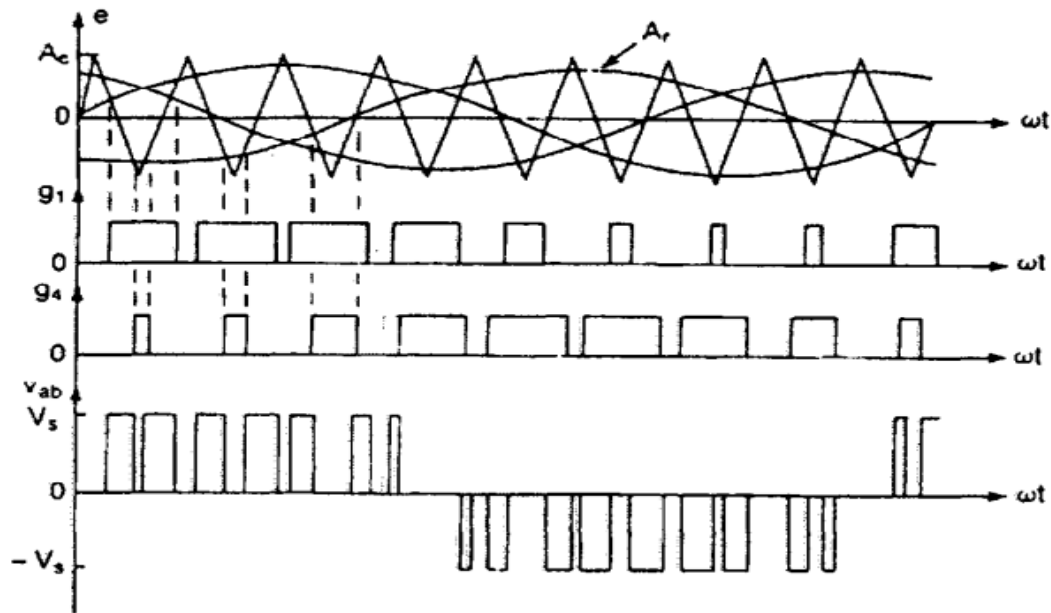


Figura 3.13 Ejemplo de señales involucradas en el proceso de modulación por ancho de pulso [25].

3.3.2 DISCUSIÓN MATEMÁTICA A USAR PARA EL MODELO.

Para el análisis de un puente inversor con PWM como el mostrado en la Figura 3.14 se establecen las siguientes relaciones:

Relación de la amplitud de modulación:

Ecuación 3-16

$$m_a = \frac{V_{control}}{V_{tri}}$$

Relación de la frecuencia de modulación:

Ecuación 3-17

$$m_f = \frac{f_{portadora}}{f_{onda_{control}}}$$

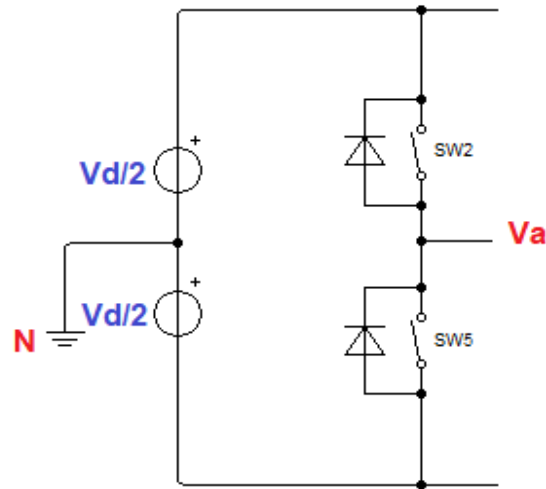


Figura 3.14 Rama de un puente inversor.

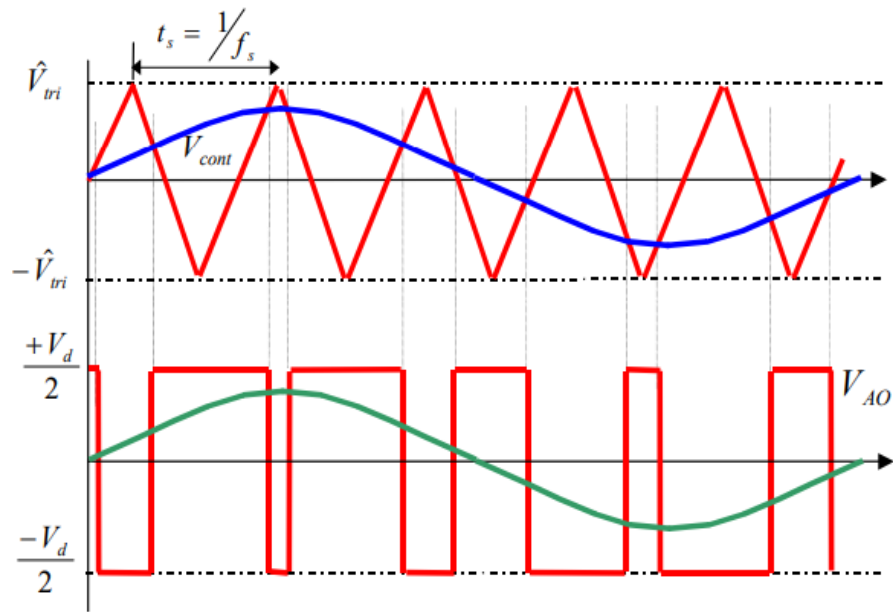


Figura 3.15 Grafica superior la señal triangular es la señal portadora, la señal azul es la señal modulante; Grafica inferior se muestran los anchos de pulso en conjunto con la señal senoidal deseada a la salida [28]

A partir del análisis del grafico de la Figura 3.15 aplicado a una rama del inversor mostrada en la Figura 3.14 se establece que:

Si $V_{control} > V_{trian}$ el interruptor SW2 conduce, por tanto $V_a = \frac{1}{2} V_d$

Si $V_{control} < -V_{trian}$ el interruptor SW5 conduce, por tanto $V_a = -\frac{1}{2} V_d$

Siendo V_a la amplitud de la señal cuadrada a la salida del inversor sin filtrar; para realizar el filtrado de la señal se considera que los armónicos se minimizarán si se elige una frecuencia de portadora igual a un múltiplo impar de tres veces la frecuencia de referencia; es decir, 3, 9, 15, etc. veces la referencia [29].

Las relaciones de modulación presentadas en la Ecuación 3-16 y la Ecuación 3-17 serán útiles para definir ciertos parámetros de la señal portadora que se debe utilizar para realizar el modulado de la señal, se definirán valores de $m_a < 1$ y $m_f \gg 1$ [28] ya que la relación de amplitud de modulación m_a depende del valor máximo de la señal de control y la amplitud máxima de la señal portadora; que este valor sea menor que 1 implica que el valor máximo de la señal portadora será mayor que el de la señal de control; a su vez que la relación de frecuencia de modulación m_f sea un valor muy grande implica que la señal de control no variara durante un periodo completo de la señal portadora; aprovechando estas propiedades es posible calcular el valor de la componente fundamental de V_{AO} haciendo uso del grafico mostrado en la Figura 3.16.

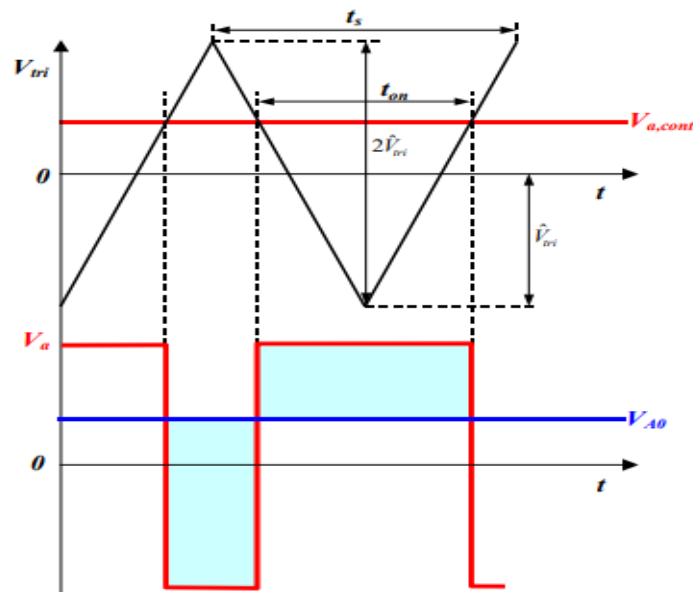


Figura 3.16 Grafica superior, señal portadora triangular V_{tri} y señal senoidal de control $V_{a,cont}$ como señal modulante; Grafica inferior, anchos de pulso V_a y valor medio de cada sección de ancho de pulso V_{AO} [28].

Por semejanza de triángulos en la en la gráfica superior de la Figura 3.16 es posible definir la ecuación mostrada en la Ecuación 3-18.

Ecuación 3-18
$$\frac{t_{on}}{t_s} = \frac{\hat{V}_{tri} + V_{a,cont}}{2 * \hat{V}_{tri}}$$

Despejando la Ecuación 3-18 da como resultado la Ecuación 3-19.

Ecuación 3-19
$$\frac{2t_{on} - t_s}{t_s} = \frac{V_{a,cont}}{\hat{V}_{tri}}$$

A continuación, se calcula el valor medio de la onda cuadrada V_a generada por el ancho de pulso [30], el cual está definido como la integral de todos los valores encerrados bajo la curva de 2 puntos dados entre el periodo de integración, como se muestra en la Ecuación 3-20 y la Ecuación 3-21.

$$\text{Ecuación 3-20} \quad V_{AO} = \frac{1}{t_s} \left(\frac{V_d}{2} t_{on} - \frac{V_d}{2} t_s - t_{on} \right) = \frac{V_d}{2} \left(\frac{t_{on}}{t_s} - \frac{t_s - t_{on}}{t_s} \right)$$

$$\text{Ecuación 3-21} \quad V_{AO} = \frac{V_d}{2} \left(\frac{2t_{on} - t_s}{t_s} \right)$$

A continuación, se sustituye la Ecuación 3-19 en la Ecuación 3-20 dando como resultado la Ecuación 3-22.

$$\text{Ecuación 3-22} \quad V_{AO} = \frac{V_{a,cont}}{\hat{V}_{tri}} * \frac{V_d}{2}$$

Teniendo en cuenta que $f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi}$ se puede establecer la Ecuación 3-23.

$$\text{Ecuación 3-23} \quad V_{control} = \hat{V}_{control} \sin(\omega_1 t)$$

Al sustituir la Ecuación 3-23 en la Ecuación 3-22 da como resultado la Ecuación 3-24.

$$\text{Ecuación 3-24} \quad V_{AO} = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} \sin(\omega_1 t) \frac{V_d}{2}$$

La componente fundamental solo considera el valor máximo de la función, esto da como resultado la Ecuación 3-25 para $m_a < 1$.

$$\text{Ecuación 3-25} \quad \hat{V}_{AO} = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} \frac{V_d}{2} = m_a \frac{V_d}{2}$$

Ventaja de operar con $m_a < 1$ y evitar el fenómeno de sobre modulación.

Se le llama sobremodulación cuando las crestas de la señal de control sobrepasan el valor maximo de la señal portadora, dicho fenomeno trae consigo ciertos efectos en la señal de salida del modulador, como se expreso en la Ecuación 3-25 existe una relacion lineal entre la señal de control y la de salida cuando la señal es poco modulada $m_a < 1$ característica que no se cumple al usar sobremodulación $m_a > 1$ como se muestra en la Figura 3.17, otro de los inconvenientes de utilizar sobremodulacion es que aparecen armonicos de baja frecuencia, caso contrario al utilizar $m_a < 1$ donde los armonicos que parecen son de alta frecuencia [31].

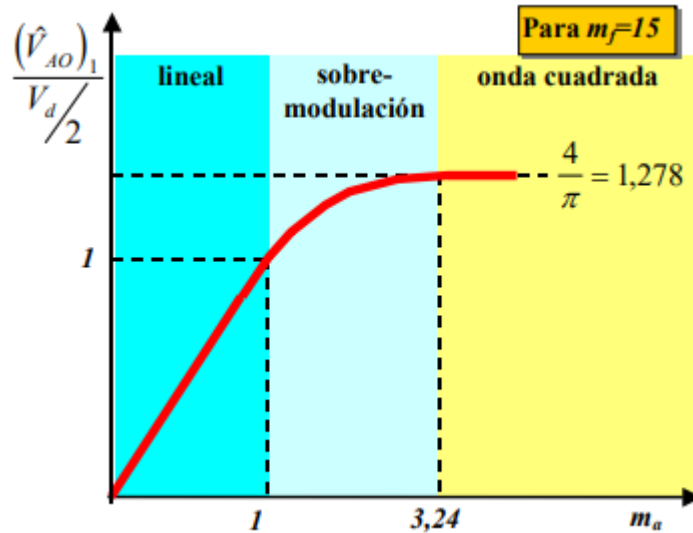


Figura 3.17 Tensión de salida normalizada en función de m_a [28]

El límite de sobre modulación está dado por los valores de m_a comprendidos entre 1 y 3.24 como se observa en la Figura 3.17, al superar este limite la onda de salida se vuelve constante dando como resultado una onda cuadrada sin importar los valores de entrada de la señal de control, la salida \hat{V}_{AO} estará definida como se muestra en la Ecuación 3-26 para $m_a > 3.24$ y $m_f = 15$.

Ecuación 3-26

$$\hat{V}_{AO} = \frac{4}{\pi} * \frac{V_d}{2}$$

Es posible observar en la Ecuación 3-26 que se pierde el control de la salida \hat{V}_{AO} , este tipo de inversores se les conoce como no modulados [31].

Inversor trifásico.

A partir del funcionamiento de una rama de un puente inversor con PWM se puede determinar el funcionamiento de un arreglo de 3 ramas para sistemas trifásicos [32], es decir serán utilizadas 3 señales senoidales de control y una portadora triangular tal como se muestra en la Figura 3.18.

Como se estableció en la Ecuación 3-25 la componente fundamental de cada fase está definida como se muestra en la Ecuación 3-27 además se puede definir la tensión RMS de línea a línea como se muestra en la Ecuación 3-28.

Ecuación 3-27

$$\hat{V}_{AN1} = \hat{V}_{BN1} = \hat{V}_{CN1} = m_a \frac{V_d}{2}$$

Ecuación 3-28

$$V_{LL/RMS} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} m_a \frac{V_d}{2}$$

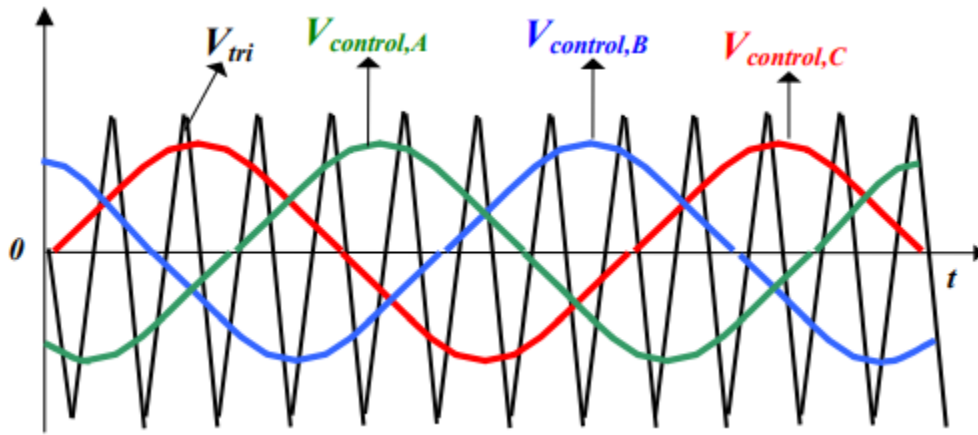


Figura 3.18 Generación de las señales de control para un puente trifásico [28].

Las señales senoidales de control de cada fase mostradas en la Figura 3.18 están desfasada 120° una de la otra lo cual genera distintos anchos de pulso para cada uno de los dispositivos de conmutación de cada rama del inversor. Cada ancho de pulso generado funciona según lo descrito anteriormente para un inversor de una rama; la generación trifásica de señales PWM se muestra en la Figura 3.19.

Cabe destacar que las especificaciones de los dispositivos pasivos y semiconductores a usar en conjunto con este dispositivo se muestran en el capítulo 4, mostrándose únicamente un modelo general en el siguiente apartado titulado: modelo implementado en Simulink.

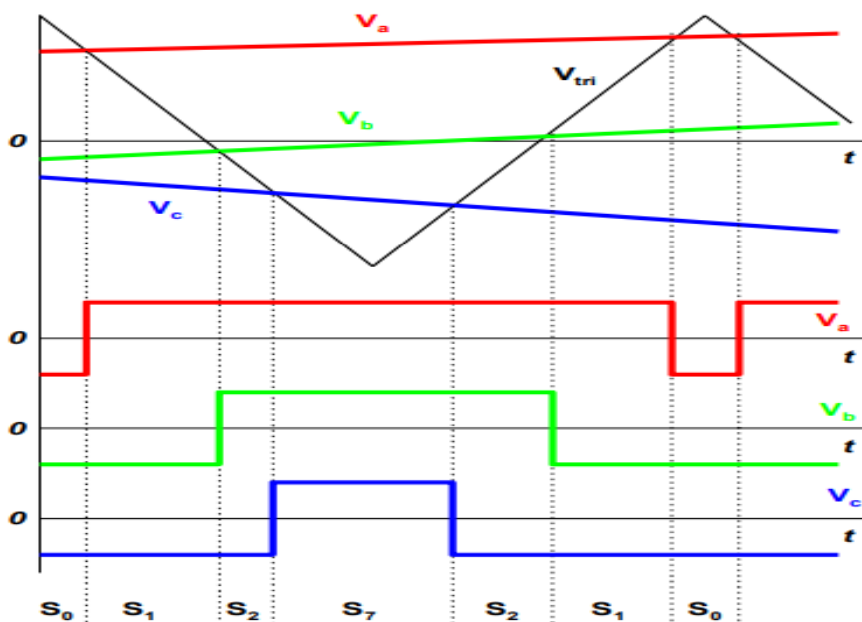


Figura 3.19 Generación de las señales trifásicas PWM [28].

3.3.3 MODELO IMPLEMENTADO EN SIMULINK.

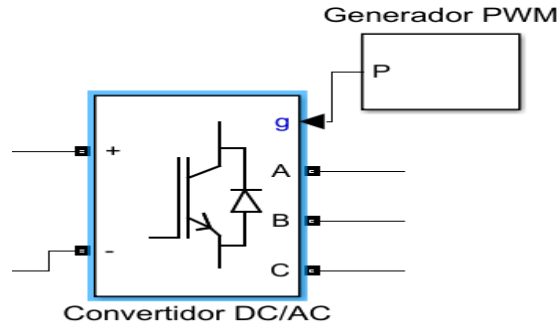


Figura 3.20 Bloque general del convertidor DC/AC (Izquierda), Bloque de generador de pulsos (Derecha).

Siendo sus entradas y salidas:

- +, -: Entradas de tensión DC provenientes del bloque conversor DC/DC elevador.
- A, B, C: Señales cuadradas a la salida del inversor sin filtrar (60Hz).

Los parámetros internos del bloque generador PWM utilizado en el modelo se muestran en la Figura 3.21, se implementa una relación de amplitud de modulación m_a de 0.56 y una frecuencia de señal portadora de 4kHz, la frecuencia de señal senoidal de control es 60Hz lo cual da como resultado una relación de frecuencia de modulación m_f de 66.666 lo cual cumple con los criterios propuestos al inicio del análisis.

el contenido interno del bloque del convertidor DC/AC se muestra en la Figura 3.22 para un arreglo de 3 ramas de dispositivos semiconductores IGBT.

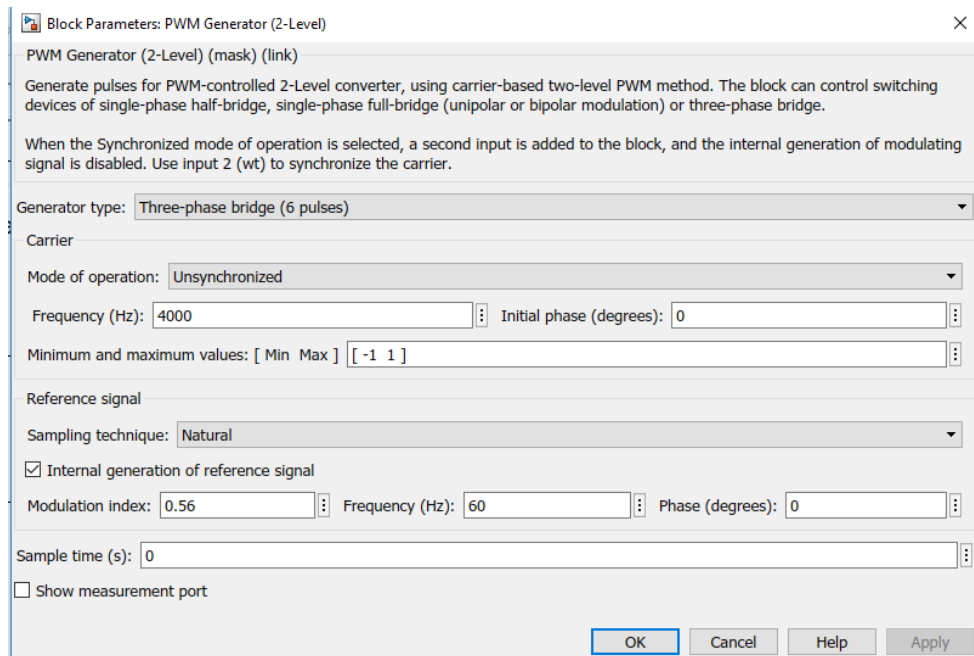


Figura 3.21 Generador de pulsos de gate.

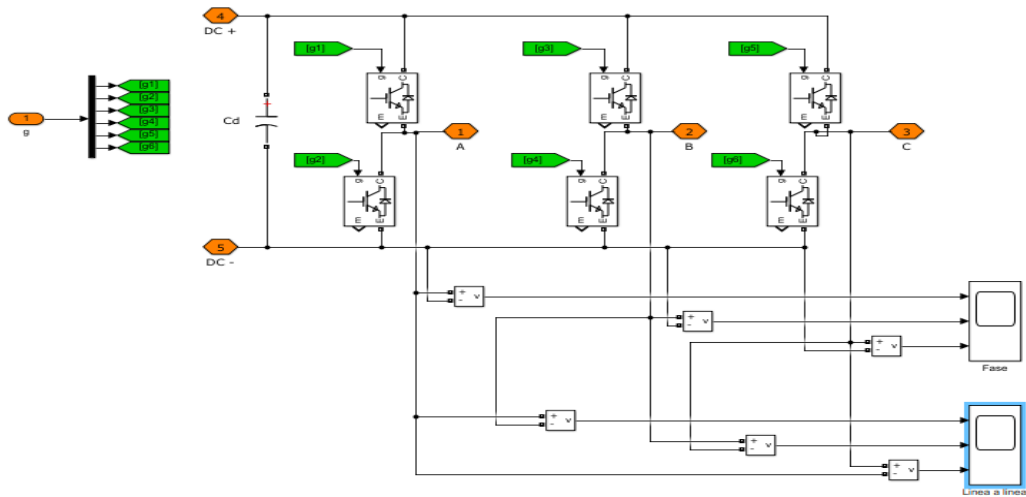


Figura 3.22 Contenido típico del bloque “convertidor DC-AC” mostrado en Figura 3.20.

4 CAPÍTULO IV: DESCRIPCIÓN DE SISTEMAS COMPLEMENTARIOS.

En este trabajo se clasifican como sistemas complementarios aquellos sistemas necesarios para procesar, controlar y filtrar las señales de salida de los sistemas fundamentales: Motor, generador y convertidor de potencia.

4.1 MODELO DE LA CARGA.

Debido a la naturaleza del modelo y las pruebas que se requieren realizar es necesario que la carga conectada al sistema sea variable en el tiempo, esto con la idea de observar el desempeño del set de generación Diésel ante cambios en la potencia demandada.

El modelo de la carga se basa en la conexión y desconexión de cargas fijas de distintos valores en diferentes tiempos de simulación, para él modelo se colocan 3 cargas trifásicas balanceadas de distintas magnitudes para mostrar 3 posibles rangos de operación; los parámetros configurados para el modelo de la carga se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Parámetros de configuración de las cargas trifásicas.

N°	Config	VLL nominal [V]	Frecuencia nominal [Hz]	Pot. activa P [kW]	Pot. reactiva inductiva QL [kW]	Pot. reactiva capacitiva QC [kW]
1	Estrella	208	60	3	0	0
2	Estrella	208	60	5.5	0	0
3	Estrella	208	60	8	0	0

La conexión y desconexión de las cargas se controla con un ciclo de trabajo predefinido desde un bloque constructor de señal de Simulink, cabe destacar que los tiempos de operación de cada carga pueden ser cambiados y han sido colocados de manera arbitraria con el objetivo de observar en un corto tiempo la operación del sistema modelado, las señales implementadas en el bloque constructor de señal de Simulink se muestra en la Figura 4.1. La señal pulso controla un interruptor trifásico que se conecta o desconecta dependiendo del valor digital de la señal de control, el modelo de la carga y la conexión de las señales de control se muestran esquematizados en la Figura 4.2.

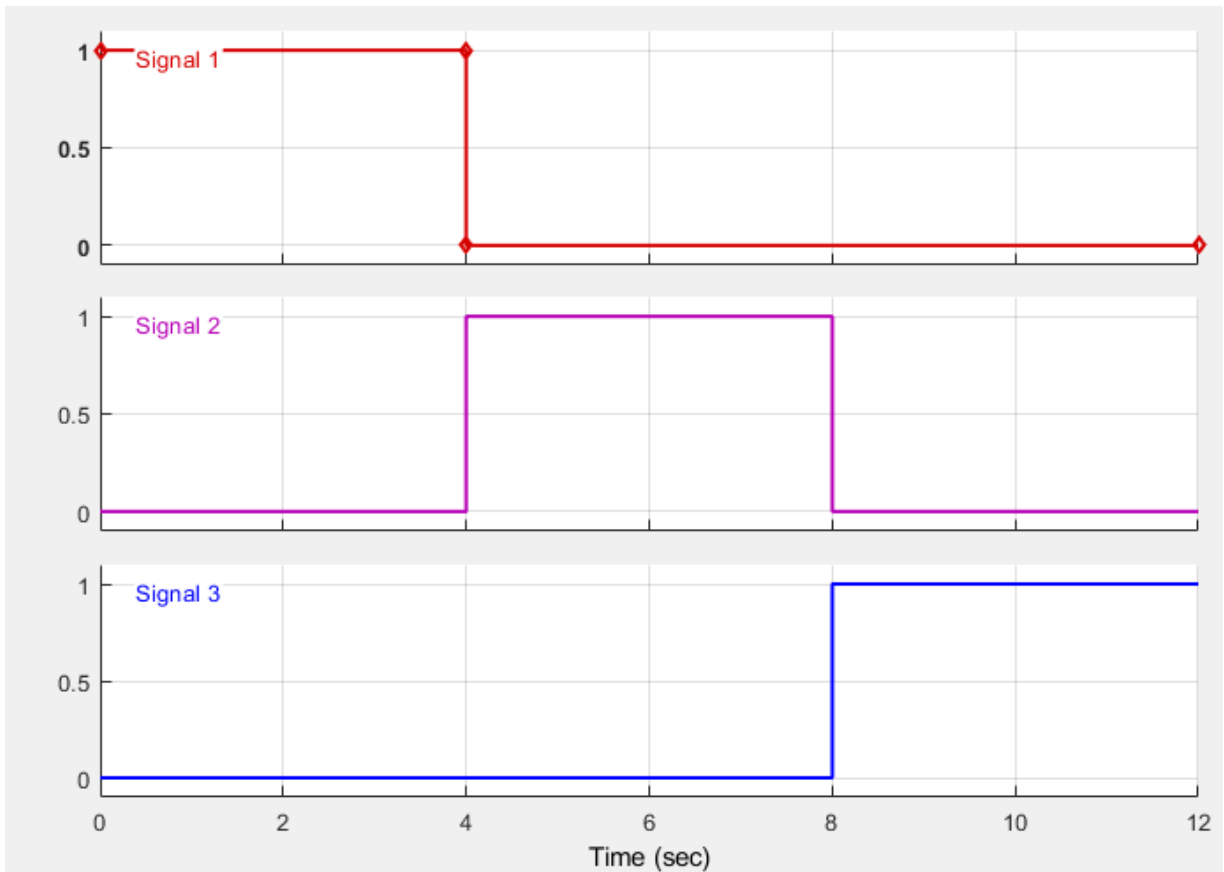


Figura 4.1. ciclo de trabajo de los interruptores trifásicos del modelo de la carga.

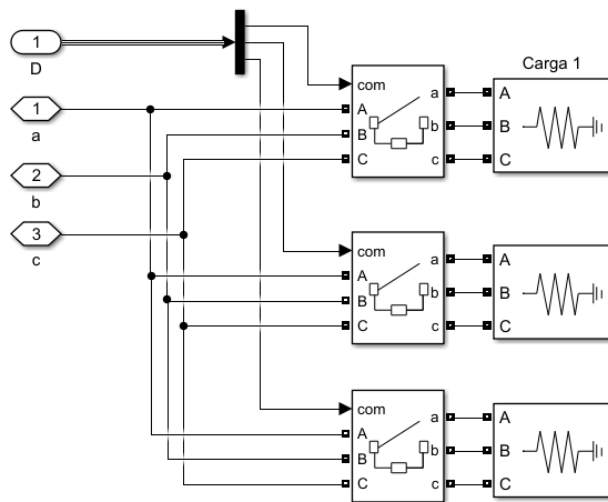


Figura 4.2 modelo de la carga trifásica.

4.2 MODELO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE VARIABLES ELÉCTRICAS EN LA CARGA.

El diseño de control de velocidad se basa la medición de la potencia entregada a la carga, con el objetivo de ajustar la velocidad del motor Diésel a partir de la potencia medida, por lo cual es necesario medir la señal de tensión y corriente demandada por la carga utilizando un bloque de medición trifásico de Simulink, dicho medidor puede ser configurado para medir tensión línea-línea o línea-neutro, en nuestro caso el medidor se configura para medir tensión línea-neutro.

El bloque de cálculo de potencia da como resultado la potencia activa P y la potencia reactiva Q, ya que es necesario que el generador sea capaz de suplir la potencia total se utiliza la Ecuación 4-1 para obtener la potencia aparente de la carga modelada, dicha ecuación se modela utilizando bloques matemáticos de Simulink como se muestra en la Figura 4.3.

Ecuación 4-1

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

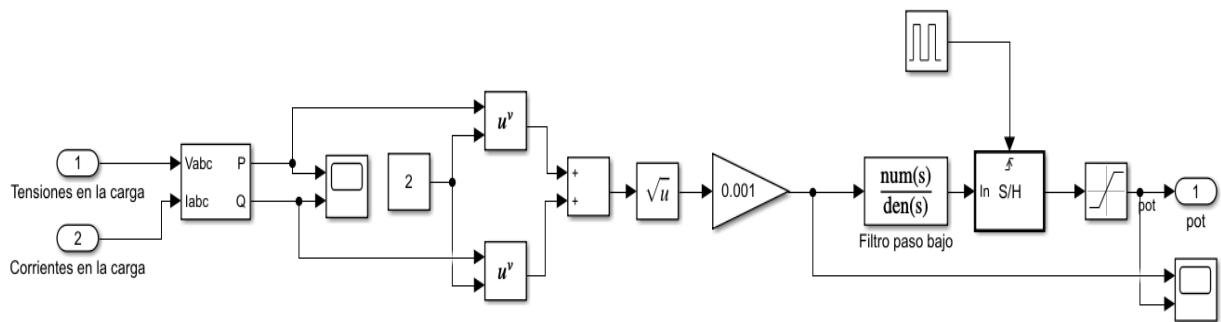


Figura 4.3 modelo del sistema de medición y escalonado de la potencia de la carga trifásica conectada.

Con la potencia aparente calculada es necesario acondicionar la medición para que sea compatible con la entrada retroalimentada del motor Diésel por tanto, se utiliza un bloque de muestreo de la potencia aparente con el objetivo de escalar la señal de salida, el muestreo se realiza con un periodo de 0.17s controlado por el flanco de subida de un generador de pulso, finalmente se utiliza un bloque de saturación con la idea de no sobrepasar los 9.9kW máximos de entrada del motor Diésel, en la Figura 4.4 se muestra una señal potencia aparente y su equivalente ya escalonado.

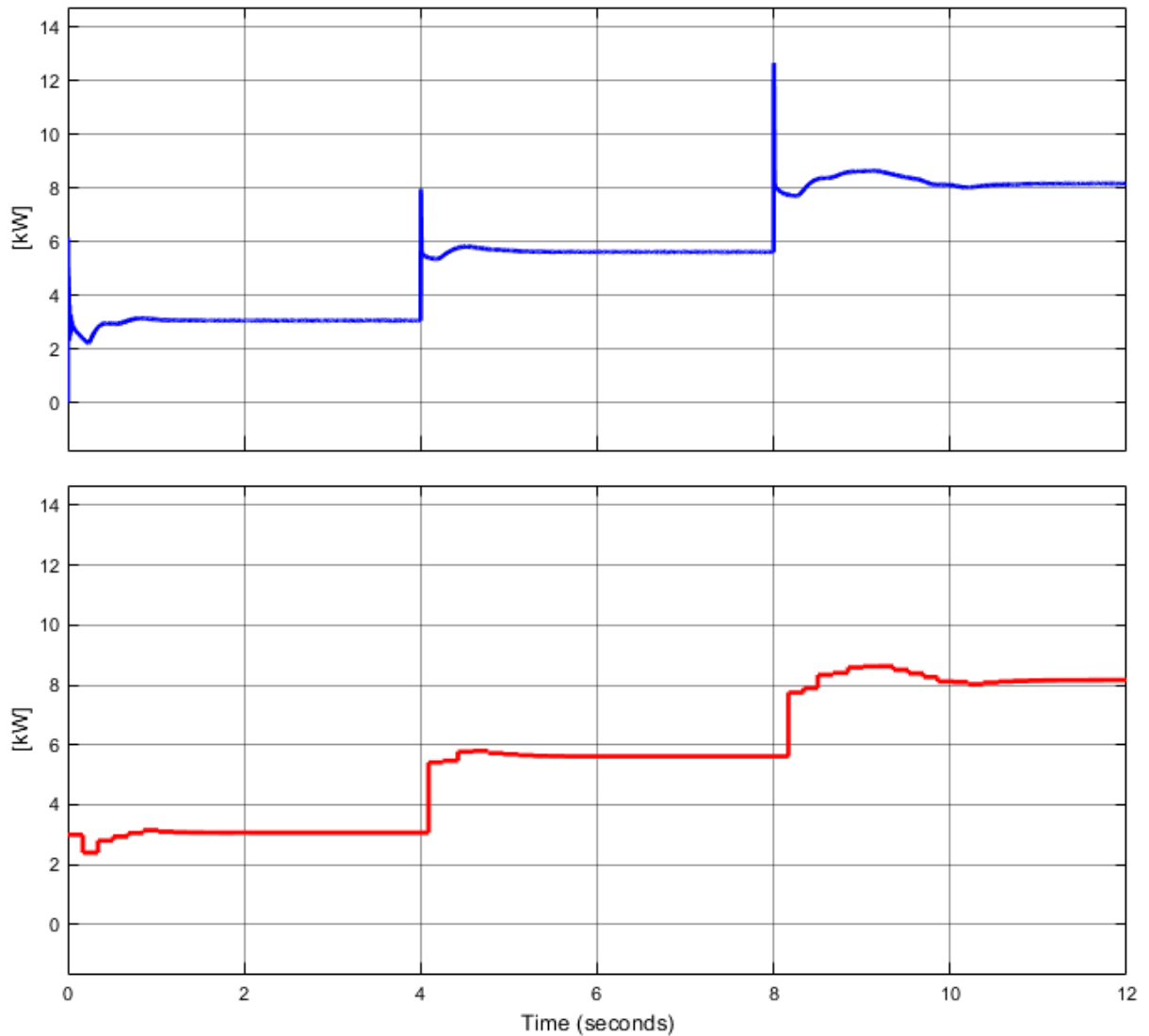


Figura 4.4 Potencia aparente de la carga trifásica; potencia aparente escalonada.

4.3 DISEÑO DEL CONTROL DE VELOCIDAD ÓPTIMO PARA EL MOTOR DIÉSEL CON BASE EN LA MEDICIÓN DE POTENCIA EN LA CARGA.

Como fue presentado en la sección 2.1.3 el control de velocidad para el motor Diésel se implementó utilizando un bloque de función de Matlab en Simulink, dicho bloque calcula la velocidad de operación óptima del motor a partir de la carga especificada además de estimar el consumo de la maquina a esta velocidad asimismo calcula el consumo a velocidad constante y el ahorro de combustible que representa operar a la velocidad de referencia, para realizar en modelo se utilizaron datos un motor Diésel de 4 tiempos Kubota Z482 de 9.9kW [33].

4.3.1 METODOLOGÍA Y ALGORITMO.

El cálculo de la velocidad de referencia del motor Diésel está basado en las ecuaciones matemáticas presentadas en la sección 2.1.2. la metodología utilizada en el bloque de función de Matlab se presenta en la Figura 4.5 en forma de flujograma a continuación se describe cada sección presentada en el flujograma:

Sección 1: El bloque de función de Matlab recibe en la entrada el valor de potencia al que está operando la carga del sistema.

Sección 2: el cálculo de consumo específico de combustible (BSFC) se basa en un ciclo repetitivo FOR, este ciclo es encargado de generar una matriz de valores para distintas magnitudes de velocidad angular y torque para luego seleccionar el menor valor de consumo que corresponda a la potencia ingresada.

El rango de operación para la velocidad angular dado por el fabricante está entre 1600-3600 RPM por lo cual en el código implementado analiza el consumo en pasos de 1 RPM lo cual indica que se generaran 21 registros para las filas de la matriz, asimismo el rango de operación del torque está definido entre 1-30.2 Nm en pasos de 0.4 generando 74 registros para las columnas de la matriz.

Al finalizar la matriz con todas las combinaciones de velocidad angular y torque el flujograma pasa a la sección 11.

Sección 3: Se calcula el torque máximo para la velocidad angular específica a partir de la especificación técnica del motor Diésel [33], ahí se presenta un gráfico para los valores máximos de torque; se seleccionó los puntos más representativos de la gráfica y se realizó una regresión cuadrática, el resultado es una curva ajustada para los valores máximos de torque a partir de la velocidad angular, la función resultante se muestra en la Ecuación 4-2. el cálculo de la regresión cuadrática se muestra en el Anexo C.

$$\text{Ecuación 4-2} \quad T_{max} = 6.96 + 0.016612 * N - 0.00000312872 * N^2$$

Sección 4: a partir del cálculo de torque máximo se utiliza una evaluación condicional IF_ELSE para determinar si el registro a calcular se encuentra dentro del rango de operación de torque, si el torque sobrepasa el torque máximo calculado el registro se descarta y no se calcula el BSFC caso contrario el flujograma sigue a la sección 5.

Sección 5: en esta sección se implementan las ecuaciones descritas en la sección 2.1.2; para la potencia calculada se utiliza la Ecuación 2-1 y para el BSFC se utiliza la Ecuación 2-16, la Ecuación 2-11, la Ecuación 2-14, la Ecuación 2-2 y la Ecuación 2-17 de manera subsecuente.

Sección 6: en esta sección es donde se analiza si el registro calculado corresponde a la potencia ingresada en el flujograma, se compara la potencia ingresada con la potencia calculada, si son distintos el registro se descarta y se pasa al siguiente, si son iguales el flujograma pasa a la sección 7.

Sección 7: para el valor de potencia medido le corresponden distintos valores de BSFC por lo cual es necesario encontrar el que represente el menor consumo para la potencia específica; inicialmente se le asigna un valor muy grande al registro de BSFC con el objetivo que el primer valor encontrado sea siempre menor al valor inicial, a continuación se evalúa por medio de un condicional si el valor de BSFC siguiente en el ciclo FOR es menor que el valor anteriormente guardado, si este es mayor, el flujograma pasa a la sección 9, de ser menor, el flujograma pasa a la sección 8.

Sección 8: si el registro correspondiente es menor que el valor anterior se guarda en la variable BSFC, mediante la matriz se vaya completando a partir del ciclo FOR, esta variable tomará diversos valores escogiendo al final el menor de todos ellos, también se almacena la velocidad de operación correspondiente al menor valor de consumo, esta será la velocidad de referencia mostrada al final.

Sección 9: si el registro de consumo (BSFC) es mayor que el valor anteriormente guardado este se descarta, a no ser que este sea el consumo específico para el motor operando a velocidad constante (3600 RPM), por lo cual se evalúa si la velocidad de operación es igual a 3600 RPM, si la velocidad es diferente de 3600 RPM el registro se descarta definitivamente y se calcula el siguiente, de ser igual a 3600 RPM se pasa a la sección 10.

Sección 10: si la velocidad de operación es igual a 3600 RPM se almacena el valor de consumo a esa velocidad en la variable BSFC_vel_const, este dato será utilizado para calcular el ahorro de combustible al operar a velocidad variable, al finalizar la sección 10 el flujograma sigue a la sección 2, el ciclo FOR hasta finalizar cada uno de los registros de la matriz definida al principio.

Sección 11: a partir de las variables guardadas en el ciclo FOR se calcula el ahorro de combustible utilizando la Ecuación 4-3.

$$\text{Ecuación 4-3} \quad \% \text{ ahorro} = \frac{BSFC_{vel_const} - BSFC}{BSFC_{vel_const}} * 100$$

Sección 12: se muestran las 4 variables de salida del bloque de función de Matlab la velocidad de referencia, el BSFC para la velocidad de referencia, el BSFC a velocidad constante y el ahorro de combustible.

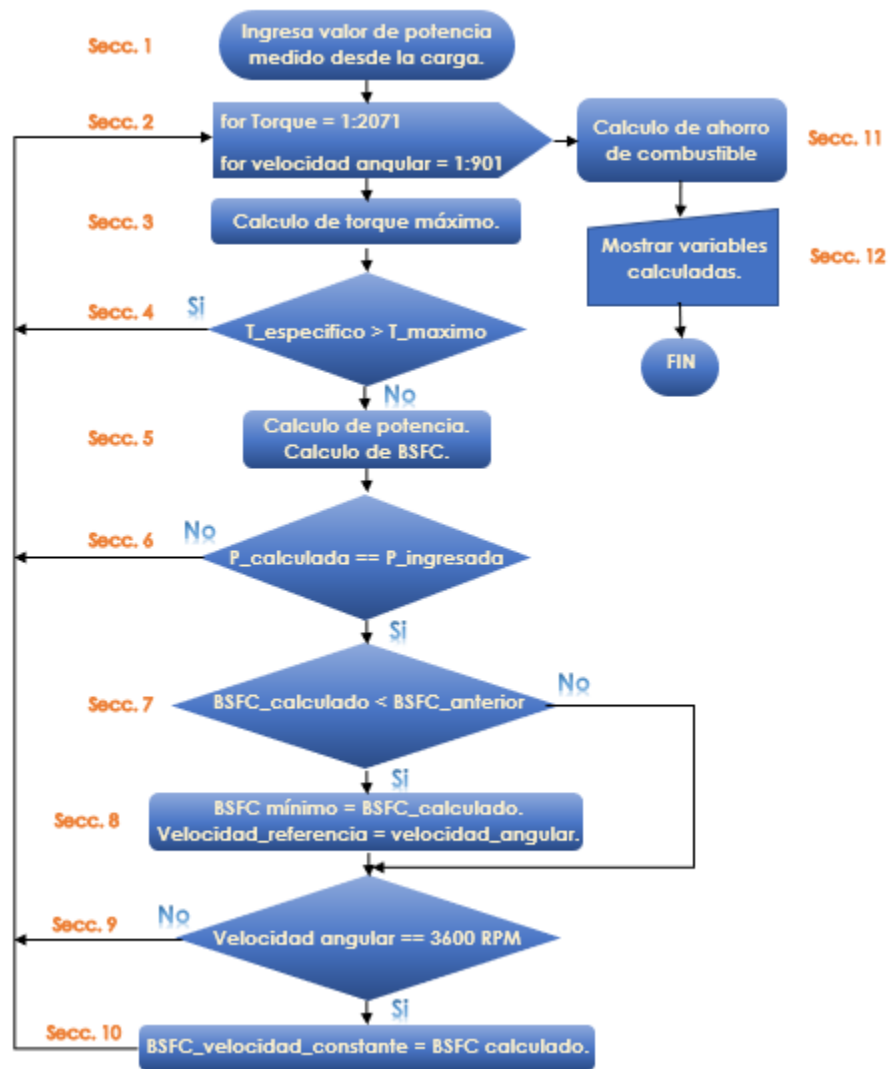


Figura 4.5 Flujoograma del cálculo de velocidad de referencia del motor Diésel.

4.3.2 CONTROL DE VELOCIDAD PID PARA EL MOTOR DIÉSEL.

Debido a que se necesita que el motor Diésel responda de manera eficiente a los cambios bruscos de velocidad, se implementó en el modelo un controlador PID utilizando el sintonizador de controladores de Simulink, utilizando un tiempo de subida de 0.2706s y un sobrepaso del 17% como se muestra en la Figura 4.6; las ganancias resultantes del controlador se muestran en la Figura 4.7.

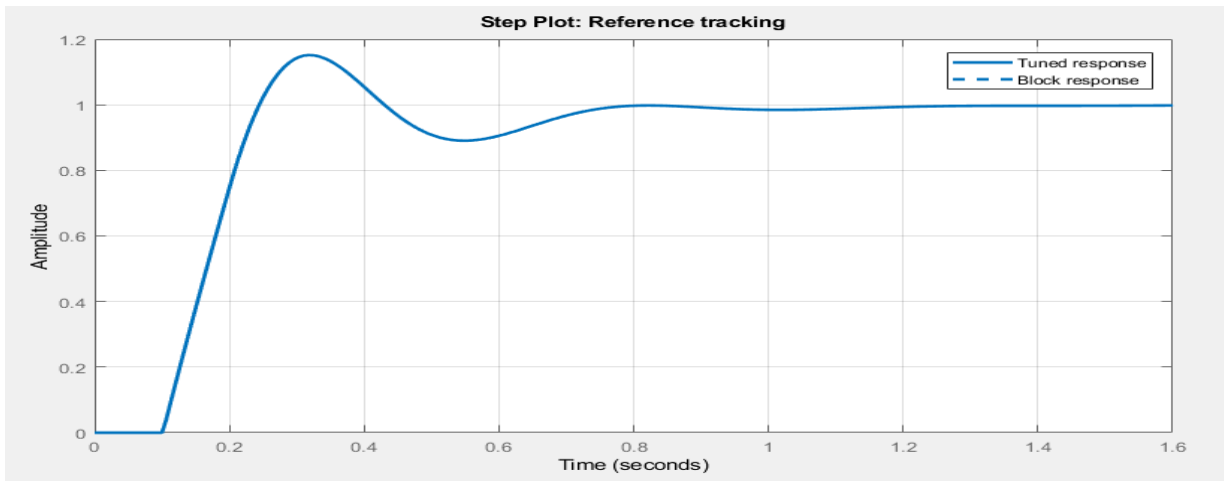


Figura 4.6 Respuesta del controlador PID del motor Diésel a un escalón unitario.

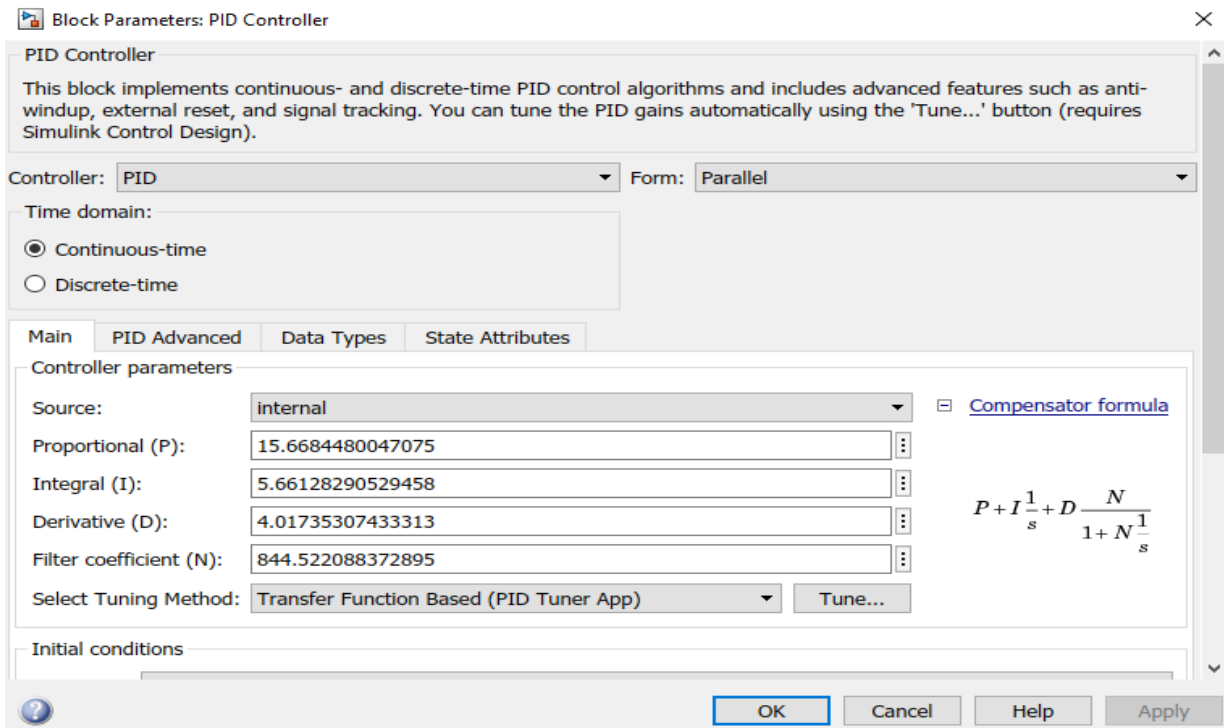


Figura 4.7 parámetros de control del controlador PID del motor Diésel.

4.4 DISEÑO DE SISTEMAS COMPLEMENTARIOS PARA EL VARIADOR DE FRECUENCIA Y TENSIÓN.

4.4.1 CONTROL PARA EL CONVERTIDOR DC/DC.

Los valores de L y C en el convertidor Boost dependen de la frecuencia de conmutación del dispositivo IGBT proporcionada por el generador de señal PWM, del rango de entrada de tensión DC, de la salida DC deseada y de la corriente máxima que demanda la carga; el inductor se calcula utilizando la Ecuación 4-4 y la Ecuación 4-5 [34].

$$\text{Ecuación 4-4} \quad L = \frac{V_{in}(V_{out}-V_{in})}{\Delta I_L * f_s V_{out}}$$

$$\text{Ecuación 4-5} \quad \Delta I_L = (0.2 \text{ a } 0.4) I_{outMax} * \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

Para el cálculo del capacitor de salida se utiliza la Ecuación 4-6.

$$\text{Ecuación 4-6} \quad C_{outMin} = \frac{I_{outMax} * D}{f_s * \Delta V_{out}}$$

Donde:

V_{in}	Tensión de entrada.
V_{out}	Tensión de salida.
f_s	Frecuencia de conmutación.
ΔI_L	Corriente de rizo estimada en el inductor.
C_{outMin}	Capacitor mínimo de salida.
I_{outMax}	Corriente de salida máxima.
D	Ciclo de trabajo.
ΔV_{out}	Tensión de rizado.

El convertidor boost es controlado mediante la técnica PWM, se implementa un control PID que se explica en el anexo B, este tiene una señal de referencia de tensión que debe mantener en la carga y que constantemente se está comparando con una medición de la tensión real presente en la salida, el modelo implementado en Simulink se muestra en la Figura 4.8.

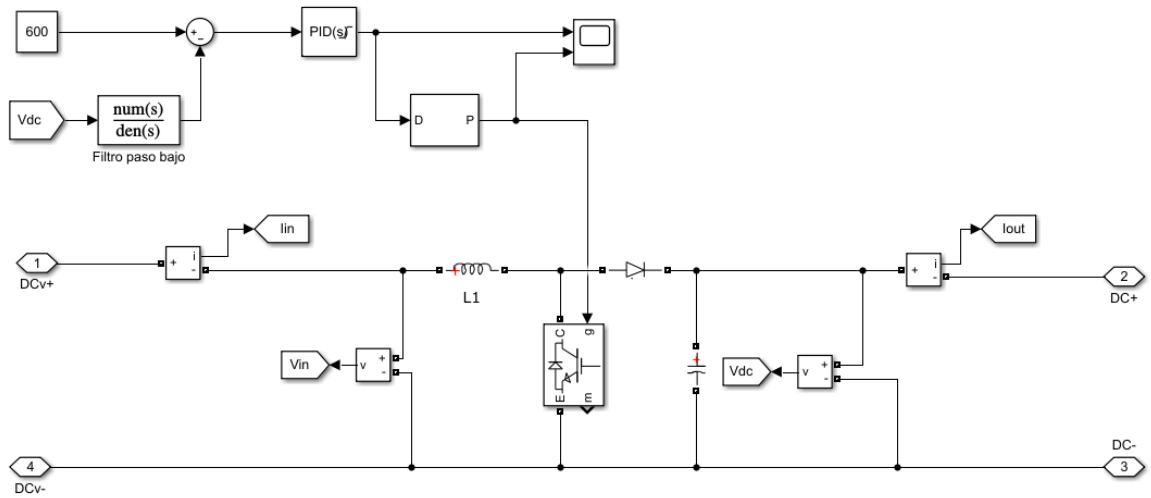


Figura 4.8 convertidor Boost implementado en Simulink.

La salida del control PID proporciona la señal del ciclo de trabajo el cual se lee en el bloque que genera los pulsos PWM proporcionando dicha señal al dispositivo generador de señal cuadrada.

Le frecuencia de conmutación del generador de señal PWM es de 10kHz como se especifica en la Figura 4.9 y los parámetros del control PID se muestran en la Figura 4.10.

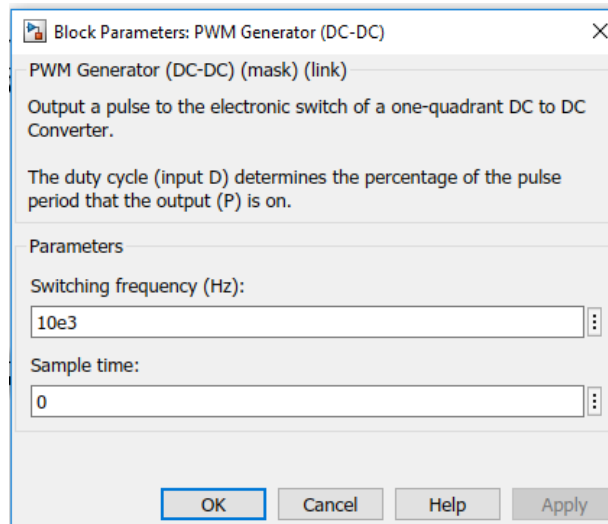


Figura 4.9 Frecuencia de operación del generador PWM.

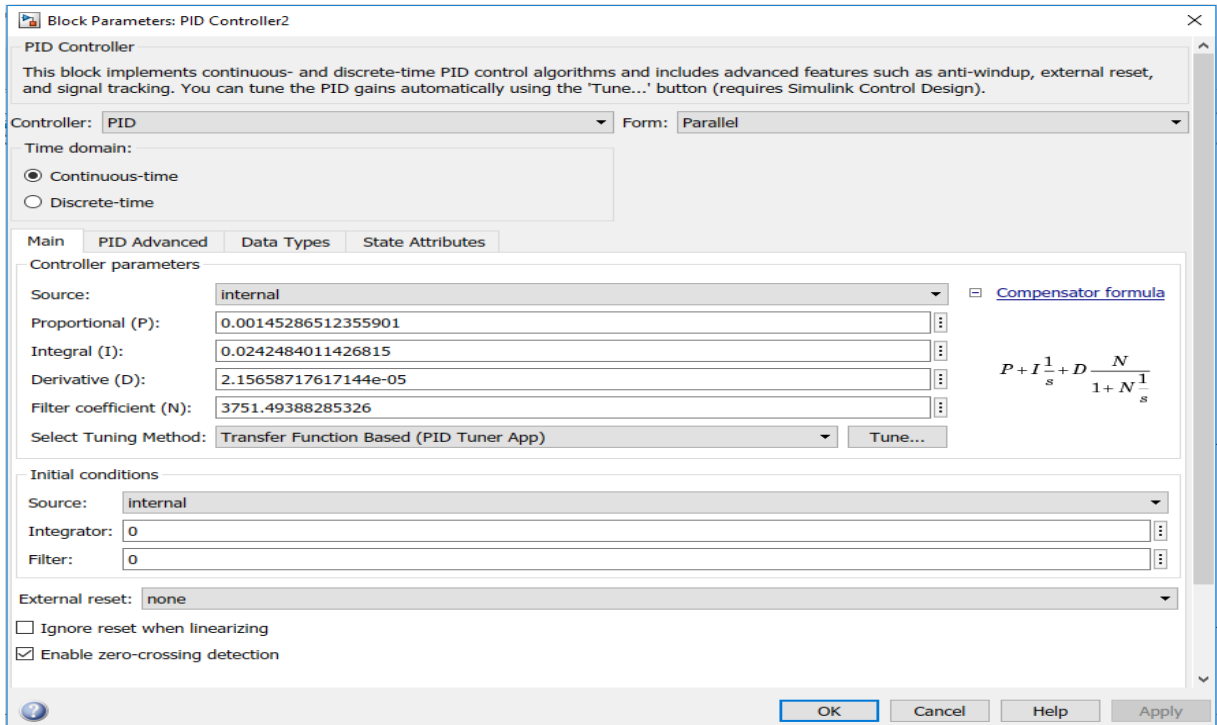


Figura 4.10 parámetros de control del controlador PID del convertidor Boost.

La función de transferencia aproximada, obtenida de manera numérica del convertidor DC/DC que relaciona ciclo de trabajo con respecto a la tensión de salida es:

Ecuación 4-7:
$$\frac{V_{out}}{D(s)} = \frac{1451}{(0.03045s)^2 + 2(0.1244)(0.03045)s + 1}$$

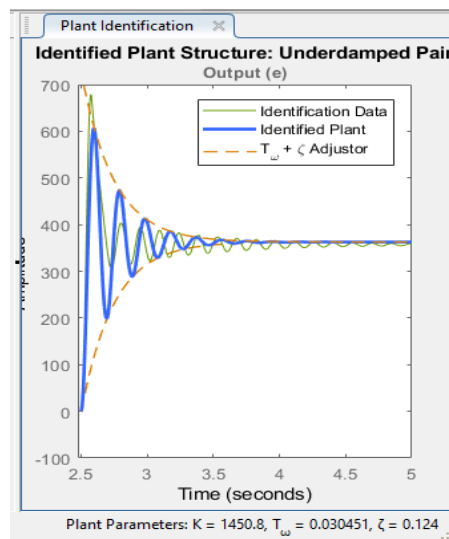


Figura 4.11 Comportamiento real del convertidor Boost [verde], comportamiento de la función de transferencia obtenida mediante métodos numéricos a través de simulación de entrada/salida del control Boost numéricos [azul].

La función de transferencia del control PID es:

Ecuación 4-8
$$PID(s) = 0.00145286 + \frac{0.024248}{s} + 2.1565(10^{-5}) \left(\frac{3751.49}{1 + \frac{3751.49}{s}} \right)$$

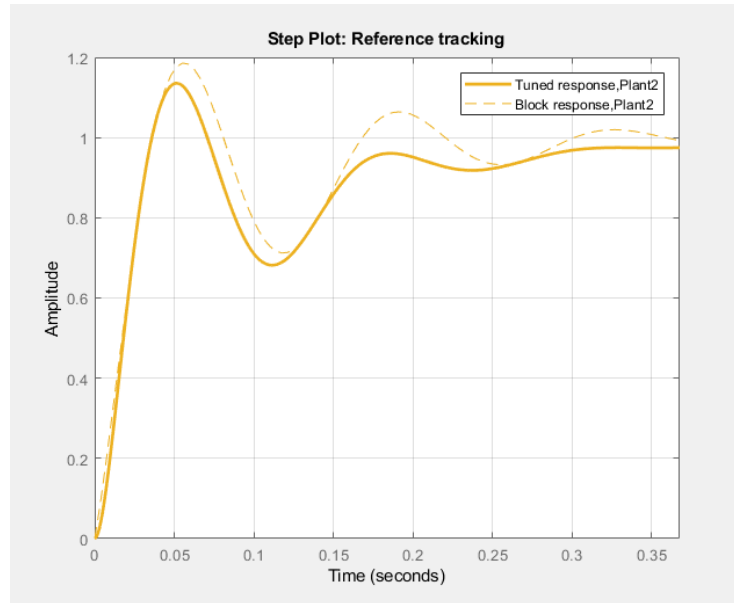


Figura 4.12 Respuesta aproximada del sistema controlado.

4.4.2 PRINCIPIO BASICO DE LOS FILTROS IMPLEMENTADOS.

El capacitor de salida del rectificador trifásico no controlado se estima utilizando la Ecuación 4-9.

Ecuación 4-9
$$C = \frac{I_{CargaMax} * V}{f_{rizado} V_{rizado}}$$

El filtro por línea implementado se observa en Figura 4.13:

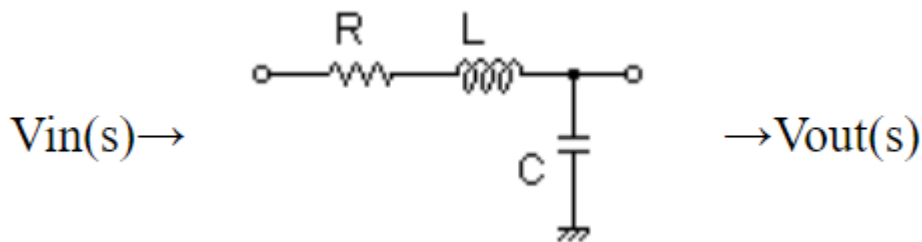


Figura 4.13 Filtro RLC por línea para el convertidor DC/AC

La función de transferencia del circuito mostrado en la Figura 4.13 se da a partir de la Ecuación 4-10 y la Ecuación 4-11.

Ecuación 4-10

$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = \frac{(2\pi f_c)^2}{s^2 + \frac{s(2\pi f_c)}{Q} + (2\pi f_c)^2}$$

Ecuación 4-11

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Donde:

f_c : Frecuencia de corte del filtro.

L: Inductancia.

C: Capacitancia.

Q: Factor de calidad del filtro.

5 CAPÍTULO V: SIMULACIÓN Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

5.1 MODELO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN.

En esta sección se muestran los parámetros de todos los subsistemas que conforman el modelo de generación en Simulink, así como los resultados de la simulación de cada subsistema operando aisladamente y en conjunto.

5.1.1 IMPLEMENTACIÓN EN SIMULINK.

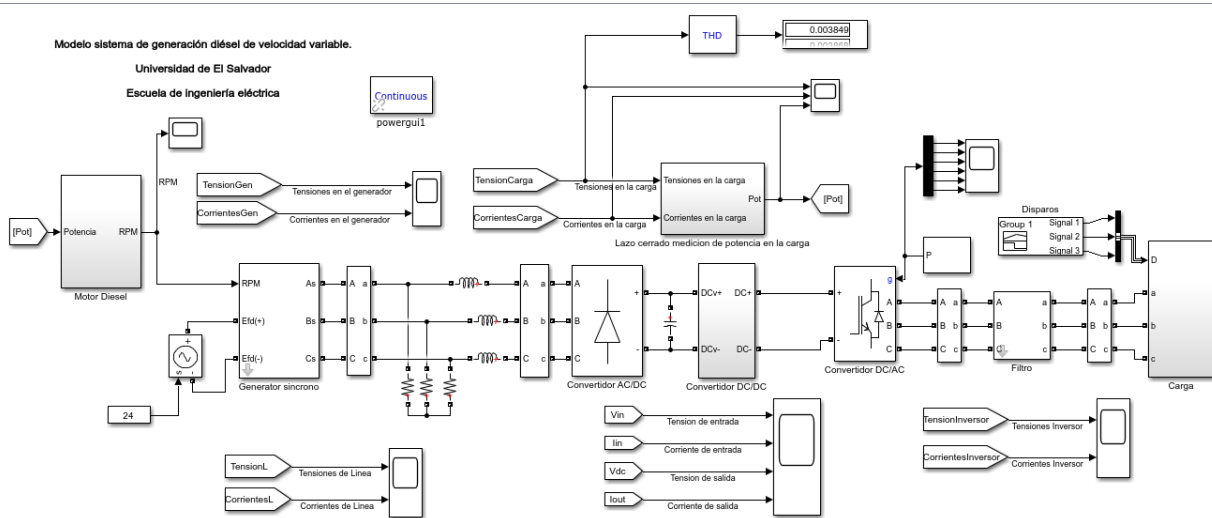


Figura 5.1 Modelo del sistema de generación implementado en Simulink.

5.1.2 RESUMEN DE PARÁMETROS DE MÁQUINAS Y SISTEMAS COMPLEMENTARIOS.

Motor Diésel:

Tabla 5.1 Parámetros que definen la capacidad del motor Diésel para el modelo punto a punto.

Parámetro	Valor en el modelo	Unidades del SI
n_R	2	-
V_d	0.497	L
r	23.5	-
L	0.068	m
n_{th}	0.6737	-

Tabla 5.2 Parámetros que definen el comportamiento del motor Diésel para el modelo de control con ganancias y retardos.

Parámetro	Valor en el modelo	Unidades del SI
K_1	1	-
K_2	1	-
K_3	1	-
J	2.5	-
τ_1	0.1	-
τ_2	0.2	-
B	1	-

Tabla 5.3 Control PID de velocidad.

Parámetro	Valor en el modelo	Unidades del SI
P	15.6684	-
I	5.6613	-
D	4.0174	-
N	844.5221	-

Generador síncrono:

Tabla 5.4 Parámetros que definen la capacidad y comportamiento del generador síncrono usados para el modelo planteado @60Hz [34].

Parámetro	Valor en el modelo	Unidades del SI
Resistencia del estator	0.37	Ω
Inductancia del eje q	8e-3	H
Inductancia del eje d	4e-2	H
Inductancia de fuga	3.5e-4	H
Auto inductancia de campo Lff	3e-2	H
Inductancia mutua Lsf	2.5e-2	H
Resistencia de campo Rf'	0.65	Ω
Pares de polos	1	-
Relación de vueltas	1	-

Convertidor de frecuencia:

Tabla 5.5 Parámetros del rectificador trifásico no controlado.

Parámetro	Valor en el modelo	Unidades del SI
Numero de ramas del puente de diodos	3	-
Resistencia de amortiguamiento Rs	1e5	Ω
Capacitancia de amortiguamiento Cs	infinito	F
Ron	1e-3	Ω
Lon	0	H
Tensión inversa	0.7	V

Tabla 5.6 Parámetros del Convertidor Boost DC/DC.

Parámetro	Valor en el modelo	Unidades del SI
Inductancia L	5.5e-3	H
Capacitor C	12e-3	F
Frecuencia de trabajo PWM	10e3	Hz
Tensión de referencia	600	V

Tabla 5.7 Parámetros convertidor DC/AC y filtros de salida.

Parámetro	Valor en el modelo	Unidades del SI
Numero de ramas del puente IGBT	3	-
Resistencia de amortiguamiento Rs	1e5	Ω
Capacitancia de amortiguamiento Cs	Infinito	F
Ron	1e-3	Ω
Tensión inversa	0	V

5.2 RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE LOS SUBSISTEMAS.

En esta sección se presentan los resultados de simulación de todos los subsistemas por separado, cada subsistema alimentado con señales ideales para observar el comportamiento de sus respectivas salidas con el objetivo de validar el modelo implementado en cada subsistema. Posteriormente se presentan los resultados del sistema de generación.

5.2.1 MOTOR DIÉSEL.

El comportamiento de ajuste de velocidad del motor Diésel se muestra utilizando una referencia ideal de potencia en la entrada mostrada en la Figura 5.2, donde se escogieron valores de 3kW, 5.5kW y 8 kW similar a la carga que se pretende utilizar para en modelo de carga variable. En la Figura 5.3 se muestra la velocidad angular de salida del motor Diésel, cabe destacar que el modelo punto por punto da el valor de velocidad y el modelo de control se encarga de mostrar el comportamiento físico del motor Diésel, los valores de salida correspondientes a la entrada de la Figura 5.2 se muestran en la Tabla 5.8.

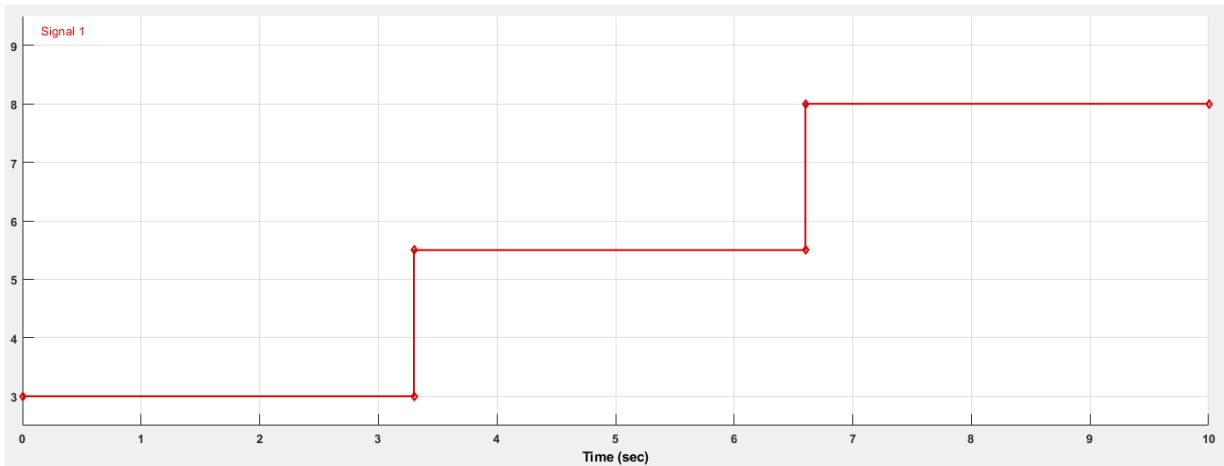


Figura 5.2 Entrada de potencia ideal para el motor Diésel modelado

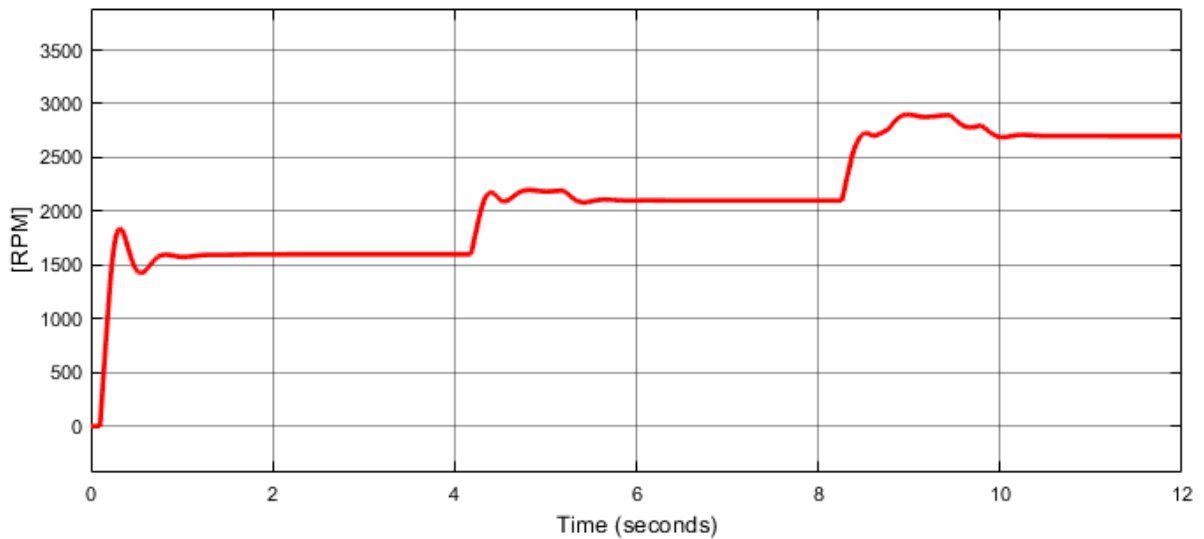


Figura 5.3 Velocidad de referencia de salida del motor Diésel debido al perfil de carga de la Figura 5.2.

Tabla 5.8 Valores de salida del motor debido a la entrada de potencia de la Figura 5.2.

Potencia requerida [kW]	Velocidad angular de referencia [RPM]
3	1600
5.5	1999
8	2696

Los rangos de operación del motor Diésel modelado se muestran en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9 Rango de operación del motor Diésel.

Parámetro	Valor max.	Valor min.
Potencia.	9.9kW	1kW
Velocidad angular.	3600RPM	1600RPM
Torque.	30N*m	1N*m
Consumo BSFC.	671g/kWh	168g/kWh

5.2.2 GENERADOR SÍNCRONO.

Para analizar el comportamiento del generador síncrono ante cambios de velocidad se utilizó la señal ideal de la Figura 5.4 en la entrada con el objetivo de simular la salida del motor Diésel y una carga arbitraria de 8Ω fija conectada para observar el comportamiento de la corriente ante una carga lineal.

Los rangos de operación del generador síncrono se muestran en la Tabla 5.10.

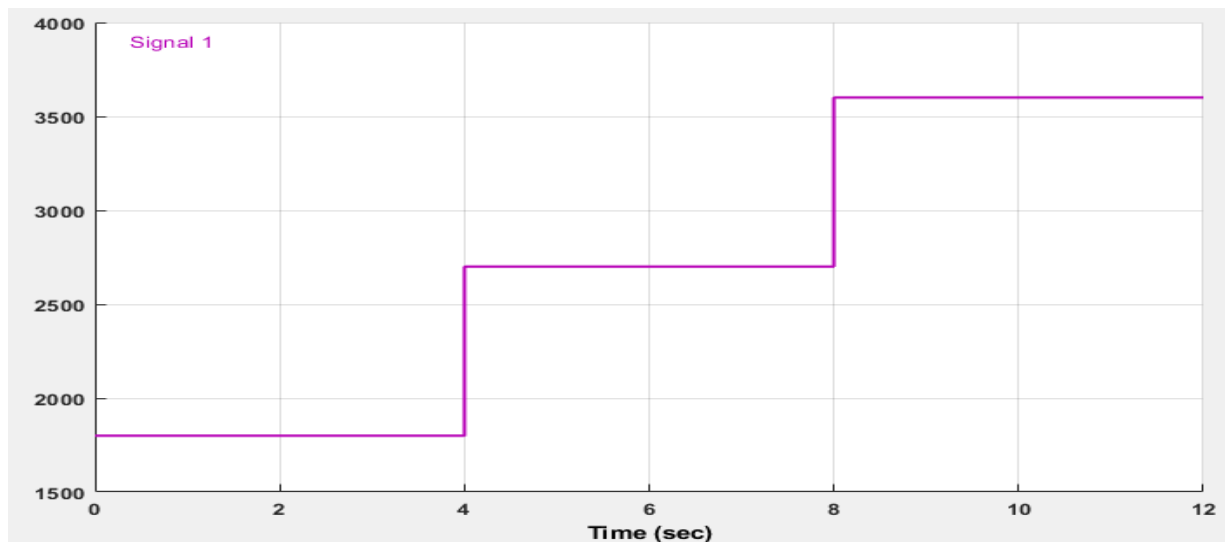


Figura 5.4 Señal ideal de velocidad en la entrada del generador síncrono.

Tabla 5.10 Rangos de operación del generador síncrono.

Velocidad	Carga	Tensión de línea	Corriente de línea	Frecuencia
1800	8 Ω [Por fase]	259.9 Vrms	18.75 Irms	30.3 Hz
2700	8 Ω [Por fase]	338 Vrms	24.4 Irms	44 Hz
3600	8 Ω [Por fase]	383.3 Vrms	27.6 Irms	60 Hz

En la Figura 5.5 se observa la respuesta del generador síncrono ante cambios de velocidad angular en la entrada; el generador varia en amplitud y frecuencia como se observa en detalle en la Figura 5.6 donde se obtiene una señal con amplitud de tensión de 245 Vrms y 45.29Hz de frecuencia, de igual manera en la Figura 5.7 se obtiene una señal con amplitud 336Vrms y 60.3Hz de frecuencia, cada una de estas señales son ampliaciones de la simulación de la Figura 5.5 ampliadas en 2.15s y 3.22s respectivamente. También es posible observar la respuesta senoidal lineal de la corriente debido a la naturaleza de la carga conectada, este comportamiento variara cuando el modelo sea acoplado a la etapa de rectificación ya que su comportamiento no es lineal.

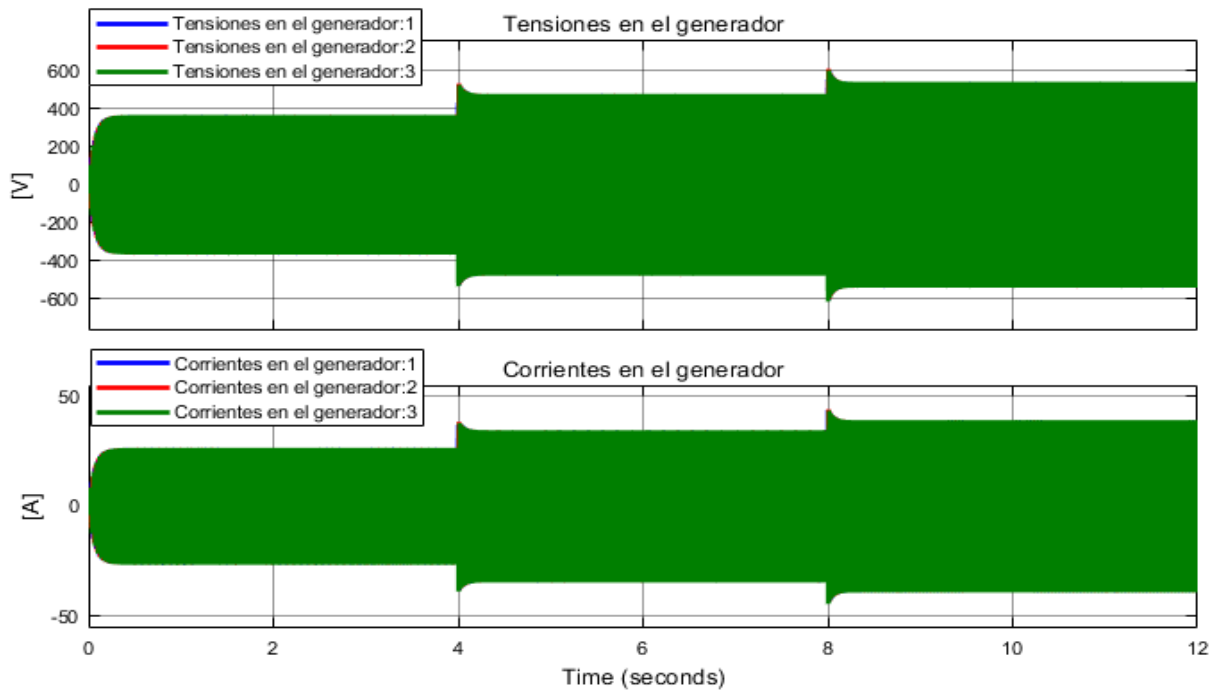


Figura 5.5 Tensión y corriente de salida del generador síncrono ante una entrada de velocidad ideal.

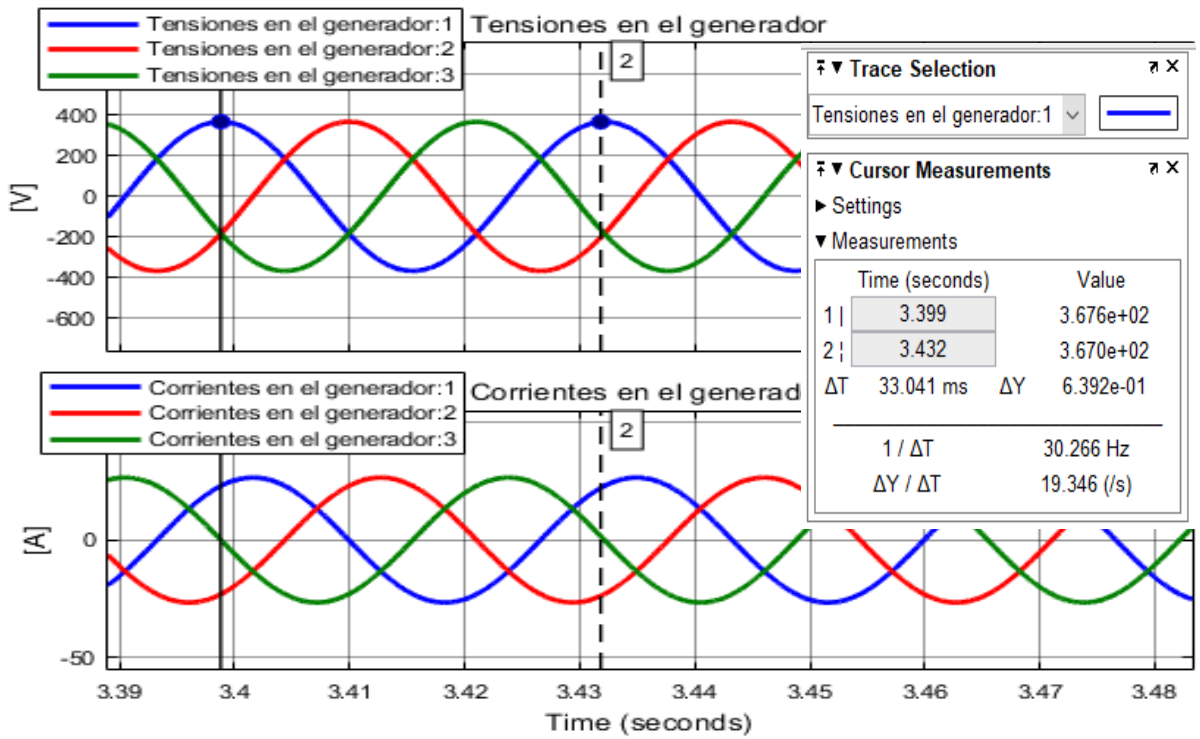


Figura 5.6 Tensión y corriente de salida del generador síncrono a 3.4s de simulación.

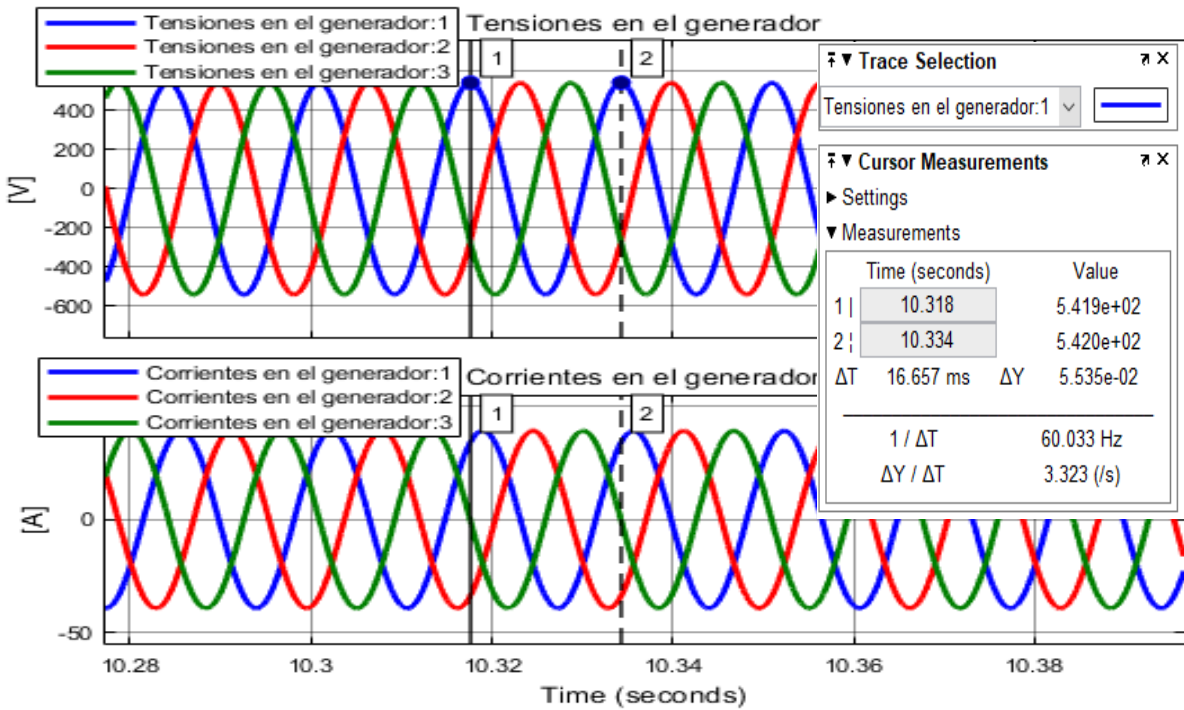


Figura 5.7 Tensión y corriente de salida del generador síncrono a 10.32s de simulación.

5.2.3 CONVERTIDOR AC/DC/AC.

RECTIFICADOR.

Para analizar el comportamiento del puente rectificador se hizo uso de una señal trifásica ideal mostrada en la

Figura 5.8.

En la Figura 5.9 se muestra la respuesta del rectificador a la señal ideal de la

Figura 5.8, cabe destacar que la señal de tensión posee un rizo de 8Vpp establecido por el capacitor filtro a la salida del puente de diodos, los valores de operación del rectificador se muestran en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11 Valores de operación del rectificador.

Tensión de entrada	Corriente de entrada	Tensión de salida	Corriente de salida	Carga
208 Vrms 60 Hz	59 Arms 60 Hz	269.25V [±0.55V]	33.66A [± 0.07A]	8 Ω

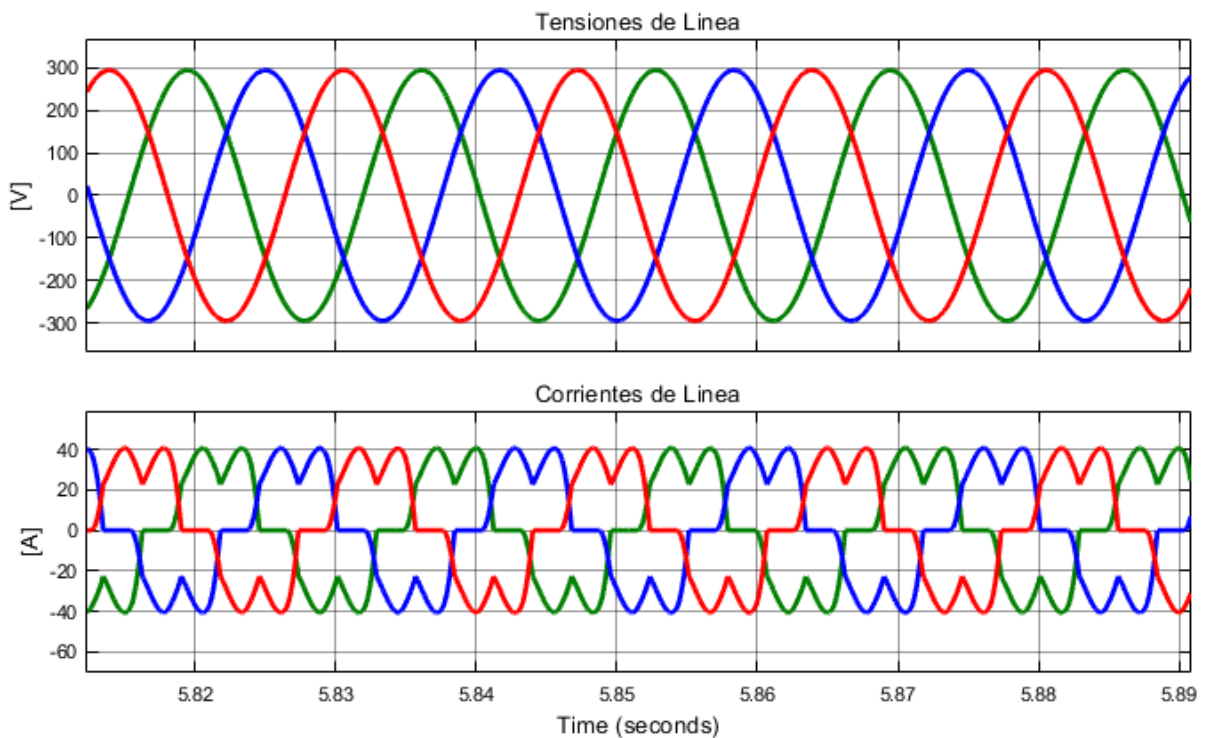


Figura 5.8 Señales de tensión y corriente ideales de entrada proporcionada por la red en estado estable.

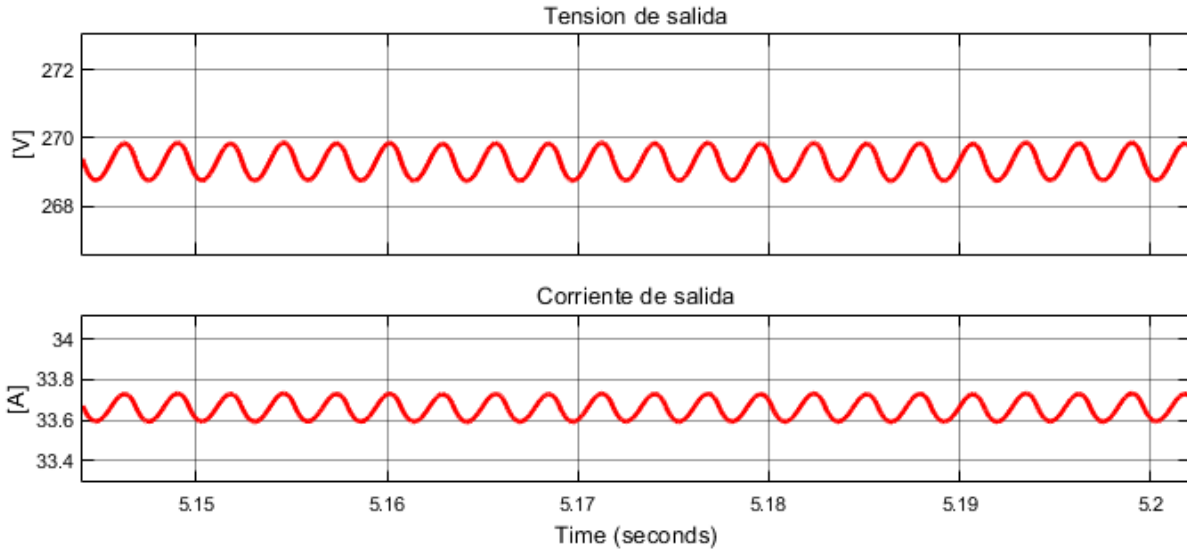


Figura 5.9 Señales de tensión y corriente a la salida del rectificador.

CONVERTIDOR BOOST.

El comportamiento del convertidor Boost se describe usando la señal ideal mostrada en la Figura 5.10 (izquierda), la señal de tensión representa variaciones de valores de tensión rectificadas; estos valores al ser menores que la referencia son elevados a 600V por el convertidor Boost como se muestra en la Figura 5.10 (derecha), la señal de corriente se mantiene aproximadamente estable ya que la carga conectada es constante.

El grafico del ciclo de trabajo necesario para elevar la tensión de salida a 600V, a partir de las variaciones en la entrada del convertidor Boost de la Figura 5.10 (izquierda), se muestra en la Figura 5.11; los valores de operación del convertidor Boost se presentan en la Tabla 5.12.

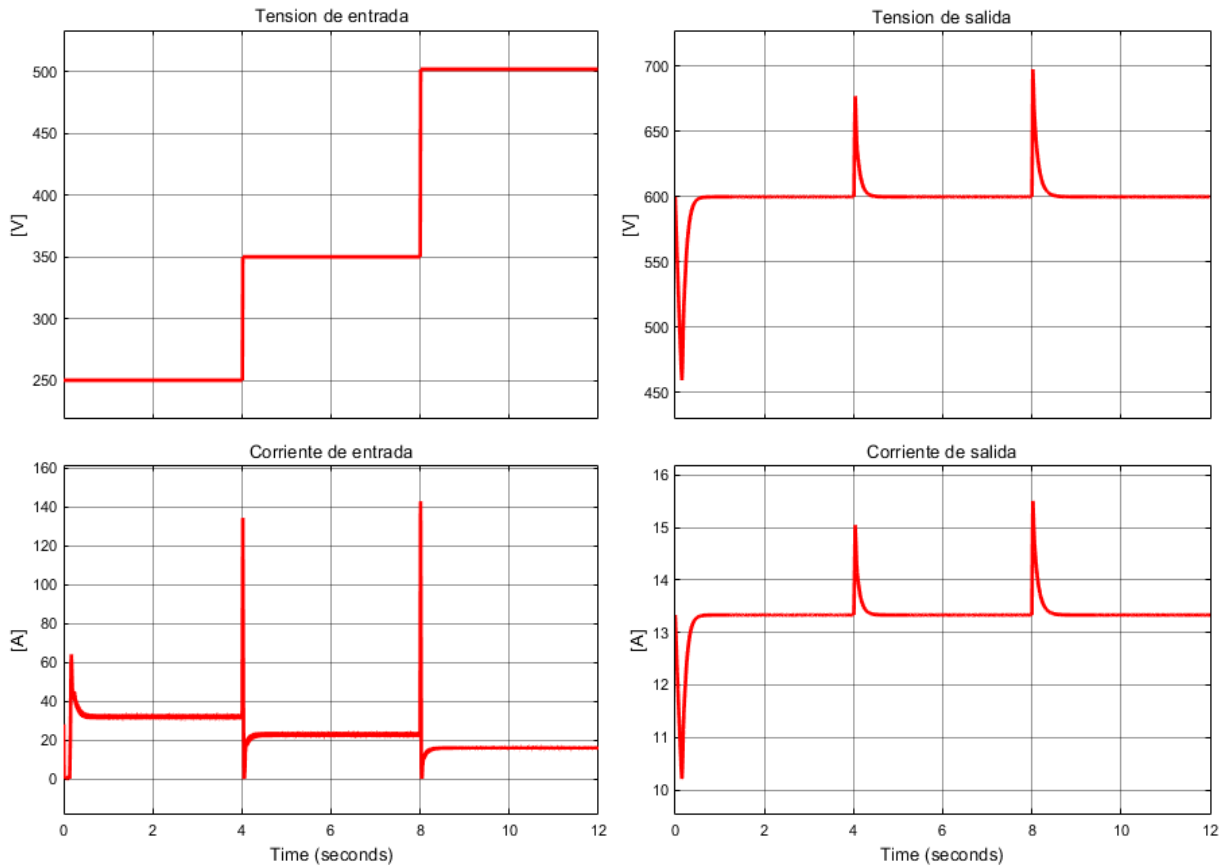


Figura 5.10 Señales de tensión y corriente del convertidor Boost ante una señal ideal de entrada.

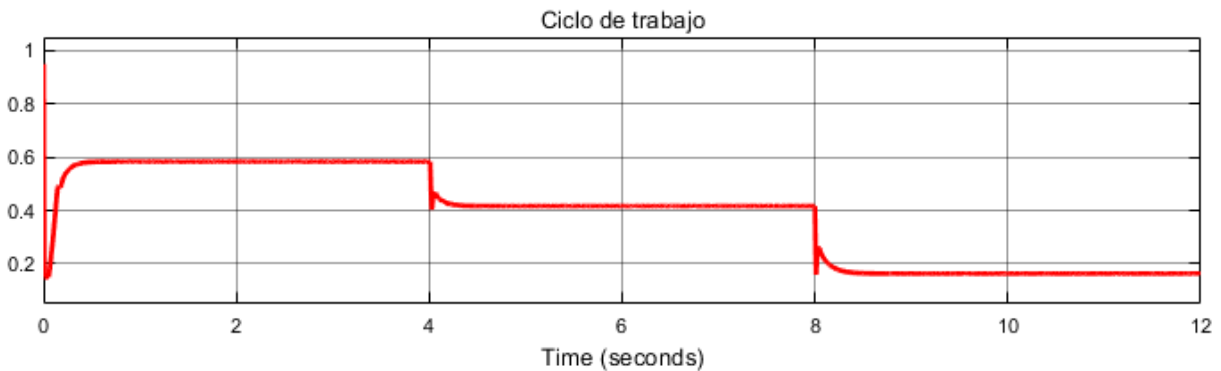


Figura 5.11 Ciclo de trabajo del convertidor DC/DC.

Tabla 5.12 Rangos de operación del conversor Boost.

Tensión de entrada	Corriente de entrada	Tensión de salida	Corriente de salida	Carga	Ciclo D
250 V	30.7 A	600 V	13.3 A	45 Ω	0.583
350 V	22.3 A	600 V	13.3 A	45 Ω	0.417
500 V	16.5 A	600 V	13.3 A	45 Ω	0.163

INVERSOR.

El comportamiento del inversor se analiza utilizando la señal ideal de 600V DC mostrada en la Figura 5.12, la respuesta de la salida del inversor sin filtrar se muestra en la Figura 5.13, el gráfico mostrado es consecuencia de la conmutación de los dispositivos IGBT controlados por los pulsos PWM de la Figura 5.14.

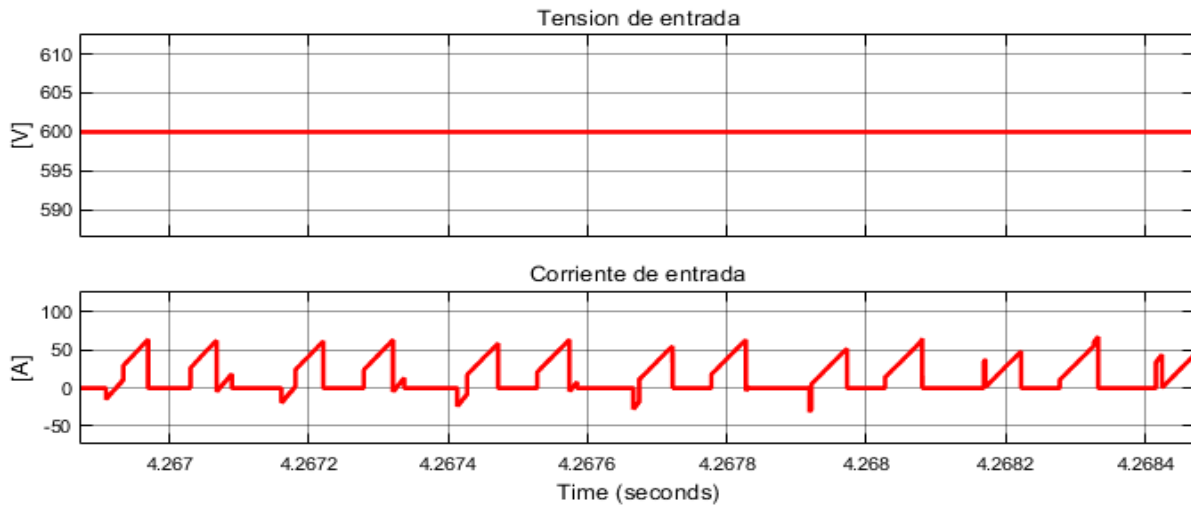


Figura 5.12 Tensión y corriente de entrada del convertidor DC/AC.

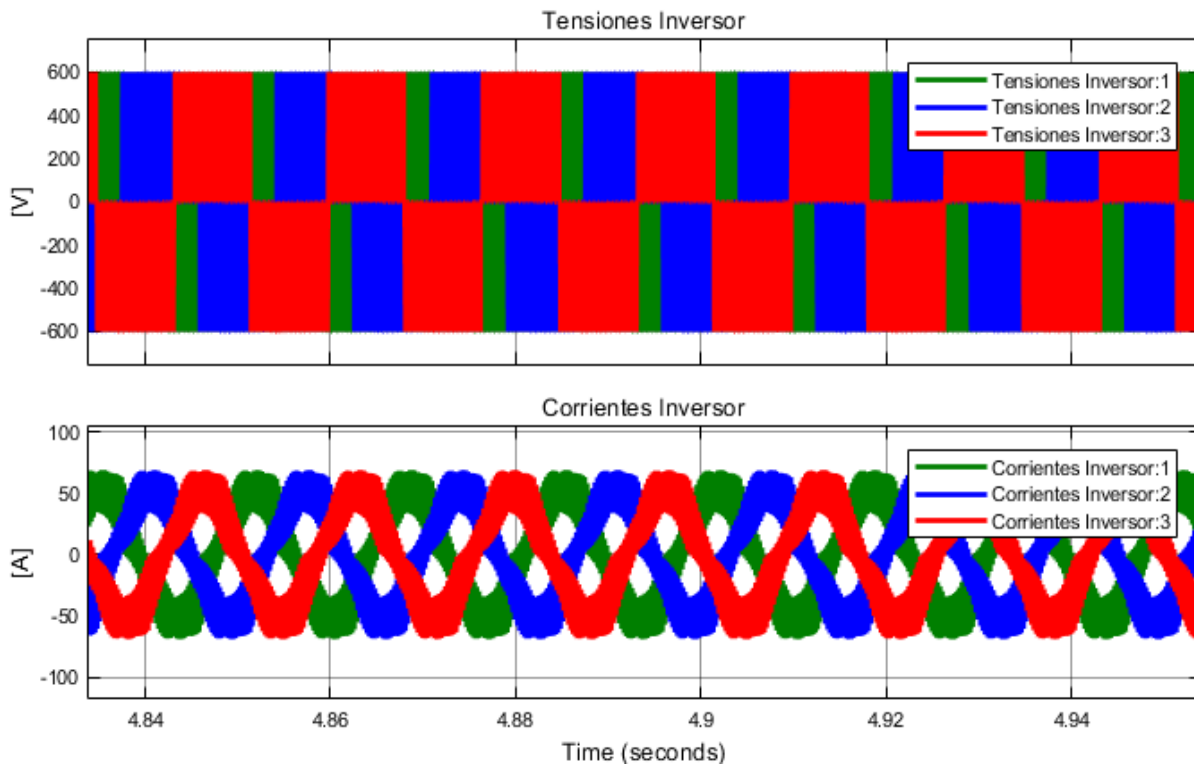


Figura 5.13 salida de corriente y tensión del inversor sin filtrar.

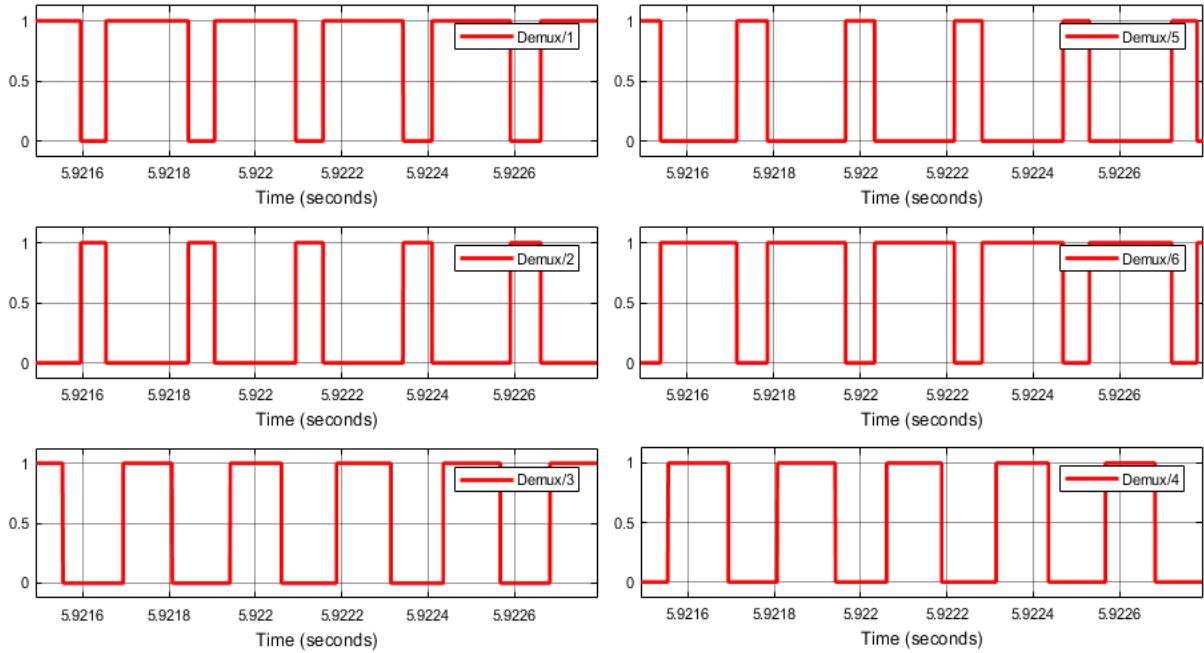


Figura 5.14 Pulsos de para las GATE de los IGBT del convertidor DC/AC.

Para filtrar la señal modulada por ancho de pulso y obtener la tensión nominal de 208V y 60Hz se utilizó el filtro mostrado en la Figura 5.15 el cual posee una frecuencia de corte de -3dB en 600Hz; el diagrama de bode de magnitud y fase se muestra en la Figura 5.16.

A partir del filtro implementado se observa la señal de salida del inversor filtrada con una amplitud senoidal de 191.3Vp equivalente a 205.98Vrms, además se observa que la señal tiene una frecuencia de 60.1Hz y un factor de potencia de 0.9, cumpliendo con los requerimientos de diseño previamente presentados, los valores de operación del inversor se muestran en la Tabla 5.13.

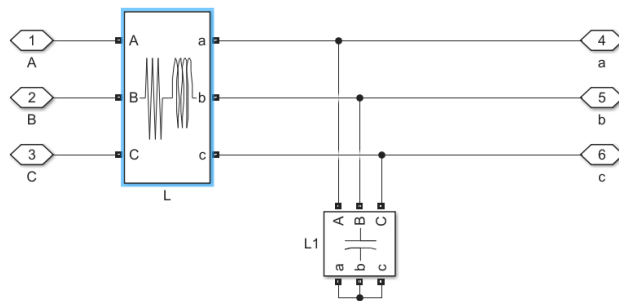


Figura 5.15 Filtro RLC implementado a la salida del inversor trifásico.

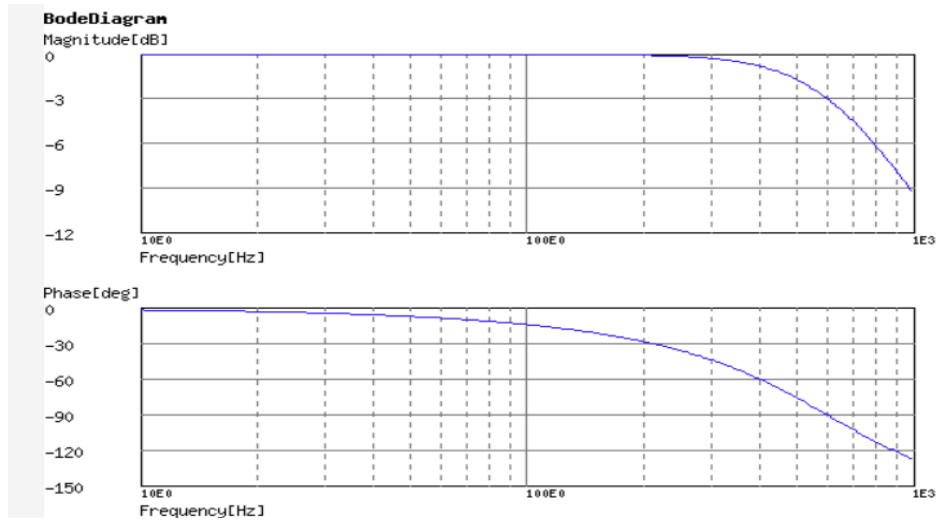


Figura 5.16 Diagrama para el filtro paso bajo mostrado en la Figura 5.15.

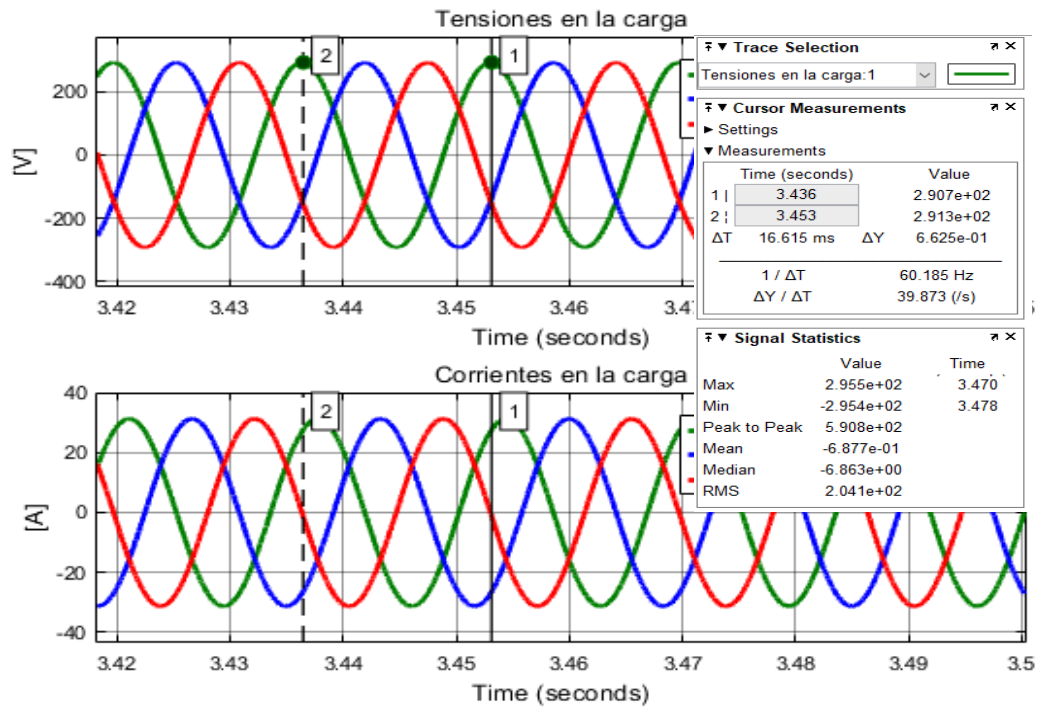


Figura 5.17 Tensión y corriente de salida en el inversor trifásico filtrada.

Tabla 5.13 Valores de operación del convertidor DC/AC.

Tensión de entrada	Tensión de salida	Corriente de salida	Carga
600 Vdc	208 Vrms 60 Hz	21.9 Arms 60 Hz	8kW @ [208 Vrms 60Hz]

5.3 OPERACIÓN DEL SISTEMA CONJUNTO ANTE VARIACIONES EN LA CARGA.

Una vez que se comprueba que todos los subsistemas responden de acuerdo a las ecuaciones de sus modelos se procede a simular el funcionamiento en conjunto del sistema de generación y observar los comportamientos ante las variaciones en la carga.

La simulación comprende en 3 cambios de carga en un lapso de 12s donde es posible observar el desempeño de los modelos acoplados.

MOTOR DIÉSEL.

Como se describió anteriormente el motor Diésel mide la señal de potencia demandada por la carga para realizar el ajuste de velocidad de referencia, en la Figura 5.18 es posible observar la potencia de salida escalonada del sistema de generación, dicha señal es retroalimentada e introducida en la entrada del motor Diésel.

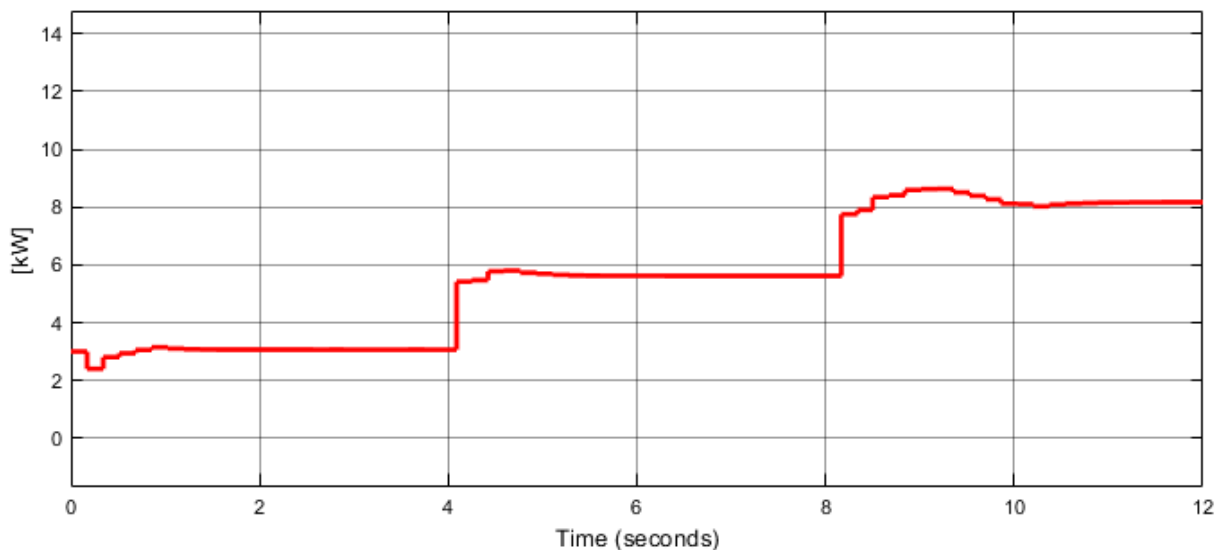


Figura 5.18 Señal de potencia escalonada medida en la carga.

En la Figura 5.19 se muestra la salida de velocidad angular del motor Diésel ante la señal de potencia medida, se debe recalcar la similitud de dicha señal con la mostrada en la Figura 5.3 donde se observó en desempeño del motor Diésel ante una señal de potencia ideal; no obstante es posible reconocer cierta oscilación en los primeros segundos cuando se realiza el cambio en la carga conectada, sin embargo el sistema es capaz de estabilizarse con bastante facilidad.

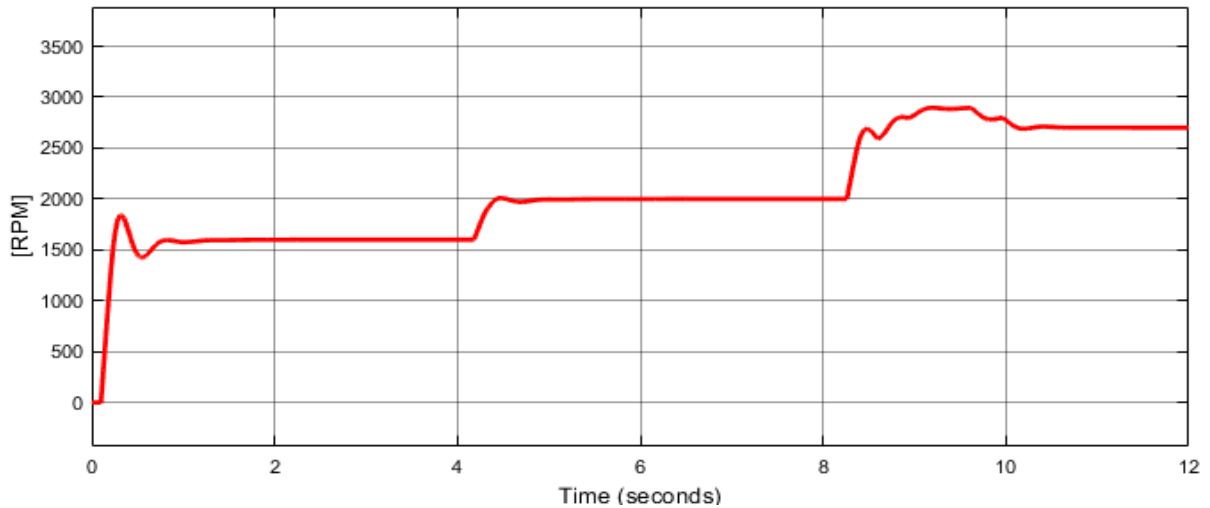


Figura 5.19 Comportamiento de la velocidad angular del motor Diésel ante variaciones en la carga.

GENERADOR SINCRONO.

La salida del motor Diésel mostrado en la Figura 5.19 ingresa a la entrada del modelo del generador síncrono, la respuesta a dicha entrada se muestra en la Figura 5.20, es posible comparar dicha salida con la obtenida en la Figura 5.5, donde se mostró el desempeño del generador síncrono ante una entrada ideal, en dicha comparación se puede destacar cierto aumento momentáneo causado por el overshoot presente en el ajuste de la velocidad del motor Diésel, sin embargo cuando la velocidad del motor Diésel se estabiliza la señal senoidal de salida del generador síncrono también lo hace, en la Figura 5.21 es posible observar a detalle el comportamiento del generador síncrono en estado estable.

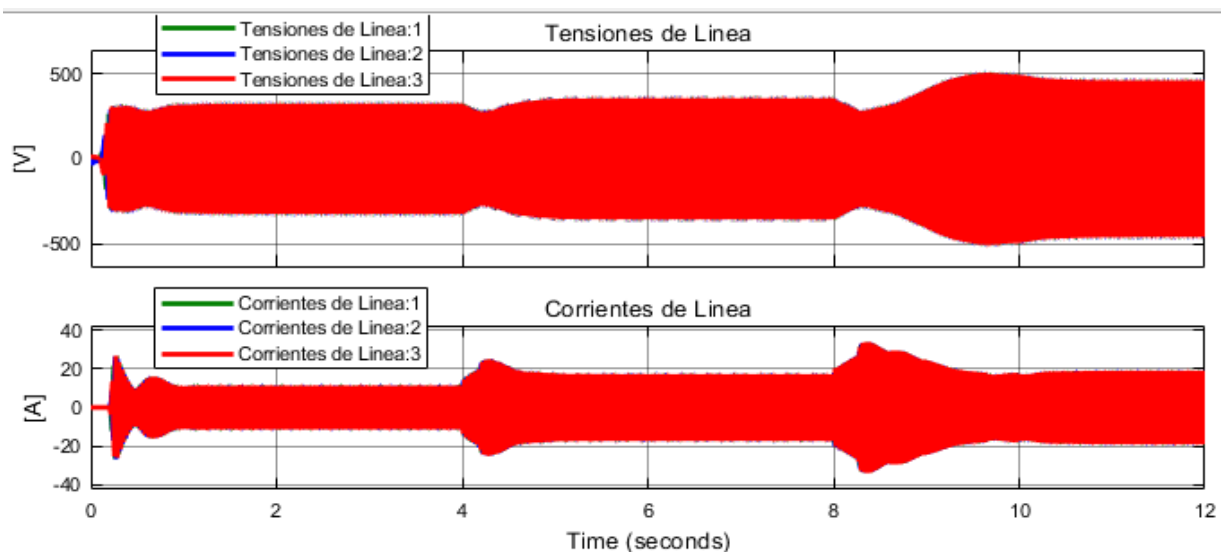


Figura 5.20 salida del generador síncrono al ser acoplado al modelo del motor Diésel.

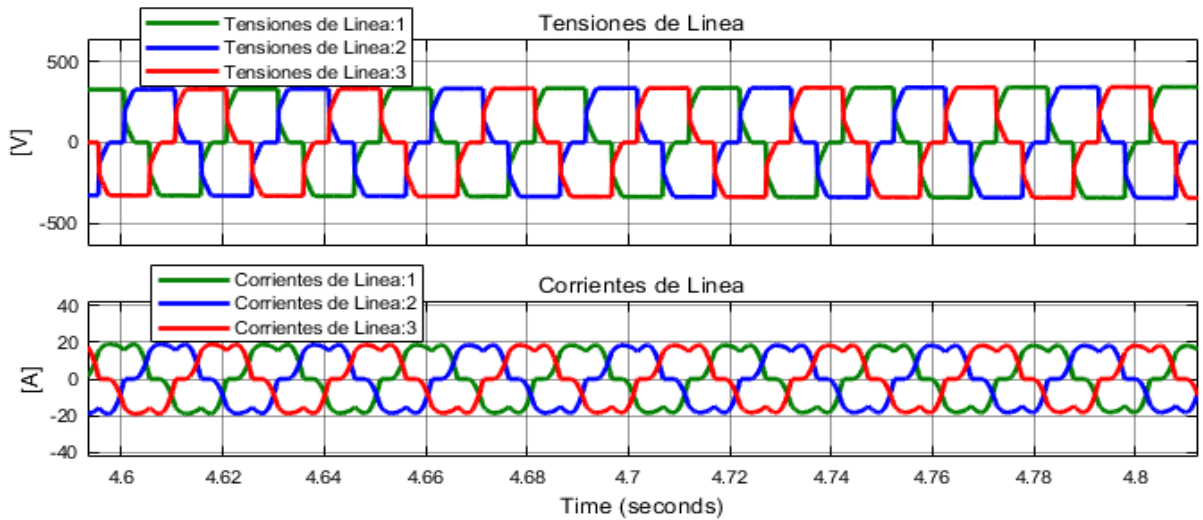


Figura 5.21 Tensiones y corrientes a la salida del generador síncrono en estado estable.

CONVERTIDOR AC/DC/AC.

En la Figura 5.22 (izquierda) se muestra la salida del rectificador al utilizar la señal de la Figura 5.20 como entrada, los valores de tensión en estado estable debido a los cambios de carga demandada se muestran en la Tabla 5.14.

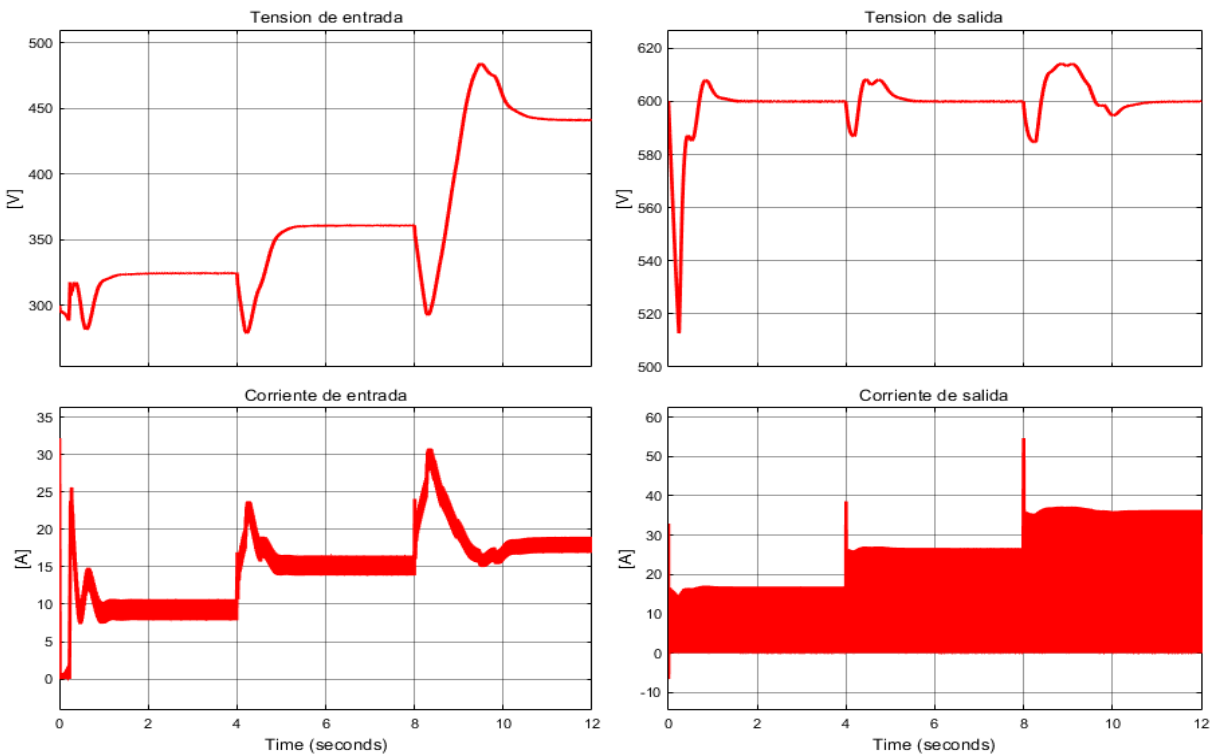


Figura 5.22 Señales de tensión y corriente del rectificador y convertidor Boost.

Tabla 5.14 Valor de salida del rectificador ante los cambios en la carga demandada

Carga demandada kW.	Tensión rectificadora estado estable [V].
3	323
5.5	361
8	444

En la Figura 5.22 (derecha) se muestra el resultado de acoplar la salida del rectificador al convertidor Boost, la señal del rectificador es controlada por medio del controlador PID y elevada hasta 600V; la señal resultante posee variaciones de tensión menores al 3% con duraciones menores a 3s.

En la Figura 5.23 se muestra la salida de tensión y corriente en el inversor debido en operación a velocidad variable, en la Figura 5.24 se observa a detalle la señal de tensión y corriente para una carga de 3kW; de las mediciones realizadas a dicha señal se obtuvo el valor RMS de la señal en 207.3V con variaciones menores al 3%, además de un valor de frecuencia de 60.2Hz y un factor de potencia de 0.9, como análisis final se mide la cantidad de armónicos en la señal de salida del modelo, dando como resultado que es menor al 1% con excepción de pequeños transitorios durante los cambios abruptos en la carga, dicha medición se muestra en la Figura 5.25.

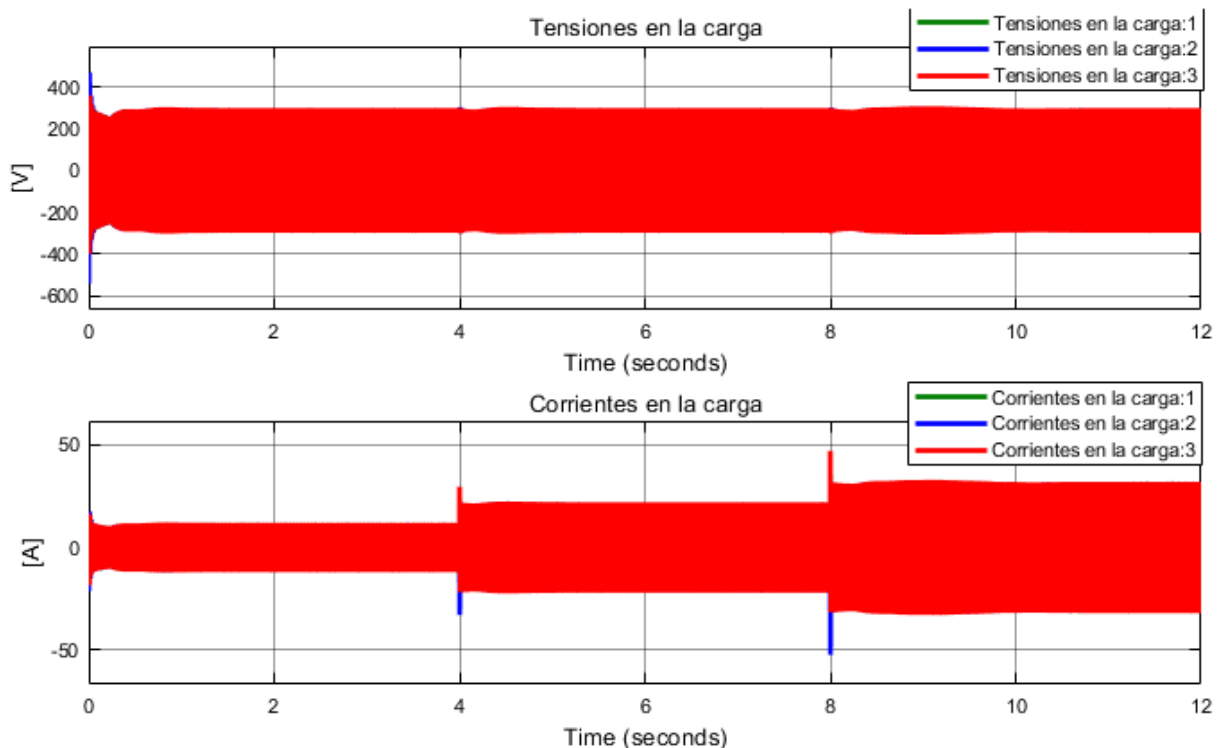


Figura 5.23 Tensión y corriente de salida del inversor ya filtrada.

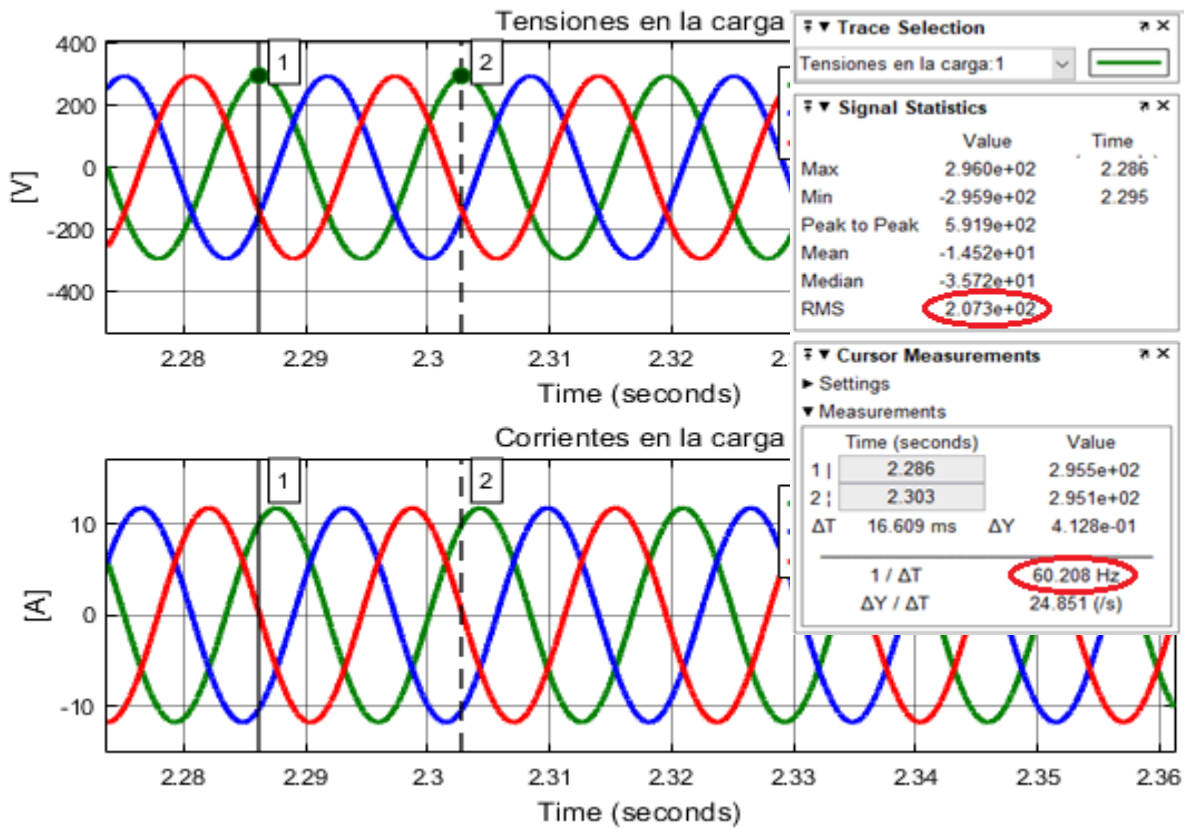


Figura 5.24 Tensión de línea a neutro y corriente en la carga para una carga trifásica de 3kW.

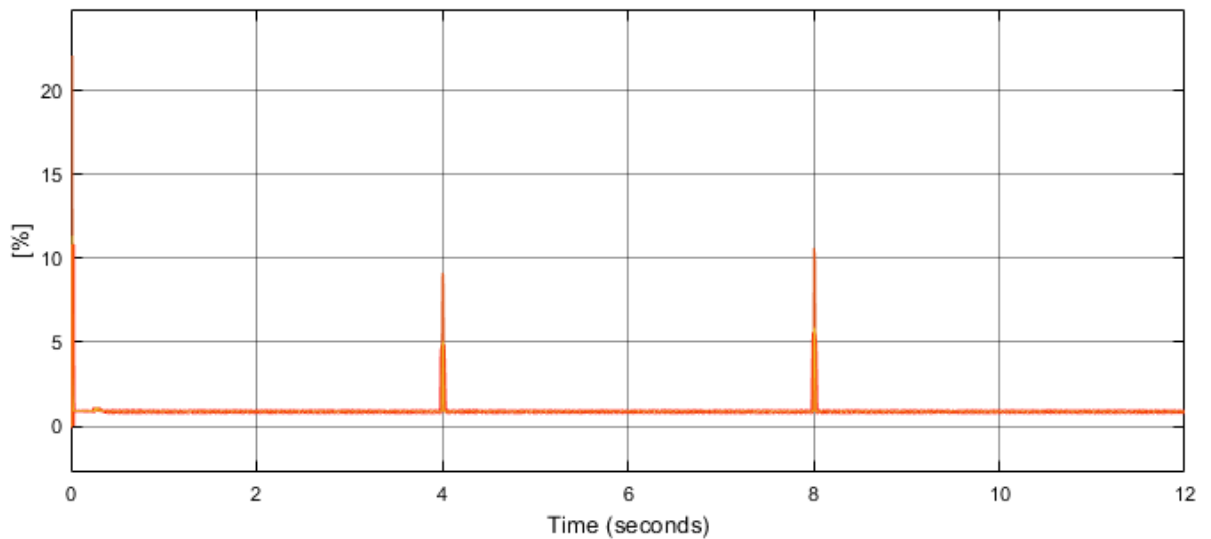


Figura 5.25 Medición de THD de tensión en la carga.

5.4 ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE DEL MOTOR MODELADO.

A partir del modelo planteado del motor Diésel es posible estimar el consumo de combustible a velocidad variable y poder compararlo con el mismo modelo del motor pero operando a velocidad constante; se muestra en la Figura 5.26 el consumo específico de combustible a velocidad variable (Rojo) y el consumo específico a velocidad constante (azul) para 3kW, 5.5 kW y 8kW; en la Tabla 5.15 se muestran los valores de BSFC obtenidos en la simulación.

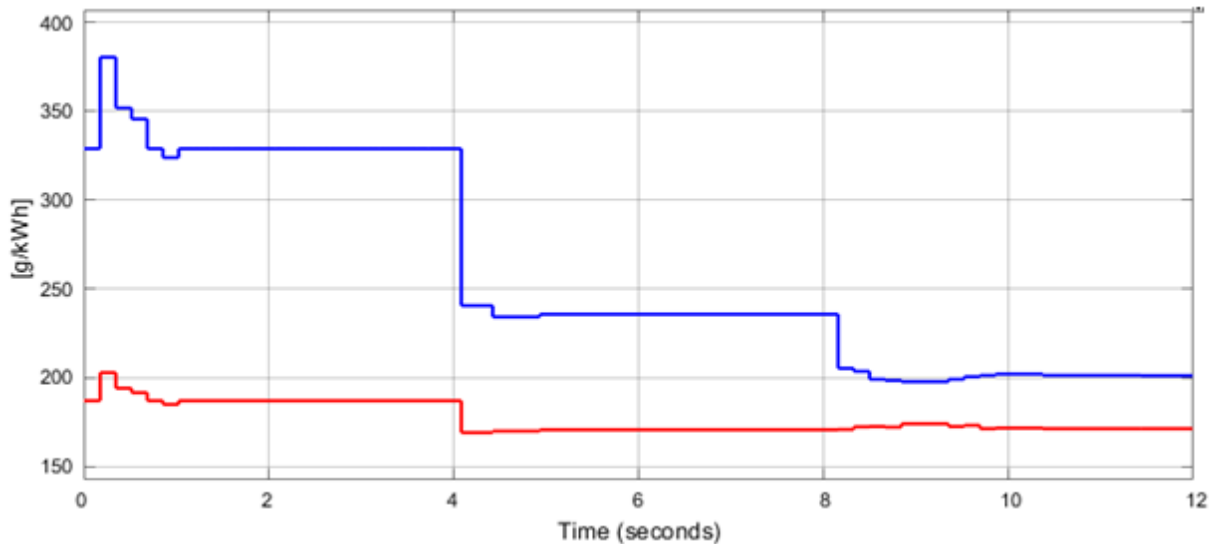


Figura 5.26 consumo específico de combustible.

Tabla 5.15 valores de BSFC para diferentes valores de potencia a velocidad constante y variable en estado estable.

Potencia [kW]	BSFC velocidad variable [g/kWh]	BSFC velocidad constante [g/kWh]
3	187.1	328.8
5.5	170.8	235.7
8	171.5	201.4

En la Figura 5.27 se muestra el porcentaje de ahorro si se decide utilizar el motor Diésel a velocidad variable, se observa que a medida la potencia demandada disminuye el ahorro de combustible aumenta, por lo cual operar el motor Diésel a velocidad variable para suplir una carga de 3kW podría representar un ahorro de hasta el 43.1% del combustible utilizado; los porcentajes de ahorro de combustible obtenidos se muestran en la Tabla 5.16.

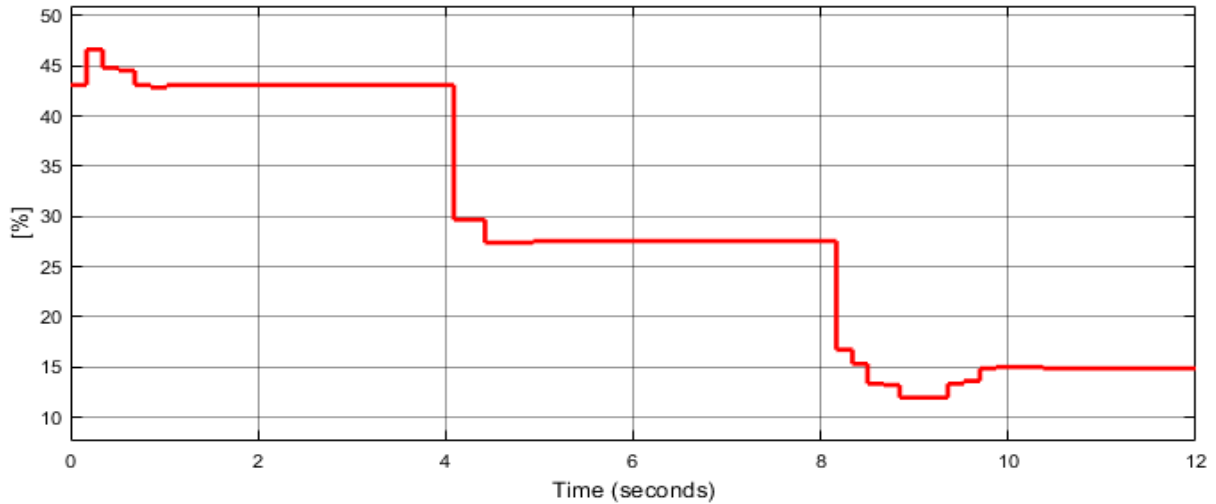


Figura 5.27 Porcentaje de ahorro de combustible con el motor operando a velocidad variable respecto a operación a velocidad constante para 3kW, 5.5kW y 8kW respectivamente.

Tabla 5.16 porcentajes de ahorro de combustible para diferentes valores de potencia

Potencia [kW]	Porcentaje de ahorro de combustible [%]
3	43.1
5.5	27.5
8	14.9

Estimación de combustible utilizado.

Para estimar la cantidad de combustible necesaria para suplir una carga por cierta cantidad de tiempo se utilizará la Ecuación 5-1 donde se tomara un valor de densidad de Diésel de $832 \frac{kg}{m^3}$ y se tomara un rango de 200 horas de operación, los cálculos de galones de combustible para los valores de carga de simulación se muestran en la Tabla 5.17.

$$\text{Ecuación 5-1} \quad G_{200h} = BSFC * Pot * h * \frac{1}{\rho_{Diesel}} * 0.26417$$

Tabla 5.17 consumo de combustible para diferentes valores de potencia a velocidad variable y constante.

Potencia suministrada [kW]	Consumo de Diésel velocidad variable [gal]	Consumo de Diésel velocidad constante [gal]
3	35.64	62.64
5.5	59.65	82.32
8	87.12	102.32

En la Tabla 5.17 se muestra la diferencia porcentual del consumo de combustible para las tres cargas específicas de la simulación, sin embargo se puede realizar un barrido de requerimiento de potencia de 2kW a 10kW tal como se ve en la Figura 5.28 y por medio de una simulación del modelo punto por punto para el motor Diésel estimar la diferencia porcentual de consumo tal como se observa en la Figura 5.29, en dicha figura es posible evidenciar de forma más marcada el comportamiento del modelo en operación a velocidad variable y a velocidad constante, donde el ahorro de combustible varía del 49% a potencia mínima hasta el 0% a velocidad nominal del motor Diésel tal como se observa en la Figura 5.30.

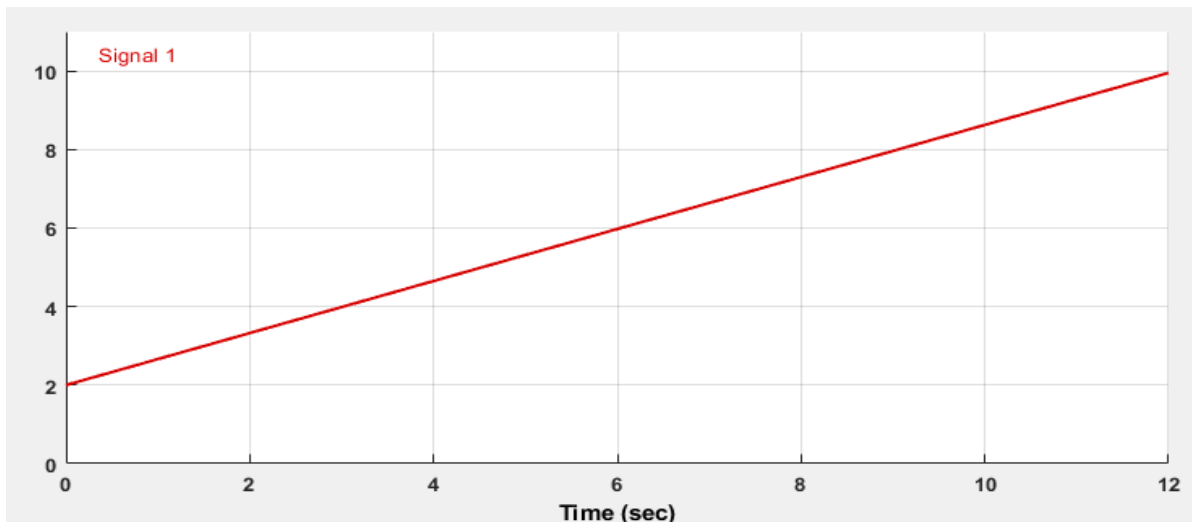


Figura 5.28 Señal de potencia de 2 kW a 10 kW

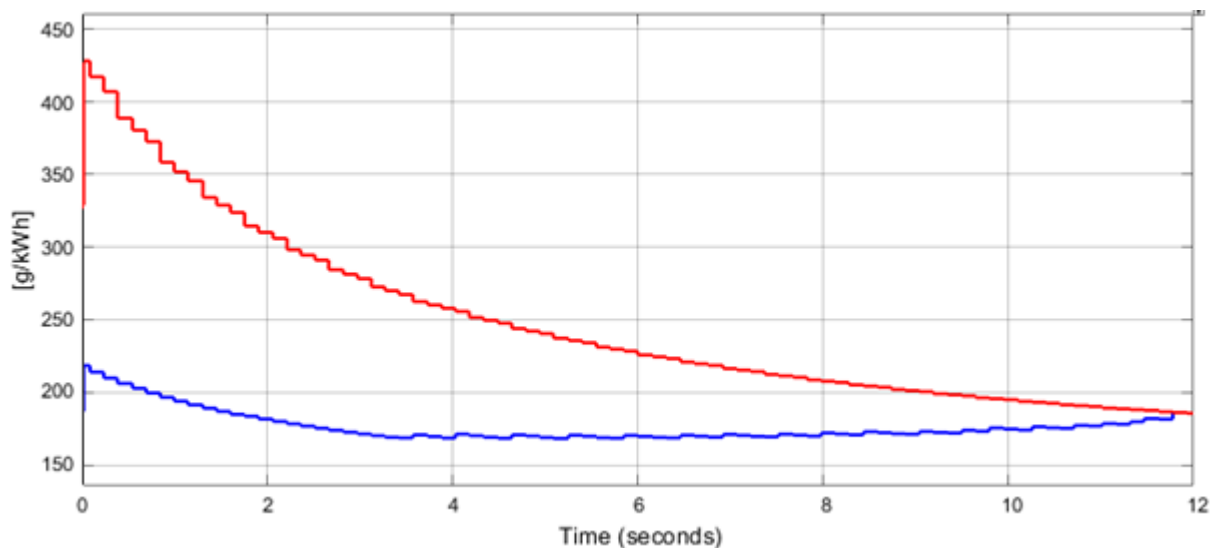


Figura 5.29 Consumo específico por kWh de energía eléctrica demanda operando a velocidad constante (Rojo) y operando a velocidad variable (Azul)

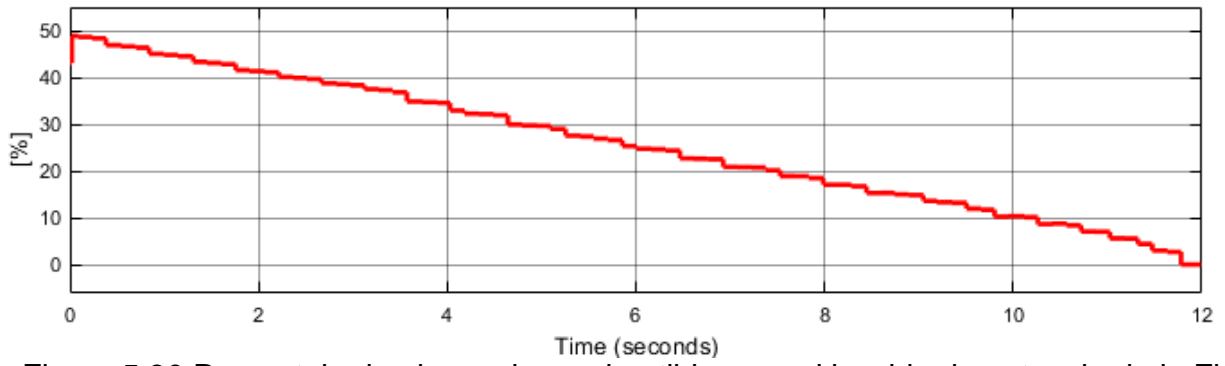


Figura 5.30 Porcentaje de ahorro de combustible para el barrido de potencia de la Figura 5.28.

CONCLUSIONES

1. Se optó por modelar un sistema de 10kW ya que representa de manera efectiva el principio de funcionamiento de un sistema de generación a velocidad variable con parámetros de máquinas para el motor y generador proporcionados por fabricantes, pero la simulación puede ser escalada para sistemas de mayor potencia si se disponen de parámetros de fabricantes o a partir de un diseño propio.
2. A pesar de que en la sección 5.2 se presentan las simulaciones de los subsistemas por separado es necesario tomar en cuenta los rangos de operación de los subsistemas adyacentes para un mejor ajuste de los controles PID de los subsistemas que lo requieran.
3. El control PID de un convertidor DC/DC elevador se estima idealmente para mantener el sobre paso de las señales en un máximo del 110% llegando a sobrepasar dicho límite en una conmutación de carga sin embargo a pesar que el control en el convertidor DC/AC es limitado se logra cumplir que la tensión de línea en la carga no sobrepase en ningún momento el 110% de su valor nominal como se comprueba en la sección 5.3.
4. La principal limitante de operación en el sistema de generación diésel propuesto es la curva de torque máximo que el algoritmo de obtención de velocidad optima toma como referencia para el motor diésel en la sección 4.3.1.
5. Para una carga lineal el THD de voltaje es igual o menor al 5% en estado estable para todos los rangos de carga del sistema como se demuestra en la sección 5.3 con un filtro pasivo con una frecuencia de corte a -3dB de 600Hz.
6. El porcentaje de ahorro de combustible en operación a velocidad variable es del 13.68% operando a 8 kW y 43.43% 3 kW, el porcentaje de ahorro aumenta si se desea suplir cargas menores que la capacidad nominal del motor como se indica en la sección 5.4 por lo que es más factible la implementación del sistema si las horas de operación a carga parcial son significativas respecto a las horas de operación a plena carga.

RECOMENDACIONES

1. Los modelos de sistemas físicos suelen involucrar una gran cantidad de variables por lo que se recomienda tomar en cuenta las variables más significativas según el objetivo del modelado del sistema.
2. Para obtener resultados más precisos con el fin de evaluar la factibilidad para la implementación de un sistema de generación se debe solicitar al fabricante los parámetros de sus sets de generación y no utilizar parámetros de máquinas separadas o parámetros genéricos para un rango de equipos.
3. Para obtener una mejor calidad de señal en los convertidores de potencia mostrados se recomienda subir la frecuencia de conmutación de los dispositivos IGBTs tomando en cuenta los límites de frecuencia y térmicos de los mismos.
4. Para evaluar la factibilidad de implementar un sistema de generación a velocidad variable se debe evaluar el perfil de carga de la instalación ya el consumo de combustible por kWh está en función de la potencia demandada.
5. No se recomienda implementar un sistema de generación a velocidad variable si dicho sistema proporciona potencia cerca de su valor nominal la mayoría del tiempo o se utiliza para arranque directo de motores por las grandes corrientes iniciales que esto implica.

BIBLIOGRAFIA

- [1] T. L. Cesar, «La máquina de vapor (1),» 16 mayo 2017. [En línea]. Available: <https://culturacientifica.com/2017/05/16/la-maquina-vapor-1/>.
- [2] H. Jääskeläinen, «Early History of the Diesel Engine,» 2013. [En línea]. Available: https://www.dieselnet.com/tech/diesel_history.php.
- [3] J. Gutiérrez Chamorro, «Generación eléctrica en plantas DIESEL,» Revista de la asociación de ingenieros del ICAI, julio-agosto 2000. [En línea]. Available: https://www.ica.es/contenidos/publicaciones/anales_get.php?id=928.
- [4] F. S. Caparrini, «Sobre el modelado matemático,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.cs.us.es/~fsancho/?e=49>.
- [5] Universidad Politécnica de Cataluña, «MATLAB fundamentos y/o aplicaciones,» [En línea]. Available: https://ocw.upc.edu/sites/all/modules/ocw/estadistiques/download.php?file=51427/2011/1/54513/tema_5_simulink-5156.pdf.
- [6] Enquest independent power innovation, «Synchronous generator power plants,» [En línea]. Available: <https://www.enquest.com.au/information/synchronous-generator>.
- [7] S. K. E. K. G. Heydt, «A short course on synchronous machines and synchronous condensers,» American Superconductor, Arizona, 2003.
- [8] D. P. R. E. T. P. Alin Grama, «Fuel Consumption Reduction of a Diesel–Electric Power Generator,» *38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, pp. 381-384, 2015.
- [9] Y. H. Z. Chen, «A hybrid generation system using variable speed wind turbines and diesel units,» *29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2729-2734, 2003.
- [10] P. P. M. K. Sami Kanerva, «Dynamic AC concept For variable speed power generation,» ABB group, 2016. [En línea]. Available: https://new.abb.com/docs/librariesprovider91/leaflets-brochures/dynamic_ac_technical_leaflet_2016.pdf?sfvrsn=2.
- [11] K. R. Wheeler, Artist, *Efficient Operation of Diesel Generator Sets in Remote Environments*. [Art]. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2017.
- [12] J. Fenske, «Gasoline vs. Diesel: What's the difference?,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.roadandtrack.com/car-culture/a10350174/gasoline-vs-diesel-whats-the-difference/>.

- [13] J. Alfaro, «1 Ciclos termodinámicos,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.fis.puc.cl/~jalvaro/fis1523/clases/12%20Ciclos.pdf>.
- [14] A. E. Dr. Navarro Frómeta, «Ciclo Diesel,» 2012. [En línea]. Available: http://navarrof.orgfree.com/Docencia/Termodinamica/CiclosGeneracion/ciclo_diesel.htm.
- [15] Nuclear Power, «Comparison of actual and ideal Diesel cycles,» [En línea]. Available: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/thermodynamics/thermodynamic-cycles/diesel-cycle-diesel-engine/actual-and-ideal-diesel-cycle/>.
- [16] J. B. Heywood, Internal combustion engine fundamentals, 1988, New York.
- [17] M. A. B. Y. A. Cengel, Thermodynamics: an engineering approach, vol 4., Boston, 2002.
- [18] O. P. M. G. S. H. S. Roy, «An adaptive control scheme for speed control of Diesel driven power-plants,» *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 6, 1991.
- [19] H. Saadat, Power System Analysis, 1999.
- [20] D. A. G.-L. C. B. Daniel M. Saban, «Test Procedures for High-Speed Multimegawatt Permanent-Magnet Synchronous Machines,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 4, pp. 1769 - 1777, 2010.
- [21] M. N. O. Sadiku, Elementos de electromagnetismo tercera edición, 2003.
- [22] J. C. K. A. E. F. S. D. U. Charles Kingsley, Electric machinery, 2003.
- [23] E. M. Committee, Artist, *IEEE 1110-2002 - IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses*. [Art]. IEEE, 2003.
- [24] Mathworks, «Getting Started with Simscape Electrical,» [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/help/phymod/sps/getting-started-with-simpowersystems.html>.
- [25] U. T. M. R. W. P. Mohan Ned, Power Electronics, 1989.
- [26] M. H. Rashid, Power Electronics: Circuits, Devices and Applications, 1988.
- [27] L. García Franquelo, «Electronics Engineering Department, TEMA 17. CONVERTIDORES CC/CA CON SALIDA,» University of Seville. [En línea].
- [28] D. W. Hart, Electronica de potencia, Madrid: Pearson educación S.A., 2001.
- [29] J. Fernandez Hernandez, «Calculo simplificado del valor medio y eficaz de una forma de onda,» 2007. [En línea]. Available:

<http://www.tecnicaindustrial.es/TIFrontal/a-486-calculo-simplificado-medio-eficaz-forma-onda.aspx>.

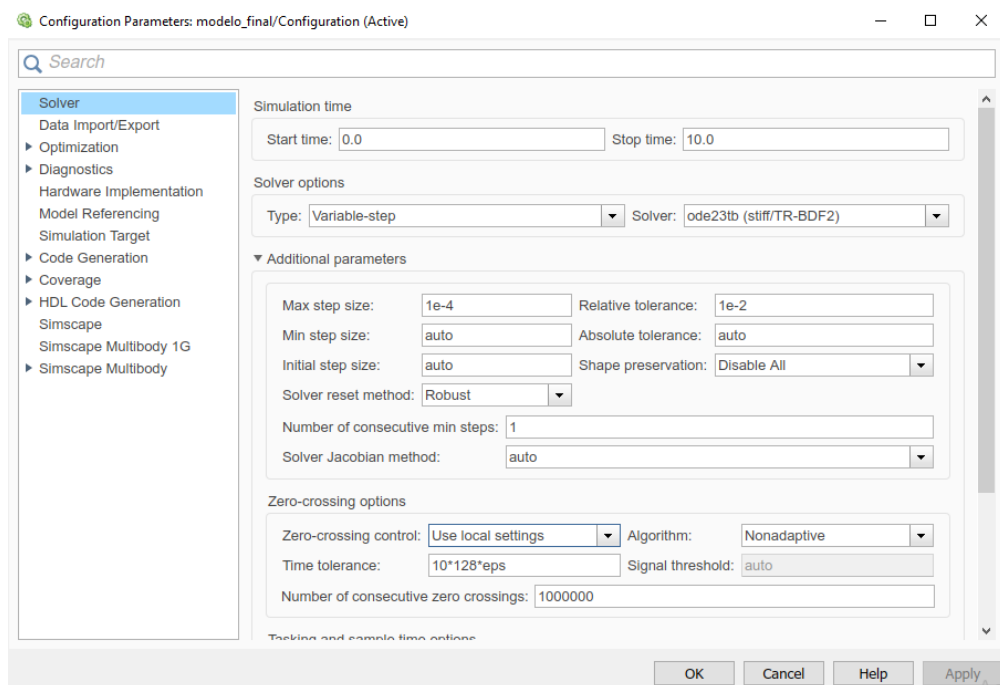
- [30] J. Díaz González, Artist, *Inversores PWM*. [Art]. Universidad de Oviedo, 1999.
- [31] C. M. G. A. D. C. J. O. G. L. C. A. López Mesa Diana Jimena, Artist, *MODULACIÓN PWM APLICADA A INVERSORES TRIFÁSICOS DENTRO DEL ESQUEMA DE ACCIONAMIENTOS ELÉCTRICOS AC*. [Art]. Universidad del Cauca, 2007.
- [32] KUBOTA corporation, «Diesel Parts,» marzo 2013. [En línea]. Available: https://dieselparts.com.au/wp-content/uploads/2013/03/Super-Mini-Series_Z482_Z602_D722_D902.pdf.
- [33] B. Hauke, «Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage,» Texas Instruments, november 2009. [En línea]. Available: <http://www.ti.com/lit/an/slva372c/slva372c.pdf>.
- [34] S. i. generators, Artist, *PI144D - Winding 311 Technical Data Sheet*. [Art]. Stamford industrial generators, 2010.
- [35] Z. Fan, Artist, *Mathematical Modelling of Grid Connected Fixed-Pitch Variable-Speed Permanent Magnet Synchronous Generators for Wind Turbines*. [Art]. University of Central Lancashire, 2012.

ANEXOS

A. PARÁMETROS EN MATLAB PARA LA SIMULACIÓN.

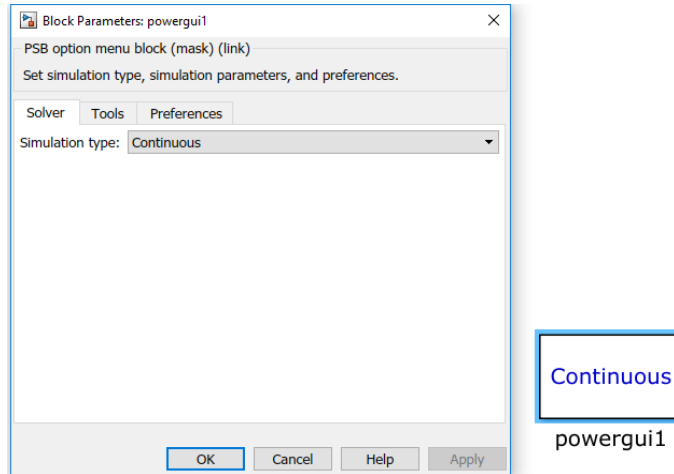
Simulink de Matlab cuenta con varios métodos para resolver las ecuaciones implícitas en los modelos que se implementan en la simulación, estos métodos pueden ser de tiempo continuo o discreto.

Para garantizar buenos resultados del modelo implementado en este trabajo de graduación se recomienda utilizar los siguientes parámetros del solucionador de ecuaciones:



Parámetros recomendados relacionados con el solucionador de MATLAB.

Debido a que se ha utilizado la librería SIMSCAPE es necesario que en la simulación se incluya el bloque POWERGUI, este se describe con detalle en el anexo B.



Muestra del bloque POWERGUI de Simulink y su configuración en tiempo continuo.

B. DESCRIPCIÓN DE BLOQUES UTILIZADOS EN SIMULINK.

Se han utilizado algunos bloques de la librería SIMSCAPE y la librería general de simulink que se detallan a continuación [35]:

POWERGUI:



El bloque powergui le permite elegir uno de estos métodos para resolver su circuito:

- Continuo, que usa un solucionador de paso variable de Simulink.
- Discretización del sistema eléctrico para una solución en pasos de tiempo fijos.
- Solución de fasores.

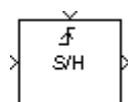
El bloque powergui también abre herramientas para el análisis de resultados de simulación y estado estable y para el diseño avanzado de parámetros.

Se necesita el bloque powergui para simular cualquier modelo de Simulink que contenga bloques de sistemas de energía especializados Simscape Electrical, almacena el circuito Simulink equivalente que representa las ecuaciones de estado-espacio del modelo.

Cuando se usa un bloque powergui en un modelo:

- Coloque el bloque powergui en el diagrama de nivel superior para un rendimiento óptimo.
- Asegúrate de que el bloque use el nombre powergui.

SAMPLE AND HOLD



El bloque Sample and Hold adquiere la entrada en el puerto de señal cada vez que recibe un evento de disparo en el puerto del disparador (marcado por \uparrow). El bloque mantiene la salida en el valor de entrada adquirido hasta que se produce el siguiente evento de activación.

La entrada de disparo debe ser un escalon basado en muestras con una frecuencia de muestreo igual a la velocidad de cuadro de entrada en el puerto de señal. Se especifica el evento desencadenante usando el parámetro de tipo Trigger:

- Rising edge dispara el bloque para adquirir la entrada de señal cuando la entrada del disparador sube de un valor negativo o cero a un valor positivo.
- Falling edge activa el bloque para que adquiera la señal de entrada cuando la entrada del disparador cae desde un valor positivo o cero a un valor negativo.
- Either edge activa el bloque para que adquiera la señal de entrada cuando la entrada del disparador sube desde un valor negativo o cero a un valor positivo o cae desde un valor positivo o cero a un valor negativo.

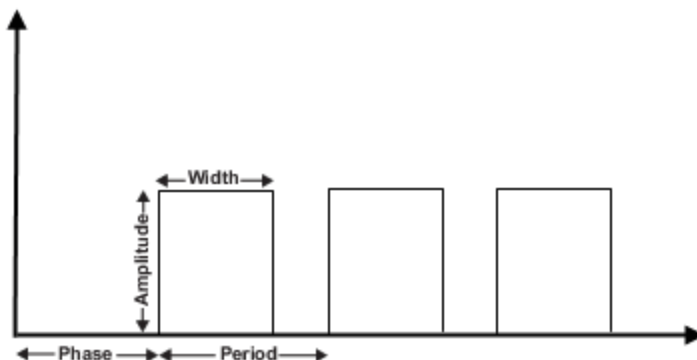
Usted especifica la salida del bloque antes del primer evento desencadenante usando el parámetro de condición inicial. Cuando la entrada adquirida es una matriz M-by-N, la condición inicial puede ser una matriz M-by-N, o un escalar que se repetirá en todos los elementos de la matriz. Cuando la entrada es un vector desorientado de longitud M, la condición inicial puede ser un vector de fila M de columna o longitud, o un escalar que se repetirá en todos los elementos del vector.

Si selecciona la casilla de verificación de entrada de Latch (buffer), el bloque genera el valor de la entrada desde el paso de tiempo anterior hasta que se produce el siguiente evento de activación. Para usar este bloque en un bucle, seleccione esta casilla de verificación.

GENERADOR DE PULSOS



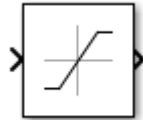
El bloque Generador de pulsos genera pulsos de onda cuadrada a intervalos regulares. Los parámetros de forma de onda de bloque, amplitud, ancho de pulso, período y retardo de fase determinan la forma de la forma de onda de salida. El siguiente diagrama muestra cómo cada parámetro afecta la forma de onda.



El bloque generador de pulsos puede emitir señales escalares, vectoriales o matrices de cualquier tipo de datos reales. Para hacer que el bloque emita una señal escalar, use escalares para especificar los parámetros de forma de onda. Para hacer que el bloque emita un vector o una señal de matriz, use vectores o matrices, respectivamente, para especificar los parámetros de forma de onda. Cada elemento de los parámetros de forma de onda afecta al elemento correspondiente de la señal de salida. Por ejemplo, el primer elemento de un parámetro de amplitud vectorial determina la amplitud del primer elemento de un impulso de salida vectorial. Todos los parámetros de forma de onda deben tener las mismas dimensiones después de la expansión escalar. El tipo de datos de la salida es el mismo que el tipo de datos del parámetro Amplitud.

Esta salida de bloque se puede generar en modos basados en tiempo o basados en muestras, determinados por el parámetro de tipo de pulso.

Saturación



El bloque Saturación produce una señal de salida que es el valor de la señal de entrada limitada a los valores de saturación superior e inferior. Los límites superior e inferior se especifican mediante los parámetros Límite superior y Límite inferior.

Entrada	Salida
$\text{Límite inferior} \leq \text{Valor de entrada} \leq \text{Límite superior}$	Valor de entrada
$\text{Valor de entrada} < \text{Límite inferior}$	Límite inferior
$\text{Valor de entrada} > \text{Límite superior}$	Límite superior

Bloque de control PID



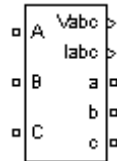
El bloque del controlador PID implementa un controlador PID (PID, PI, PD, P solamente o I solo). El bloque es idéntico al bloque Discrete PID Controller con el parámetro de **dominio de tiempo** configurado en Continuous-time.

La salida de bloque es una suma ponderada de la señal de entrada, la integral de la señal de entrada y la derivada de la señal de entrada. Los pesos son los parámetros de ganancia proporcional, integral y derivado. Un polo de primer orden filtra la acción derivada.

El bloque admite varios tipos y estructuras de controladores. Las opciones configurables en el bloque incluyen:

- Tipo de controlador (solo PID, PI, PD, P o I solo): consulte el parámetro Controlador.
- Forma del controlador (Paralelo o Ideal) - Ver el parámetro Forma.
- Dominio de tiempo (continuo o discreto) - Ver el parámetro de dominio de tiempo.
- Condiciones iniciales y desencadenador de reinicio: consulte los parámetros de restablecimiento de origen y externo.
- Límites de saturación de salida y mecanismo antiarranque incorporado: consulte el parámetro Límite de salida.

Medición de tensión y corriente trifásicas



El bloque de medición trifásico V-I se utiliza para medir voltajes y corrientes trifásicas instantáneas en un circuito. Cuando se conecta en serie con elementos trifásicos, devuelve los voltajes y corrientes pico de fase a tierra o de fase a fase.

El bloque puede emitir los voltajes y las corrientes en valores de unidad (pu) o en voltios y amperios.

Si elige medir voltajes de fase a tierra por unidad, el bloque convierte los voltajes medidos en función del valor pico de la tensión nominal de fase a tierra.

Los fasores de voltaje y corriente de estado estacionario medidos por el bloque de medición V-I trifásico se pueden obtener del bloque Powergui seleccionando Voltajes e intensidades de estado estable. Las magnitudes fasoriales que se muestran en el Powergui permanecen en valores máximos o RMS incluso si las señales de salida se convierten en pu.

Entradas y salidas

Vabc:

Los tres voltajes medidos fase a tierra o fase a fase. La salida de Vabc desaparece cuando se selecciona el parámetro Utilizar una etiqueta o cuando el menú de medición de Voltaje se establece en no.

Iabc:

Las tres corrientes de línea medidas. La salida Iabc desaparece cuando se selecciona el parámetro Usar etiqueta o cuando el menú Medición actual se establece en no.

Generador PWM (DC-DC)



El bloque PWM Generator (DC-DC) emite un pulso para disparar el interruptor MOSFET, GTO o IGBT de un convertidor de un cuadrante (buck o boost). El ciclo de trabajo del generador se especifica mediante la entrada *D*. Un valor entre 0 y 1 determina el porcentaje del período de impulso en el que se encuentra la salida.

Frecuencia de conmutación (Hz):

Especifique la frecuencia de conmutación F_{sw} del generador, en hercios. La frecuencia de conmutación es la frecuencia de la señal de diente de sierra interna utilizada para generar el pulso. Por defecto es 5000.

Tiempo de muestra

Especifique el tiempo de muestra del bloque, en segundos. Establézcalo en 0 para implementar un bloque continuo. Por defecto es 0.

D, El ciclo de trabajo del generador. Especifique una señal con un valor entre 0 y 1.

P, Envía el pulso.

Tiempo de muestra	Especificado en el parámetro Tiempo de muestra Continuo si Tiempo de muestra = 0
Expansión escalar	No
Dimensionado	No

Generador de señal PWM de dos niveles.



El bloque Generador PWM (2 niveles) genera impulsos para convertidores de modulación de ancho de pulsos (PWM) basados en portadora que utilizan topología de dos niveles. El bloque puede controlar dispositivos de conmutación (FET, GTO o IGBT) de tres tipos diferentes de convertidor: medio puente monofásico (1 brazo), puente completo monofásico (2 brazos) o puente trifásico (3 brazos).

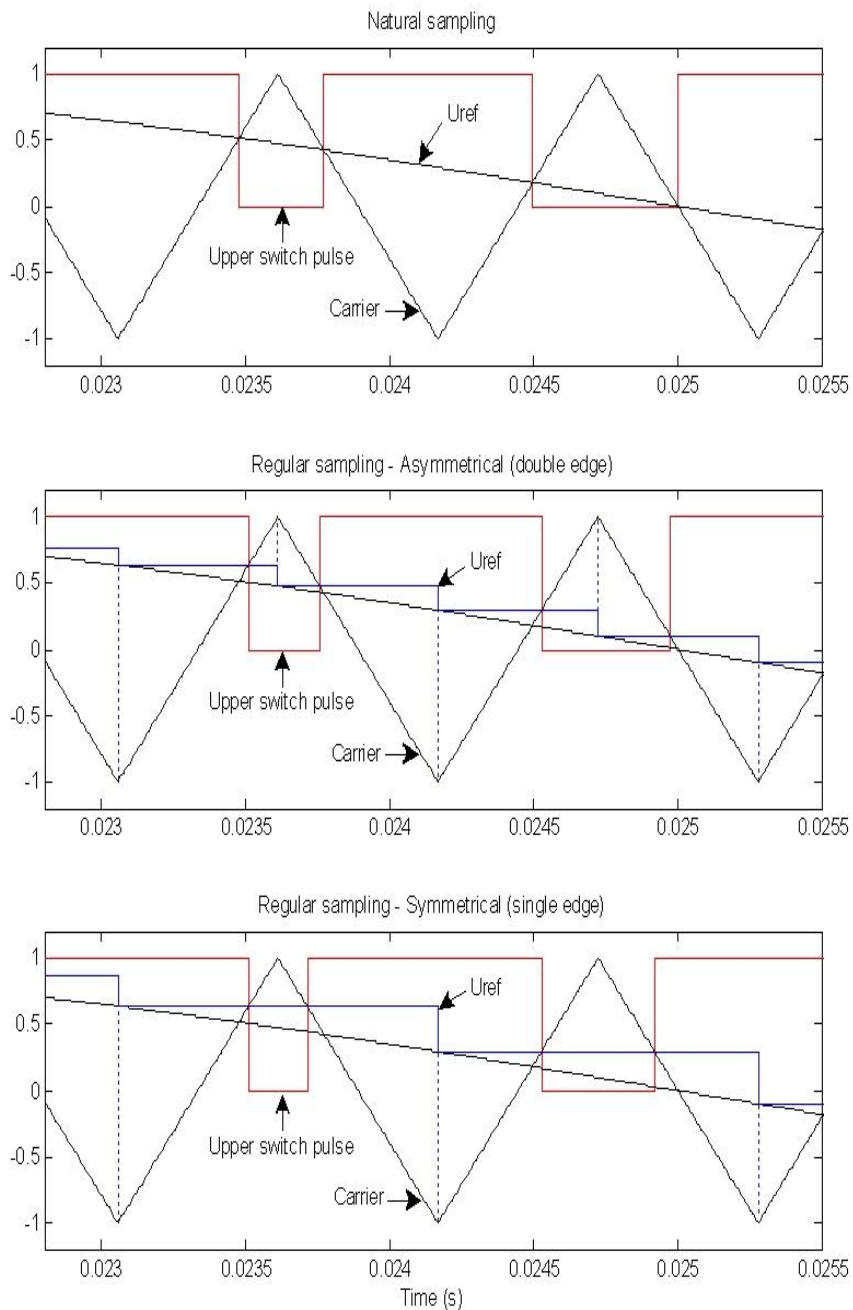
La señal de referencia (entrada de *Uref*), también llamada señal de modulación, se compara con un portador de triángulo simétrico. Cuando la señal de referencia es mayor que la portadora, el pulso para el dispositivo de conmutación superior es alto (1), y el pulso para el dispositivo inferior es bajo (0).

Para controlar un dispositivo de puente completo monofásico, puede seleccionar la modulación PWM unipolar o bipolar. Usando la modulación unipolar, cada brazo se controla de forma independiente. Una segunda señal de referencia se genera internamente mediante el desplazamiento de fase de la señal de referencia original en 180 grados. Usando la modulación bipolar, el estado del dispositivo de conmutación inferior del segundo brazo es el mismo que el del interruptor superior del primer brazo, y el estado

del interruptor superior del segundo brazo es el mismo que el estado del interruptor inferior del primer brazo. La modulación unipolar produce una forma de onda de CA de mejor calidad, pero la modulación bipolar produce una tensión de modo común de muy baja variación.

La figura describe las tres técnicas para muestrear la señal de referencia U_{ref} . La técnica de muestreo natural modela el comportamiento de una implementación analógica de un generador de PWM. Usando las dos técnicas de muestreo regulares, U_{ref} puede muestrearse dos veces tanto en el valle como en el pico del portador o solo una vez en el valle del portador. El primero se conoce como muestreo asimétrico o técnica de doble filo. Este último se llama muestreo simétrico o técnica de un solo borde.

Técnicas de muestreo de señal de referencia



Parámetros.

Tipo de generador.

Especifique la cantidad de pulsos para generar. La cantidad de pulsos generados por el bloque es proporcional a la cantidad de brazos de puente que se deben disparar.

Seleccione Single-phase half-bridge (2 pulsos) para disparar los dispositivos autoconmutados de un convertidor de medio puente monofásico. El pulso 1 dispara el dispositivo superior, y el pulso 2 dispara el dispositivo inferior.

Seleccione Single-phase full-bridge (4 pulsos) para disparar los dispositivos autoconmutados de un convertidor monofásico de puente completo. Luego se generan cuatro pulsos. Los pulsos 1 y 3 disparan los dispositivos superiores del primer y segundo brazo. Los pulsos 2 y 4 disparan los dispositivos inferiores.

Seleccione Single-phase full-bridge - Bipolar modulation (4 pulsos) para disparar los dispositivos autoconmutados de un convertidor monofásico de puente completo. Luego se generan cuatro pulsos. Los pulsos 1 y 3 disparan los dispositivos superiores del primer y segundo brazo. Los pulsos 2 y 4 disparan los dispositivos inferiores. Los pulsos 1 y 4 son idénticos. Los pulsos 2 y 3 son idénticos.

Seleccione Three-phase bridge (6 pulsos) (predeterminado) para disparar los dispositivos autoconmutados de un convertidor de puente trifásico. Los pulsos 1, 3 y 5 disparan los dispositivos superiores del primer, segundo y tercer brazo. Los pulsos 2, 4 y 6 disparan los dispositivos inferiores.

Operador: modo de operación

Cuando se establece en Unsynchronized (predeterminado), la frecuencia de la señal portadora no sincronizada se determina mediante el parámetro Frecuencia.

Cuando se establece en Synchronized, la señal portadora se sincroniza con una señal de referencia externa (entrada wt) y la frecuencia portadora se determina mediante el parámetro de relación de conmutación.

Portador: Frecuencia (Hz)

Especifique la frecuencia, en hertz, de la señal de portadora triangular. Por defecto es 27×60 . Este parámetro está disponible solo si el parámetro Modo de operación está configurado en Unsynchronized.

Operador: fase inicial (grados)

Especifique la fase inicial de la portadora, en grados. Por defecto es 90. Un valor de 90 grados significa que la posición inicial del transportador triangular se establece en el punto medio entre su valor mínimo y máximo y la pendiente es positiva.

Este parámetro está disponible solo si el parámetro Modo de operación está configurado en Unsynchronized.

Portadora: valores mínimos y máximos

Especifique los valores mínimos (valle) y máximo (pico) de la señal de portadora triangular. Por defecto es [-1 1].

Relación de conmutación (frecuencia portadora / frecuencia de salida)

Especifique la frecuencia (F_c) de la señal de portadora triangular.

$$F_c = \text{SwitchingRuntio} \times \text{OutputVoltage} \times \text{Frequency}$$

Por defecto es 27. Este parámetro está disponible solo si el parámetro Modo de operación está configurado en Synchronized.

Señal de referencia: técnica de muestreo

Especifique cómo se muestrea la señal de referencia: Natural (predeterminado), Regular Asymmetrical (double edge) o Regular Symmetrical (single edge).

Si selecciona una técnica de muestreo regular, el parámetro de tiempo de la muestra debe ser un submúltiplo entero del período de muestreo. El período de muestreo es igual a $1 / \text{Carrier Frequency} / 2$ para muestreo asimétrico y a $1 / \text{Carrier Frequency}$ para muestreo simétrico.

Señal de referencia: generación interna de señal de referencia

Cuando se selecciona, la señal de referencia es generada por el bloque. El valor predeterminado está despejado.

Cuando no se selecciona, las señales de referencia externas se utilizan para la generación de impulsos.

Este parámetro está disponible solo si el parámetro Modo de operación está configurado en Unsynchronized.

Señal de referencia: índice de modulación

Especifique el índice de modulación para controlar la amplitud del componente fundamental de la tensión de salida del convertidor. El índice de modulación debe ser mayor 0o menor que o igual a 1. Por defecto es 0.8. Este parámetro está disponible solo cuando se selecciona la generación interna del parámetro de señal de referencia.

Señal de referencia: frecuencia (Hz)

Especifique la frecuencia de tensión de salida utilizada para controlar la frecuencia del componente fundamental de la tensión de salida del convertidor. Por defecto es 60. Este parámetro está disponible solo cuando se selecciona la generación interna del parámetro de señales modulantes.

Señal de referencia: Fase (grados)

Especifique este parámetro para controlar la fase del componente fundamental de la tensión de salida del convertidor. Por defecto es 0. Este parámetro está disponible solo cuando se selecciona la generación interna del parámetro de señales modulantes.

Tiempo de muestra

Especifique el tiempo de muestra del bloque, en segundos. Configurado para 0 implementar un bloque continuo. Por defecto es 0. Si selecciona una técnica de muestreo regular, el parámetro de tiempo de la muestra debe ser un submúltiplo entero del período de muestreo. El período de muestreo es igual a $1 / \text{Carrier Frequency} / 2$ para muestreo asimétrico y a $1 / \text{Carrier Frequency}$ para muestreo simétrico.

Entradas y salidas

Uref: La señal de referencia vectorizada utilizada para generar los pulsos de salida. La entrada es visible solo cuando la generación interna de señal (es) de modulación no está seleccionada. Conecte esta entrada a una señal sinusoidal monofásica cuando el bloque se utiliza para controlar un convertidor monofásico de puente medio o completo, o a una señal sinusoidal trifásica cuando el bloque generador PWM está controlando un convertidor puente trifásico. Para el funcionamiento lineal de este bloque, la magnitud de Uref debe estar entre -1 y +1.

wt: La señal de referencia externa utilizada para sincronizar la portadora. Este puerto de entrada Simulink no está presente cuando El modo de operación de la portadora está configurado en Unsynchronized.

P: La salida contiene las dos, cuatro o seis señales de pulso usadas para disparar los dispositivos autoconmutados (MOSFET, GTO o IGBT) de un convertidor de uno, dos o tres brazos.

m: La salida de medición que devuelve la señal de portadora utilizada para determinar los impulsos de salida y la señal de referencia muestreada. Este puerto está presente solo cuando se selecciona

UNIVERSAL BRIDGE

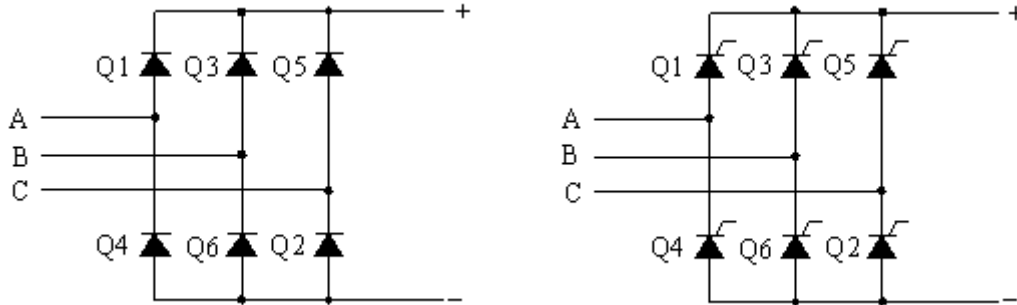


El bloque Universal Bridge implementa un convertidor de potencia trifásico universal que consta de hasta seis interruptores de potencia conectados en una configuración de puente. El tipo de interruptor de alimentación y la configuración del convertidor se pueden seleccionar desde el cuadro de diálogo.

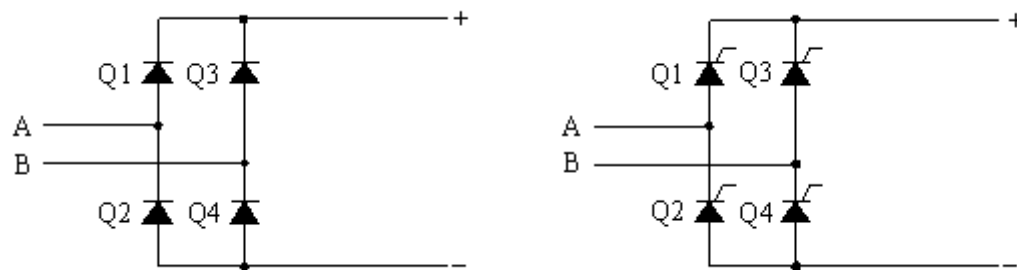
El bloque Universal Bridge permite la simulación de conversores que utilizan dispositivos electrónicos de potencia conmutados naturalmente (o conmutados por línea) (diodos o tiristores) y dispositivos de conmutación forzada (GTO, IGBT, MOSFET).

El bloque Universal Bridge es el bloque básico para construir convertidores de fuente de voltaje de dos niveles (VSC).

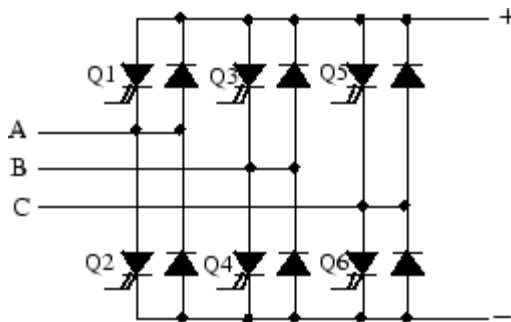
La numeración del dispositivo es diferente si los dispositivos electrónicos de potencia se conmutan naturalmente o se conmutan forzosamente. Para un convertidor trifásico con conmutación natural (diodo y tiristor), la numeración sigue el orden natural de conmutación:



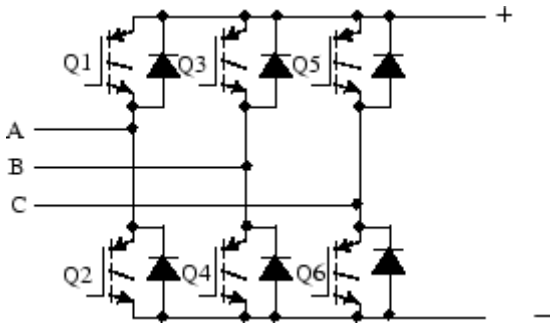
Para el caso de un puente de diodos o tiristores de dos fases y para cualquier otra configuración de puente, el orden de conmutación es el siguiente:



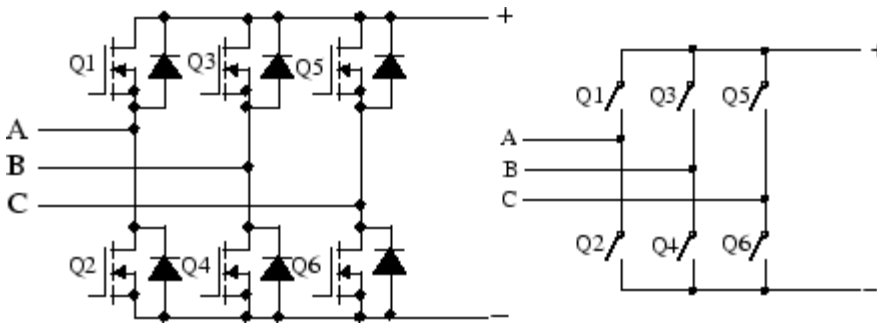
Puente GTO-Diodo:



Puente IGBT-Diodo:



Puentes de diodo MOSFET y puente ideal:



Parámetros:

Número de brazos de puente

Establecer en 1 o 2 para obtener un convertidor monofásico (dos o cuatro dispositivos de conmutación). Configure 3 para obtener un convertidor trifásico conectado en la configuración del puente Graetz (seis dispositivos de conmutación). Por defecto es 3.

Amortiguación resistencia R_s

La resistencia del amortiguador, en ohmios (Ω). Por defecto es $1e5$. Ajuste Inf para eliminar este parámetro del modelo

Capacitancia de amortiguamiento C_s

La capacitancia de amortiguamiento, en faradios (F). Por defecto es inf.

Cuando está utilizando el solucionador continuo, puede eliminar los amortiguadores en todos los dispositivos electrónicos de potencia si selecciona la opción Desactivar los amortiguadores en los dispositivos de conmutación en la pestaña Preferencias del bloque Powergui.

Cuando su sistema está discretizado, puede simular dispositivos electrónicos de potencia virtualmente sin amortiguadores al especificar amortiguadores puramente resistivos con una resistencia muy grande, produciendo corrientes de fuga insignificantes. El puente funciona satisfactoriamente con amortiguadores puramente resistivos.

Dispositivo electrónico de potencia

Seleccione el tipo de dispositivo electrónico de potencia para usar en el puente. Por defecto es Thyristors.

Cuando se selecciona Switching-function based VSC, se usa un modelo equivalente de tipo convertidor de fuente de voltaje de conmutación, donde los interruptores se reemplazan por dos fuentes de voltaje en el lado de CA y una fuente de corriente en el lado de CC. Este modelo usa los mismos impulsos de disparo que para otros dispositivos electrónicos de potencia y representa correctamente los armónicos generados normalmente por el puente.

Cuando se selecciona Average-model based VSC, se usa un tipo de convertidor de fuente de voltaje de modelo promedio para representar los interruptores de encendido electrónico. A diferencia de otros dispositivos electrónicos de potencia, este modelo usa las señales de referencia (u_{ref}) que representan los voltajes promedio generados en los terminales ABC del puente. Este modelo no representa armónicos. Se puede usar con tiempos de muestra más grandes a la vez que se preserva la dinámica de voltaje promedio.

Ron

Resistencia interna del dispositivo seleccionado, en ohmios (Ω). Por defecto es 1e-3.

Lon

Inductancia interna, en Henrios (H), para el diodo o el dispositivo tiristor. Por defecto es 0. Cuando el puente está discretizado, el parámetro Lon debe establecerse en cero.

Voltaje directo Vf

Este parámetro está disponible solo cuando el dispositivo electrónico de potencia seleccionado es Thyristors-Diodes.

Voltaje hacia adelante, en voltios (V), a través del dispositivo cuando está conduciendo. Por defecto es 0.

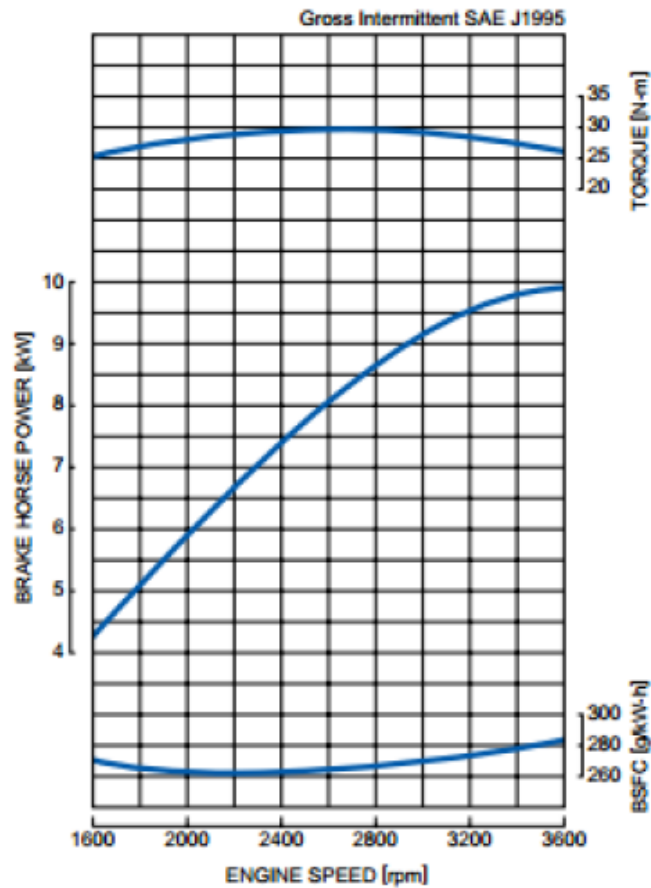
Voltajes directos [Dispositivo Vf, Diodo Vfd]

Este parámetro está disponible cuando el Power device seleccionado es GTO/IGBT-Diodes/Diodes.

Voltajes directos, en voltios (V), de los dispositivos de conmutación forzada (GTO, MOSFET o IGBT) y de los diodos antiparalelos. Por defecto es [0 0].

C. MINIMOS CUADRADOS PARA TORQUE MAXIMO Y TABLA DE CONSUMOS DEL MOTOR DIÉSEL.

A partir de los valores de torque máximo de la gráfica de especificación del motor Diésel Kubota z482 se realiza el análisis de mínimos cuadrados para determinar la relación de torque máximo con respecto a la velocidad angular.



n	velocidad angular (X)	Torque (Y)	X ²	XY	X ³	X ² Y	X ⁴
1	1600	25	2560000	40000	4096000000	64000000	6.5536E+12
2	2600	30	6760000	78000	17576000000	202800000	4.56976E+13
3	3600	26	12960000	93600	46656000000	336960000	1.67962E+14
4	3400	27	11560000	91800	39304000000	312120000	1.33634E+14
Σ	11200	108	33840000	303400	1.07632E+11	915880000	3.53846E+14

Utilizando las ecuaciones de mínimos cuadrados:

$$\Sigma y = n * a_0 + \Sigma x * a_1 + \Sigma x^2 a_2$$

$$\Sigma xy = \Sigma x * a_0 + \Sigma x^2 * a_1 + \Sigma x^3 a_2$$

$$\Sigma x^2 y = \Sigma x^2 * a_0 + \Sigma x^3 * a_1 + \Sigma x^4 a_2$$

Da como resultado:

$$T_{max} = a_0 + a_1 * N + a_2 * N^2$$

$$T_{max} = 6.96 + 0.016612 * N - 3.13 * 10^{-6} * N^2$$

El resultado de cálculo de combustible para el motor Diésel modelado se muestra a continuación:

	Torque [Nm]																																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30					
1600	1290	706.4	511.9	414.7	356.3	317.4	289.7	268.8	252.6	239.7	229.1	220.2	212.7	206.3	200.8	195.9	191.6	187.8	184.4	181.3	178.6	176	173.7	171.6	169.7										
1700	1314	718.3	519.8	420.6	361.1	321.4	293.1	271.8	255.3	242	231.2	222.2	214.6	208	202.4	197.4	193	189.1	185.7	182.5	179.7	177.1	174.8	172.6	170.6	168.8									
1800	1337	730.2	527.8	426.6	365.9	325.4	296.5	274.8	257.9	244.4	233.4	224.2	216.4	209.7	203.9	198.6	194.4	190.5	186.9	183.7	180.8	178.2	175.8	173.6	171.6	169.7	168								
1900	1361	742.1	535.7	432.5	370.6	329.4	299.9	277.8	260.6	246.8	235.6	226.2	218.2	211.4	205.5	200.4	195.8	191.8	188.2	184.9	182	179.3	176.8	174.6	172.5	170.6	168.8								
2000	1385	754	543.7	438.5	375.4	333.3	303.3	280.7	263.2	249.2	237.7	228.2	220.1	213.1	207.1	201.9	197.2	193.1	189.4	186.1	183.1	180.4	177.9	175.6	173.5	171.5	169.7	168.1							
2100	1409	765.9	551.6	444.5	380.2	337.3	306.7	283.7	265.9	251.6	239.9	230.1	221.9	214.8	208.7	203.4	198.6	194.4	190.7	187.3	184.2	181.4	178.9	176.6	174.4	172.4	170.6	168.9							
2200	1433	777.9	559.6	450.4	385	341.3	310.1	286.7	268.5	254	242.1	232.1	223.7	216.5	210.3	204.9	200	195.8	191.9	188.5	185.4	182.5	179.9	177.6	175.4	173.4	171.5	169.8							
2300	1457	789.8	567.6	456.4	389.7	345.3	313.5	289.7	271.2	256.4	244.2	234.1	225.6	218.3	211.9	206.3	201.4	197.1	193.2	189.7	186.5	183.6	181	178.6	176.3	174.3	172.4	170.6	169						
2400	1481	801.8	575.5	462.4	394.5	349.3	316.9	292.7	273.8	258.8	246.4	236.1	227.4	220	213.5	207.8	202.9	198.4	194.4	190.9	187.6	184.7	182	179.6	177.3	175.2	173.3	171.5	169.8						
2500	1505	813.8	583.5	468.4	399.3	353.3	320.4	295.7	276.5	261.1	248.6	238.1	229.3	221.7	215.1	209.3	204.3	199.7	195.7	192.1	188.6	185.8	183.1	180.6	178.3	176.1	174.2	172.3	170.6						
2600	1529	825.8	591.5	474.4	404.1	357.2	323.8	298.7	279.2	263.5	250.5	240.1	231.1	223.4	216.7	210.8	205.7	201.1	197	193.3	189.9	186.9	184.1	181.6	179.2	177.1	175	173.2	171.5	169.8					
2700	1553	837.8	599.5	480.4	408.9	361.2	327.2	301.7	281.8	265.9	252.9	242.1	233	225.1	218.3	212.3	207.1	202.4	198.2	194.5	191.1	188	185.1	182.6	180.2	178	175.9	174	172.3	170.6					
2800	1577	849.8	607.5	486.4	413.7	365.2	330.6	304.7	284.5	268.5	255.1	244.1	234.8	226.8	219.9	213.8	208.5	203.7	199.5	195.7	192.2	189.1	186.2	183.6	181.1	178.9	176.8	174.9	173.1						
2900	1601	861.8	615.5	492.4	418.5	369.2	334.1	307.7	287.2	270.7	257.3	246.1	236.6	228.5	221.5	215.3	209.9	205.1	200.8	196.9	193.3	190.2	187.2	184.6	182.1	179.8	177.7	175.8	173.9						
3000	1625	873.8	623.5	498.4	423.3	373.3	337.5	310.7	289.8	273.1	259.5	248.1	238.5	230.2	223.1	216.8	211.3	206.4	202	198.1	194.5	191.2	188.3	185.6	183	180.7	178.6	176.6	174.8						
3100	1649	885.8	631.5	504.4	428.1	377.3	340.9	313.7	292.5	275.6	261.7	250.1	240.3	232	224.7	218.3	212.7	207.7	203.3	199.3	195.6	192.3	189.3	186.6	184	181.7	179.5	177.5							
3200	1673	897.8	639.6	510.4	432.9	381.3	344.4	316.7	295.2	278	263.9	252.1	242.2	233.7	226.3	219.8	214.2	209.1	204.6	200.5	196.8	193.4	190.4	187.6	185	182.6	180.4	178.3							
3300	1697	909.9	647.6	516.4	437.8	385.3	347.8	319.7	297.9	280.4	266.1	254.1	244.1	235.4	227.9	221.4	215.6	210.4	205.8	201.7	197.9	194.5	191.4	188.6	185.9	183.5	181.3	179.2							
3400	1721	921.9	655.6	522.5	442.6	389.3	351.3	322.7	300.5	282.8	268.3	256.2	245.9	237.1	229.5	222.9	217	211.8	207.1	202.9	199.1	195.6	192.5	189.6	186.9	184.4	182.2								
3500	1745	934	663.7	528.5	447.4	393.3	354.7	325.7	303.2	285.2	270.4	258.2	247.8	238.9	231.1	224.4	218.4	213.1	208.4	204.1	200.2	196.7	193.5	190.6	187.9	185.4	183.1								
3600	1769	946.1	671.7	534.5	452.2	397.4	358.2	328.8	305.9	287.6	272.6	260.2	249.6	240.6	232.7	225.9	219.8	214.4	209.6	205.3	201.4	197.8	194.6	191.6	188.8	186.3									

D. TEOREMA DE FORTESCUE.

El teorema de Fortescue o teorema de los componentes simétricas es uno de los teoremas más importantes en la ingeniería eléctrica. Se utiliza para simplificar el análisis de los sistemas de energía trifásicos desequilibrados, pues permite escribir de forma general un sistema polifásico desbalanceado (con n fases) como la suma de n sistemas equilibrados aplicando el principio de superposición. Siempre y cuando las corrientes y tensiones del sistema se relacionen con impedancias lineales de otro modo el principio de superposición no es aplicable.

Físicamente, en un sistema trifásico, unos conjuntos de corrientes positivas producen un campo rotatorio normal, un conjunto de corrientes negativas producen un campo con rotación opuesta y la secuencia cero produce un campo que oscila, pero no gira. Desde que estos efectos pueden ser detectados físicamente, la herramienta matemática llegó a ser la base para el diseño de relevadores de protección, los cuales usan voltaje y corrientes de secuencia negativa como un indicador confiable de condiciones de falla. Dichos relevadores deben ser usados para activar los disyuntores o interruptores automáticos o seguir otros pasos para proteger sistemas eléctricos. La técnica analítica fue adoptada y mejorada por ingenieros de General Electric y Westinghouse y después de la Segunda Guerra Mundial, el método fue aceptado para el análisis de sistemas asimétricos.

Este teorema es usado de forma intensiva en el análisis de fallas en sistemas de potencia trifásicos y en el análisis de máquinas eléctricas trifásicas bajo condiciones no equilibradas.

El teorema de Fortescue establece que si se tiene un sistema trifásico cualquiera donde sus componentes simples sean I_a , I_b e I_c el sistema se puede representar de la siguiente manera así:

$$I_a = I_a^0 + I_a^+ + I_a^-$$

$$I_b = I_b^0 + I_b^+ + I_b^-$$

$$I_c = I_c^0 + I_c^+ + I_c^-$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^+ \\ I_a^- \end{bmatrix}$$

Donde I_a , I_b e I_c representan el sistema desequilibrado que se quiere representar como uno equilibrado, I_a^+ se denomina sistema de secuencia positiva o directa, I_a^- sistema de secuencia negativo inversa e I_a^0 sistema de secuencia cero o homopolar. El operador a representa el desfase 120° . Su valor es $a = -\frac{1}{2} + j\sqrt{3}/2$. Aunque el signo de este desfase será diferente en función de si operamos con senos o cosenos. Esto es debido a que el desfase entre seno y coseno es de 90° .

E. TRANSFORMADA DQ0.

La transformación DQ0 se usa a menudo en el contexto de la ingeniería eléctrica con circuitos trifásicos. La transformación se puede usar para rotar los cuadros de referencia de formas de onda de CA de manera que se conviertan en señales de cd. Luego, se pueden llevar a cabo cálculos simplificados sobre estas cantidades de cd antes de realizar la transformación inversa para recuperar los resultados de ca de tres fases reales. Como ejemplo, la transformación DQ0 se usa a menudo para simplificar el análisis de máquinas trifásicas sincrónicas o simplificar los cálculos para el control de inversores trifásicos. En el análisis de máquinas trifásicas sincrónicas, la transformación transfiere cantidades de estator y rotor trifásicos en un solo bastidor de referencia giratorio para eliminar el efecto de las inductancias variables en el tiempo.

La transformación DQ0 está hecha de las matrices de transformación de Park y Clarke. La transformada de Clarke (llamada así por Edith Clarke) convierte vectores en el marco de referencia ABC al marco de referencia XYZ (a menudo $\alpha\beta z$). El valor primario de la transformada de Clarke es aislar esa parte del vector referenciado por ABC que es común a los tres componentes del vector; aísla el componente de modo común (es decir, el componente 0).

Las transformaciones de Clarke y Park juntas forman la transformación DQ0:

$$K_{CP} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}$$

Donde su inversa es:

$$K_{CP}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}$$

Donde θ es el ángulo de referencia rotativa de los ejes D-Q:

$$\theta = \int_0^t (\omega * t) dt + \theta_0$$

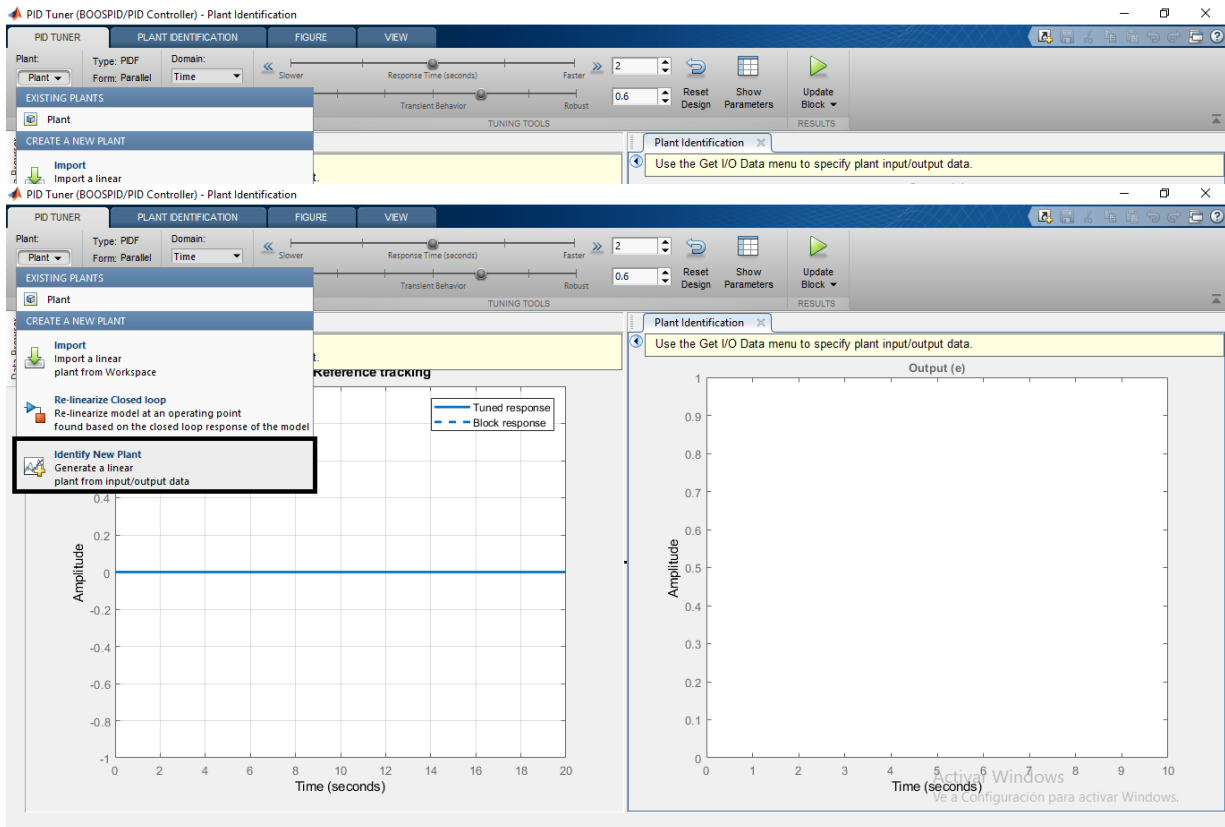
Las transformaciones entre los marcos de referencia están dadas por:

$$v_{DQ0} = K_{CP} \cdot v_{ABC}$$

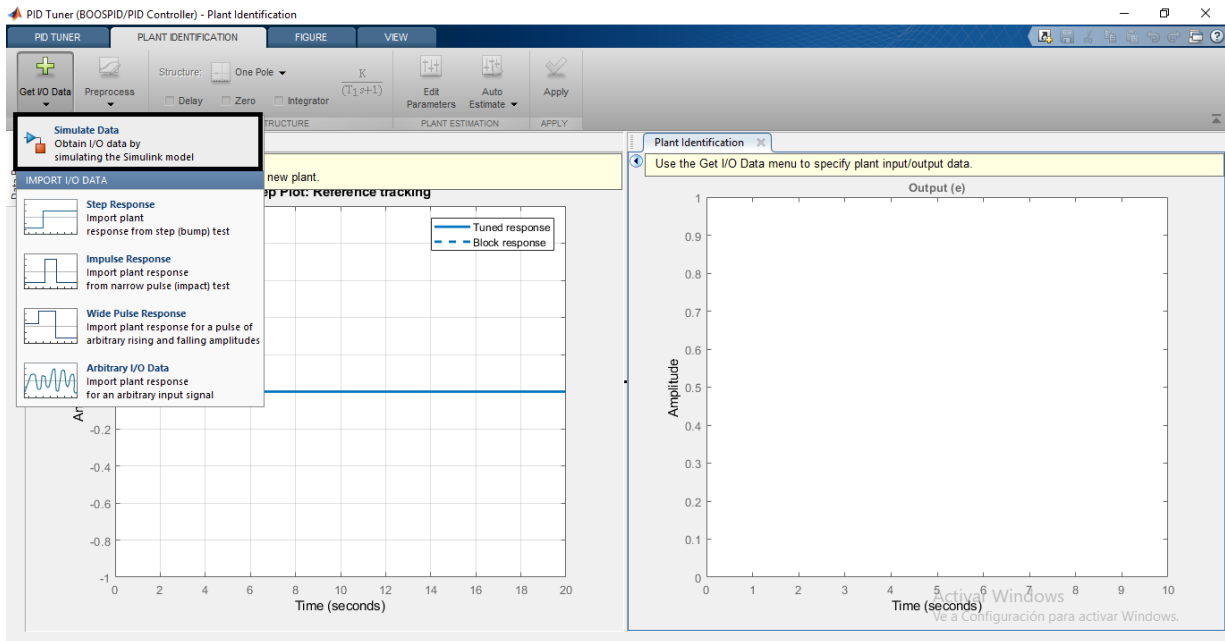
$$v_{ABC} = K_{CP}^{-1} \cdot v_{DQ0}$$

F. USO DE LA HERRAMIENTA PARA EL CÁLCULO DEL CONTROL PID EN SIMULINK

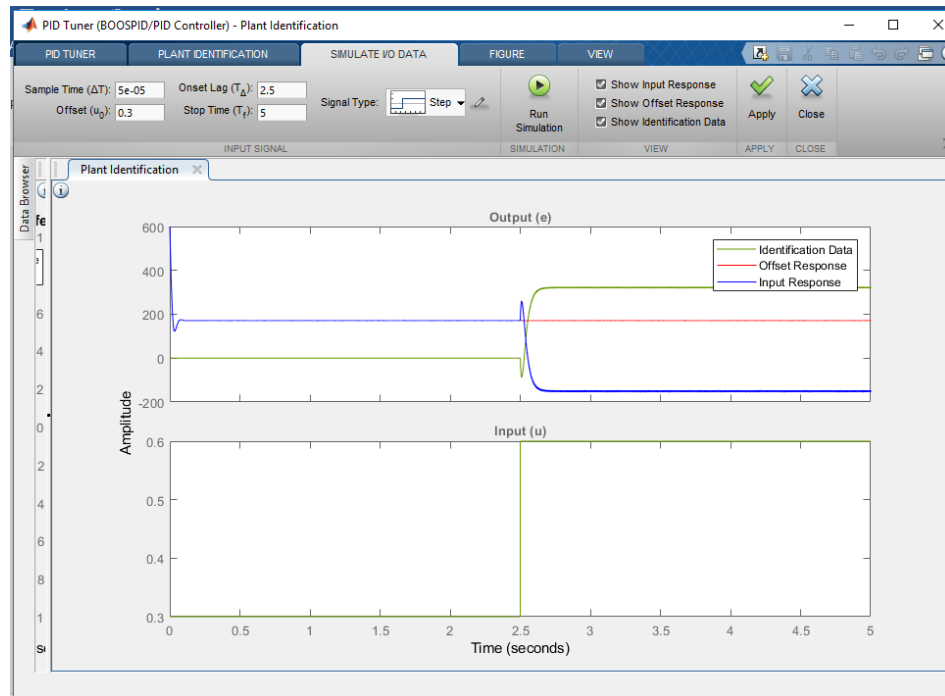
Es de vital importancia identificar la función de transferencia de planta para poder diseñar un control PID que sea eficaz, sin embargo, esto representa un verdadero reto cuando se trata de sistemas no lineales como por ejemplo el convertidor BOOST por lo cual se utiliza la herramienta de identificación de planta como sigue:



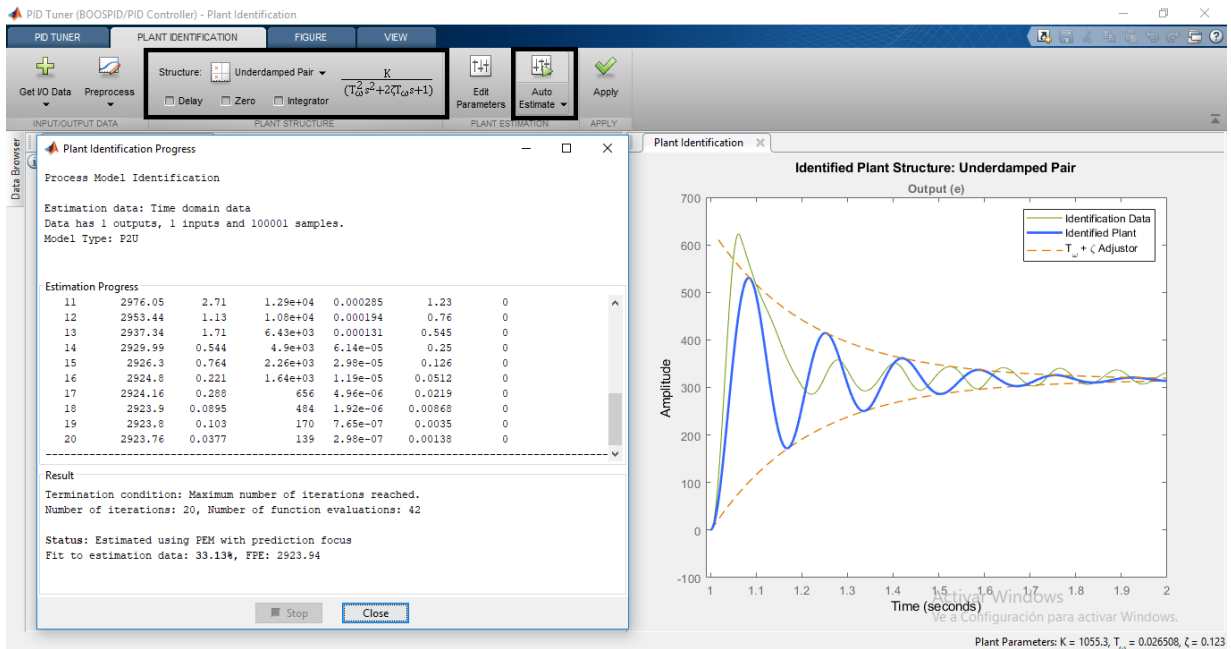
Herramienta de identificación de planta.



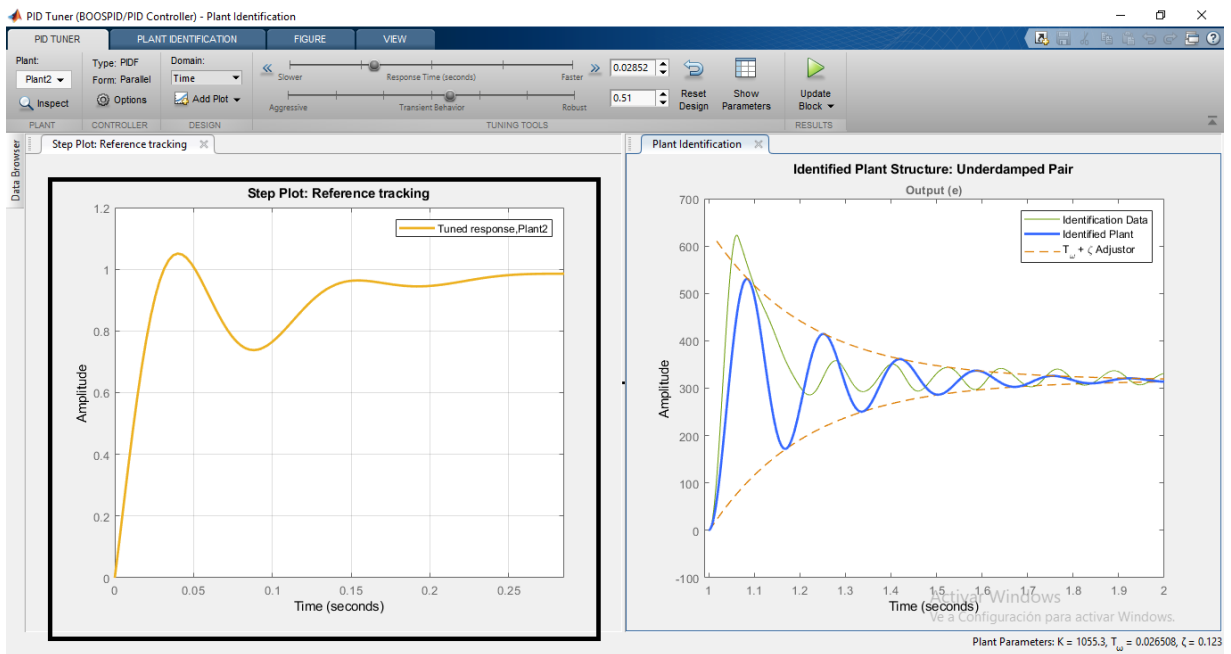
Obtencion de la respuesta del sistema mediante simulacion.



Ejemplo de la respuesta de un determinado sistema a la función escalón.



Ejemplo de cálculo de linealización una función planta perteneciente a un sistema no lineal a través de métodos numéricos



Respuesta del sistema con un control PID ya implementado (Derecha)

G. CODIGOS DE MATLAB.

```
%Codigo_1_BSFC.
function [N_ref, BSFC, BSFC_vel_const, ahorro_comb] = fcn(Pot_1)

T = 645:0.5:1680;
n_R = 2;
V_d = 12.1;

N = 1200:1:2100;
r = 15;
L = 0.127;

Q_hv = 0.012068709;
n_th = 0.5911;
%Pot_1 = 124.5;
BSFC = 1000; %DEBE SER UN VALOR ALTO
BSFC_vel_const = 1000;
Vel_const = 1800;
N_ref = 0;

matriz = zeros(901,2071); % (N,T)
for i = 1:2071 % T
    for j = 1:901 % N

        Torque_maximo=916.21+1.0991*N(1,j)-0.000397*N(1,j)^2;

        if T(1,i) > Torque_maximo
            matriz(j,i) = 0;

        else

            fmep = (6.89476*(r+7*(N(1,j)/1000)+1.5*((2*L*N(1,j))/1000)^2));
            bmep = ((6.28*n_R*T(1,i))/V_d);
            n_mech = bmep/(bmep+fmep);
            n_f = n_th*n_mech;
            matriz(j,i) = 1/(n_f*Q_hv);
            Pot_2 = (T(1,i)*N(1,j)*(pi/30))/1000;
            Pot_2 = round(Pot_2*10)/10;

            if Pot_2 == Pot_1
                if matriz(j,i) < BSFC
                    BSFC = matriz(j,i);
                    N_ref = N(1,j);
                end

                if N(1,j) == Vel_const
                    BSFC_vel_const = matriz(j,i);
                end
            end
        end
    end
end
end
ahorro_comb = ((BSFC_vel_const-BSFC)/BSFC_vel_const)*100;

end
```

```

%Codigo_2_DinamicasDeCorrienteGenSinc.

function dI_dt = EcuacionDeCorrientes (vdq0,vfdp,wr,I,...
                                       Rs,Rfdp,Lls,Ld,Lq,Linv)

id = I(1);
iq = I(2);
ifdp = I(3);

vd = vdq0(1);
vq = vdq0(2);

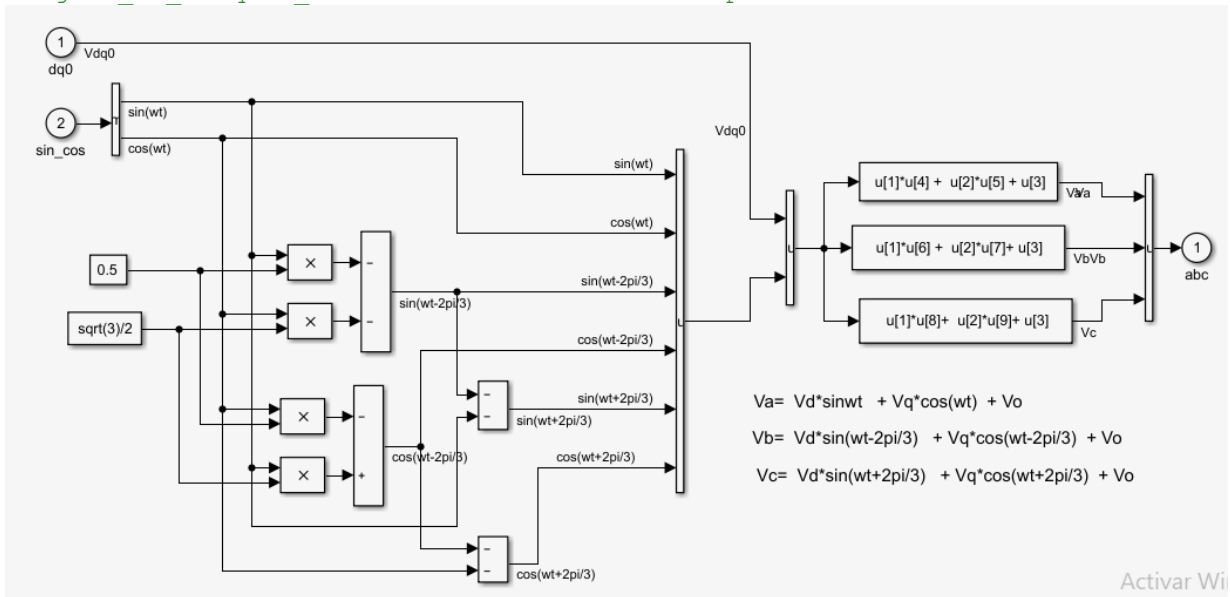
imd = id + ifdp;           % 2.75
Lmd = Ld - Lls;           % 2.75
psi_d = Lls*id + Lmd*imd; % 2.60
psi_q = Lq*iq;            % 2.61

V = [vd - Rs*id + wr*psi_q; ... % 2.64
     vq - Rs*iq - wr*psi_d; ... % 2.65
     vfdp - Rfdp*ifdp];      % 2.63

dI_dt = Linv*V;           % Linv 2.78 a 2.80

```


%Lógica_de_bloques_1 Transformada inversa de park.



%Lógica_de_bloques_2 Transformada de park.

