



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

SEDE GUAYAQUIL

**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**PROYECTO DE TITULACIÓN**

Previa la obtención del Título de:

**INGENIERO ELÉCTRICO**

**Tema**

“Regulación Automática De Voltaje Terminal De Un Generador Trifásico De  
Corriente Alterna”

AUTORES

José David Espinosa Cárdenas

Carlos Henry López Ortega

DIRECTOR: David Humberto Cárdenas Villacrés

GUAYAQUIL

2019

## **CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TIULACIÓN**

Nosotros, José David Espinosa Cárdenas y Carlos Henry López Ortega autorizamos a la **Universidad Politécnica Salesiana** la publicación total o parcial de este trabajo de titulación y su reproducción sin fines de lucro.

Además, declaramos que los conceptos, análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Guayaquil, mayo del 2019

Firma: \_\_\_\_\_

Autor: José David Espinosa Cárdenas

Cédula: 0926156415

Firma: \_\_\_\_\_

Autor: Carlos Henry López Ortega

Cédula: 0920521689

## **CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS**

Nosotros, **JOSÉ DAVID ESPINOSA CÁRDENAS**, con documento de identificación N° **0926156415** y **CARLOS HENRRY LÓPEZ ORTEGA**, con documento de identificación N° **0920521689**, manifiesto mi voluntad y cedo a la **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA** la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado titulado “**REGULACIÓN AUTOMÁTICA DE VOLTAJE TERMINAL DE UN GENERADOR TRIFÁSICO DE CORRIENTE ALTERNA**” mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de **INGENIERO ELÉCTRICO**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos antes cedidos.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscrito este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, mayo del 2019

Firma: \_\_\_\_\_

Autor: José David Espinosa Cárdenas

Cédula: 0926156415

Firma: \_\_\_\_\_

Autor: Carlos Henry López Ortega

Cédula: 0920521689

**CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN SUSCRITO POR EL TUTOR**

Yo, **DAVID HUMBERTO CÁRDENAS VILLACRÉS**, director del proyecto de Titulación denominado “Regulación Automática De Voltaje Terminal De Un Generador Trifásico De Corriente Alterna” realizado por los estudiantes, José David Espinosa Cárdenas y Carlos Henry Lopez Ortega, certifico que ha sido orientado y revisado durante su desarrollo, por cuanto se aprueba la presentación del mismo ante las autoridades pertinentes.

Guayaquil, mayo del 2019

Firma: \_\_\_\_\_

David Humberto Cárdenas Villacrés

## **DEDICATORIA**

Le dedico este proyecto a mis padres Patricio Espinosa y María Auxiliadora Cárdenas, a mi abuela María Cecilia Guzmán, a mi abuela Josefina Ramos, a mi abuelo Bolívar Espinosa, a mis amigos, a Miguel Guerrero, Saul Arroba, Pedro Avellaneda, a Michelle González, a mis primos Andrés, Jorge, Joaquín, a mi tía Carolina Espinosa y a mi tío José Carrasco que por alguna razón creyó en mí hasta su último día.

José David Espinosa Cárdenas

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto principalmente a Dios que es el motivo para seguir adelante y nunca rendirme dándome la fuerza y la sabiduría necesaria en los momentos más difíciles, cuando más quise tirar la toalla, él estuvo conmigo y gracias a El logré una meta más en mi vida que es llegar a ser Ingeniero Eléctrico.

A mis padres que estuvieron a mi lado apoyándome siempre y nunca dejaron que me rindiera ellos son el motivo de quien soy en la vida me enseñaron actitudes y valores que en el camino de mi vida fueron forjándome como ser humano y como hijo.

A mis hermanos y amistades que me acompañaron en el transcurso de mi carrera que me dieron el apoyo necesario para seguir adelante con esta nueva etapa de mi vida.

Y para culminar esta dedicatoria, a todas las personas que dieron un granito de arena para lograr terminar este proyecto del cual me siento orgulloso.

Carlos Henry López Ortega

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero que todo, agradezco al Hacedor de todas las cosas, que nos permite llegar hasta este punto solo porque quiere, agradezco a mis padres y abuelos, agradezco a los profesores que nos ayudaron con sus enseñanzas y consejos, y a los amigos y demás personas que con su experiencia ayudaron a resolver cada novedad que se presentaba, agradezco a Henry López, Carlos Chávez, Nino Vega, Daniel Cantos, Daniel Bayas, Juan Patricio García, Gabriel Domínguez, Jonny Cañar, Jorge López, Alexander Rendón, Félix Claros, Christian Carvajal, Pomerio Sarmiento y Leonardo Urbina.

José David Espinosa Cárdenas

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco principalmente a Dios que ha sido mi guía en este largo camino de duras batallas dándome la fuerza y voluntad para seguir adelante. A mis padres Laura Ortega Galarza Y Leopoldo López Andrade que siempre me dieron su apoyo y han sido un pilar fundamental en mi vida desde el momento que nací.

A mi compañero de tesis José David Espinosa Cárdenas que estuvo a mi lado en todo este proceso de graduación, a mis compañeros de universidad con los cuales compartí muchos momento alegres y difíciles.

A mi tutor de tesis, David Humberto Cárdenas Villacrés y el Ingeniero Carlos Fernando Chávez Córdoba que han sido parte importante en la elaboración de este proyecto de tesis.

Gracias a todos los docentes de la Universidad politécnica salesiana que compartieron sus conocimientos en el transcurso de mi carrera y que me ayudaron con muchas dudas en este proyecto.

Y un agradecimiento especial a Leonardo Urbina, Alexander Rendon, Wilber López, Daniel Bayas y Fernando Tutasi que apoyaron de distintas formas en la construcción de este proyecto.

Carlos Henry López Ortega



## RESUMEN

Este proyecto tiene como finalidad proporcionar a los laboratorios de la carrera de ingeniería eléctrica de la universidad politécnica salesiana una fuente de voltaje estable, con capacidad de entregar diferentes niveles de tensión según el requerimiento del usuario, la cual se pondrá a prueba alimentando un motor de corriente directa acoplado mediante su eje a un generador trifásico sincrónico, y regulando el voltaje terminal de este último. Para dicho propósito se ha hecho uso de un autotransformador variable con un motor reductor que por medio de cadenas variará la posición de los contactos del variac haciendo que aumente o disminuya su voltaje, un sensor de voltaje alterno para medir el voltaje a controlar, un display 16x2 para mostrar el valor medido y el valor requerido, un teclado matricial para ingresar los valores de voltaje deseados, un puente rectificado para la salida en corriente directa y un Arduino Mega que procesará todos los datos y dará ordenes al motor reductor para actuar o no. El sistema tendrá la opción de ser usado en modo de regulación manual o automático para satisfacer las necesidades de las pruebas didácticas que los profesores y los alumnos quieran realizar.

**Palabras clave:** variac, voltaje terminal, sensor, motor reductor, autotransformador, generador, rectificador, regulación

## ABSTRACT

The purpose of this project is to provide the laboratories of the electrical engineering career of the Salesian Polytechnic University with a stable voltage source, with the capacity to deliver different voltage levels according to the user's requirement, which will be tested by feeding a direct current motor coupled through its axis to a synchronous three-phase generator and regulating the terminal voltage of this one. For this purpose, a variable autotransformer has been used with a reduction motor which, by means of chains, will vary the position of the variac contacts, increasing or decreasing its voltage, an alternating voltage sensor to measure the voltage to be controlled, a display 16x2 to show the measured value and the required value, a matrix keyboard to enter the desired voltage values, a rectified bridge for direct current output and an Arduino Mega that will process all the data and give orders to the reduction motor to act or not . The system will have the option of being used in manual or automatic regulation mode to satisfy the needs of the didactic tests that the professors and the students want to carry out.

**Keywords:** variac, terminal voltage, sensor, reduction motor, autotransformer, generator, rectifier bridge, regulation

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

	<b>Pág.</b>
PROYECTO DE TITULACIÓN .....	I
TEMA .....	I
CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TIULACIÓN .....	I
CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS II	II
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN SUSCRITO POR EL TUTOR.....	III
DEDICATORIA .....	IV
DEDICATORIA .....	V
AGRADECIMIENTOS .....	VI
AGRADECIMIENTOS .....	VII
RESUMEN .....	VIII
ABSTRACT.....	IX
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	X
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIV
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVI
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XVII
ABREVIATURAS .....	XVIII
SIMBOLOGÍA .....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	1
1. EL PROBLEMA .....	1
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.2. IMPORTANCIA Y ALCANCES .....	1

DELIMITACIÓN .....	2
1.3. OBJETIVOS.....	2
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	2
1.3.2. OBJETIVO ESPECIFICO .....	2
2. MARCO TEÓRICO .....	3
2.1. ESTADO DEL ARTE.....	3
2.2. TRABAJO Y ENERGÍA.....	3
2.3. POTENCIA .....	4
2.4. CALOR.....	4
2.4.1. CAPACIDAD CALÓRICA .....	5
2.4.2. CALOR ESPECIFICO .....	5
2.5. LEY DE OHM .....	5
2.6. CAÍDAS DE TENSIÓN Y EFECTO JOULE .....	5
2.7. VARIAC.....	6
2.8. MOTOR CC.....	10
2.1. CONEXIONES MOTORES DC .....	12
2.1.1. MOTOR EN EXCITACIÓN SEPARADA .....	12
2.1.2. MOTOR EN PARALELO.....	13
2.1.3. MOTOR EN SERIE .....	13
2.1.4. MOTOR CON IMÁN PERMANENTE .....	13
2.1.5. MOTOR COMPUESTO CON DERIVACIÓN CORTA Y LARGA .....	13
2.2. GENERADOR SINCRÓNICO .....	14
2.1. SERVOMOTOR .....	18
2.2. CORRIENTE INRUSH O DE IRRUPCIÓN .....	19
3. MATERIALES Y MÉTODOS .....	20
3.1. AUTOTRANSFORMADOR VARIABLE POWERSTAT DE SUPERIOR ELECTRIC.....	20
3.2. ARDUINO MEGA .....	21
3.3. GENERADOR SÍNCRONO HAMPDEN MODELO SM-300 .....	22
3.4. MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA HAMPDEN MODELO DYN-400 .....	23
3.5. MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA HAMPDEN MODELO D-300 (MOTOR UNIVERSAL).....	24
3.6. SENSOR DE VOLTAJE ZMPT101B .....	25
3.6.1. AJUSTE DEL SENSOR ZMPT101B .....	27
3.7. DRIVER PARA MOTOR L298N .....	30
3.8. MOTOR CON CAJA DE REDUCCIÓN.....	31
3.9. TRANSMISIÓN, ENGRANAJES .....	32
3.10. DISPLAY 16x2 .....	33
3.11. PUENTE RECTIFICADOR KBPC3504W.....	35
3.12. CHASÍS DEL MÓDULO .....	36
3.12.1. PANEL FRONTAL .....	37
3.13. BANCO DE PRUEBAS RESISTIVO.....	39
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	41
4.1. PRUEBAS AL MOTOR DC HAMPDEN MODELO D-300 (MOTOR UNIVERSAL).....	41
4.1.1. MOTOR DE EXCITACIÓN SEPARADA .....	41
4.1.2. PRUEBAS MOTOR EN PARALELO.....	47

4.1.3.	PRUEBAS MOTOR SERIE.....	53
4.1.4.	PRUEBAS MOTOR CONEXIÓN COMPUESTA DERIVACIÓN CORTA.....	59
4.1.5.	PRUEBAS MOTOR COMPUESTO CONEXIÓN LARGA.....	65
4.2.	PRUEBAS AL MOTOR DC HAMPDEN MODELO DYN-400.....	71
4.3.	PRUEBAS AL AUTOTRANSFORMADOR TRIFÁSICO VARIABLE.....	75
4.4.	PRUEBAS AL GENERADOR SÍNCRONO .....	77
4.4.1.	FACTOR DE POTENCIA Y REACTANCIAS DEL GENERADOR SEGÚN LA CARGA.....	77
4.4.2.	DIAGRAMA DE CAPACIDAD DEL GENERADOR SINCRÓNICO TRIFÁSICO.....	81
4.5.	PRUEBA DE RECTIFICACIÓN .....	86
4.6.	PRUEBA DE MEDICIÓN EN VOLTAJE DIRECTO CON ARDUINO.....	87
4.7.	PRUEBA DE MEDICIÓN AC CON ARDUINO.....	87
4.7.1.	MEDICIÓN LÍNEA-LÍNEA Y LÍNEA-NEUTRO ANTES DE AJUSTE .....	88
4.7.1.	MEDICIÓN DESPUÉS DEL AJUSTE AL SENSOR.....	90
4.7.2.	ERROR DE MEDICIÓN DE VOLTAJE SEGÚN FRECUENCIA MEDIDA .....	90
4.8.	PRUEBA DE VELOCIDAD DE ESTABILIZACIÓN DE LA SALIDA AC DEL VARIAC EN VACÍO.....	95
4.8.1.	PRUEBA DE TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN DE LA SALIDA AC DEL VARIAC EN VACÍO, USANDO ACTUACIÓN CONSTANTE Y PWM PARA REGULAR VELOCIDAD DEL MOTOR REDUCTOR. ....	95
4.8.2.	PRUEBAS DE TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN CON ACTUACIÓN CADA 2.5 SEGUNDOS Y REGULANDO TIEMPO DE ACTUACIÓN DEL MOTOR REDUCTOR. ....	99
	CONCLUSIONES.....	103
	RECOMENDACIONES.....	104
	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	105
	ANEXO.....	108

## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
4.9. PANEL DEL MOTOR DC .....	109
4.10. ESQUEMA DE MOTOR DE EXCITACIÓN SEPARADA.....	110
4.11. ESQUEMA DE CONEXIÓN MOTOR DE EXCITACIÓN SEPARADA CON INVERSIÓN EN EL CAMPO.....	111
4.12. ESQUEMA DE CONEXIÓN MOTOR DE EXCITACIÓN SEPARADA CON INVERSIÓN EN LA ARMADURA.....	112
4.13. ESQUEMA DE CONEXIÓN MOTOR EN SERIE.....	113
4.14. ESQUEMA DE CONEXIÓN MOTOR EN SERIE CON INVERSIÓN DE GIRO EN EL CAMPO.....	114
4.15. ESQUEMA DE CONEXIÓN MOTOR EN SERIE CON INVERSIÓN DE GIRO EN LA ARMADURA .....	115
4.16. ESQUEMA DE CONEXIÓN MOTOR EN PARALELO.....	116
4.17. ESQUEMA DE CONEXIÓN MOTOR EN PARALELO CON INVERSIÓN DE GIRO EN EL CAMPO.....	117
4.18. ESQUEMA DE CONEXIÓN MOTOR EN PARALELO CON INVERSIÓN DE GIRO EN LA ARMADURA ....	118
4.19. ESQUEMA DE CONEXIÓN MOTOR MIXTO DE DERIVACIÓN CORTA.....	119
4.20. ESQUEMA DE CONEXIÓN MOTOR MIXTO DE DERIVACIÓN CORTA CON INVERSIÓN DE GIRO EN EL CAMPO .....	120
4.21. ESQUEMA DE CONEXIÓN MOTOR MIXTO DE DERIVACIÓN CORTA CON INVERSIÓN DE GIRO EN ARMADURA .....	121
4.22. ESQUEMA DE CONEXIÓN MOTOR MIXTO DE DERIVACIÓN LARGA .....	122
4.23. ESQUEMA DE CONEXIÓN MOTOR MIXTO DE DERIVACIÓN LARGA CON INVERSIÓN DE GIRO EN EL CAMPO .....	123
4.24. ESQUEMA DE CONEXIÓN MOTOR MIXTO DE DERIVACIÓN LARGA CON INVERSIÓN DE GIRO EN LA ARMADURA .....	124
4.25. ESQUEMA DE CONEXIÓN DEL SENSOR DE VOLTAJE ZMPT101B EN MULTISIM .....	125
4.26. DIAGRAMA DE CONEXIÓN DEL DISPLAY EN PROTEUS .....	126
4.27. DIAGRAMA DE CONEXIÓN DEL TECLADO EN PROTEUS. ....	127
4.28. DIAGRAMA DE CONEXIÓN DEL DRIVER PARA MOTOR EN PROTEUS, USANDO EL CONTROL DE VELOCIDAD.....	128
4.29. CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN .....	129

# ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

FIGURA 1: MÁQUINA SÍNCRONA HAMPDEN MODELO SM-300. [1].....	1
FIGURA 2: DIAGRAMA AUTOTRANSFORMADOR MONOFÁSICO [5, p. 1].....	7
FIGURA 3: RELACIÓN DE CORRIENTES Y VOLTAJES EN UN AUTOTRANSFORMADOR MONOFÁSICO.....	9
FIGURA 4: SERVOMOTOR MARCA HITEC .....	18
FIGURA 5: VISTA DE ENGRANAJES DE UN SERVOMOTOR. ....	18
FIGURA 6: VISTA DEL DRIVER DE SERVOMOTOR.....	19
FIGURA 7: VISTA LATERAL DEL AUTOTRANSFORMADOR VARIABLE POWERSTAT.....	20
FIGURA 8: VISTA SUPERIOR DE ARDUINO MEGA CON PROTECTOR DE ACRILICO.....	21
FIGURA 9: VISTA FRONTAL DE LA MAQUINA SÍNCRONA HAMPDEN. ....	22
FIGURA 10: MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA HAMPDEN MODELO DYN-400.....	23
FIGURA 11: VISTA DEL MOTOR DC HAMPDEN MODELO D-300.....	24
FIGURA 12: VISTA LATERAL DE SENSOR DE VOLTAJE ZMPT101B.....	25
FIGURA 13: ENTRADAS Y SALIDAS DEL SENSOR DE VOLTAJE ZMPT101B [19].....	26
FIGURA 14. DIAGRAMA DEL ZMP101B EN MULTISIM .....	27
FIGURA 15 : CALIBRACIÓN DEL SENSOR USANDO UN OSCILOSCOPIO Y UN VOLTAJE DE 250V.....	28
FIGURA 16: EJEMPLO DE COMO DEBERÍA VERSE LA ONDA MIENTRAS SE LA CALIBRA .....	29
FIGURA 17 : ONDA SENOIDAL CON RUIDO, PERO NO RECORTADA. ....	29
FIGURA 18: DRIVER L298N PARA MOTOR.....	30
FIGURA 19: MOTOR REDUCTOR Y TRANSMISIONES.....	31
FIGURA 20: TRANSMISION COMPUESTA POR ENGRANAJES Y CADENA .....	32
FIGURA 21: DISPLAY 16X2.....	33
FIGURA 22: DISPLAY CON MODULO I2C.....	35
FIGURA 23: PUENTE RECTIFICADOR KBPC3504W .....	35
FIGURA 24: VISTA DE LA CARA SUPERIOR Y DERECHA DEL MODULO. ....	36
FIGURA 25: VISTA DE LA CARA IZQUIERDA DEL MODULO.....	37
FIGURA 26: VISTA DEL PANEL POSTERIOR. ....	37
FIGURA 27: PANEL FRONTAL CON VINIL TEMPORAL PARA HACER LOS HUECOS.....	38
FIGURA 28: PANEL FRONTAL, DISEÑADO EN AUTOCAD Y EDITADO EN PAINT.....	38
FIGURA 29: VISTA DEL MODULO TERMINADO DURANTE SU USO.. ....	39
FIGURA 30: BANCO DE PRUEBAS RESISTIVO. ....	39
FIGURA 31: CONEXIÓN DE MOTOR DE EXCITACIÓN SEPARADA.....	41
FIGURA 32: FLUJO DE POTENCIA PUNTO 1, MOTOR DE EXCITACIÓN SEPARADA.....	44
FIGURA 33: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE RPM VS TORQUE DE CARGA. ....	44
FIGURA 34: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE %N VS TORQUE DE CARGA.....	45
FIGURA 35: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE RPM VS TORQUE DE ROZAMIENTO.....	45
FIGURA 36: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE POTENCIA MECÁNICA VS TORQUE DE CARGA.....	46
FIGURA 37: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE TORQUE DE ROZAMIENTO VS TORQUE DE CARGA. ....	46
FIGURA 38: CONEXIÓN MOTOR EN PARALELO.....	47
FIGURA 39: FLUJO DE POTENCIA EN EL PUNTO UNO.....	50
FIGURA 40: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE RPM VS TORQUE DE CARGA. ....	50
FIGURA 41: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE % N VS TORQUE DE CARGA. ....	51
FIGURA 42: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE RPM VS TORQUE DE ROZAMIENTO.....	51
FIGURA 43: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE POTENCIA MECÁNICA VS TORQUE DE CARGA.....	52
FIGURA 44: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE TORQUE ROZAMIENTO VS TORQUE DE CARGA. ....	52
FIGURA 45: MOTOR CONEXIÓN SERIE. ....	53
FIGURA 46: FLUJO DE POTENCIAS MOTOR SERIE PUNTO UNO. ....	56

FIGURA 47: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE RPM VS TORQUE DE CARGA. ....	56
FIGURA 48: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE % N VS TORQUE DE CARGA. ....	57
FIGURA 49: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE RPM VS TORQUE DE ROZAMIENTO. ....	57
FIGURA 50: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE POTENCIA MECÁNICA VS TORQUE DE CARGA. ....	58
FIGURA 51: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE TORQUE ROZAMIENTO VS TORQUE DE CARGA. ....	58
FIGURA 52: MOTOR CONEXIÓN COMPUESTA CORTA.....	59
FIGURA 53: FLUJO DE POTENCIAS PUNTO 1 MOTOR CCC.....	62
FIGURA 54: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE RPM VS TORQUE DE CARGA. ....	62
FIGURA 55: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE % NVS TORQUE DE CARGA.....	63
FIGURA 56: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE RPM VS TORQUE DE ROZAMIENTO.....	63
FIGURA 57: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE POTENCIA MECÁNICA VS TORQUE DE CARGA. ....	64
FIGURA 58: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE TORQUE ROZAMIENTO VS TORQUE DE CARGA. ....	64
FIGURA 59: MOTOR COMPUESTO CONEXIÓN LARGA.....	65
FIGURA 60: FLUJO DE POTENCIAS PUNTO 1 MOTOR CCL.....	68
FIGURA 61: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE RPM VS TORQUE DE CARGA. ....	68
FIGURA 62: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE % NVS TORQUE DE CARGA.....	69
FIGURA 63: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE RPM VS TORQUE DE ROZAMIENTO.....	69
FIGURA 64: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE POTENCIA MECÁNICA VS TORQUE DE CARGA.....	70
FIGURA 65: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE TORQUE ROZAMIENTO VS TORQUE DE CARGA. ....	70
FIGURA 66: RPM EN FUNCIÓN DEL TORQUE DE CARGA.....	73
FIGURA 67: EFICIENCIA EN FUNCIÓN DEL TORQUE DE CARGA. ....	73
FIGURA 69: POTENCIA DEL EJE EN FUNCIÓN DEL TORQUE DE CARGA.....	74
FIGURA 70: TORQUE INDUCIDO EN FUNCIÓN DEL TORQUE DE CARGA. ....	74
FIGURA 71: DIAGRAMA FASORIAL PARA CARGA RL, CON FP DE 0.1 A 1.0 EN ATRASO. ....	78
FIGURA 72: DIAGRAMA FASORIAL PARA CARGA RC, CON FACTORES DE POTENCIA DE 0.1 A 1.0 EN ADELANTO. 78	
FIGURA 73: $I_X$ S EN FUNCIÓN DE FP DE CARGA.....	79
FIGURA 74: ANGULO DE TORSIÓN EN FUNCIÓN DEL FP DE CARGA.....	79
FIGURA 75: FP DEL GENERADOR EN FUNCIÓN DEL FP DE CARGA.....	80
FIGURA 76: CAPACIDAD DEL GENERADOR CON FACTOR DE POTENCIA 1. ....	81
FIGURA 77: CAPACIDAD DEL GENERADOR CON FACTOR DE POTENCIA DE 0.9.....	82
FIGURA 78: CAPACIDAD DEL GENERADOR CON FACTOR DE POTENCIA DE 0.8.....	84
FIGURA 79: CAPACIDAD DEL GENERADOR CON FACTOR DE POTENCIA DE 0.7.....	85
FIGURA 80 :ERROR PORCENTUAL DE LA MEDICIÓN DE VOLTAJE EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA .....	91
FIGURA 81 : COMPARACIÓN ENTRE VOLTAJE DEL SENSOR Y VOLTAJE DE CONTROL .....	92
FIGURA 82 : VOLTAJE DE ERROR EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA .....	92
FIGURA 83 :TENDENCIA DEL VOLTAJE DE ERROR EN FUNCION DE LA FRECUENCIA.....	93



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
TABLA 1: VALORES RESISTIVOS DE DEVANADOS DEL GENERADOR. ....	22
TABLA 2: VALORES RESISTIVOS DE MOTOR DC MODELO DYN-400.....	23
TABLA 3: VALORES RESISTIVOS DE BOBINADOS DEL MOTOR DC MODELO D-300.....	24
TABLA 4: VALORES POSIBLES DE CARGA EN EL BANCO DE RESISTENCIAS. ....	40
TABLA 5: VALORES EXPERIMENTALES DE UN MOTOR CONECTADO INDEPENDIENTE.....	42
TABLA 6: VALORES EXPERIMENTALES DE UN MOTOR PARALELO.....	48
TABLA 7: VALORES EXPERIMENTALES DE UN MOTOR CONECTADO EN SERIE.....	54
TABLA 8: VALORES EXPERIMENTALES DE UN MOTOR CCC .....	59
TABLA 9: VALORES EXPERIMENTALES MOTOR COMPUESTO CONEXIÓN LARGA.....	66
TABLA 10: VALORES EXPERIMENTALES MOTOR INDEPENDIENTE.....	72
TABLA 11: VALORES CALCULADOS DE PRUEBA AL MOTOR DC INDEPENDIENTE DYN-400... 72	72
TABLA 12: REACTANCIA EN FUNCIÓN DE LA CARGA. ....	77
TABLA 13: MEDICIÓN LÍNEA-LÍNEA, DEL SENSOR VS EL MULTIMETRO DE CONTROL.....	88
TABLA 14: VOLTAJE MEDIDO VS VOLTAJE CONTROL ANTES DE AJUSTE .....	89
TABLA 15: MEDICIÓN DE SENSOR L-N VS MEDICION DE CONTROL LUEGO DEL AJUSTE .....	90
TABLA 16 :ERROR DE MEDIDCION EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA.....	91
TABLA 17: TIEMPO DE REGULACIÓN CON RANGO DE +/-10, SUBIDA.....	97
TABLA 18: TIEMPO DE REGULACIÓN CON RANGO DE +/-10, BAJADA .....	97
TABLA 19: TIEMPO DE REGULACIÓN CON RANGO DE +/-5, SUBIDA.....	97
TABLA 20: TIEMPO DE REGULACIÓN CON RANGO DE +/-5, BAJADA .....	98
TABLA 21: TIEMPO DE REGULACIÓN CON RANGO DE +/-3, SUBIDA.....	98
TABLA 22: TIEMPO DE REGULACION CON RANGO DE +/-3, BAJADA .....	99
TABLA 23: PRUEBA DE TIEMPO DE REGULACIÓN AL VARIAC EN VACÍO. ....	101
TABLA 24: RESULTADO DE PRUEBA DE ESTABILIZACIÓN DE GENERADOR SIN CARGA. ....	101
TABLA 25: RESULTADO DE PRUEBA DE ESTABILIZACIÓN DE VOLTAJE AL GENERADOR CON CARGA.....	102

## ÍNDICE DE ECUACIONES

	<b>Pág.</b>
ECUACIÓN 1: TRABAJO Y ENERGÍA. ....	3
ECUACIÓN 2: ENERGÍA SUMINISTRADA AL MATERIAL. ....	5
ECUACIÓN 3: TENSIÓN INDUCIDA. ....	7
ECUACIÓN 4: RELACIÓN DE VOLTAJES. ....	8
ECUACIÓN 5: RELACIÓN DE CORRIENTES. ....	8
ECUACIÓN 6: TORQUE INDUCIDO. ....	10
ECUACIÓN 7: FUERZA ELECTROMOTRIZ. ....	11
ECUACIÓN 8: CORRIENTE DEL INDUCIDO. ....	11
ECUACIÓN 9: TORQUE. ....	12
ECUACIÓN 10: VELOCIDAD ROTACIONAL. ....	14
ECUACIÓN 11: FRECUENCIA. ....	15
ECUACIÓN 12: VOLTAJE INDUCIDO. ....	15
ECUACIÓN 13: FUERZA ELECTROMOTRIZ. ....	16
ECUACIÓN 14: VOLTAJE INDUCIDO. ....	17

## ABREVIATURAS

BET	Brunauer – Emmett – Teller
°C	Grados Centígrados
CH	Capacidad de Hinchamiento
Der	Derecha
Fig	Figura
GAB	Guggenheim-Anderson-de Boer
Gr	Gramos
gH <sub>2</sub> O/100gSS	Gramos de agua por 100 gramos de sólido seco
g/cm <sup>3</sup>	Gramos por centímetros cúbicos
GE	Grado de Esterificación
h	Hora
HR%	Humedad Relativa
Izq	Izquierda
Kg	Kilogramo
Lt	Litro
Máx	Máximo
Mg	Miligramo
Min	Mínimo
min	Minuto
mm	Milímetro
mM	Milimolar
ml	Mililitros
MCDB	Contenido de humedad en base seca
N	Normalidad
PME	Polimetiesterasa
PG	Poligalacturonasa
Ref	Referencia
Seg.	Segundo
Temp.	Temperatura

## SIMBOLOGÍA

°C	Grados Celsius
°K	Grados Kelvin
V	Voltaje
Amp	Amperios
I	Corriente
W	Watts
VAR	Voltio amperios reactivos
VA	Voltio amperios
J	Joules
HP	Horse Power (Caballos de fuerza)
$\Omega$	Ohms
R	Resistencia
X	Reactancia
Z	Impedancia
j	Componente imaginaria
seg	Segundos
min	Minutos
h	Horas
Cu	Cobre
Fe	Hierro
F	Fuerza

## INTRODUCCIÓN

En todo sistema eléctrico ya sea industrial o civil las caídas de tensión han sido uno de los problemas más recurrentes a la hora de transportar energía o de mantener un voltaje de alimentación estable, por eso es que en todo el mundo emplean diferentes métodos para mantener un nivel de voltaje lo más regular posible.

En este proyecto se busca realizar un control de voltaje terminal de un generador trifásico que está siendo impulsado por un motor DC alimentado por la salida rectificadora de un autotransformador trifásico. El presente documento se divide en 4 capítulos, el primero habla del problema y parámetros previos a la ejecución del proyecto, el segundo capítulo es un marco teórico para que el lector pueda entender un poco más del tema, el tercero habla de los materiales usados y de los métodos y técnicas aplicadas y el cuarto es un reporte de las diferentes pruebas realizadas a lo largo del proceso de construcción del módulo. Al término del proyecto, este podrá ser utilizado en diferentes aplicaciones para pruebas de la universidad, pero un control similar podría aplicarse a autotransformadores en el cableado eléctrico de lugares con caídas de tensión grandes o frecuentes. El módulo deberá ser capaz de mantener la tensión terminal de línea-neutro de un generador síncrono trifásico, con carga y sin carga, estable, con un error no mayor a +/- 1 voltio.

# 1. EL PROBLEMA

## 1.1.Descripción del Problema.

Los módulos de prácticas de máquinas síncronas cuentan con dispositivos de variación de voltaje (variacs) que funcionan de manera manual, esto hace que las diferentes aplicaciones de los generadores sean trabajadas con la visualización de datos por parte del docente y los respectivos ajustes regulando los variacs, dicha situación limita los tiempos de trabajo en cuanto a las respuestas del funcionamiento de las máquinas, al implementar un sistema de adquisición de datos nuestro proyecto realizará el control automático de la máquina síncrona Hampden modelo SM-300.

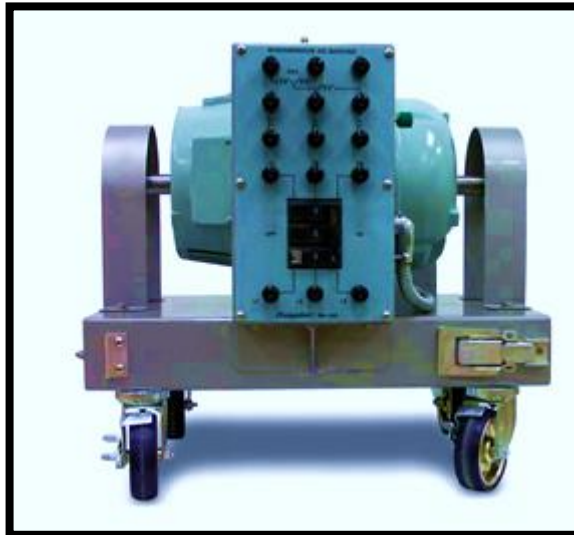


FIGURA 1: MÁQUINA SÍNCRONA HAMPDEN MODELO SM-300. [1]

## 1.2.Importancia y Alcances

El desarrollo de este proyecto beneficiará a docentes y estudiantes de las materias de Máquinas Eléctricas de la carrera de Ingeniería Eléctrica, además que podrá ser utilizado como un actuador con control externo para cualquier aplicación donde se requiera una fuente de alimentación AC y DC.

## **Delimitación**

El proyecto será realizado entre marzo del 2018 y septiembre del 2018, haciendo uso del laboratorio de Motores y Generadores del bloque “B” de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, se aplicarán conocimientos concernientes a las asignaturas de Circuitos I y II, Teoría Electromagnética, Métodos Numéricos, Máquinas Eléctricas I y II, Sistemas Micro-procesados, Electrónica Analógica I y II.

### **1.3.Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Regular automáticamente el voltaje terminal del generador trifásico de corriente alterna Hampden modelo SM-300.

#### **1.3.2. Objetivo Especifico**

- Implementar un sistema de control y medición para un variac trifásico de 30 A con regulación de 0 a 240 V para aplicaciones en corriente alterna y corriente continua
- Realizar la programación del sistema micro-procesado.
- Demostrar el funcionamiento del control mediante la adquisición del voltaje en los terminales de la máquina síncrona Hampden modelo SM-300, manteniendo la estabilidad dentro de los límites de las características de la misma.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1.Estado del Arte.

El proyecto presentado consta de varios elementos eléctricos, electromecánicos, electrónicos analógicos y electrónicos digitales. Estos elementos son: Variac (autotransformador), rectificador de onda completa, motor dc, generador sincrónico AC, Arduino, actuador rotatorio, display y teclado matricial.

La idea principal del proyecto es regular el voltaje terminal de un generador sincrónico, variando la velocidad angular del eje, variando el voltaje recibido por un motor de corriente continua, el cual estará alimentado por un rectificador conectado a un variac, regulado por un Servomotor, motor que estará controlado por un Arduino el cual debe leer el voltaje terminal del generador para decidir si es el correcto o no. Al Arduino se conectará a un teclado matricial con el cual se podrá configurar un voltaje requerido, además un display que mostrará el voltaje deseado versus el voltaje medido, para medir el voltaje se hará uso de un transformador reductor dado que el Arduino solo soporta potenciales bajos.

### 2.2.Trabajo y energía

Dentro de la física el trabajo se puede definir como el producto de aplicar una fuerza a un objeto causando así su desplazamiento.

La expresión para hallar el trabajo realizado se expresa como el producto punto entre los vectores de fuerza y de desplazamiento

$$W=\vec{F} \cdot \vec{S} \text{ [Joules]} \quad (1)$$

ECUACIÓN 1: TRABAJO Y ENERGÍA.



O como la multiplicación de la magnitud de ambas por el coseno del ángulo entre ellas como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$W=F.S.\cos\theta[\text{Joules}]$$

Donde:

F=Fuerza [Newtons]

S=Desplazamiento [Metros]

$\Theta$ =Ángulo entre la dirección de la fuerza y la dirección del desplazamiento [Grados]

[1] [2]

### **2.3.Potencia**

La potencia se define como la cantidad de trabajo realizado sobre unidad de tiempo, o según el caso, la cantidad de energía requerida a cada momento.

En cuanto al estudio de la electricidad, la potencia es el producto del voltaje por la intensidad.

Para lo referente al movimiento circular, como es el caso del movimiento de motores y generadores, la potencia conviene ser expresada como el producto de la velocidad angular por el torque.

Las unidades más usadas para cuantificar la potencia son los watts o vatios y los HP horse power , que en español significa caballos de fuerza.

### **2.4.Calor**

El calor es la energía causada por el movimiento irregular de las partículas que conforman un cuerpo, estas partículas poseen por lo tanto energía cinética, para transmitir energía térmica, moléculas con alta velocidad chocan con moléculas que poseen menos velocidad haciendo que estas se aceleren y aumenten su velocidad, y estas vuelven a repetir el proceso creando un efecto en cadena, esta forma de transmisión de energía está dada como una diferencia de temperatura entre un cuerpo y otro. Si a un sistema se le agrega energía y no aumenta ni su energía cinética ni su energía potencial, entonces se generará un alza en su temperatura.

### 2.4.1. Capacidad calórica

Es la energía que se debe aplicar a una muestra de una sustancia para elevar su temperatura en un grado Celsius.

### 2.4.2. Calor específico

Es la capacidad calórica por cada unidad de masa, es decir que es la energía que se debe aplicar a una unidad de masa para elevar su temperatura un grado. Lo cual puede ser mejor visualizado en la siguiente ecuación.

$$Q=m.c.\Delta T \text{ [Joules]} \quad (2)$$

ECUACIÓN 2: ENERGÍA SUMINISTRADA AL MATERIAL.

Donde:

Q=Energía suministrada al material [Joules]

m=Masa [Kilogramos]

$\Delta T$ =Cambio en la temperatura [°C]

C=Calor específico [Joules/Kilogramo. °C]

[3]

## 2.5.Ley de ohm

La ley de ohm establece que la intensidad de la corriente que circula a través de un conductor es directamente proporcional a la diferencia de potencial aplicado, e inversamente proporcional a la impedancia de dicho conductor.

## 2.6.Caídas de tensión y efecto Joule

Una corriente al atravesar un conductor no ideal causa una disipación de calor que se traduce en una pérdida de energía que a su vez causa una pérdida de potencia, a esto se lo conoce como efecto Joule, este desperdicio de potencia afecta al voltaje presente a lo largo del conductor, haciendo que se reduzca su nivel.

La caída de tensión es proporcional a la intensidad y a la resistencia del material, de manera que entre más corriente haya y más resistencia tenga el material, más será la pérdida de potencia como calor y la disminución de voltaje. Para evitar esto se usan líneas de transmisión limitadas por transformadores elevadores y reductores, para así transportar la potencia usando voltajes elevados y corrientes pequeñas, evitando que el efecto Joule sea muy pronunciado.

## **2.7.Variac**

Un variac no es otra cosa que un autotransformador con la particularidad de poder conmutar sus devanados a fin de obtener un voltaje de salida variable.

En algunas ocasiones es deseable cambiar los niveles de voltaje únicamente en una pequeña cantidad. Es demasiado costo elaborar un transformador con dos devanados completos independientes dimensionados para casi el mismo nivel de voltaje. En su lugar se usa un transformador especial llamado autotransformador. [4, p. 109]

Las aplicaciones para los autotransformadores van desde el arranque a baja tensión de un motor en una industria, hasta la adaptación de un electrodoméstico cuyo voltaje nominal no coincide con el del proveedor eléctrico, pasando por los autotransformadores que regulan la tensión en poblados remotos donde es común que ocurran caídas de tensión.

Un autotransformador es un transformador especial que para cada fase tiene un único devanado que actúa a la vez de primario y secundario. Esto es debido al pequeño valor de su tensión relativa de cortocircuito. [5, p. 1] [6]

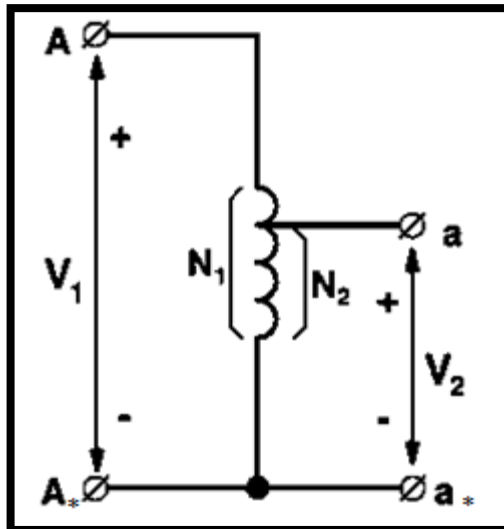


FIGURA 2: DIAGRAMA AUTOTRANSFORMADOR MONOFÁSICO [5, P. 1]

Esto es posible gracias a la auto inductancia la cual es el fenómeno que se produce cuando se induce una fem en una bobina si la corriente que circula por esta cambia con el tiempo. [7, p. 61], esto es descrito en la siguiente ecuación:

$$V = -L \frac{di}{dt} \quad (3)$$

ECUACIÓN 3: TENSIÓN INDUCIDA.

Donde:

L= Inductancia [Henrios]

V= Tensión inducido [Voltios]

Di= Razón de cambio de la corriente [Amperios]

Dt= Diferencial del tiempo [segundos]

A continuación, se detallan las relaciones de voltaje y corriente entre las distintas partes del circuito eléctrico:

$$\frac{V_{común}}{V_{serie}} = \frac{N_{común}}{N_{serie}} \quad (4)$$

ECUACIÓN 4: RELACIÓN DE VOLTAJES.

$$I_{común}N_{común} = I_{serie}N_{serie} \quad (5)$$

ECUACIÓN 5: RELACIÓN DE CORRIENTES.

$$V_{LV} = V_{común}$$

$$V_{HV} = V_{común} + V_{serie}$$

$$I_{LV} = I_{serie} + I_{común} \quad I_{HV} = I_{serie}$$

Donde:

$V_{común}$  = Voltaje en el devanado común

$V_{serie}$  = Voltaje en el devanado serie

$N_{común}$  = Numero de espiras en el devanado común

$N_{serie}$  = Numero de espiras en el devanado serie

$I_{común}$  = Corriente en el devanado común

$I_{serie}$  = Corriente en el devanado serie

$V_{HV}$  = Voltaje en el lado de alta tensión

$V_{LV}$  = Voltaje en el lado de baja tensión

$I_{HV}$  = Corriente en el lado de alta tensión

$I_{LV}$  = Corriente en el lado de baja tensión

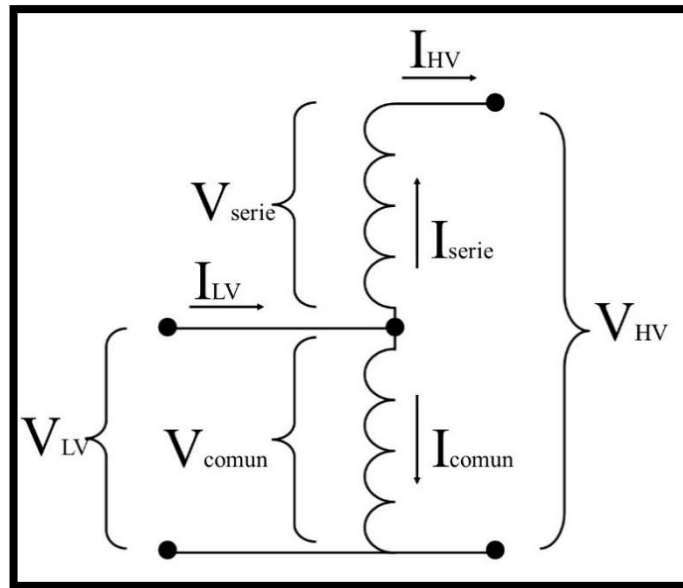


FIGURA 3: RELACIÓN DE CORRIENTES Y VOLTAJES EN UN AUTOTRANSFORMADOR MONOFÁSICO

Pruebas de vacío, esta prueba sirve para calcular las pérdidas en el hierro a tensión, para realizarla hay que seguir los siguientes pasos:

1 variar el potenciómetro o transformador regulable desde cero hasta la tensión nominal correspondiente al arrollamiento particular. [8, p. 622]

2 anotar la potencia en vacío,  $P_{oc}$ , a tensión nominal,  $V_n$ , y la corriente magnetizante,  $I_m$ , que se hayan medido en el vatímetro, voltímetro y amperímetro, respectivamente. [8, p. 622]

3 calcular las pérdidas del hierro a partir de  $P_h = P_{oc} - I_m^2 R_x$ , donde  $R_x$  es la resistencia del arrollamiento de baja tensión seleccionado. [8, p. 622]

Pruebas de cortocircuito, la prueba de corto circuito dará los valores correspondientes a las impedancias de los devanados, para realizarla se debe cortocircuitar el lado de baja tensión, luego se coloca una fuente en el lado de alta tensión, aplicando un voltaje muy bajo, (aproximadamente 5% de la tensión nominal para evitar dañar la máquina), medir la corriente, el voltaje y la potencia en el lado donde se aplica la diferencia de potencial antes mencionada. [9]

## 2.8.Motor CC

Un motor CC es una maquina eléctrica rotativa que permite convertir la energía eléctrica en energía cinética por la interacción de campos magnéticos, en algunos casos con imanes permanentes. La forma en que funcionan consiste en energizar un rotor dentro de un campo magnético de tal forma que la fuerza magnética del rotor interactúe con la fuerza magnética causada por el estator, haciendo que en un lado del motor se atraiga el rotor y el estator y en el otro lado del motor se repelan, esto crea un torque inicial que pone en movimiento el rotor y le da una velocidad angular, al llegar a cierto punto los terminales del rotor se conmutan para empezar el ciclo de nuevo.

Dentro de algunas de las características del motor CC tenemos que su torque depende de la corriente del rotor:

$$\tau = K_M \varphi_i I_i \quad (6)$$

ECUACIÓN 6: TORQUE INDUCIDO.

Donde:

$\tau$ =Torque inducido [Newton.Metros]

$K_M$ =Constante constructiva

$\varphi_i$ =Flujo magnético [Webers]

$I_i$ =Corriente del inducido [Amperios]

[10]

La velocidad está relacionada con la fuerza electromotriz, de la siguiente forma:

$$E=K_M \cdot \omega \cdot \varphi_M \quad (7)$$

ECUACIÓN 7: FUERZA ELECTROMOTRIZ.

Donde:

$E$ =Fuerza electromotriz [Voltios]

$K_M$ =Constante constructiva

$\varphi_M$ =Flujo magnético por polo [Webers]

$\omega$ =Velocidad angular[Radianes/Segundo]

[10]

Los motores de corriente directa se construyen del mismo modo que los generadores, por consiguiente, una máquina de cd puede operar como motor o como generador.

Cuando el motor se pone en marcha empieza a generar un voltaje de polaridad contraria a la aplicada, comportándose como un generador, este voltaje en una maquina ideal contrarrestaría por completo el voltaje aplicado de manera que lo anule, sin embargo, como no existen las maquinas ideales, simplemente el resultado de la sumaria de voltajes disminuye, haciendo que por la ley de Ohm también disminuya la corriente y por consiguiente el torque, a esto se denomina fuerza contra electromotriz.

Lo anterior se representa mediante la siguiente ecuación:

$$I = \frac{E_s - E_0}{R} \quad (8)$$

ECUACIÓN 8: CORRIENTE DEL INDUCIDO.

Donde:

$E_0$ =Voltaje generado por el motor [Voltios]

$E_s$ =Voltaje aplicado [Voltios]

$R$ =Resistencia del bobinado del rotor [Ohmios]

$I_i$ =Corriente del inducido [Amperios]

[11]



Cuando el torque de salida de un motor CC está moviendo un sistema mecánico, la velocidad del rotor se puede determinar a partir de la ecuación de movimiento en:

$$\tau = J \frac{\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_l \quad (9)$$

ECUACIÓN 9: TORQUE.

Donde:

$\tau$ =Torque

$\omega_m$ =Velocidad angular del rotor

$dt$ =Diferencial de tiempo

$B$ =Coeficiente de fricción de un motor CC

$T_l$ =Torque de la carga

[12] [13]

## 2.1. Conexiones motores DC

Existen varios tipos de conexiones que se pueden hacer a un motor DC, algunos motores DC permiten 5 tipos de conexión diferentes, otros solo una, dependiendo esto del diseño del motor, sus devanados y las entradas de voltaje que hayan sido instaladas. A continuación, se enumerará cada una de las conexiones posibles.

### 2.1.1. Motor en excitación separada

Se caracteriza principalmente porque su bobinado de campo y su bobinado de armadura están conectados independientemente uno del otro, y energizados por una fuente distinta. Según la polaridad de la conexión, tanto de la armadura como del campo dependerá el giro del motor.

Es importante recalcar que dada la naturaleza de los motores DC y de la configuración antes mencionada, se tiene, imperiosamente, que energizar siempre, primero el bobinado de campo antes que el de armadura, porque la fuerza contra electromotriz solo se produce cuando el rotor se mueve, mientras que antes de que pase eso, no se producirá, y si no se produce, la corriente de la armadura responderá netamente a la ley de Ohm, y siendo que el bobinado de armadura es pequeño aparecerá entonces una corriente grande, la cual, podría quemar dicho bobinado, como si de un corto circuito tratase, que es por cierto el mismo caso de un motor atascado.

### **2.1.2. Motor en paralelo**

En este arreglo, como su nombre lo dice, hay que conectar en paralelo el devanado de campo y el de armadura, en resultado se aplica el mismo voltaje tanto al bobinado rotórico como estatórico.

### **2.1.3. Motor en serie**

Así como en el motor paralelo el voltaje es igual para los dos bobinados, en el motor serie hace que el campo y la armadura compartan la misma intensidad de corriente conectándolos en serie uno con otro.

### **2.1.4. Motor con imán permanente**

Es en principio, idéntico al funcionamiento del motor independiente, nada más que, en vez de que el campo lo creen las cargas en movimiento a través de un conductor, esta vez será lo creará un imán permanente.

### **2.1.5. Motor compuesto con derivación corta y larga**

Los motores compuestos dividen el bobinado de campo en dos de tal forma que uno se coloque en serie a la armadura y el otro en paralelo, tomando así parte de las características de ambos tipos de conexión. Se dice que el motor está en derivación corta cuando el inducido y el devanado serie se encuentran en paralelo con el devanado paralelo. Se dice que el motor está en derivación larga cuando el inducido está juntamente con el devanado paralelo, en serie con el bobinado serie.

## 2.2. Generador sincrónico

Un generador síncrono AC es una máquina eléctrica que permite convertir la energía cinética rotacional en energía eléctrica, induciendo una diferencia de potencial en el devanado del inducido, mediante un campo magnético rotativo que causa el movimiento de electrones en el devanado estatórico, se dice que es sincrónico porque el devanado de campo al estar ubicado en el rotor, no presenta desfasamiento angular respecto al movimiento del eje y por consecuencia tienen la misma velocidad de rotación .

Normalmente los generadores van equipados con Sistemas Administradores de Potencia o PMS por sus siglas en inglés (Power Management Systems). Los PMS se encargan de economizar el consumo de combustible y de garantizar el mejor desempeño del generador. [14]

Una de las cosas más importantes para elegir un generador será la corriente máxima de los elementos a energizar, haciendo inca pie especialmente en la corriente de arranque de los motores eléctricos y transformadores, el cual es aproximadamente 6 veces su valor nominal. [14]

La velocidad de sincronismo dependerá de la frecuencia a la cual se desee trabajar, y del número de polos  $p$  que se tenga disponible.

$$n = \frac{120 \cdot f}{p} \quad \text{o} \quad n = \frac{60 \cdot f}{pp} \quad (10)$$

ECUACIÓN 10: VELOCIDAD ROTACIONAL.

Despejando la frecuencia:

$$f = \frac{n.p}{120} \text{ o } f = \frac{n.pp}{60} \quad (11)$$

ECUACIÓN 11: FRECUENCIA

Donde:

$f = \text{Frecuencia [Hertz]}$

$n = \text{Velocidad rotacional [Revoluciones por minuto]}$

$pp = \text{Número de pares de polos}$

$p = \text{Número de polos}$

[15]

El comportamiento del voltaje inducido o fuerza electromotriz estará dado por sus componentes de flujo magnético.

Componente transformatriz, solo existe si la derivada temporal del flujo es distinta de cero.

Componente rotacional, depende del valor de la velocidad del eje.

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \cdot \frac{d\phi_0}{dt} \cdot \cos(\omega_r \cdot t) + \omega_r \cdot N \cdot \phi_0 \cdot \text{sen}(\omega_r \cdot t) \quad (12)$$

ECUACIÓN 12: VOLTAJE INDUCIDO

Siendo:

$$e_{trans} = -N \cdot \frac{d\phi_0}{dt} \cdot \cos(\omega_r \cdot t)$$

$$e_{rot} = \omega_r \cdot N \cdot \phi_0 \cdot \text{sen}(\omega_r \cdot t)$$

Como la tensión inducida en el generador es rotacional, no tomaremos en cuenta la componente transformatriz. [16]

Teniendo:

$$e_{\text{rotacional}} = \omega_r \cdot N \cdot \varphi_{\text{max}} \cdot \text{sen}(\omega_r t)$$

$$e_{\text{rotacional}} = \omega_r \cdot N \cdot \Psi_0 \cdot \text{sen}(\omega_r t)$$

Entonces para el ángulo de referencia:

$$E_0 = \omega_r \cdot N \cdot \varphi_{\text{max}}$$

$$E_0 = 2\pi \cdot f_r \cdot N \cdot \varphi_{\text{max}}$$

Para el caso del valor de raíz media cuadrada:

$$E_0 = \frac{2\pi \cdot f_r \cdot N \cdot \varphi_{\text{max}}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f_r \cdot N \cdot \varphi_{\text{max}} = 4.44 \cdot f_r \cdot N \cdot \varphi_{\text{max}} \quad (13)$$

ECUACIÓN 13: FUERZA ELECTROMOTRIZ

Donde:

$E_0$  = Voltaje inducido o fuerza electromotriz

$e_{\text{rot}}$  = Voltaje inducido o fuerza electromotriz rotacional

$e_{\text{trans}}$  = Voltaje inducido o fuerza electromotriz transformatriz

$\omega_r$  = Velocidad angular

$\varphi_{\text{max}}$  = Flujo magnético máximo

$N$  = Número de espiras

$\Psi_0$  = Flujo

Para relacionar el voltaje inducido con el voltaje terminal se tiene la siguiente ecuación:

$$E=V+I_aR_a+jI_aX_s \quad (14)$$

ECUACIÓN 14: VOLTAJE INDUCIDO

Donde:

$E$  = Voltaje inducido o fuerza electromotriz

$V$  = Voltaje terminal

$I_a$  = Corriente de armadura

$R_a$  = Resistencia del devanado de armadura

$X_s$  = Reactancia sincrónica

[17] [18]

## 2.1.Servomotor

El servomotor o servo básicamente es un motor de corriente continua, que tiene varios tipos de aplicación en la parte industriales y en sistemas automatizados por su fácil adaptación ya que este puede ser controlado tanto en su velocidad como en su posición. [19] [19]

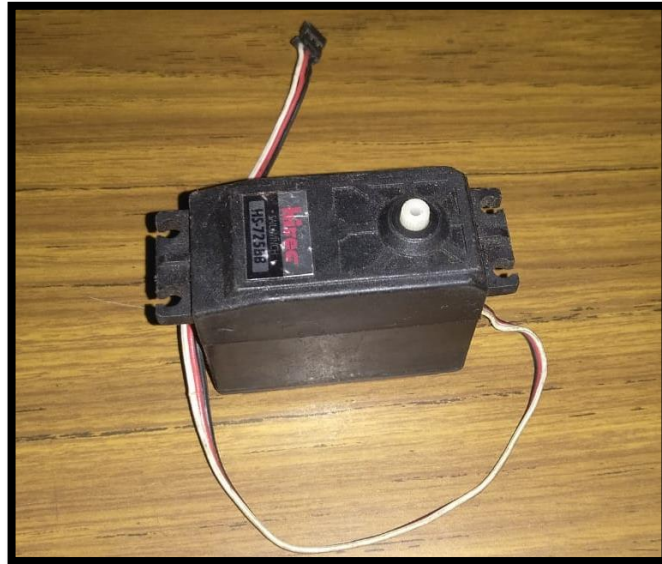


FIGURA 4: SERVOMOTOR MARCA HITEC

Por dentro el servomotor tiene un conjunto de engranes que sirven para reducir su velocidad al mismo tiempo que aumentan su torque.



FIGURA 5: VISTA DE ENGRANAJES DE UN SERVOMOTOR.

Además de estos engranajes, y lo que hace especial a esta máquina, es un potenciómetro que trabaja junto a un controlador electrónico, para poder conocer el ángulo de giro del eje en todo momento.



FIGURA 6: VISTA DEL DRIVER DE SERVOMOTOR

## 2.2. Corriente inrush o de irrupción

Esta una corriente transitoria que puede aparecer al momento de energizar un transformador, dependiendo de la fase en que esté el voltaje terminal en ese preciso instante, dando como consecuencia, corrientes de entre 10 a 20 veces la establecida como valor nominal, con una duración de varios ciclos, y dando surgimiento a armónicos, mayormente la segunda armónica. [20] [21]



### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Autotransformador variable PowerStat de Superior Electric



FIGURA 7: VISTA LATERAL DEL AUTOTRANSFORMADOR VARIABLE POWERSTAT.

Es un autotransformador trifásico, compuesto por tres autotransformadores monofásicos, a continuación, se enumerará sus características técnicas:

- Tipo: 146U
- Corriente nominal: 30 amperios.
- Entrada nominal: 120 voltios.
- Salida nominal: Variable 0-140 voltios.
- Frecuencia nominal: 50/60 Hertz.
- Potencia aparente: 4.2 KVA.

Sus dimensiones son:

- Largo: 40 centímetros incluyendo perilla.
- Ancho: 28 centímetros incluyendo bases.
- Altura: 29 centímetros incluyendo pernos de borneras.

## 3.2.Arduino Mega



FIGURA 8: VISTA SUPERIOR DE ARDUINO MEGA CON PROTECTOR DE ACRILICO.

Arduino Mega es una tarjeta microcontroladora basada en un procesador ATmega2560., el Arduino Mega posee:

54 pines para entrada o salida digital (15 de los cuales pueden ser usados como salidas PWM)

16 entradas analógicas

4 UART (puertos serie de hardware)

Cristal de cuarzo de 16 MHz

Conexión USB

Entrada de poder

Cabecera ICSP (In circuit serial programming)

Botón de reset

[22]

### 3.3. Generador síncrono Hampden modelo SM-300

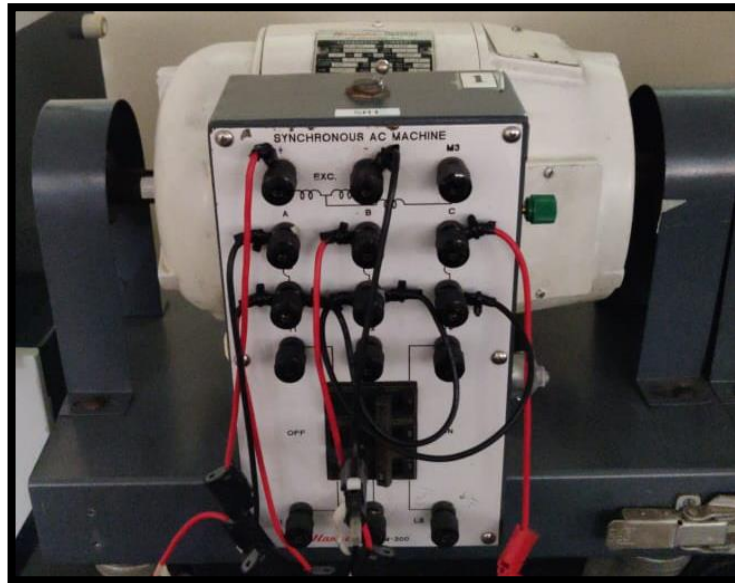


FIGURA 9: VISTA FRONTAL DE LA MAQUINA SÍNCRONA HAMPDEN.

Las especificaciones técnicas de la maquina son las siguientes:

Voltaje de armadura nominal: 127/220 voltios AC.

Corriente de armadura nominal: 9.7 amperios AC.

Fases: 3.

Potencia nominal mecánica: 3 caballos de fuerza.

Potencia nominal eléctrica: 2238 watts.

Frecuencia nominal: 60 Hertz.

Velocidad nominal: 1800 revoluciones por minuto.

Corriente de campo nominal: 2.3 amperios.

Temperatura ambiente de trabajo máxima: 40 grados Celsius.

TABLA 1: VALORES RESISTIVOS DE DEVANADOS DEL GENERADOR.

<i>Bobinado</i>	<i>Resistencia [<math>\Omega</math>]</i>
Campo	26.2
A-A''	1.8
B-B''	2.9
C-C''	2.3

### 3.4. Motor de corriente directa Hampden modelo DYN-400

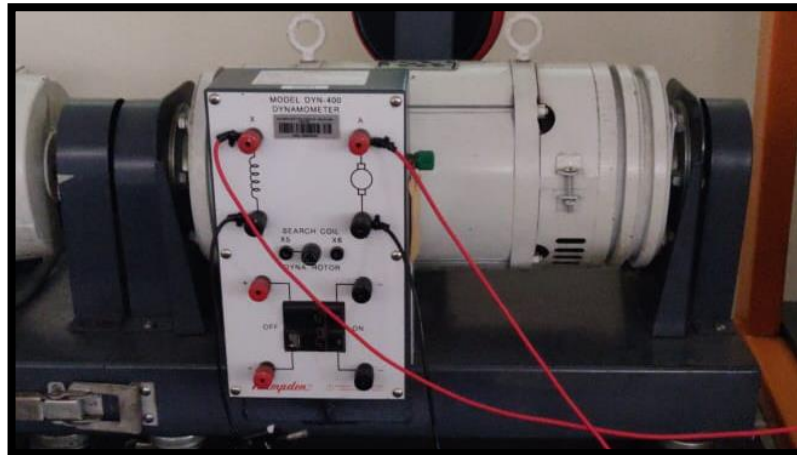


FIGURA 10: MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA HAMPDEN MODELO DYN-400.

Las especificaciones técnicas de la maquina son las siguientes:

Voltaje nominal de armadura: 115 voltios DC.

Corriente nominal de armadura: 30 amperios DC.

Potencia mecánica: 4 caballos de fuerza.

Potencia eléctrica: 3000 watts.

Velocidad nominal: 3600 revoluciones por minuto.

Corriente de campo nominal: 0.75 amperios DC.

Voltaje nominal de campo: 115 voltios DC.

Tipo: SH.

Clase: B.

Temperatura ambiente de trabajo máxima: 40 grados Celsius.

TABLA 2: VALORES RESISTIVOS DE MOTOR DC MODELO DYN-400.

<b><i>Bobinado</i></b>	<b><i>Resistencia [<math>\Omega</math>]</i></b>
Armadura	2.1
Campo	165.3

### 3.5. Motor de corriente directa Hampden modelo D-300 (motor universal).

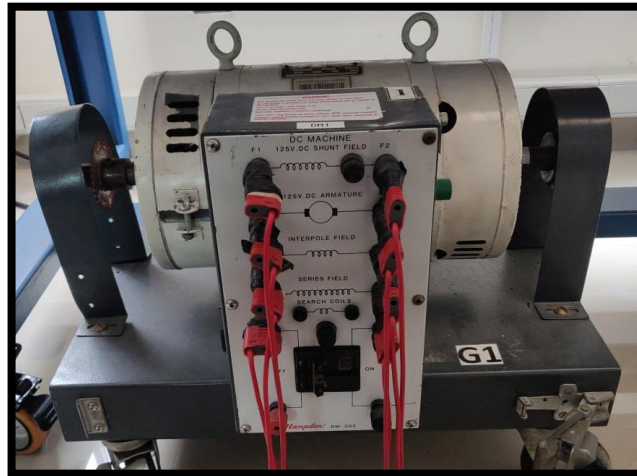


FIGURA 11: VISTA DEL MOTOR DC HAMPDEN MODELO D-300.

Las especificaciones técnicas de la maquina son las siguientes:

Voltaje de armadura nominal: 125 voltios DC.

Corriente de armadura nominal: 23 amperios DC.

Potencia mecánica nominal: 3 caballos de fuerza.

Potencia eléctrica nominal: 2000 watts.

Velocidad nominal: 1800 revoluciones por minuto.

Clase: B.

Voltaje nominal de campo: 125 voltios DC.

Corriente nominal de campo: 0.6 amperios DC.

Temperatura ambiente de trabajo máxima: 40 grados Celsius.

TABLA 3: VALORES RESISTIVOS DE BOBINADOS DEL MOTOR DC MODELO D-300.

<i>Bobinado</i>	<i>Resistencia [<math>\Omega</math>]</i>
Armadura	2
Campo Shunt	230
campo serie	1.7

### 3.6.Sensor de voltaje zmpt101b

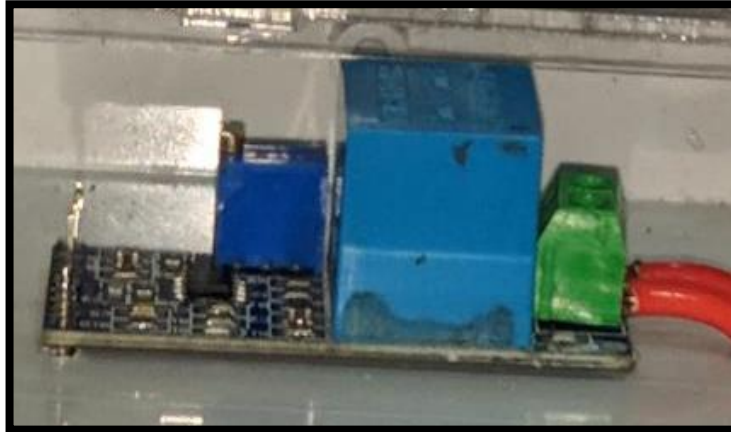


FIGURA 12: VISTA LATERAL DE SENSOR DE VOLTAJE ZMPT101B

El sensor de voltaje zmpt101b, es un circuito basado en el transformador de potencial zmpt101b, que se utiliza en aplicaciones de medición en voltaje alterno en un rango de hasta aproximadamente 250 voltios y de 50 a 60 hertzios. El sensor de voltaje zmpt101b consta de dos sub-circuitos (uno de medición y otro para alimentar un led) y dentro de estos, los siguientes componentes que serán nombrados a continuación uno a uno:

- 1 transformador de potencia zmpt101b:XFRM1
- 1 circuito integrado amplificador operacional LM358: AO1, AO2
- 1 diodo QED123: D1
- 1 resistencia 100Ω:R11
- 1 resistencias 1.001KΩ: R10
- 6 resistencias 10KΩ: R2, R3, R4, R6, R7, R8
- 2 resistencias 100KΩ: R1, R9
- 1 resistencia 820KΩ: R12
- 1 resistencia 10KΩ variable: R5
- 3 capacitores 1nf: C1, C3, C5
- 2 capacitores 1μf: C2, C4

El circuito posee dos entradas y cuatro salidas:

#### Salidas

1.Vcc: es la terminal por donde entra en voltaje directo de alimentación del circuito, este voltaje puede variar de 3.3 voltios a 5 voltios, hay que notar que de este voltaje de alimentación depende la resolución de salida del sensor.

2.Out: es la salida por la cual se comunica unidireccionalmente el sensor al microcontrolador, esta salida es una onda senoidal, muy similar a la entrada a medir, pero a una escala mucho menor.

3.Ground: Tierra del circuito de medición

4.Ground: Tierra del circuito donde va el led

#### Entradas

5.AC Phase: es la entrada del voltaje a medir, esta entrada posee una resistencia R12 de 820K $\Omega$  en serie con el transformador zmpt101b, aquí se debe conectar la fase o línea que se desee medir.

6. AC Neutral: es la entrada de voltaje que está conectada directo al transformador zmpt101b sin ninguna resistencia en serie ni paralelo, en esta entrada se debe conectar el neutro del sistema a medir.

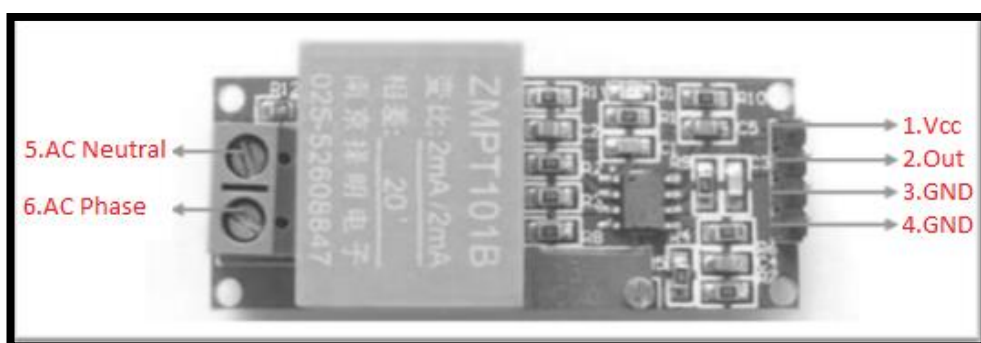


FIGURA 13: ENTRADAS Y SALIDAS DEL SENSOR DE VOLTAJE ZMPT101B [19]

El funcionamiento de este sensor es el siguiente:

Luego de haberse conectado las salidas del sensor al microcontrolador, y las entradas del sensor a punto que se quiere monitorear, sucederá lo siguiente:

La señal alterna de entrada pasara por la resistencia R12 donde tendrá una caída de tensión y pasara al transformador, elemento que actuará como aislamiento galvánico, seguido de una resistencia R11, que hará de divisor de corriente, luego tenemos el amplificador operacional OA1, y después un potenciómetro para calibrar la salida del sensor.

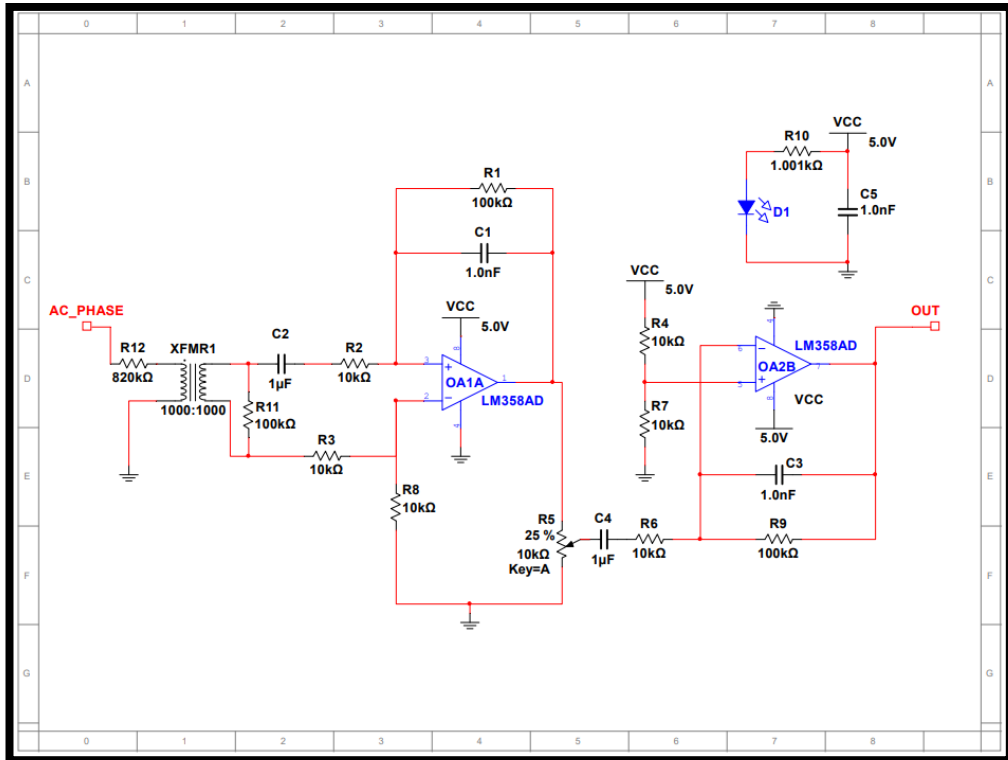


FIGURA 14. DIAGRAMA DEL ZMP101B EN MULTISIM

### 3.6.1. Ajuste del sensor ZMPT101B

El proceso de calibrar el sensor ZMPT101B es el siguiente:

Conectar el pin de alimentación del sensor a el voltaje que se vaya a alimentar cuando esté conectado al Arduino o a otro sistema, ya sea 5Vdc, 3.3Vdc u otro, pero en este caso se ha conectado a 5V ya que es la tensión con la cual el Arduino alimenta el sensor.

Conectar los pines de tierra, a 0V.

Conectar las entradas AC del sensor a una fuente que entregue el máximo voltaje al que se desee trabajar.



Conectar la salida analógica del sensor “out”, y la tierra a un osciloscopio especializado en bajos voltajes y previamente calibrado.

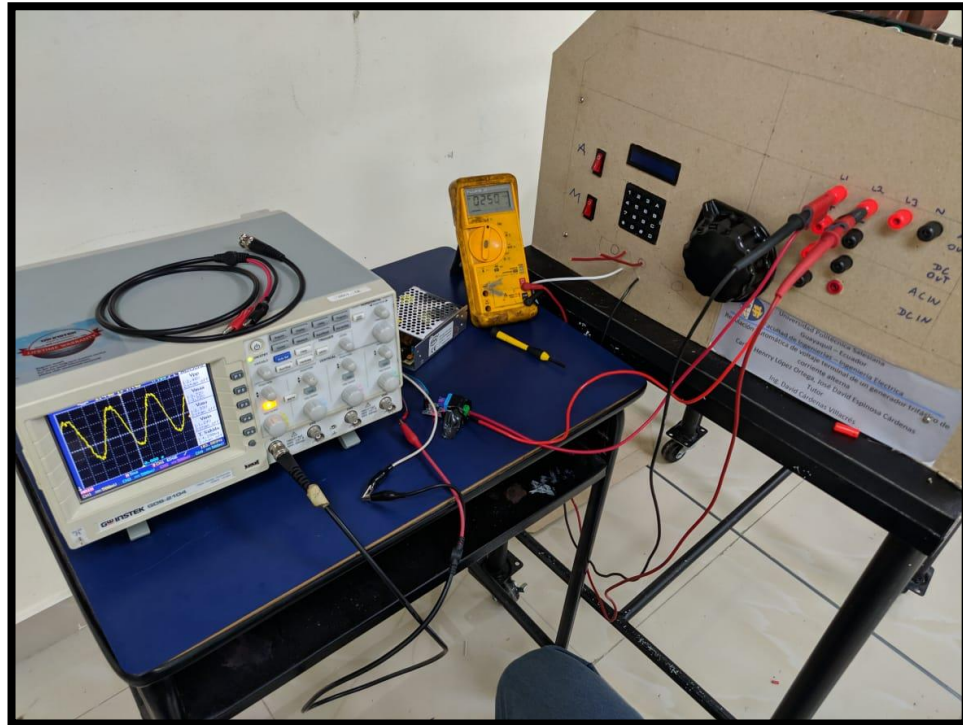


FIGURA 15 : CALIBRACIÓN DEL SENSOR USANDO UN OSCILOSCOPIO Y UN VOLTAJE DE 250V.

Hecho todo lo anterior y con el osciloscopio encendido, se podrá observar la forma de onda de salida del sensor, su amplitud y su frecuencia. La amplitud será la amplitud de la entrada AC a una escala mucho menor, la frecuencia será la misma frecuencia de la entrada AC, pero la forma de onda estará seguramente recortada debido a que la amplitud de onda de salida debe haber sobrepasado el voltaje de saturación de amp-op presente en el sensor, y este recorte de onda es lo que causa lecturas erróneas.

Para variar la amplitud de salida del sensor y que la onda se encuadre perfectamente dentro de sus límites, el ZMPT101B ha venido incorporado con un potenciómetro W104 de 100K $\Omega$ , que tiene la función de dividir el voltaje, y reducir o aumentar la amplitud.

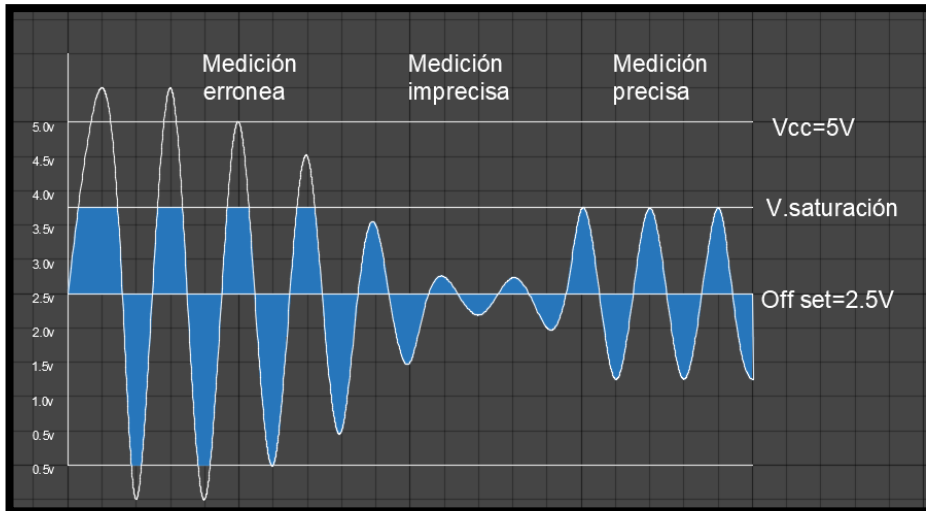


FIGURA 16: EJEMPLO DE COMO DEBERÍA VERSE LA ONDA MIENTRAS SE LA CALIBRA

Se reduce la amplitud hasta que se pueda apreciar la onda senoidal en el osciloscopio, pero no se debe reducir demasiado pues esto, si bien no causa el mismo tipo de error donde el voltaje medido varía mucho, si hace que se reduzca la exactitud que tiene el sensor.

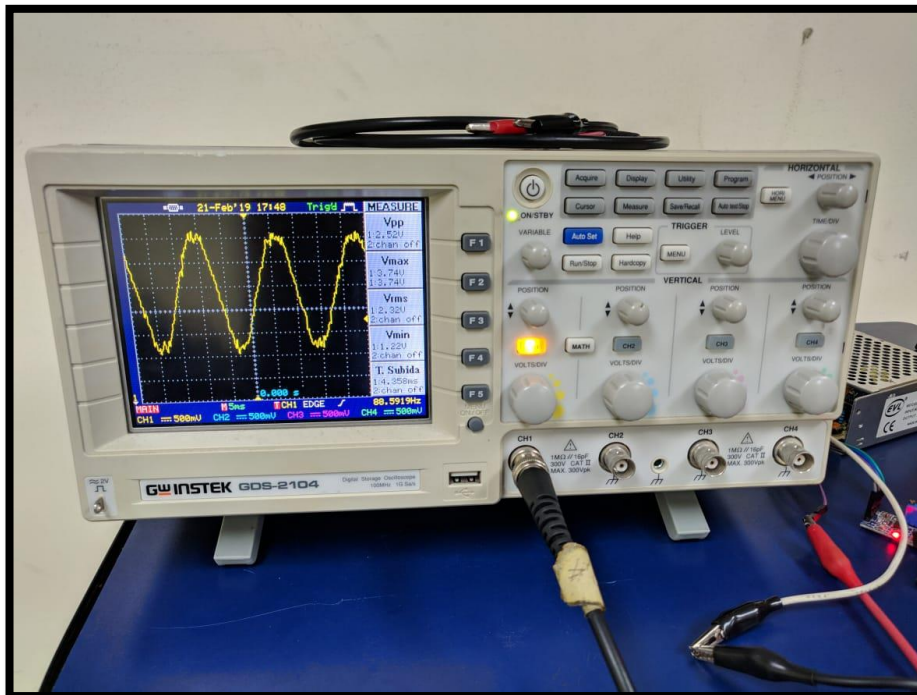


FIGURA 17 : ONDA SENOIDAL CON RUIDO, PERO NO RECORTADA.

### 3.7.Driver para motor L298N

Es un puente H, soldado a una placa y usado para controlar motor dc, motores de paso u otro tipo de elemento inductivos, tiene capacidad para controlar dos motores dc, o un motor de pasos de cuatro cables, puede aguantar tensiones de hasta 46 voltios, corrientes de hasta 3 amperios por corto tiempo y corrientes de 2 amperios en operación regular. [23]

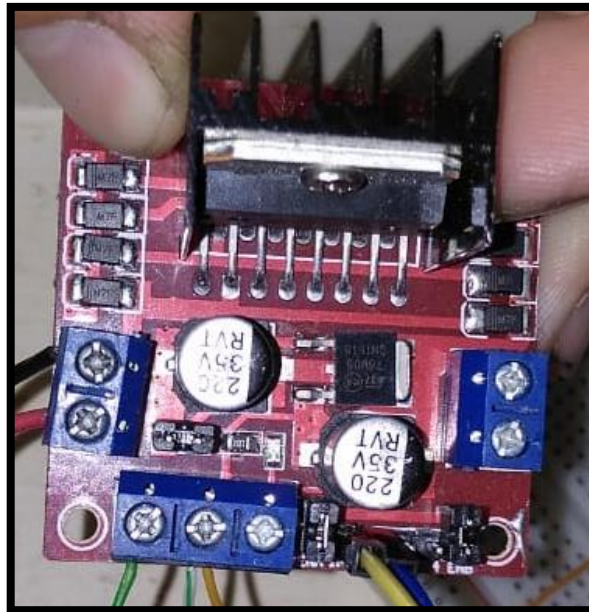


FIGURA 18: DRIVER L298N PARA MOTOR

El driver tiene 4 salidas de fuerza, dos a la derecha y dos a la izquierda, 4 pines de entrada que pueden ser conectados a los pines digitales del Arduino para recibir órdenes de este, dos a la izquierda que controlaran la salida izquierda de fuerza, y dos a la derecha para las restantes, además cerca de las entradas digitales se encuentran dos parejas de pines puenteados cada par, el puente sirve para dar el máximo voltaje de salida en los pines de salida de fuerza, pero al quitar el puente, se puede ingresar una señal de modulación por ancho de pulsos (PWM), que dará la posibilidad de modular el voltaje de salida de los pines de fuerza, lo que se traduce como el control sobre la velocidad de un motor DC, tiene una entrada de fuerza, a la que, como se mencionó anteriormente, se la puede alimentar con hasta 46 voltios, una entrada que debe ir al negativo de la alimentación, y otra que recibe alimentación de 5 voltios por parte del controlador, en vez de la otra entrada, pero solo cuando la carga a controlar tenga una tensión nominal menor a 5 voltios.

### 3.8.Motor con caja de reducción

Un motor con caja de reducción es simplemente un motor dc común, al que se le ha adaptado a su eje una caja de reducción compuesta por engranes que hacen se aumente su torque a medida que disminuye su velocidad, manteniendo en todo momento la misma potencia.

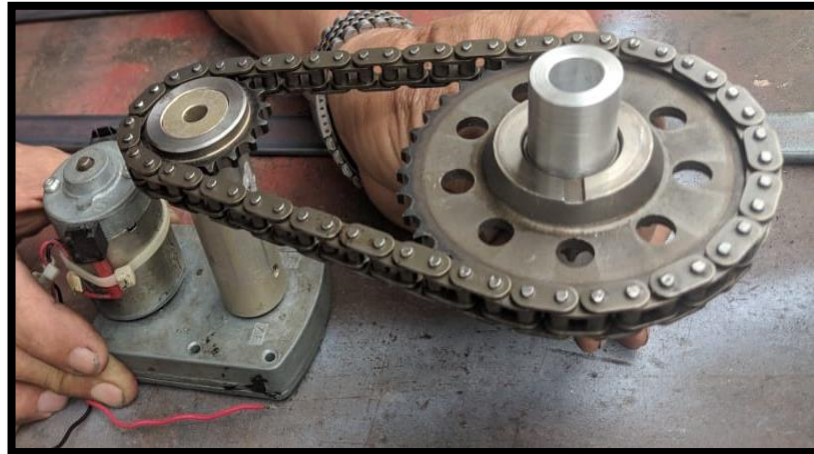


FIGURA 19: MOTOR REDUCTOR Y TRANSMISIONES

Este motor hace de actuador sobre el variac, girando su eje y variando su voltaje, fue elegido por su fuerza, capaz de romper la inercia, y superar la fuerza de rozamiento estático que hay entre los devanados del autotransformador y sus carbones, y por su baja velocidad la cual es ideal pues se quiere evitar cambios bruscos de voltaje de salida del variac.

Mediante experimentación se pudo observar que su corriente a vacío es de aproximadamente 200 miliamperios, y con el motor trabado de alrededor de 500 miliamperios.

### 3.9. Transmisión, engranajes

Para acoplar el eje del motor reductor, primero se pensó en hacerlo directamente, enganchando uno con el otro alineando sus ejes, pero esto supondría un alineamiento muy preciso, o usar una junta cardán, la que fue descartada pues no se pudo conseguir tal artefacto en el tamaño que se necesitaba, por último, se prefirió dos engranes y una cadena.



FIGURA 20: TRANSMISION COMPUESTA POR ENGRANAJES Y CADENA

Aunque el motor reductor es bastante fuerte, la superficie de rozamiento entre las espiras del autotransformador y las escobillas es muy irregular y, así como hay sectores donde el motor es capaz de mover el eje a la perfección, hay otros donde se nota un esfuerzo extra, por esto y porque se quería un poco de más de margen de tiempo para medir y tomar decisiones al ATMEGA, se optó por una transmisión que diera una reducción extra.

### 3.10. Display 16x2

Es la interfase visual entre el controlador y el usuario, va a mostrar todos los valores medidos, así como los valores requeridos en tiempo real.



FIGURA 21: DISPLAY 16X2

Es llamado 16x2 debido a que tiene 16 columnas y 2 filas, dando 32 espacios en donde mostrar caracteres blancos en un fondo azul.

En su parte superior se pueden observar 16 entradas:

VSS: Conexión a tierra o a voltaje de referencia.

VDD: Alimentación de 5 voltios.

V0 o VE: Contraste.

RS: Selector de registro (register selector).

RW: Lectura/Escritura (Read/Write).

E: Habilitación (enable).

D0,D1,D2,D3,D4,D5,D6,D7: Entradas digitales.

A: Ánodo del Led.

K: Cátodo del Led.

El uso del display la manera como conectarlo es la siguiente:

VSS y VDD van al positivo y negativo de la alimentación en ese orden.

V0 o también conocido como VE, es el pin encargado del contraste de las letras, a este pin es necesario conectarlo en un nodo donde confluyan dos resistencias que formen un divisor de voltaje, o a la entrada central de un potenciómetro cuyas entradas exteriores irán, una a 5 voltios y la otra al negativo, es recomendable mejor usar las resistencias, o un potenciómetro de buena calidad, se ha notado que, cuando el pin V0 se desconecta momentáneamente, o hace un mal contacto, el display muestra errores que solo se quitan si se lo reinicia.

RS el selector de registro se debe conectar a un pin digital del microcontrolador, para que este le diga al display si lo que quiere es escribir un carácter o dar un comando, como dar la posición al cursor.

RW, se encarga de establecer si lo que se quiere es leer o escribir en el display, un uno lógico significa leer, y un cero lógico significa escribir, por tanto, y para este caso, va a ser conectado a cero voltios en forma permanente.

E, se usa para que el microcontrolador habilite al display para realizar una escritura.

D0 a D7 es un bus de datos de ocho bits de capacidad, de la información enviada a través de estos pines dependerán los caracteres y ordenes que se den, mas en esta ocasión solo harán falta los cuatro últimos.

Ánodo, debe ser conectado a la alimentación de 5 voltios a través de una resistencia pequeña, de valores de alrededor de 330 ohmios, con este pin se puede manejar la iluminación del fondo.

Cátodo, para que trabaje en conjunto con el ánodo a fin de controlar la iluminación de fondo, tendrá que conectarse a cero voltios.

El display es especialmente susceptible a la interferencia electromagnética, más aún si está cerca de una fuente de ruido como es el caso, así se pudo observar que en muchas ocasiones la pantalla mostraba caracteres aleatorios o sin ningún sentido, para evitarlo, se recubrieron los cables con papel aluminio conectado al chasis aterrizado del módulo, y encima un aislamiento para evitar accidentes. [24] [25]

Otra manera de conectar el display, y que se probó, fue a través de un módulo I2C, con la gran ventaja de solo necesitar cuatro cables, pero no se lo hizo pues en esta configuración el display no se arreglaba al reiniciarlo (apagarlo y prenderlo).

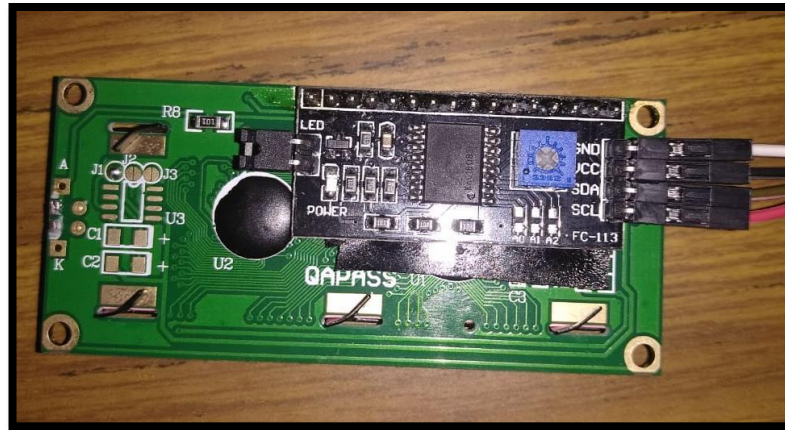


FIGURA 22: DISPLAY CON MODULO I2C

Si se deseara implementar una comunicación I cuadrado C, o I2C, habría que nada más conectar la alimentación VCC, la referencia a cero, y dos pines que irían hacia los pines analógicos del Arduino, estos pines son SDA (serial data), que es encargado de transmitir información, y SCL (serial clock) que como dice su nombre, trabaja de reloj.

### 3.11. Puente rectificador KBPC3504W

Es un dispositivo compuesto de cuatro diodos empaquetados dentro de una carcasa cuadrada de metal ideada para disipar calor, el KBPC3504W puede soportar corrientes de trabajo de hasta 35 amperios y corrientes transitorias de 400 amperios con duración de menos de 8 milisegundos, aunque necesita ser colocado con un disipador de calor pues rápidamente eleva su temperatura a más de 60 grados dependiendo de la carga, tiene un voltaje de polarización inversa de 280 voltios RMS, una caída de tensión de polarización directa de 1.2 voltios y un voltaje máximo de aislamiento de 2500 voltios entre los elementos internos que la conforman y la carcasa.



FIGURA 23: PUENTE RECTIFICADOR KBPC3504W



### 3.12. Chasis del módulo

Para hacer la carcasa se cortó, dobló y pintó una plancha de acero, la carcasa tiene 31 centímetros de alto, 50 centímetros de ancho y 60 centímetros de largo. En su parte superior una claraboya de 20 por 30 centímetros, para colocar en ella una ventana de acrílico.



FIGURA 24: VISTA DE LA CARA SUPERIOR Y DERECHA DEL MODULO.

En la cara derecha, hay dos aberturas, una para el disyuntor de salida y otra para la toma de 32 amperios de salida, además se le aplico varios pequeños huecos a modo de rejilla para dejar fluir el aire.

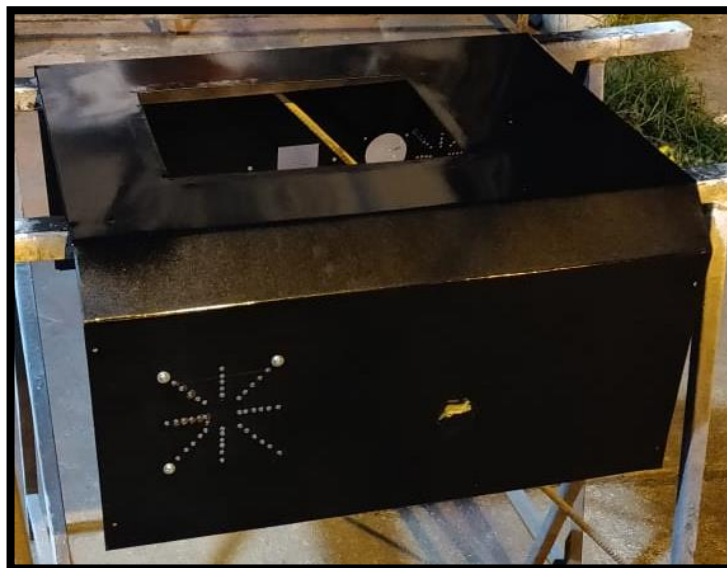


FIGURA 25: VISTA DE LA CARA IZQUIERDA DEL MODULO.

En la cara izquierda se hace otro grupo de huecos con el mismo objetivo de dejar circular el aire dentro del módulo.

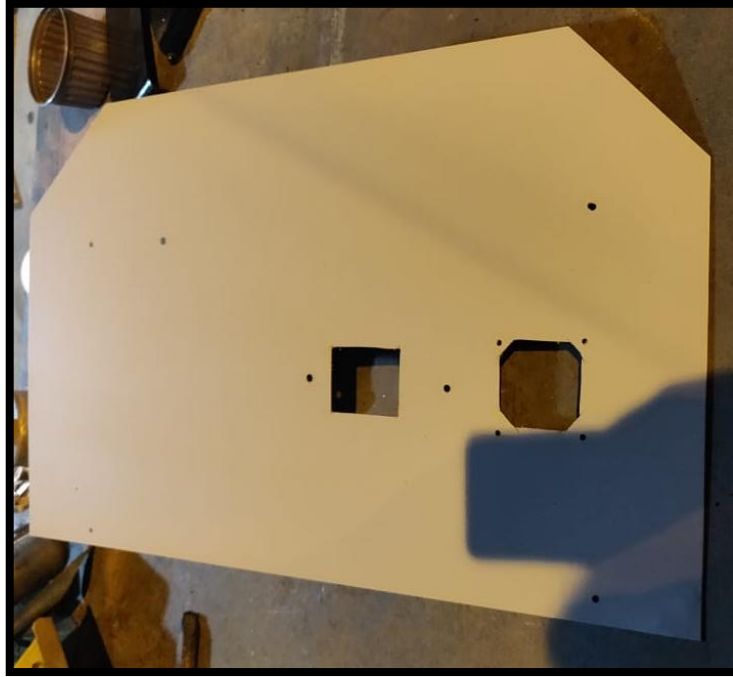


FIGURA 26: VISTA DEL PANEL POSTERIOR.

En la cara posterior hay dos espacios para el breaker principal y para la toma de entrada.

### **3.12.1. Panel frontal**

El panel frontal fue hecho con una lamina de zinc, recortada, fondeada, pintada y posteriormente estampada con un vinil, su función es proteger la parte interior del módulo de agentes mecánicos externos, al mismo tiempo de proteger a los usuarios de lesiones mecánicas en las transmisiones y de lesiones eléctricas por contacto con zonas energizadas.



FIGURA 27: PANEL FRONTAL CON VINIL TEMPORAL PARA HACER LOS HUECOS.

El lado izquierdo del panel frontal se puede observar el display, el teclado, los dos interruptores, dos pares de entradas para los sensores de voltaje, tanto DC como AC. En el centro la perilla del variac en caso de que se desee regular el voltaje en modo manual. A la izquierda un par de salidas DC, (dos positivos y dos negativos), un par de salidas AC (dos líneas 1, dos líneas 2, dos líneas 3, dos neutros). En la parte superior el nombre del módulo y el logo de la universidad.



FIGURA 28: PANEL FRONTAL, DISEÑADO EN AUTOCAD Y EDITADO EN PAINT.

Como observación se puede decir que, la altura del panel frontal es mayor a la del resto del chasis con el fin de evitar que se puedan ver aberturas en las uniones de este con el resto del chasis.



FIGURA 29: VISTA DEL MODULO TERMINADO DURANTE SU USO..

### 3.13. Banco de pruebas resistivo.

Para realizar las pruebas de regulación de voltaje con carga es conveniente usar un banco de pruebas, con la capacidad de dar diferentes niveles de carga que puedan irse aumentando o disminuyendo de manera discreta, en la universidad politécnica salesiana existe uno, este banco de pruebas puede usarse de forma monofásica y trifásica dependiendo de cómo se conecten sus puentes. A continuación, se mostrará una tabla con las diferentes impedancias que pueden ajustarse, y el porcentaje de carga que representan.



FIGURA 30: BANCO DE PRUEBAS RESISTIVO.

TABLA 4: VALORES POSIBLES DE CARGA EN EL BANCO DE RESISTENCIAS.

<b><i>CARGA [%]</i></b>	<b><i>RESISTENCIA [<math>\Omega</math>]</i></b>
0	40000000
2.5	1000
5	491.5
7.5	328.5
10	242.6
12.5	202.4
15	163.5
17.5	144.1
20	120.9
22.5	107.9
25	99
30	82.9
35	71

<b><i>CARGA [%]</i></b>	<b><i>RESISTENCIA [<math>\Omega</math>]</i></b>
40	62.8
45	55.8
50	50.2
55	45.8
60	42.1
65	39.4
70	36.1
75	33.8
80	31.7
85	30.7
90	32.5
95	27.6
100	26
102.5	25.4

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1. Pruebas al motor DC Hampden modelo D-300 (motor universal).

Las siguientes pruebas al motor DC se hacen con el fin de determinar, que conexión conviene usar para ser usada junto al variac, y el generador en un control de voltaje como el que se busca realizar en este proyecto.

#### 4.1.1. Motor de excitación separada

En esta prueba se conecta la armadura a una fuente de voltaje DC diferente de la fuente del devanado de campo, se debe encender primero la bobina de campo y elevar el voltaje de esta mientras se mide con un amperímetro su corriente, hasta que alcance su valor nominal.

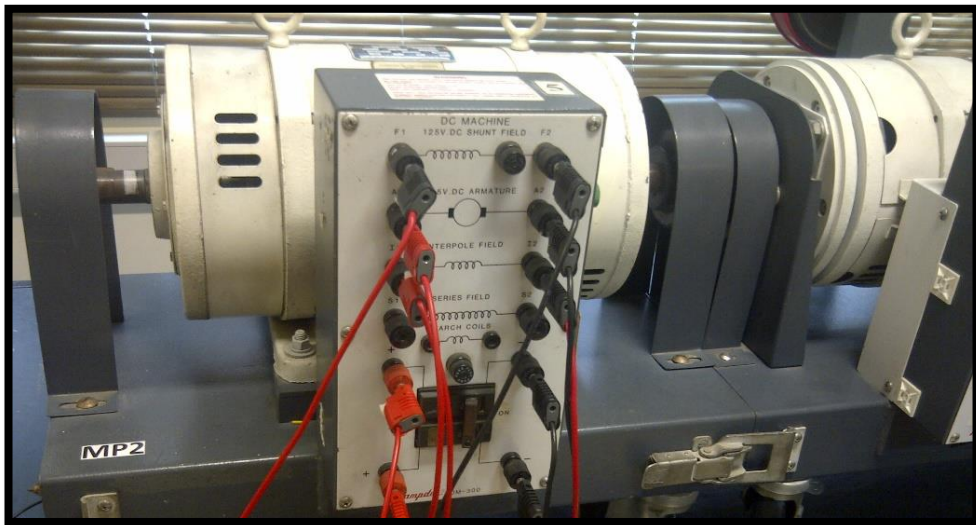


FIGURA 31: CONEXIÓN DE MOTOR DE EXCITACIÓN SEPARADA

TABLA 5: VALORES EXPERIMENTALES DE UN MOTOR CONECTADO INDEPENDIENTE

<i>Puntos</i>	<i>VT[V]</i>	<i>IA[A]</i>	<i>IL[A]</i>	<i>IF[Amp]</i>	<i>N[RPM]</i>	<i>Tcarga[N.M]</i>
1	127	2,9	2,9	0,55	1812	0,6
2	126,5	3,3	3,3	0,55	1799	0,8
3	125,7	4,1	4,1	0,55	1774	1
4	125,6	4,2	4,2	0,55	1770	1,25
5	125,6	4,6	4,6	0,55	1764	1,5
6	125,3	4,9	4,9	0,55	1759	1,65
7	124,5	5,5	5,5	0,55	1739	2
8	124,2	6,2	6,2	0,55	1721	2,3
9	124	6,4	6,4	0,55	1714	2,5
10	123,6	6,8	6,8	0,55	1701	2,8
11	123,4	7,2	7,2	0,55	1688	3
12	122,7	8,2	8,2	0,55	1668	3,6
13	121,9	9,1	9,1	0,55	1637	4,1
14	121,1	10,3	10,3	0,55	1606	4,7
15	119,2	12,8	12,8	0,55	1532	6

Ejemplo del cálculo realizado para cada uno de los puntos, tomando como referencia el primero de ellos.

$$Fem = E_a = V_t - \sum R I_a = (127) - (0.7 + 0.3)(2.9) = 124.1V.$$

$$\omega = \frac{1812 \text{ rev}}{\text{min}} * \frac{2\pi \text{ rad}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} = 189.75 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$$

$$P_{\text{conv}} = E_a * I_a = (124.1) * (2.9) = 359.89W.$$

$$P_{\text{cu}} = P_{\text{cu}}(\text{armadura}) + P_{\text{cu}}(\text{campo}).$$

$$P_{\text{cu}} = \sum R I_a^2$$

$$P_{\text{cu}} = (0.7 + 0.3)(2.9)^2 = 8.41W.$$

$$P_{\text{eje}} = T_{\text{carga}} * \omega.$$

$$P_{\text{eje}} = (0.6) * (189.75) = 113.85W.$$

$$P_{\text{mecánicas}} = P_{\text{conv}} - P_{\text{peje}}.$$

$$P_{\text{mecánicas}} = 359.89 - 113.85 = 246.04W.$$

$$P_{\text{entrada}} = V_t * I_l.$$

$$I_l = I_a.$$

$$P_{\text{entrada}} = 127 * 2.9 = 368.3W.$$

$$\%n = \frac{P_{\text{peje}}}{P_{\text{entrada}}} * 100.$$

$$\%n = \frac{113.85}{368.3} * 100 = 30.91\%.$$

$$P_{\text{conv}} = T_{\text{ind}} * \omega.$$

$$T_{\text{ind}} = \frac{P_{\text{conv}}}{\omega} = \frac{359.89}{189.75} = 1.89 N * m.$$

*Punto1.*

$$T_{\text{roz}} = T_{\text{ind}} - T_{\text{carga}} = 1.89 - 0.6 = 1.29N * m.$$

$$\%Rn = \frac{n_o - n_{\text{carga}}}{n_o} * 100$$

$$\%Rn = \frac{1812 - 1532}{1812} * 100 = 15.45\%.$$



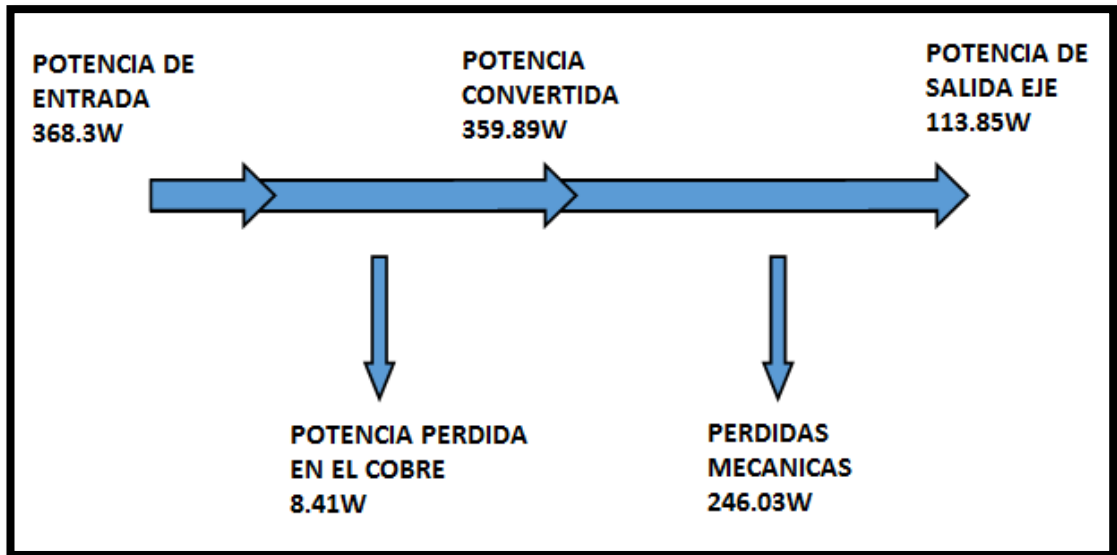


FIGURA 32: FLUJO DE POTENCIA PUNTO 1, MOTOR DE EXCITACIÓN SEPARADA.

Se puede observar rápidamente donde se encuentran las pérdidas de potencia, siendo las pérdidas mecánicas mucho mayores a las eléctricas.

A continuación, las características de operación del motor independiente.

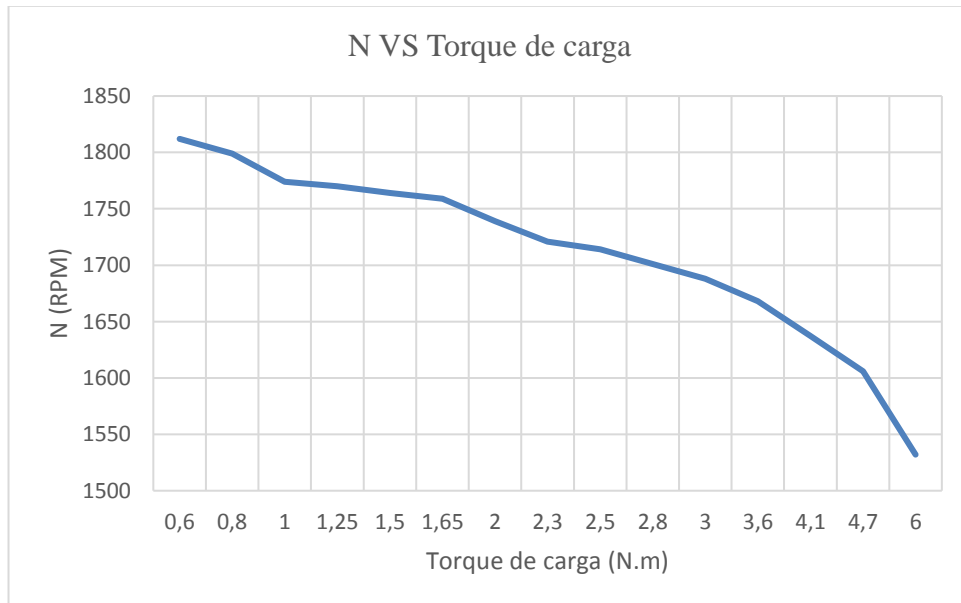


FIGURA 33: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE RPM VS TORQUE DE CARGA.

La gráfica muestra como la relación torque-revoluciones es inversamente proporcional de manera lineal hasta un cierto punto alrededor de los 3 N.m donde las revoluciones se van a pique. Es recomendable trabajar debajo de este punto para mantener una velocidad estable frente a aumentos de carga transitorios.

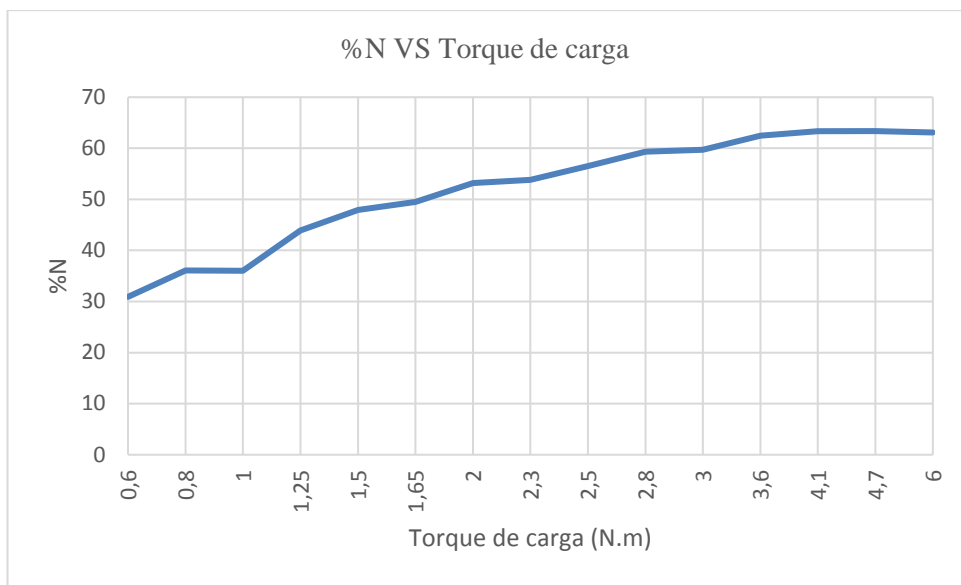


FIGURA 34: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE %N VS TORQUE DE CARGA.

Se puede observar que a mayor torque de carga la eficiencia de la maquina aumenta. Por tanto, para sacar el mayor provecho se puede trabajar valores mayores a 3 N.m en tanto no se considere la estabilidad de velocidad como una prioridad.

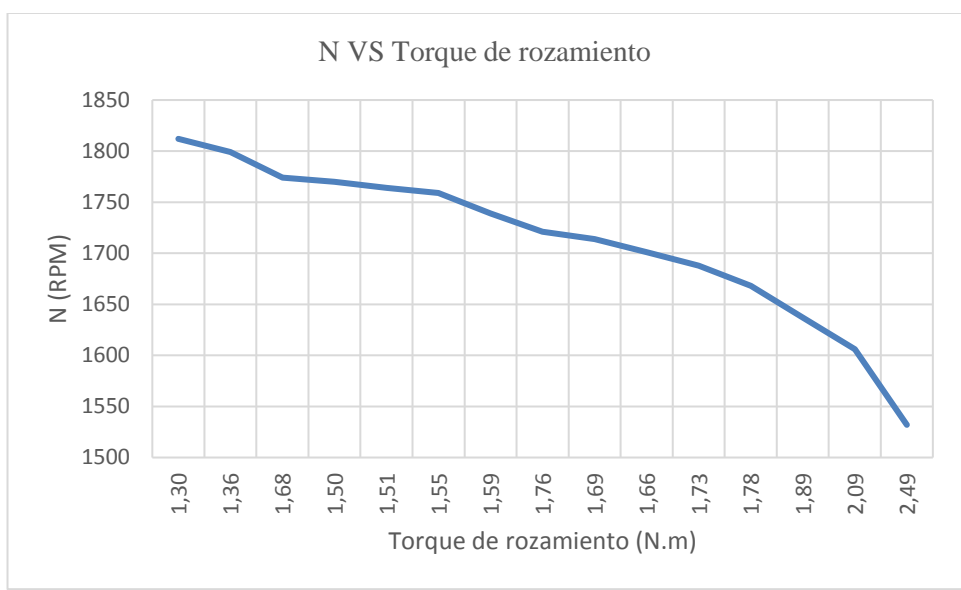


FIGURA 35: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE RPM VS TORQUE DE ROZAMIENTO.

La gráfica indica como las revoluciones disminuyen a medida que aumenta el torque de rozamiento, muy similar al caso de la grafica de torque de carga vs revoluciones, ya que el torque de rozamiento es función del torque de carga.

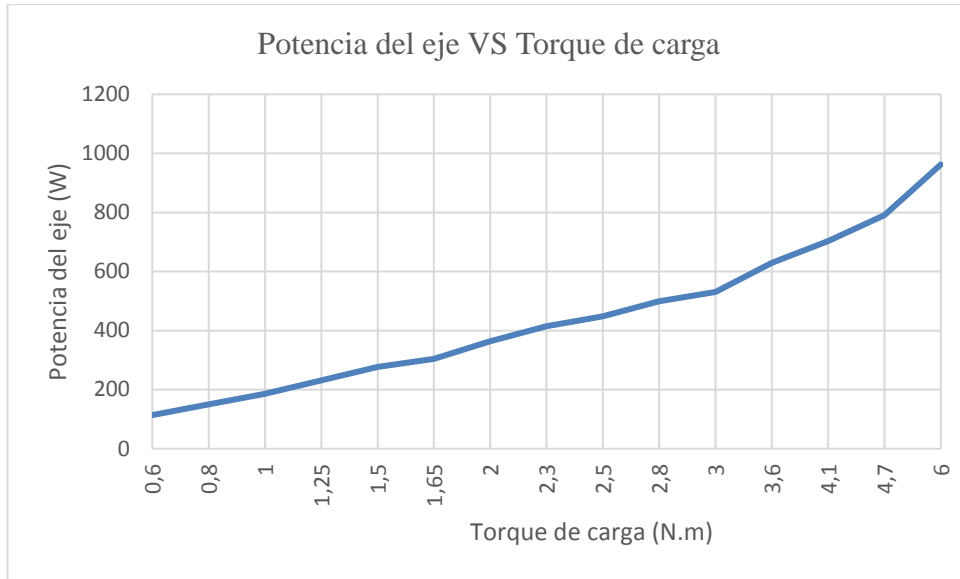


FIGURA 36: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE POTENCIA MECÁNICA VS TORQUE DE CARGA.

Se puede observar como la potencia del eje aumenta linealmente respecto al torque de carga hasta los 3 N.m presentando luego un crecimiento exponencial positivo, que se corresponde con la caída abrupta de revoluciones presenciada en el grafico de RPM vs torque de carga.

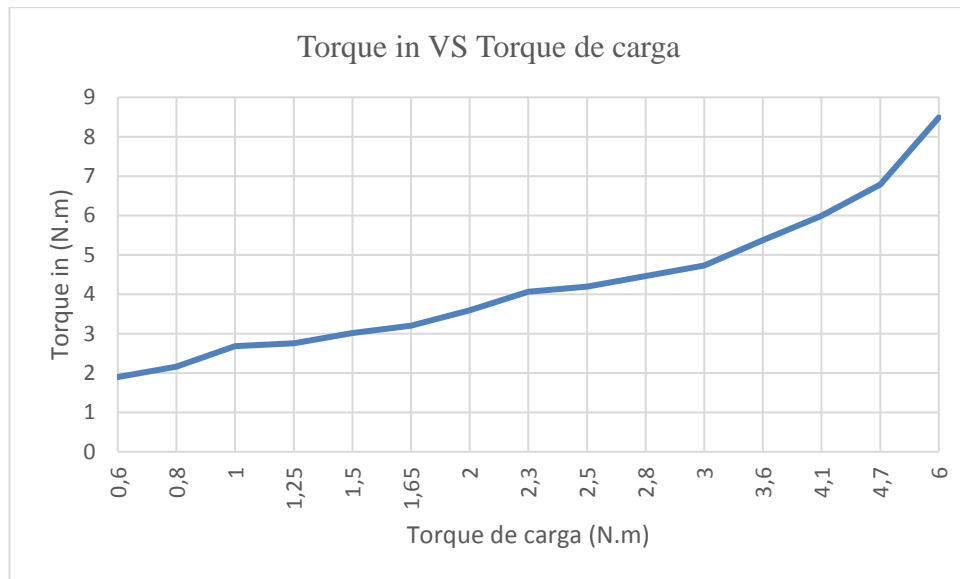


FIGURA 37: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE TORQUE DE ROZAMIENTO VS TORQUE DE CARGA.

Aquí se puede observar la causa de la caída de velocidad después de los 3 N.m, y es que el rozamiento es mucho mayor después de ese punto, y esto hace que la maquina muestre ese comportamiento

## Conclusiones de la prueba realizada

- $R_n=15.45\%$
- A más torque de carga menos velocidad
- A más torque de rozamiento menos velocidad
- A más torque de carga más potencia en el eje
- El torque de carga hace crecer el torque de rozamiento
- La máquina presenta gran cantidad de perdidas mecánicas

### 4.1.2. Pruebas motor en paralelo.

En esta prueba se conectará la armadura en paralelo con el campo y conectados a la misma fuente de voltaje a fin de observar su comportamiento.

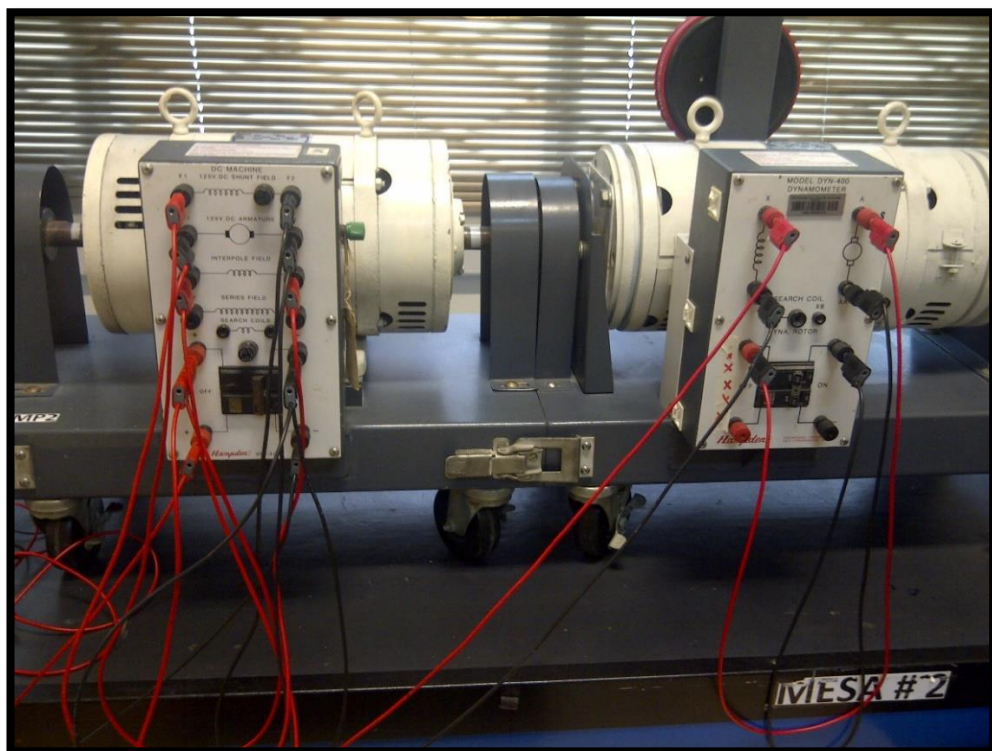


FIGURA 38: CONEXIÓN MOTOR EN PARALELO.

TABLA 6: VALORES EXPERIMENTALES DE UN MOTOR PARALELO.

<b>Puntos</b>	<b>VT(V)</b>	<b>IA(A)</b>	<b>IF(A)</b>	<b>IL(A)</b>	<b>n(RPM)</b>	<b>Tcarga(N.M)</b>
1	130,2	3,4	0,5	3,9	1815	0,7
2	128,9	4,9	0,5	5,4	1772	1,5
3	128,3	5,6	0,5	6,1	1761	1,75
4	127,7	6,1	0,5	6,6	1745	2
5	127,2	6,8	0,5	7,3	1728	2,35
6	126,5	7,6	0,5	8,1	1706	2,8
7	126,2	8,1	0,5	8,6	1691	3,1
8	125,6	8,7	0,5	9,2	1681	3,45
9	124,5	10	0,5	10,5	1638	4,15
10	124,2	10,7	0,5	11,2	1626	4,5
11	123,4	11,7	0,5	12,2	1617	5

Ejemplo del cálculo realizado para cada uno de los puntos, tomando como referencia el primero de ellos.

$$Fem = Ea = Vt - \sum RiIa = (130.2) - (0.7 + 0.3)(3.4) = 126.8V.$$

$$\omega = \frac{1815 \text{ rev}}{\text{min}} * \frac{2\pi \text{ rad}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} = 190.06 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}.$$

$$P_{\text{conv}} = Ea * Ia = (126.8) * (3.4) = 431.12W.$$

$$P_{\text{cu}} = P_{\text{cu}}(\text{armadura}) + P_{\text{cu}}(\text{campo}).$$

$$P_{\text{cu}} = \sum RiIa^2 + If^2RNFP.$$

$$RNFP = \frac{VT}{IF} = \frac{130.2}{0.5} = 260.4\Omega.$$

$$P_{\text{cu}} = (0.7 + 0.3)(3.4)^2 + (260.4)(0.5)^2 = 76.66W.$$

$$P_{\text{eje}} = T_{\text{carga}} * \omega.$$

$$P_{\text{eje}} = (0.7) * (190.06) = 133.042W.$$

$$P_{\text{mecánicas}} = P_{\text{conv}} - P_{\text{eje}}.$$

$$P_{\text{mecánicas}} = 431.12 - 133.042 = 298.078\text{W}.$$

$$P_{\text{entrada}} = V_t * I_l.$$

$$I_l = I_a + I_f.$$

$$I_l = 3.4 + 0.5 = 3.9\text{A}.$$

$$P_{\text{entrada}} = 130.2 * 3.9 = 507.78\text{W}.$$

$$\%n = \frac{P_{\text{eje}}}{P_{\text{entrada}}} * 100.$$

$$\%n = \frac{133.042}{507.78} * 100 = 26.20\%.$$

$$P_{\text{conv}} = T_{\text{ind}} * \omega.$$

$$T_{\text{ind}} = \frac{P_{\text{conv}}}{\omega} = \frac{431.12}{190.06} = 2.26\text{N} * \text{m}.$$

$$T_{\text{roz}} = T_{\text{ind}} - T_{\text{carga}} = 2.26 - 0.7 = 1.56\text{N} * \text{m}.$$

$$\%R_n = \frac{n_o - n_{\text{carga}}}{n_o} * 100$$

$$\%R_n = \frac{1815 - 1617}{1815} * 100 = 10.9\%.$$

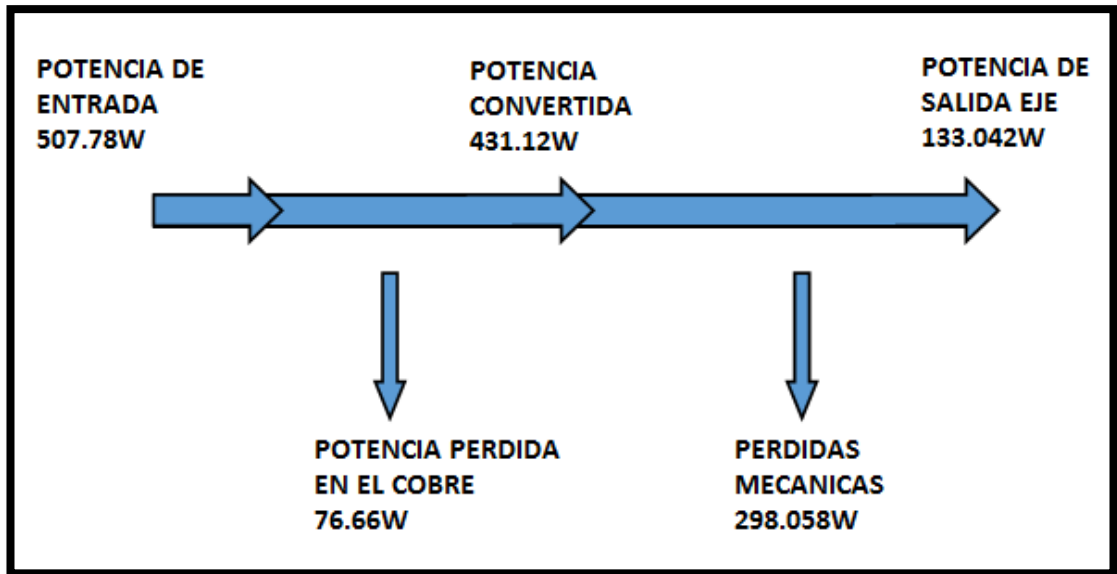


FIGURA 39: FLUJO DE POTENCIA EN EL PUNTO UNO.

Se puede observar un aumento de pérdida por efecto Joule significativo respecto a la configuración de motor independiente.

A continuación: las gráficas de características del motor paralelo.

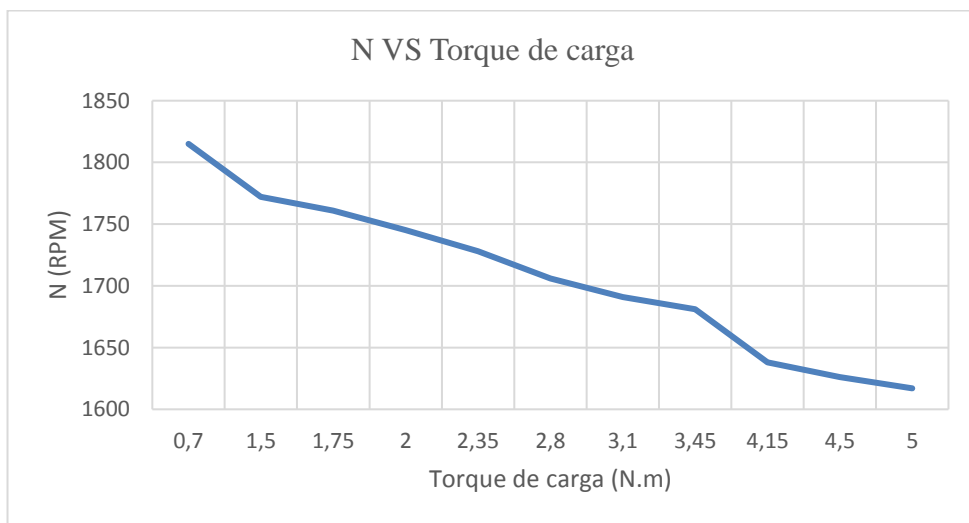


FIGURA 40: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE RPM VS TORQUE DE CARGA.

Como se puede observar el comportamiento de la velocidad es inverso y lineal en todos los puntos respecto al torque de carga, esto supone una ventaja en cuanto a estabilidad de velocidad respecto al torque.

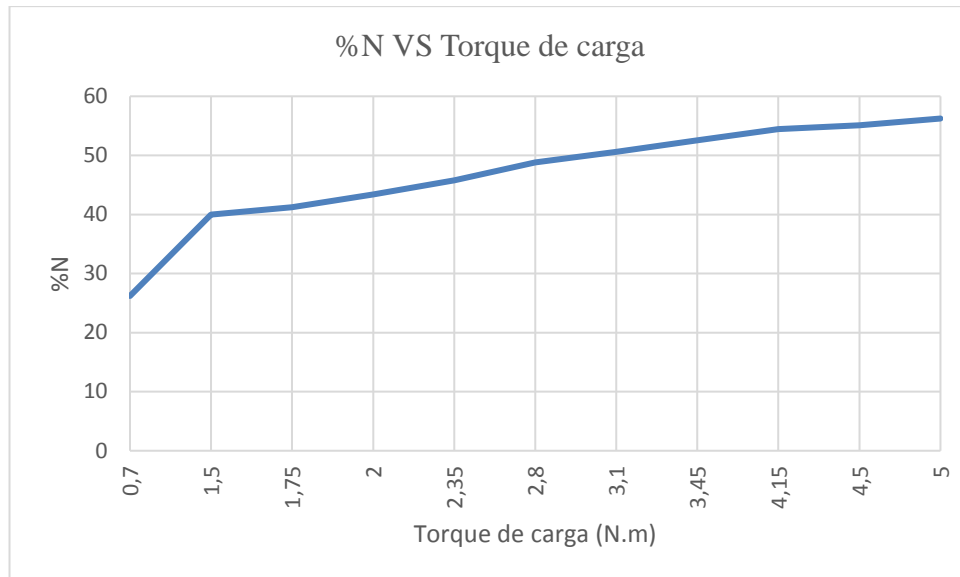


FIGURA 41: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE % N VS TORQUE DE CARGA.

En la gráfica de la eficiencia respecto al torque se puede notar al igual que en el caso del motor independiente, que esta aumenta junto con el torque de carga en forma bastante regular exceptuando los puntos con torques menores a 1 N.m.

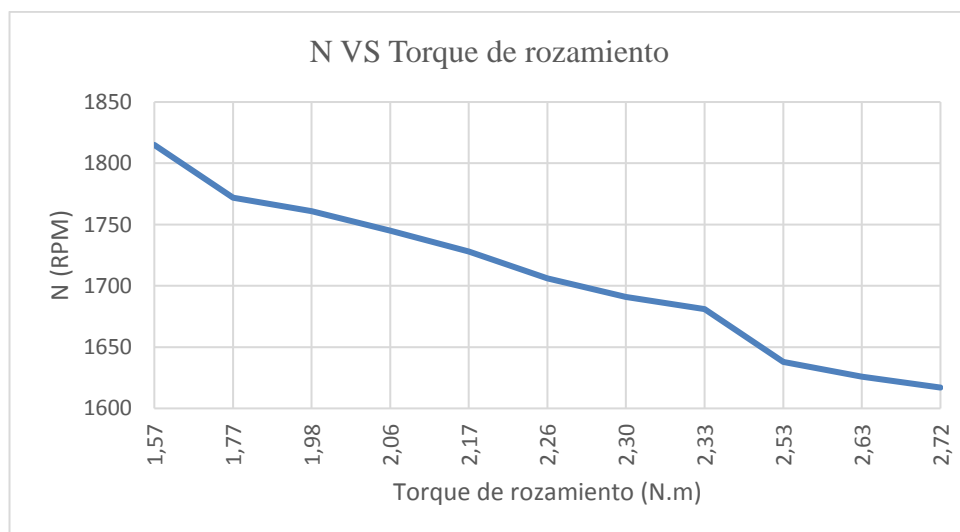


FIGURA 42: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE RPM VS TORQUE DEROZAMIENTO.

Como es de esperar las revoluciones decrecen al aumentar el torque de rozamiento de la maquina en forma lineal y sin mayores variaciones.



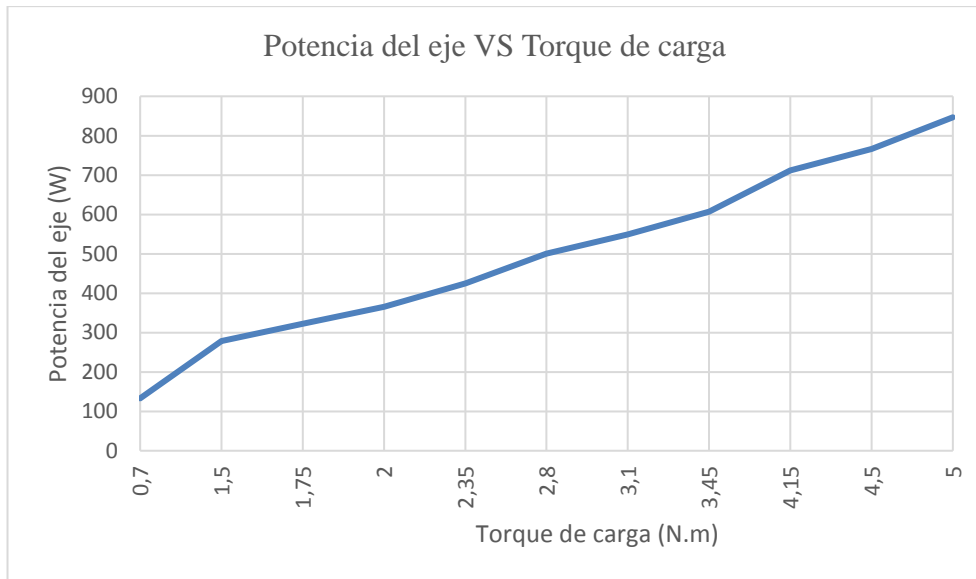


FIGURA 43: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE POTENCIA MECÁNICA VS TORQUE DE CARGA.

Con una relación regular entre el torque de carga y la velocidad es predecible que la curva de la potencia sea también regular.

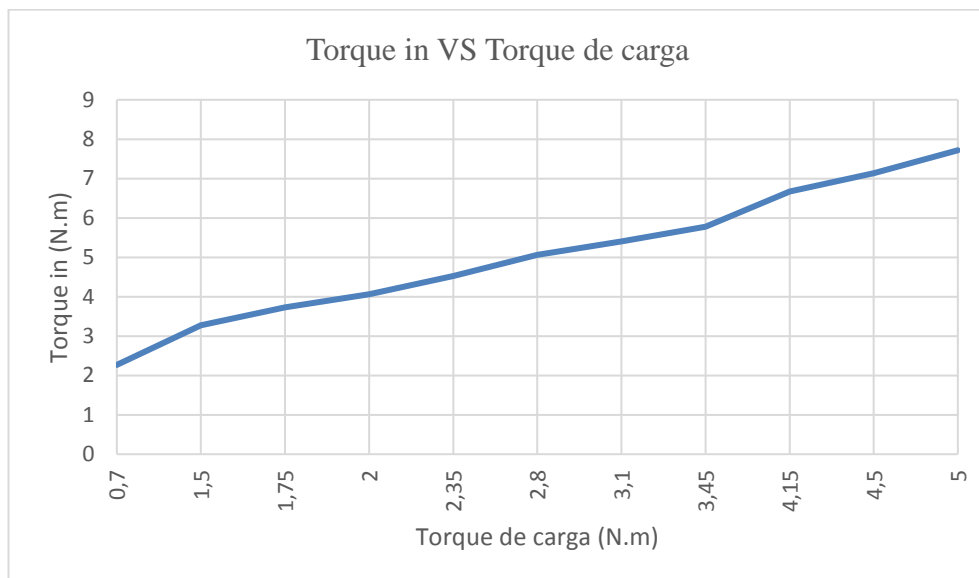


FIGURA 44: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE TORQUE ROZAMIENTO VS TORQUE DE CARGA.

En cuanto a la relación entre el torque de carga con el torque inducido la grafica muestra como el torque inducido se adapta al torque de carga en todo momento.

Conclusiones de la prueba realizada.

- $R_n = 10.9\%$
- El motor paralelo tiene muy poco torque de arranque por lo que necesita el uso de un primo-motor
- El motor paralelo tiene una velocidad muy estable
- La máquina tiene muchas pérdidas mecánicas
- A más torque menos velocidad
- A más torque más rozamiento

#### 4.1.3. Pruebas motor serie.

Para esta prueba se conecta la entrada del campo a la fuente, la salida del campo a la entrada de la armadura, la salida de la armadura a el negativo de la fuente, haciendo que la corriente del inducido sea la misma que atraviesa el bobinado de campo.

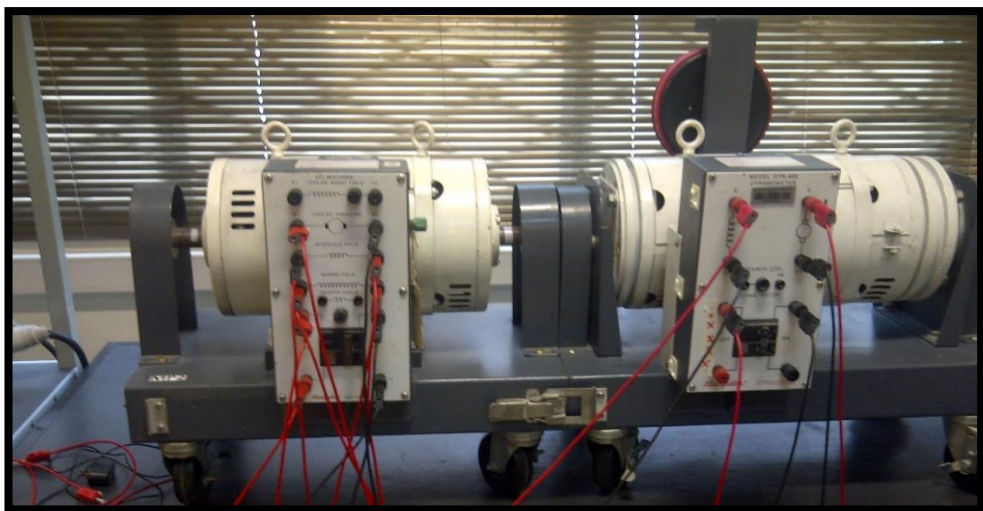


Figura 45: Motor conexión serie.

TABLA 7: VALORES EXPERIMENTALES DE UN MOTOR CONECTADO EN SERIE

<i>Puntos</i>	<i>VT(V)</i>	<i>IA(A)</i>	<i>IL(A)</i>	<i>ISA</i>	<i>n(RPM)</i>	<i>Tcarga(N.m)</i>
1	53,45	6,5	6,5	6,5	1839	0,6
2	53,1	7,1	7,1	7,1	1642	0,75
3	52,7	7,7	7,7	7,7	1511	1
4	52,4	8,5	8,5	8,5	1360	1,4
5	52	9,2	9,2	9,2	1237	1,7
6	52	9,3	9,3	9,3	1206	2
7	51,7	9,8	9,8	9,8	1131	2,25
8	51,5	10,3	10,3	10,3	1062	2,5
9	51,3	10,8	10,8	10,8	1011	2,75
10	51,2	11,2	11,2	11,2	960,7	3
11	51	11,6	11,6	11,6	929,2	3,25
12	50,9	11,8	11,8	11,8	901,5	3,5
13	50,6	12,6	12,6	12,6	839,5	4
14	50,3	13,3	13,3	13,3	791,2	4,5
15	50	14	14	14	746,9	5

Ejemplo del cálculo realizado para cada uno de los puntos, tomando como referencia el primero de ellos.

$$Fem = E_a = V_t - \sum R I_a = (53.45) - (0.7 + 0.3 + 0.3)(6.5) = 45V.$$

$$\omega = \frac{1839 \text{ rev}}{\text{min}} * \frac{2\pi \text{ rad}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} = 192.5 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$$

$$P_{\text{conv}} = E_a * I_a = (45) * (6.5) = 292.5W.$$

$$P_{\text{cu}} = P_{\text{cu}}(\text{armadura}) + P_{\text{cu}}(\text{campo}).$$

$$P_{\text{cu}} = \sum R I_a^2 + R I_F^2$$

$$P_{\text{cu}} = (0.7 + 0.3 + 0.3)(6.5)^2 = 54.925W.$$

$$P_{\text{eje}} = T_{\text{carga}} * \omega.$$

$$P_{\text{eje}} = (0.6) * (192.5) = 115.5W.$$

$$P_{\text{mecánicas}} = P_{\text{conv}} - P_{\text{eje}}.$$

$$P_{\text{mecánicas}} = 292.5 - 115.5\text{W} = 177\text{W}.$$

$$P_{\text{entrada}} = V_t * I_l.$$

$$I_l = I_a.$$

$$P_{\text{entrada}} = 53.45 * 6.5 = 347.425\text{W}.$$

$$\%n = \frac{P_{\text{eje}}}{P_{\text{entrada}}} * 100.$$

$$\%n = \frac{115.5}{347.425} * 100 = 33.24\%.$$

$$P_{\text{conv}} = T_{\text{ind}} * \omega.$$

$$T_{\text{ind}} = \frac{P_{\text{conv}}}{\omega} = \frac{292.5}{192.5} = 1.51 \text{ N} * \text{m}.$$

$$T_{\text{roz}} = T_{\text{ind}} - T_{\text{carga}} = 1.51 - 0.6 = 0.91\text{N} * \text{m}.$$

$$\%R_n = \frac{n_o - n_{\text{carga}}}{n_o} * 100$$

$$\%R_n = \frac{1839 - 746.9}{1839} * 100 = 59.38\%.$$

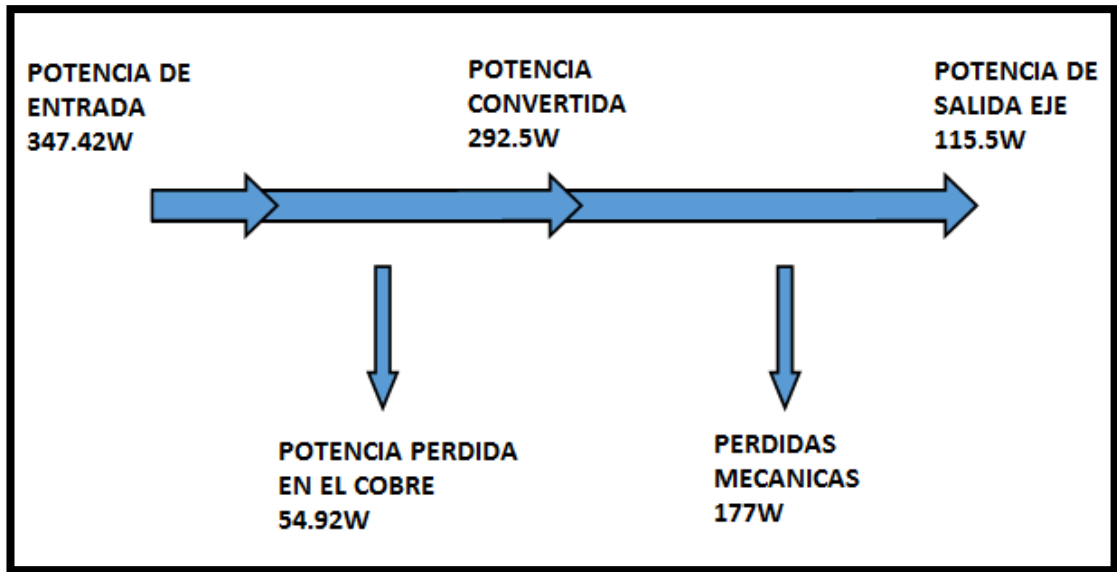


FIGURA 46: FLUJO DE POTENCIAS MOTOR SERIE PUNTO UNO.

Se puede observar como la potencia eléctrica es en este caso la tercera parte de la potencia perdida por factores mecánicos.

A continuación: las características técnicas de operación de un motor serie.

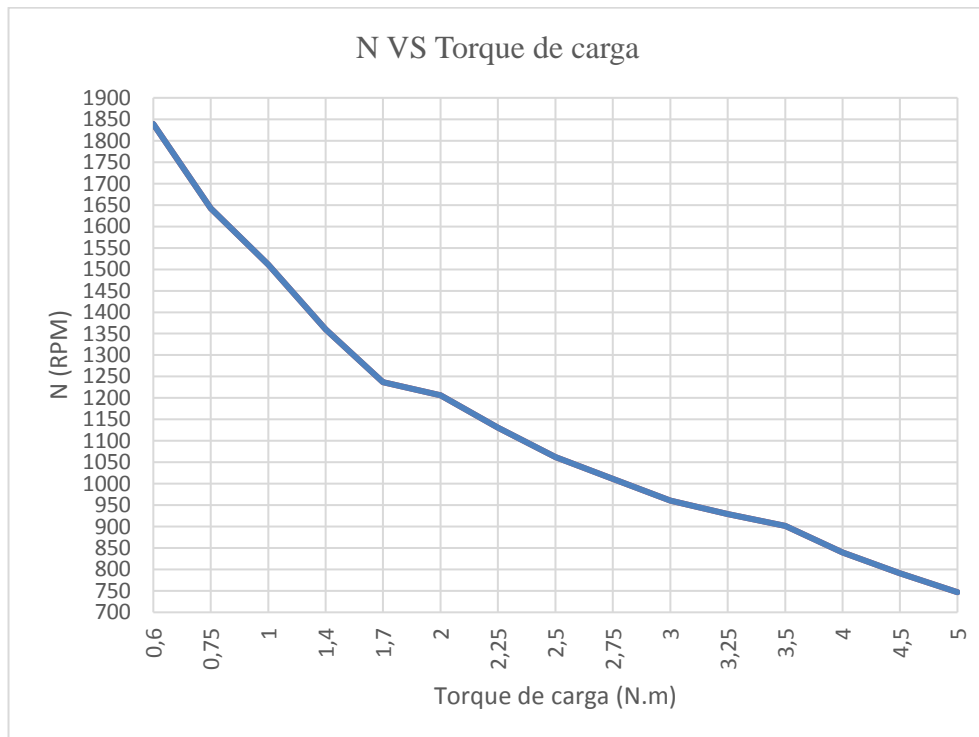


FIGURA 47: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE RPM VS TORQUE DE CARGA.

Como en los anteriores casos y como va a ser siempre, la grafica vuelve a mostrar una relación inversa, con la particularidad de una tendencia no del todo lineal.

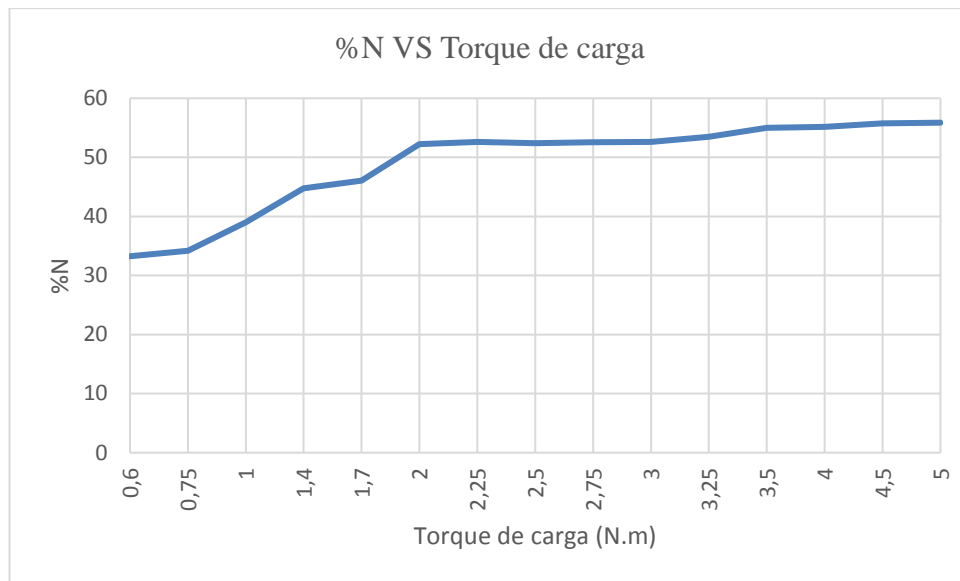


FIGURA 48: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE % N VS TORQUE DE CARGA.

Se puede observar como la eficiencia aumenta linealmente hasta los 2 N.m y permanece virtualmente estable luego eso.

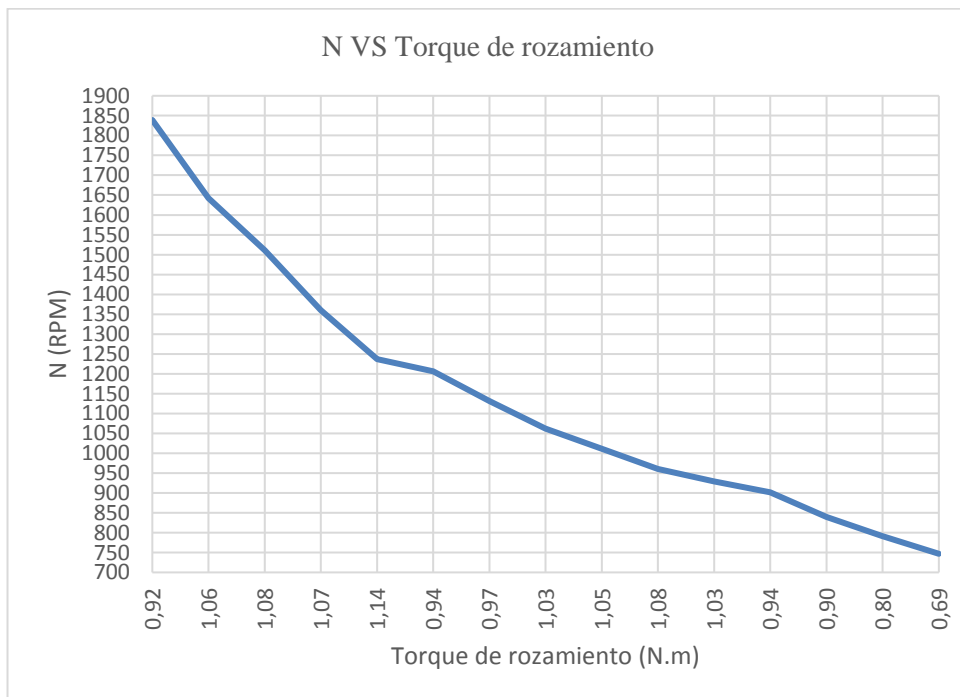


FIGURA 49: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE RPM VS TORQUE DEROZAMIENTO.

Ya que el rozamiento es en sí una carga mecánica la grafica describe un patrón muy parecido al del torque de carga vs RPM.

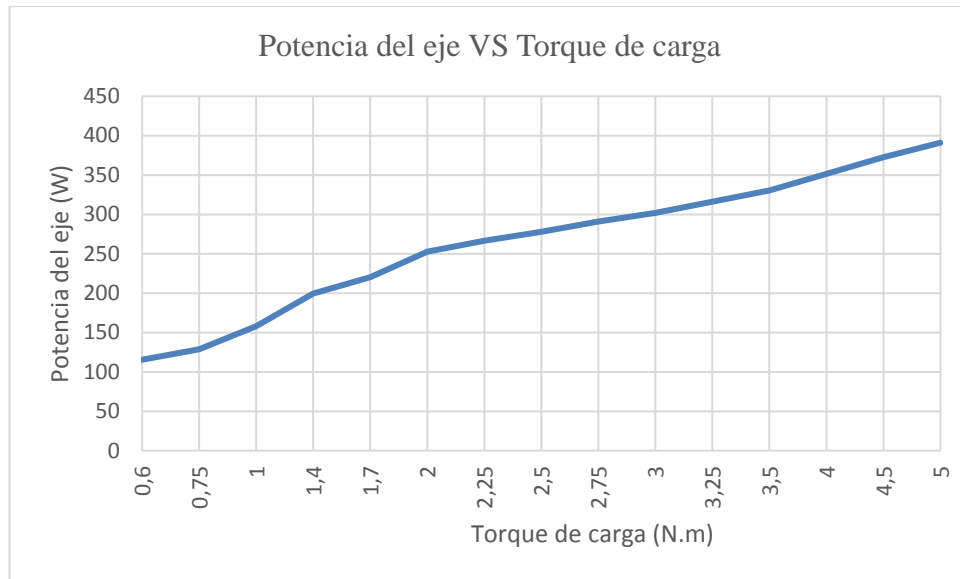


FIGURA 50: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE POTENCIA MECÁNICA VS TORQUE DE CARGA.

En esta grafica se logra observar dos pendientes distintas, una mas pronunciada en el sector donde el torque de carga es inferior a 2 N.m y otra menos pronunciada, pero mas regular luego de ese punto.

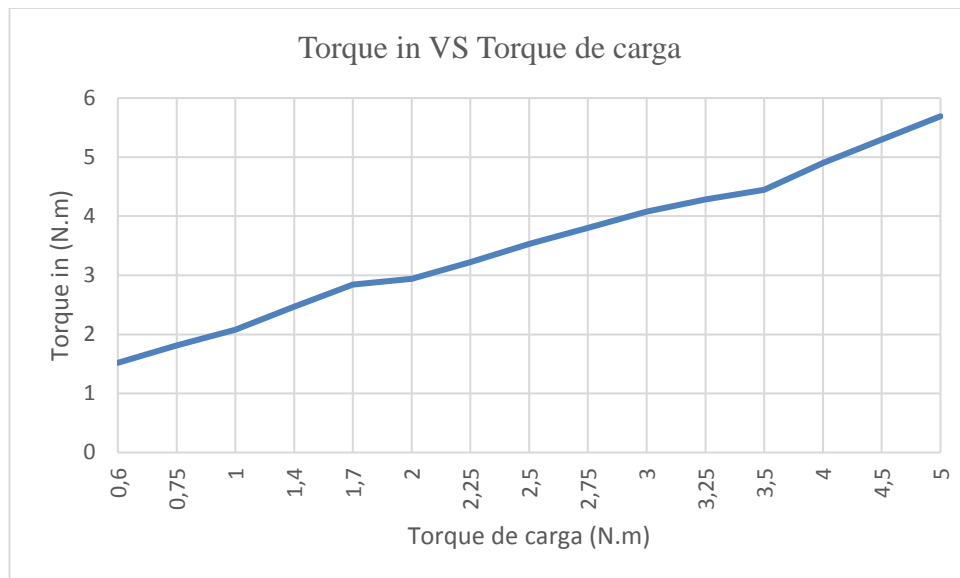


FIGURA 51: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE TORQUE ROZAMIENTO VS TORQUE DE CARGA.

En cuanto al torque inducido en función del torque de carga se tiene una recta con una pendiente bastante uniforme. Lo cual indica un comportamiento muy muy estable en cuanto a torque.

Conclusiones de la prueba realizada.

- $R_n = 59.38\%$
- El motor Serie tiene un torque de arranque muy fuerte
- El motor serie no tiene una velocidad muy estable
- El motor tiene muchas pérdidas mecánicas
- A más torque mucha menos velocidad
- Puede ser arrancado con cargas muy grandes

#### 4.1.4. Pruebas motor Conexión Compuesta Derivación Corta.

Para las pruebas del motor CCC, se debe usar tanto el campo serie como el campo paralelo, conectándose primero el campo serie, y la salida del bobinado serie conectado a la entrada del bobinado paralelo.

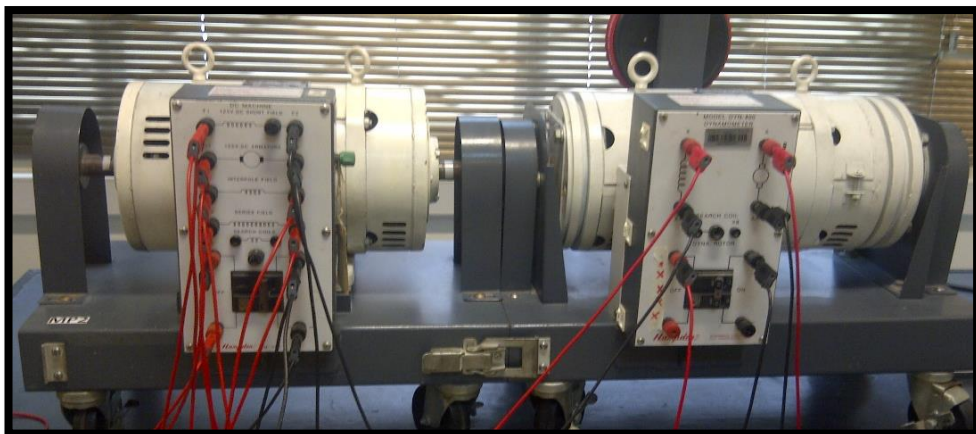


FIGURA 52: MOTOR CONEXIÓN COMPUESTA CORTA.

TABLA 8: VALORES EXPERIMENTALES DE UN MOTOR CCC

<i>Puntos</i>	<i>VT[V]</i>	<i>IA[A]</i>	<i>IL[A]</i>	<i>IFP[A]</i>	<i>IFS[A]</i>	<i>N[RPM]</i>	<i>Tcarga[N.M]</i>
1	138	2,7	3,3	0,6	3,3	1801	0,5
2	137,8	3,3	3,9	0,6	3,9	1786	0,75
3	137,6	3,7	4,3	0,6	4,3	1766	1
4	137,3	4	4,6	0,6	4,6	1756	1,2
5	136,8	4,5	5,2	0,6	5,2	1743	1,52



6	136,6	4,9	5,5	0,6	5,5	1718	1,75
7	136,2	5,2	5,8	0,6	5,8	1701	2
8	135,8	5,5	6,3	0,6	6,3	1690	2,25
9	135,4	5,9	6,6	0,6	6,6	1668	2,5
10	135	6,2	7	0,58	7	1655	2,75
11	134,7	6,4	7,2	0,58	7,2	1644	3
12	134,4	7	7,7	0,58	7,7	1628	3,3
13	133,9	7,6	8,4	0,57	8,4	1602	3,75
14	133,3	8,2	9	0,57	9	1581	4,28
15	132,6	8,9	9,7	0,56	9,7	1556	4,7
16	132,5	9,2	10	0,56	10	1547	5
17	131,6	9,8	10,6	0,56	10,6	1518	5,32
18	131,2	10,65	11,2	0,55	11,2	1503	5,7

Ejemplo del cálculo realizado para cada uno de los puntos, tomando como referencia el primero de ellos.

$$Fem = Ea = Vt - \sum RIa + RfsIs = (138) - (0.7 + 0.3)(2.7) - (0.3)(3.3) = 136.29V.$$

$$\omega = \frac{1801 \text{ rev}}{\text{min}} * \frac{2\pi\text{rad}}{\text{min}} * \frac{1\text{min}}{60\text{seg}} = 188.60 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}.$$

$$P_{conv} = Ea * Ia = (136.29) * (2.7) = 367.98W.$$

$$P_{cu} = P_{cu}(\text{armadura}) + P_{cu}(\text{campo}).$$

$$P_{cu} = \sum RIa^2 + If^2RNFP + IS^2RNFS.$$

$$RNFP = \frac{VT}{IF} = \frac{138}{0.6} = 230\Omega.$$

$$P_{cu} = (0.7 + 0.3)(2.7)^2 + (230\Omega)(0.6)^2 + (0.3)(3.3)^2 = 93.35W.$$

$$P_{eje} = T_{carga} * \omega.$$

$$P_{eje} = (0.5) * (188.6) = 94.3W.$$

$$P_{\text{mecánicas}} = P_{\text{conv}} - P_{\text{peje}}.$$

$$P_{\text{mecánicas}} = 367.98 - 94.3 = 273.68 \text{ W}.$$

$$P_{\text{entrada}} = V_t * I_l.$$

$$I_l = I_a + I_f.$$

$$I_l = 2.7 + 0.6 = 3.3 \text{ A}.$$

$$P_{\text{entrada}} = 138 * 3.3 = 455.4 \text{ W}.$$

$$\%n = \frac{P_{\text{peje}}}{P_{\text{entrada}}} * 100.$$

$$\%n = \frac{94.3}{455.4} * 100 = 20.7\%.$$

$$P_{\text{conv}} = T_{\text{ind}} * \omega.$$

$$T_{\text{ind}} = \frac{P_{\text{conv}}}{\omega} = \frac{367.98}{188.6} = 1.95 \text{ N} * \text{m}.$$

$$T_{\text{roz}} = T_{\text{ind}} - T_{\text{carga}} = 1.95 - 0.5 = 1.45 \text{ N} * \text{m}.$$

$$\%R_n = \frac{n_o - n_{\text{carga}}}{n_o} * 100$$

$$\%R_n = \frac{1801 - 1503}{1801} * 100 = 16.54\%.$$

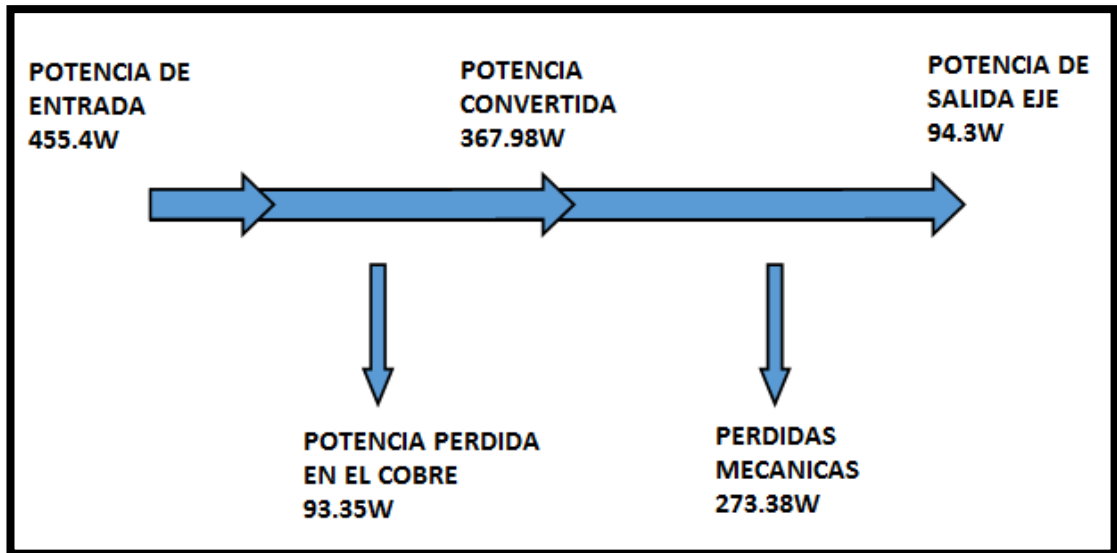


FIGURA 53: FLUJO DE POTENCIAS PUNTO 1 MOTOR CCC

Con la configuración actual se observa un parecido con el motor paralelo en cuanto a la proporción de las pérdidas mecánicas respecto a las del cobre, sin mencionar que la potencia de salida es menos de la cuarta parte de la de entrada, dando a entender su baja eficiencia, al menos en el punto uno.

A continuación: las características técnicas de operación de un motor CCC.

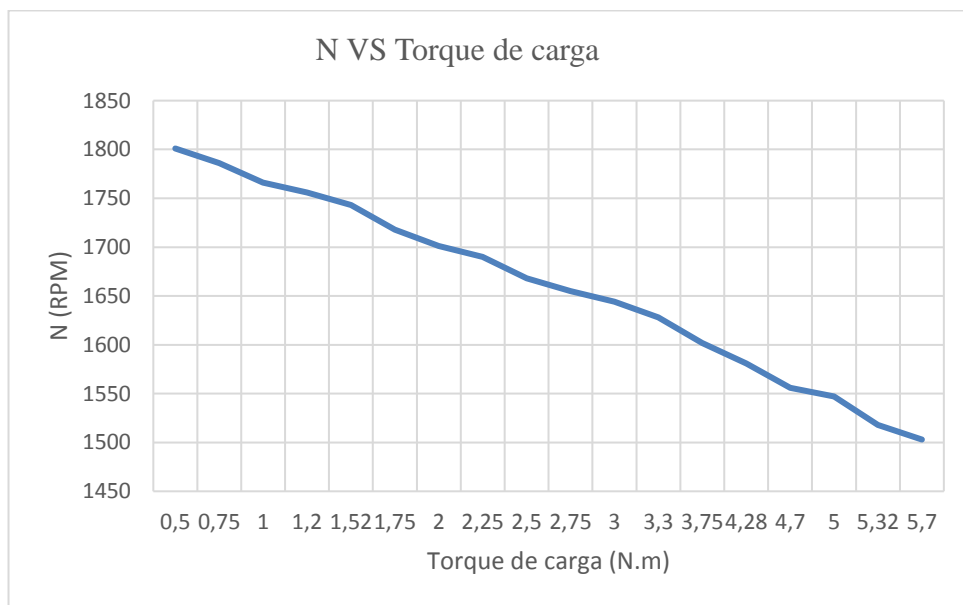


FIGURA 54: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE RPM VS TORQUE DE CARGA.

En la gráfica se observa una relación lineal con una pendiente negativa, lo cual indica que la velocidad disminuye en forma lineal a medida que el torque de carga aumenta.

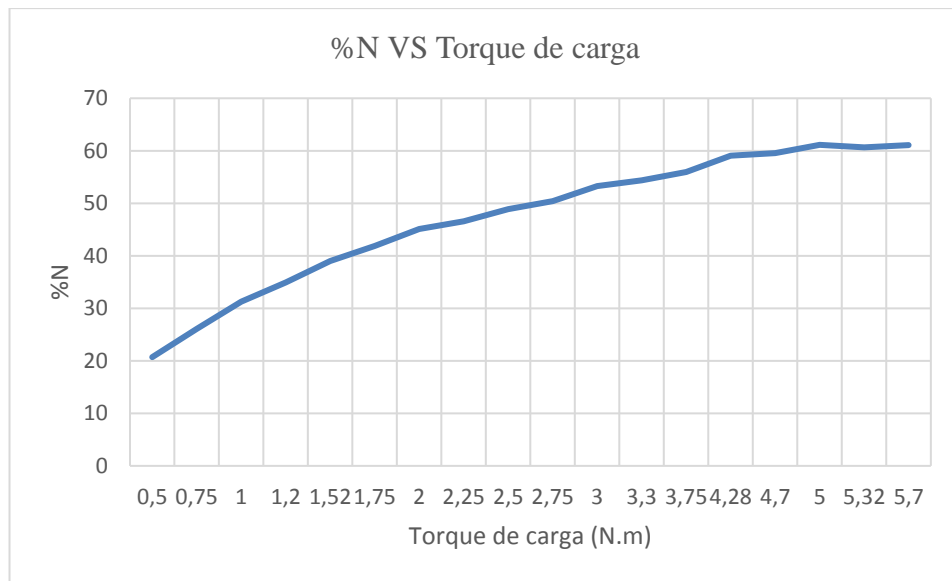


FIGURA 55: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE % NVS TORQUE DE CARGA.

La grafica de la eficiencia vs torque de carga, muestra como el crecimiento de la eficiencia respecto a la carga va siendo menos acentuado a medida que se llega al 60%, dibujando una función de naturaleza logarítmica.

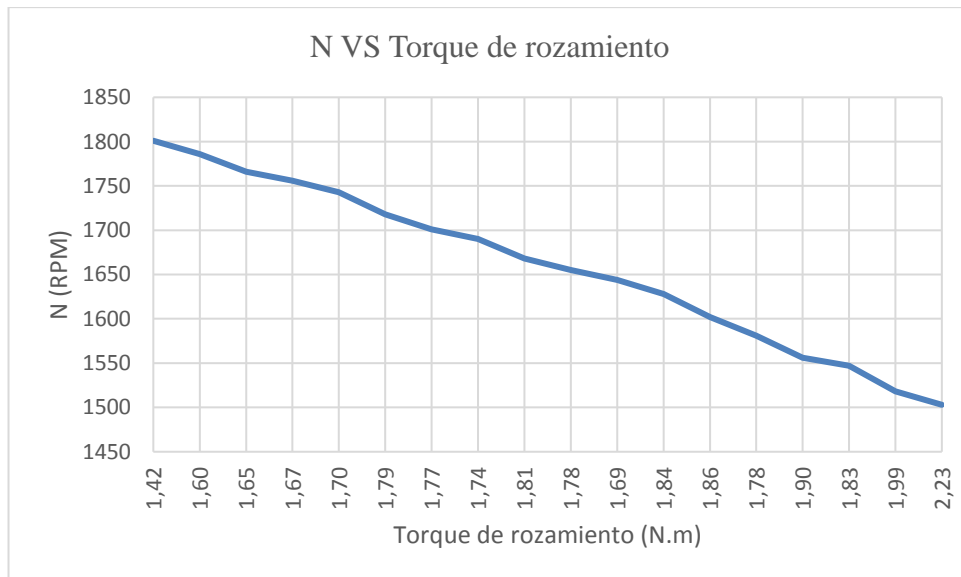


FIGURA 56: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE RPM VS TORQUE DEROZAMIENTO.

En cuanto a la velocidad en función del rozamiento se puede ver la típica linealidad inversa, que indica que las RPM disminuyen con el rozamiento.

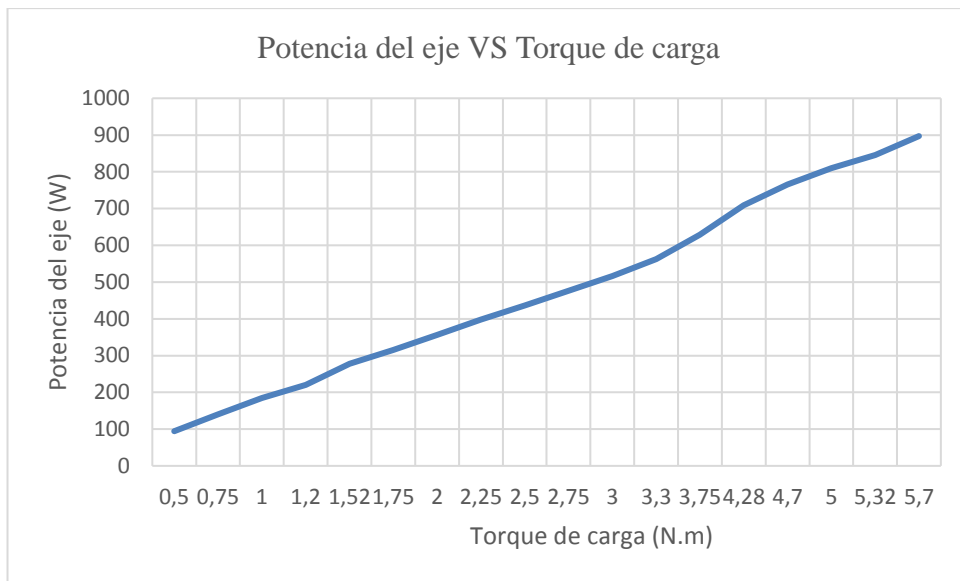


FIGURA 57: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE POTENCIA MECÁNICA VS TORQUE DE CARGA.

Como la velocidad es lineal respecto al torque de carga también lo será la potencia del eje cuya ecuación es la multiplicación de la velocidad angular por el torque de carga.

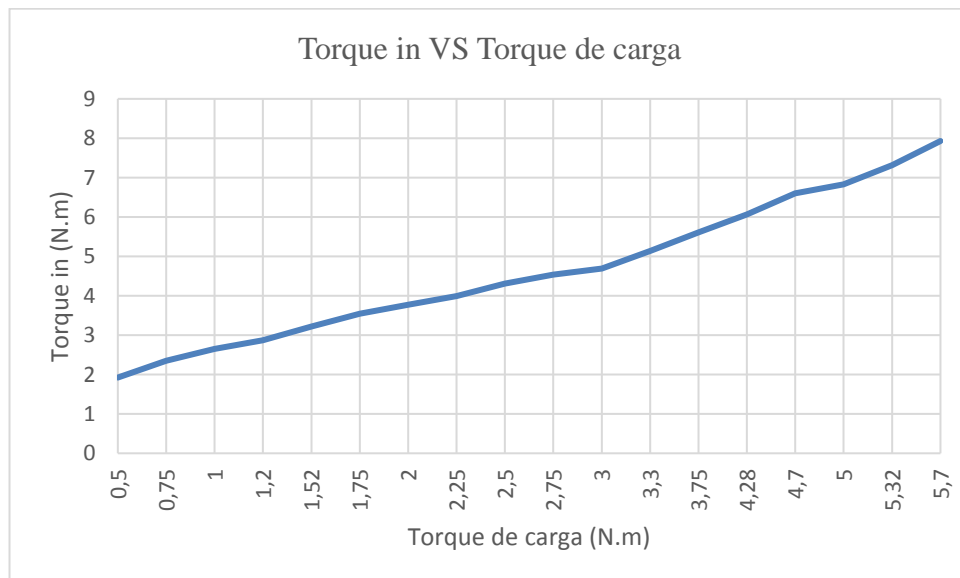


FIGURA 58: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE TORQUE ROZAMIENTO VS TORQUE DE CARGA.

El torque inducido presenta linealidad con dos pendientes diferentes, una menor previo al torque de 3 N.m y una mayor después de este valor

## Conclusión de la prueba

- $R_n = 16.54\%$
- Tiene un torque de arranque fuerte
- Tiene una buena estabilidad de velocidad
- d.- Tiene muchas pérdidas mecánicas
- A más torque menos velocidad
- A más torque más fricción

### 4.1.5. Pruebas motor Compuesto Conexión Larga

Para realizar la prueba del motor conectado en derivación larga se debe conectar en serie el devanado serie con el inducido, y estos dos en paralelo al devanado Shunt, de forma que el voltaje que cae en el devanado paralelo sea igual al voltaje terminal de entrada, y la corriente de inducido sea igual que la del campo en serie.

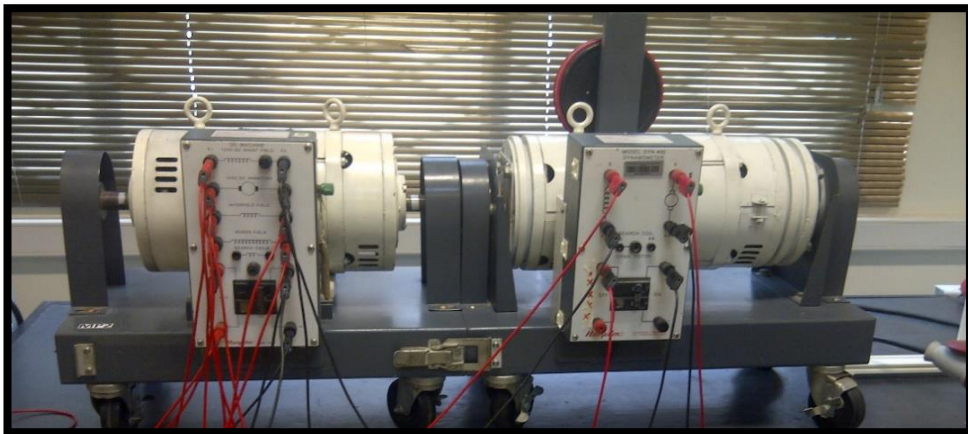


FIGURA 59: MOTOR COMPUESTO CONEXIÓN LARGA

TABLA 9: VALORES EXPERIMENTALES MOTOR COMPUESTO CONEXIÓN LARGA

<i>Puntos</i>	<i>VT(V)</i>	<i>IL(A)</i>	<i>IA(A)</i>	<i>IFP(A)</i>	<i>IFS(A)</i>	<i>n(RPM)</i>	<i>Tcarga(N.M)</i>
1	133,2	3,7	2,4	1,3	2,4	1800	0,5
2	132,7	4,4	3,1	1,3	3,1	1764	0,75
3	132,2	4,8	3,5	1,3	3,5	1743	1
4	131,9	5,1	3,9	1,3	3,9	1722	1,25
5	131,7	5,3	4,1	1,4	4,1	1714	1,5
6	131,4	5,6	4,4	1,4	4,4	1702	1,75
7	130,85	6,2	5	1,3	5	1675	2
8	130,6	6,7	5,4	1,4	5,4	1649	2,25
9	130,4	7	5,8	1,3	5,8	1638	2,5
10	130,2	7,5	6,2	1,3	6,2	1620	2,75
11	129,9	7,8	6,6	1,3	6,6	1610	3
12	129,7	8,2	7	1,3	7	1596	3,25
13	129,5	8,6	7,4	1,3	7,4	1580	3,5
14	129,2	9,3	8,1	1,3	8,1	1555	4
15	128,6	10,1	8,8	1,3	8,8	1525	4,5
16	127,9	11	9,7	1,3	9,7	1495	5,1

Ejemplo del cálculo realizado para cada uno de los puntos, tomando como referencia el primero de ellos.

$$E_m = E_a = V_t - \sum R I_a + R_f I_s = (133.2) - (0.7 + 0.3 + 0.3)(2.4) = 130.08V.$$

$$\omega = \frac{1800 \text{ rev}}{\text{min}} * \frac{2\pi \text{ rad}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} = 188.49 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}.$$

$$P_{\text{conv}} = E_a * I_a = (130.08) * (2.4) = 312.192W.$$

$$P_{\text{cu}} = P_{\text{cu}}(\text{armadura}) + P_{\text{cu}}(\text{campo}).$$

$$P_{\text{cu}} = \sum R I_a^2 + I_f^2 R_{\text{NFP}} + I_s^2 R_{\text{NFS}}.$$

$$R_{\text{NFP}} = \frac{V_T}{I_F} = \frac{133.2}{1.3} = 102.46\Omega.$$

$$P_{cu} = (0.7 + 0.3)(2.4)^2 + (102.46)(1.3)^2 + (0.3)(2.4)^2 = 180.63W.$$

$$P_{eje} = T_{carga} * \omega.$$

$$P_{eje} = (0.5) * (188.49) = 94.245W.$$

$$P_{mecánicas} = P_{conv} - P_{eje}.$$

$$P_{mecánicas} = 312.19 - 94.24W = 217.95W.$$

$$P_{entrada} = V_t * I_l.$$

$$I_l = I_a + I_f.$$

$$I_l = 2.4 + 1.3 = 3.7A.$$

$$P_{entrada} = 133.2 * 3.7 = 492.84W.$$

$$\%n = \frac{P_{eje}}{P_{entrada}} * 100.$$

$$\%n = \frac{94.24}{492.84} * 100 = 19.12\%.$$

$$P_{conv} = T_{ind} * \omega.$$

$$T_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega} = \frac{312.19}{188.49} = 1.65N * m.$$

$$T_{roz} = T_{ind} - T_{carga} = 1.65 - 0.5 = 1.15 N * m.$$

$$\%R_n = \frac{n_o - n_{carga}}{n_o} * 100$$

$$\%R_n = \frac{1800 - 1495}{1800} * 100 = 16.9\%.$$



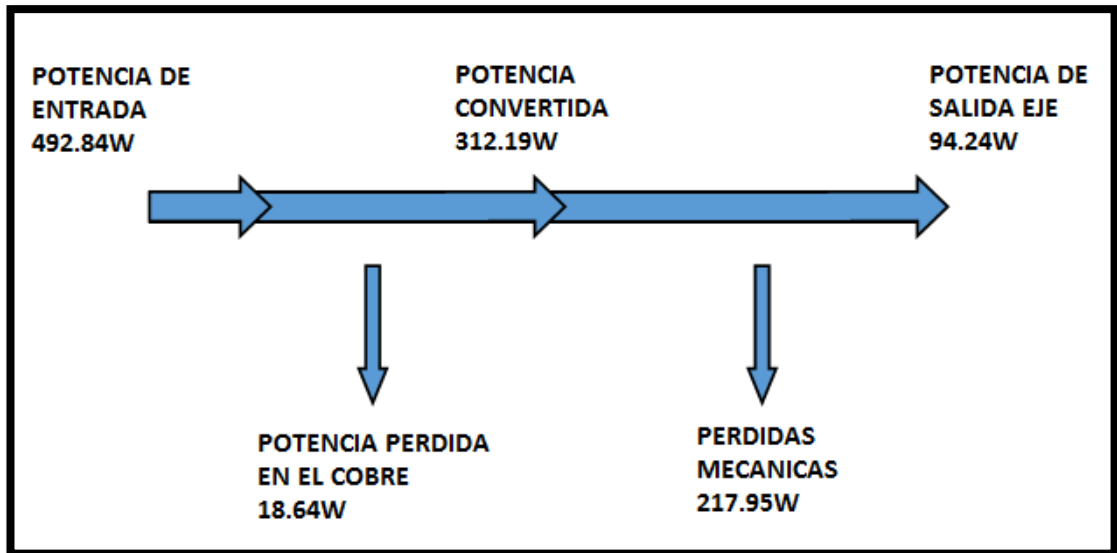


FIGURA 60: FLUJO DE POTENCIAS PUNTO 1 MOTOR CCL

La gráfica muestra una eficiencia muy baja, donde la potencia de salida es prácticamente la quinta parte de la potencia de entrada, y las pérdidas mecánicas con significativamente mayores a las pérdidas eléctricas.

A continuación: las características técnicas de operación de un motor CCL.

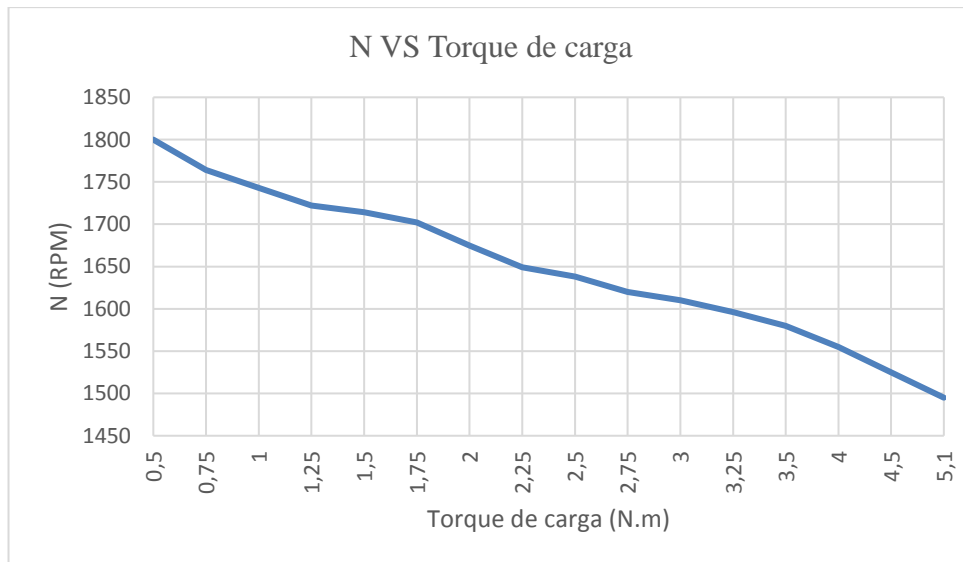


FIGURA 61: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE RPM VS TORQUE DE CARGA.

La grafica muestra un patrón lineal donde igual que en los casos anteriores las revoluciones disminuyen mientras el torque de carga aumenta.

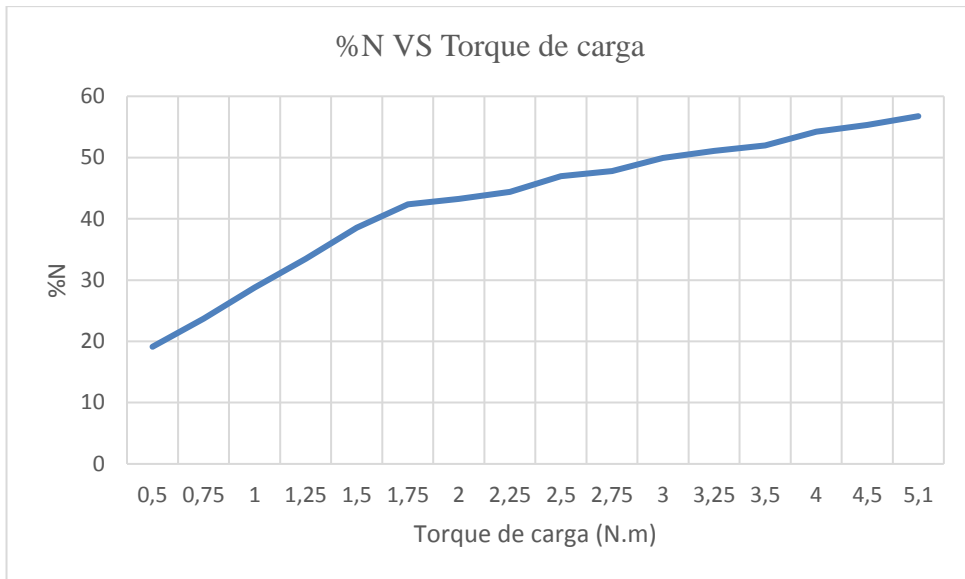


FIGURA 62: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE % NVS TORQUE DE CARGA.

La eficiencia enseña dos comportamientos parecidos ambos lineales, en el primer tramo, entre 0.5 N.m y 1.75 N.m una pendiente mayor que la que hay en los valores que siguen después de los 1.75 N.m.

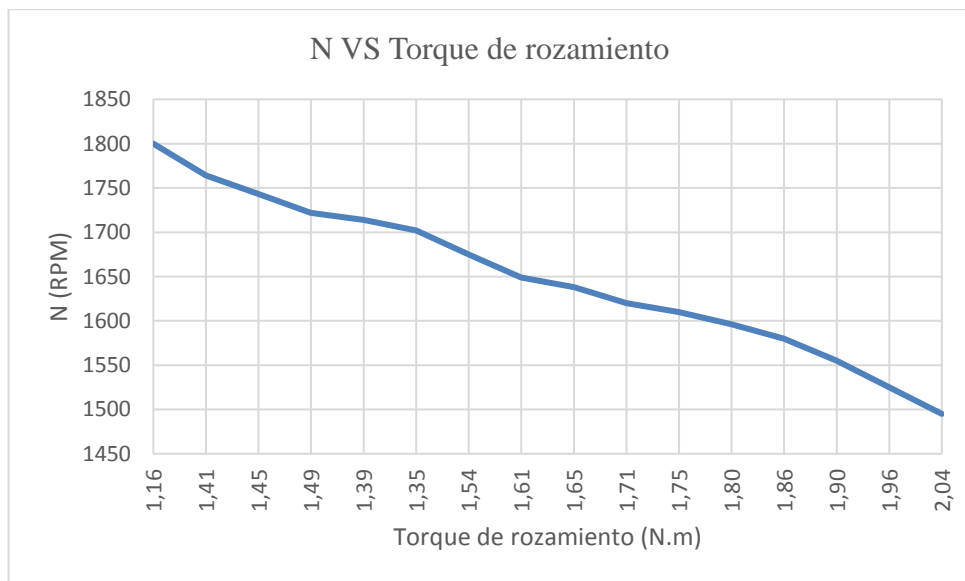


FIGURA 63: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE RPM VS TORQUE DE ROZAMIENTO.

Se puede observar el mismo comportamiento que en la mayoría de las conexiones del motor, donde la velocidad cae conforme se incrementa el torque de rozamiento.

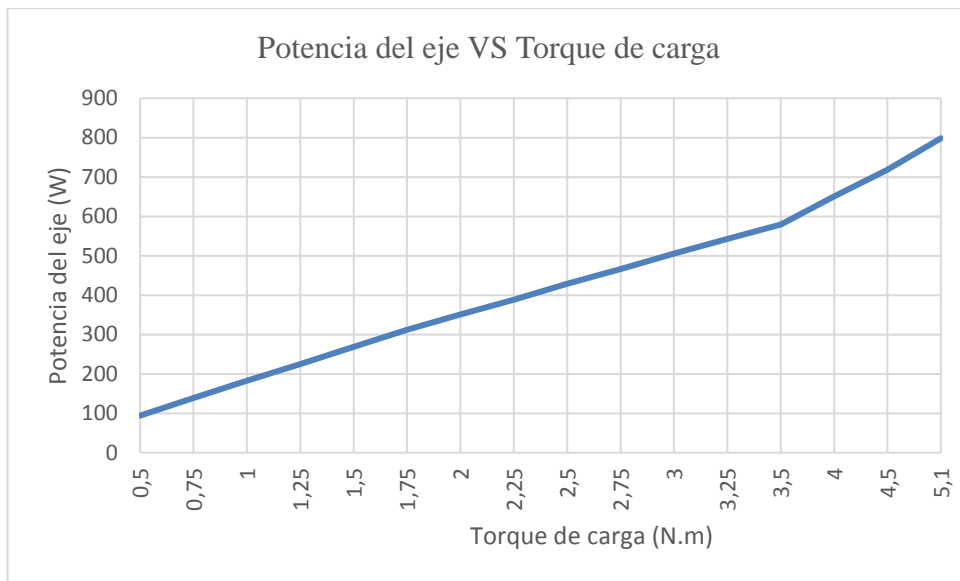


FIGURA 64: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE POTENCIA MECÁNICA VS TORQUE DE CARGA.

La potencia de salida del eje muestra un comportamiento lineal casi perfecto hasta alrededor de los 3.5 N.m donde la pendiente aumenta.

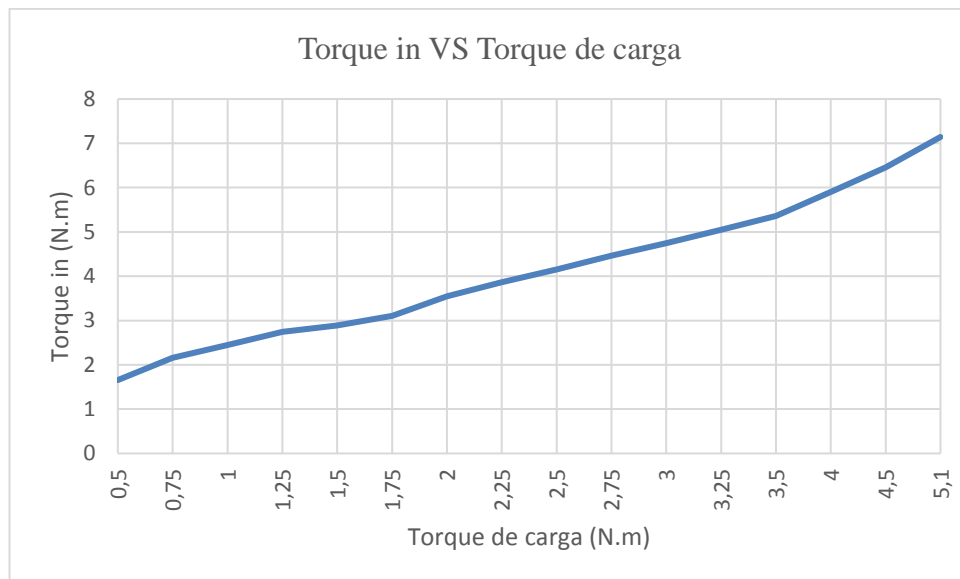


FIGURA 65: GRÁFICA CARACTERÍSTICA ENTRE TORQUE ROZAMIENTO VS TORQUE DE CARGA.

El torque inducido muestra un aumento lineal en proporción al torque de carga, destacando que se observan 3 regiones con pendientes diferentes, la primera entre 0.5 a 1.75 N.m, la segunda entre 1.75 y 3.5 N.m y la tercera desde 3.5 N.m en adelante, cada una con una pendiente mayor a la anterior.

## Conclusiones de la prueba realizada

- $R_n=16.9\%$
- Tiene un buen torque de arranque
- Tiene una velocidad muy estable
- A más torque menos velocidad
- La máquina tiene muchas pérdidas mecánicas
- A más torque más fricción

## **4.2.Pruebas al motor DC Hampden modelo DYN-400.**

Luego de hacer pruebas sobre el motor universal, y de observar los diferentes comportamientos, se decidió que usar el motor de excitación separada sería lo más conveniente, pues manteniendo ciertas similitudes positivas con la conexión en paralelo, tiene además posibilidades en cuanto a la variación de su velocidad, y por tanto también, en lo referente a la variación de voltaje del generador acoplado, asimismo posee la cualidad de tener una corriente de campo constante. Dicho lo anterior, y con el fin de simplificar las conexiones y hacer uso de una máquina completamente dedicada al caso, se ha preferido cambiar a otro modelo de motor DC, el cual cuenta solo con la bobina de campo y la de inducido.

A continuación, se hicieron pruebas de su comportamiento conectada en configuración independiente, en dichas pruebas se ha tomado los valores medidos del voltaje terminal, la corriente de armadura y línea, la corriente de campo, la velocidad del eje en revoluciones por minuto y el torque de carga, señalando también los casos donde se le aplicó una carga mecánica adicional.

TABLA 10: VALORES EXPERIMENTALES MOTOR INDEPENDIENTE

<b>Puntos</b>	<b><i>VT</i> [v]</b>	<b><i>IA</i> [Amp]</b>	<b><i>IL</i> [Amp]</b>	<b><i>IF</i> [Amp]</b>	<b><i>n</i> [RPM]</b>	<b><i>Tcarga</i> [N.m]</b>	<b>Carga adicional</b>
1	19.1	4.5	4.5	0.75	360	0.55	No
2	21.4	4.6	4.6	0.72	417	0.55	No
3	27.3	4.5	4.5	0.71	540	0.55	No
4	33.2	4.5	4.5	0.7	658.2	0.55	No
5	34.5	4.5	4.5	0.7	690	0.55	No
6	39	4.5	4.5	0.7	784	0.55	No
7	44.2	5	5	0.7	893	0.55	No
8	44.5	5.5	5.5	0.7	869	0.8	Sí
9	43.9	6	6	0.695	864	1.05	Sí
10	43.5	7	7	0.75	833	1.4	Sí
11	44	8	8	0.75	812	1.8	Sí
12	42.8	9	9	0.75	807	2.15	Sí
13	42.4	9.8	9.8	0.75	794	2.5	Sí
14	42	10.5	10.5	0.75	790	2.85	Sí

A partir de los resultados experimentales se pueden obtener a través de cálculos otros valores de interés, que ayudaran a entender mejor las propiedades de la máquina.

La resistencia equivalente es de 2.1 ohmios.

TABLA 11: VALORES CALCULADOS DE PRUEBA AL MOTOR DC INDEPENDIENTE DYN-400.

<b>Puntos</b>	<b><i>FEM</i> [v]</b>	<b><math>\omega</math> [rad/seg]</b>	<b><i>Pconv</i> [w]</b>	<b><i>Ppcu</i> [w]</b>	<b><i>Peje</i> [w]</b>	<b><i>Pp mec</i> [w]</b>	<b><i>Pentrada</i> [w]</b>	<b><math>\eta\%</math></b>	<b><i>Tind</i> [N.m]</b>	<b><i>Troz</i> [N.m]</b>	<b><i>%Rn</i></b>
1	9.65	37.70	43.43	42.53	20.73	22.69	85.95	24.12	1.15	0.60	11.53
2	11.74	43.67	54.00	44.44	24.02	29.99	98.44	24.40	1.24	0.69	11.53
3	17.85	56.55	80.33	42.53	31.10	49.22	122.85	25.32	1.42	0.87	11.53
4	23.75	68.93	106.88	42.53	37.91	68.97	149.40	25.37	1.55	1.00	11.53
5	25.05	72.26	112.73	42.53	39.74	72.98	155.25	25.60	1.56	1.01	11.53
6	29.55	82.10	132.98	42.53	45.16	87.82	175.50	25.73	1.62	1.07	11.53
7	33.70	93.51	168.50	52.50	51.43	117.07	221.00	23.27	1.80	1.25	11.53
8	32.95	91.00	181.23	63.53	72.80	108.42	244.75	29.75	1.99	1.19	11.53
9	31.30	90.48	187.80	75.60	95.00	92.80	263.40	36.07	2.08	1.03	11.53
10	28.80	87.23	201.60	102.90	122.12	79.48	304.50	40.11	2.31	0.91	11.53
11	27.20	85.03	217.60	134.40	153.06	64.54	352.00	43.48	2.56	0.76	11.53
12	23.90	84.51	215.10	170.10	181.69	33.41	385.20	47.17	2.55	0.40	11.53
13	21.82	83.15	213.84	201.68	207.87	5.97	415.52	50.03	2.57	0.07	11.53
14	19.95	82.73	209.48	231.53	235.78	-26.30	441.00	53.46	2.53	-0.32	11.53

De estos datos calculado se puede hacer una mejor comparación a través de gráficos.

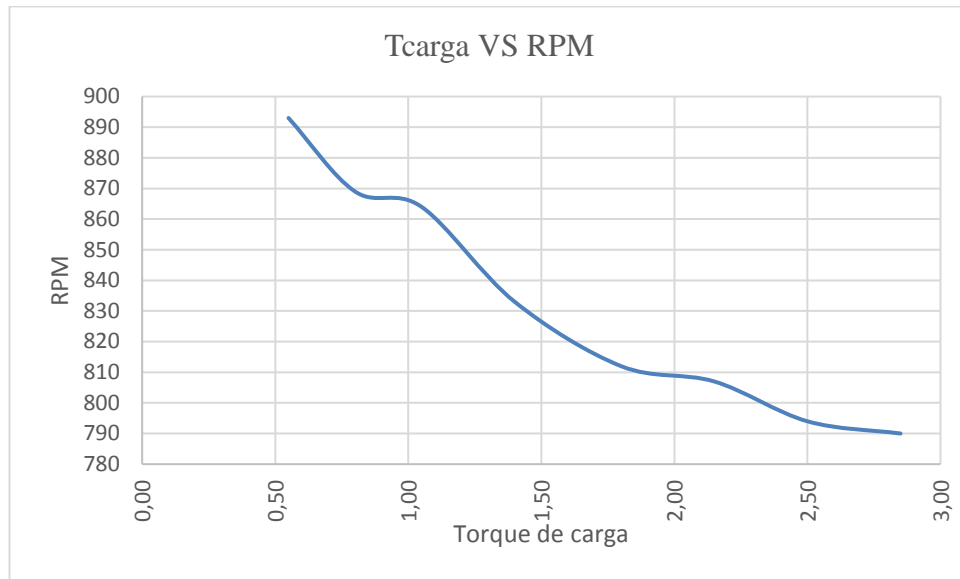


FIGURA 66: RPM EN FUNCIÓN DEL TORQUE DE CARGA.

En esta grafica se puede apreciar como al aumentarse el torque de carga la velocidad del eje se reduce en forma exponencial.

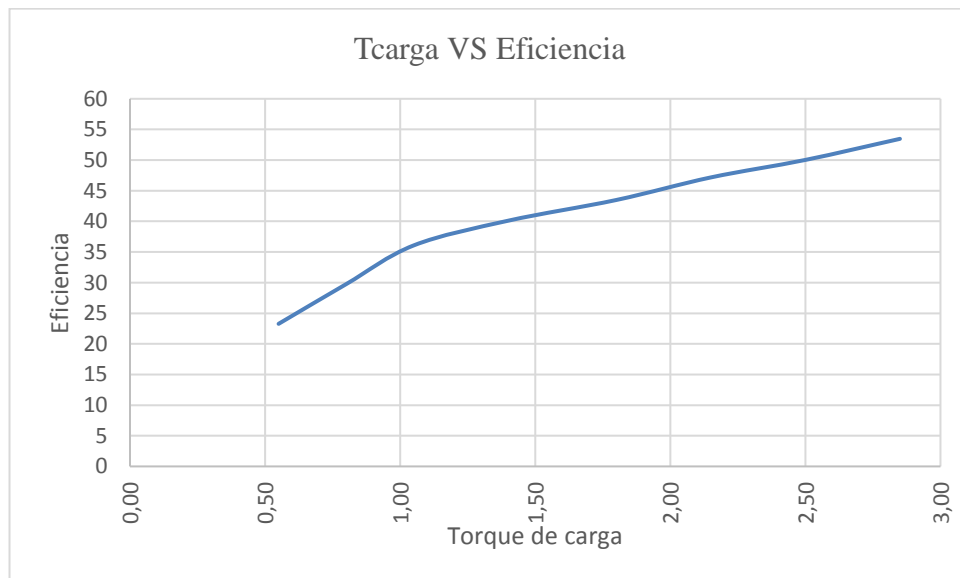


FIGURA 67: EFICIENCIA EN FUNCIÓN DEL TORQUE DE CARGA.

Según la gráfica a más torque de carga, la eficiencia aumenta de forma lineal, hay que señalar que existen dos pendientes, la primera entre 0.5 y 1 N.m y la segunda que empieza en 1 N.m y continua, esto significa que hasta un torque de carga de 1 N.m la eficiencia aumenta significativamente respecto a cómo aumenta luego de ese punto.

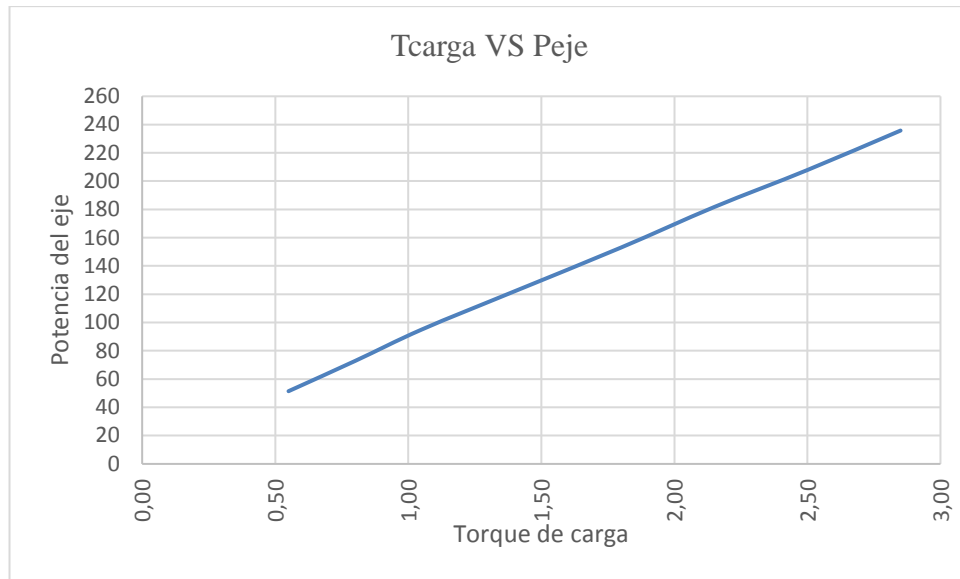


FIGURA 68: POTENCIA DEL EJE EN FUNCIÓN DEL TORQUE DE CARGA.

Se puede observar como el torque de carga y la potencia del eje está estrechamente ligados, como da a entender una recta casi perfecta.

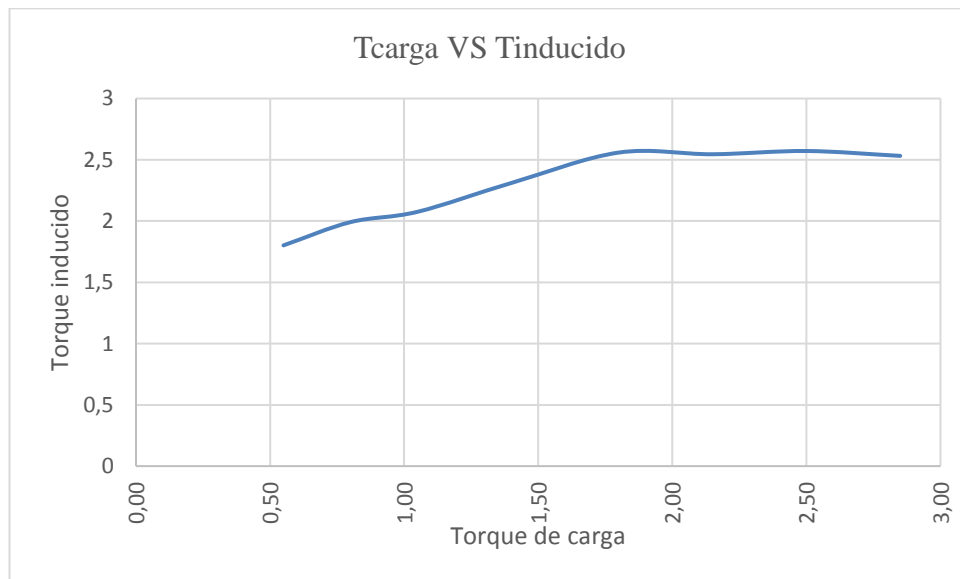


FIGURA 69: TORQUE INDUCIDO EN FUNCIÓN DEL TORQUE DE CARGA.

La grafica muestra que hasta cierto punto el torque inducido aumenta respecto al torque de carga, y a partir de los 1.75 N.m aproximadamente se vuelve casi constante.

### **4.3.Pruebas al autotransformador trifásico variable**

Para determinar las características de los componentes a usarse en el proyecto se inició observando cuales son los límites del variac, para esto se tomaron las siguientes medidas:

Voltaje línea-línea RMS de alimentación del variac

L1L3=216.7 voltios AC

L2L1=220.1 voltios AC

L3L2=217.8 voltios AC

Voltaje línea neutro RMS de alimentación del variac

L1=126.7 voltios AC

L2=127.4 voltios AC

L3=125.1 voltios AC

Salidas de voltaje línea línea RMS máximas del variac

L1L3=256.5 voltios AC

L2L1=260.7 voltios AC

L3L2=258.1 voltios AC

Salidas de voltaje línea neutro RMS máximas del variac (usando neutro de la alimentación)

L1=149.8 voltios AC

L2=147.3 voltios AC

L3=149.7 voltios AC



Salidas de voltaje línea-línea RMS mínimas del variac

L1L3=1.3 voltios AC

L2L1=1.4 voltios AC

L3L2=1.3 voltios AC

Salidas de voltaje línea neutro RMS mínimas del variac (usando neutro de la alimentación)

L1=34.3 voltios AC

L2=34.3 voltios AC

L3=34.4 voltios AC

Salidas de voltaje línea neutro RMS mínimas del variac (usando neutro de la conexión estrella)

L1=0.0 voltios AC

L2=0.0 voltios AC

L3=0.1 voltios AC

Como se puede apreciar, el voltaje entre el neutro no aterrizado de la conexión estrella y el neutro de la fuente es de 34.3 voltios AC.

Obtenidas las medidas anteriores, y conociendo gracias a la placa que la corriente máxima recomendada por línea es de 30 amperios, ya se puede determinar las características de los demás componentes.

#### 4.4.Pruebas al generador síncrono

Las siguientes pruebas se hacen con la finalidad de establecer parámetros de uso del generador, así saber cuánta potencia es capaz de dar y al mismo tiempo cuanta potencia es seguro que dé.

##### 4.4.1. Factor de potencia y reactancias del generador según la carga.

A continuación, se han hecho pruebas con distintos factores de potencia, se ha calculado la reactancia y determinado el factor de potencia del generador para cada caso.

TABLA 12: REACTANCIA EN FUNCIÓN DE LA CARGA.

<i>carga</i>	<i>FP carga</i>	<i>θ carga [grados]</i>	<i>Xs[Ω]</i>	<i>γ [grados]</i>	<i>FP generador</i>
RL	1	0,000	15,694	41,659	0,747
RL	0,9	25,842	9,787	21,905	0,672
RL	0,8	36,870	8,345	16,425	0,598
RL	0,7	45,573	7,527	12,894	0,523
RL	0,6	53,130	6,994	10,237	0,448
RL	0,5	60,000	6,625	8,065	0,374
RL	0,4	66,422	6,365	6,190	0,299
RL	0,3	72,542	6,183	4,506	0,224
RL	0,2	78,463	6,062	2,943	0,149
RL	0,1	84,261	5,993	1,455	0,075
R	0	90,000	5,971	0,000	0,000
RC	0,1	84,261	5,993	1,455	0,075
RC	0,2	78,463	6,062	2,943	0,149
RC	0,3	72,542	6,183	4,506	0,224
RC	0,4	66,422	6,365	6,190	0,299
RC	0,5	60,000	6,625	8,065	0,374
RC	0,6	53,130	6,994	10,237	0,448
RC	0,7	45,573	7,527	12,894	0,523
RC	0,8	36,870	8,345	16,425	0,598
RC	0,9	25,842	9,787	21,905	0,672
RC	1	0,000	15,694	41,659	0,747

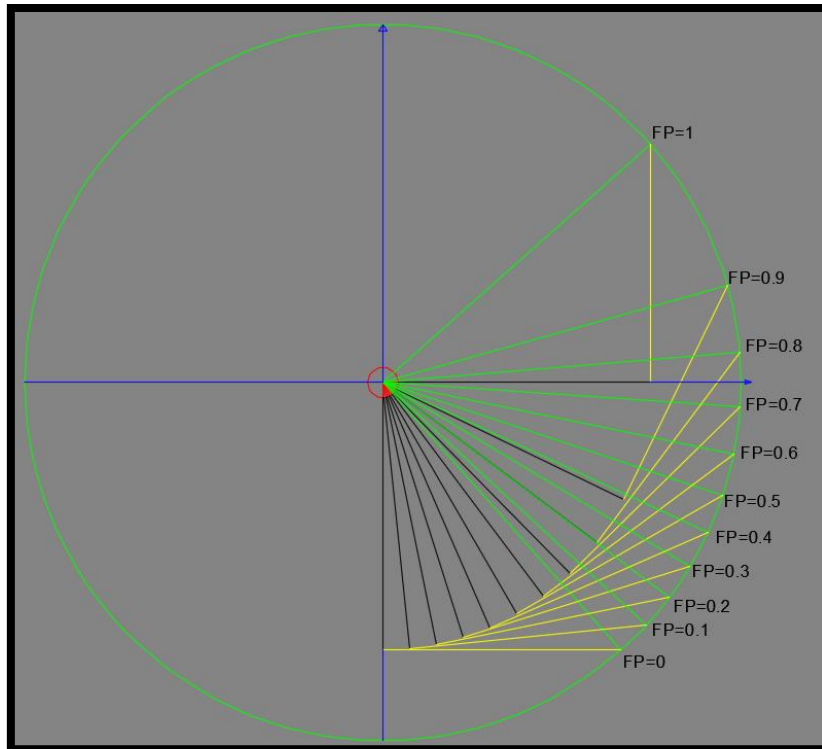


FIGURA 70: DIAGRAMA FASORIAL PARA CARGA RL, CON FP DE 0.1 A 1.0 EN ATRASO.

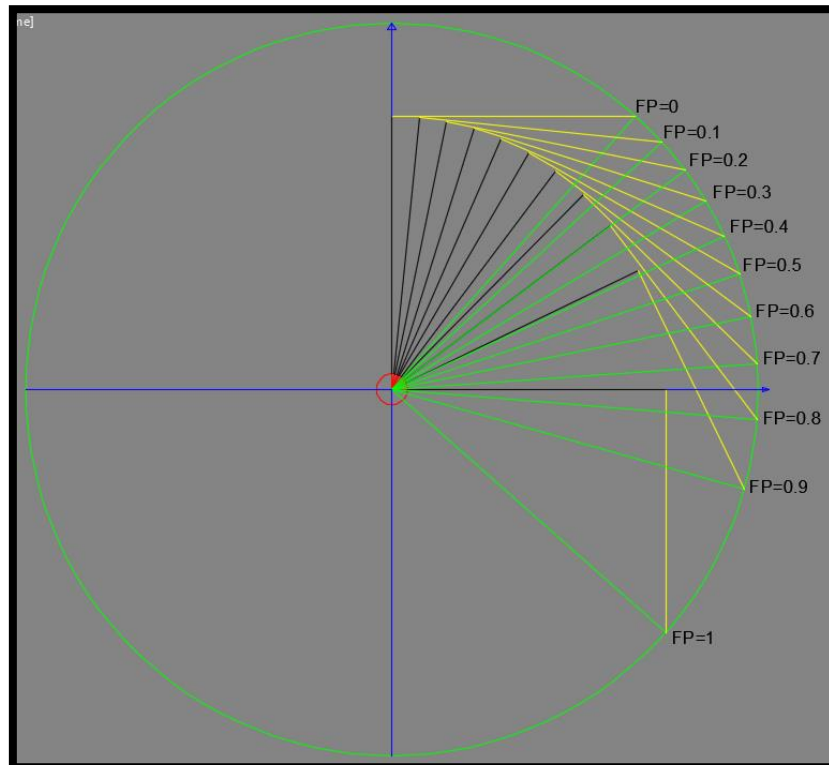


FIGURA 71: DIAGRAMA FASORIAL PARA CARGA RC, CON FACTORES DE POTENCIA DE 0.1 A 1.0 EN ADELANTO.

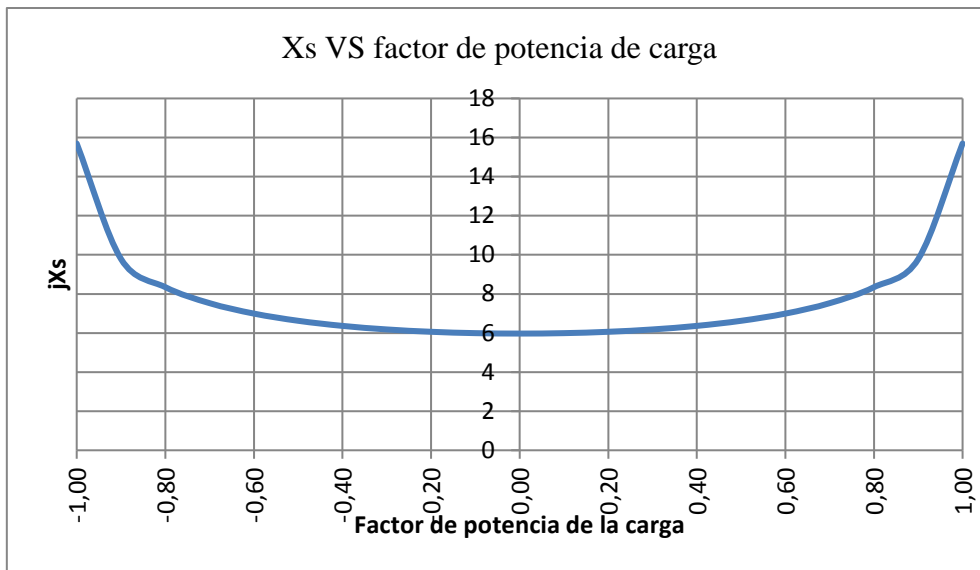


FIGURA 72: JXS EN FUNCIÓN DE FP DE CARGA.

La grafica muestra el comportamiento de la reactancia en diferentes factores de potencia, se puede observar que a ambos lados la magnitud de la reactancia es igual.

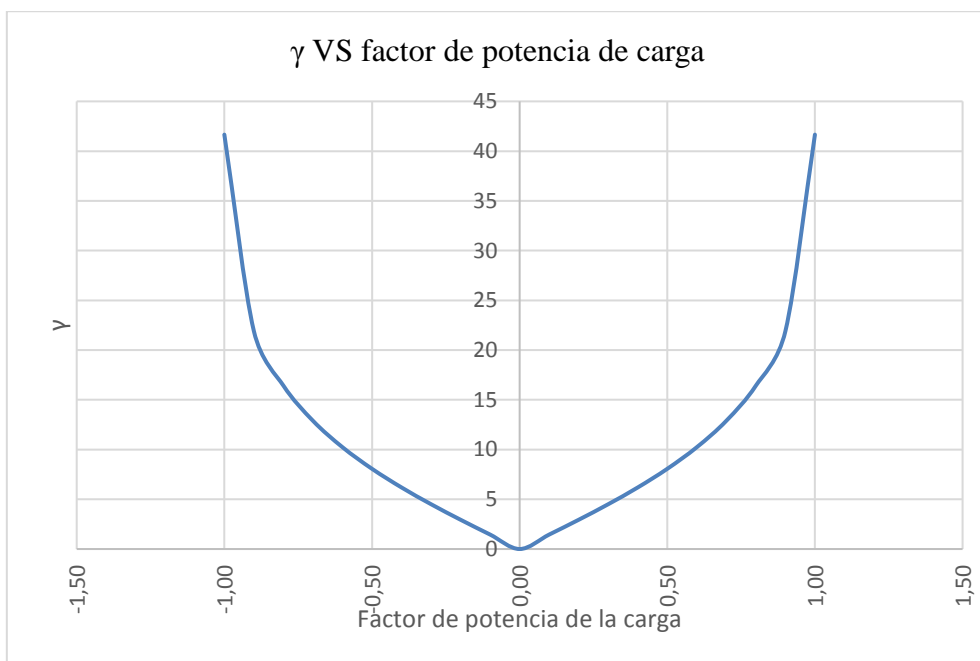


FIGURA 73: ANGULO DE TORSIÓN EN FUNCIÓN DEL FP DE CARGA.

Al igual que la gráfica anterior el comportamiento de la reactancia en diferentes factores de potencia, se puede observar que a ambos lados la magnitud de la reactancia es igual.

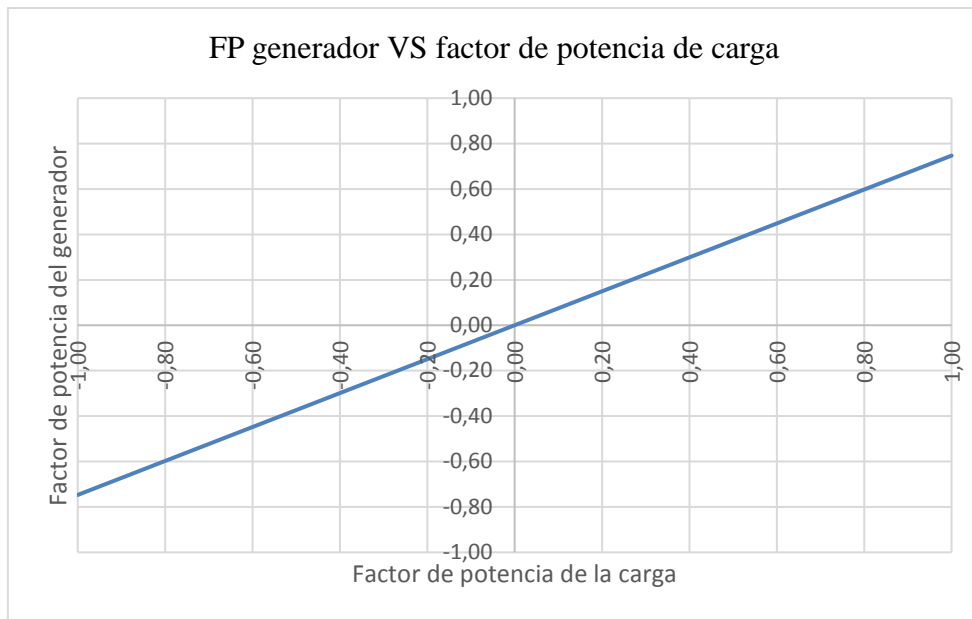


FIGURA 74: FP DEL GENERADOR EN FUNCIÓN DEL FP DE CARGA.

El grafico muestra la relación lineal que existe entre el factor de potencia de la carga y el factor de potencia del generador.

#### 4.4.2. Diagrama de capacidad del generador sincrónico trifásico.

Con factor de potencia, FP=1.

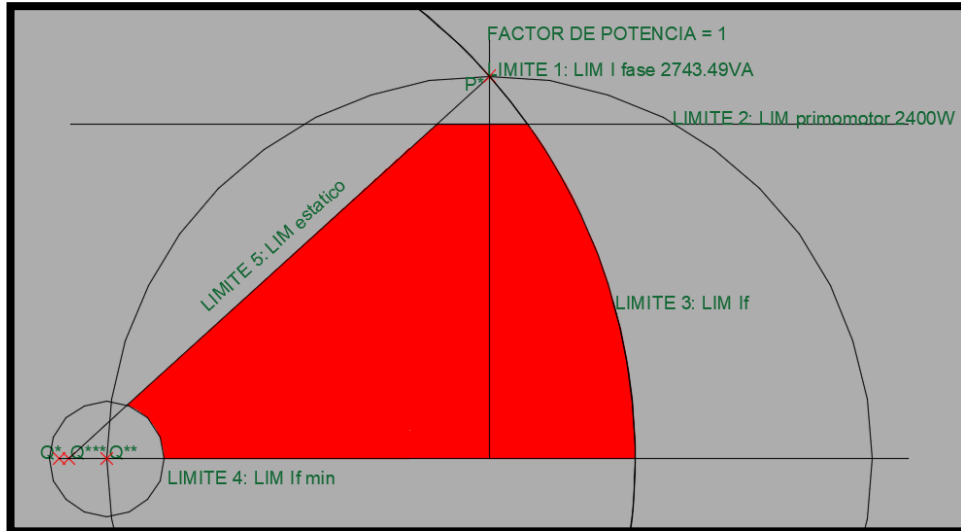


FIGURA 75: CAPACIDAD DEL GENERADOR CON FACTOR DE POTENCIA 1.

Calculo de los límites:

$$K = \frac{3 \cdot V_f}{X_s} = 24.28$$

Ecuaciones de rectas y circunferencias

Límite #1 (Límite de corriente de fase)

$$Q^2 + P^2 = 2743^2$$

$$\text{Potencia aparente} = 2743 \text{ [VA]}$$

Límite #2 (Límite del motor primario)

$$P = (0)2400$$

$$\text{Potencia Activa} = 2400 \text{ [W]}$$

Límite #3 (Límite corriente de campo: Q\*)

$$(Q + 3083)^2 + (P)^2 = 4127^2$$

$$Q^* = V_f * K = 3083 \text{ (capacitivo)}$$

$$\text{Radio if} = FEM * K = 4127$$

Limite #4 (Limite corriente de campo mínima:  $Q^{**}$ )

$$(Q + 2743)^2 + (P)^2 = 412.7^2$$

$$Q^{**} = -Q_{\text{nominal}} = -2743$$

$$\text{Radio if mínimo} = 10\% \text{ de Radio if} = 412.7$$

Limite #5 (Limite estabilidad estática:  $Q^{***}, P^*$ )

$$P = 0.9(Q + 3017) + 2743$$

$$Q^{***} = 110\% \text{ de } Q^{**} = -3017$$

$$P^* = \frac{\sqrt{3} * FEM * V_f}{X_s} * \text{sen}(\gamma) = 2743$$

Con factor de potencia, FP=0.9.

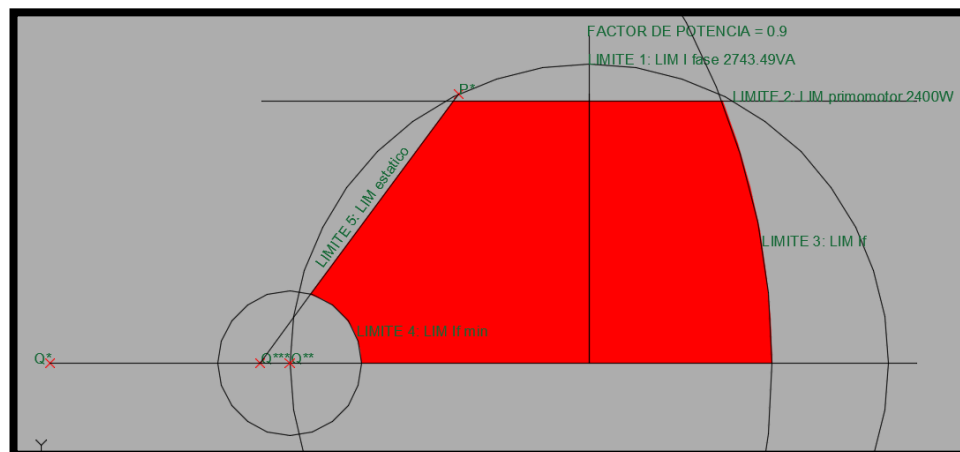


FIGURA 76: CAPACIDAD DEL GENERADOR CON FACTOR DE POTENCIA DE 0.9.

Calculo de los límites:

$$K = \frac{3 * V_f}{X_s} = 24.28$$

Ecuaciones de rectas y circunferencias

Limite #1 (Limite de corriente de fase)

$$Q^2+P^2=2743^2$$

$$\text{Potencia aparente}=2743[\text{VA}]$$

Limite #2 (Limite del motor primario)

$$P=(0)2400$$

$$\text{Potencia Activa}=2400[\text{W}]$$

Limite #3 (Limite corriente de campo: Q\*)

$$(Q+4944)^2 +(P)^2=6618^2$$

$$Q^*=V_f \cdot K=4944(\text{capacitivo})$$

$$\text{Radio if}=FEM \cdot K=6618$$

Limite #4 (Limite corriente de campo mínima: Q\*\*)

$$(Q+2743)^2 +(P)^2=661^2$$

$$Q^{**}=-Q_{\text{nominal}}=-2743$$

$$\text{Radio if mínimo}= 10\% \text{ de Radio if}=661$$

Limite #5 (Limite estabilidad estática: Q\*\*\*, P\*)

$$P=1.35(Q+3017)+2469$$

$$Q^{***}=110\% \text{ de } Q^{**}=-3017$$

$$P^*=\frac{\sqrt{3} \cdot FEM \cdot V_f}{X_s} \cdot \text{sen}(\gamma)=2469$$



Con factor de potencia, FP=0.8.

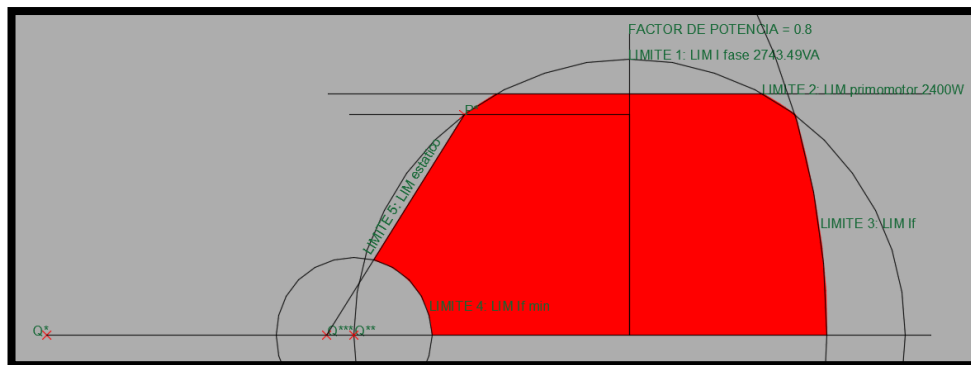


FIGURA 77: CAPACIDAD DEL GENERADOR CON FACTOR DE POTENCIA DE 0.8.

Calculo de los límites:

$$K = \frac{3 \cdot V_f}{X_s} = 24.28$$

Ecuaciones de rectas y circunferencias

Límite #1 (Límite de corriente de fase)

$$Q^2 + P^2 = 2743^2$$

$$\text{Potencia aparente} = 2743 \text{ [VA]}$$

Límite #2 (Límite del motor primario)

$$P = (0)2400$$

$$\text{Potencia Activa} = 2400 \text{ [W]}$$

Límite #3 (Límite corriente de campo: Q\*)

$$(Q + 5798)^2 + (P)^2 = 7761^2$$

$$Q^* = V_f \cdot K = 5798 \text{ (capacitivo)}$$

$$\text{Radio if} = FEM \cdot K = 7761$$

Límite #4 (Límite corriente de campo mínima: Q\*\*)

$$(Q + 2743)^2 + (P)^2 = 776^2$$

$$Q^{**} = -Q_{\text{nominal}} = -2743$$

$$\text{Radio if m\u00ednimo} = 10\% \text{ de Radio if} = 776$$

Limite #5 (Limite estabilidad est\u00e1tica:  $Q^{***}$ ,  $P^*$ )

$$P = 1.6(Q + 3017) + 2194$$

$$Q^{***} = 110\% \text{ de } Q^{**} = -3017$$

$$P^* = \frac{\sqrt{3} * FEM * V_f}{X_s} * \text{sen}(\gamma) = 2194$$

Con factor de potencia,  $FP = 0.7$ .

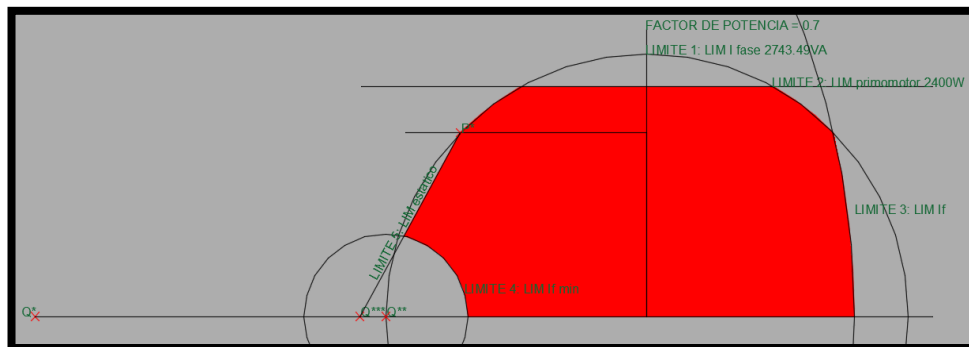


FIGURA 78: CAPACIDAD DEL GENERADOR CON FACTOR DE POTENCIA DE 0.7.

Calculo de los l\u00edmites:

$$K = \frac{3 * V_f}{X_s} = 24.28$$

Ecuaciones de rectas y circunferencias

Limite #1 (Limite de corriente de fase)

$$Q^2 + P^2 = 2743^2$$

$$\text{Potencia aparente} = 2743[\text{VA}]$$

Limite #2 (Limite del motor primario)

$$P = (0)2400$$

$$\text{Potencia Activa} = 2400[\text{W}]$$

Limite #3 (Limite corriente de campo: Q\*)

$$(Q+6429)^2 + (P)^2 = 8605^2$$

$$Q^* = V_f * K = 6429 \text{ (capacitivo)}$$

$$\text{Radio if} = FEM * K = 8605$$

Limite #4 (Limite corriente de campo mínima: Q\*\*)

$$(Q+2743)^2 + (P)^2 = 860^2$$

$$Q^{**} = -Q_{\text{nominal}} = -2743$$

$$\text{Radio if mínimo} = 10\% \text{ de Radio if} = 860$$

Limite #5 (Limite estabilidad estática: Q\*\*\*, P\*)

$$P = 1.81(Q+3017) + 1920$$

$$Q^{***} = 110\% \text{ de } Q^{**} = -3017$$

$$P^* = \frac{\sqrt{3} * FEM * V_f}{X_s} * \text{sen}(\gamma) = 1920$$

#### 4.5. Prueba de rectificación

Para esta prueba se ha hecho un rectificador trifásico que consta de 8 diodos repartidos en dos circuitos puente-rectificador de 30 amperios, de los que solo serán necesarios usar 6, y dos quedarán sobrando.

Cada una de las tres líneas del variac irá conectada en medio de dos diodos en serie, de tal manera que de un lado tengan el cátodo de un diodo, y del otro tengan el ánodo de otro diodo. Los tres diodos cuyos cátodos se conectan a las líneas, tendrán así mismo sus ánodos puenteados entre ellos y este nodo que se forma será el negativo.

Los otros tres diodos cuyos ánodos se conectan a las tres líneas, tendrán por su parte, los cátodos puenteados entre ellos, y este nodo será el lado positivo.

De esta forma tendremos tres entradas y dos salidas, las entradas en voltaje alterno y las salidas en voltaje directo.

Para conocer el máximo voltaje directo y a continuación poder determinar que capacitores usar, procedimos a regular manualmente el variac al máximo ( 260 voltios ), resultando en un voltaje rectificado de 352.7 voltios DC. Notamos además un curioso fenómeno: al tocar los dos extremos de la salida rectificada de voltaje, regulando el variac de forma que el arreglo nos entregue 100 voltios DC, no se experimenta el dolor que causaría tocar los terminales de una salida de 100 voltios AC, sino solamente un cosquilleo casi imperceptible.

#### **4.6.Prueba de medición en voltaje directo con Arduino**

Para dicha prueba fue necesario realizar un divisor de tensión a fin de hacer un escalado del voltaje medido ya que el Arduino solo puede recibir señales analógicas de hasta 5vdc.

El divisor de voltaje fue diseñado para escalar valores de alrededor de 350 voltios pues el máximo valor de voltaje rectificado en el variac es de 352.7 voltios, sin embargo, no es aconsejable llegar a valores tan altos si tomamos en cuenta el efecto Joule, y si se tomaran valores así deberá ser por poco tiempo.

El Arduino toma valores de entre 0 y 5 voltios dc, y los transforma a valores discretos de entre 0 y 1023, este valor tomado es multiplicado por un valor escalar, el cual es el cociente entre el valor real de voltaje medido con un voltímetro y el valor interpretado por el Arduino.

#### **4.7.Prueba de medición AC con Arduino**

Para esta muy importante prueba, se han tomado los valores medidos a través del sensor de voltaje, y se los ha comparado con las mediciones hechas con un multímetro “Fluke 29”.(todos los siguientes valores han sido tomados a 60Hz)

#### 4.7.1. Medición línea-línea y línea-neutro antes de ajuste

TABLA 13: MEDICIÓN LÍNEA-LÍNEA, DEL SENSOR VS EL MULTIMETRO DE CONTROL

<i>Muestra</i>	<i>Sensor</i> [V]	<i>Control</i> <i>(Fluke 29)</i> [V]	<i>error</i> [V]	<i>error</i> [%]
3	8	8	0	0.00
4	21	22	1	4.55
5	23	24	1	4.17
6	36	38	2	5.26
7	41	44	3	6.82
8	42	45	3	6.67
9	49	52	3	5.77
10	52	55	3	5.45
11	54	57	3	5.26
12	57	61	4	6.56
13	64	68	4	5.88
14	72	77	5	6.49
15	74	78	4	5.13
16	83	88	5	5.68
17	87	91	4	4.40
18	92	98	6	6.12
19	97	103	6	5.83
20	104	111	7	6.31
21	105	111	6	5.41
22	111	118	7	5.93
23	118	126	8	6.35
24	121	129	8	6.20
25	128	136	8	5.88
26	140	148	8	5.41
27	149	158	9	5.70
28	158	168	10	5.95
29	170	180	10	5.56
30	185	196	11	5.61
31	195	208	13	6.25
32	202	218	16	7.34
33	207	228	21	9.21
34	211	234	23	9.83
35	216	242	26	10.74
36	219	250	31	12.40

El error promedio en medición L-L es del 6.18%

TABLA 14: VOLTAJE MEDIDO VS VOLTAJE CONTROL ANTES DE AJUSTE

<i>Muestra</i>	<i>Sensor [V]</i>	<i>Control (Fluke 29)[V]</i>	<i>error [V]</i>	<i>error [%]</i>
1	14	13	1	7.69
2	18	17	1	5.88
3	23	22	1	4.55
4	28	28	0	0.00
5	35	35	0	0.00
6	39	38	1	2.63
7	47	45	2	4.44
8	54	53	1	1.89
9	56	54	2	3.70
10	67	67	0	0.00
11	69	73	4	5.48
12	75	75	0	0.00
13	92	92	0	0.00
14	95	100	5	5.00
15	109	109	0	0.00
16	111	113	2	1.77
17	117	115	2	1.74
18	130	124	6	4.84
19	143	141	2	1.42

El error promedio en medición de voltaje L-N antes del ajuste es del 2.69%

#### 4.7.1. Medición después del ajuste al sensor.

Después de la calibración se repiten las pruebas de medición, para ver qué efectos ha tenido.

TABLA 15: MEDICIÓN DE SENSOR L-N VS MEDICION DE CONTROL LUEGO DEL AJUSTE

<i>Muestra</i>	<i>Sensor [V]</i>	<i>Control (Fluke 29)[V]</i>	<i>error [V]</i>	<i>error [%]</i>
1	10	10	0	0.00
2	31	32	1	3.13
3	63	64	1	1.56
4	97	98	1	1.02
5	114	115	1	0.87
6	132	133	1	0.75
7	146	147	1	0.68
8	158	159	1	0.63
9	177	177	0	0.00
10	198	198	0	0.00
11	216	216	0	0.00
12	231	231	0	0.00
13	243	243	0	0.00
14	251	251	0	0.00

El error promedio en medición L-N después del ajuste es del 0.62%

#### 4.7.2. Error de medición de voltaje según frecuencia medida

Al empezar a probar el módulo en conjunto con el motor DC y el generador síncrono, se observó que el voltaje medido a la salida del generador no era el mismo que el medido con el multímetro de control, al principio se creyó que el sensor de voltaje se había descalibrado, pero luego se llegó a la conclusión de que se trataba de la frecuencia de salida del generador, la había sido en mucho de los casos, de entre 20 Hz y 30 Hz, pero al acercarse a los 40 Hz y 50 Hz el voltaje era medido con más aproximación, y al llegar a alrededor de los 60 Hz, la medición volvía a ser óptima.

Se realizó una tabla donde la corriente de campo del motor DC y la corriente de campo del generador son constantes, a fin de establecer la curva del hecho antes mencionado.

TABLA 16 :ERROR DE MEDICION EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA

	<i>Campo generador [Amp]</i>	<i>Campo motor DC [Amp]</i>	<i>Frecuencia generador [Hz]</i>	<i>Corriente de armadura [Amp]</i>	<i>Voltaje medido [V]</i>	<i>Voltaje control [V]</i>	<i>Error [V]</i>	<i>Error [%]</i>
1	2.30	0.75	17.80	5.03	35.00	49.70	14.70	29.58
2	2.30	0.75	19.99	5.14	43.00	56.20	13.20	23.49
3	2.30	0.75	22.20	5.21	49.00	62.70	13.70	21.85
4	2.30	0.75	23.40	5.30	53.00	65.60	12.60	19.21
5	2.30	0.75	25.30	5.34	60.00	71.00	11.0	15.49
6	2.30	0.75	27.40	5.47	66.00	76.90	10.90	14.17
7	2.30	0.75	30.30	5.60	76.00	85.30	9.30	10.90
8	2.30	0.75	36.10	5.90	94.00	101.70	7.70	7.57
9	2.30	0.75	41.00	6.15	109.00	115.30	6.30	5.46
10	2.30	0.75	45.80	6.35	124.00	129.00	5.00	3.88
11	2.30	0.75	50.50	6.58	138.00	142.20	4.20	2.95
12	2.30	0.75	52.70	6.64	144.00	148.00	4.00	2.70

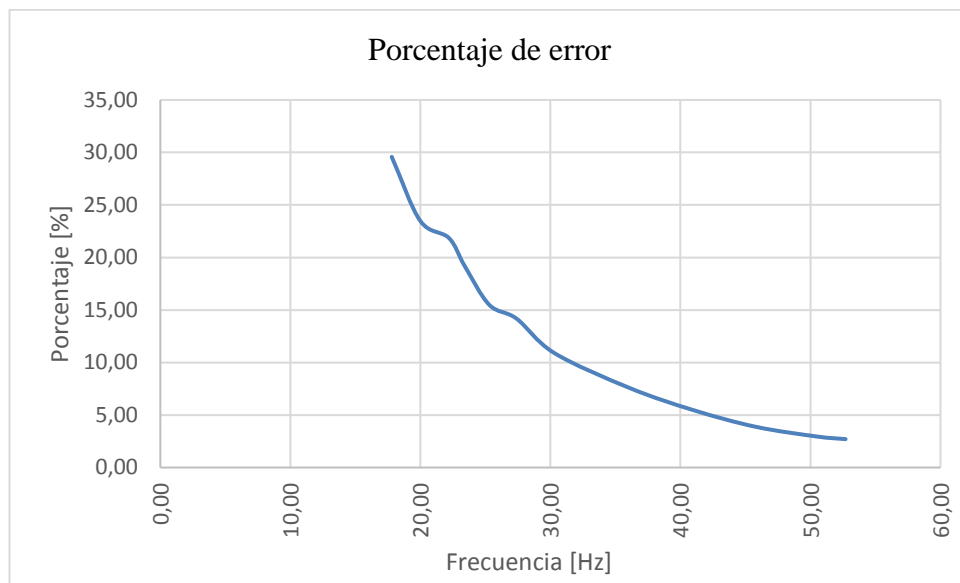


FIGURA 79 :ERROR PORCENTUAL DE LA MEDICIÓN DE VOLTAJE EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA

En esta grafica se observa la relación entre el porcentaje de error y la frecuencia control medido.



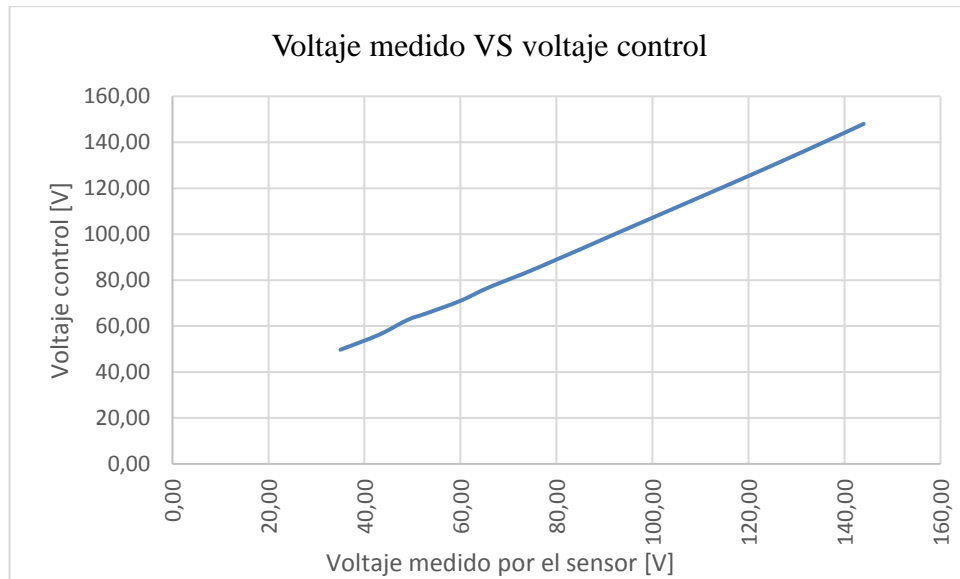


FIGURA 80 : COMPARACIÓN ENTRE VOLTAJE DEL SENSOR Y VOLTAJE DE CONTROL

Se puede observar la relación entre el voltaje medido por el sensor y el voltaje de control medido por el voltímetro guardan una relación lineal.

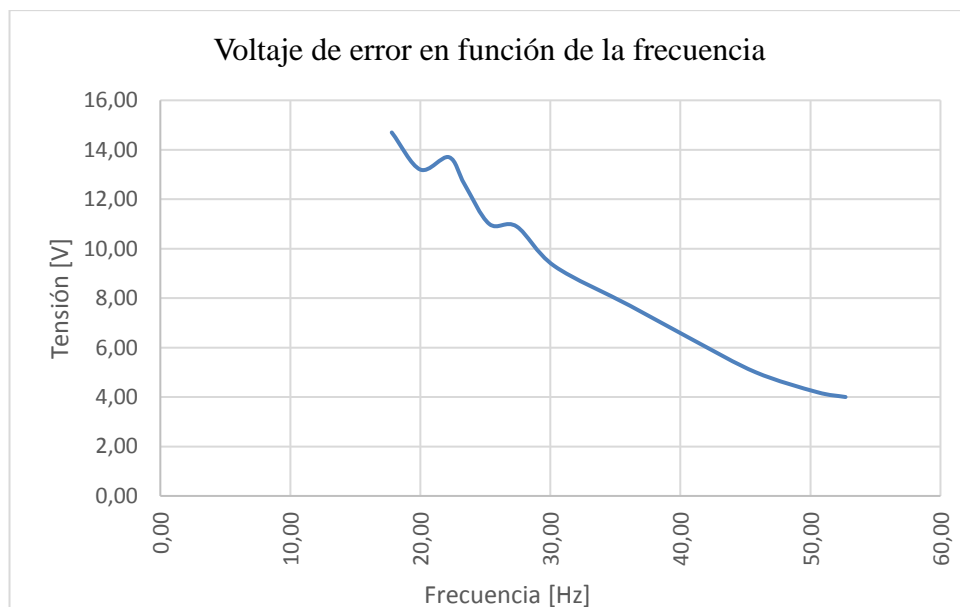


FIGURA 81 : VOLTAJE DE ERROR EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA

De esta grafica se puede extraer una función para corregir el voltaje medido según la frecuencia a utilizarse. Para dicho efecto se usará una herramienta muy sencilla del

Excel, donde se pueden ajustar varias funciones a la gráfica, y seleccionar según el criterio requerido, como se vio en la gráfica del voltaje medido VS el voltaje de control, la relación entre ambas es casi lineal, y por eso se supondrá que la actual gráfica también lo es solo que no a la perfección.

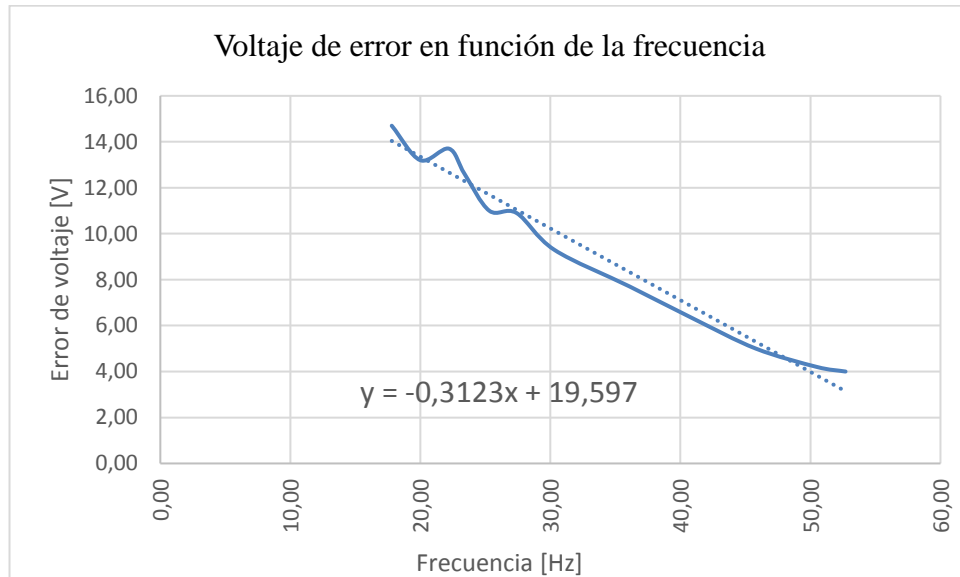


FIGURA 82 :TENDENCIA DEL VOLTAJE DE ERROR EN FUNCION DE LA FRECUENCIA

Se puede observar la relación entre el error de voltaje medido por el sensor y frecuencia se forma una pendiente.

La ecuación de dicha curva de frecuencia es:

$$v \text{ error} = -0.3123f + 19.597$$

Donde:

v error: es el voltaje de error en Voltios

f: es la frecuencia en Hertz

Para probar esta ecuación, se la usara para ver cuál es el error de voltaje en frecuencias, donde ya se conoce dicho dato:

Cuando la frecuencia es 30.3, voltaje medido 76, voltaje control 86.1, el voltaje de error 9.3 y el porcentaje de error 10.9%

$$v \text{ error} = -0.3123f + 19.597$$

$$10.1 = -0.3123(30.3) + 19.597$$

$$\text{nuevo voltaje}=\text{voltaje medido}+v \text{ error}$$

$$\text{nuevo voltaje}=76+10.1=86.1$$

$$\text{nuevo error}=\frac{|\text{voltaje control}-\text{nuevo voltaje}|}{\text{voltaje control}} * 100$$

$$\text{error}=\frac{|85.3-86.1|}{85.3} * 100=0.93\%$$

$$\text{reducción de error}=\text{error anterior}-\text{nuevo error}$$

$$\text{reducción de error}=10.9\%-0.93\%=9.9\%$$

Cuando la frecuencia es 41 y el voltaje de error debería ser 6.3

$$v \text{ error}=-0.3123f+19.597$$

$$6.78=-0.3123(41)+19.597$$

$$\text{nuevo voltaje}=\text{voltaje medido}+v \text{ error}$$

$$\text{nuevo voltaje}=109+6.78=115.78$$

$$\text{nuevo error}=\frac{|\text{voltaje control}-\text{nuevo voltaje}|}{\text{voltaje control}} * 100$$

$$\text{error}=\frac{|115.3-115.78|}{115.3} * 100=0.41\%$$

$$\text{reducción de error}=\text{error anterior}-\text{nuevo error}$$

$$\text{reducción de error}=10.9\%-0.93\%=9.9\%$$

Cuando la frecuencia es 60, el voltaje de error debería ser máximo 1, y el porcentaje de error de 0.62%, (este caso solo se lo toma para demostrar que, en caso de tomar 60 Hz, la formula también funcionaría)

$$v \text{ error} = -0.3123f + 19.597$$

$$0.852 = -0.3123(60) + 19.597$$

$$\text{nuevo voltaje} = \text{voltaje medido} + v \text{ error}$$

$$\text{nuevo voltaje} = 114 + 0.852 = 114.85$$

$$\text{nuevo error} = \frac{|\text{voltaje control} - \text{nuevo voltaje}|}{\text{voltaje control}} * 100$$

$$\text{error} = \frac{|115 - 114.85|}{115} * 100 = 0.13\%$$

$$\text{reducción de error} = \text{error anterior} - \text{nuevo error}$$

$$\text{reducción de error} = 0.62\% - 0.13\% = 0.49\%$$

## **4.8. Prueba de velocidad de estabilización de la salida AC del variac en vacío**

### **4.8.1. Prueba de tiempo de estabilización de la salida AC del variac en vacío, usando actuación constante y PWM para regular velocidad del motor reductor.**

En esta prueba se desea observar que tan efectivo es el sistema que se ha diseñado hasta el momento, tanto en la parte electromecánica, como en la electrónica y algoritmo implementado.

La parte electromecánica está compuesta de un motor dc reductor que a través de unos piñones se transmite el movimiento rotatorio hacia el autotransformador para poder variar su voltaje.

El motor dc es alimentado y controlado desde la parte electrónica usando un driver L298N que controla tanto la dirección que gira el motor como la velocidad que tenga.

El sensor ZMPT101B se encarga de reducir el voltaje ac y de crear un offset a fin de que llegue un voltaje AC reducido y sin componentes negativas, de tal forma que el Arduino pueda leer estos valores.

El algoritmo hace referencia directa al programa subido al microprocesador, que se encargara de tomar datos administrarlos y posteriormente mandar a ejecutar una acción.

Dicho esto, con los disyuntores abajo y la perilla en posición de menor voltaje, se procede a conectar una línea (la primera) con la entrada AC Phase del sensor de voltaje, y el neutro del variac con la entrada Neutro del sensor. Luego de revisar que las conexiones estén bien hechas, ya se pueden subir los disyuntores tanto de la alimentación como de la salida del variac.

En cuanto a los parámetros a tomar en cuenta está lo siguiente:

Se usa la librería `emon.lib` con un número de 1000 muestras

Para valores requeridos menores que 100 y mayores que 130 voltios y una diferencia igual o mayor de 30 voltios, el motor usara el 60% de su velocidad nominal.

Para valores requeridos menores que 100 y mayores que 130 voltios y una diferencia menor de 30 voltios, el motor usara el 40% de su velocidad nominal.

Para valores requeridos de entre 100 y 130 voltios incluidos, y una diferencia mayor o igual a 10 voltios el motor usara el 90% de su velocidad nominal.

Para valores requeridos de entre 100 y 130 voltios incluidos, y una diferencia menor de 10 voltios, el motor usara el 80% de su velocidad nominal.

Prueba de tiempo de estabilización de la salida AC del variac usando un rango de +/- 10.

Piñón central de 38 dientes.

TABLA 17: TIEMPO DE REGULACIÓN CON RANGO DE +/-10, SUBIDA

<i>Votaje act inicial [V]</i>	<i>V set [V]</i>	<i>Diferencia [V]</i>	<i>V act final [V]</i>	<i>Error [V]</i>	<i>Tiempo [seg]</i>
3	20	17	17	3	0.57
17	30	13	22	8	0.52
22	40	18	48	8	0.053
48	60	12	62	2	0.051
62	80	18	77	3	0.36
77	100	23	91	9	0.67
91	120	29	125	5	0.52
125	140	15	132	8	0.36

TABLA 18: TIEMPO DE REGULACIÓN CON RANGO DE +/-10, BAJADA

<i>Votaje act inicial [V]</i>	<i>V set [V]</i>	<i>Diferencia [V]</i>	<i>V act final [V]</i>	<i>Error [V]</i>	<i>Tiempo [seg]</i>
141	120	-21	110	10	0.48
110	100	-10	96	4	0.61
96	80	-16	84	4	0.65
84	60	-24	64	4	0.72
64	40	-24	42	2	0.85
42	30	-12	33	3	1
33	20	-13	17	3	1

TABLA 19: TIEMPO DE REGULACIÓN CON RANGO DE +/-5, SUBIDA

<i>Votaje act inicial [V]</i>	<i>V set [V]</i>	<i>Diferencia [V]</i>	<i>V act final [V]</i>	<i>Error [V]</i>	<i>Tiempo [seg]</i>
3	10	7	7	3	0.4
7	20	13	17	3	0.4
17	30	13	30	0	20
30	40	10	43	3	0.1
43	50	7	49	1	0.82
49	60	11	56	4	0.47
56	70	14	67	3	0.59
67	80	13	82	2	2.5
82	90	8	92	2	1
92	100	8	96	4	1.5
101	110	9	114	4	5
110	120	10	123	3	3.01
123	130	7	128	2	1.69
128	140	12	143	3	0.1

TABLA 20: TIEMPO DE REGULACIÓN CON RANGO DE +/-5, BAJADA

<i>Votaje act inicial [V]</i>	<i>V set [V]</i>	<i>Diferencia [V]</i>	<i>V act final [V]</i>	<i>Error [V]</i>	<i>Tiempo [seg]</i>
140	130	-10	134	4	1.82
127	120	-7	120	0	1.36
120	110	-10	107	3	1.84
107	100	-7	100	0	4.3
100	90	-10	89	1	2.27
89	80	-9	76	4	1.1
76	70	-6	69	1	1.41
69	60	-9	56	4	1.02
56	50	-6	46	4	3.39
46	40	-6	42	2	2.08
42	30	-12	26	4	1.54
26	20	-6	21	1	2.78
20	10	-10	10	0	2.03

TABLA 21: TIEMPO DE REGULACIÓN CON RANGO DE +/-3, SUBIDA

<i>Votaje act inicial [V]</i>	<i>V set [V]</i>	<i>Diferencia [V]</i>	<i>V act final [V]</i>	<i>Error [V]</i>	<i>Tiempo [seg]</i>
10	15	5	14	1	0.1
14	20	6	22	2	3
21	25	4	26	1	3.13
26	30	4	28	2	20
28	35	7	33	2	8
33	40	7	41	1	3.03
41	45	4	43	2	7
43	50	7	49	1	5.07
49	55	6	54	1	1.75
54	60	6	60	0	1.87
60	65	5	64	1	1.8
64	70	6	70	0	3.07
68	75	7	73	2	0.1
73	80	7	80	0	23.7
80	85	5	84	1	15
84	90	6	88	2	0.1
88	95	7	95	0	1
95	100	5	100	0	2
100	105	5	103	2	1.09
103	110	7	111	1	2.16
109	115	6	115	0	1.32
116	120	4	119	1	1.88
119	125	6	124	1	9
126	130	4			
127	135	8			
127	140	13			

Notar que para valores requeridos de las de 130 voltios, el motor no logra romper la inercia debido al gran rozamiento que experimenta el variac en esa sección de devanado.

TABLA 22: TIEMPO DE REGULACION CON RANGO DE +/-3, BAJADA

<i>V act inicial [V]</i>	<i>V set [V]</i>	<i>Diferencia [V]</i>	<i>V act final [V]</i>	<i>Error [V]</i>	<i>Tiempo [seg]</i>
99	95	-4	94	1	2.55
94	90	-4	91	1	0.1
91	85	-6	86	1	0.81
86	80	-6	77	3	0.71
78	75	-3	77	2	0.145
77	70	-7	69	1	5.74
69	65	-4	64	1	0.1
64	60	-4	59	1	0.1
59	55	-4	53	2	1.57
53	50	-3	48	2	3.51
48	45	-3	44	1	2.46
44	40	-4	40	0	1
40	35	-5	36	1	3.58
36	30	-6	30	0	22
30	25	-5	24	1	5.25
25	20	-5	17	3	5
17	10	-7	10	0	3

#### **4.8.2. Pruebas de tiempo de estabilización con actuación cada 2.5 segundos y regulando tiempo de actuación del motor reductor.**

Para las siguientes pruebas se ha cambiado el método de actuación del motor reductor. Usar el método tenía serias desventajas, una era que el motor siempre estaba en marcha oscilando alrededor de un punto, haciendo cambios de giro bruscos que a la larga podían dañar sus engranajes o quemarlo. Otro inconveniente era que, las velocidades variables se traducen como voltajes variables, asimismo los voltajes variables en corrientes iniciales de arranque variables, y estas, en torques iniciales variables, que en algunos casos al ser bajos no lograban mover el actuador. Pero lo más grave de todo es, que al tener que controlar un motor DC de considerable momento de inercia se



necesita un cierto periodo de tiempo para acelerar, lo que significa que hay que darle cierto margen antes de cada actuación del motor reductor, como consecuencia el actuador realiza oscilaciones en un rango de más de una decena de voltios, haciendo que aumente y disminuya continuamente la velocidad del motor, y causando aumentos de corriente innecesarios, de hecho es por eso que ni si quiera se opto por realizar pruebas en esas condiciones.

Después de un periodo de incertidumbre, se observó las regulaciones manuales sobre el variac alimentando el motor DC nunca causaban (obviamente) las mismas oscilaciones que el actuador, entonces se procedió a emular a través del algoritmo del programa, lo más parecido a una regulación hecha por una mano humana. Un ser humano al regular el variac capta con sus sentidos dos variables de control, con la vista mira el voltaje en el display, y con los oídos nota la velocidad del motor, luego mueve la perilla, ya sea para subir o bajar el voltaje (y la velocidad), espera un momento “a ver qué pasa”, y si el voltaje es el deseado lo deja así, y si no, vuelve a repetir el proceso hasta que la variable llegue al valor requerido. Implementado ese control al actuador, se quita totalmente la subrutina que hacía que el motor reductor variara su velocidad, y se hizo que el controlador midiera voltaje repetidamente pero que el motor reductor solo actuara cada 2.5 segundos, cada vez que el motor reductor actúa lo hace por un periodo de tiempo en función de la diferencia entre el voltaje leído y el voltaje del setpoint, así el motor se activa durante un corto periodo de tiempo cuando la diferencia de voltajes es poca, y durante un periodo de tiempo mayor cuando la diferencia sea grande. Después de realizar lo anteriormente mencionado fue notorio el resultado, tanto el voltaje terminal del generador como la velocidad del eje se regulaban de forma suave y satisfactoriamente rápida.

A continuación, se hicieron algunas pruebas en estas condiciones:

La primera prueba es estabilizando un voltaje terminal AC del variac, para esto se conecta una línea y el neutro con la entrada del sensor de voltaje AC, luego se pone un valor 20 voltios más elevado que el actual, se mide el tiempo hasta que el voltaje queda estable y se cuenta las veces que trabaja el actuador.

TABLA 23: PRUEBA DE TIEMPO DE REGULACIÓN AL VARIAC EN VACÍO.

<i>Voltaje act inicial [V]</i>	<i>Set point [V]</i>	<i>Diferencia [V]</i>	<i>Voltaje act final [V]</i>	<i>Voltaje control multímetro [V]</i>	<i>Tiempo [seg]</i>	<i>Pasos</i>	<i>Voltaje control salida DC multímetro [Vdc]</i>	<i>Error [V]</i>	<i>Error [%]</i>
1	20	19	19	19	13.35	3	26	1	5.00
20	40	20	39	39	9.46	3	54	1	2.50
39	60	21	60	60	8.58	3	83	0	0.00
60	80	20	79	79	11	4	111	1	1.25
79	100	21	99	99	19	8	139	1	1.00
99	120	21	119	119	28	14	168	1	0.83
119	140	21	139	139	22	9	197	1	0.71

La segunda prueba consiste en conectar la salida DC del variac al motor DC, un terminal del generador y el neutro del generador conectado en estrella, hacia la entrada AC del módulo, de esta forma se podrá observar el comportamiento del control del voltaje terminal de un generador trifásico síncrono sin carga.

TABLA 24: RESULTADO DE PRUEBA DE ESTABILIZACIÓN DE GENERADOR SIN CARGA.

<i>voltaje act inicial [V]</i>	<i>Set point [V]</i>	<i>Diferencia [V]</i>	<i>V act final [V]</i>	<i>Voltaje control multímetro [V]</i>	<i>Tiempo [seg]</i>	<i>Pasos</i>	<i>Voltaje control salida DC multímetro [Vdc]</i>	<i>Error [V]</i>	<i>Error [%]</i>
60	70	10	70	69	4	3	37	0	0.00
70	80	10	79	78.2	9	4	42.7	1	0.01
79	90	11	89	86.8	5	2	47	1	0.01
88	100	12	99	98.5	4	1	53.3	1	0.01
99	120	21	120	120	10	3	75.3	0	0.00

En la tercera prueba consiste en conectar las entradas y salidas del variac de igual manera que en la segunda prueba, la diferencia está en que ahora se aplicara cargas al generador, lo cual causara caídas de tensión, se va a poner un setpoint fijo de 100 voltios AC, luego se irán conectando poco a poco cargas resistivas procedentes de un banco de resistencias.

TABLA 25: RESULTADO DE PRUEBA DE ESTABILIZACIÓN DE VOLTAJE AL GENERADOR CON CARGA.

<i>Carga aplicada [%]</i>	<i>Carga aplicada [Amp]</i>	<i>voltaje al aplicar la carga [V]</i>	<i>Set point [V]</i>	<i>Caída de tensión [V]</i>	<i>V act final [V]</i>	<i>Tiempo [seg]</i>	<i>Pasos</i>	<i>Error [V]</i>	<i>Error [%]</i>
0	0	100	100	0	100			0	0
2.5	0.2	98	100	2	100	3	1	0	0
5	0.3	96	100	4	100	8	3	0	0
7.5	0.6	93	100	7	100	3	1	0	0
10	0.8	89	100	11	100	3.9	1	0	0

## CONCLUSIONES

Se logro realizar la regulación terminal automática de un generador síncrono trifásico de corriente alterna, de manera que se mantenga en un rango de +/-1 del valor ingresado por el usuario, por un tiempo prolongado sin ningún problema.

Se implemento un sistema de control y medición para regular la salida de tensión de un variac trifásico de 30 amperios para aplicaciones en corriente directa y alterna, haciendo uso del microprocesador ATmega2560 incorporado en una placa Arduino en conjunto con un divisor de tensión para medir voltaje directo, un sensor de voltaje alterno y un motor reductor para regular la salida de tensión del variac mediante el giro de su eje y consiguiente cambio de voltaje.

Se realizo el algoritmo de funcionamiento y la programación del sistema microprocesador ATmega2560 mediante la plataforma de Arduino IDE y complementándose con librerías basadas en lenguaje C++.

Se demostró el correcto funcionamiento del sistema de control, estableciendo con el teclado un valor de voltaje a mantener en los terminales del generador y luego de eso aplicando caídas de tensión mediante un banco de resistencias, pudiéndose observar como en pocos segundos el voltaje medido en el generador volvía a estar en los niveles deseados.

## RECOMENDACIONES

Usar cable blindado para las señales analógicas de los sensores.

Conectar primero la extensión de alimentación al módulo antes de conectar la extensión a la fuente debido a que el cable tiene en sus extremos dos enchufes macho.

Notar que la fricción entre el carbón y las espiras del autotransformador trifásico variable cambia considerablemente entre una zona u otra.

Conectar siempre una tierra al módulo para mejorar mediciones y evitar accidentes.

Tener mucho cuidado con la polaridad en que se conectan los puntos de medición en voltaje directo, un error en esto podría causar lecturas erróneas, y en el peor de los casos la avería del Arduino.

Recordar siempre energizar primero el campo del motor DC antes que su armadura, en el caso de una conexión de motor independiente, de lo contrario se daría un corto circuito.

Procurar introducir cargas suavemente a cualquiera de las máquinas usadas en este proyecto, para evitar corrientes elevadas.

Evitar des energizar de golpe el motor DC, hay que recordar que un motor es así mismo un generador, y este “generador” estaría introduciendo un voltaje hacia el variac y hacia la red eléctrica.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] C. V. M. & B. C. Flores, Física teoría y problemas, guayaquil : Espol, 2012 .
- [2] Boylestad, Introducción al análisis de circuitos 12va edición, Pearson , 2011.
- [3] J. Raymond A. Serway & John W. Jewett, Física Para Ciencias E Ingeniería 9na Edicion, 2015.
- [4] S. J. Chapman, Máquinas eléctricas - Tercera Edición, Mc Graw Hill, 2000.
- [5] M. A. R. Pozueta, Autotransformadores, Departamento de ingeniería eléctrica y energía. Universidad de Cantabria.
- [6] M. P. A. Bermúdez, «Mathematical and numerical analysis of a transient magnetic model with voltage drop excitations,» de *Computers & Mathematics with Applications*, Santiago de Compostela, Elsevier, 2018, pp. 2710-2727.
- [7] H. B. R. & E. R. Calderón, Electromagnetismo y física moderna - Primera Edición, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, 2001.
- [8] I. L. Kosow, Máquinas eléctricas y transformadores, India: Pearson education , 2007.
- [9] L. V. J.-D. R. M.-A. K. Bouayed, «Applied Acoustics,» de *Noise and vibration of a power transformer under an electrical excitation*, Compiègne, France, Elsevier, 2017, pp. 64-70.
- [10] M. A. Pozueta, MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA, Cantabria, 2017.
- [11] T. Wildi, «MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA,» de *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia (Sexta edición)*, Quebec, Pearson, 2007, p. 97.
- [12] S.-H. Kim, «Control of direct current,» de *Electric Motor Control DC, AC, and BLDC Motors*, Elsevier, 2017, pp. 39-93.

- [13] JeanPollefliet, «Speed- and (or) Torque-Control of a DC-motor,» de *Power Electronics Drive Technology and Motion Control*, Academic Press, 2018, pp. 19.1-19.56.
- [14] W. Pumps, «Considerations in generator selection,» *World Pumps*, pp. 26-28, 2018.
- [15] S. C. S. M. S. G. David Santos Martín, Máquinas Eléctricas de Corriente Alterna, Madrid: Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Carlos III, 2011.
- [16] D. I. M. G. Macri, Generador Síncrono, Mar del Plata: Universidad Nacional de Mar del Plata.
- [17] G. MacAngus-Gerrard, Offshore Electrical Engineering Manual (Second Edition), Elsevier Inc, 2018.
- [18] S. K. A. Boonyang Plangklang, «Study of Generator Mode on Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) for Application on Elevator Energy Regenerative Unit (EERU),» de *Energy Procedia*, Elsevier, 2013, pp. 382-389.
- [19] R. G. ,. S. M. A. Ramírez, «Integral Retarded Velocity Control of DC Servomotors,» *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 46, 2013.
- [20] A. S. B. O. E. P. J. H. R. H. E. M. R. S. O. P. M. O. Oliveira, «Principales Características de la Corriente Inrush,» 2012.
- [21] Q. A. L.L.Zhang, «Identification of inrush currents in power transformers based on higher-order statistics,» de *Electric Power Systems Research*, Guangzhou , Elsevier, 2017, pp. 161-169.
- [22] <https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-2560-rev3>, «ARDUINO MEGA 2560 REV3,» 2018.
- [23] B. Electronics, «Mercado libre,» [En línea]. Available: <https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-420307444-arduino-controlador->

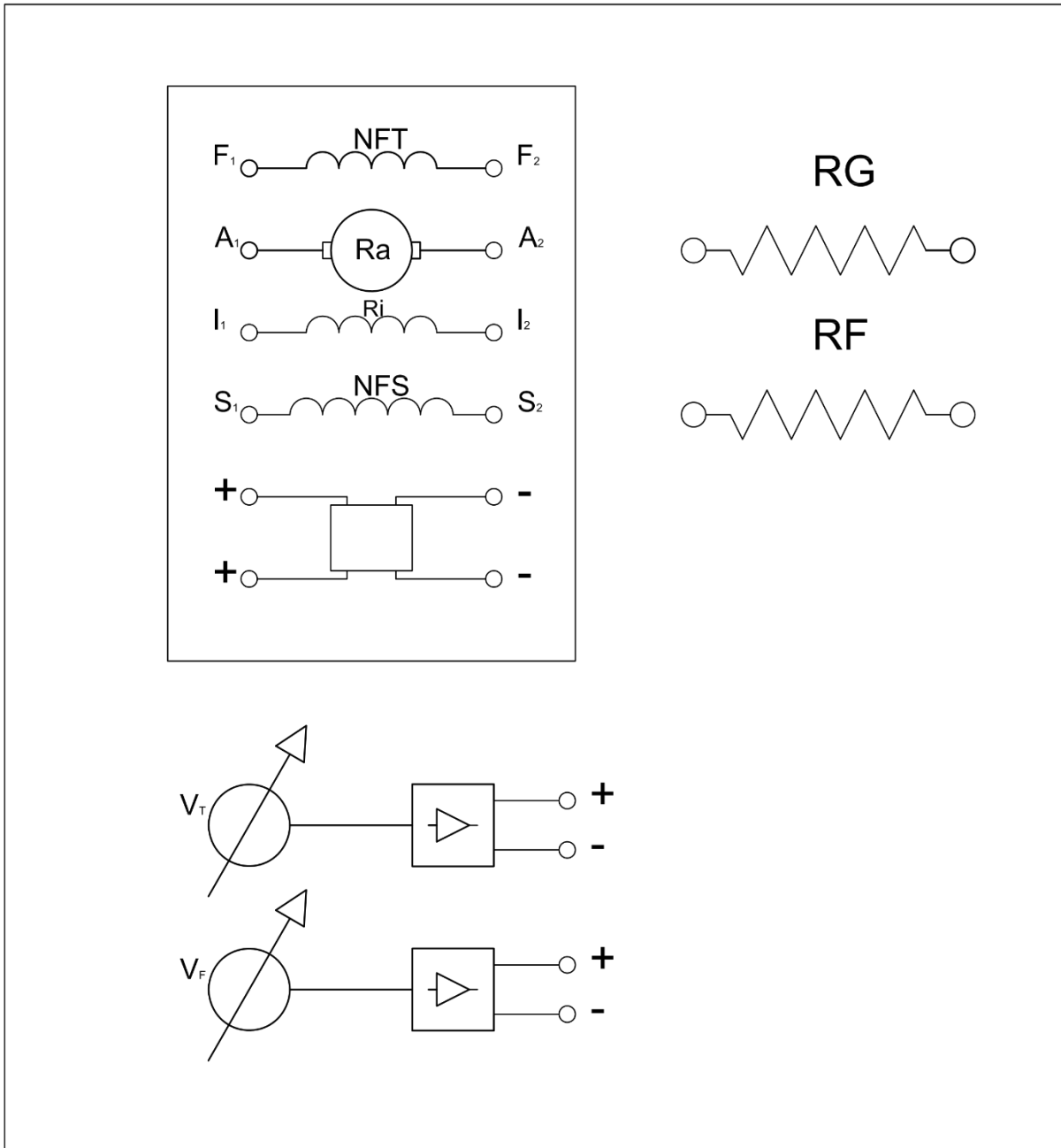
driver-motores-dc-o-de-pasos-l298n-\_JM?quantity=1. [Último acceso: 6 Mayo 2019].

- [24] C. Cassiolato, «PROFIBUS: Puesta a tierra, blindaje, ruidos, interferencias, reflexiones y mucho mas...» [En línea]. Available: <http://www.smar.com/espanol/articulos-tecnicos/profibus-puesta-a-tierra-blindaje-ruidos-interferencias-reflexiones-y-mucho-mas>.
- [25] DrFrankSüli, «Interference and shielding,» de *Electronic Enclosures, Housings and Packages*, United Kingdom, Woodhead Publishing, 2018, pp. 499-526.
- [26] A. G. González, «¿Qué es y cómo funciona un servomotor?,» *PANAMAHITEK*, 2016.
- [27] Hampden, «MODEL #Machines - SM-300 Synchronous Machine,» 2018.
- [28] G. L. S. Technologies, AC Voltage Sensor (ZMPT101B), Bangalore-India: Technologies, Global Logica™ Software.
- [29] L. Nanjing Zeming Electronic Co., ZMPT107 potential transformer-Small size,high accuracy,consistency,for power measurement, Nanjing Zeming Electronic Co., Ltd.
- [30] S. N. K. W. M. S. M. M. I. Abubakar, «CALIBRATION OF ZMPT101B VOLTAGE SENSOR MODULE USING POLYNOMIAL REGRESSION FOR ACCURATE LOAD MONITORING,» *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 12, nº 4, pp. 1076-1084, 2017.
- [31] R. S. A. Ramírez, «Integral Retarded Velocity Control of DC Servomotors,» de *IFAC Proceedings Volumes*, México, Elsevier, 2016, pp. 558-563.

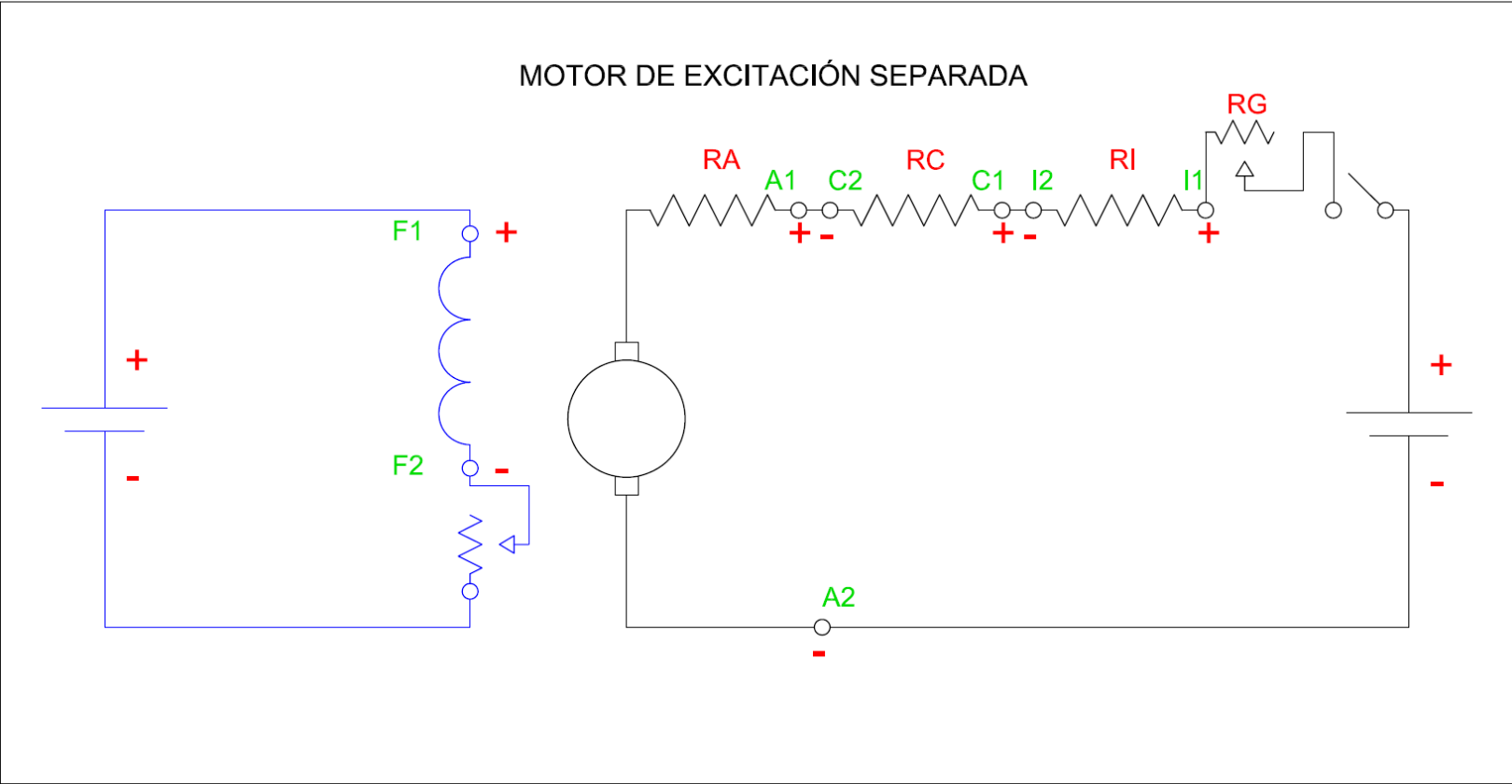


## **ANEXO**

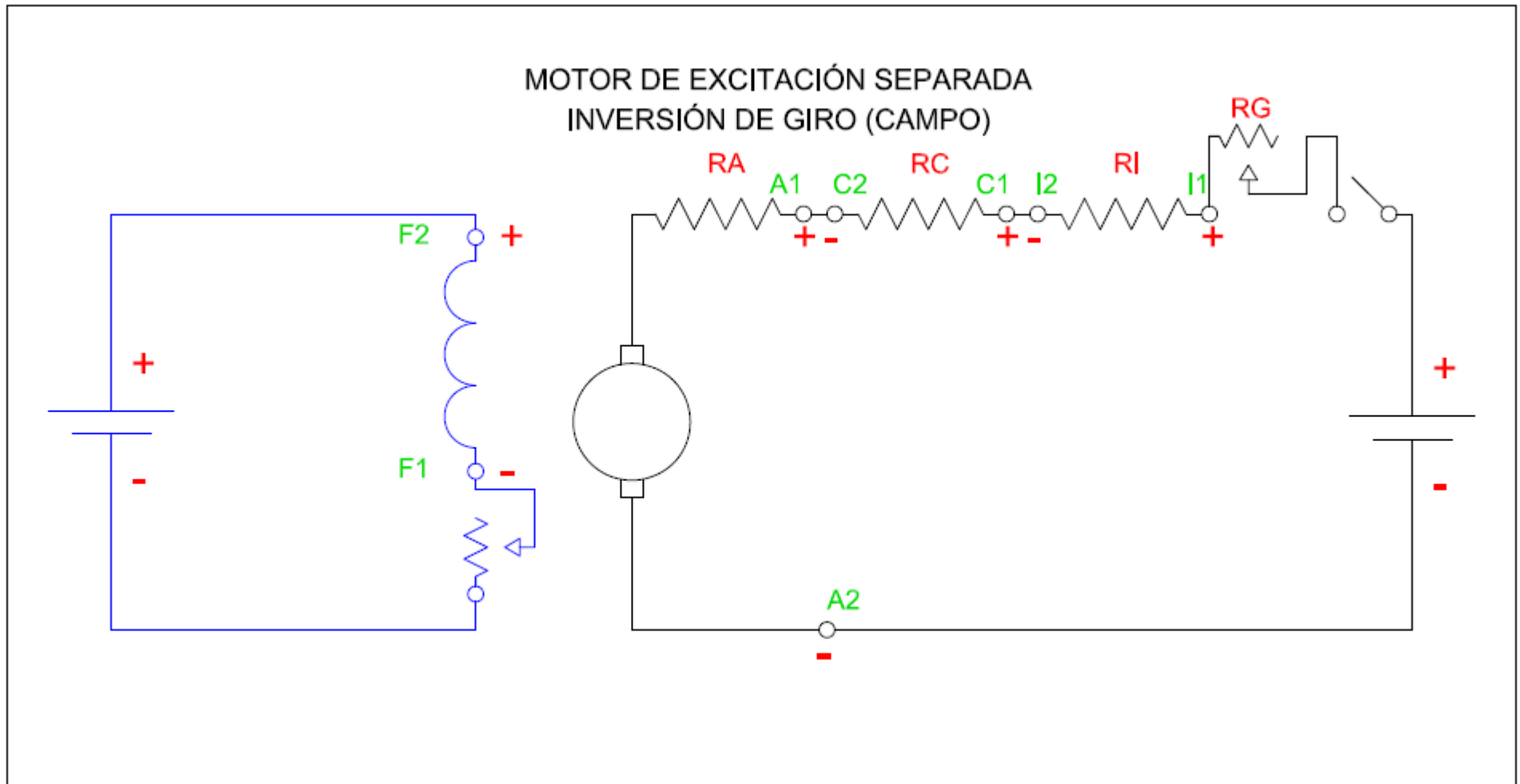
## 4.9. Panel del motor DC



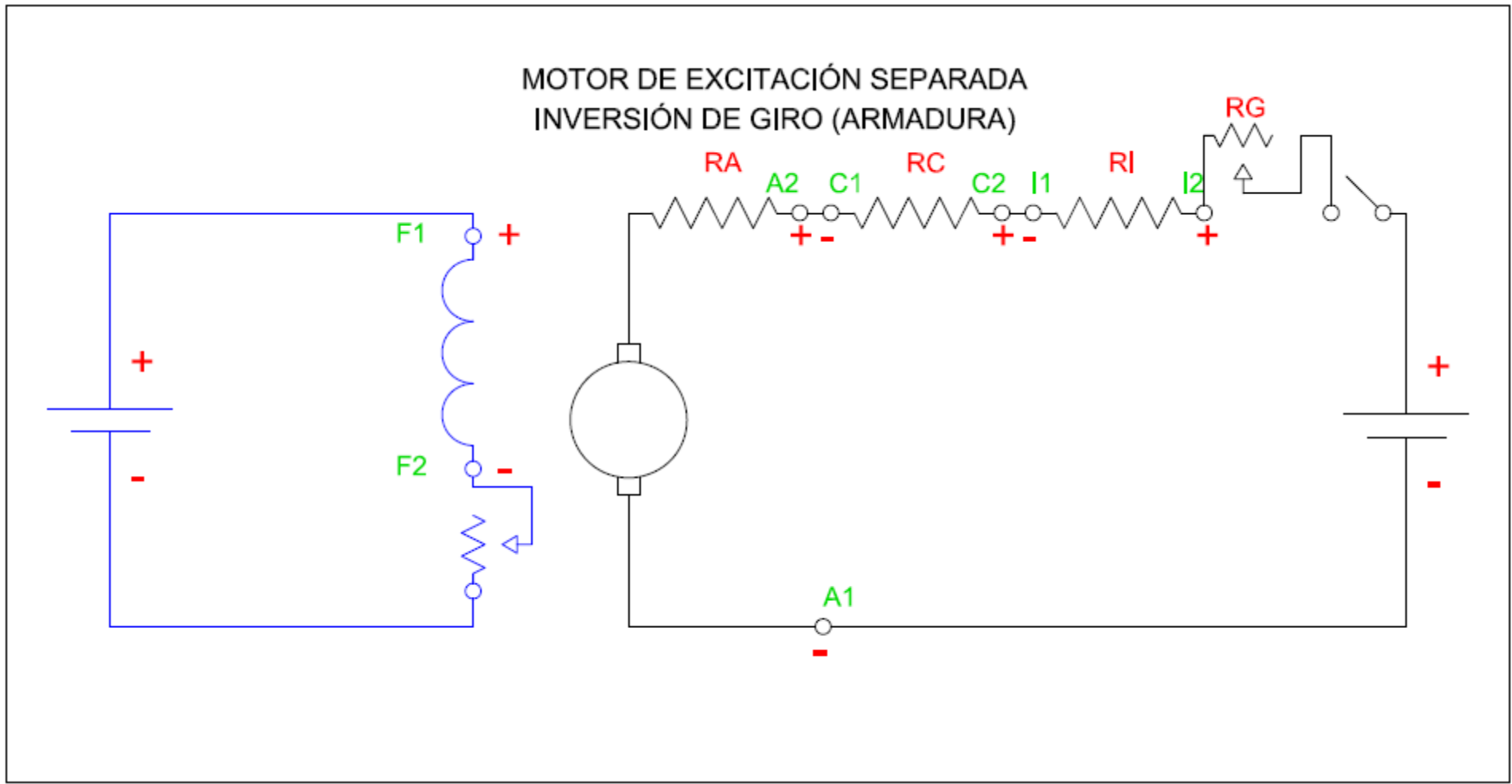
4.10. Esquema de motor de excitación separada



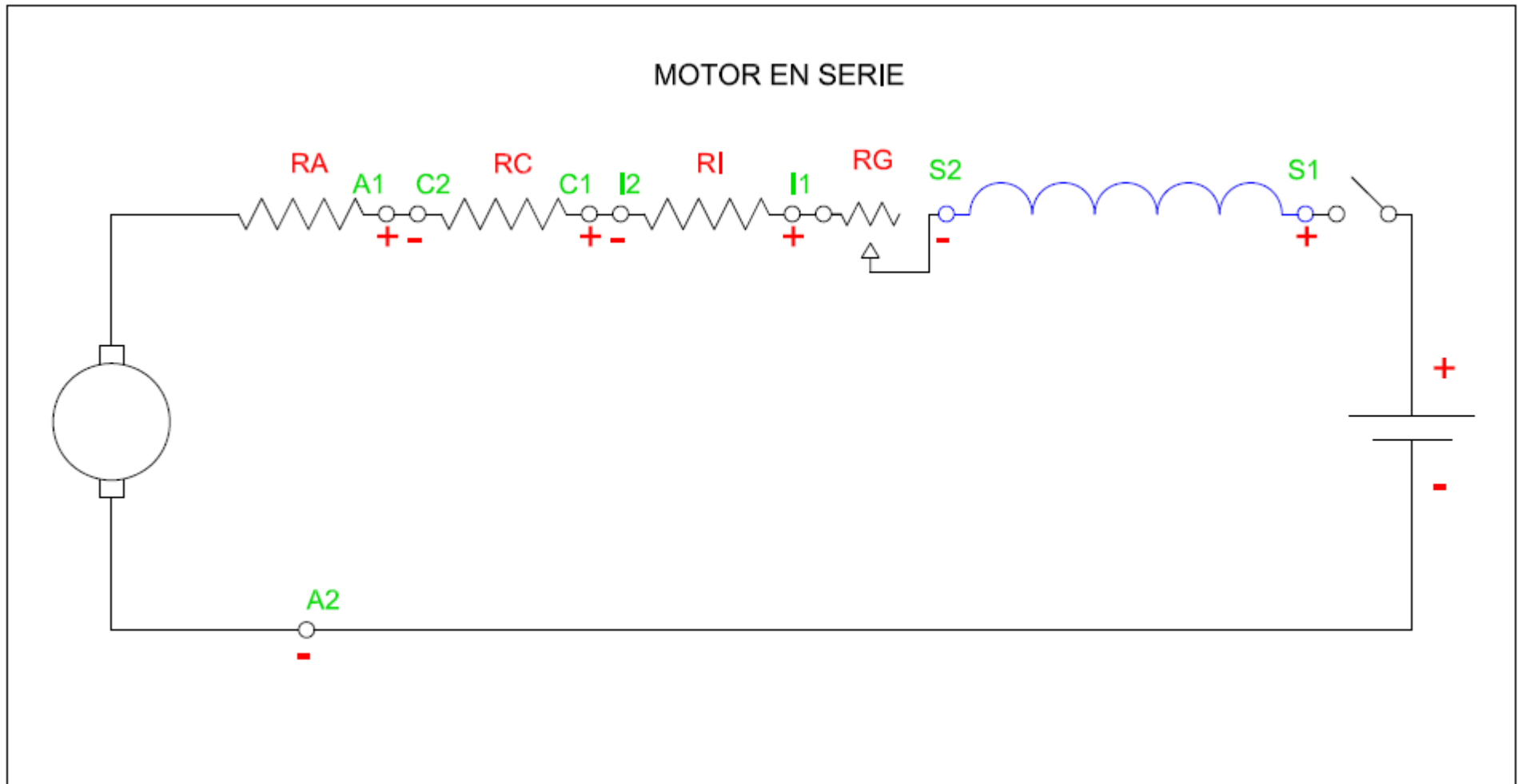
4.11. Esquema de conexión motor de excitación separada con inversión en el campo



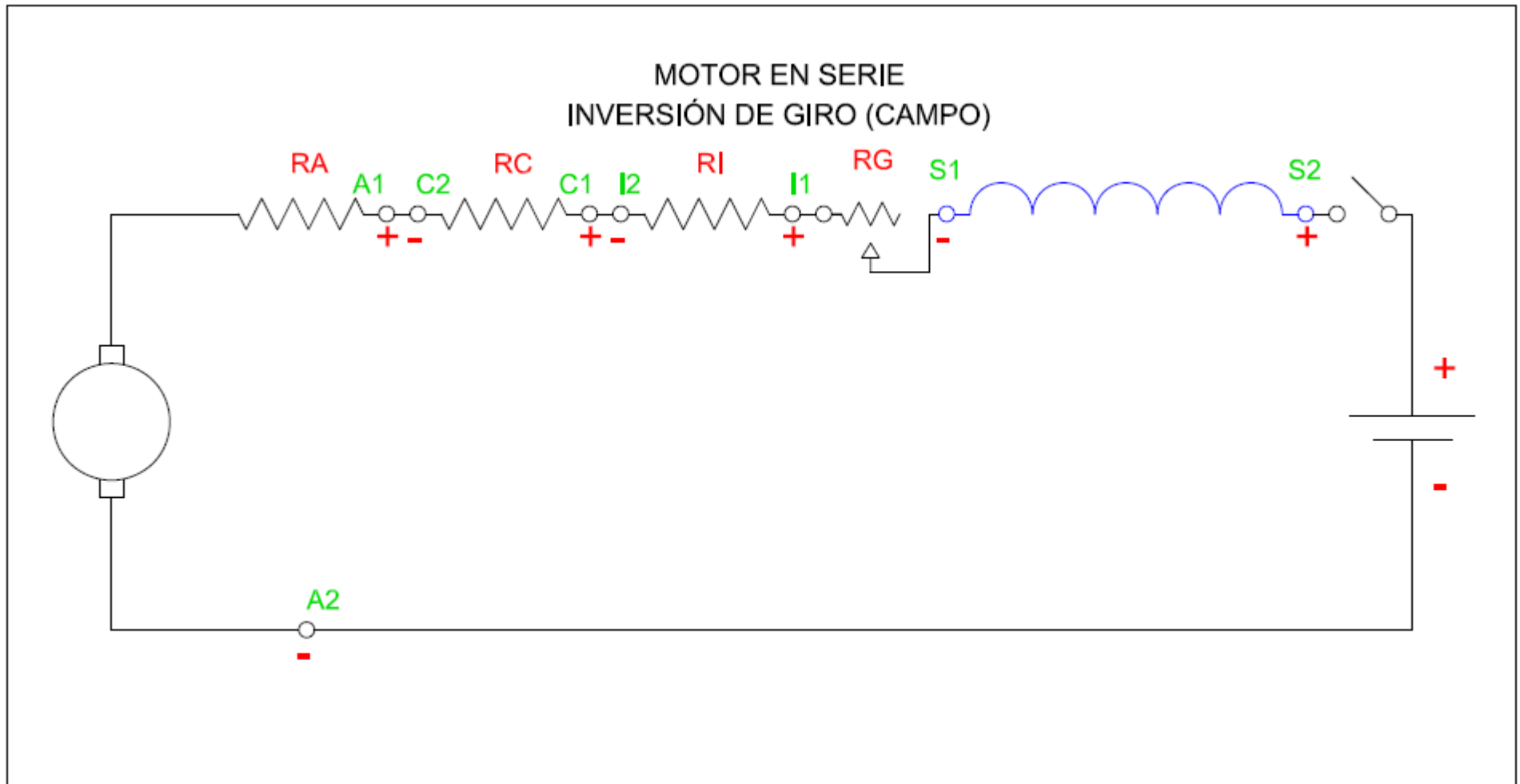
4.12. Esquema de conexión motor de excitación separada con inversión en la armadura



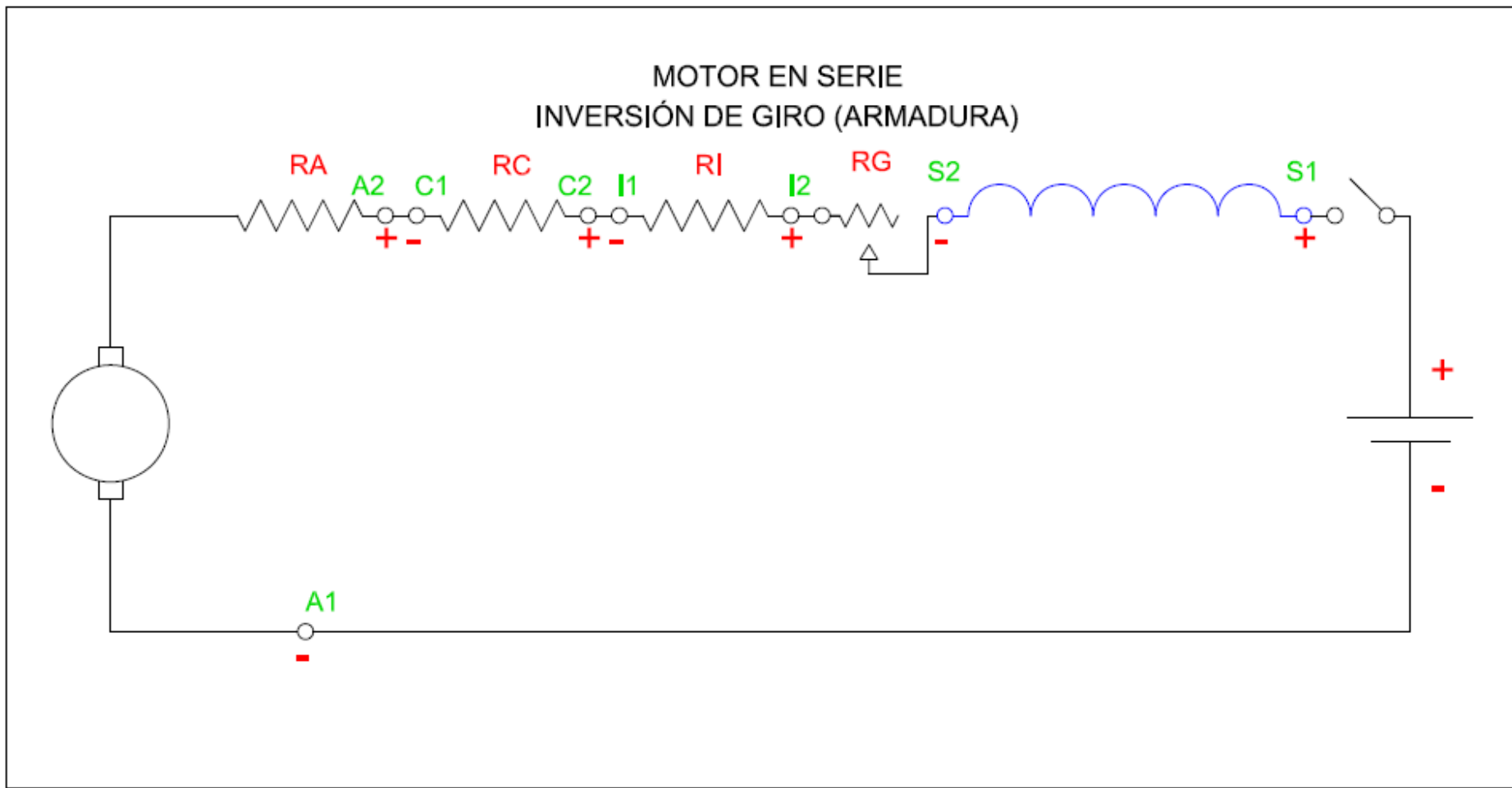
#### 4.13. Esquema de conexión motor en serie



4.14. Esquema de conexión motor en serie con inversión de giro en el campo

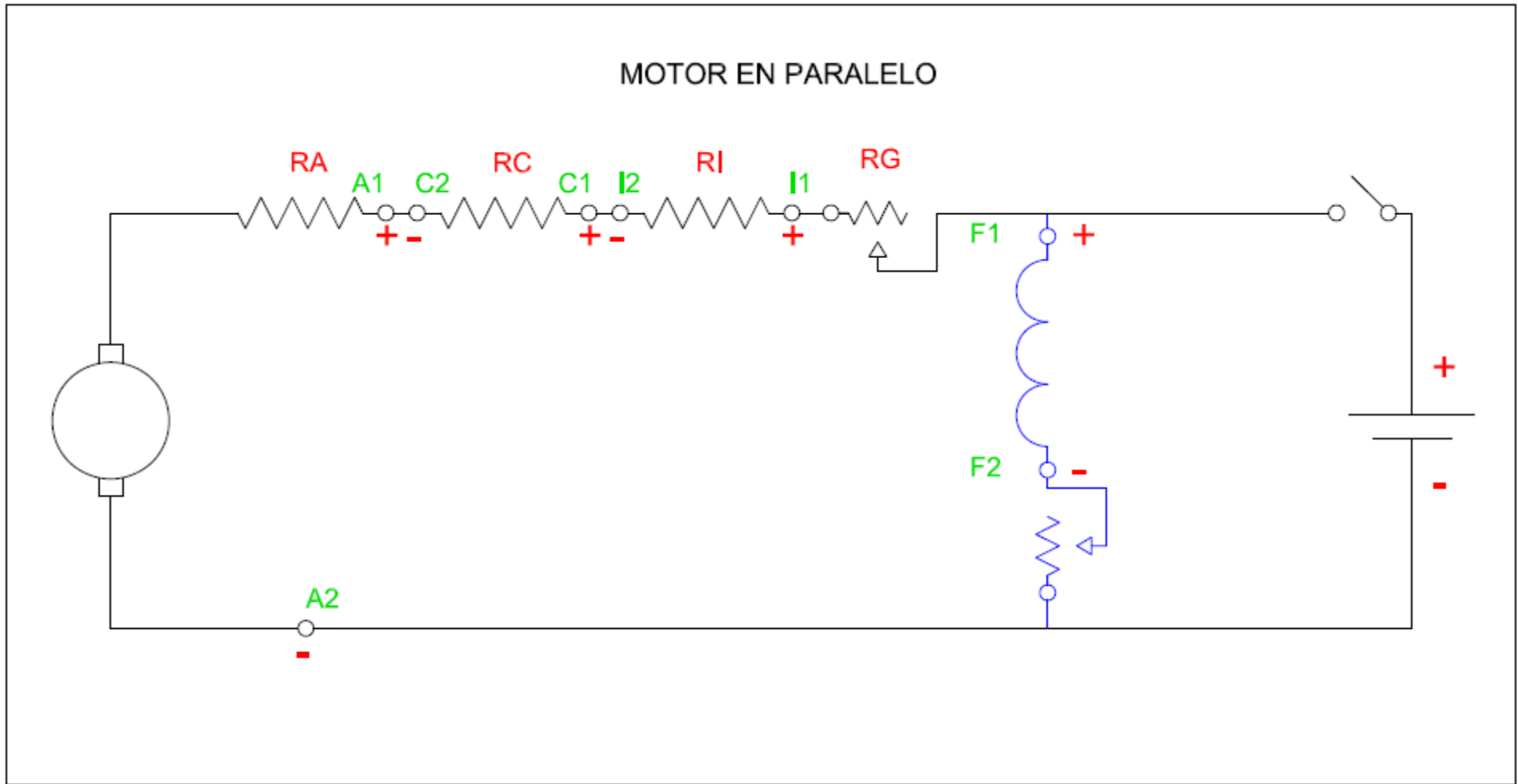


4.15. Esquema de conexión motor en serie con inversión de giro en la armadura

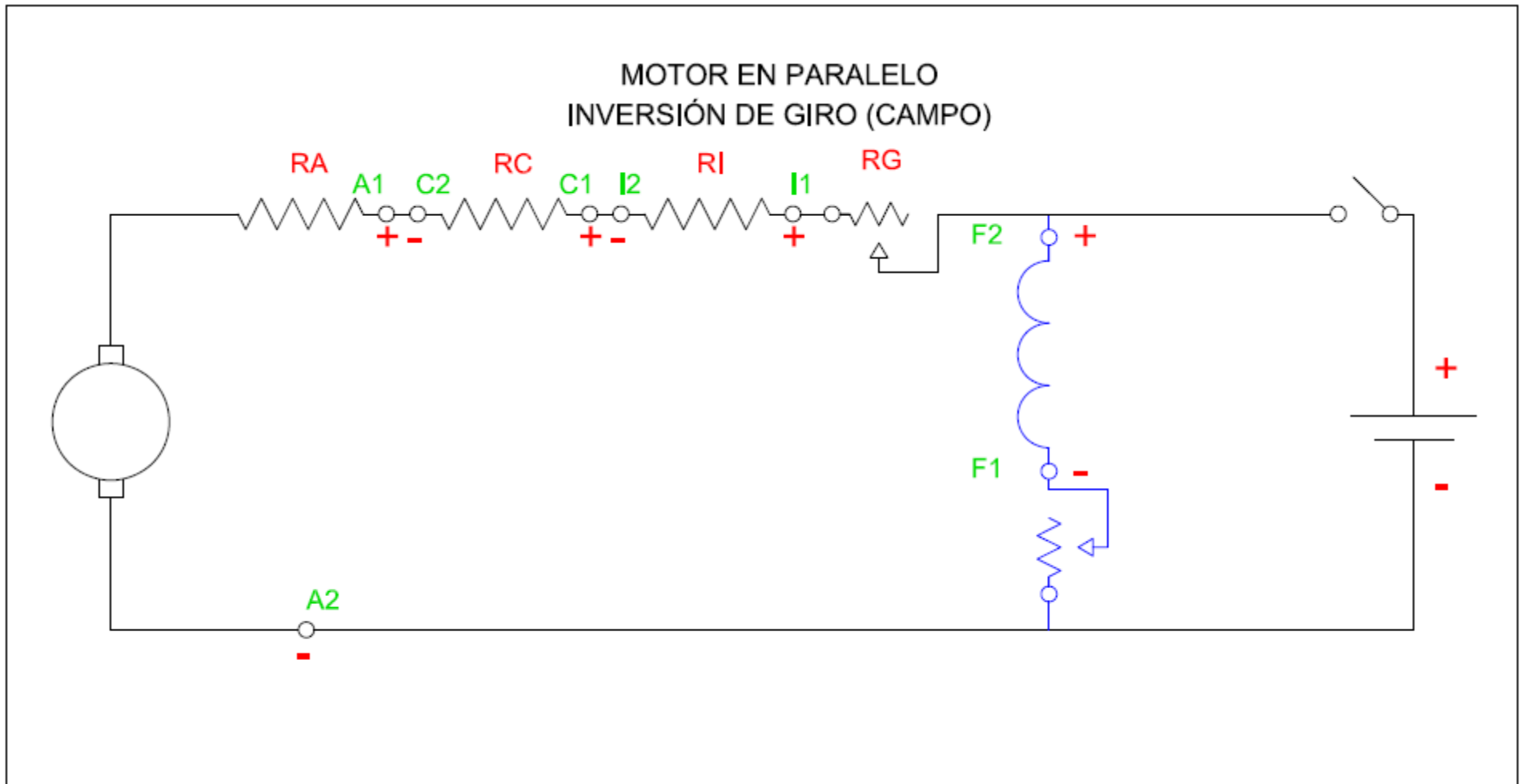




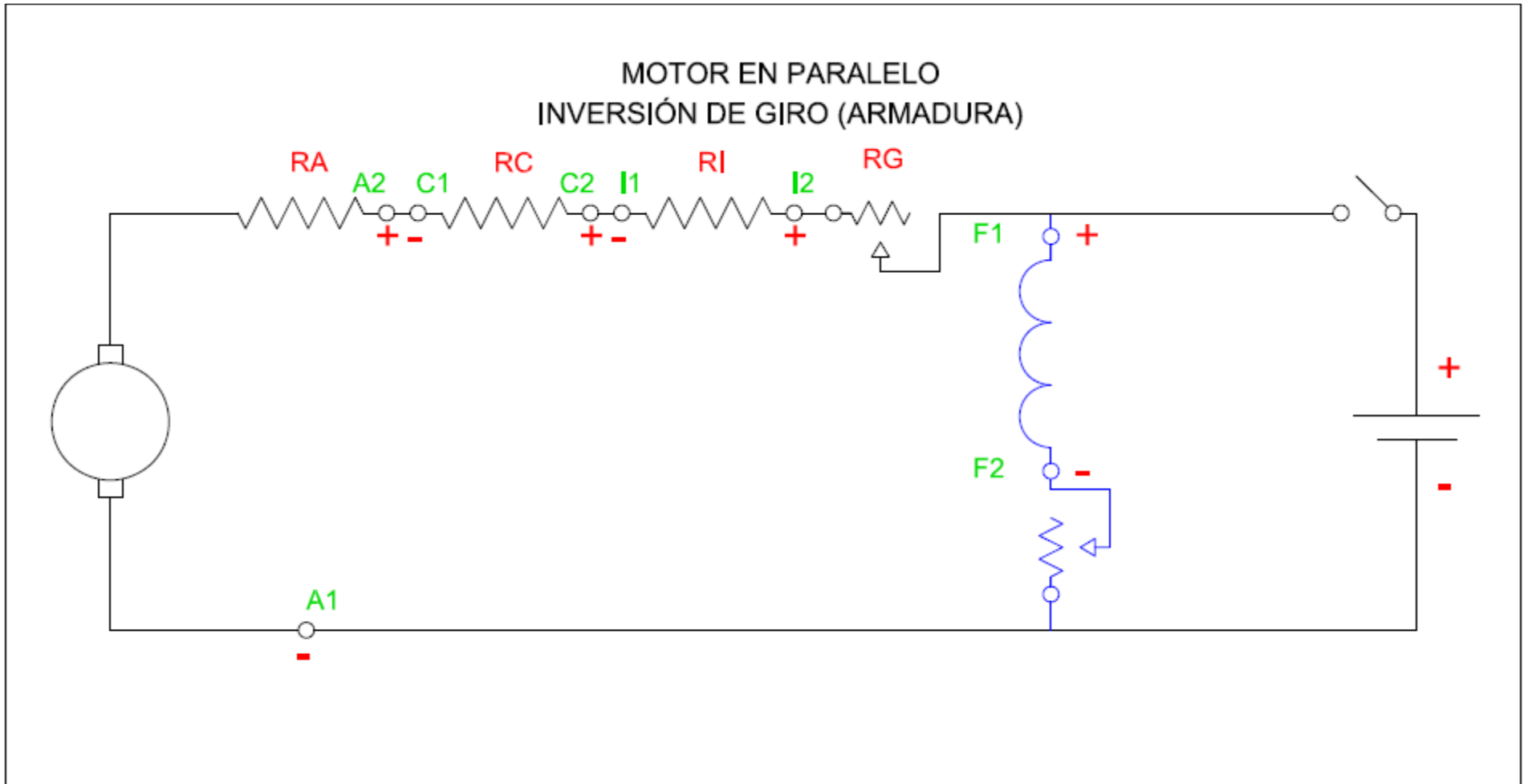
4.16. Esquema de conexión motor en paralelo



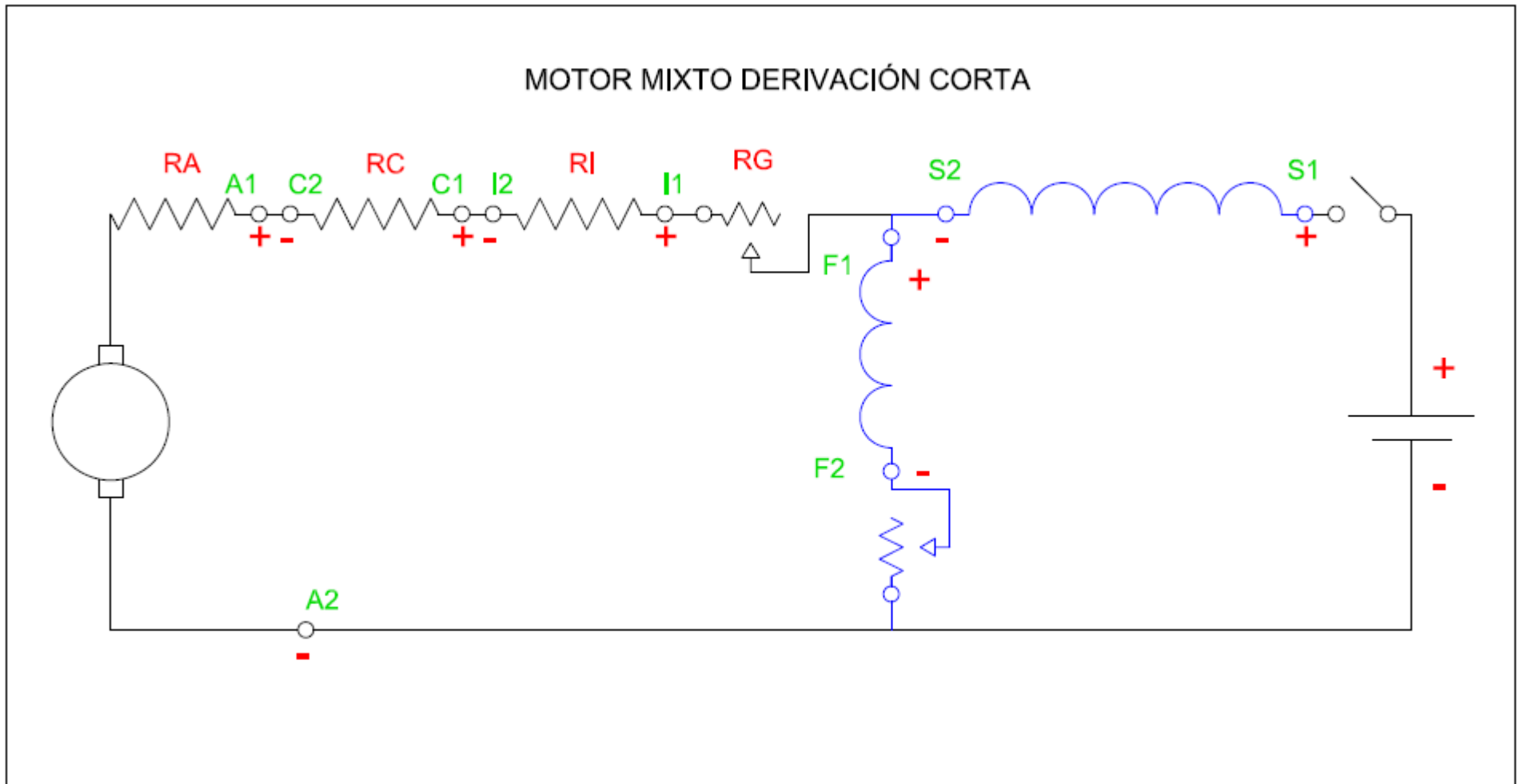
4.17. Esquema de conexión motor en paralelo con inversión de giro en el campo



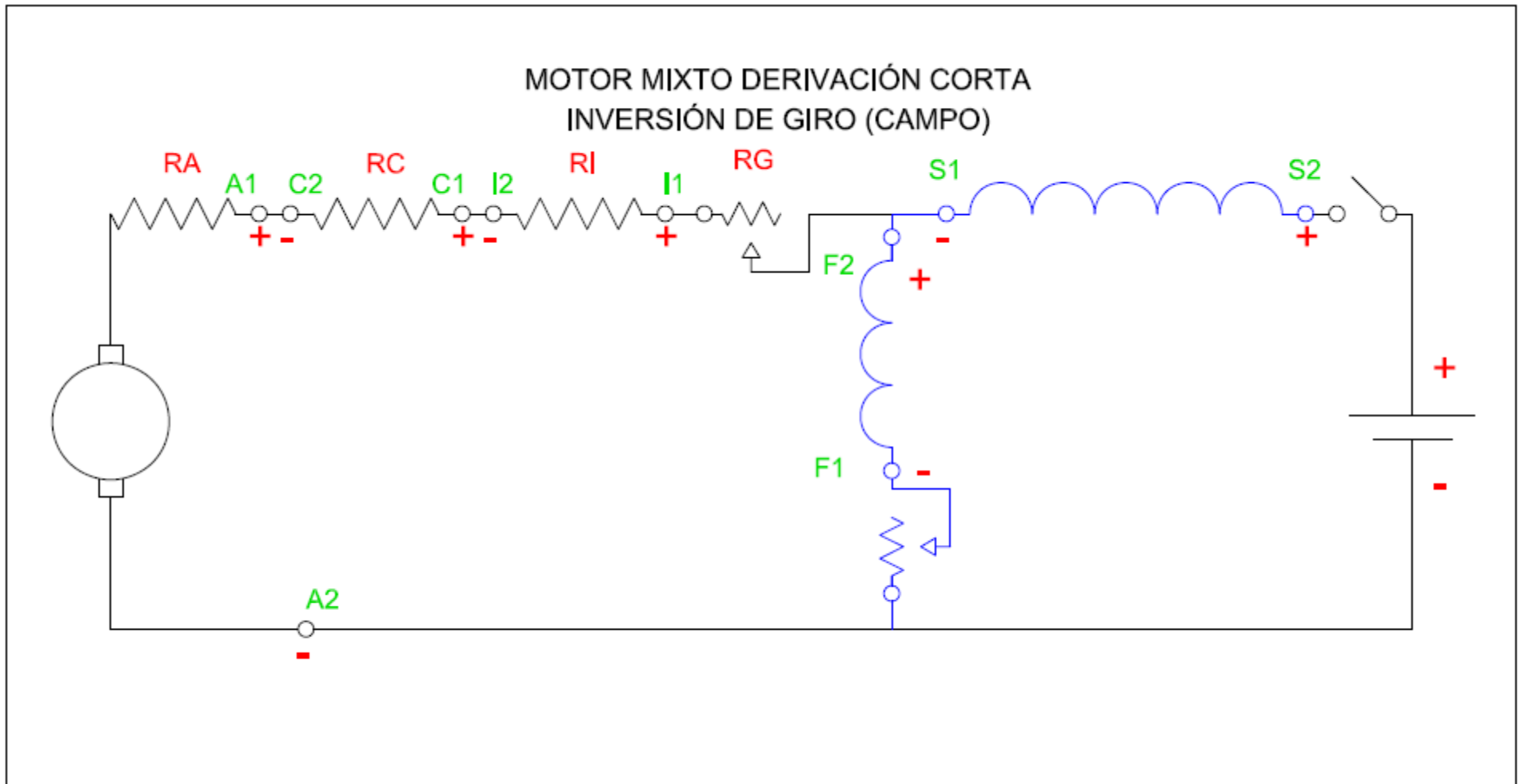
4.18. Esquema de conexión motor en paralelo con inversión de giro en la armadura



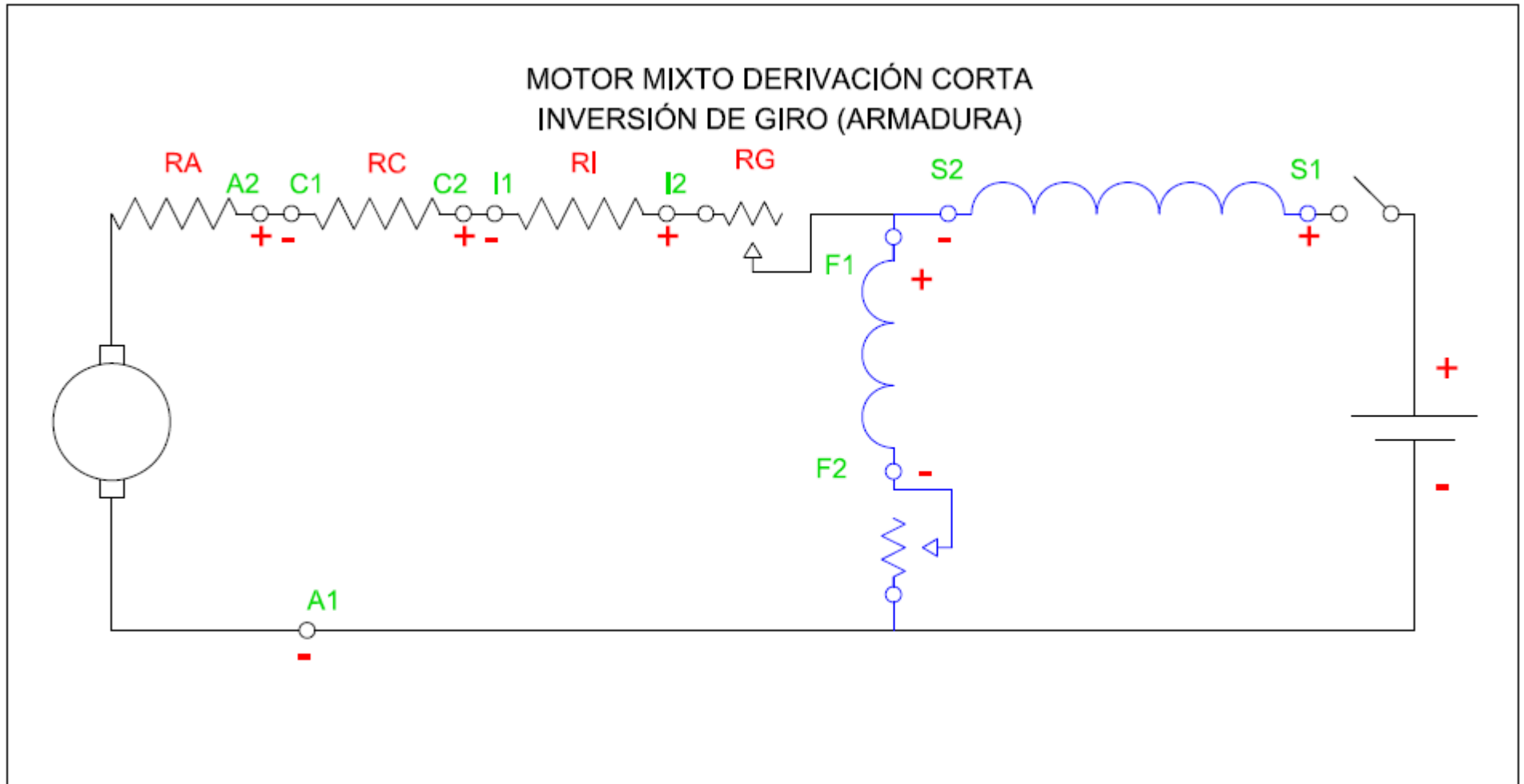
4.19. Esquema de conexión motor mixto de derivación corta



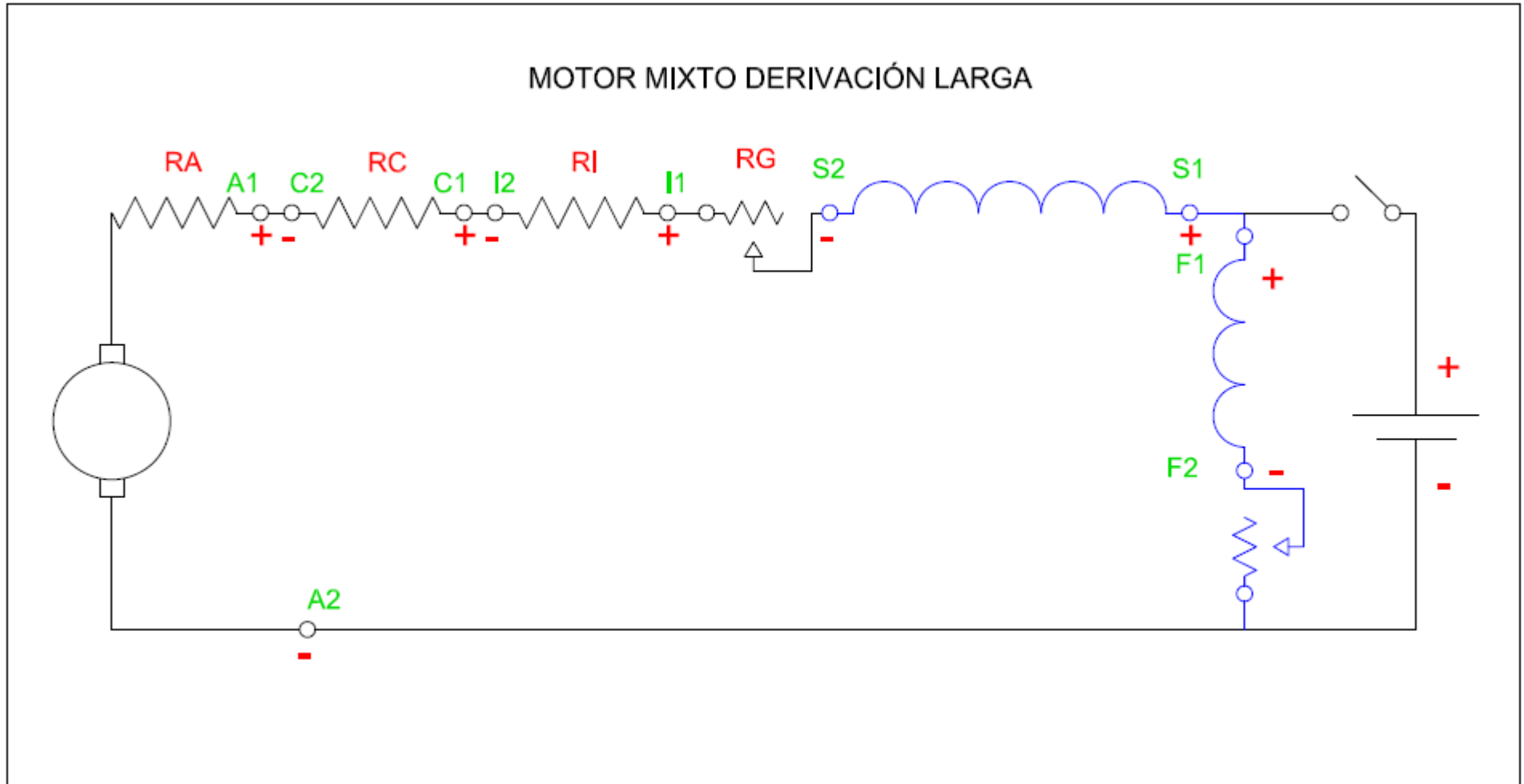
4.20. Esquema de conexión motor mixto de derivación corta con inversión de giro en el campo



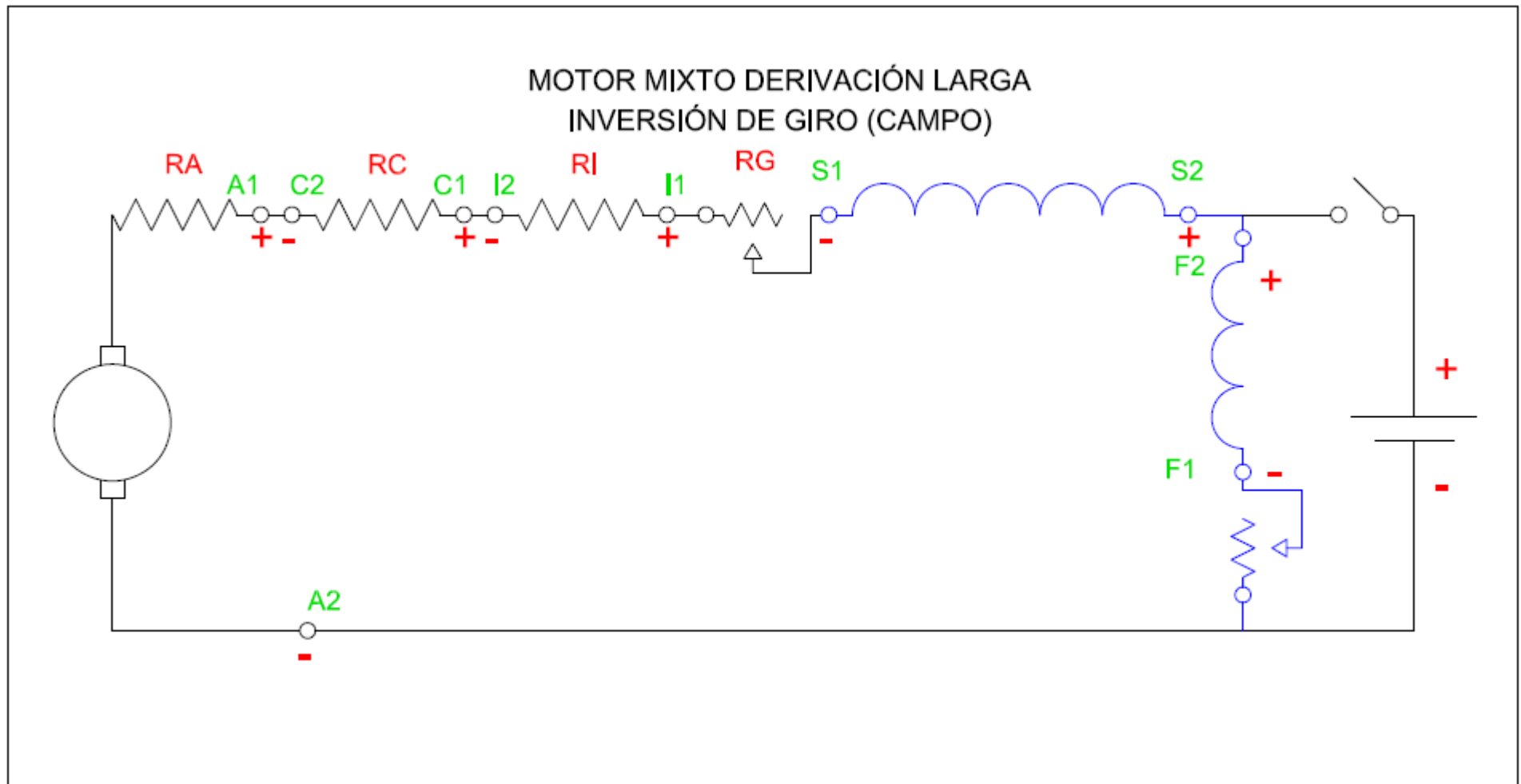
4.21. Esquema de conexión motor mixto de derivación corta con inversión de giro en armadura



4.22. Esquema de conexión motor mixto de derivación larga

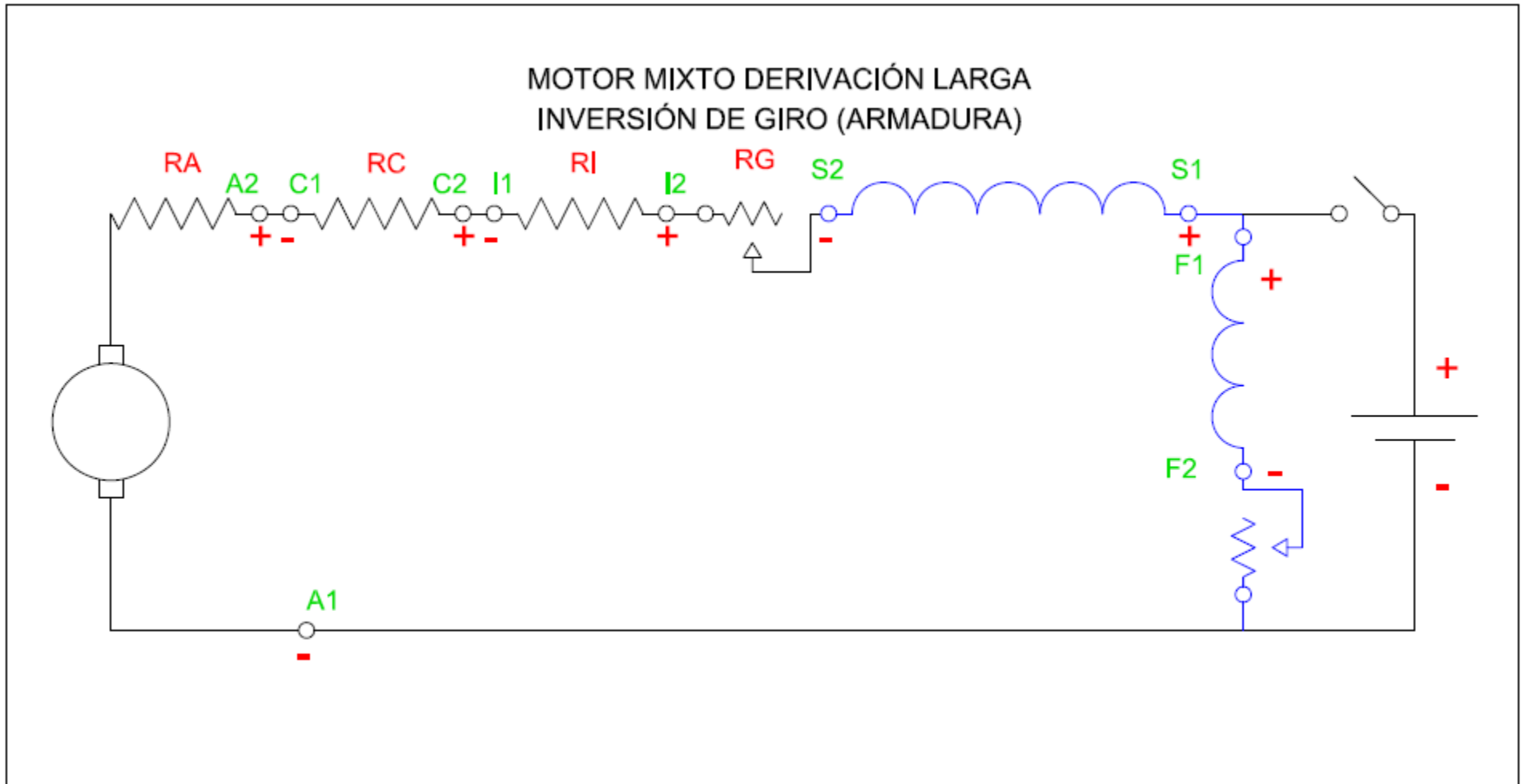


4.23. Esquema de conexión motor mixto de derivación larga con inversión de giro en el campo

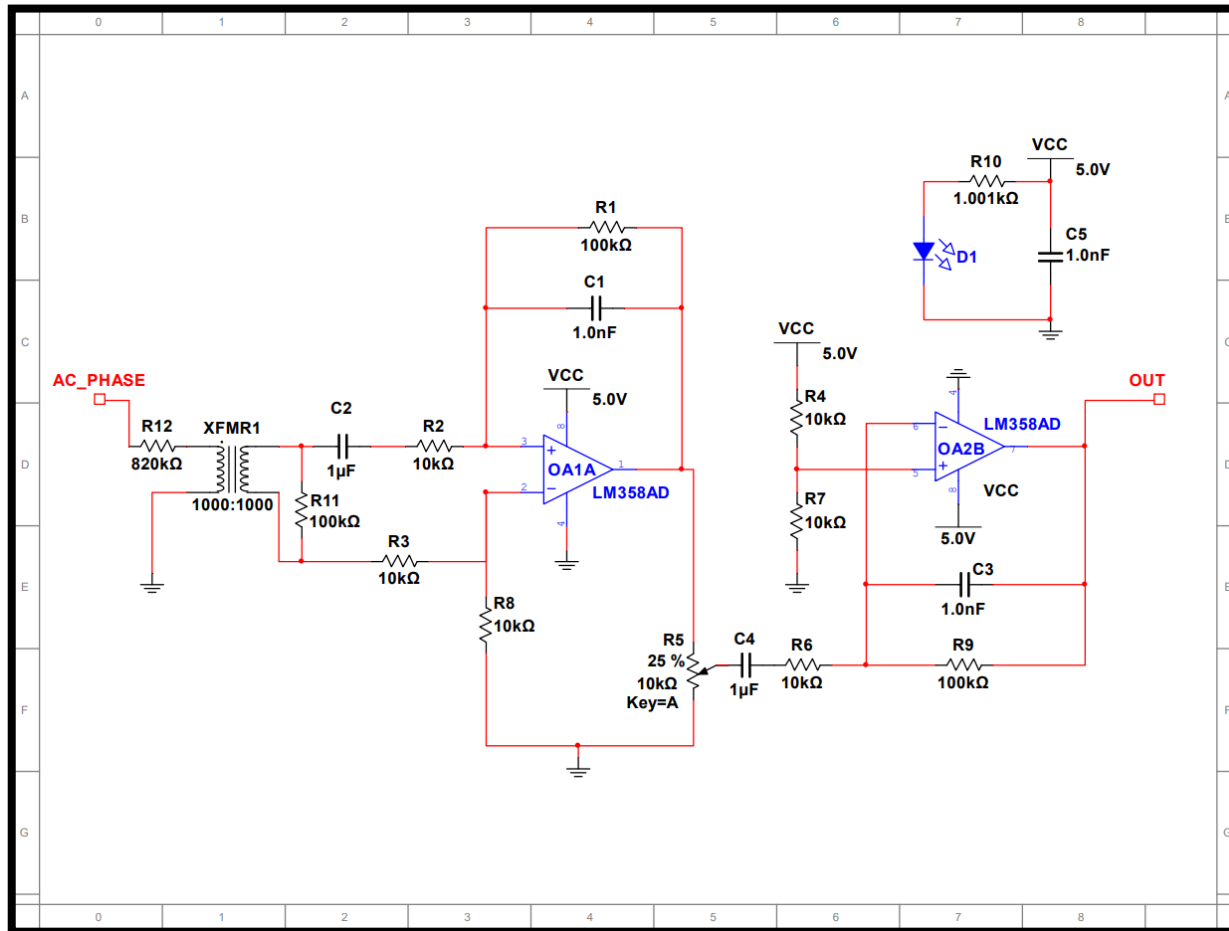




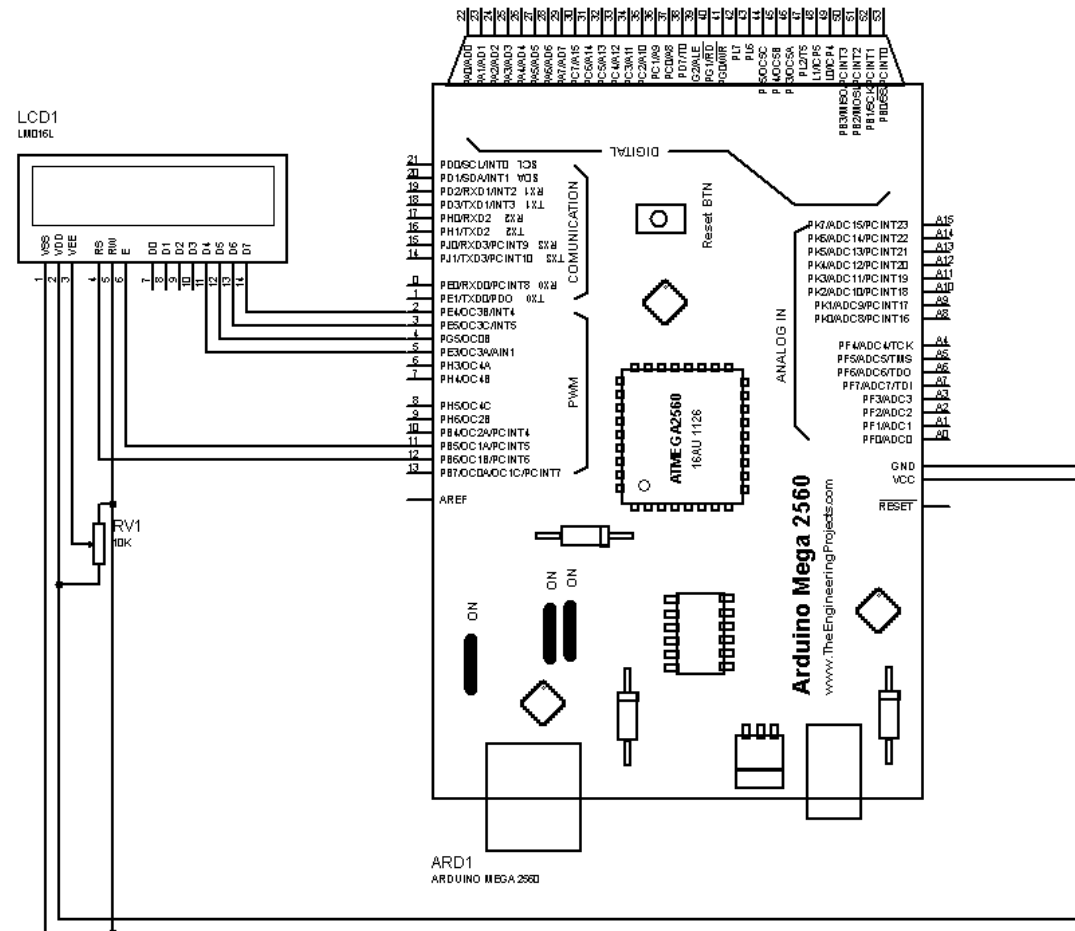
4.24. Esquema de conexión motor mixto de derivación larga con inversión de giro en la armadura



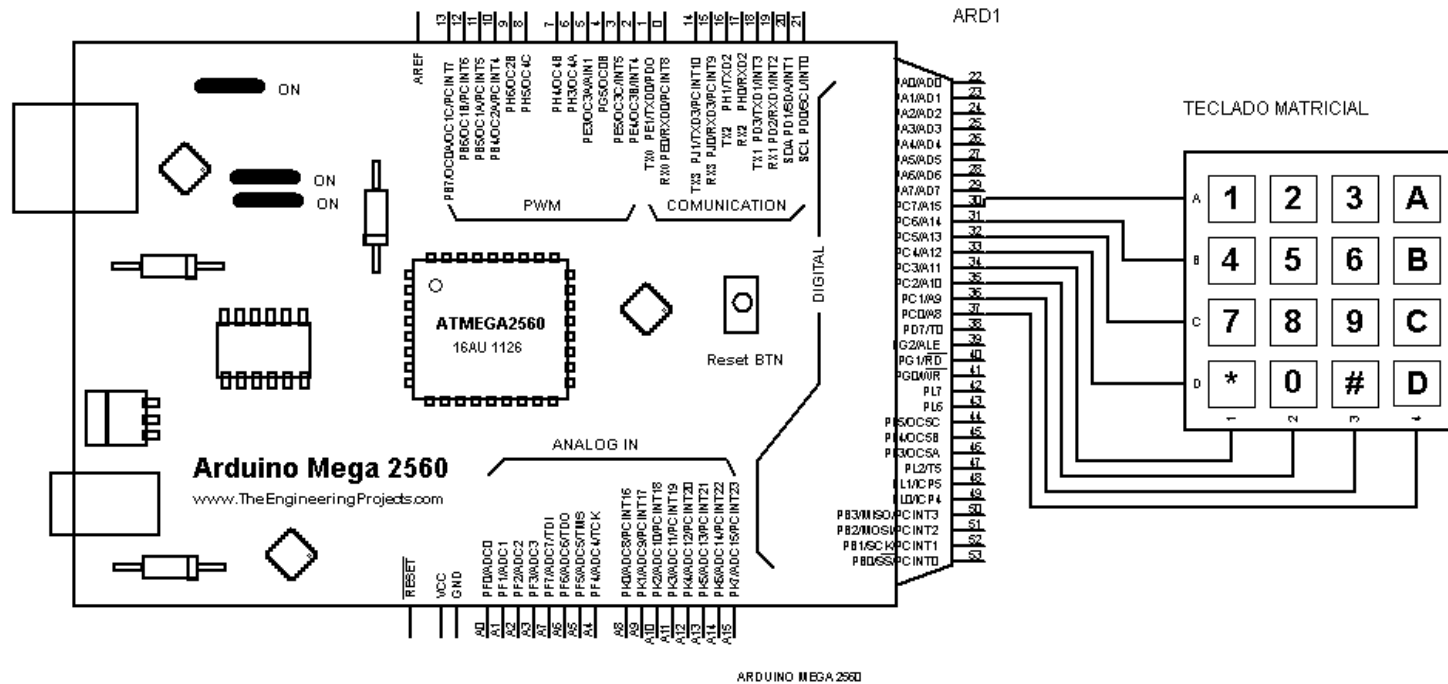
4.25. Esquema de conexión del sensor de voltaje ZMPT101B en multisim



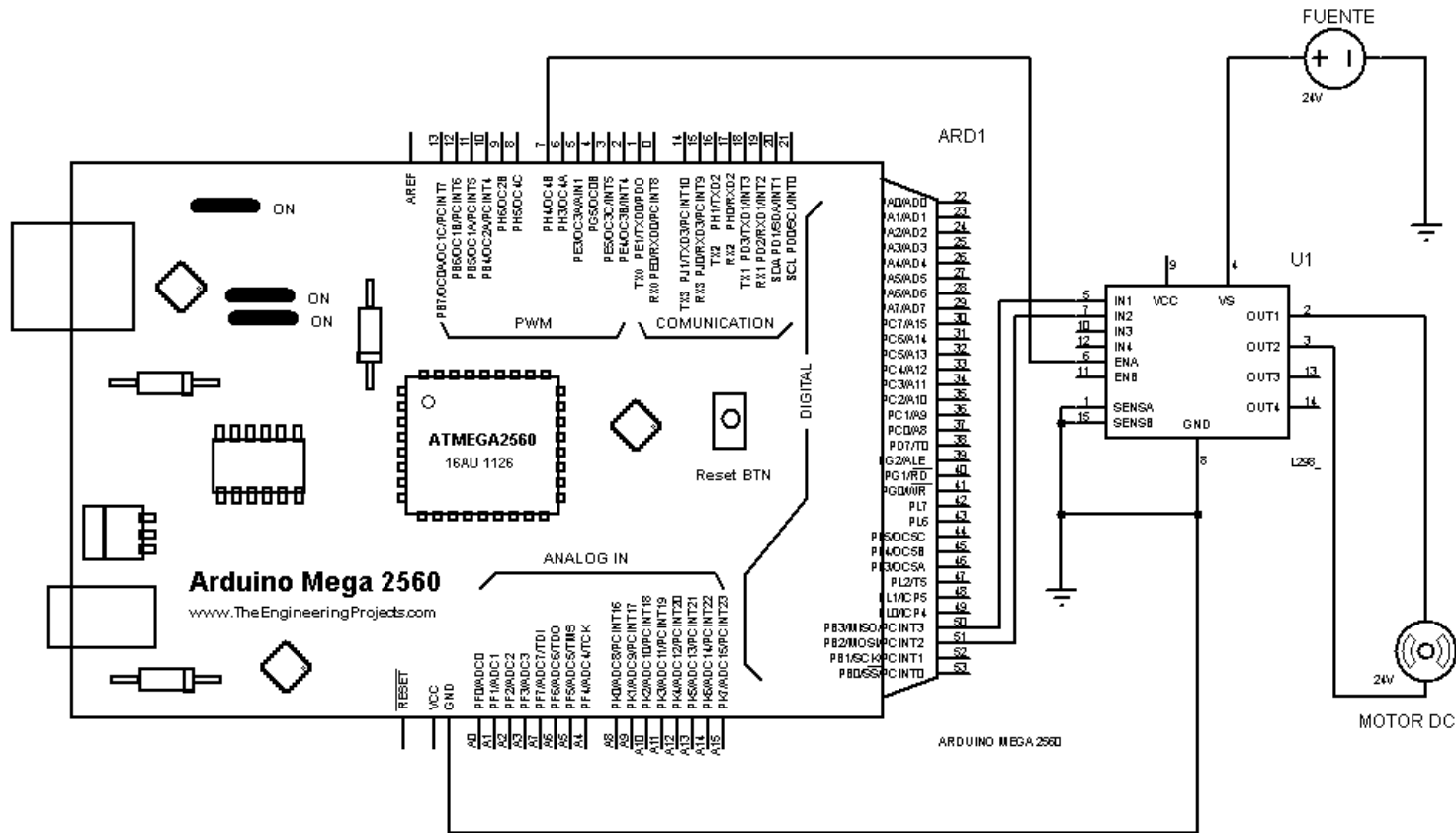
#### 4.26. Diagrama de conexión del display en Proteus



4.27. Diagrama de conexión del teclado en Proteus.



4.28. Diagrama de conexión del driver para motor en Proteus, usando el control de velocidad.



## 4.29. Código de programación

```
#include <Key.h>
#include <Keypad.h>
#include <EmonLib.h>
#include <LiquidCrystal.h>
#include <EEPROM.h>
#define VOLT_CAL 296
//configuracion display
const int rs = 12, en = 11, d4 = 5, d5 = 4, d6 = 3, d7 = 2;
LiquidCrystal lcd(rs, en, d4, d5, d6, d7);
//sensor voltaje
EnergyMonitor emon1; //, emon2;
//configuracion teclado
const byte ROWS = 4; //cuatro filas
const byte COLS = 4; //cuatro columnas
char keys[ROWS][COLS] = {
    {'1','4','7','*'},
    {'2','5','8','0'},
    {'3','6','9','#'},
    {'A','B','C','D'}
};
byte rowPins[ROWS] = {30, 31, 32, 33}; //connect to the row pinouts of the keypad
byte colPins[COLS] = {34, 35, 36, 37}; //connect to the column pinouts of the keypad
Keypad tecla = Keypad( makeKeymap(keys), rowPins, colPins, ROWS, COLS );
double set=50;
double v; //voltaje alterno medido, voltaje alterno mostrado y segun el caso voltaje dc
mostrado
char k;
int q=0;
double x;
```

```

double f=1; //factor multiplicativo para variar entre Vdc,Vrms,Vpp,Vp
double dc; //voltaje dc medido
int m=0; //validador, cuando m=0 es modo AC, cuando m=1 es modo DC
int n=1;

double memoria=0; //sirve para poder cambiar entre las unidades rms,Vp sin causar
afectaciones

String palabra1;

int valor1;

String unidades1;

String palabra2;

int valor2;

String unidades2;

double delta=0.5; // error +/- permitido

int tac; //tiempo de medicion ac
int tdc; //tiempo de medicion dc

int correccion;

unsigned long parpadeo=0; //tiempo transcurrido-parpadeo= tiempo en que se muestra
voltaje medido

unsigned long tempo=0; //tiempo transcurrido-tempo= tiempo en que se ejecuta la
actuacion

unsigned long reset_time=0;

unsigned long alto;

unsigned long bajo;

double tau;

int fq;

int konstante;

void setup()
{
//comunicacion serial velocidad
Serial.begin(9600);

lcd.begin(16, 2);

```

```

pinMode(50, OUTPUT);

pinMode(51, OUTPUT);

pinMode(7, INPUT);

emon1.voltage(1, VOLT_CAL, 1.7); // pin de entrada analogica, factor de calibracion, desfase
EEPROM.get(0,set); //toma el ultimo valor set antes de haber sido apagado

palabra1="Vset= ";
palabra2="Vact= ";

valor1=set;

unidades1="Vrms";
unidades2="Vrms";
}

void loop()

{

if(m==1) //midiendo dc
{tac=1; tdc=200; }

if(m==0) // midiendo ac
{tac=200; tdc= 1;}

v=0;

dc=0;

emon1.calcVI(30,tac); // Numerio.de media longitud de onda=8 (cruces), tiempo fuera=1500

v= emon1.Vrms; //voltaje rms

if(v>5)

{alto=pulseIn(7,HIGH); bajo=pulseIn(7,LOW);}

alto=abs(alto);

bajo=abs(bajo);

tau=alto+bajo;

tau=tau/1000;

fq=1000/tau;

if(fq>10)

{correccion=20.9-(0.35*fq); v=v+correccion;}

```



```

v= (1.0166*v) + 0.2354;//correccion por excel

for (int i=0; i<tdc; i++)

{dc+=analogRead(A2); delayMicroseconds(500);}

dc=(0.2748*dc - 2.4967)/tdc;

dc = (1.0074*dc) - 4.7402; //primera corrección al valor dc

dc = (0.9147*dc) + 3.7363; //segunda corrección al valor dc

if(m==1){v=dc; valor2=dc;}

if(m==0)

{ if(n==1){valor2=v;} if(n==2){valor2=fq;} if(n==3){valor2=v*f;} }

lcd.clear();

lcd.setCursor(0, 0); lcd.print(palabra1); lcd.print(valor1);

lcd.setCursor(9, 0); lcd.print(unidades1);

lcd.setCursor(0, 1); lcd.print(palabra2); lcd.print(valor2);

lcd.setCursor(9, 1); lcd.print(unidades2);

parpadeo=millis();

if(millis()-reset_time>30000)

{ reseteo_lcd(); reset_time=millis(); }

if(millis()-tempo>2500)

{

if((abs((set/f)-v))>=delta) //cuando no está en rango, el rango permitido de error es de 1 v

{

if(v>set) //cuando el voltaje medido es mayor que el voltaje requerido

{digitalWrite(50,HIGH); digitalWrite(51,LOW);}

else //cuando el voltaje medido es menor que el voltaje requerido

{digitalWrite(50,LOW); digitalWrite(51,HIGH);}

}

else //cuando sí está en rango

{digitalWrite(50,LOW);

digitalWrite(51,LOW);}

if ((abs(set-v))>100 )           {konstante=1;}

```

```

if ((abs(set-v))>50 && (abs(set-v))<=100) {konstante=3;}
if ((abs(set-v))>30 && (abs(set-v))<=50) {konstante=4;}
if ((abs(set-v))>7 && (abs(set-v))<=30) {konstante=5;}
if ((abs(set-v))>3 && (abs(set-v))<=07) {konstante=7;}
if ((abs(set-v))>1 && (abs(set-v))<=03) {konstante=6;}
if ((abs(set-v))<=1) {konstante=5;}
delay(abs((set-v)*konstante));
digitalWrite(50,LOW); digitalWrite(51,LOW);
tempo=millis();
return;
}
k=tecla.getKey();
if(k)
{
if(k=='1'){q=q*10+k-'0'; valor1=q; palabra1="NewIn ";}
if(k=='2'){q=q*10+k-'0'; valor1=q; palabra1="NewIn ";}
if(k=='3'){q=q*10+k-'0'; valor1=q; palabra1="NewIn ";}
if(k=='4'){q=q*10+k-'0'; valor1=q; palabra1="NewIn ";}
if(k=='5'){q=q*10+k-'0'; valor1=q; palabra1="NewIn ";}
if(k=='6'){q=q*10+k-'0'; valor1=q; palabra1="NewIn ";}
if(k=='7'){q=q*10+k-'0'; valor1=q; palabra1="NewIn ";}
if(k=='8'){q=q*10+k-'0'; valor1=q; palabra1="NewIn ";}
if(k=='9'){q=q*10+k-'0'; valor1=q; palabra1="NewIn ";}
if(k=='0'){q=q*10+k-'0'; valor1=q; palabra1="NewIn ";}
if(k=='#'){
if(m==1) //si es voltaje directo
{set=q; q=0; palabra1="Vset= ";
if(set>=120) {set=120;} valor1=set;
EEPROM.put(0, set); //escribe el valor de set en los primeros 8 bytes de la memoria eeprom
}
}
}

```

```

if(m==0) //si es voltaje alterno

{set=q; q=0; palabra1="Vset= ";

if(set/f>=140) {set=140*f;} //los valores de 1 (uno) podrian ser cambiados por f si se
necesitara

if(set/f<=10) {set=10*f;} //los valores de 1 (uno) podrian ser cambiados por f si se
necesitara

valor1=set;

memoria=set;

EEPROM.put(0, set); //escribe el valor de set en los primeros 8 bytes de la memoria eeprom

}}

if(k=='A') //voltaje dc

{f=1; m=1; set=set; memoria=0; valor1=set; unidades1="Vdc"; unidades2="Vdc";
palabra2="Vact= "; delta=1;}

if(k=='B') //voltaje ac rms

{f=1; m=0; n=1; valor1=set; unidades1="Vrms"; unidades2="Vrms"; palabra2="Vact= ";
delta=(delta); }

if(k=='C') //frecuencia

{f=1; m=0; n=2; valor1=set; unidades1="Vrms"; unidades2="Hz"; palabra2="freq= ";
delta=(delta); }

if(k=='D') //voltaje ac pico

{f=(1.4142); m=0; n=3; valor1=set*f; unidades1="Vp"; unidades2="Vp"; delta=(delta);}

if(k=='*') //borrar

{q=0; valor1=q; palabra1="Newln ";}

}}

void reseteo_lcd()

{lcd.begin(16, 2);}

```