



**ANÁLISIS DE CASOS SOBRE LA VARIACIÓN DE LA DISTORSIÓN
ARMÓNICA PRODUCIDA POR CARGAS CLASIFICADAS COMO
HERRAMIENTAS PORTÁTILES Y EQUIPO TRIFÁSICO FRENTE A
CAMBIOS EN LA AMPLITUD Y DISTORSIÓN DE LA TENSIÓN DE
ALIMENTACIÓN.**

**CRISTIAN FAURICIO ARANGO RAMOS
JOSE MIGUEL AYALA TROCONIS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2016**



**ANÁLISIS DE CASOS SOBRE LA VARIACIÓN DE LA DISTORSIÓN
ARMÓNICA PRODUCIDA POR CARGAS CLASIFICADAS COMO
HERRAMIENTAS PORTÁTILES Y EQUIPO TRIFÁSICO FRENTE A
CAMBIOS EN LA AMPLITUD Y DISTORSIÓN DE LA TENSIÓN DE
ALIMENTACIÓN.**

**CRISTIAN FAURICIO ARANGO RAMOS
JOSE MIGUEL AYALA TROCONIS**

**Trabajo de Grado para optar por el título de
Ingeniero Electricista**

Director

CESAR A. DUARTE GUALDRON
Ingeniero Electricista, Ph.D

Codirectores

GABRIEL ORDOÑEZ PLATA
Ingeniero Electricista, Ph.D

GABRIEL MALAGON CARVAJAL
Ingeniero Electricista, MIE

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2016**



DEDICATORIA

Queremos dedicar este trabajo de grado a Dios que fue nuestro pilar y nos concedió la vida y la fortaleza para terminar este proyecto de investigación, nunca nos abandonó y siempre nos dio la perseverancia necesaria en todo momento.

A nuestros padres quienes fueron una herramienta importante de nuestro Dios para proporcionarnos de las comodidades necesarias a través de nuestra vida, además de la motivación para no flaquear a lo largo del camino que hemos escogido.

Finalmente le queremos dedicar este proyecto a aquellos maestros fundamentales en nuestro aprendizaje durante la vida universitaria, los cuales nos brindaron sus conocimientos con mucha entrega y con la mejor energía posible, igualmente fueron inspiración que motivó la entrega por nuestra profesión.

“Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente; no temas ni desmayes, porque tu Dios todo poderoso estará contigo en donde quiera que vayas” _____ Josué 1:9.



AGRADECIMIENTOS

Agradecemos principalmente a Dios por su bendición a lo largo de nuestra vida, por darnos la oportunidad de realizar cada uno de nuestros sueños y porque siempre ha sido, es y será nuestro pilar para cada cosa que emprendamos.

También queremos agradecer a nuestros padres, quienes han sido un gran apoyo en nuestra vida

A la universidad industrial de Santander por brindarnos formación y estudio.

A nuestro director de tesis, Dr. Cesar Duarte y codirectores, Dr. Gabriel Ordoñez y MSc. Gabriel Malagón, los cuales con sus conocimientos, disposición, apoyo y motivación han sido trascendentales en la culminación exitosa de este trabajo.

Finalmente queremos agradecer a Gustavo Latorre, quien con sus conocimientos, experiencia y disposición ayudó en gran manera a con la elaboración de éste proyecto.



CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	19
1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	21
2 JUSTIFICACIÓN.....	23
3 OBJETIVOS	25
3.1 OBJETIVO GENERAL	25
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	25
4 MARCO REFERENCIAL	26
4.1 CARGAS ELECTRICAS Y SU TOPOLOGÍA.....	26
4.1.1 SMPS sin PFC.....	27
4.1.2 PFC pasivo y activo	27
4.1.3 Motores trifásicos	28
4.1.4 Variador de velocidad	29
4.1.5 Herramientas de mano	30
4.2 DISTRIBUCION DE LAS CARGAS POR SECTOR	31
4.3 INDICES DE DISTORSION ARMONICA.....	32
4.4 ESTADO DEL ARTE.....	33
4.5 FUENTE CHROMA.....	36
4.6 REGLAMENTACIÓN	37
5 METODOLOGÍA.....	39
5.1 SELECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS CARGAS	39
5.1.1 Cargas seleccionadas	40
5.2 PLANTEAMIENTO DEL EXPERIMENTO	41
5.3 METODOS USADOS PARA EL ANÁLISIS DE LOS DATOS.....	41
5.3.1 Fingerprints.....	42
5.3.2 Índices	44
6 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS	52
6.1 TALADRO DE MANO MONOFÁSICO, RESPUESTA EN CORRIENTE PARA 3, 5 Y 7 ARMÓNICO.....	54
6.1.1 Índice de auto-sensibilidad, sensibilidad cruzada (Matriz de admitancias), linealidad y asimetría.....	57
6.2 MOTOR DE INDUCCIÓN JAULA DE ARDILLA	59



6.2.1	Arranque por resistencias, respuesta en corriente para 3, 5 y 7 armónico	59
6.2.2	Motor de inducción jaula de ardilla con variador Eurotherm, velocidad 1700 [rpm], respuesta en corriente para 3,5 y 7 armónico	65
6.2.3	Motor de inducción jaula de ardilla con variador Eurotherm, velocidad 1352 [rpm], respuesta en corriente para 3, 5 y 7 armónico	70
6.2.4	Motor de inducción jaula de ardilla con variador Schneider, velocidad 1700 [rpm], respuesta en corriente para 3,5 y 7 armónico	74
6.2.5	Motor de inducción jaula de ardilla con variador Schneider, velocidad 1352 [rpm], respuesta en corriente para 3, 5 y 7 armónico	82
6.3	MOTOR DE INDUCCIÓN ROTOR DEVANADO	86
6.3.1	Arranque por resistencias, respuesta en corriente para 3, 5 y 7 armónico	87
6.3.2	Motor de inducción rotor devanado con variador Eurotherm, velocidad 1680 [rpm], respuesta en corriente para 3, 5 y 7 armónico	91
6.3.3	Motor de inducción rotor devanado con variador Eurotherm, velocidad 1336 [rpm], respuesta en corriente para 3, 5 y 7 armónico	96
6.3.4	Motor de inducción rotor devanado con variador Schneider, velocidad 1680 [rpm], respuesta en corriente para 3, 5 y 7 armónico	101
6.3.5	Motor de inducción rotor devanado con variador Schneider, velocidad 1336 [rpm], respuesta en corriente para 3, 5 y 7 armónico	110
6.4	ESTUDIOS COMPARATIVOS DE LA MATRIZ DE SENSIBILIDAD	114
6.4.1	Taladro.	115
6.4.2	Motor Jaula de Ardilla con variador de velocidad Schneider a velocidad de 1700 [rpm].	119
6.5	CONCLUSIONES	123
	REFERENCIAS	124
	BIBLIOGRAFÍA	128
	ANEXOS	130



LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Circuito de un SMPS sin PFC, Fuente autor.....	27
Figura 2. Circuito de un PFC pasivo y activo, Fuente autor.	27
Figura 3. Circuito rectificador de onda, Fuente autor.	29
Figura 4. Circuito del variador de potencia alimentación bifásica, Fuente autor.	30
Figura 5. Incremento en la temperatura de motores monofásicos y trifásicos en función del factor armónico [27].....	34
Figura 6. Reconstrucción de la señal de corriente en el dominio del tiempo a partir del espectro armónico.....	43
Figura 7. Barrido de tensión para diferentes porcentajes de magnitud, con barrido de ángulo, respecto a la señal fundamental.	44
Figura 8. Respuesta en corriente de una carga ante la variación de la tensión de alimentación.	47
Figura 9. Respuesta en corriente, comportamiento no lineal.	48
Figura 10. Asimetría de magnitud.	50
Figura 11. Asimetría de fase.	51
Figura 12. Referencia de colores para los niveles de sensibilidad S.	53
Figura 13. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónica. Taladro.	54
Figura 14. Respuesta en corriente para quinto (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en tercer armónico. Taladro.	55
Figura 15. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en quinto armónico, (b) con respuesta en corriente para quinto armónica. Taladro.....	55
Figura 16. Respuesta en corriente para tercero (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en quinto armónico. Taladro.....	56
Figura 17. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en séptimo armónico, (b) con respuesta en corriente para séptimo armónica. Taladro.	56
Figura 18. Respuesta en corriente para tercero (a) y quinto armónico (b), con señal distorsionada de tensión en séptimo armónico. Taladro.	57
Figura 19. Intensidad del índice de sensibilidad para el taladro.....	57
Figura 20. (a) Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónico. Motor jaula de ardilla.	59
Figura 21. Respuesta en corriente para quinto (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en tercer armónico. Motor jaula de ardilla.	60
Figura 22. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en quinto armónico, (b) con respuesta en corriente para quinto armónica. Motor jaula de ardilla.	60
Figura 23. Respuesta en corriente para tercero (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en quinto armónico. Motor jaula de ardilla.....	61
Figura 24. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en séptimo armónico, (b) con respuesta en corriente para séptimo armónica. Motor jaula de ardilla. .	61
Figura 25. Respuesta en corriente para tercero (a) y quinto armónico (b), con señal distorsionada de tensión en séptimo armónico. Motor jaula de ardilla.....	62
Figura 26. Intensidad de índice de sensibilidad para motor jaula de ardilla con resistencias de arranque.	63
Figura 27. Modelo de corriente para secuencia cero, sin neutro físico.	64



Figura 28. (a) Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónico. Motor jaula de ardilla V1_1700 [rpm].	65
Figura 29. Respuesta en corriente para quinto (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en tercer armónico. Motor jaula de ardilla V1_1700 [rpm].	65
Figura 30. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en quinto armónico, (b) con respuesta en corriente para quinto armónica. Motor jaula de ardilla V1_1700 [rpm].	66
Figura 31. Respuesta en corriente para tercero (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en quinto armónico. Motor jaula de ardilla V1_1700 [rpm].	66
Figura 32. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en séptimo armónico, (b) con respuesta en corriente para séptimo armónica. Motor jaula de ardilla V1_1700 [rpm].	67
Figura 33. Respuesta en corriente para tercero (a) y quinto armónico (b), con señal distorsionada de tensión en séptimo armónico. Motor jaula de ardilla V1_1700 [rpm].	67
Figura 34. Intensidad de índice de sensibilidad para motor jaula de ardilla V1_1700 [rpm].	68
Figura 35. (a) Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónico. Motor jaula de ardilla V1_1352 [rpm].	70
Figura 36. Respuesta en corriente para quinto (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en tercer armónico. Motor jaula de ardilla V1_1352 [rpm].	70
Figura 37. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en quinto armónico, (b) con respuesta en corriente para quinto armónica. Motor jaula de ardilla V1_1352 [rpm].	71
Figura 38. Respuesta en corriente para tercero (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en quinto armónico. Motor jaula de ardilla V1_1352 [rpm].	71
Figura 39. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en séptimo armónico, (b) con respuesta en corriente para séptimo armónico. Motor jaula de ardilla V1_1352 [rpm].	72
Figura 40. Respuesta en corriente para tercero (a) y quinto armónico (b), con señal distorsionada de tensión en séptimo armónico. Motor jaula de ardilla V1_1352 [rpm].	72
Figura 41. Intensidad de índice de sensibilidad para motor jaula de ardilla V1_1352 [rpm].	73
Figura 42. (a) Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónico. Motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm].	75
Figura 43. Respuesta en corriente para quinto (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en tercer armónico. Motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm].	75
Figura 44. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en quinto armónico, (b) con respuesta en corriente para quinto armónica. Motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm].	76
Figura 45. Respuesta en corriente para tercero (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en quinto armónico. Motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm].	76
Figura 46. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en séptimo armónico, (b) con respuesta en corriente para séptimo armónica. Motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm].	77
Figura 47. Respuesta en corriente para tercero (a) y quinto armónico (b), con señal distorsionada de tensión en séptimo armónico. Motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm].	77



Figura 48. Intensidad de índice de sensibilidad para motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm].	78
Figura 49. Barrido de 2% en tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónico. Motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm].	79
Figura 50. Respuesta en corriente para quinto (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en tercer armónico, barrido 2%. Motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm].	80
Figura 51. Intensidad de índice de sensibilidad para motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm] barrido de a 2%.	81
Figura 52. (a) Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónico. Motor jaula de ardilla V2_1352 [rpm].	82
Figura 53. Respuesta en corriente para quinto (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en tercer armónico. Motor jaula de ardilla V2_1352 [rpm].	82
Figura 54. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en quinto armónico, (b) con respuesta en corriente para quinto armónica. Motor jaula de ardilla V2_1352 [rpm].	83
Figura 55. Respuesta en corriente para tercero (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en quinto armónico. Motor jaula de ardilla V2_1352 [rpm].	83
Figura 56. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en séptimo armónico, (b) con respuesta en corriente para séptimo armónica. Motor jaula de ardilla V2_1352 [rpm].	84
Figura 57. Respuesta en corriente para tercero (a) y quinto armónico (b), con señal distorsionada de tensión en séptimo armónico. Motor jaula de ardilla V2_1352 [rpm].	84
Figura 58. Intensidad de índice de sensibilidad para motor jaula de ardilla V2_1352 [rpm].	85
Figura 59. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónico. Motor de rotor devanado.	87
Figura 60. Respuesta en corriente para quinto (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en tercer armónico. Motor de rotor devanado.	87
Figura 61. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en quinto armónico, (b) con respuesta en corriente para quinto armónica. Motor de rotor devanado.	88
Figura 62. Respuesta en corriente para tercero (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en quinto armónico. Motor de rotor devanado.	88
Figura 63. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en séptimo armónico, (b) con respuesta en corriente para séptimo armónica. Motor de rotor devanado.	89
Figura 64. Respuesta en corriente para tercero (a) y quinto armónico (b), con señal distorsionada de tensión en séptimo armónico. Motor de rotor devanado.	89
Figura 65. Intensidad de índice de sensibilidad para motor de rotor devanado con resistencias de arranque.	90
Figura 66. Índice de asimetría para motor de rotor devanado con resistencias de arranque.	90
Figura 67. (a) Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónico. Motor de rotor devanado V1_1680 [rpm].	92
Figura 68. Respuesta en corriente para quinto (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en tercer armónico. Motor de rotor devanado V1_1680 [rpm].	92



Figura 69. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en quinto armónico, (b) con respuesta en corriente para quinto armónica. Motor de rotor devanado V1_1680 [rpm].	93
Figura 70. Respuesta en corriente para tercero (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en quinto armónico. Motor de rotor devanado V1_1680 [rpm]. ..	93
Figura 71. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en séptimo armónico, (b) con respuesta en corriente para séptimo armónica. Motor de rotor devanado V1_1680 [rpm].	94
Figura 72. Respuesta en corriente para tercero (a) y quinto armónico (b), con señal distorsionada de tensión en séptimo armónico. Motor de rotor devanado V1_1680 [rpm].	94
Figura 73. Intensidad de índice de sensibilidad para motor de rotor devanado V1_1680 [rpm].	95
Figura 74. (a) Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónico. Motor de rotor devanado V1_1336 [rpm].	97
Figura 75. Respuesta en corriente para quinto (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en tercer armónico. Motor de rotor devanado V1_1336 [rpm]. ..	97
Figura 76. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en quinto armónico, (b) con respuesta en corriente para quinto armónica. Motor de rotor devanado V1_1336 [rpm].	97
Figura 77. Respuesta en corriente para tercero (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en quinto armónico. Motor de rotor devanado V1_1336 [rpm]. ..	98
Figura 78. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en séptimo armónico, (b) con respuesta en corriente para séptimo armónica. Motor de rotor devanado V1_1336 [rpm].	98
Figura 79. Respuesta en corriente para tercero (a) y quinto armónico (b), con señal distorsionada de tensión en séptimo armónico. Motor de rotor devanado V1_1336 [rpm].	99
Figura 80. Intensidad de índice de sensibilidad para motor rotor devanado V1_1336 [rpm].	100
Figura 81. (a) Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónico. Motor de rotor devanado V2_1680 [rpm].	101
Figura 82. Respuesta en corriente para quinto (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en tercer armónico. Motor de rotor devanado V2_1680 [rpm].	102
Figura 83. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en quinto armónico, (b) con respuesta en corriente para quinto armónica. Motor de rotor devanado V2_1680 [rpm].	103
Figura 84. Respuesta en corriente para tercero (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en quinto armónico. Motor de rotor devanado V2_1680 [rpm].	103
Figura 85. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en séptimo armónico, (b) con respuesta en corriente para séptimo armónica. Motor de rotor devanado V2_1680 [rpm].	104
Figura 86. Respuesta en corriente para tercero (a) y quinto armónico (b), con señal distorsionada de tensión en séptimo armónico. Motor de rotor devanado V2_1680 [rpm].	104
Figura 87. Intensidad de índice de sensibilidad para motor de rotor devanado V2_1680 [rpm].	105



Figura 88. Barrido de 2% en tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónico. Motor de rotor devanado V2_1680 [rpm].	107
Figura 89. Respuesta en corriente para quinto (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en tercer armónico. Motor de rotor devanado V2_1680 [rpm].	108
Figura 90. Intensidad de índice de sensibilidad para motor de rotor devanado V2_1680 [rpm] barrido de a 2%.	108
Figura 91. (a) Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónico. Motor de rotor devanado V2_1336 [rpm].	110
Figura 92. Respuesta en corriente para quinto (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en tercer armónico. Motor de rotor devanado V2_1336 [rpm].	110
Figura 93. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en quinto armónico, (b) con respuesta en corriente para quinto armónica. Motor de rotor devanado V2_1336 [rpm].	111
Figura 94. Respuesta en corriente para tercero (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en quinto armónico. Motor de rotor devanado V2_1336 [rpm].	111
Figura 95. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en séptimo armónico, (b) con respuesta en corriente para séptimo armónica. Motor de rotor devanado V2_1336 [rpm].	112
Figura 96. Respuesta en corriente para tercero (a) y quinto armónico (b), con señal distorsionada de tensión en séptimo armónico. Motor de rotor devanado V2_1336 [rpm].	112
Figura 97. Intensidad de índice de sensibilidad para motor de rotor devanado V2_1336 [rpm].	113
Figura 98. Tensión de alimentación nominal 120 [V] con distorsión en tercer armónico a 12% en magnitud y 240° de fase respecto de la fundamental. Modelo de Norton acoplado.	116
Figura 99. Tensión de alimentación nominal 120 [V] con distorsión en tercer armónico a 12% en magnitud y 240° de fase respecto de la fundamental. Modelo de Norton.	116
Figura 100. Tensión de alimentación nominal 120 [V] con distorsión en séptimo armónico a 12% en magnitud y 120° de fase respecto de la fundamental Modelo de Norton.	117
Figura 101. Tensión de alimentación nominal 120 [V] con distorsión en quinto armónico a 12% en magnitud y 210° de fase y séptimo armónico a 10% en magnitud y 300° de fase respecto de la fundamental. Modelo de Norton acoplado.	118
Figura 102. Tensión de alimentación nominal 120 [V] con distorsión en tercer armónico a 8% en magnitud y 150° de fase, en quinto armónico a 12% en magnitud y 210° de fase y séptimo armónico a 10% en magnitud y 300° de fase respecto de la fundamental. Modelo de Norton acoplado.	118
Figura 103. Reconstrucción de la señal a partir del modelo de Norton Acoplado. Ordenes armónicos 3,5 y 7.	120
Figura 104. Reconstrucción de la señal a partir del modelo de Norton Acoplado. Ordenes armónicos 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17 y 19.	120
Figura 105. Reconstrucción de la señal a partir del modelo de Norton. Ordenes armónicos 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17 y 19.	121
Figura 106. Comparación entre Modelo de Norton y Norton Acoplado utilizando la matriz de sensibilidad.	122



LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Límites de distorsión armónica norma IEEE Std 519-2014 [24].	37
Tabla 2. Límites de distorsión armónica norma IEC 61000-3-2 2009 [34].	38
Tabla 3. Cargas seleccionadas, Fuente autor.	40
Tabla 4. Índice de sensibilidad para el taladro, unidades [mS].	57
Tabla 5. Índice de linealidad para el taladro, adimensional.	58
Tabla 6. Índice de asimetría para el taladro, adimensional.	58
Tabla 7. Índice de sensibilidad para motor jaula de ardilla con resistencia de arranque, unidades [mS].	63
Tabla 8. Índice de linealidad para motor jaula de ardilla con resistencias de arranque, adimensional.	63
Tabla 9. Índice de asimetría para motor jaula de ardilla con resistencias de arranque, adimensional.	63
Tabla 10. Índice de sensibilidad para motor jaula de ardilla V1_1700 [rpm], unidades [mS].	68
Tabla 11. Índice de linealidad para el motor jaula de ardilla V1_1700 [rpm], adimensional.	68
Tabla 12. Índice de asimetría para el motor jaula de ardilla V1_1700 [rpm], adimensional.	69
Tabla 13. Índice de sensibilidad para el motor jaula de ardilla V1_1352 [rpm], unidades [mS].	73
Tabla 14. Índice de linealidad para motor jaula de ardilla V1_1352 [rpm], adimensional.	73
Tabla 15. Índice de asimetría para motor jaula de ardilla V1_1352 [rpm], adimensional.	73
Tabla 16. Índice de sensibilidad para motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm], unidades [mS].	78
Tabla 17. Índice de linealidad para el motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm], adimensionales.	78
Tabla 18. Índice de asimetría para motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm], adimensionales.	78
Tabla 19. Índice de sensibilidad para motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm] barrido de a 2%, unidades [mS].	80
Tabla 20. Índice de linealidad para motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm] barrido de a 2%, adimensionales.	80
Tabla 21. Índice de asimetría para motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm] barrido de a 2%, adimensionales.	81
Tabla 22. Índice de sensibilidad para el motor jaula de ardilla V2_1352 [rpm], unidades [mS].	85
Tabla 23. Índice de linealidad para el motor jaula de ardilla V2_1352 [rpm], adimensionales.	85
Tabla 24. Índice de asimetría para motor jaula de ardilla V2_1352 [rpm], adimensionales.	86
Tabla 25. Índice de sensibilidad para el motor de rotor devanado con resistencias de arranque, unidades [mS].	90
Tabla 26. Índice de linealidad para motor de rotor devanado con resistencias de arranque, adimensionales.	90



Tabla 27. Índice de sensibilidad para motor de rotor devanado V1_1680 [rpm], unidades [mS].	95
Tabla 28. Índice de linealidad para motor de rotor devanado V1_1680 [rpm], adimensionales.	95
Tabla 29. Índice de asimetría para motor de rotor devanado V1_1680 [rpm], adimensionales.	95
Tabla 30. Índice de sensibilidad para motor de rotor devanado V1_1336 [rpm], unidades [mS].	100
Tabla 31. Índice de linealidad para motor de rotor devanado V1_1336 [rpm], adimensionales.	100
Tabla 32. Índice de asimetría para motor de rotor devanado V1_1336 [rpm], adimensionales.	100
Tabla 33. Índice de sensibilidad para motor de rotor devanado V2_1680 [rpm], unidades [mS].	105
Tabla 34. Índice de linealidad para motor de rotor devanado V2_1680 [rpm], adimensionales.	105
Tabla 35. Índice de asimetría para motor rotor devanado V2_1680 [rpm], adimensionales.	106
Tabla 36. Índice de sensibilidad para motor de rotor devanado V2_1680 [rpm] barrido de a 2%, unidades [mS].	108
Tabla 37. Índice de linealidad para motor de rotor devanado V2_1680 [rpm] barrido de a 2%, adimensionales.	109
Tabla 38. Intensidad de índice de asimetría para motor de rotor devanado V2_1680 [rpm] barrido de a 2%, adimensionales.	109
Tabla 39. Índice de sensibilidad para motor de rotor devanado V2_1336 [rpm], unidades [mS].	113
Tabla 40. Índice de linealidad para motor de rotor devanado V2_1336 [rpm], adimensional.	113
Tabla 41. Índice de asimetría para motor de rotor devanado V2_1336 [rpm], adimensionales.	113
Tabla 42. Contenido armónico típico para convertidores de 6 y 12 pulsos.	141



LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. PROGRAMACIÓN DE LA FUENTE CHROMA	130
ANEXO B. MONTAJE DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES EN EL LABORATORIO.....	134
ANEXO C. PROGRAMACIÓN DEL EQUIPO DE MEDIDA FLUKE 435 SERIE II.....	144



RESUMEN

TÍTULO: Análisis de casos sobre la variación de la distorsión armónica producida por cargas clasificadas como herramientas portátiles y equipo trifásico frente a cambios en la amplitud y distorsión de la tensión de alimentación ¹

AUTORES: CRISTIAN F. ARANGO RAMOS, JOSE M. AYALA TROCONIS ²

PALABRAS CLAVE: Distorsión armónica, espectro armónico, armónicos, calidad de la potencia, índices, graficas Fingerprint.

DESCRIPCIÓN: Las distorsiones armónicas en corriente y tensión que se producen por las cargas eléctricas con comportamiento no lineal, ocasionan mala calidad en el suministro energético, esto se traduce en pérdidas de potencia, acortamiento de la vida útil de los equipos, calentamientos excesivos en motores y fallas en su funcionamiento, entre otros. Por estas razones los estudios pertinentes sobre las distorsiones armónicas en las redes eléctricas, no se hacen esperar, ya que el resultado del análisis es clave para el mejoramiento de la mitigación de este fenómeno.

El motivo principal de este trabajo de grado es el estudio de análisis de casos sobre la variación de la distorsión armónica producida por cargas clasificadas como herramientas portátiles y equipo trifásico frente a cambios en la amplitud y distorsión de la tensión de alimentación. En el análisis propuesto, se proporcionan índices como el de sensibilidad, THD y evidencias gráficas, las cuales son claves para transmitir los efectos al igual que el comportamiento del espectro armónico de dichas cargas ante las variaciones de la tensión de alimentación.

Se realizaron una serie de experimentos en los que se llevó a cabo un barrido de la magnitud y ángulo de fase armónica con respecto de la señal fundamental de la tensión de alimentación para cargas trifásicas y monofásicas Tabla 3. Donde se busca evidenciar el comportamiento de la corriente armónica absorbida ante estas variaciones. Para ello se utiliza la información que se obtiene del espectro armónico de la señal medida en el tiempo, y una vez se cuenta con estos datos se evidencia tanto la corriente y la tensión en graficas Fingerprint, además se le aplican algunos índices armónicos que permiten evidenciar los resultados concluidos para este estudio.

¹ Proyecto de Grado: Trabajo de Investigación

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuelas de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Dr. CÉSAR A. DUARTE GUALDRÓN. CODIRECTORES: Dr. GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA, MSc. GABRIEL MALAGON



ABSTRACT

TITLE: Case analysis on the variation of the harmonic distortion produced by loads classified as portable tools and three-phase equipment against changes in the amplitude and distortion of the supply voltage³

AUTHORS: CRISTIAN F. ARANGO RAMOS, JOSE M. AYALA TROCONIS ⁴

KEYWORDS: Distorsión armónica, espectro armónico, armónicos, calidad de la potencia, índices, graficas Fingerprint.

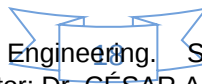
DESCRIPTION: Harmonic distortions in current and voltage that occur for the electric charges with non-linear behavior, occasion poor quality of energy supply, this is translates in loss of power, shortening of the useful life of equipment, excessive heating in motors and faults in its operation, between others. For these reasons the studies pertinent on harmonic distortions in electrical networks, are not made wait, as the analysis result its key for the improvement of mitigation of this phenomenon.

The main reason for this degree work is the case analysis study on the variation of the harmonic distortion produced by loads classified as portable tools and three-phase equipment against changes in the amplitude and distortion of the supply voltage. In the proposed analysis, it is provided indices as the of sensitivity, THD and graphic evidence, these are keys for transmit the effects the same that the behavior of the harmonic spectrum of such loads before the variations of the supply voltage.

It are performed one series of experiments in the that it carried out as weep of magnitude and harmonic phase angle with respect to the fundamental signal of the supply voltage for three-phase and single-phase loads Tabla 3. Where it seeks to evidence the behavior of the current harmonica absorbed in these variations. For this is used the information that is obtained of the harmonic spectrum of the signal measured in time, and once it has with these dates it evidences so much current and voltage in graphs Fingerprint, again it the apply some indices harmonics that allow evidence completed results for this studio.

³ Degree Project: Research Work

⁴ Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Schools of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Dr. CÉSAR A. DUARTE GUALDRÓN. CODIRECTORS: Dr. GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA, MSc. GABRIEL MALAGON





INTRODUCCIÓN

La demanda eléctrica en la red residencial, comercial e industrial crece exponencialmente con el pasar del tiempo, la mayoría de estas cargas alimentadas en la red son de tipo no lineal y producen distorsiones armónicas. De manera similar aparecen nuevas tecnologías en el campo de la electrónica de potencia las cuales mejoran las características eléctricas internas de dichos aparatos, haciéndolos más eficientes desde el punto de vista energético, claro está sin tener en cuenta la contaminación armónica que estos pueden generar. Individualmente la distorsión armónica generada por estas cargas no es apreciable, pero el aumento de estos elementos conectados en conjunto a la red sí es motivo de preocupación [1], ya que los efectos de la distorsión armónica total pueden ser variados y requieren la identificación del daño eventual producido en el sistema de potencia.

Muchas de las configuraciones circuitales de estos equipos emplean etapas de rectificación, conversión de tensión, o filtros capacitivos con puente rectificador. La corriente que fluye en el periodo de carga del filtro capacitivo a través de la rectificación es rica en contenido armónico [1]. Esta distorsión de corriente circula por la impedancia propia de la fuente de alimentación produciendo una distorsión en la onda entrante de tensión, siendo inevitable, porque esta impedancia es propia de los conductores y transformadores al interactuar ante campos magnéticos variables en el tiempo; a esta distorsión de tensión producida por la caída distorsionada en la impedancia de la línea, se le conoce como agregación de carga.

En diferentes estudios realizados se hace mención de las cargas que aportan una gran cantidad de distorsión armónica y que son de carácter no lineal [2][3][4], estas son: variadores de velocidad, bombillos de iluminación CFLs, electrodoméstico de la parte de entretenimiento, entre otros. Las distorsiones armónicas en corriente que se producen, afectan de manera diferente a la red eléctrica. El tercer armónico que es de secuencia cero, produce circulación de corrientes por el neutro que ocasionan calentamientos excesivos en el conductor, convirtiendo esta energía en pérdidas de potencia eléctrica por efecto Joule; otra consecuencia de las distorsiones armónicas son los daños que se pueden presentar en los motores de inducción como por ejemplo pares pulsantes, daños irreversibles en su vida útil, calentamiento en los devanados debido a la secuencia de armónicos como el quinto y el séptimo que trabajan a frecuencias muy altas (300[Hz], 420[Hz] respectivamente), pares pulsantes que atenúan el sentido adecuado de giro y al par nominal motor [5][6][7].

El análisis hecho en este trabajo de grado está orientado a los equipos trifásicos y herramientas portátiles de mano en los cuales se busca evidenciar el comportamiento de la corriente ante distorsiones en la tensión de alimentación, esto con diferentes porcentajes de distorsión armónica (los más influyentes tercero, quinto y séptimo) y haciendo un barrido en ángulo de fase con un delta de treinta grados [8].



Para el estudio propuesto en este documento fue necesario emplear una fuente de alimentación AC programable Chroma 61511[9] que representa a la red vista por la carga y un equipo de medida de calidad de la potencia Fluke 435 serie II [10] que se encarga de capturar y guardar muestras en el tiempo necesarias para el análisis consecuente de la forma de onda de la corriente a causa de la variación de la tensión.

Lo ideal sería que el comportamiento de la corriente en la carga fuera de carácter línea, pero al presentarse distorsión armónica esto no se cumple y en cambio la forma de onda se vuelve irregular, una de las mejores formas de evidenciar el comportamiento de dicha corriente en la carga, es el método gráfico Fingerprint. Esta gráfica nos muestra cómo varía la distorsión armónica de la corriente respecto de la distorsión en la señal de tensión.

Cada punto mostrado en el Fingerprint de corriente corresponde a la respuesta de un punto en particular del Fingerprint de tensión, y cada uno de estos puntos representa la magnitud y ángulo de fase del armónico. De esta forma podemos observar el espectro armónico de cada medida en un solo esquema, por lo que estas gráficas se convierten en una herramienta excelente a la hora de deducir conclusiones y analizar si los comportamientos son inesperados o aceptables en el rango de posibilidades contempladas, como linealidades, referencias cruzadas, etc.

Se busca de manera puntual medir algunos índices armónicos que cuantifiquen los niveles de distorsión armónica producida por estas cargas no lineales, además se utilizan para caracterizar las gráficas Fingerprints presentes en los resultados y conclusiones. Dando a conocer límites y tendencias de crecimiento o disminución de la distorsión armónica en corriente producida por las cargas experimentales. Además estos índices, hacen parte del cálculo que permite deducir de manera empírica, el modelado de algunas cargas no lineales; propuesto en[8][11].



1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Años atrás las distorsiones armónicas producidas por cargas no lineales, no eran tenidas en cuenta en el sector residencial, debido a que el número de cargas por cada hogar no era significativo; con el pasar del tiempo y con el avance de la electrónica de potencia, el uso de cargas no lineales se ha masificado no solo en el sector residencial, si no que ha crecido activamente en el sector comercial e Industrial.

Esta masificación ha provocado un aumento en la distorsión armónica de tensión y corriente que estos equipos pueden producir sobre la red de distribución, generando así una preocupación por la calidad y la eficiencia de los sistemas de potencia y sobre los posibles efectos que podrían tener sobre las cargas conectadas a la red [12] [13].

Algunas investigaciones evidencian una fuerte problemática relacionada con estas cargas en sistemas de distribución de baja tensión, por ejemplo, en la investigación realizada en [13] durante los espectáculos deportivos FIFA World Cup 2006 y Melbourne Cup la utilización de electrodomésticos de entretenimiento generó un incremento en el nivel de distorsión armónica de hasta un 100%.

De esta forma, el comportamiento de la variación de la distorsión de corriente, frente a nuevas condiciones de la tensión de alimentación (distorsión armónica presente en la tensión) en cargas como herramientas de mano y equipo trifásico, constituye el problema de investigación que este trabajo de grado estudió de forma rigurosa.

De manera general, los estudios encaminados a la estimación de la distorsión armónica de cargas no lineales se han basado en modelos en el dominio de la frecuencia debido a que los modelos en el dominio del tiempo resultan en algunos casos complicados de formular y al mismo tiempo el posible costo computacional durante la estimación de la distorsión de un grupo de cargas puede ser considerablemente alto.

Por otra parte, los modelos en el dominio de la frecuencia no requieren de conocimiento sobre los elementos internos, pero necesitan mediciones detalladas de la distorsión armónica de tensión y corriente. No obstante, la mayoría de estos modelos presentan ciertas limitaciones a la hora de representar eficientemente el comportamiento de la distorsión generada por algunas cargas, por lo que éste trabajo de grado se enfoca en el análisis de figuras basadas en Fingerprints en busca de poder realizar un mejor análisis del comportamiento del espectro de corriente frente a variaciones en la amplitud, distorsión y ángulo de fase de la señal de tensión de alimentación.



Básicamente, el método para la obtención de Fingerprints consiste en realizar un barrido de amplitud y ángulo de fase para cada uno de los armónicos presente en la forma de onda de la tensión de alimentación, logrando así un mayor análisis individual de cada armónico y de esta manera la formulación y cálculo de índices que describen el comportamiento de la distorsión o respuesta de corriente de carga y por tanto del posible modelo modelado de la carga en el dominio de la frecuencia que mejor describe este comportamiento [8] [11] [14] [15].



2 JUSTIFICACIÓN

El rápido incremento de cargas no lineales a nivel residencial ha traído consigo un aumento en la distorsión armónica de corriente. Así mismo el uso de estos equipos masivamente ha generado una creciente preocupación acerca de este grupo de cargas que hasta hace pocos años considerábamos despreciables.

En el estudio realizado por [2] se realiza un experimento en el que se utilizan varias cargas típicas en una unidad residencial (computador personal, horno microondas, televisor, videograbadora y lámpara fluorescente). En este experimento se observó una disminución del Índice de distorsión armónica total (THD) de un 99% a un 86% a causa de estos fenómenos, de igual forma, para 10 cargas idénticas e con igual potencia siendo conectadas en paralelo se notó una reducción del THD de un 97% a un 75% por cuenta de la cancelación de armónicos del mismo orden debida a los fenómenos de atenuación y diversidad.

Así mismo en [16], se observa que el fenómeno de diversidad y atenuación, es causada en gran medida por la impedancia del sistema y las diferencias de los parámetros de carga que generan cambios en el ángulo de fase para cada orden armónico; en este estudio este comportamiento se presentó en los armónicos más altos, mientras que en los armónicos de orden tres y cinco la dispersión del ángulo de fase fue pequeña, por lo tanto hubo menor efecto de cancelación armónica [16] [17].

De esta forma, observamos que el comportamiento de estas distorsiones varía de acuerdo al tipo de electrodoméstico utilizado y la forma de operación de los mismos por lo cual así se conozcan las distorsiones individuales generadas por algunas de estas cargas típicas, sigue siendo incierto el comportamiento de las distorsiones armónicas agregadas en cargas como herramientas portátiles y equipos trifásicos, por consiguiente surge la necesidad de caracterizar y estudiar el comportamiento de las distorsiones de corriente producidas por éstas cargas para posteriormente establecer los modelos que puedan representar este comportamiento.

Desde este punto de vista, una posible solución a esta preocupación pudiera ser el mejor conocimiento de los fenómenos relacionados (atenuación, diversidad y agregación de carga), puesto que en la medida que se pueda conocer de una mejor manera el comportamiento de estos fenómenos es probable determinar el posible impacto de esta distorsión en redes de baja tensión y los posibles mecanismos para su mitigación.



En ese sentido, este trabajo de grado se concentra en el análisis de la distorsión de corriente producida por cargas de tipo herramientas portátiles y equipos trifásicos y su respuesta frente a cambios de la señal de tensión de alimentación, se espera que los resultados obtenidos de las medidas de laboratorio y el análisis de las señales se proporcione una mejor percepción acerca del comportamiento de una distorsión de la corriente para el posterior modelado de cargas.



3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio sobre la sensibilidad de la magnitud y el ángulo de fase del espectro armónico de la corriente consumida por cargas clasificadas como herramientas portátiles y equipos trifásicos ante variaciones en la amplitud y distorsión de la tensión de alimentación. Este estudio se llevará a cabo mediante la evaluación y análisis de pruebas realizadas en laboratorio, utilizando la fuente programable Chroma y equipos de medición de calidad de energía.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

El cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado comprende:

- Determinar las herramientas de mano y equipos trifásicos que se tendrán en cuenta para el análisis del presente trabajo.
- Diseñar los experimentos que permitan evidenciar el comportamiento del espectro armónico de corriente frente a cambios en la amplitud y distorsión de la señal de tensión.
- Establecer una metodología para el análisis de los datos obtenidos en la que se tengan en cuenta los criterios para los algoritmos de cálculo del espectro armónico (magnitud y ángulo de fase) e índices para la representación y evaluación del comportamiento del espectro.
- Cuantificar el impacto que tiene la distorsión en la señal de tensión sobre la señal de corriente por medio del análisis del espectro armónico para cada una de las cargas seleccionadas.



4 MARCO REFERENCIAL

En este capítulo se presentan investigaciones, antecedentes consultados que ratifican los conceptos básicos utilizados en la metodología, donde se describen el tipo de cargas de interés en el estudio, además de los fundamentos y conceptos relacionados con: distorsión armónica, magnitud y ángulo de fase de los armónicos de la corriente de carga, el fenómeno de la atenuación, espectro armónico de la señal de tensión y corriente de la carga y equipos de medida entre otros aspectos

4.1 CARGAS ELÉCTRICAS Y SU TOPOLOGÍA

La mayoría de los artefactos eléctricos utilizados en el entorno residencial, comercial e industrial corresponden a cargas no lineales debido a sus componentes de electrónica de potencia [18], que tienen como objetivo mejorar el rendimiento de funcionamiento. Estas cargas producen una circulación de corrientes con frecuencias diferentes a la fundamental y dichas corrientes reciben el nombre de distorsiones armónicas en corriente.

Para entender el efecto de los armónicos hay que saber que la red eléctrica tiene distorsión armónica debido a la interacción con cargas no lineales, ya que estas cargas devuelven una corriente distorsionada que al interactuar con la impedancia propia de la línea ocasiona una caída de tensión a diferentes frecuencias y de esta manera la tensión de alimentación ya no es una onda pura.

Si el sistema contara solo con cargas lineales, además de alimentaciones sin ningún tipo de distorsión, los elementos pasivos como resistencias, inductancias y condensadores solo generarían tensiones y corrientes sinusoidales a frecuencia fundamental. A pesar que esto es lo ideal, en la realidad no es cierto, puesto que cada vez la incorporación de cargas no lineales aumenta constantemente al pasar el tiempo, por eso las distorsiones armónicas en corriente a consecuencia de la variación en la tensión de alimentación se vuelven motivo de interés y de estudio, ya que sus incidencias en el sistema de potencia podrían ser importantes.

Conforme sea el porcentaje de distorsión armónica las consecuencias van desde calentamiento en la fase del conductor neutro “3 armónico”, problemas en motores trifásicos y monofásicos “5 y 7 armónico”, pérdidas de potencia por efecto Joule, sobrecalentamiento en motores, generadores y transformadores afectando su vida útil, interferencia en equipos de telecomunicación, resonancias, falla en bancos de capacitores para corrección de FDP.

La respuesta en corriente de las cargas no lineales, varía de acuerdo a la topología de su circuito. Los dispositivos más encontrados en el mercado según [18] y a su vez los que más

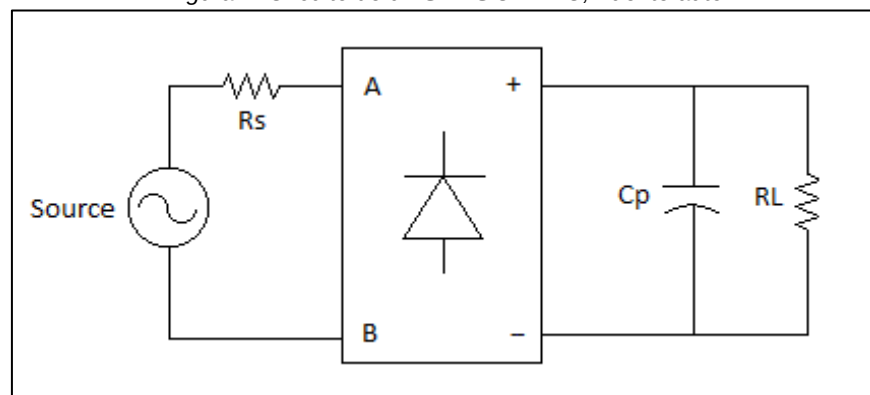


producen distorsión armónica son los que cuentan con sistemas SMPS (Switched-Mode Power Supply) sin corrección de factor de potencia (PFC), con PFC pasivo y con PFC activo, que constan de capacitores para el desempeño de su función de rectificación o inversión [18].

Por otra parte, los motores monofásicos de herramientas de mano por ejemplo o de equipos trifásicos, presentan un comportamiento altamente lineal, debido a que predomina la inductancia de sus devanados. A pesar de esto pueden ocasionar distorsión armónica en la red [19].

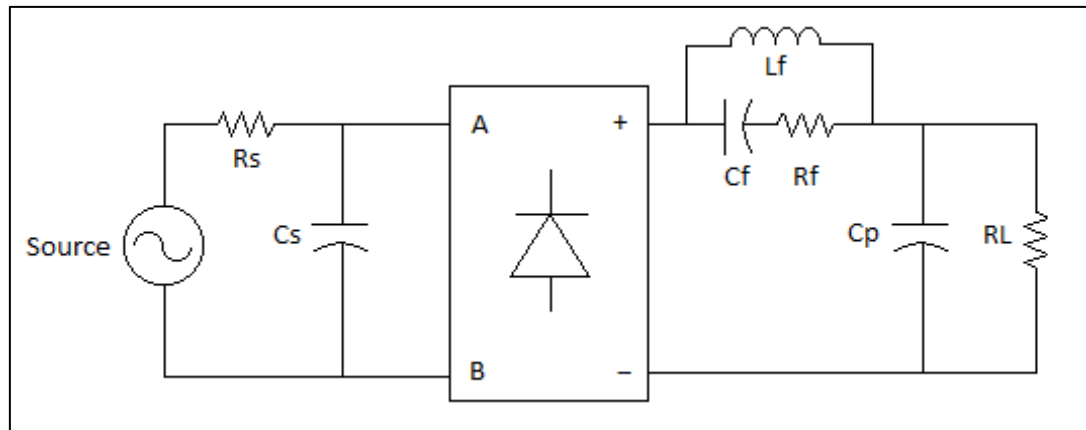
4.1.1 SMPS sin PFC. La topología de este circuito consta de una primera etapa es de rectificación que consta de una resistencia para restringir el pico de corriente, un puente de diodos completo y un condensador de filtrado, la segunda etapa es inversora y solo se modela con una resistencia en paralelo que simboliza el inversor resonante y la carga como se muestra en la Figura 1[18].

Figura 1. Circuito de un SMPS sin PFC, Fuente autor.



4.1.2 Figura 2 consta de una bobina de suavizado que actúa como filtro armónico pasivo y una resistencia en serie con un capacitor en resonancia [18], el hecho de que sea un solo inductor es por cuestiones de costo y tamaño. En esencia un PFC activo necesita de la creación de la corriente de entrada para asimilarse a la señal de tensión del sistema sinusoidal por medio de conmutación del impulso del convertidor DC-DC.

Figura 2. Circuito de un PFC pasivo y activo.



4.1.3 Motores trifásicos. Los motores trifásicos son máquinas eléctricas basadas en el principio de flujo magnético con una versatilidad de uso bastante alta y son de tipo asíncrono o síncrono. Debido al costo, mantenimiento, potencias de trabajo, pares y velocidades, conexión de alimentación, los motores asíncronos son los más utilizados en las redes de baja tensión y en consecuencia nos centraremos únicamente en su explicación.

Un motor asíncrono está conformado por un rotor y un estator, el rotor cuenta con un arrollamiento inducido que se le conoce como armadura la cual puede ser de tipo jaula de ardilla o de rotor devanado, y las corrientes que lo recorren se derivan de la interacción con el flujo del estator. El estator cuenta con un arrollamiento inductor también conocido como devanado de campo que es alimentado por una corriente que produce un flujo giratorio constante; además tiene otras partes esenciales como la carcasa, ventilador de refrigeración forzada en algunos casos, rodamientos, etc.

Cuando el motor es conectado a una fuente trifásica hay circulación de corrientes por el estator que producen un campo magnético de magnitud constante, dando lugar a una F.M.M. que genera un flujo giratorio alrededor del entre hierro a velocidad síncrona, el campo rotatorio induce una F.E.M. en el devanado del rotor donde se origina una corriente que genera un par y tiende a hacer girar el rotor [21] [22].



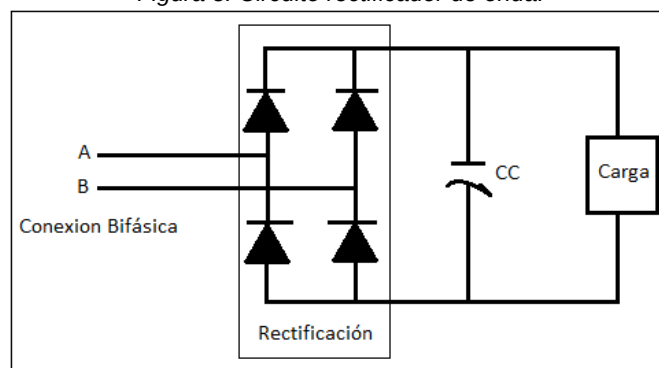
4.1.4 Variador de velocidad. Los variadores de velocidad o variadores de frecuencia son equipos que sirven para controlar la velocidad de un motor de inducción de corriente alterna, permitiendo manipular además parámetros como la rampa de aceleración, desaceleración y sentidos de giro entre otras cosas. Son utilizados en la industria para accionar motores trifásicos y monofásicos como aires acondicionados, ventiladores, equipo de bombeo, bandas transportadoras, elevadores, llenadoras, tornos, frenadores, etc, teniendo en cuenta que la mayoría de los procesos dependen de estos tipos de motores de corriente alterna.

En la actualidad los variadores de velocidad son muy utilizados debido a que son eficientes desde el punto de vista energético superando un 50% de ahorro en comparación de otros métodos de control de velocidad [4], también mejora el factor de potencia y la precisión de los procesos en los que es implementado.

Estos artefactos originan una gran cantidad de distorsión armónica en la red por su electrónica de potencia interna, a causa de los pulsos abruptos en la etapa de rectificación de la onda de alimentación enviados al capacitor de carga Figura 3. Una explicación general reduce el variador de velocidad a un puente rectificador que convierte la corriente AC entrante en corriente CC de salida y ésta a su vez es convertida en corriente AC entregada a la carga Figura 4, se emplean diodos o tiristores. Hay diferentes métodos para controlar la velocidad del motor por medio del variador, entre los más usados está el control de tensión/frecuencia, PWM (Modulación por ancho de pulso), rectificador IGBT activo, cada uno varía en costo y en contaminación armónica.

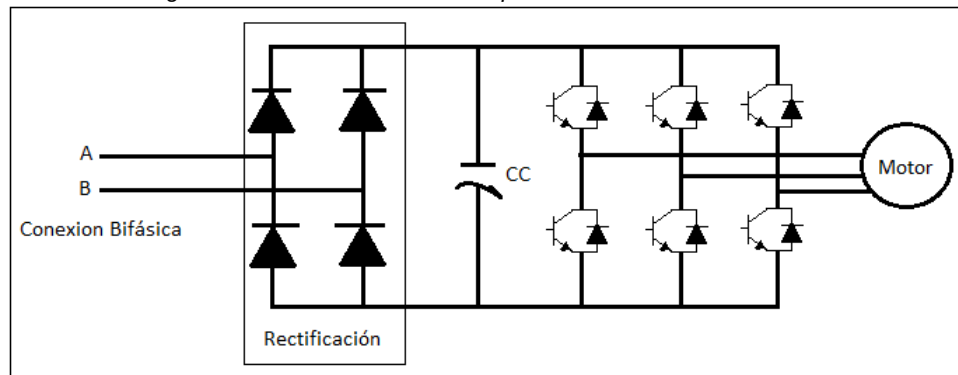
En [4] describen en qué consiste cada estrategia y presentan una gráfica porcentual donde se visualiza la cantidad relativa de distorsión armónica introducida a la red, adicionalmente muestran el costo de cada sistema para hacer una comparación de beneficios entre uno y otro.

Figura 3. Circuito rectificador de onda.



Una de las formas de reducir la contaminación armónica es el método RHT por sus siglas en ingles que significan Tecnología de Reducción de Armónicos, trata de reducir los niveles de distorsión armónica producidos por el variador partiendo del tratamiento de los picos de corriente altos y la mejora en la onda de alimentación. El RHT se basa en dos principios, uno es la mejora de la sección equivalente a la potencia que se da al reducir las pilas de capacitores y el otro es el desarrollo de un mejor procesador que controle el motor para así atenuar el rizado de la tensión en el bus de corriente continua.

Figura 4. Circuito del variador de potencia alimentación bifásica.



4.1.5 Herramientas de mano. Las herramientas de mano explicadas a continuación y para contexto de este proyecto de grado son las que funcionan a partir de electricidad y cuentan con un motor monofásico que les permite cumplir la función de trabajo requerida.

Este tipo de cargas monofásicas son quizás las más utilizadas en los diferentes sectores (residencial, comercial e industrial), es normal encontrar situaciones en las que se requiere de herramientas de manejo simples, pero eficaces a la hora de realizar una tarea, ya sea de mantenimiento, reparación o diseño. Por lo general muchos electrodomésticos al igual que las herramientas de mano basan su puesta en marcha en motores monofásicos de varios tipos, algunos accionados por electrónica de potencia, otros con funcionamiento básico en la utilización del motor y otros con estrategias de control para el aprovechamiento de diferentes formas de uso.

Los motores son de naturaleza inductiva por el tamaño de sus arrollamientos, en [23] podemos encontrar algunos tipos de motores monofásicos más comunes encontrados en tres tipos diferentes:

1. CSCR (Capacitor Start-Capacitor Run): En español significa capacitor de arranque y trabajo, son motores que cuentan con un capacitor en serie con el devanado de arranque que le permite aumentar el par inicial y permite su arranque con un par elevado, luego este



se desconecta con un interruptor centrífugo, el capacitor de trabajo es el que está en funcionamiento continuo con el aparato y le permite tener un par de marcha estable al igual que un buen rendimiento de trabajo. Se les puede encontrar en accionamiento a máquinas y herramientas como pueden ser taladros, pulidoras, motobombas pequeñas, etc.

2. RSCR (ResistiveStart-Capacitor Run): En español significa resistencia de arranque y capacitor de trabajo, en estos motores la impedancia del devanado de arranque es muy pequeña comparada con la impedancia del devanado de marcha lo que ocasiona que la corriente de marcha sea mucho mayor, para ello se le agrega un devanado auxiliar que después del arranque es sacado con un interruptor centrífugo y como en el caso anterior cuenta con un capacitor de marcha que le brinda un par de marcha estable al igual que un buen rendimiento de trabajo. Se les encuentra en quemadores de aceite, pulidoras lavadoras de ropa, lavadoras de vajillas, ventiladores, sopladores de aire, compresoras de aire y bombas de agua pequeñas.

3. CSIR (Capacitor Start-Induction Run): En español significa capacitor de arranque y operación por inducción, en este motor se realiza el arranque por medio de un capacitor de arranque y un arrollamiento inductivo de arranque controlados por un relevador el cual cuando el motor gana velocidad saca estos elementos adicionales de funcionamiento en la fracción de segundo.

4.2 DISTRIBUCIÓN DE LAS CARGAS POR SECTOR

La problemática de la distorsión armónica en las redes de baja tensión se hace notoria por el número de cargas conectadas al sistema, esta es la causa del incremento en la THD en tensión y en corriente debido al aporte individual en magnitud armónica de las cargas no lineales. En el sector industrial las máquinas eléctricas predominantes son los motores [23], se utilizan como herramienta de bombeo en la extracción de petróleo, accionamiento de procesos, grúas, motobombas de agua, y otros usos importantes para las diferentes tareas que se presentan en el trabajo general.

El sector residencial al igual que el comercial, mezclan en general una variedad de cargas con diferentes topologías en sus circuitos, por esta razón no se podría estimar o aproximar un modelo que represente a cada uno de los dos sectores, ni se podría distinguir qué efecto es más dominante. Las cargas que se pueden encontrar son neveras, lavavajillas, secadoras, aspiradoras, equipos de entretenimiento, herramientas de mano, lavadoras, licuadoras, molinos trabajando con motores monofásicos, motores trifásicos de baja potencia, etc.

Así mismo en la red de baja tensión encontramos cargas trifásicas de gran importancia para diversas actividades de gran potencia, existen transformadores, ascensores, bombas de agua, bombas contra incendios, motores para abrir y cerrar portones, bandas



transportadoras, aires acondicionados de gran potencia, plantas de respaldo (UPS), en cuanto a las cargas monofásicas la variedad es amplia, hay taladros, pulidoras, cortadoras, máquinas de coser, lavadoras, neveras, licuadoras, ventiladores, lavavajillas, herramientas de carpintería, secadores, aires acondicionados mini Split, etc. Como se puede detallar los motores son parte esencial de la vida cotidiana, muchas de las tareas son suplidas por este tipo de cargas y por eso su comportamiento es motivo de estudio para este proyecto de grado.

4.3 ÍNDICES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA

Un armónico según la norma Std IEEE 519 [24] es una componente sinusoidal de una señal periódica que tiene una frecuencia múltiplo entero de la fundamental [6].

Los armónicos son asociados a diferentes problemas en la red eléctrica, en especial los de orden impar. Los más relevantes son los de orden 3 (180 [HZ]), 5 (300 [HZ]) y 7 (420 [HZ]); el primero es causante de sobrecalentamientos en el conductor de neutro de los sistemas eléctricos [1], el segundo hace que los motores tiendan a cambiar su sentido de giro en la marcha porque induce un flujo giratorio en el entrehierro que provoca la rotación opuesta, el tercero que es de orden siete, al ser de una frecuencia muy alta origina corrientes de alta frecuencia en el rotor produciendo calentamientos en los devanados y pérdidas de potencia [5].

- Índice de distorsión armónica total (THD): La distorsión armónica total (THD) es el índice utilizado para medir el porcentaje de distorsión armónica con respecto a la señal sinusoidal, se define como la relación entre el valor eficaz de las componentes armónicas y el valor eficaz de la componente fundamental[6][2][24], además el THD está definido para corriente como THDI, el cual es producido por la carga y para la tensión como THDV generado por la fuente como respuesta a la corriente distorsionada [7].

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}}{V_1} \times 100\%$$

Donde:

K: Número de armónico.

V_1 : Valor eficaz de la onda fundamental de tensión.

V_k : Valor eficaz del armónico k.

- Factor de atenuación (FA): El fenómeno de atenuación se presenta en la interacción de la tensión distorsionada y las corrientes armónicas por la impedancia compartida del



sistema, haciendo que se disminuyan las distorsiones armónicas en corriente causadas por las cargas no lineales [2][25].

- Factor de diversidad (FD): En ocasiones, la distorsión armónica en corriente se disminuyen en el punto de acople común a causa de la dispersión del ángulo de fase, este efecto ocurre por el tipo de configuración o parámetros de la carga y el sistema de potencia [2][3].

4.4 ESTADO DEL ARTE

En las referencias [5] y [26] se hace un análisis de los efectos que pueden ocasionar las fuentes de alimentación con distorsión armónica de tensión en los motores de inducción, se busca explicar y dar a entender en detalle el daño causado a este tipo de cargas si se cuenta con una pobre calidad de potencia eléctrica.

Con el circuito equivalente del motor, más el método de superposición puede ser evaluado el efecto asociado con las pérdidas de potencia armónica [26],[27], estas pérdidas se disipan en calor (efecto Joule) afectando la vida útil y el funcionamiento normal de la máquina, por otro lado [5] nos proporciona una gráfica que consta de factores de trabajo para la potencia nominal de los motores, esto se traduce en factores de corrección por potencia, los cuales evitan la sobrecarga ocasionada por la potencia armónica adicional.

La temperatura es otro motivo de preocupación en el funcionamiento óptimo de los motores, las distorsiones armónicas en corriente ocasionan calentamientos excesivos debido a su topología en especial los de menor orden [26],[27]. Para comprender el efecto, se deben tener en cuenta las tres posibles secuencias de un sistema, que son la positiva, negativa y cero; los de secuencia positiva como el cuarto, el séptimo y en menor medida el noveno, aportan corrientes que producen flujos en el mismo sentido de rotación del motor para una red fundamental de igual secuencia (positiva) que es lo común en el sistema eléctrico, pero el hecho de que sus frecuencias sean muy altas atenúa el aporte y lo convierte en calentamientos que sacan el motor de su temperatura de trabajo normal [28].

La Figura5 muestra el incremento de temperatura de los motores monofásicos y trifásicos en función del factor armónico, como se puede apreciar los monofásicos son más propensos a elevar sus temperaturas que los trifásicos [27].

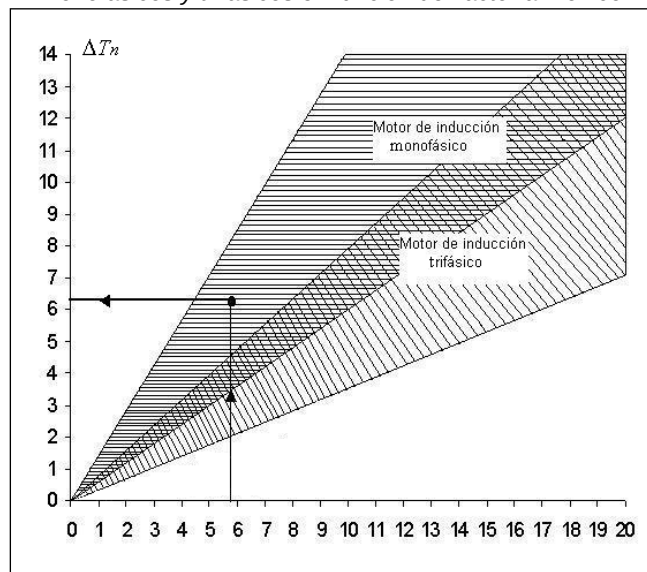
Factor armónico:

- K y I valores experimentales presentados en 1 y 2 de [27].
- N el orden del armónico.
- V_n tensión armónica.

- V1 tensión fundamental.

$$\sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n^k} \left[\frac{V_n}{V_1} \right]^l$$

Figura5. Incremento en la temperatura de motores monofásicos y trifásicos en función del factor armónico.



Fuente. E. F. Fuchs, University of Colorado, Boulder, CO, K. P. Kovacs and D. J. Roesler, "Aging of Electrical Appliances Due to Harmonics of the Power System's Voltage" [27].

Las distorsiones armónicas de tensión de secuencia cero en especial el tercero, viajan por el conductor de neutro, por eso no es común encontrarlos en los motores trifásicos que no tienen conexión física de neutro ya que son alimentados por lo general en delta o estrella sin neutro [28], más sin embargo si el motor sufre desbalances de tensión que pueden ser originados por otras órdenes armónicas o si tiene asimetrías de construcción, el tercer armónico al igual que sus múltiplos se pueden presentar y deben ser motivo de análisis. En [29] se presentan las diferentes configuraciones de arranque y marcha de trabajo para equipos monofásicos y la incidencia del tercer armónico de tensión en dichas cargas con el fin de evidenciar su comportamiento en corriente.

Por otro lado, frente al tema del tratamiento y análisis de los datos, en [30] se investiga cómo los diferentes tipos de dispositivos que tienen en su configuración interna una electrónica de potencia moderna interactúan entre sí y con la red de baja tensión. Dichas interacciones se cuantificaron mediante el análisis de los efectos de cancelación y



atenuación armónica, que fueron evaluados por medio de medición, cálculo y simulación de los contenidos armónicos y el Índice de distorsión total (THD).

Las cargas que se analizan en este estudio son las CFL (Compact Fluorescent Lamp) y las que utilizan fuente de alimentación conmutada (SMPS), que para el modelado se dividieron en tres grupos, en no-PFC, p-PFC y a-PFC; mientras que para las CFL se utilizó un mismo modelo circuital. Uno de los resultados obtenidos es que, al suministrar una tensión de alimentación distorsionada, la distorsión armónica total de las cargas agregadas tipo SMPS se reducirá. Otros resultados muestran que el fenómeno de agregación en cargas SMPS tendrá efectos moderados en la cancelación de armónicos y que el fenómeno de atenuación tendrá mayor influencia sobre las cargas no-PFC que en las p-PFC.

Por su parte, en [31] se propone un esquema de muestreo y reconstrucción a partir del espectro de una señal de banda no limitada (non band limited) que tiene escasa representación en el dominio del tiempo. Para el planteamiento de este procedimiento utilizan como referencia el teorema de muestreo de Shannon, y con ello presentan un algoritmo para la reconstrucción de la señal. A pesar de que dichas señales son en su forma paramétrica de banda no limitada, con este método es posible recuperar sus parámetros de manera muy precisa.

En la referencia [32] se presenta un estudio que propone cómo se debe modelar y analizar los armónicos variables en el tiempo. En primera instancia, recalcan la importancia de considerar los armónicos como cantidades complejas y sugieren estudiar el comportamiento de los mismos en cada componente simétrica (red de secuencia positiva, negativa y cero).

Con el fin de establecer una referencia para los ángulos, plantean determinar cruces por cero (de negativo a positivo) en la tensión de secuencia positiva; dicho de otra forma, establecer el punto de partida en el tiempo de la tensión, la cual estaría a cero grados. Así mismo consideran observar los tiempos de referencia de los armónicos en distintas partes de la red, ya que varían. Por ejemplo, en el lado de alta respecto al lado de baja de un transformador habrá un cambio de fase de los armónicos.

Por último, se modela en el dominio de la frecuencia el comportamiento del dominio en el tiempo de un armónico, utilizando datos probabilísticos. Con esto también se quiere definir la probabilidad de ocurrencia de armónicos en el plano complejo. Para modelar la amplitud sugieren la distribución de Weibull, mientras que para modelar la fase utilizan la distribución de Mises-Fisher (también conocida como la distribución circular normal), recreando así una gráfica en el plano complejo a modo de Fingerprints (véase la sección 5.3.1) en la que se



aprecia el comportamiento de la distorsión armónica y la probabilidad de ocurrencia de los mismos.

En el estudio de [14] alimentan cargas tales como lámparas ahorradoras de energía, computador personal, condensador (1KVar – 230KV) a tensión fundamental, luego distorsionan la tensión de alimentación variando la amplitud de los armónicos de 0,5% a 5% y la fase de 0 a 360°. Con lo anterior, se recrean los Fingerprints para analizar el comportamiento de la corriente frente a los cambios de la tensión, y se encontró que existía una interferencia cruzada que debía ser tomada en cuenta a la hora de modelar las cargas. La interferencia cruzada hace referencia a qué tanto afecta una tensión armónica enésima en la creación de corrientes a otra frecuencia, dicho de otra forma; si no existiera interferencia cruzada, una tensión armónica enésima sólo dará una reacción en la corriente armónica enésima, y no a otras frecuencias.

De esta forma, se descartan los modelos simples de capacitancia de la carga y conductancia total de la carga, y dejan en claro que modelar las cargas a través de Fingerprints resulta muy apropiado a la hora de examinar la interacción de la corriente con respecto a tensiones distorsionadas. Además, sirven como punto de partida para el diseño de equipos robustos en cuanto a distorsiones armónicas.

De igual forma en [8] se realiza un estudio, el cual está enfocado en cuantificar el comportamiento en distorsión de las cargas no lineales comunes en los hogares. Para ello, pretenden establecer si los modelos convencionales en el dominio de la frecuencia, como por ejemplo el modelo de Norton, resultan muy precisos a la hora de evidenciar el comportamiento de estas cargas.

En este sentido, primero se clasifican las cargas de acuerdo a la topología del circuito, de corrección de factor de potencia (PFC) en no-PFC, passive-PFC y active-PFC. Que son alimentadas por tensiones distorsionadas y son modeladas por medio de los Fingerprints.

Adicional a esto, proponen el cálculo de varios indicadores como lo son el índice de sensibilidad, de asimetría y de linealidad. Y con todo esto de acuerdo a los resultados de los índices, determinan un modelo adecuado en el dominio de la frecuencia propio para cada carga. Los resultados demuestran que, en diferentes casos, algunos de estos modelos pueden no ser lo suficientemente precisos a la hora de modelar el comportamiento de la carga.

4.5 FUENTE CHROMA

La Fuente programable de AC CHROMA modelo 61511, permite generar diferentes tipos de ondas compuestas de hasta 40 órdenes armónicas. Cuenta con la tecnología DSP por



sus siglas en ingles que significa procesador digital de señales, además maneja un rango de voltaje en AC de 0-300 [V] con una potencia aparente de 12 [KVA] y una frecuencia de 15 a 1500 [Hz]. Gracias a la fácil interfaz de uso, la fuente CHROMA nos permite en modo de experimentación hacer un barrido adecuado en magnitud y ángulo de fase en la inyección de la distorsión armónica en tensión necesaria para el desarrollo de pruebas del presente proyecto.

4.6 REGLAMENTACIÓN

En Colombia, los estándares que establecen las condiciones para obtener calidad de la energía eléctrica son las resoluciones de la CREG tales como la CREG 070-1998, CREG 024-2005, CREG 016-2007y todas ellas hacen referencia al estándar IEEE 519.

En el estándar IEEE 519 encontramos los límites de distorsión de la tensión:

Tabla 1. Límites de distorsión armónica

Bus voltage V at PCC	Individual harmonic (%)	Total harmonic distortion THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5 ^a
High-voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal whose effects will have attenuated at points in the network where future users may be connected.		

Fuente. Norma IEEE Std 519-2014. Límites de distorsión armónica [24].

Por otro lado, en la norma IEC 61000-3-2 2009, clasifican los equipos y establecen unos límites de distorsión armónica en corriente para cada clase, los cuales serán tenidos en cuenta a la hora de analizar y comparar los resultados obtenidos en el laboratorio. El equipo trifásico hace parte de la clase A, cuyos límites de distorsión se presenta en la Tabla 2, mientras que las herramientas de mano pertenecen a la clase B y sus límites estarán asociados en la Tabla 2multiplicando por un factor de 1,5 [33].



*Tabla 2. Límites de distorsión armónica norma IEC 61000-3-2
2009.*

Harmonic order N	Maximum permissible Harmonic current [A]
Odd harmonics	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \frac{15}{n}$
Even harmonics	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \frac{8}{n}$

Fuente. norma IEC 61000-3-2 2009. Límites de distorsión armónica [33].



5 METODOLOGÍA

Se realiza un estudio donde se indagan antecedentes y estado actual del efecto de la distorsión armónica en la red de baja tensión producida por cargas no lineales, como se muestra en el capítulo 4. A continuación, se da cumplimiento a los tres primeros objetivos específicos, que expresándolos de manera general son determinar o seleccionar las cargas de trabajo, diseñar los experimentos que son motivo de estudio y establecer el método de análisis para abordar el problema.

5.1 SELECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS CARGAS

Revisando diferentes fuentes de información, artículos de interés y demás reseñas acerca de los estudios relacionados con el fenómeno de distorsión armónica para las redes de baja tensión., se pudo evidenciar que las cargas de mayor interés son las de entretenimiento e iluminación, es decir, las de comportamiento capacitivo predominante.

Gracias a la variedad de usos a los que se ven sometidos los equipos trifásicos y herramientas de mano (en especial las de tipo motriz), es importante estudiar el comportamiento de este tipo de cargas ante variaciones en la distorsión de la tensión de alimentación. Las cargas según la norma IEC 61000-3-2 se clasifican en: cargas de iluminación, entretenimiento, herramientas de mano y equipo trifásico. Se desea estudiar el comportamiento de la distorsión armónica para cada uno de estos grupos. En este sentido, el presente trabajo de grado se deriva de un proyecto macro que abarca los cuatro grupos de cargas clasificadas en dicha norma, donde iluminación y entretenimiento fueron abordados en otros proyectos, orientando nuestro enfoque en las herramientas de mano y el equipo trifásico.

En el caso de los motores trifásicos, predomina el funcionamiento con controles de velocidad, tipos de arranque y parada; se debe tener claro que el comportamiento de este tipo de cargas tiende a ser altamente lineal, es por eso que parte de los experimentos presentados se realizan sobre el conjunto variadores de velocidad-motor, puestos que estos son causantes de distorsión armónica de acuerdo al tipo de tecnología y topología envuelta en su electrónica de potencia.

Por ejemplo, en la referencia [29] se exponen los tres tipos de motores monofásicos que comúnmente se encuentran en las herramientas de mano. Este tipo de cargas manejan potencias bajas alrededor de 2 [HP], con tensiones de alimentación de 120 [V] a 60 [Hz] con diferentes estrategias de arranque y marcha de trabajo continua.



5.1.1 Cargas seleccionadas. Para el presente proyecto se escogieron dos tipos de motores de prueba, el de jaula de ardilla y el de rotor devanado, ambos son de inducción, pero la topología de construcción del rotor es diferente.

Cabe resaltar que el variador de velocidad es uno de los métodos de control más sencillos para el arranque y funcionamiento continuo de los motores, y debido a la generación de pulsos internos en la etapa de rectificación se producen distorsiones armónicas en corriente. Adicionalmente es utilizado de forma muy frecuente en la industria por ser un modo económico y práctico para el control de motores de inducción en comparación con otros métodos.

Cargas:

- 1) Motor de inducción jaula de ardilla
- 2) Motor de inducción rotor devanado
- 3) Variador de velocidad 1
- 4) Variador de velocidad 2
- 5) Taladro de mano

Tabla 3. Cargas seleccionadas, Fuente autor.

Carga N°	Referencia	Marca	Pn [kW]	In [A]	Vn [V]	
1	DL1021 N	De Lorenzo	1,5 [3φ]	12/6,94 Δ/Y	127/22 0 Δ/Y	1700 [r.p.m]
2	DL1022 N	De Lorenzo	1,5 [3φ]	16,3/9,4 Δ/Y	127/22 0 Δ/Y	1680 [r.p.m]
3	601/015/230 /F/00/UK	Eurotherm	2,2	15/7 1φ/3φ	220/24 0 1φ y 3φ	6 pulsos
4	Altivar 31	Schneider Telemecanique	2,2	21.9/11 1φ/3φ	200/24 0 1φ y 3φ	6 pulsos
5	TM500-B3	Black & Decker	0,5	5,95	120	2800 [r.p.m]



5.2 PLANTEAMIENTO DEL EXPERIMENTO

Analizando el trabajo realizado en [8], [11], [14], [32], se observa que una forma de evidenciar el comportamiento del espectro armónico de corriente frente a cambios en la amplitud y distorsión en la tensión de alimentación, es a través del análisis de Fingerprints. Por tanto, es necesario estudiar la distorsión armónica de corriente que se genera a partir del aporte individual de un armónico de tensión.

Para la toma de datos en el laboratorio, se requiere hacer un barrido en distorsión armónica en la tensión de alimentación [24]. Es decir, energizar las cargas a tensión nominal y hacer una variación en el porcentaje de la magnitud y el ángulo de fase de los armónicos introducidos. Para este procedimiento se tomó como punto de partida el límite de THD (Total Harmonic Distortion) establecido por la norma IEEE Std 519-2014 el cual es de 8%, y a criterio propio y para efectos de investigación, se aumentó este límite un 50% por lo que el barrido en la magnitud de los armónicos de tensión se hizo desde 1% hasta 12% de la tensión nominal con pasos del 1%. El ángulo de fase varía de 0° a 330° para cada magnitud de armónico con pasos de 30°.

Los armónicos utilizados en este trabajo de grado son los de orden tercero, quinto y séptimo. Por último y para cada variación de magnitud y ángulo de fase, se almacena la señal de tensión y corriente (12 ciclos) utilizando el medidor de calidad de energía Fluke 435 Serie II.

La configuración de la fuente, el equipo de medida y los diferentes experimentos propuestos para el estudio de la distorsión armónica de corriente producida en las cargas trifásicas y monofásicas a causa de la variación de la tensión de alimentación, será explicada con detalle en la sub-sección 8.1, 8.2 y 8.3 de la sección 8 (anexos).

5.3 MÉTODOS USADOS PARA EL ANÁLISIS DE LOS DATOS

A continuación, se explican las estrategias de cuantificación y presentación visual de los resultados del proyecto, ya que serán determinantes en las conclusiones finales.

El análisis de las cargas se evidencia en graficas Fingerprint, las cuales se utilizan para mostrar el comportamiento de la distorsión armónica de corriente producida por variaciones en la tensión de alimentación en la carga, además se utilizan índices que hacen parte del cálculo puntual de los efectos de las distorsiones armónicas para los ensayos de laboratorio propuestos para las cargas seleccionadas.



5.3.1 Fingerprints. Los Fingerprints son herramientas gráficas utilizadas en este proyecto de grado para garantizar una interpretación clara y concisa del estudio elaborado a las distorsiones armónicas en corriente producidas por variaciones en la magnitud y ángulo de fase en la tensión de alimentación. Por medio de esta herramienta se puede reconocer fácilmente el comportamiento de la distorsión armónica del elemento medido y a su vez se puede cuantificar el comportamiento del espectro de corriente frente a cambios en la distorsión y ángulo de fase de la tensión de alimentación.

Es indispensable definir y entender los Fingerprints propuestos posteriormente a modo de resultados, ya que forman parte importante del estudio de la distorsión armónica en las cargas experimentadas: Cada Fingerprint cuenta con doce brazos, debido al barrido en ángulo de fase respecto de la señal fundamental, los cuales parten de un centro en común. Los brazos están conformados por doce puntos, que representan el barrido en magnitud armónica respectivo al ángulo del brazo,

Figura 7.

Por ejemplo, para el tercer armónico se inyecta a la carga una tensión nominal con un barrido en la magnitud de distorsión que va de 1 a 12 % en pasos de 1% y el ángulo de fase que varía de 0° a 330° con pasos de 30°. Esto quiere decir que la toma de datos representada en el Fingerprint para una sola distorsión armónica, se da con un total de 144 medidas, y que cada medida está comprendida de 75 muestras por ciclo para una ventana de 12 ciclos; así el total de medidas para los tres órdenes armónicos tratados en el proyecto (tercero, quinto y séptimo) de una sola carga es de 432 medidas, lo cual permite hacer una idea del tiempo al igual que el trabajo que conlleva el desarrollo de los experimentos y el posterior análisis de resultados.

Se utilizó la herramienta de software Matlab para tomar los datos medidos en el tiempo y calcular el espectro de la señal, que consta de una magnitud pico y un ángulo de fase de onda fundamental, además de los armónicos de orden n presentes en la señal. También es importante reconstruir la señal en el tiempo, a partir de su espectro, esto con el fin de corroborar que la medida es la correcta y que no se pierde información importante de la señal original. Por ejemplo en la Figura 6 se observa una señal de color negra correspondiente a la señal real tomada en el tiempo, y la señal de color rojo es la reconstruida a partir del espectro armónico.

Una vez calculado el espectro armónico de la carga, se construye el Fingerprint. Como se mencionó anteriormente un Fingerprint evidencia una gran cantidad de información, por esta razón elaboramos de manera alterna una matriz en Excel que contiene la magnitud y



el respectivo ángulo de fase para las diferentes variaciones de la distorsión armónica en la tensión de alimentación, más el comportamiento de la distorsión armónica en corriente. Teniendo en cuenta que el proceso es repetitivo para cada porcentaje, esta matriz se vuelve muy ventajosa desde el punto de vista analítico, puesto que permite suministrar de forma inmediata el comportamiento de la carga para diferentes situaciones de la señal de alimentación, y de esta forma construir el Fingerprint obviando los primeros pasos de programación.

El centro de la gráfica es clave, ya que es el punto en común para todos los brazos del Fingerprint, siendo el resultado de la distorsión armónica en corriente que produce la tensión fundamental inyectada a la carga. Sí la carga tiene comportamiento netamente lineal, su interacción ante una onda fundamental no generaría distorsión armónica, por lo tanto, el centro del Fingerprint sería cero puesto que no existirían componentes de frecuencia diferentes a la fundamental. Teniendo claro lo anterior, en una carga no lineal, su centro es diferente de cero, puesto que para cada distorsión de tensión se presentan distorsiones de corriente en diferentes órdenes armónicos.

En una figura se muestran dos Fingerprints, por ejemplo Figura 7, Figura 8, el primero representa la variación en forma polar de la magnitud y ángulo de fase de los armónicos presentes en la señal de tensión de alimentación (tercero, quinto o séptimo), y el segundo muestra la respuesta de la distorsión de la corriente absorbida por la carga.

Figura 6. Reconstrucción de la señal de corriente en el dominio del tiempo a partir del espectro armónico.

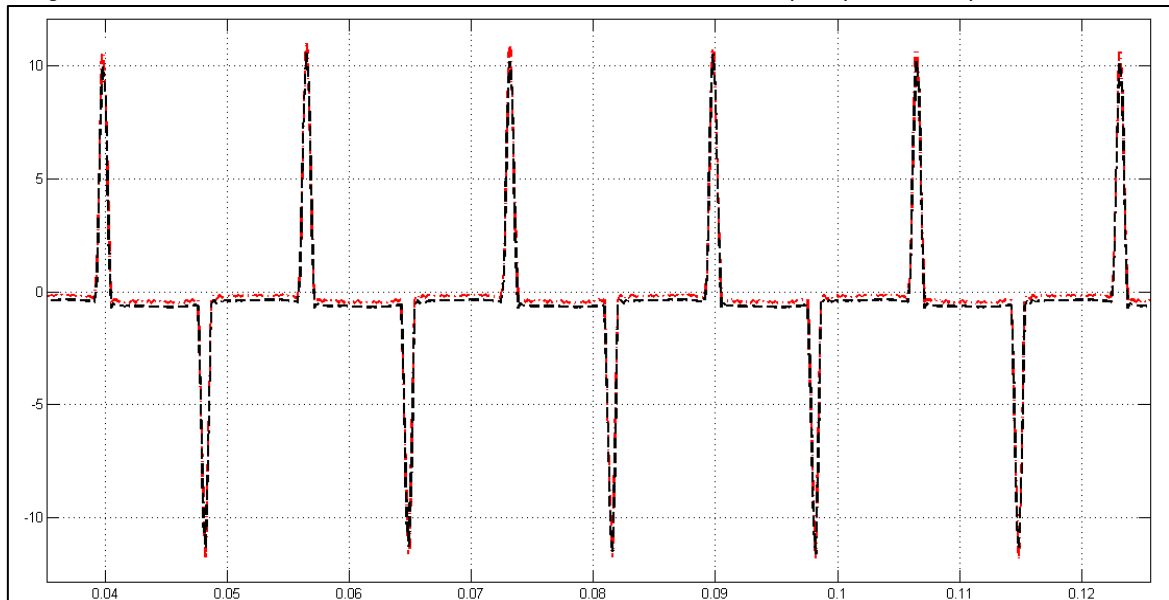
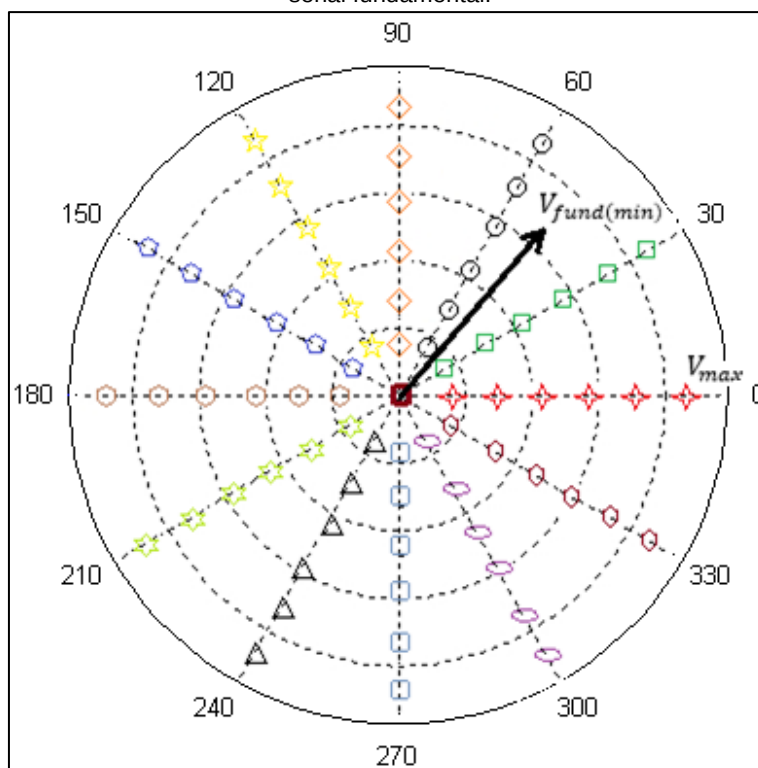


Figura 7. Barrido de tensión para diferentes porcentajes de magnitud, con barrido de ángulo, respecto a la señal fundamental.



5.3.2 Índices. La medición hecha en las pruebas de laboratorio, arroja una gran cantidad de datos que son recolectados con el fin de estudiar las cargas. A raíz de esto, se analiza el comportamiento de la distorsión armónica, utilizando diferentes índices como el de sensibilidad y asimetría, que permiten caracterizar los Fingerprints.

El cálculo del THD (Total Harmonic Distortion), se utiliza para determinar si el porcentaje de distorsión de un equipo o un grupo de equipos en una instalación, se encuentra dentro de los límites de distorsión armónica de corriente o de tensión establecidos por la norma. Lamentablemente no siempre es útil para analizar las tendencias relativas del comportamiento de la distorsión armónica[34].



Por lo anterior en [8] se plantean otros índices que brindan más información acerca de los porcentajes de distorsión armónica en el sistema, al igual que el comportamiento del espectro armónico.

En el estudio de la distorsión armónica, es útil contar con un modelo que represente el comportamiento de la carga. Ya que permite analizar su respuesta ante diversas condiciones de alimentación. Uno de los métodos más usados para el modelado de las cargas es el modelo en el dominio de la frecuencia de Norton y Norton acoplado.

Una de las dificultades a la hora de modelar cargas, es la interacción de los diferentes componentes internos que la conforman. En [8] [11] plantean una forma para la caracterización de cargas a partir de un análisis experimental, teniendo en cuenta diferentes índices como el de sensibilidad, linealidad y asimetría. Con la ayuda de estos índices se puede construir una matriz de sensibilidad que es muy similar a la matriz de admitancias utilizada en el modelo de Norton y Norton acoplado [11].

5.3.2.1 Distorsión armónica total (THD). La norma IEC 61000 3-2 [33] define el THD como la relación entre la suma del valor r.m.s de las componentes armónicas y el valor r.m.s de la componente fundamental. Es adimensional y se expresa en porcentaje

Para el caso de la corriente la ecuación sería:

- I_h Componentes armónicas
- I_1 Componente fundamental

$$THD_I = \sqrt{\frac{\sum_2^h (I_h)^2}{(I_1)^2}} * 100\%$$

5.3.2.2 Índice de sensibilidad. El índice de sensibilidad se utiliza para definir la matriz de sensibilidad, que relaciona el impacto de la tensión armónica sobre la corriente armónica absorbida por la carga.

Si el orden armónico de la corriente y de la tensión es el mismo, hablamos de una auto-sensibilidad, y corresponde a qué tan sensible es el equipo en la distorsión de corriente frente a cambios en la distorsión de tensión del mismo orden, pero si los órdenes son diferentes entre sí, se obtiene una sensibilidad cruzada, la cual corresponde a que tan



sensible es el equipo en la distorsión de corriente frente a cambios en la distorsión de tensión de diferente orden.

El índice de sensibilidad será la relación entre la resta vectorial del punto máximo de la corriente con el centro del Fingerprint El $I_{i(min)}^v$ corresponde al centro del Fingerprint, el cual no siempre es cero. En la Figura 8, se observa a modo de ejemplo una posible respuesta en corriente de una carga, donde el centro del Fingerprint es diferente de cero. Es importante tener claridad en el centro de la gráfica para el cálculo del índice de sensibilidad.

Figura 8 y la resta vectorial del punto máximo de voltaje con su respectivo centro del Fingerprint de tensión, para cada uno de los diferentes brazos

Figura 7, [11]. Las unidades son mili-Siemens.

- n es el número de brazos o brazos del Fingerprint.
- i es el brazo o brazo del Fingerprint seleccionada en la sumatoria.
- μ, v donde v es el orden armónico de referencia de la tensión y μ es el orden armónico de la respuesta en corriente.
- $V_{i(max)}^v$ vector de tensión del punto máximo del brazo o brazo seleccionada.
- $V_{i(min)}^v$ vector de tensión del punto mínimo (centro del Fingerprint) del brazo o brazo seleccionada.
- $I_{i(min)}^v$ vector de corriente del punto mínimo (centro del Fingerprint - respuesta fundamental) del brazo o brazo seleccionada.
- $I_{i(max)}^v$ vector de corriente del punto máximo del brazo o brazo seleccionada.

Auto-sensibilidad:

$$S^{(vv)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|I_{i(max)}^v - I_{i(min)}^v|}{|V_{i(max)}^v - V_{i(min)}^v|}$$

Sensibilidad cruzada:



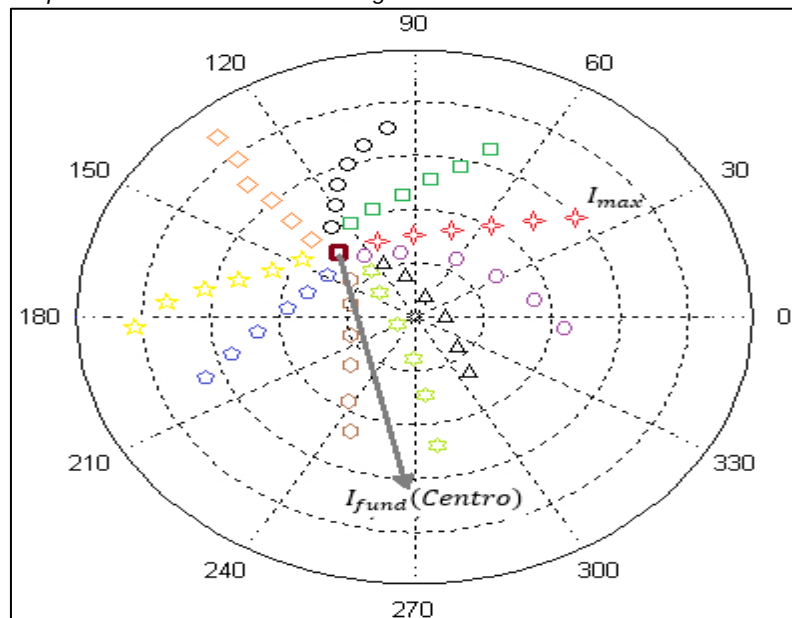
$$S^{(v\mu)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|I_{i(max)}^{\mu} - I_{i(min)}^{\mu}|}{|V_{i(max)}^v - V_{i(min)}^v|}$$

Observaciones:

Una vez se tiene la resta vectorial, se extrae solo la magnitud del vector tanto para numerador como para denominador. La señal fundamental de alimentación de tensión, no contiene ningún porcentaje armónico, por lo cual el centro de la gráfica y el valor mínimo es cero.

El $I_{i(min)}$ corresponde al centro del Fingerprint, el cual no siempre es cero. En la Figura 8, se observa a modo de ejemplo una posible respuesta en corriente de una carga, donde el centro del Fingerprint es diferente de cero. Es importante tener claridad en el centro de la gráfica para el cálculo del índice de sensibilidad.

Figura 8. Respuesta en corriente de una carga ante la variación de la tensión de alimentación.



5.3.2.3 Índice de linealidad. Debido al impacto que puede tener la relación de la tensión con la corriente de diferente orden armónico, es necesario saber si existe una tendencia lineal o no.



Este índice se define como relación entre la distancia del valor máximo al centro del Fingerprint de un brazo seleccionado y la suma entre las distancias de los puntos sucesivos de este brazo seleccionado del Fingerprint, partiendo desde el centro hasta el punto más alejado (máximo) Figura 9, [11]. La relación varía de 0 a 1, donde 1 propone una fuerte linealidad. La unidad es adimensional.

- v, μ relación de órdenes armónicos.
- ΔI_m la distancia del valor máxima del brazo seleccionado con el centro (respuesta a la señal fundamental).
- ΔI_i la distancia de los puntos sucesivos del brazo j , partiendo del centro del Fingerprint (respuesta a la señal fundamental) hasta el punto más alejado (máximo).

$$L^{(v\mu)} = P_{percentil,25(j)} \left[\frac{\Delta I_m^{(v\mu)}(j)}{\sum_i \Delta I_i^{(v\mu)}(j)} \right]$$

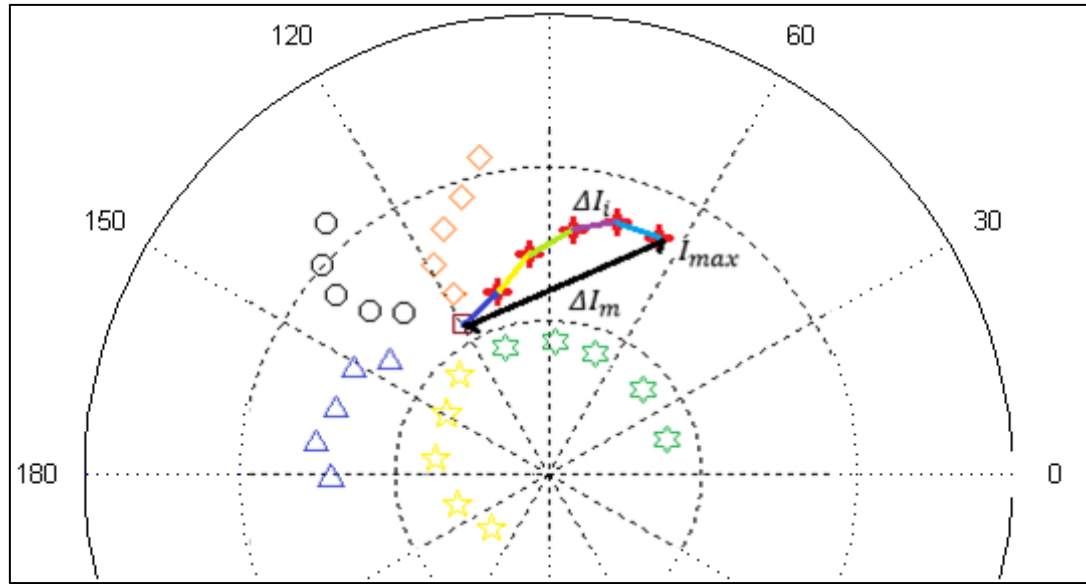
Observaciones:

Una vez obtenidas las relaciones entre cada brazo de la gráfica, se calcula el cuartil 25 y el resultado corresponde a un valor entre 0 y 1 como se mencionó anteriormente.

Se sugiere realizar el cálculo de las distancias con la ley del coseno, referenciándose con el centro del Fingerprint y teniendo en cuenta que la variación de los ángulos es de forma polar en la gráfica.

No se recomienda tomar los puntos a partir de vectores, debido a que si la referencia es el centro del Fingerprint la operación de los dos vectores es un vector resultante con una magnitud diferente a la distancia real entre los dos puntos.

Figura 9. Respuesta en corriente, comportamiento no lineal.



5.3.2.4 Índice de asimetría. El Fingerprint y el comportamiento mismo del espectro no sólo pueden ser lineal, sino que también puede ser asimétrico. La asimetría indica que tan diferente es un brazo en particular de los demás brazos del Fingerprint. Por tanto, este índice se describe teniendo en cuenta qué tan diferente son las distancias entre puntos vecinos que conforman los brazos del Fingerprint, así como los ángulos resultantes entre los puntos anteriormente mencionados.

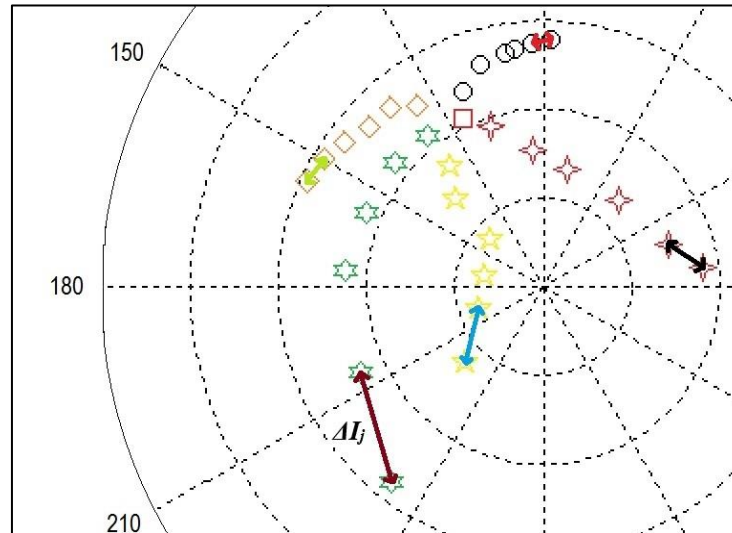
En este sentido, el índice de asimetría se conforma de dos subíndices, la asimetría de magnitud $A_{\rho}^{(v\mu)}$ y la asimetría de fase $A_{\phi}^{(v\mu)}$. La Figura 10 muestra las distancias entre puntos vecinos de un brazo, mientras que la Figura 11 muestra los ángulos resultantes entre dos puntos vecinos de dos brazos consecutivos. La unidad es adimensional.

Similar al índice de linealidad, los valores cercanos a 1, indican una gran asimetría entre los brazos del Fingerprint. Este índice es similar al coeficiente de variación empleado en las estadísticas empíricas en [11].

La asimetría de magnitud indica la diferencia entre la longitud de los brazos y es definida como el percentil 75 de la relación entre la desviación estándar ($S_j^{(v\mu)}$) de las distancias entre puntos vecinos de cada brazo del Fingerprint (ΔI_j), y el valor medio de dichas distancias.

$$A_{\rho}^{(v\mu)} = P_{\text{percentil},75(i)} \left[\frac{S_{\rho j}^{(v\mu)}(j)}{\Delta I_j^{(v\mu)}(j)} \right]$$

Figura 10. Asimetría de magnitud.

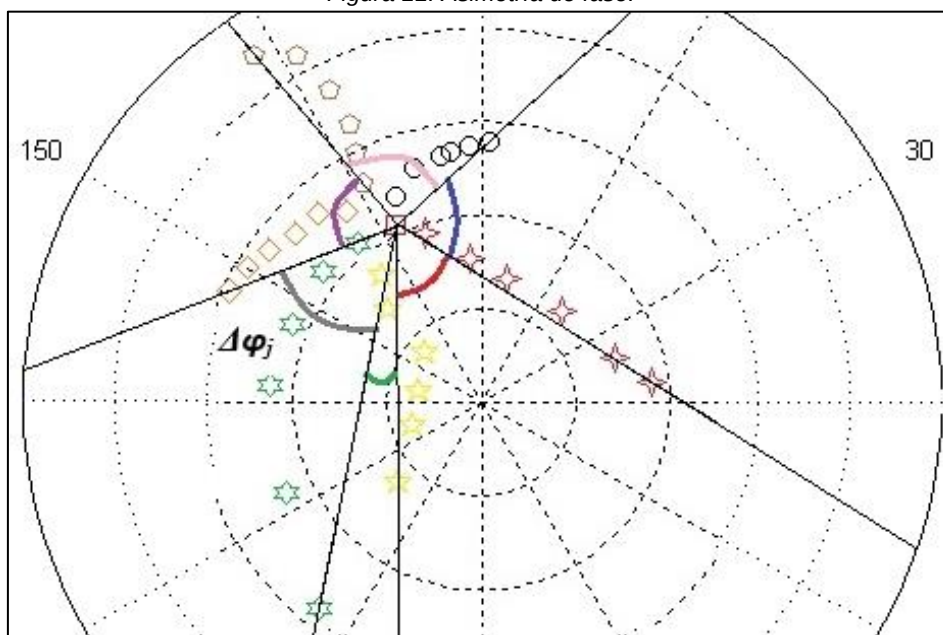


La asimetría de fase indica la diferencia entre el ángulo de los brazos vecinos y es definida de manera similar a la asimetría de magnitud, solo que en lugar de las diferencias de magnitud ΔI_j son usadas las diferencias de fase $\Delta \varphi_j$ para el cálculo del valor medio y la desviación estándar.

$$A_{\varphi}^{(v\mu)} = P_{percentil,75(i)} \left[\frac{S_{\varphi j}^{(v\mu)}(j)}{\Delta \varphi_j^{(v\mu)}(j)} \right]$$



Figura 11. Asimetría de fase.





6 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS

En este capítulo se hace mención de las cargas y una explicación breve de los experimentos a los que fueron sometidas a modo de recordatorio. Se busca dar cumplimiento al cuarto objetivo específico planteado, plasmando de manera consecuente en cada experimento los resultados gráficos, al igual que los numéricos y al final de cada una, se hace el análisis concluyente.

En las primeras gráficas Fingerprints, se puede observar la respuesta en corriente con respecto a cada orden armónica de 3-3, 5-5, y 7-7, por ejemplo Figura 13. Los doce brazos en la gráfica de corriente representan la respuesta asociada a sus correspondientes brazos de la gráfica de tensión, los cuales se pueden distinguir por colores y por figuras.

El centro del Fingerprint no es el mismo en todos los casos para los brazos de corriente como se puede apreciar en la Figura 13 (b) por ejemplo. Esto varía dependiendo de la respuesta de la carga ante la señal de alimentación fundamental sin ninguna distorsión armónica, como se mencionó en el capítulo anterior.

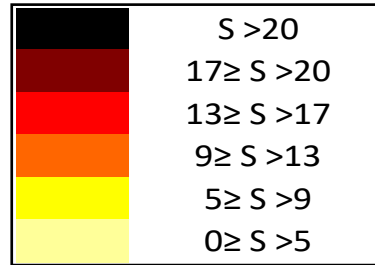
La

Figura14 por ejemplo, muestra la respuesta en corriente de orden quinto y séptimo, producido por la distorsión armónica en tensión de orden tres. En los índices de sensibilidad, linealidad y asimetría, se emplea la palabra “cruzada(o)”, que hace referencia al efecto que tiene un orden armónico en particular sobre los demás, tomando siempre como referencia la tensión de alimentación de la carga.



Para los siguientes índices de sensibilidad (Matriz de admitancias) de cada experimento, se proporcionará una gráfica de intensidad, que tiene un nivel de escala referenciado a su respectivo color. Figura 12. Donde el color negro simboliza alta sensibilidad y va disminuyendo según la escala propuesta.

Figura 12. Referencia de colores para los niveles de sensibilidad S.





6.1 TALADRO DE MANO MONOFÁSICO, RESPUESTA EN CORRIENTE PARA 3, 5 Y 7 ARMÓNICO

Se practicó un barrido en tensión con distorsión armónica, que va del 1% al 12% en magnitud respecto a la señal fundamental. Además, se realizó una variación del ángulo de fase desde 0° a 330° con pasos de 30° , respecto a la señal fundamental tomando primero tercer armónico, luego quinto, y por último séptimo.

- Tercer armónico

Figura 13. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónico. Taladro.

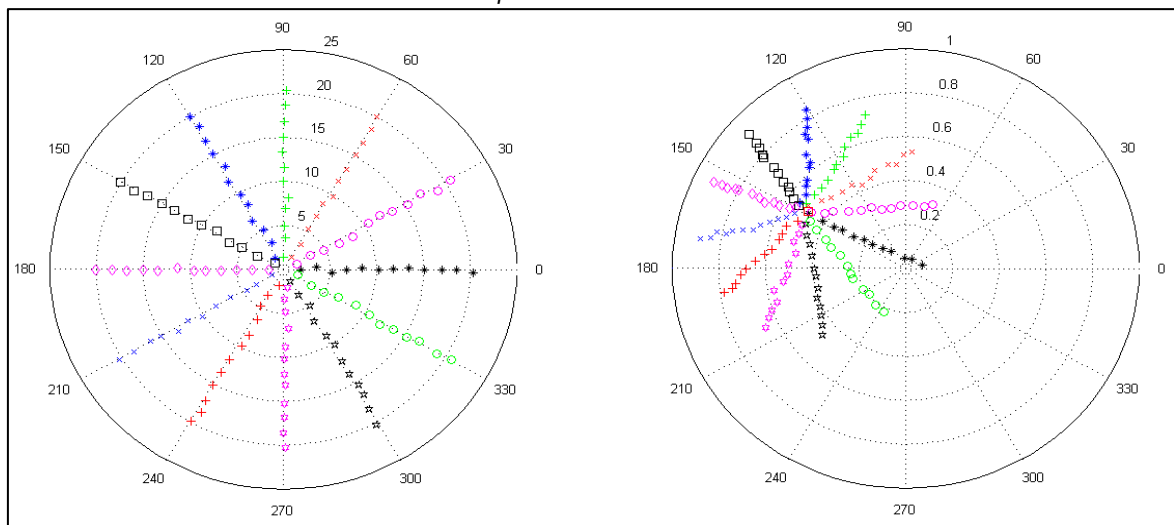
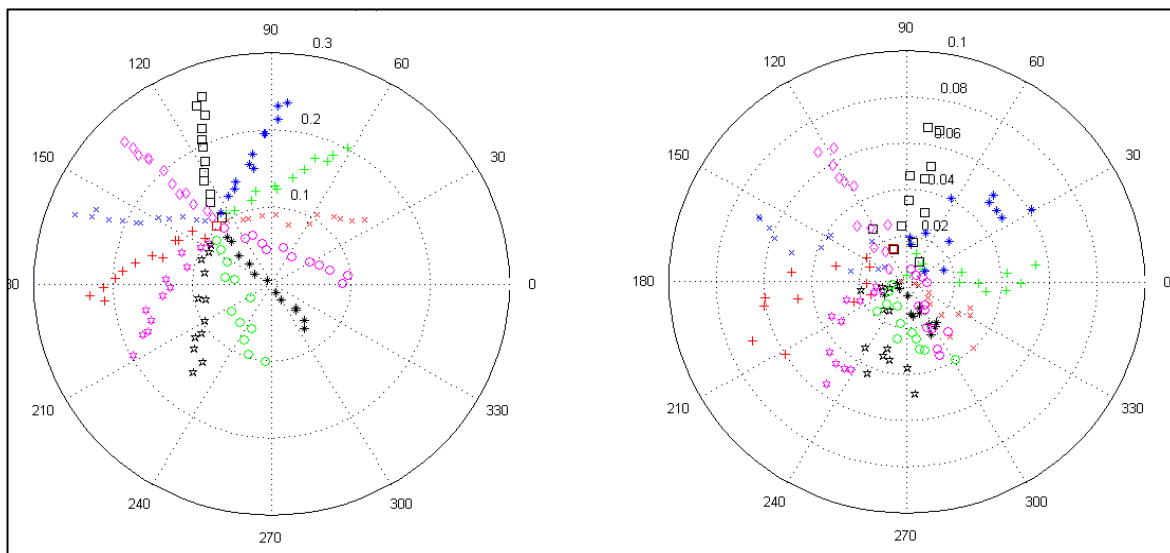


Figura 14. Respuesta en corriente para quinto (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en tercer armónico. Taladro.



- Quinto armónico

Figura 15. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en quinto armónico, (b) con respuesta en corriente para quinto armónico. Taladro.

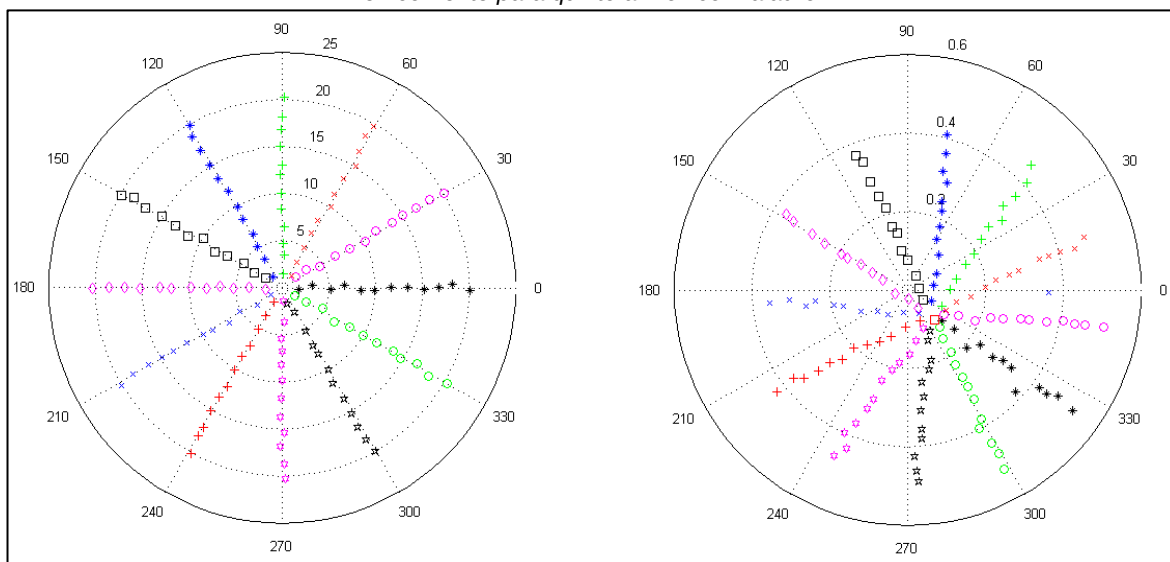
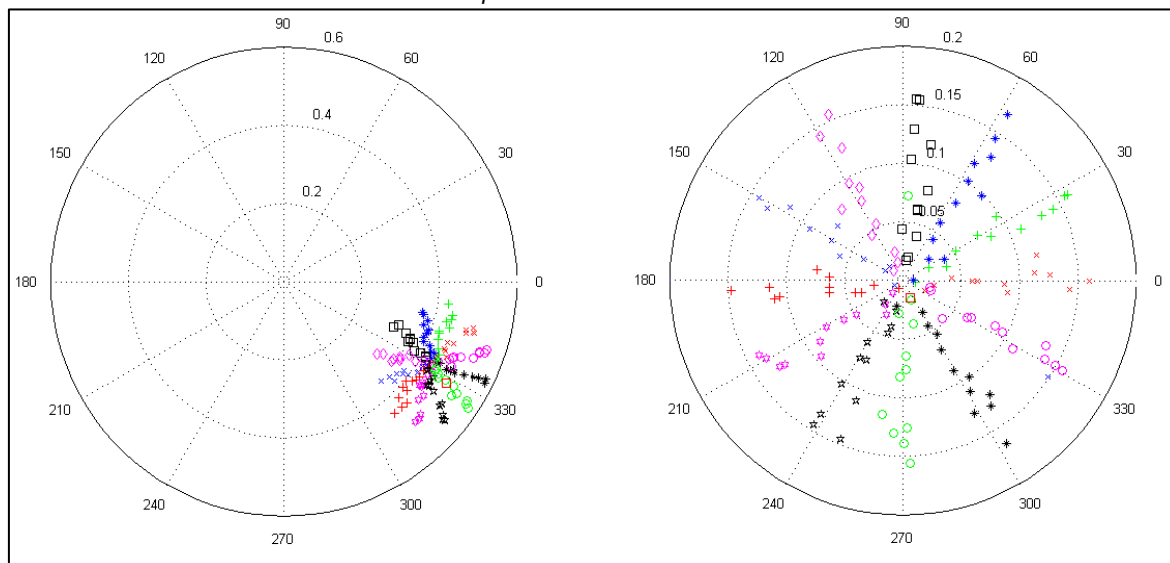


Figura 16. Respuesta en corriente para tercero (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en quinto armónico. Taladro.



- Séptimo armónico

Figura17. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en séptimo armónico, (b) con respuesta en corriente para séptimo armónico. Taladro.

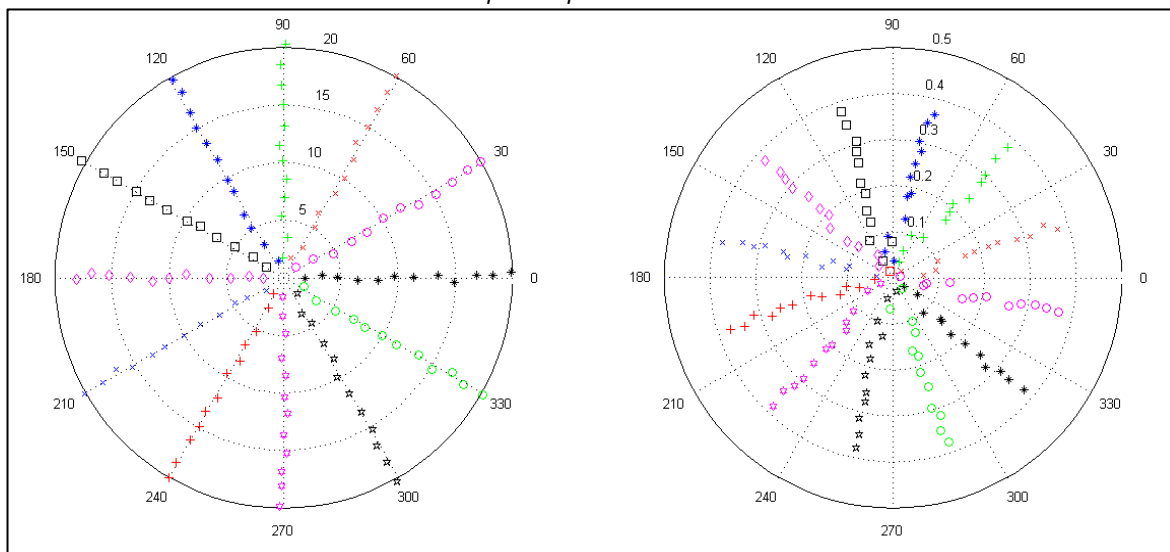
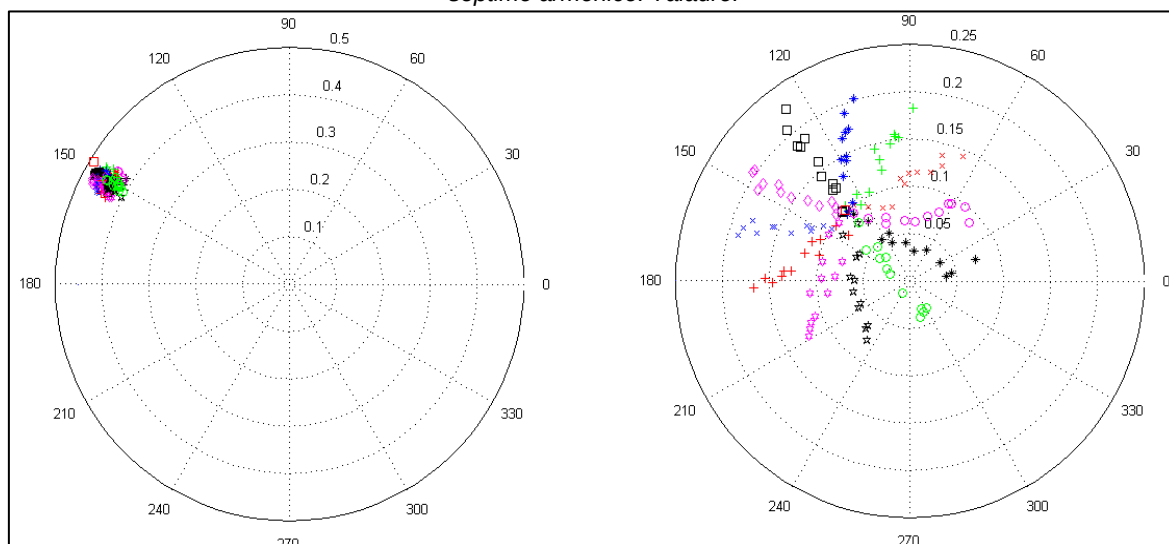


Figura 18. Respuesta en corriente para tercero (a) y quinto armónico (b), con señal distorsionada de tensión en séptimo armónico. Taladro.



6.1.1 Índice de auto-sensibilidad, sensibilidad cruzada (Matriz de admitancias), linealidad y asimetría

Tabla 4. Índice de sensibilidad para el taladro, unidades [mS].

Carga		Índice de sensibilidad		
Taladro		3	5	7
	3	16,50	8,15	2,29
	5	4,61	22,14	3,91
	7	0,56	4,88	18,72

Figura 19. Intensidad del índice de sensibilidad para el taladro.

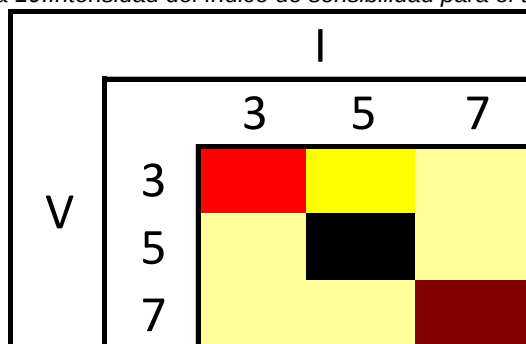




Tabla 5. Índice de linealidad para el taladro, adimensional.

Índice de linealidad			
	3	5	7
3	0,95	0,84	0,40
5	0,38	0,85	0,56
7	0,27	0,67	0,92

Tabla 6. Índice de asimetría para el taladro, adimensional.

Índice de asimetría _Mag			
	3	5	7
3	0,29	0,42	0,62
5	2,81	0,64	1,27
7	0,58	0,56	0,33
Índice de asimetría _Ang			
	3	5	7
3	0,16	0,25	0,25
5	1,01	0,26	0,26
7	0,76	0,59	0,59

Podemos observar en las gráficas Fingerprints del taladro Figura 13, Figura 15 y Figura 17, que la herramienta presenta un comportamiento altamente lineal, esto se debe a que predomina el efecto inductivo sobre las distorsiones que pueda generar su circuito de control. Recordemos que este tipo de herramienta posee una electrónica de potencia basada en CSCR (Capacitor Start-Capacitor Run), la cual genera las pequeñas distorsiones armónicas que se observan en el Fingerprint. Por ejemplo, en la respuesta al tercer armónico Figura 13 es notorio ver un centro diferente de cero, esto quiere decir que ante una onda de tensión sin armónicos se produce distorsión en el tercer armónico, caso contrario al quinto Figura 15 y séptimo Figura 17, donde el centro del Fingerprint es aproximadamente cero, lo que quiere decir que no hubo distorsión en la corriente ante la entrada fundamental de tensión.

También se puede deducir que debido al circuito de control CSCR se generan referencias cruzadas entre 3-5, 5-3, 5-7, 7-5



Figura14, Figura 16 y Figura18 respectivamente; aunque son muy pequeñas (nótese la escala de la gráfica), el comportamiento también es lineal. De igual forma se puede apreciar que no se produce referencia cruzada entre el tercer y séptimo armónico.

De acuerdo con [11] podemos obtener la matriz de sensibilidad para el taladro. Cabe resaltar que la matriz de sensibilidad es altamente similar a la matriz de admitancias armónica, pero no son idénticas. En la gráfica de intensidad de la Figura 19, se observa que los elemento que tienen alta sensibilidad son 5-5, y en menor medida 7-7

$$[Y] = \begin{Bmatrix} 17 & 5 & 0.6 \\ 8 & 22 & 5 \\ 2 & 4 & 19 \end{Bmatrix} [mS]$$

6.2 MOTOR DE INDUCCIÓN JAULA DE ARDILLA

Se practicó un barrido en tensión con distorsión armónica, que va del 1% al 12% en magnitud respecto a la señal fundamental. Además, se realizó una variación del ángulo de fase de 0° a 330° con pasos de 30°, respecto a la señal fundamental, tomando primero tercer armónico, luego quinto, y por último el séptimo.

Esto se hizo para el motor con resistencias en el arranque, para el motor conectado al variador 1 y para el motor conectado al variador 2 cada uno con dos velocidades diferentes de funcionamiento.

6.2.1 Arranque por resistencias, respuesta en corriente para 3, 5 y 7 armónico

- Tercer armónico

Figura 20. (a) Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónico. Motor jaula de ardilla.

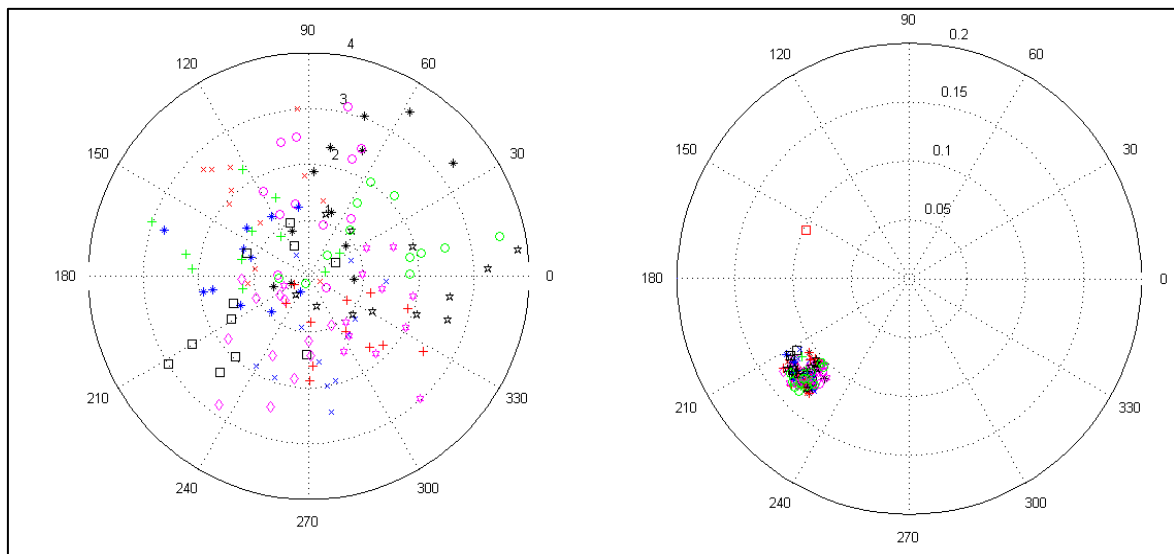
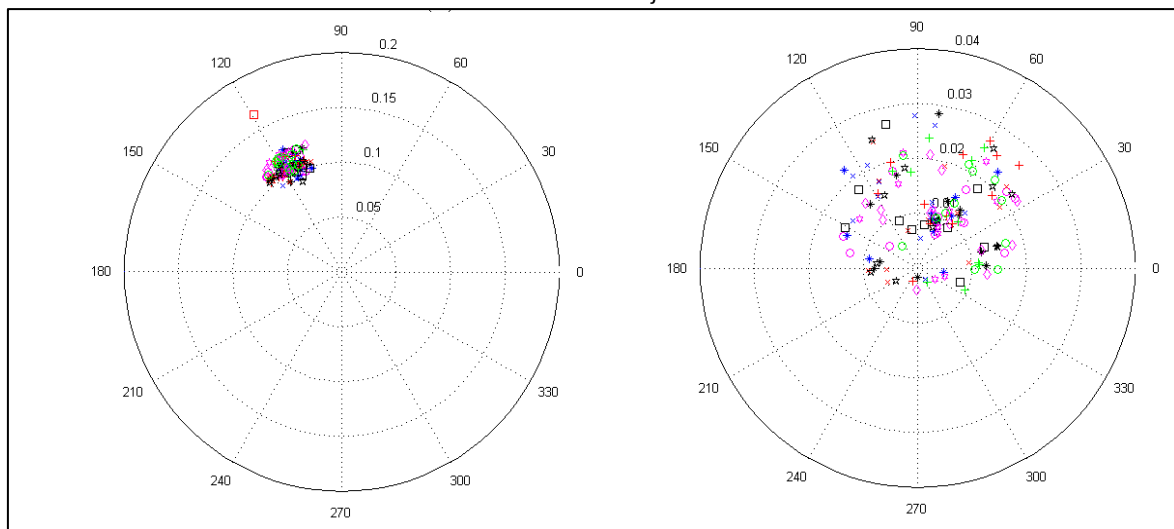


Figura 21. Respuesta en corriente para quinto (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en tercer armónico. Motor jaula de ardilla.



- Quinto armónico

Figura 22. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en quinto armónico, (b) con respuesta en corriente para quinto armónico. Motor jaula de ardilla.

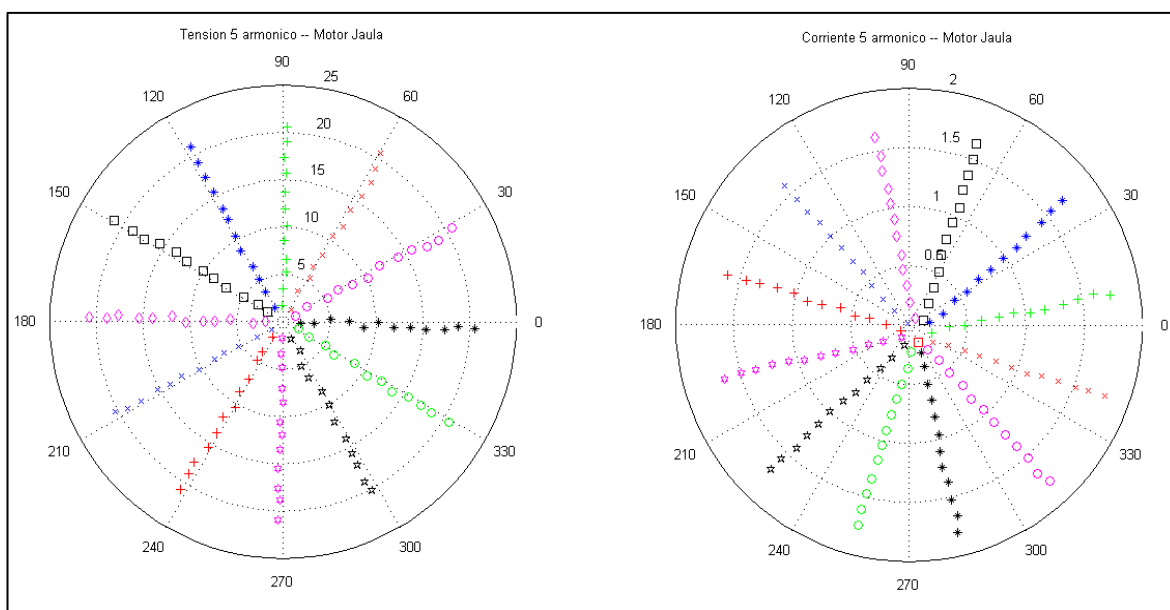
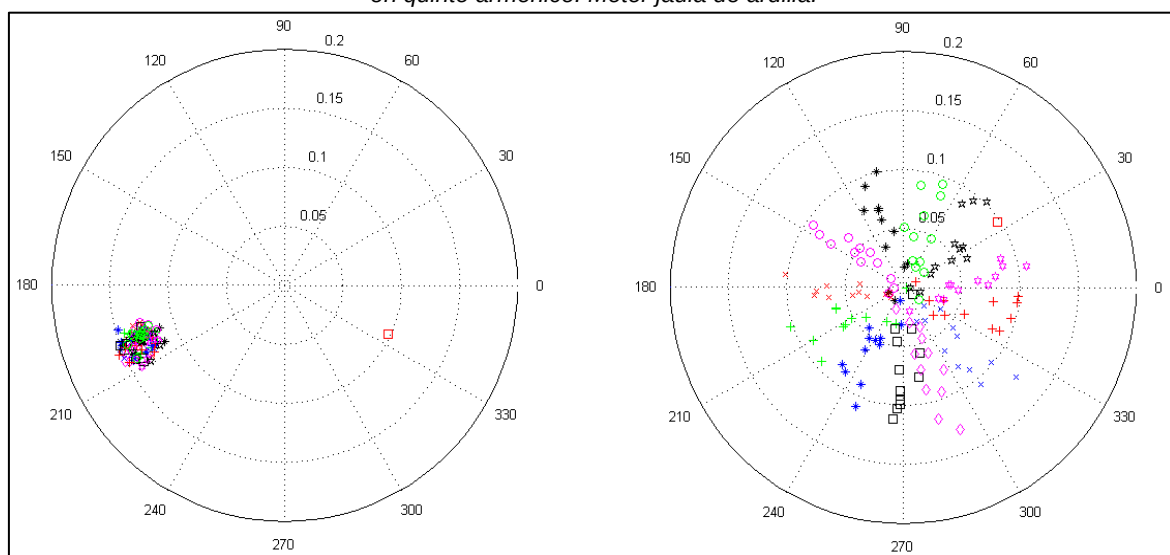


Figura 23. Respuesta en corriente para tercero (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en quinto armónico. Motor jaula de ardilla.



- Séptimo armónico

Figura 24. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en séptimo armónico, (b) con respuesta en corriente para séptimo armónico. Motor jaula de ardilla.

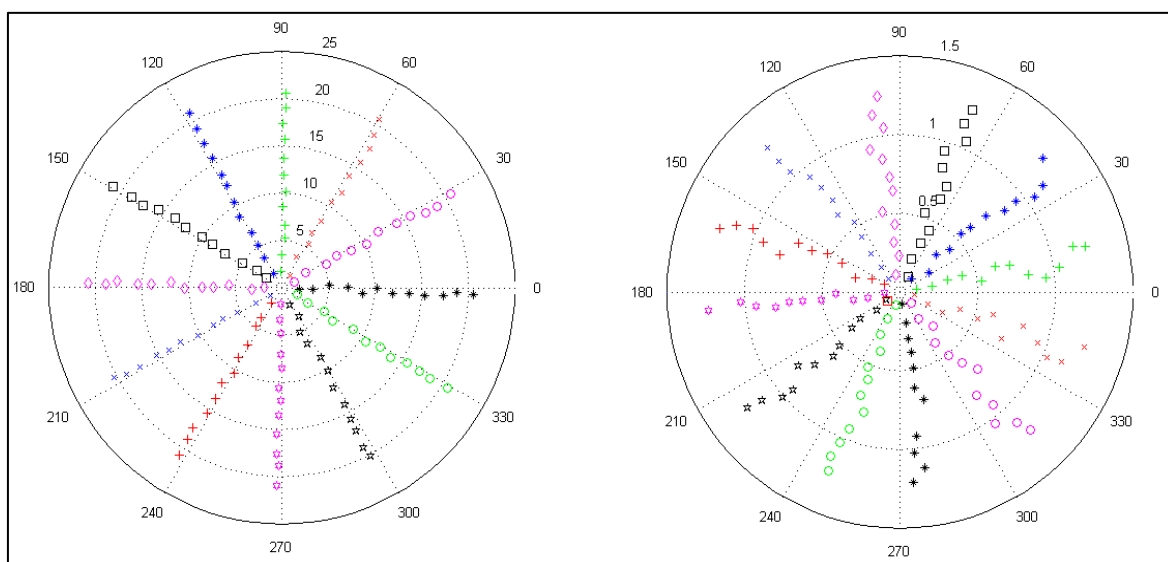
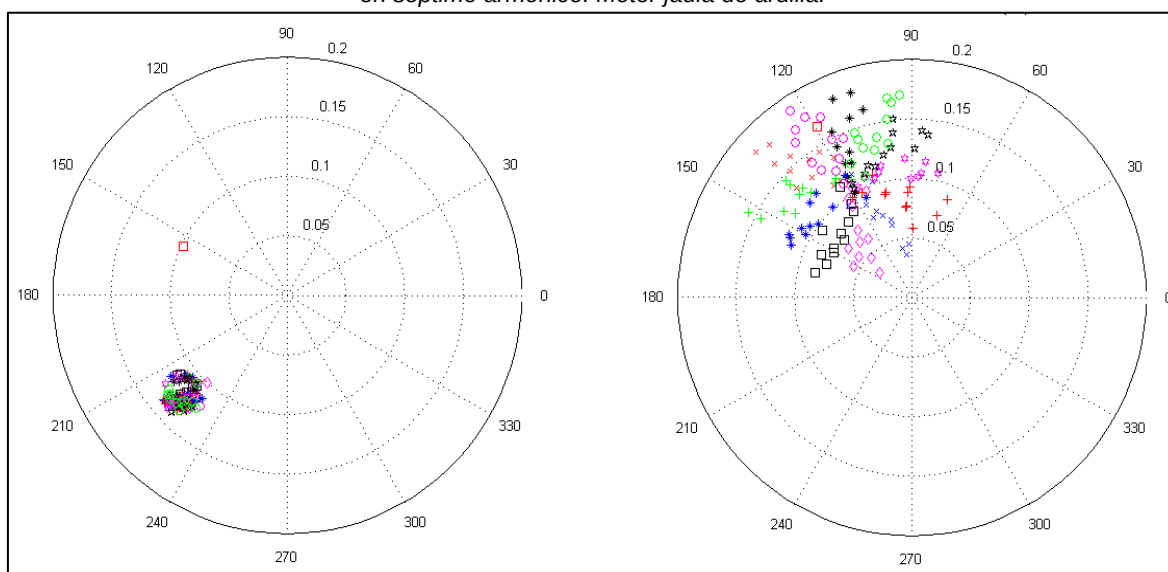


Figura 25. Respuesta en corriente para tercero (a) y quinto armónico (b), con señal distorsionada de tensión en séptimo armónico. Motor jaula de ardilla.



6.2.1.1 Índice de auto-sensibilidad, sensibilidad cruzada (Matriz de admitancias), linealidad y asimetría



Tabla 7. Índice de sensibilidad para motor jaula de ardilla con resistencia de arranque, unidades [mS].

Carga		Índice de sensibilidad		
		3	5	7
Motor Jaula	3	3,78	1,35	2,42
	5	0,24	81,80	5,08
	7	0,10	2,11	57,80

Figura 26. Intensidad de índice de sensibilidad para motor jaula de ardilla con resistencias de arranque.

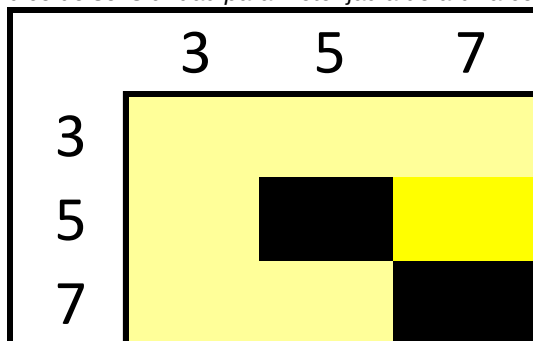


Tabla 8. Índice de linealidad para motor jaula de ardilla con resistencias de arranque, adimensional.

		Índice de linealidad		
		3	5	7
3		0,37	0,21	0,36
5		0,53	0,99	0,25
7		0,41	0,23	0,88

Tabla 9. Índice de asimetría para motor jaula de ardilla con resistencias de arranque, adimensional.

		Índice de asimetría _Mag		
		3	5	7
3		1,09	1,15	0,41
5		0,58	0,09	0,54
7		0,54	0,55	0,31
		Índice de asimetría _Ang		
		3	5	7
3		0,77	0,80	0,80
5		0,81	0,08	0,08
7		0,87	1,19	1,01



$$[Y] = \begin{Bmatrix} 4 & 0.3 & 0.1 \\ 1 & 82 & 2 \\ 2 & 5 & 58 \end{Bmatrix} [mS]$$

Los armónicos de secuencia cero son los que circulan por el neutro físico de las redes, para este caso el motor jaula de ardilla fue conectado sin neutro en común con la fuente. En la Figura 20 (b) podemos evidenciar el comportamiento de la corriente en la carga para tercer armónico, el cual era lo esperado en este caso ya que si nos remitimos al modelo circuital de secuencia cero Figura 27(nótese la escala de la gráfica), la corriente de este orden, no tendría modo de circular por la carga y de esta forma producir distorsión alguna.

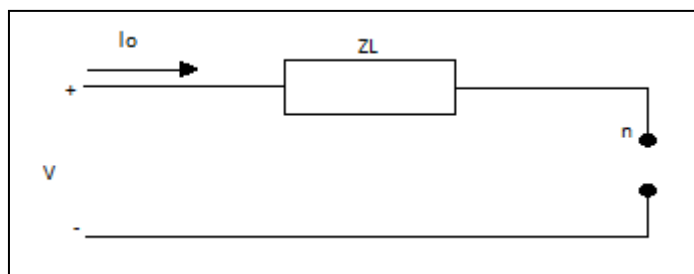
Cabe aclarar que en el caso de la tensión podemos ver como al no haber circulación de corriente tampoco ocurre distorsión en la tensión, así los datos en la Figura 20(a) muestran un comportamiento disperso con magnitudes muy pequeñas en comparación a las configuradas previamente en la fuente de alimentación(nótese la escala de la gráfica). Si hubiera respuesta en corriente por parte de la carga y debido a la impedancia que se genera en las líneas de conducción, la caída generaría en dicha impedancia, distorsión en la tensión de alimentación.

Para el caso de la Figura 22 (b) y Figura 24 (b), la respuesta en corriente de quinto y séptimo armónico es altamente lineal, con un desfase de aproximadamente 90°. Se observa que el motor no presenta referencia cruzada Figura 23 y Figura 25(nótese la escala de la gráfica). Esto es de esperar, ya que el motor es altamente inductivo y no presenta electrónica de potencia, por lo tanto, solo produciría desfases.

En el caso de la Figura 26 para la gráfica de intensidad, se evidencia alta sensibilidad en las posiciones 5-5 y 7-7 y en menor grado 5-7, por el lado de 3-3 la sensibilidad es muy baja al igual que la linealidad. La posición 5-5 es altamente lineal

Tabla 8.

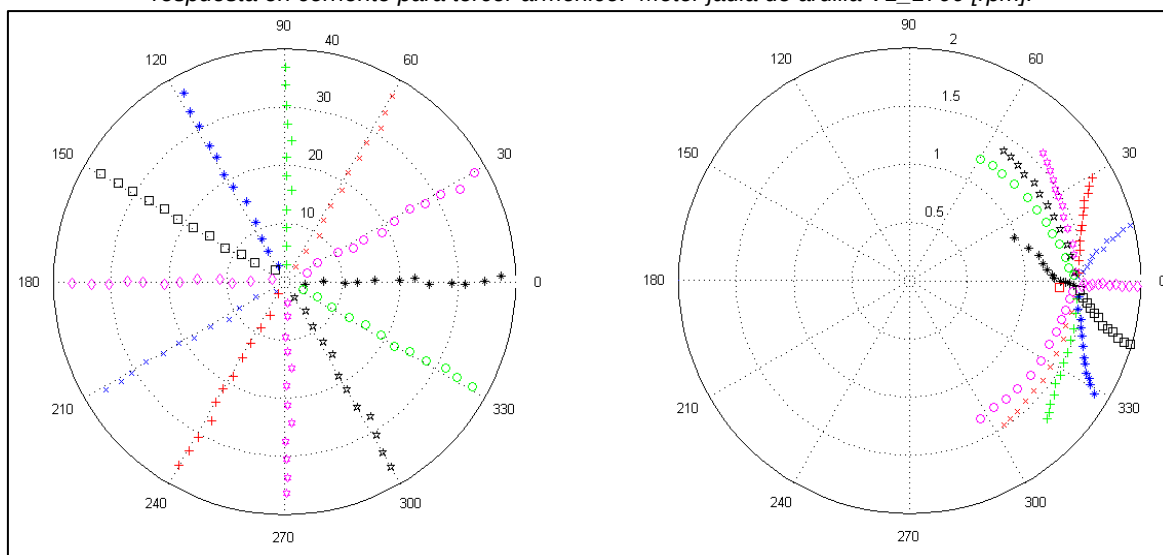
Figura 27. Modelo de corriente para secuencia cero, sin neutro físico.

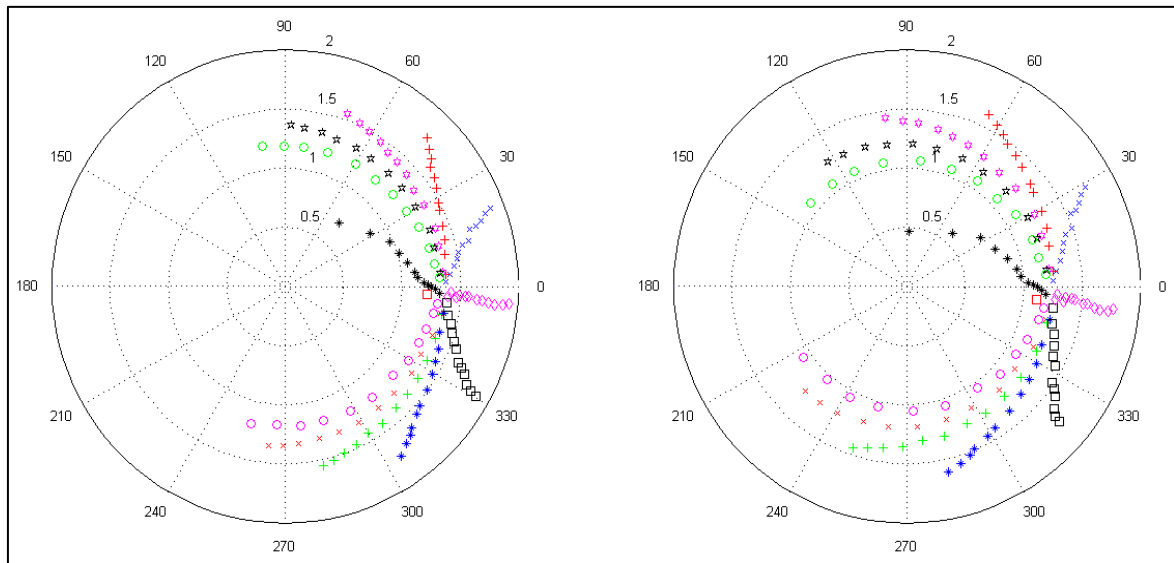


6.2.2 Motor de inducción jaula de ardilla con variador Eurotherm, velocidad 1700 [rpm], respuesta en corriente para 3,5 y 7 armónico

- Tercer armónico

Figura 28. (a) Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónico. Motor jaula de ardilla V1_1700 [rpm].





- Quinto armónico

Figura 30. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en quinto armónico, (b) con respuesta en corriente para quinto armónico. Motor jaula de ardilla V1_1700 [rpm].

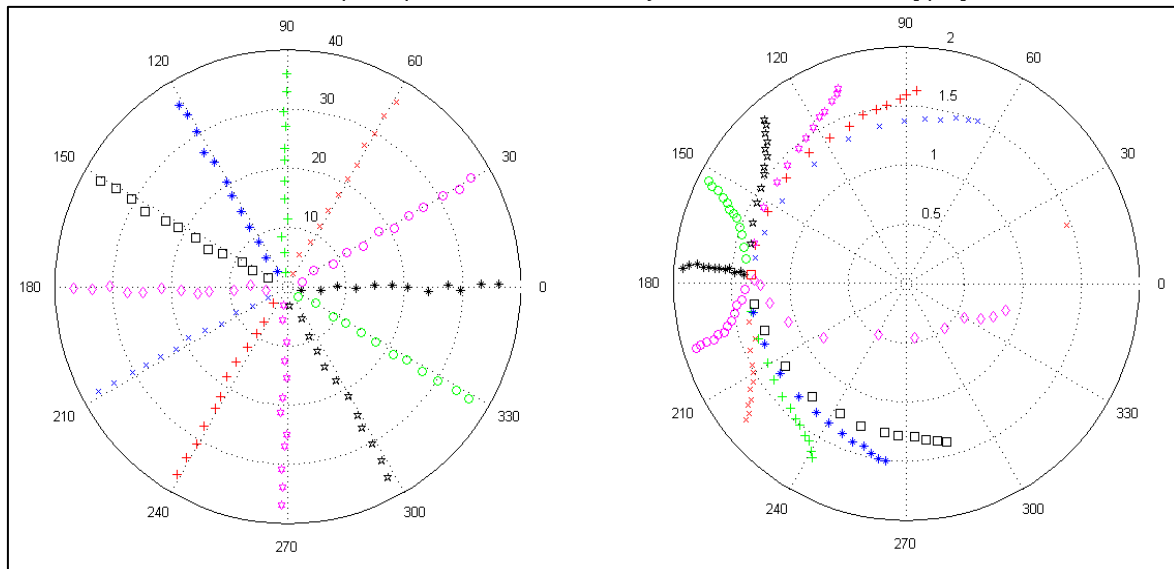
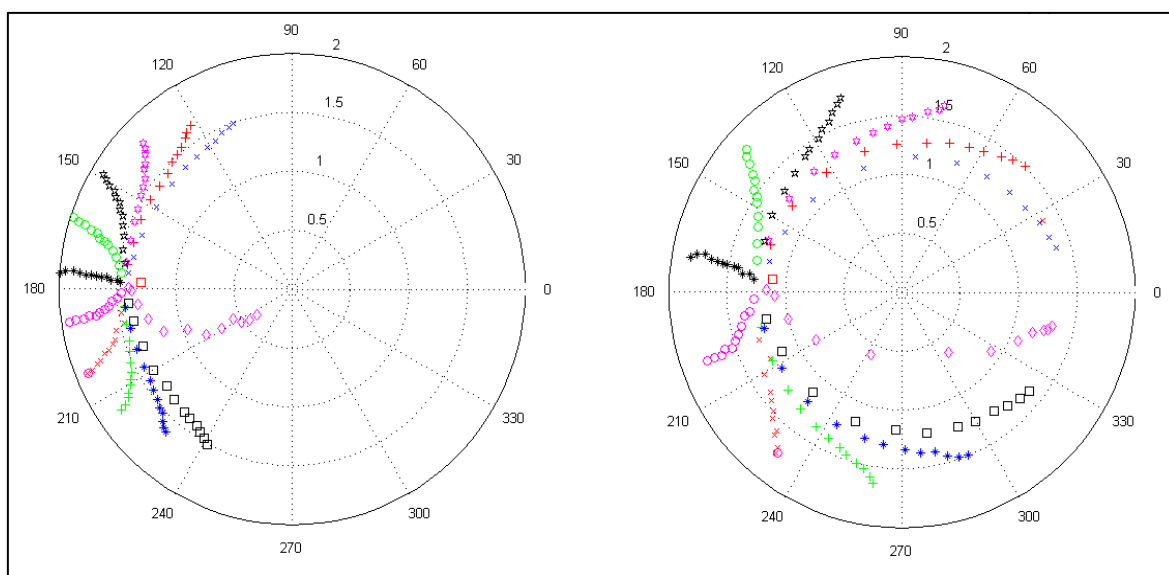


Figura 31. Respuesta en corriente para tercero (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en quinto armónico. Motor jaula de ardilla V1_1700 [rpm].



- Séptimo armónico

Figura 32. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en séptimo armónico, (b) con respuesta en corriente para séptimo armónico. Motor jaula de ardilla V1_1700 [rpm].

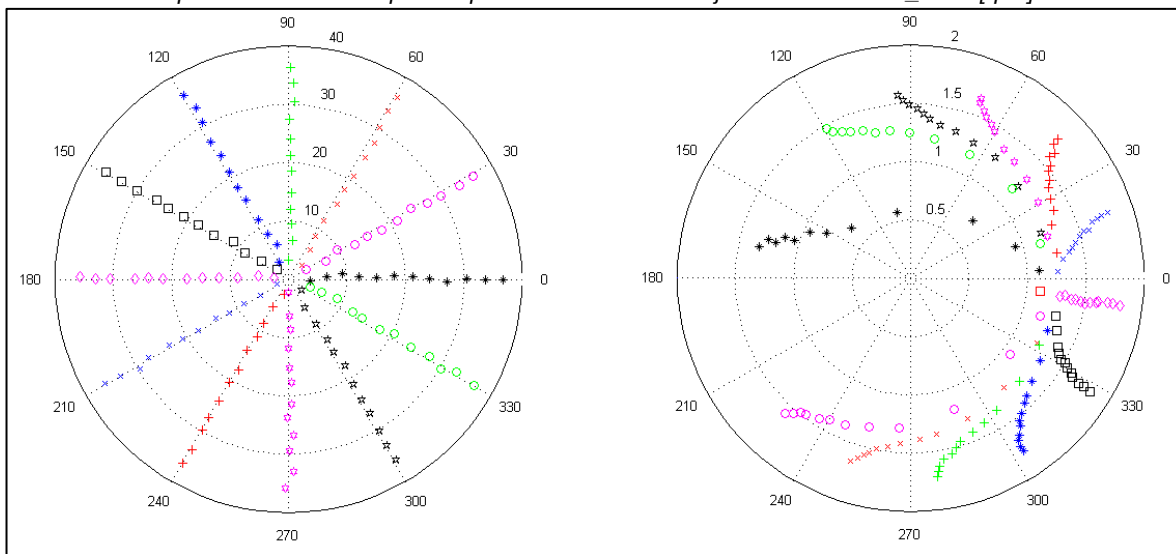
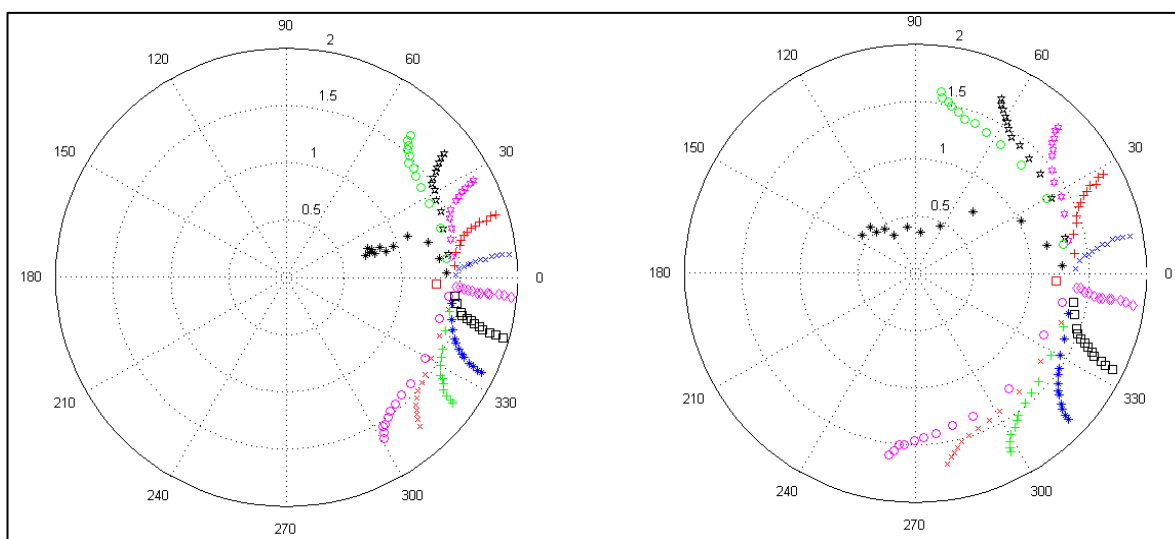


Figura 33. Respuesta en corriente para tercero (a) y quinto armónico (b), con señal distorsionada de tensión en séptimo armónico. Motor jaula de ardilla V1_1700 [rpm].



6.2.2.1 Índice de auto-sensibilidad, sensibilidad cruzada (Matriz de admitancias), linealidad y asimetría

Tabla 10. Índice de sensibilidad para motor jaula de ardilla V1_1700 [rpm], unidades [mS].

Tabla 16. Índice de sensibilidad para motor jaula de araña V1_160 [rpm], unidades [m/s].				
Carga		Índice de sensibilidad		
Vd_1_V60_motor_jaula		3	5	7
	3	17,17	25,11	24,27
	5	25,72	36,23	44,06
	7	22,08	33,26	44,26

Figura 34. Intensidad de índice de sensibilidad para motor jaula de ardilla V1_1700 [rpm].

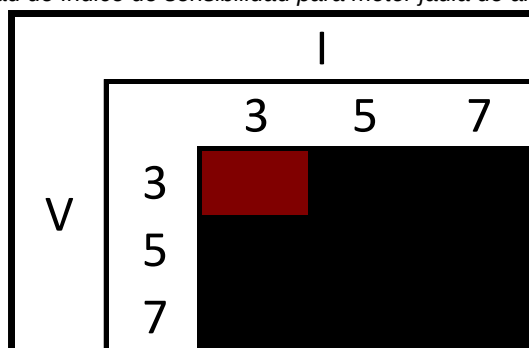


Tabla 11. Índice de linealidad para el motor jaula de ardilla V1_1700 [rpm], adimensional.



Índice de linealidad			
	3	5	7
3	0,61	0,40	0,21
5	0,57	0,90	0,21
7	0,72	0,53	0,38

Tabla 12. Índice de asimetría para el motor jaula de ardilla V1_1700 [rpm], adimensional.

Índice de asimetría _Mag			
	3	5	7
3	0,41	0,48	0,51
5	0,79	0,68	1,05
7	0,52	0,58	0,60
Índice de asimetría _Ang			
	3	5	7
3	1,19	1,24	1,24
5	1,18	1,09	1,09
7	1,11	0,96	0,96

En la gráfica Fingerprint se observa una gran distorsión armónica para el experimento con variador de velocidad, no solo se presenta auto-sensibilidad Figura 28, Figura 30 y Figura 32; sino que también existe referencia cruzada Figura 29, Figura 31 y Figura 33 para todos los órdenes armónicos (3, 5, 7 armónico). Hay que aclarar que el variador de velocidad está configurado para hacer girar el motor a velocidad nominal 1700 rpm.

La Figura 34 indica alta sensibilidad para todos los elementos que conforman la matriz. La linealidad es alta para la posición de 5-5 Tabla 11. A continuación, se presenta su respectiva matriz aproximada.

$$[Y] = \begin{Bmatrix} 17 & 26 & 22 \\ 25 & 36 & 33 \\ 24 & 44 & 44 \end{Bmatrix} [mS]$$

6.2.3 Motor de inducción jaula de ardilla con variador Eurotherm, velocidad 1352 [rpm], respuesta en corriente para 3, 5 y 7 armónico.

- Tercer armónico

Figura 35.(a) Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónico. Motor jaula de ardilla V1_1352 [rpm].

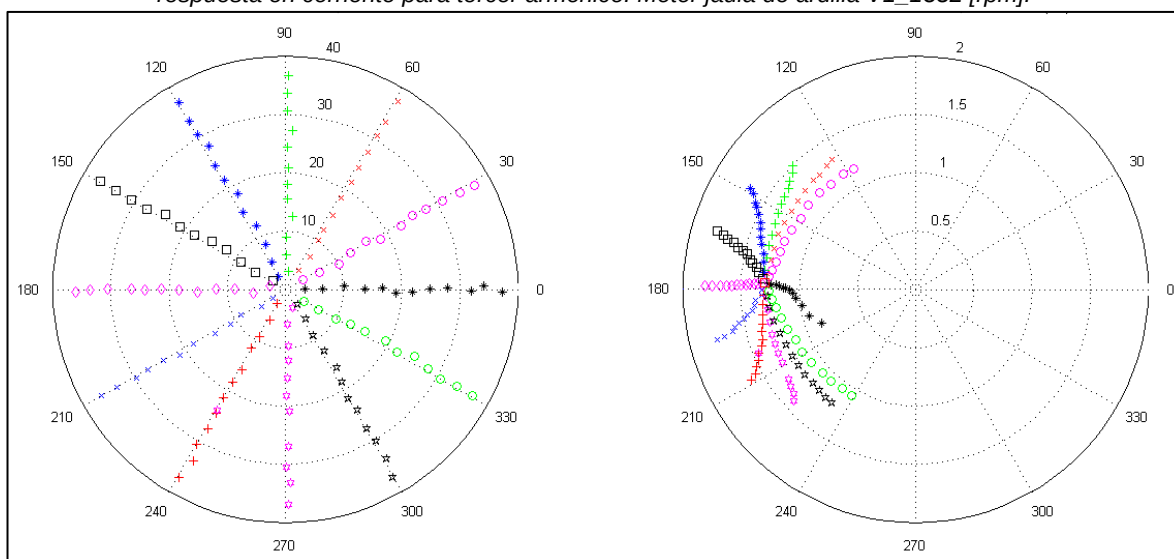
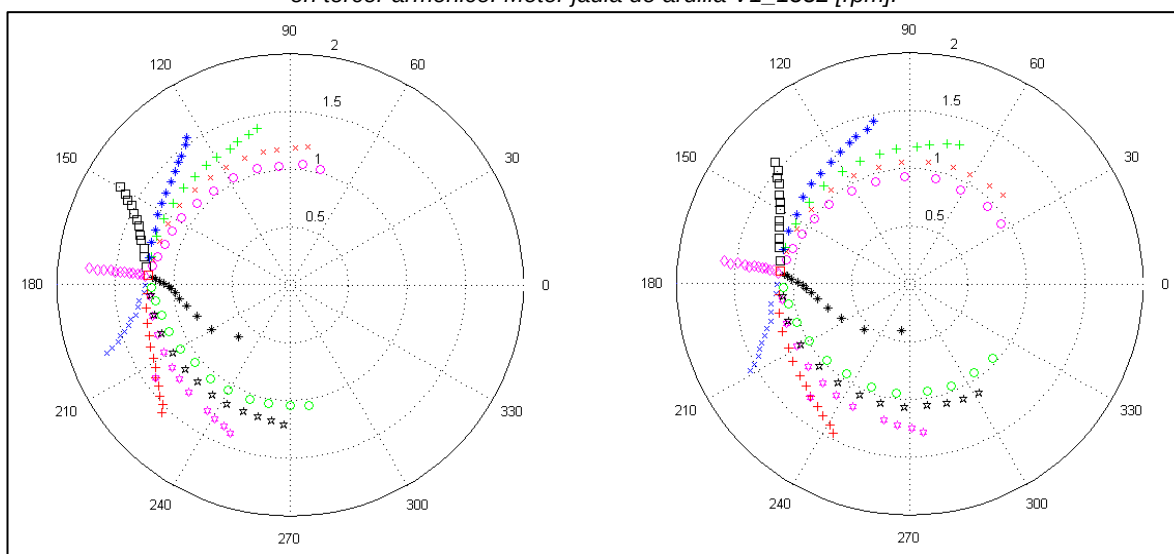


Figura 36.Respuesta en corriente para quinto (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en tercer armónico. Motor jaula de ardilla V1_1352 [rpm].



- Quinto armónico

Figura 37. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en quinto armónico, (b) con respuesta en corriente para quinto armónico. Motor jaula de ardilla V1_1352 [rpm].

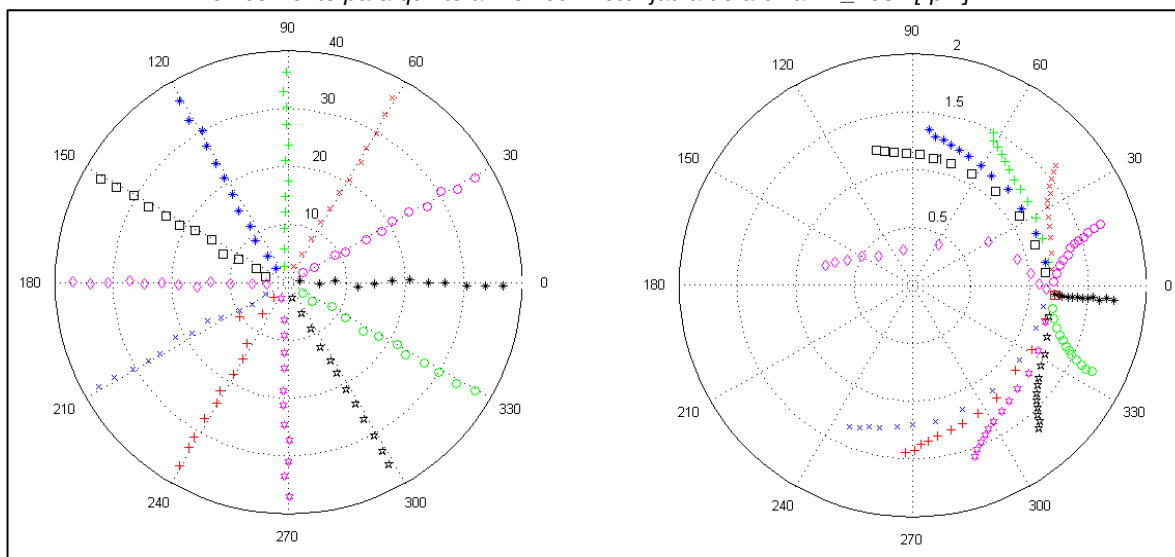
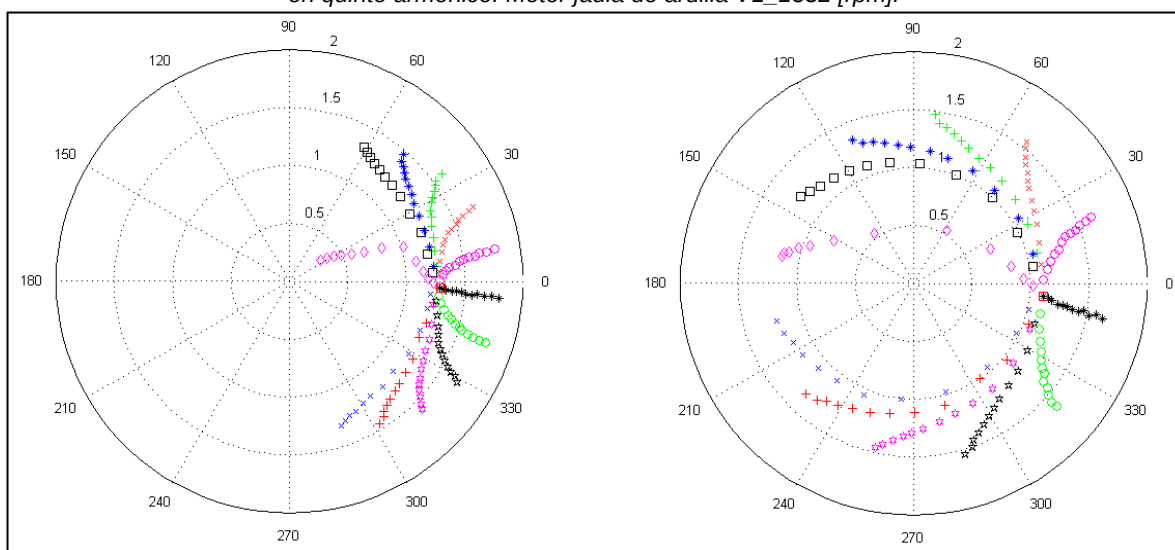


Figura 38. Respuesta en corriente para tercero (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en quinto armónico. Motor jaula de ardilla V1_1352 [rpm].



- Séptimo armónico

Figura 39. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en séptimo armónico, (b) con respuesta en corriente para séptimo armónico. Motor jaula de ardilla V1_1352 [rpm].

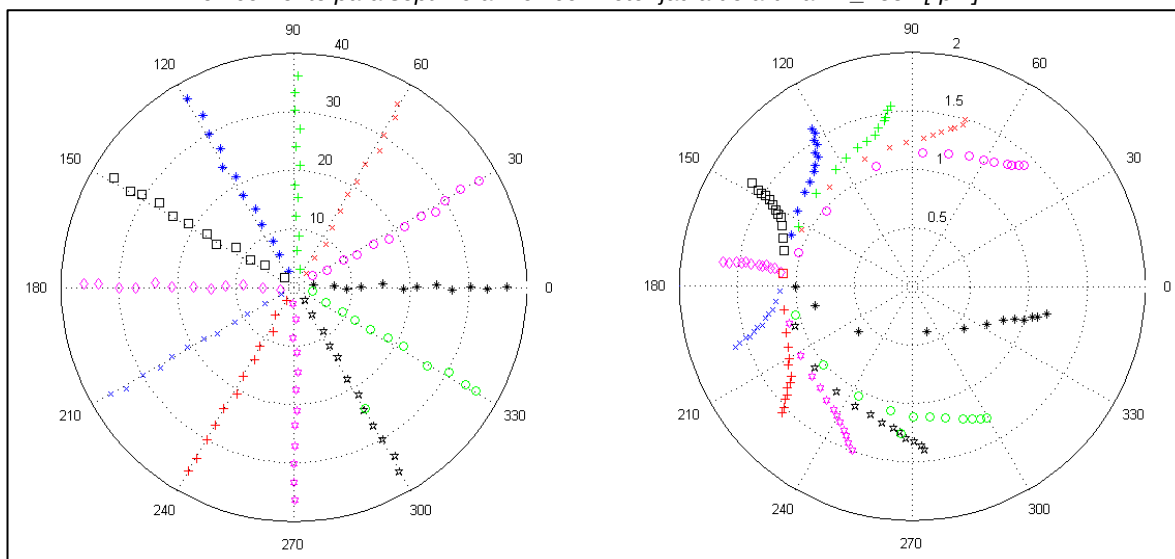
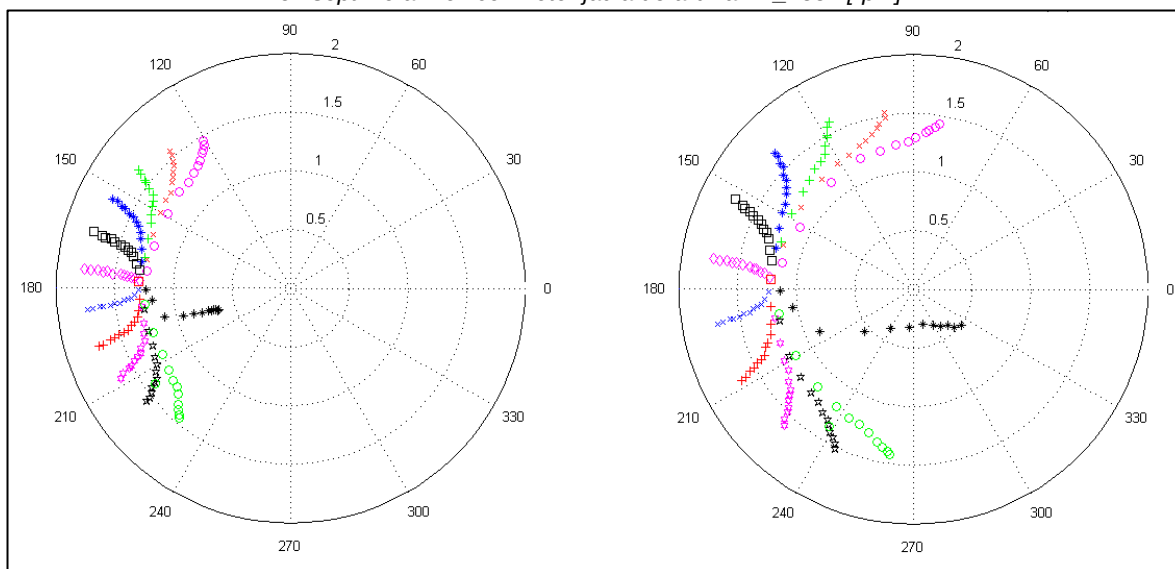


Figura 40. Respuesta en corriente para tercero (a) y quinto armónico (b), con señal distorsionada de tensión en séptimo armónico. Motor jaula de ardilla V1_1352 [rpm].





6.2.3.1 Índice de auto-sensibilidad, sensibilidad cruzada (Matriz de admitancias), linealidad y asimetría.

Tabla 13. Índice de sensibilidad para el motor jaula de ardilla V1_1352 [rpm], unidades [mS].

Carga		Índice de sensibilidad		
		3	5	7
Vd_1_V47,7_motor_jaula	3	14,26	21,24	21,10
	5	23,16	32,26	39,12
	7	20,00	30,05	39,85

Figura 41. Intensidad de índice de sensibilidad para motor jaula de ardilla V1_1352 [rpm].

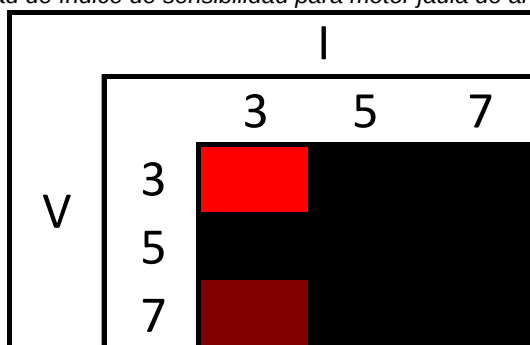


Tabla 14. Índice de linealidad para motor jaula de ardilla V1_1352 [rpm], adimensional.

		Índice de linealidad		
		3	5	7
3		0,97	0,91	0,82
5		0,93	0,92	0,89
7		0,89	0,92	0,93

Tabla 15. Índice de asimetría para motor jaula de ardilla V1_1352 [rpm], adimensional.

		Índice de asimetría _Mag		
		3	5	7
3		0,42	0,48	0,53
5		0,52	0,60	0,60
7		0,64	0,68	0,71
		Índice de asimetría _Ang		
		3	5	7
3		0,85	1,07	1,07
5		1,18	1,18	1,18
7		1,14	1,10	1,10



El siguiente experimento es exactamente igual al anterior, solo que aquí el variador de velocidad está configurado para hacer girar al motor una velocidad diferente de la nominal, en este caso 1352 rpm.

Al igual que el experimento anterior también se ve que la carga genera gran distorsión armónica en corriente Figura 35, Figura 37, Figura 39 y que de igual forma presenta sensibilidad cruzada Figura 36, Figura 38, Figura 40. Aunque gráficamente la diferencia de la distorsión armónica en corriente entre el variador configurado a 1700 rpm y 1352 rpm presenta pocas diferencias, los índices revelan una mayor aproximación del comportamiento de la distorsión para el segundo caso.

Para el variador Eurotherm configurado a 1352 rpm, hay mayor linealidad, y mayor asimetría de magnitud y de fase que para el variador Eurotherm configurado a 1700 rpm.

La Figura 41 muestra la alta sensibilidad que tienen los elementos en conjunto de la matriz, así como una buena linealidad para los elementos de la diagonal principal Tabla 14.

$$[Y] = \begin{Bmatrix} 14 & 23 & 20 \\ 21 & 32 & 30 \\ 21 & 39 & 40 \end{Bmatrix} [mS]$$

6.2.4 Motor de inducción jaula de ardilla con variador Schneider, velocidad 1700 [rpm], respuesta en corriente para 3,5 y 7 armónico

- Tercer armónico

Figura 42. (a) Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónico. Motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm].

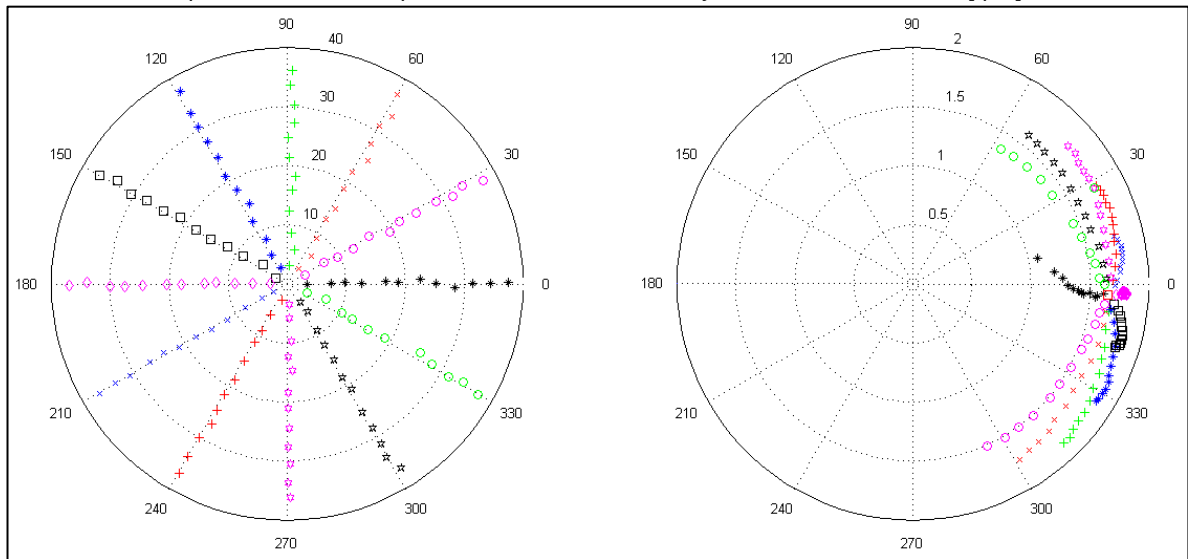
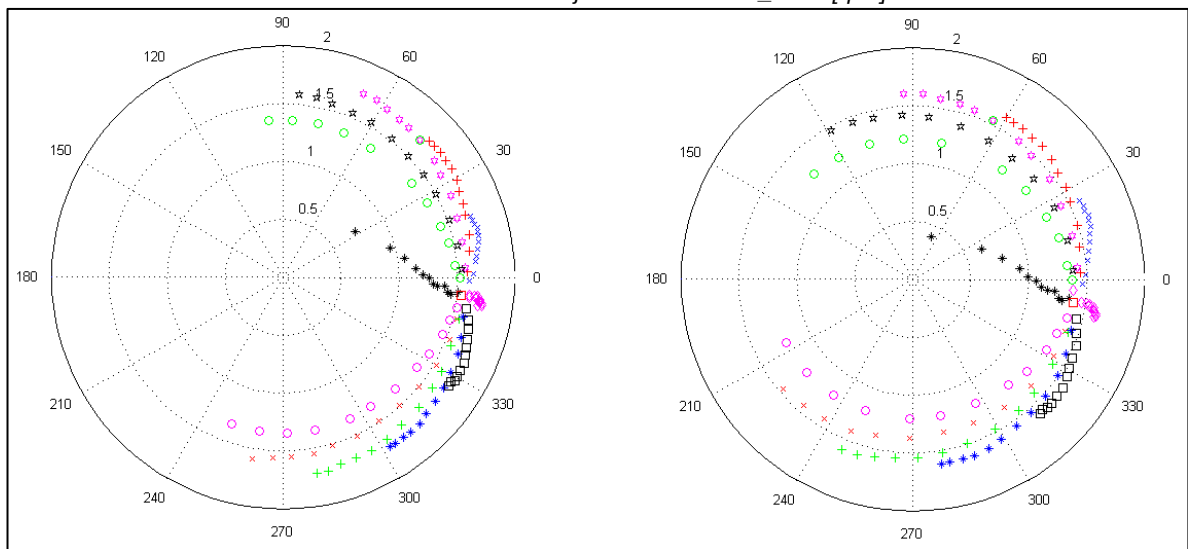


Figura 43. Respuesta en corriente para quinto (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en tercer armónico. Motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm].



Fuente autor.

- Quinto armónico

Figura 44. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en quinto armónico, (b) con respuesta en corriente para quinto armónico. Motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm].

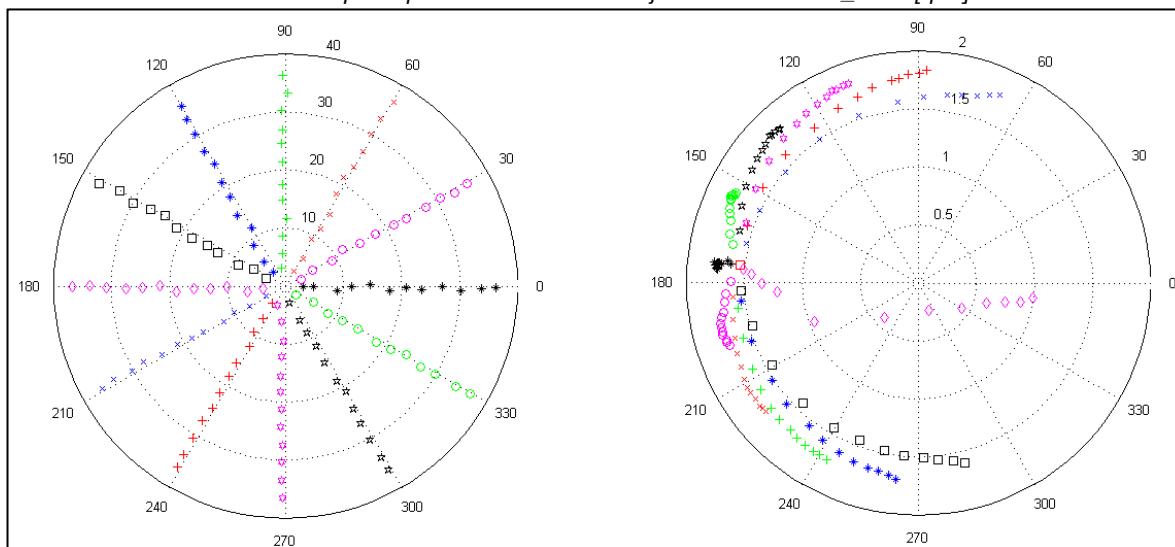
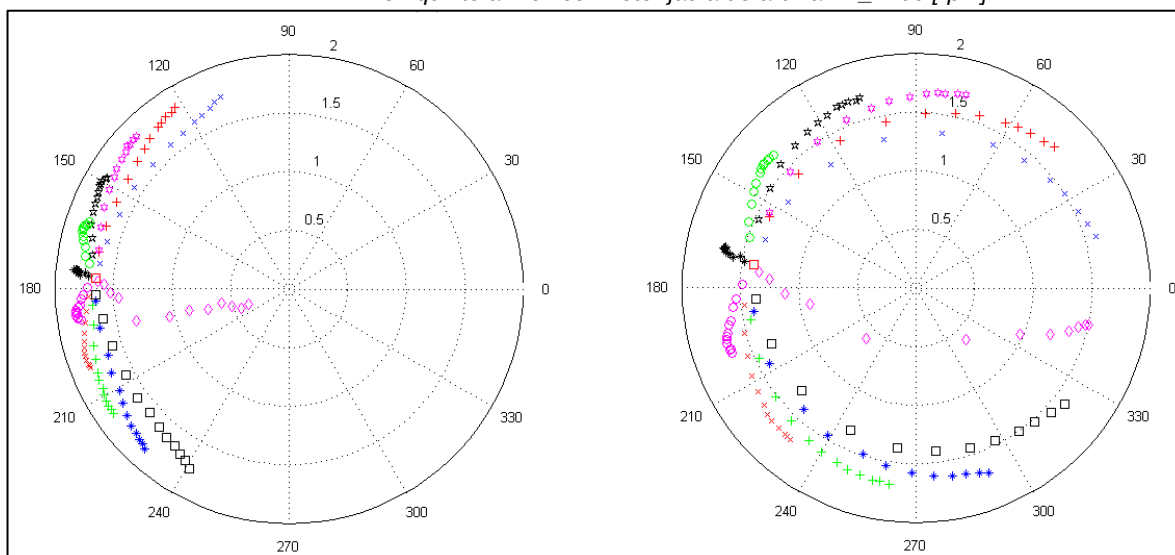
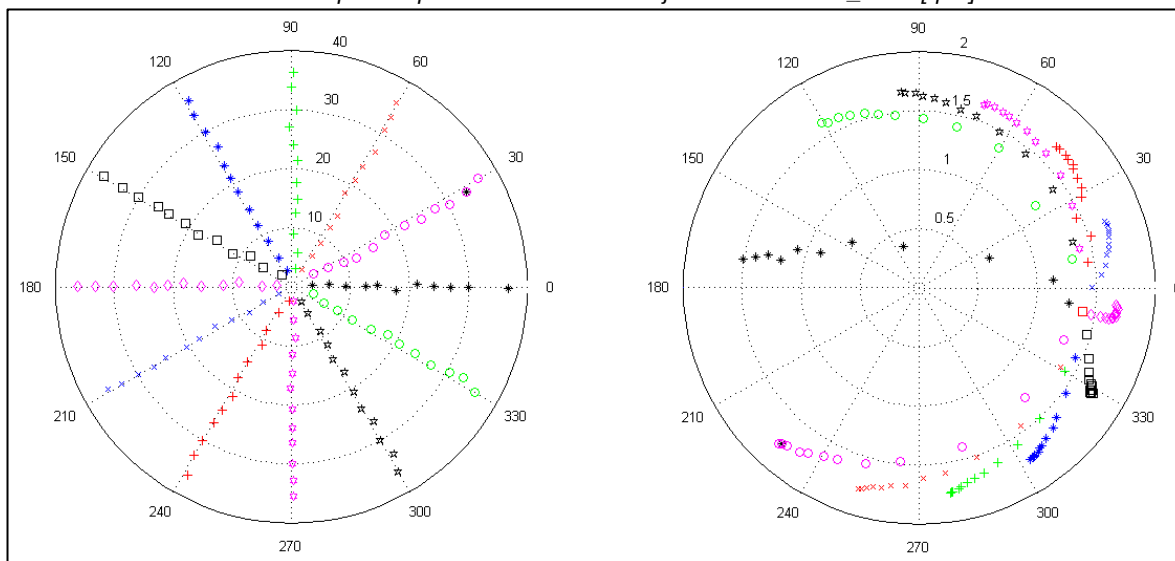


Figura 45. Respuesta en corriente para tercero (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en quinto armónico. Motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm].



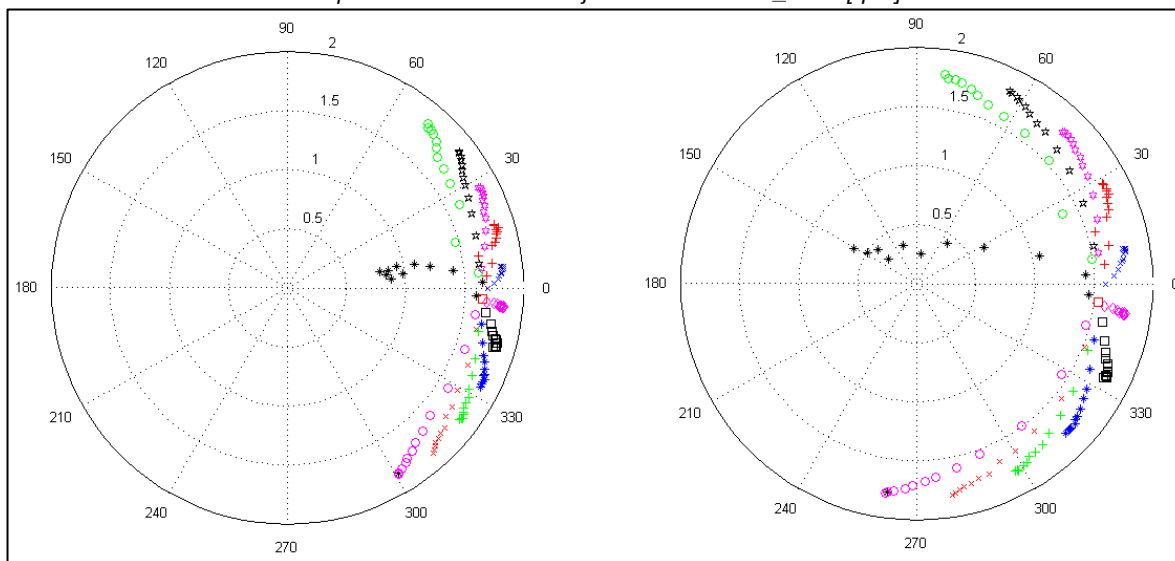
- Séptimo armónico

Figura 46. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en séptimo armónico, (b) con respuesta en corriente para séptimo armónico. Motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm].



Fuente autor.

Figura 47. Respuesta en corriente para tercero (a) y quinto armónico (b), con señal distorsionada de tensión en séptimo armónico. Motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm].



6.2.4.1 Índice de auto-sensibilidad, sensibilidad cruzada (Matriz de admitancias), linealidad y asimetría.



Tabla 16. Índice de sensibilidad para motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm], unidades [mS].

Carga		Índice de sensibilidad		
		3	5	7
Vd_2_V60_motor_jaula	3	14,37	24,11	24,24
	5	23,92	35,64	45,33
	7	21,93	36,14	44,03

Figura 48. Intensidad de índice de sensibilidad para motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm].

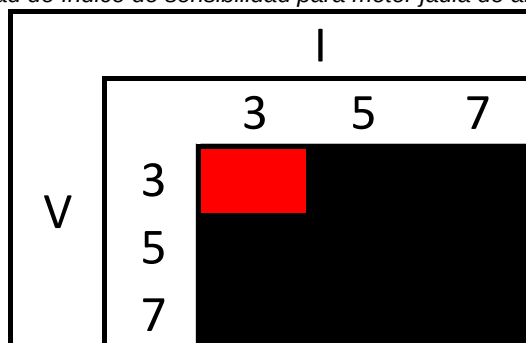


Tabla 17. Índice de linealidad para el motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm], adimensional.

Índice de linealidad			
	3	5	7
3	0,89	0,90	0,81
5	0,89	0,92	0,83
7	0,81	0,90	0,86

Tabla 18. Índice de asimetría para motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm], adimensional.

Índice de asimetría _Mag			
	3	5	7
3	0,69	0,67	0,63
5	0,68	0,72	0,68
7	0,67	0,74	0,75
Índice de asimetría _Ang			
	3	5	7
3	0,95	1,07	1,07
5	1,10	1,07	1,07
7	1,10	1,07	1,07



$$[Y] = \begin{Bmatrix} 14 & 24 & 22 \\ 24 & 36 & 36 \\ 24 & 46 & 44 \end{Bmatrix} [mS]$$

La respuesta en corriente para la señal fundamental en este experimento tiene alta distorsión armónica para el caso de 3, 5 y 7 como se puede observar en las Figura 42, Figura 44, Figura 46. Se da interferencia cruzada para los tres casos de órdenes armónicos, con aproximadamente igual intensidades de corriente respecto de la fundamental.

Se presentan linealidades cercanas a 0,92 en respuesta a tercer armónico para las posiciones 3-5, 5-5, 7-5 Tabla 17. Las gráficas de respuesta cruzada Figura 43, Figura 45, Figura 47 sugieren que la carga es de comportamiento no lineal, además de no arrojar linealidades muy cercanas a 1 como se esperaría de una carga con comportamiento lineal.

Se realizó el mismo experimento, donde se conservó el variador, la velocidad de 1700 [rpm], pero la medición se realizó para la mitad de los datos o sea para un barrido hasta 12% en magnitud pero con pasos de 2% y los mismos ángulos de fase del experimento anterior, esto con el fin de probar si es necesario tomar un rango de datos tan cercanos como lo hacen en [8], para indagar acerca de los índices y de la matriz de admitancias para el modelo aproximado propuesto para la carga. Los resultados son los siguientes:

En la Figura 49 y Figura 50, se muestra el barrido con pasos de 2% para el tercer armónico.

Figura 49. Barrido de 2% en tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónico. Motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm].

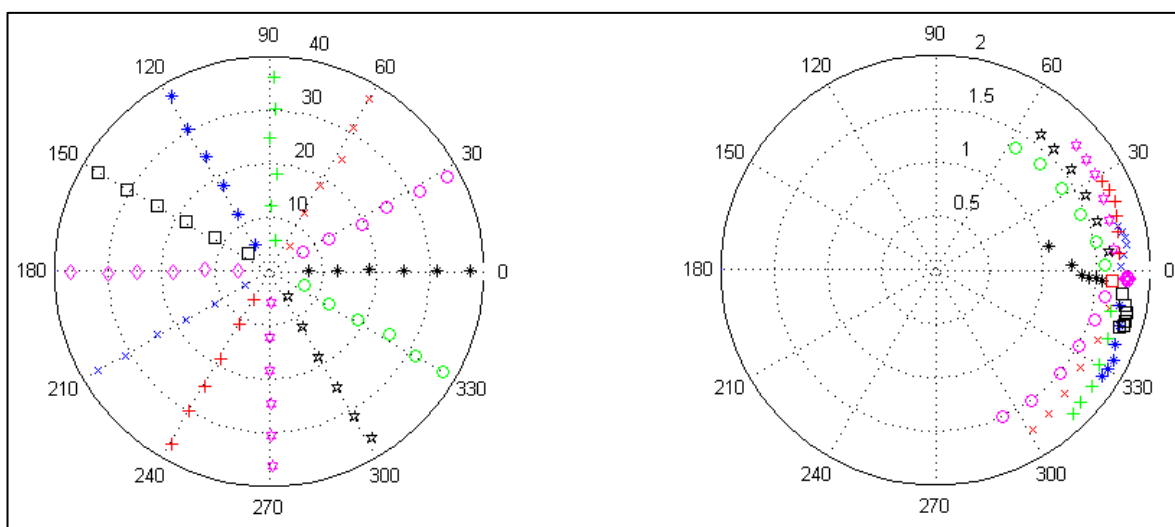


Figura 50. Respuesta en corriente para quinto (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en tercer armónico, barrido 2%. Motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm].

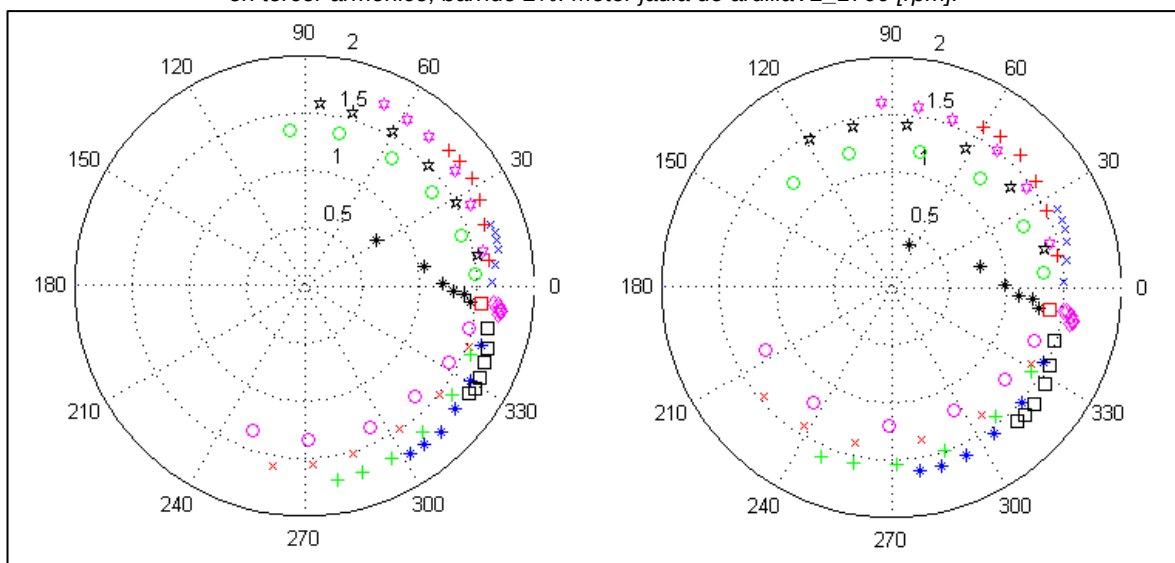


Tabla 19. Índice de sensibilidad para motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm] barrido de a 2%, unidades [mS].

Carga	Índice de sensibilidad			
		3	5	7
b_2% Vd_2_V60_motor_jaula	3	15,22	24,72	24,80
	5	24,52	36,20	45,72
	7	20,62	33,02	45,26

Tabla 20. Índice de linealidad para motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm] barrido de a 2%, adimensional.

Índice de linealidad



	3	5	7
3	0,94	0,91	0,82
5	0,93	0,92	0,86
7	0,91	0,94	0,90

Figura 51. Intensidad de índice de sensibilidad para motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm] barrido de a 2%.

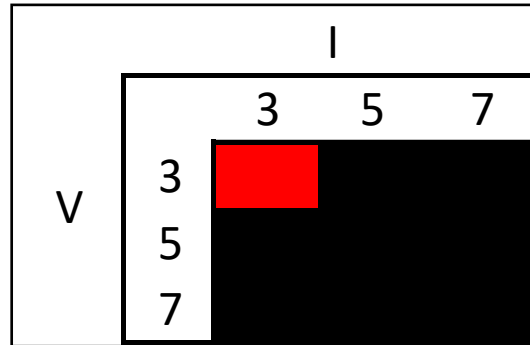


Tabla 21. Índice de asimetría para motor jaula de ardilla V2_1700 [rpm] barrido de a 2%, adimensional.

Índice de asimetría _Mag			
	3	5	7
3	0,62	0,629	0,62
5	0,68	0,74	0,69
7	0,60	0,67	0,67
Índice de asimetría _Ang			
	3	5	7
3	0,97	1,07	1,07
5	1,16	1,02	1,02
7	1,11	0,93	0,93

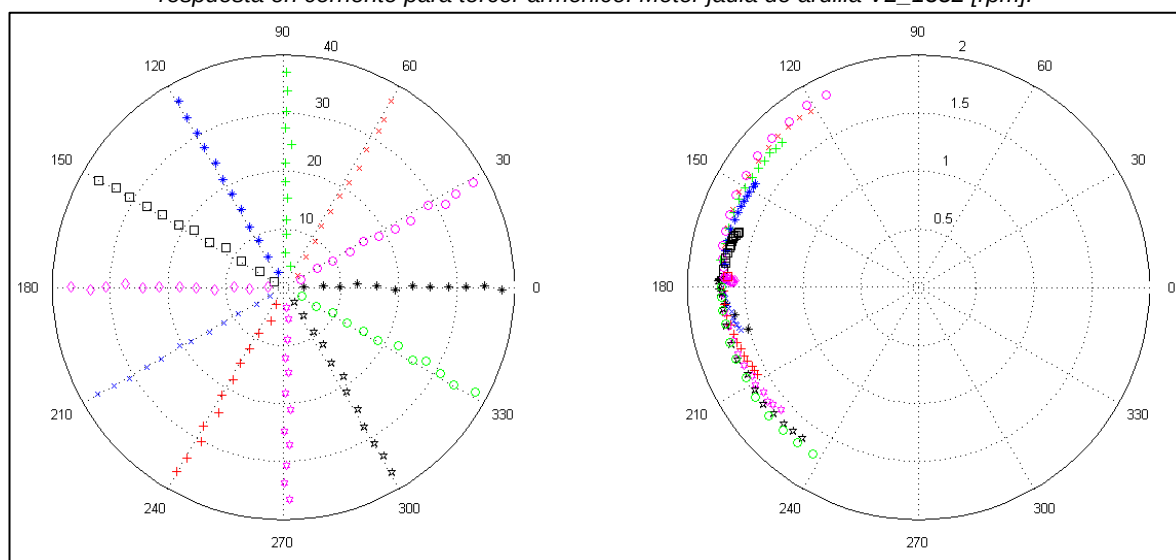
$$[Y] = \begin{Bmatrix} 15 & 25 & 21 \\ 25 & 36 & 33 \\ 25 & 46 & 45 \end{Bmatrix} [mS]$$

Haciendo una comparación de los datos obtenidos para esta segunda prueba con los obtenidos en el experimento base, vemos como un barrido de tensión de un 2% en magnitud, también provee una muy buena información acerca de los elementos que deben conformar la matriz de admitancias a través del cálculo y análisis de los datos. Con números aproximadamente iguales, por ejemplo las tablas de sensibilidad Tabla 16 y Tabla 19.

6.2.5 Motor de inducción jaula de ardilla con variador Schneider, velocidad 1352 [rpm], respuesta en corriente para 3, 5 y 7 armónico.

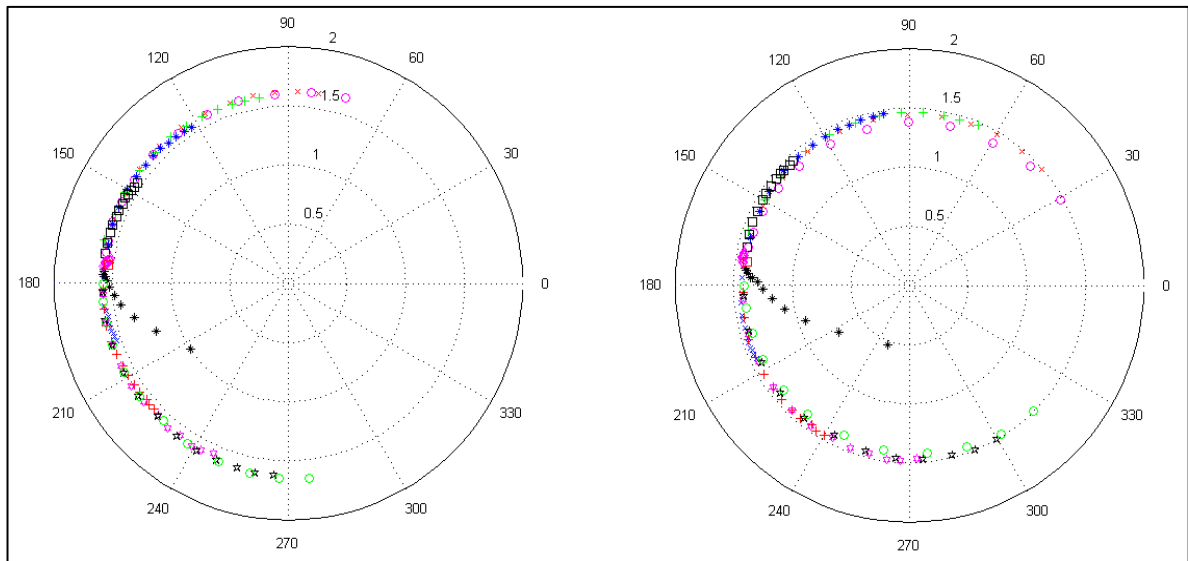
- Tercer armónico

Figura 52.(a) Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónico. Motor jaula de ardilla V2_1352 [rpm].



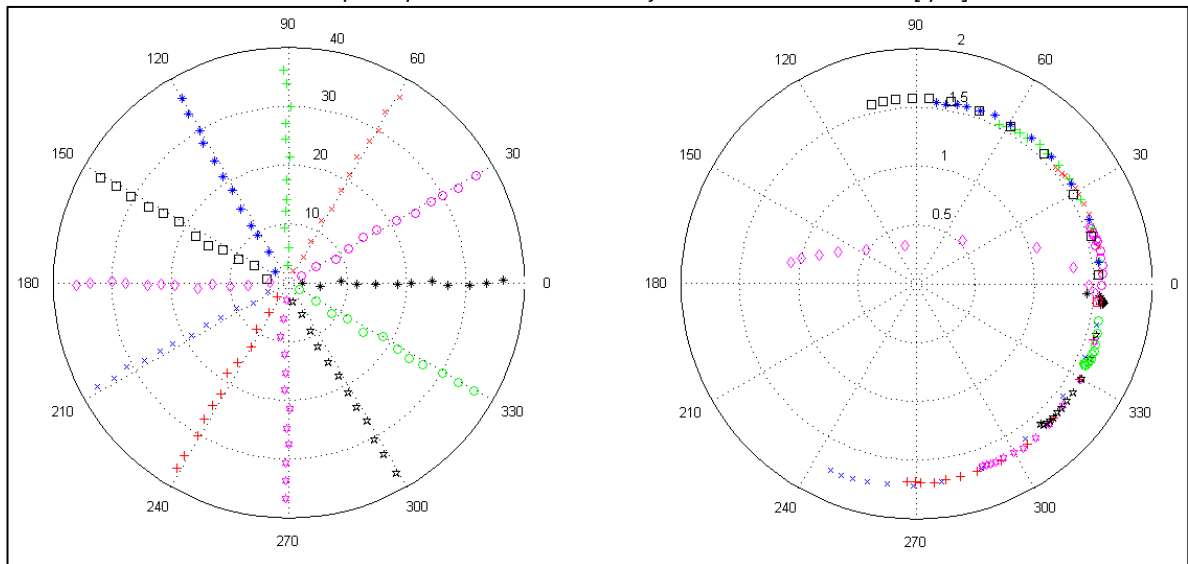
Fuente autor.

Figura 53. Respuesta en corriente para quinto (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en tercer armónico. Motor jaula de ardilla V2_1352 [rpm].



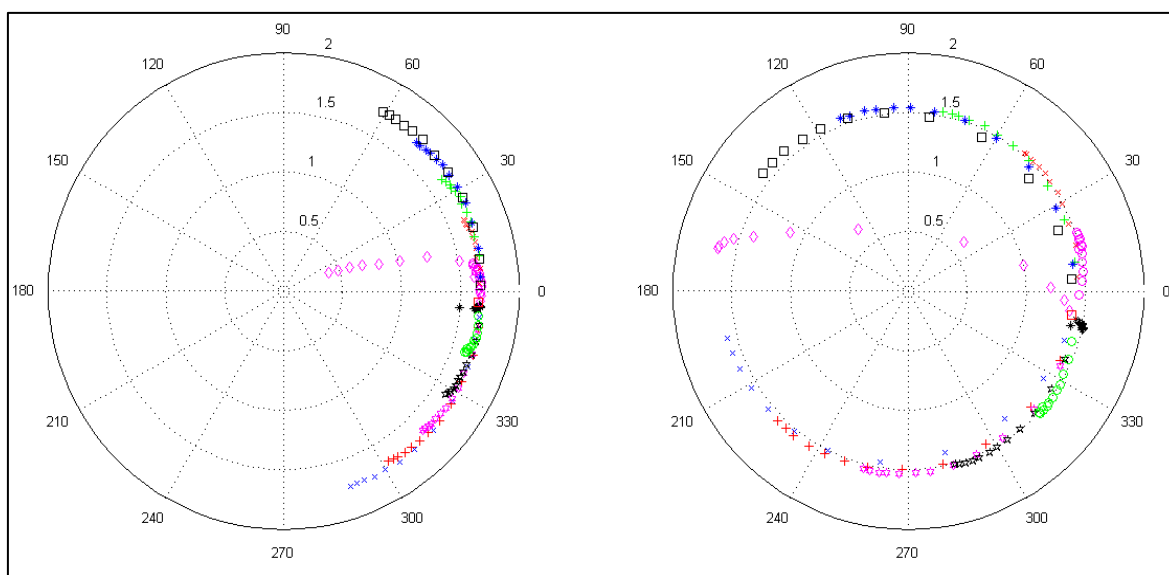
- Quinto armónico

Figura 54. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en quinto armónico, (b) con respuesta en corriente para quinto armónico. Motor jaula de ardilla V2_1352 [rpm].



Fuente autor.

Figura 55. Respuesta en corriente para tercero (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en quinto armónico. Motor jaula de ardilla V2_1352 [rpm].



- Séptimo armónico

Figura 56. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en séptimo armónico, (b) con respuesta en corriente para séptimo armónico. Motor jaula de ardilla V2_1352 [rpm].

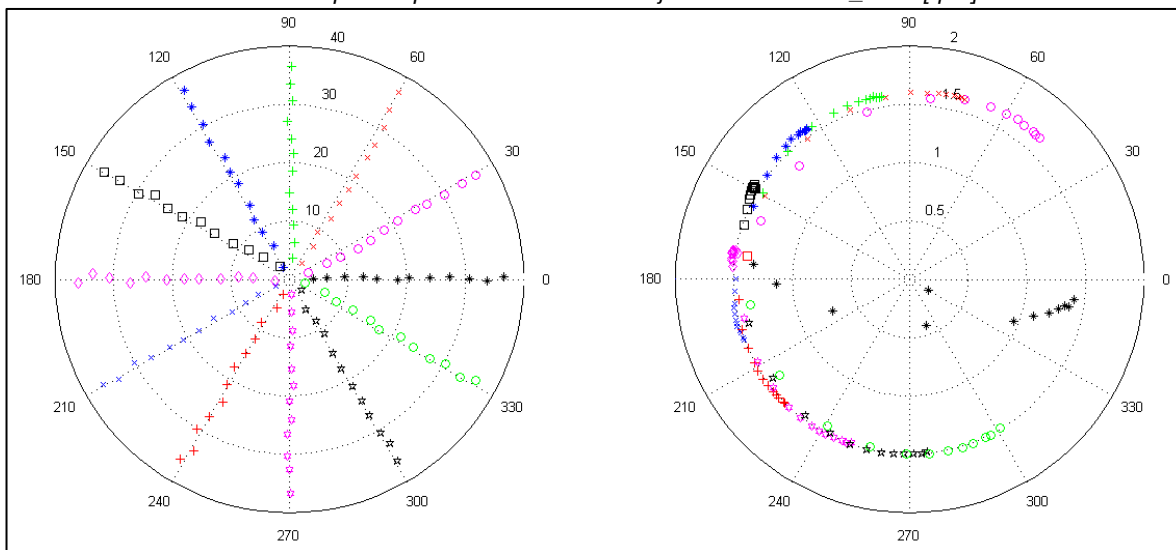
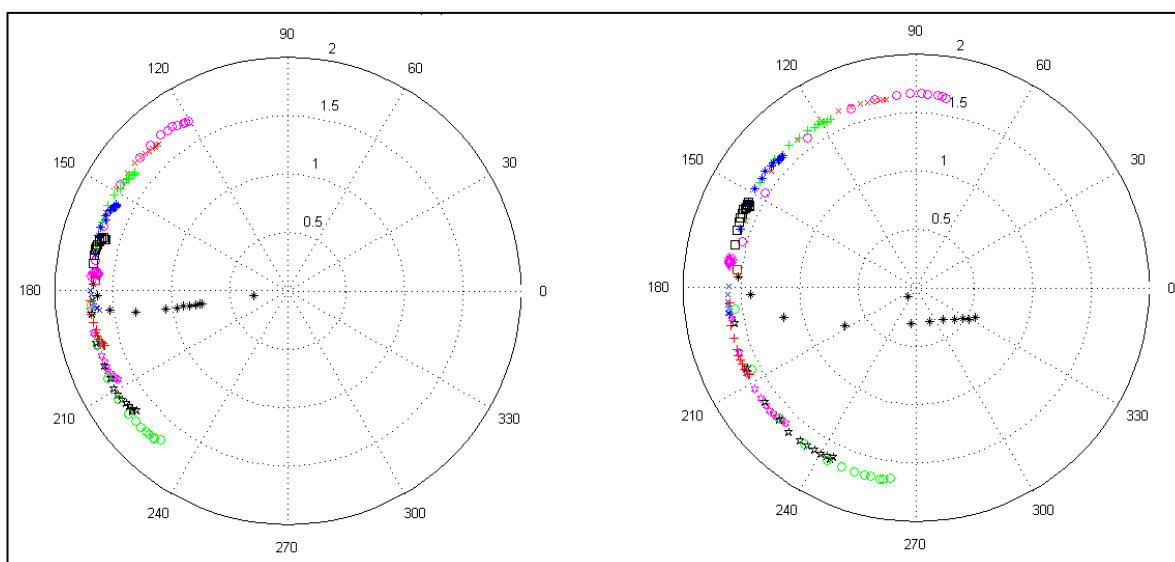


Figura 57. Respuesta en corriente para tercero (a) y quinto armónico (b), con señal distorsionada de tensión en séptimo armónico. Motor jaula de ardilla V2_1352 [rpm].



6.2.5.1 Índice de auto-sensibilidad, sensibilidad cruzada (Matriz de admitancias), linealidad y asimetría.

Tabla 22. Índice de sensibilidad para el motor jaula de ardilla V2_1352 [rpm], unidades [mS].

Carga	Índice de sensibilidad			
Vd_2_V47,7_motor_jaula		3	5	7
	3	8,88	26,90	33,14
	5	15,50	29,67	42,58
	7	12,72	25,74	39,28

Figura 58. Intensidad de índice de sensibilidad para motor jaula de ardilla V2_1352 [rpm].

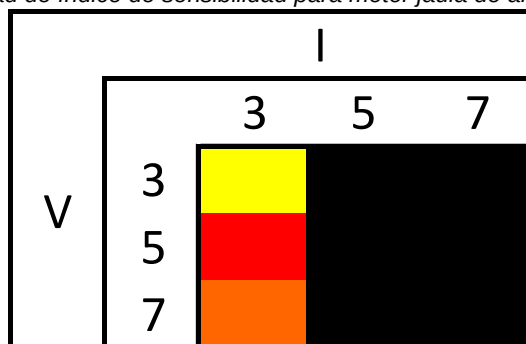


Tabla 23. Índice de linealidad para el motor jaula de ardilla V2_1352 [rpm], adimensional.

Índice de linealidad



	3	5	7
3	0,92	0,88	0,79
5	0,86	0,87	0,79
7	0,84	0,89	0,84

Tabla 24. Índice de asimetría para motor jaula de ardilla V2_1352 [rpm], adimensional.

Índice de asimetría _Mag			
	3	5	7
3	0,72	0,71	0,70
5	0,76	0,77	0,77
7	0,75	0,71	0,72
Índice de asimetría _Ang			
	3	5	7
3	1,75	1,70	1,70
5	1,87	1,49	1,49
7	1,73	1,35	1,35

Al igual que el experimento con el variador Eurotherm, para el variador Schneider también se midieron dos velocidades. En este caso para la velocidad de 1352 [rpm] se observa también alta distorsión armónica Figura 52, Figura 54, Figura 56, al igual que sensibilidad cruzada Figura 53, Figura 55, Figura 57. Para este experimento se presenta baja linealidad Tabla 23, y asimetría de magnitud Tabla 24. La sensibilidad es alta para las posiciones 3-5, 3-7, 5-5, 5-7, 7-5, 7-7, los demás presentan baja sensibilidad Figura 58.

$$[Y] = \begin{Bmatrix} 9 & 16 & 13 \\ 27 & 30 & 26 \\ 33 & 43 & 39 \end{Bmatrix} [mS]$$

6.3 MOTOR DE INDUCCIÓN ROTOR DEVANADO

Se practicó un barrido en tensión con distorsión armónica, que va del 1% al 12% en magnitud con respecto de la señal fundamental. Además, se realizó una variación del ángulo de fase de 0° a 330° con pasos de 30°, respecto a la señal fundamental, tomando primero tercer armónico, luego quinto, y por último el séptimo.

Esto se hizo para el motor con resistencias en el arranque, para el motor conectado al variador 1 y para el motor conectado al variador 2 cada uno con dos velocidades diferentes de funcionamiento.

6.3.1 Arranque por resistencias, respuesta en corriente para 3, 5 y 7 armónico.

- Tercer armónico

Figura 59. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónico. Motor de rotor devanado.

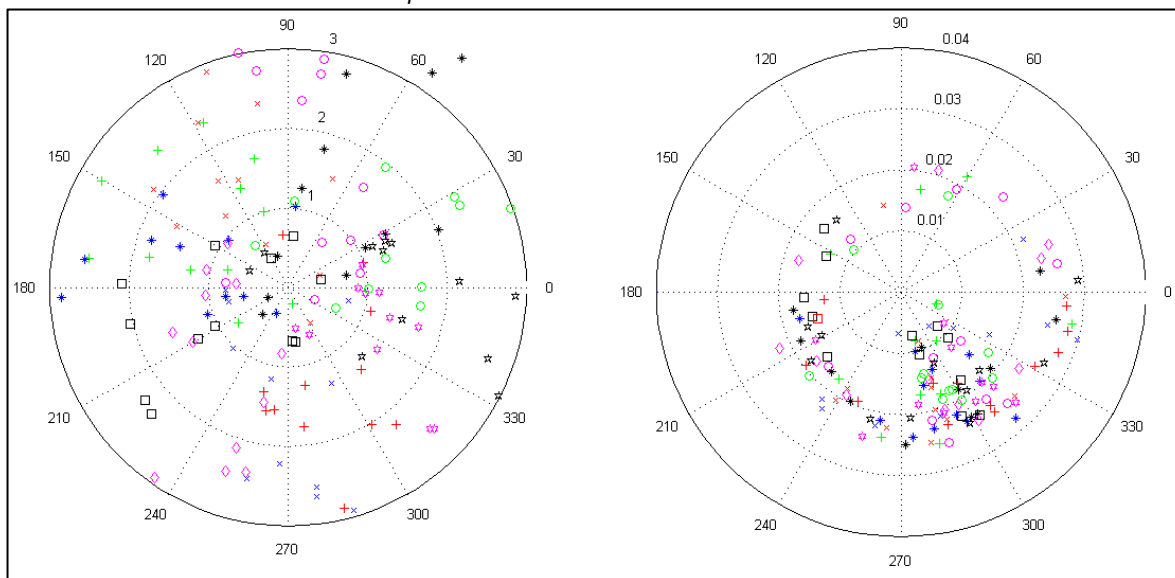
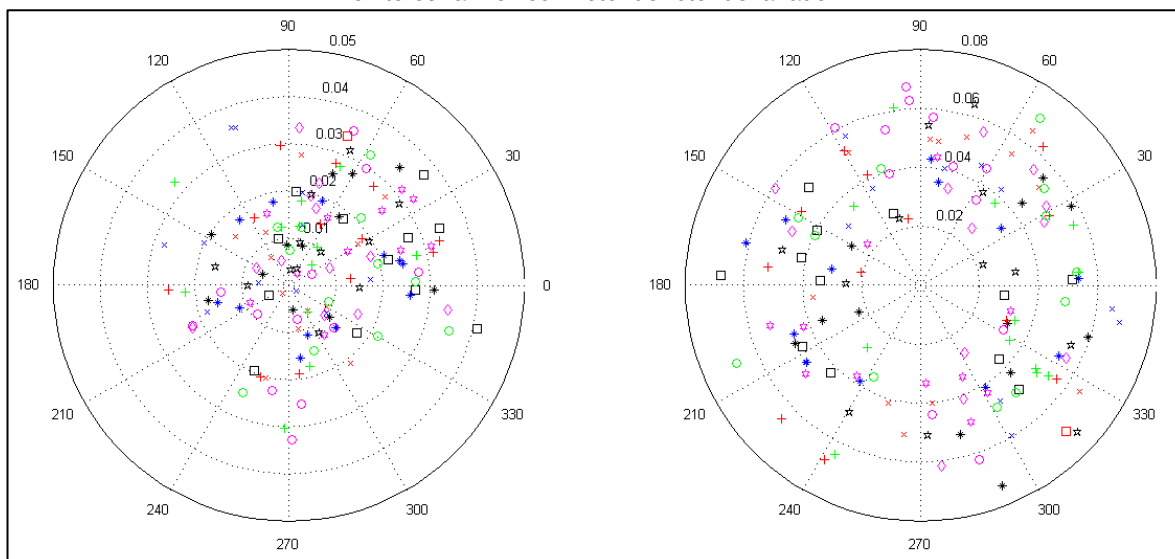


Figura 60. Respuesta en corriente para quinto (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en tercer armónico. Motor de rotor devanado.



- Quinto armónico

Figura 61. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en quinto armónico, (b) con respuesta en corriente para quinto armónico. Motor de rotor devanado.

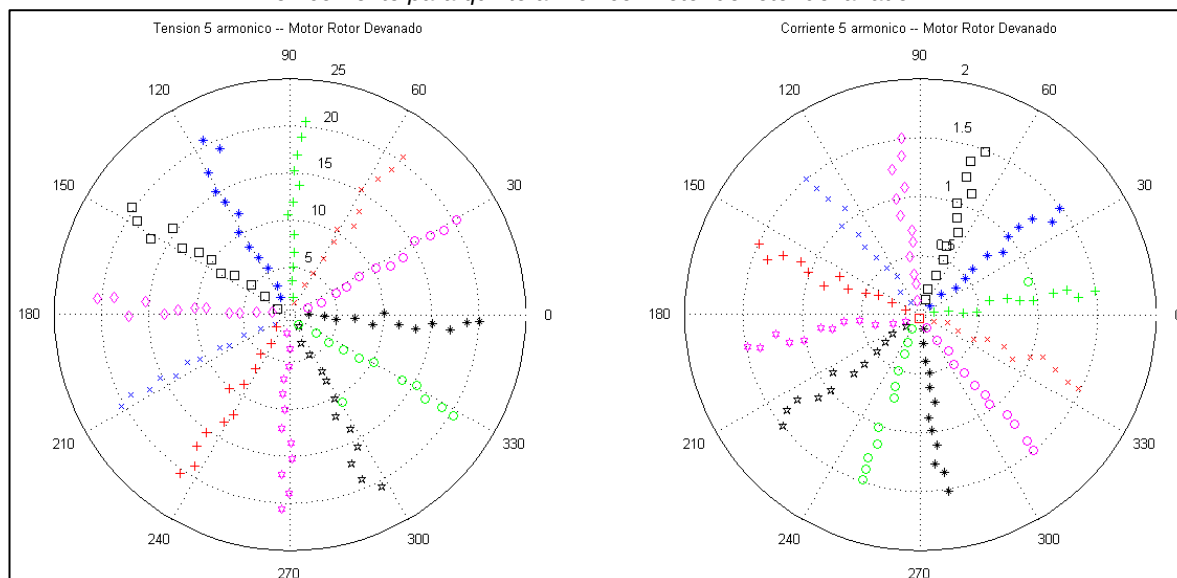
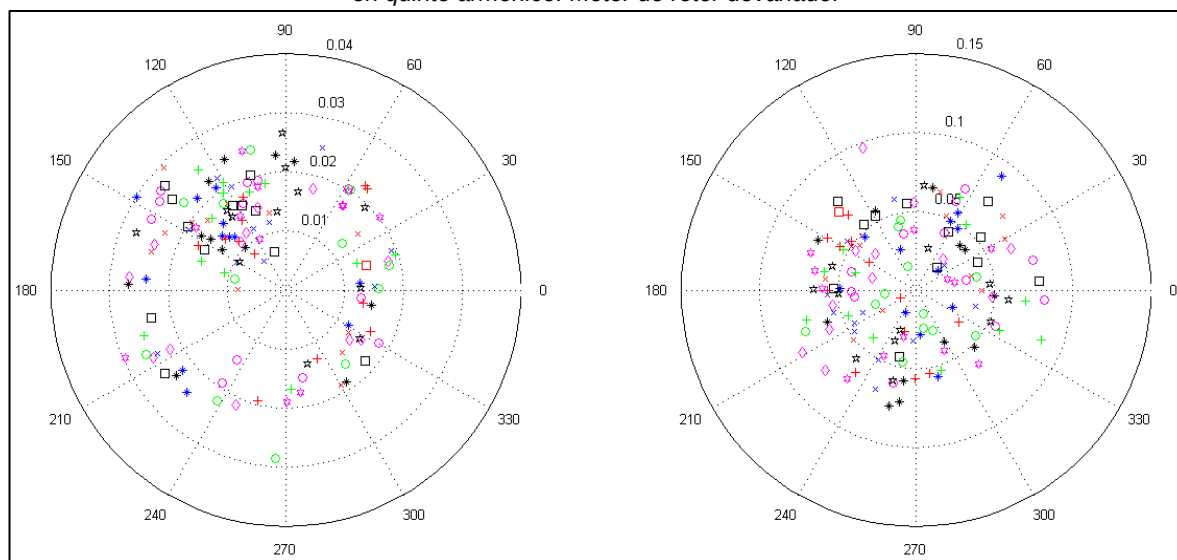


Figura 62. Respuesta en corriente para tercero (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en quinto armónico. Motor de rotor devanado.



- Séptimo armónico

Figura 63. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en séptimo armónico, (b) con respuesta en corriente para séptimo armónico. Motor de rotor devanado.

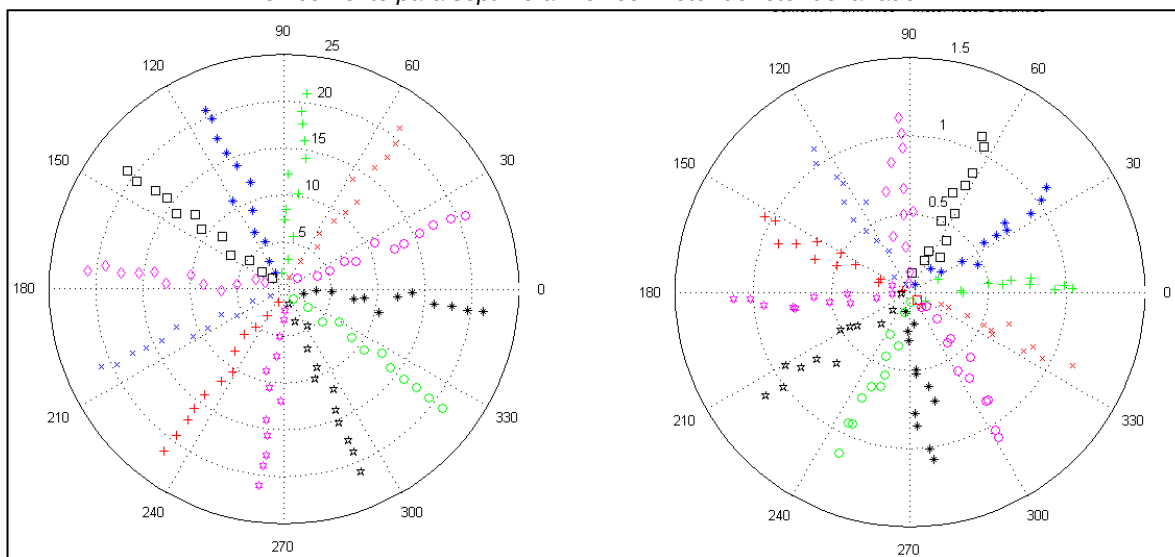
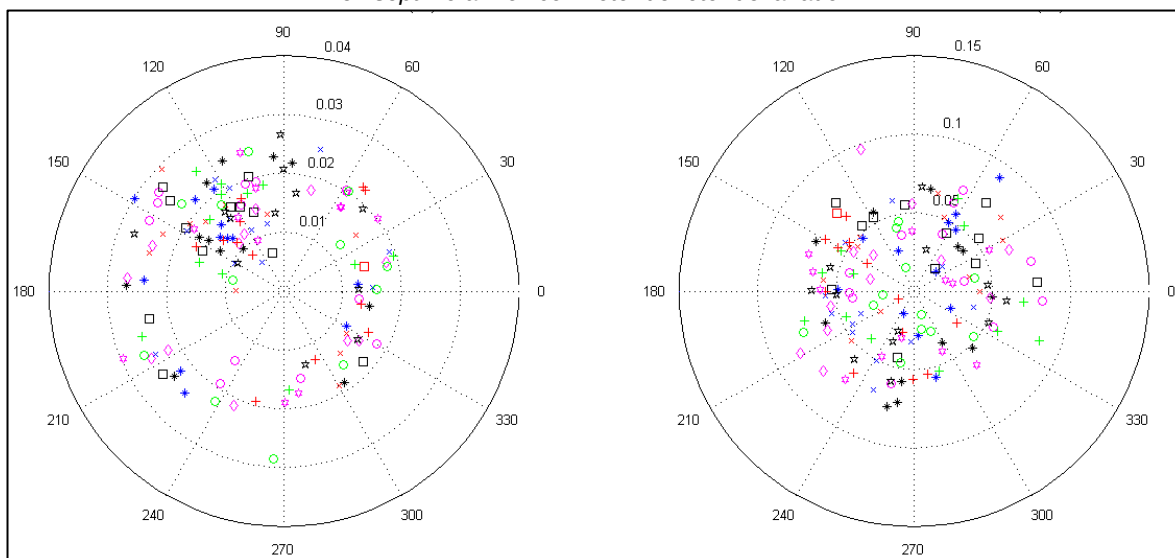


Figura 64. Respuesta en corriente para tercero (a) y quinto armónico (b), con señal distorsionada de tensión en séptimo armónico. Motor de rotor devanado.



6.3.1.1 Índice de auto-sensibilidad, sensibilidad cruzada (Matriz de admitancias), linealidad y asimetría.

Tabla 25. Índice de sensibilidad para el motor de rotor devanado con resistencias de arranque, unidades [mS].

Índice de sensibilidad			
	3	5	7
3	1,46	3,75	11,23
5	0,03	73,00	2,20
7	0,11	1,20	52,14

Figura 65. Intensidad de índice de sensibilidad para motor de rotor devanado con resistencias de arranque.

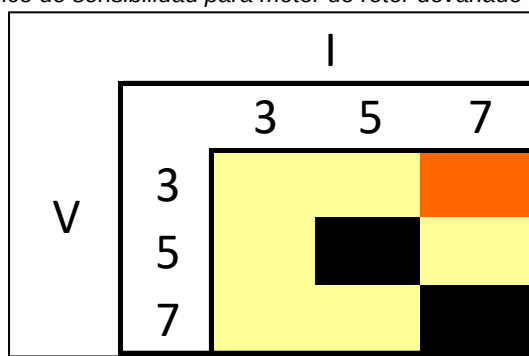


Tabla 26. Índice de linealidad para motor de rotor devanado con resistencias de arranque, adimensional.

Índice de linealidad			
	3	5	7
3	0,06	0,05	0,05
5	0,08	0,91	0,03
7	0,03	0,09	0,80

Figura 66. Índice de asimetría para motor de rotor devanado con resistencias de arranque, adimensional.

Índice de asimetría _Mag			
	3	5	7
3	0,68	0,57	0,53
5	0,67	0,18	0,57
7	0,56	0,57	0,48
Índice de asimetría _Ang			
	3	5	7
3	0,93	0,85	0,85
5	0,94	0,17	0,17
7	0,77	0,77	0,77



$$[Y] = \begin{Bmatrix} 1.5 & 0 & 0.1 \\ 4 & 73 & 1 \\ 11 & 2 & 52 \end{Bmatrix} [mS]$$

Como se mencionó en la sección 6.2.1.1. para el motor jaula de ardilla, los armónicos de secuencia cero son los que circulan por el neutro físico de las redes, para este caso el motor de rotor devanado fue conectado sin neutro en común con la fuente. En la Figura 59 podemos evidenciar el comportamiento de la corriente en la carga para tercer armónico, el cual era lo esperado en este caso ya que si nos remitimos al modelo circuital de secuencia cero Figura 27, la corriente de este orden, no tendría modo de circular por la carga y de esta forma producir distorsión alguna.

Cabe aclarar que en el caso de la tensión podemos ver como al no haber circulación de corriente tampoco ocurre distorsión en la tensión, así los datos en la Figura 59 (a) muestran un comportamiento disperso con magnitudes muy pequeñas en comparación a las configuradas previamente en la fuente de alimentación (nótese la escala de la gráfica). Si hubiera respuesta en corriente por parte de la carga y debido a la impedancia que se genera en las líneas de conducción, la caída generaría en dicha impedancia, distorsión en la tensión de alimentación.

Para el caso de la Figura 61 (b) y Figura 63 (b), la respuesta en corriente de quinto y séptimo armónico es altamente lineal, con un desfase de aproximadamente 90°. Se observa que el motor no presenta referencia cruzada

Figura 62, Figura 64 (nótese la escala de la gráfica). Esto es de esperar, ya que el motor es altamente inductivo y no presenta electrónica de potencia, por lo tanto, solo produciría desfases.

En el caso de la Figura 65 para la gráfica de intensidad, se evidencia intensidad sensibilidad muy alta en las posiciones 5-5 y 7-7. Para los demás elementos, la sensibilidad es baja, al igual que la linealidad

Tabla 26. La posición 5-5 tiene una linealidad de 0,91, alejándose relativamente del valor de 1 para una gran sensibilidad.

6.3.2 Motor de inducción rotor devanado con variador Eurotherm, velocidad 1680 [rpm], respuesta en corriente para 3, 5 y 7 armónico.

- Tercer armónico

Figura 67. (a) Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónico. Motor de rotor devanado V1_1680 [rpm].

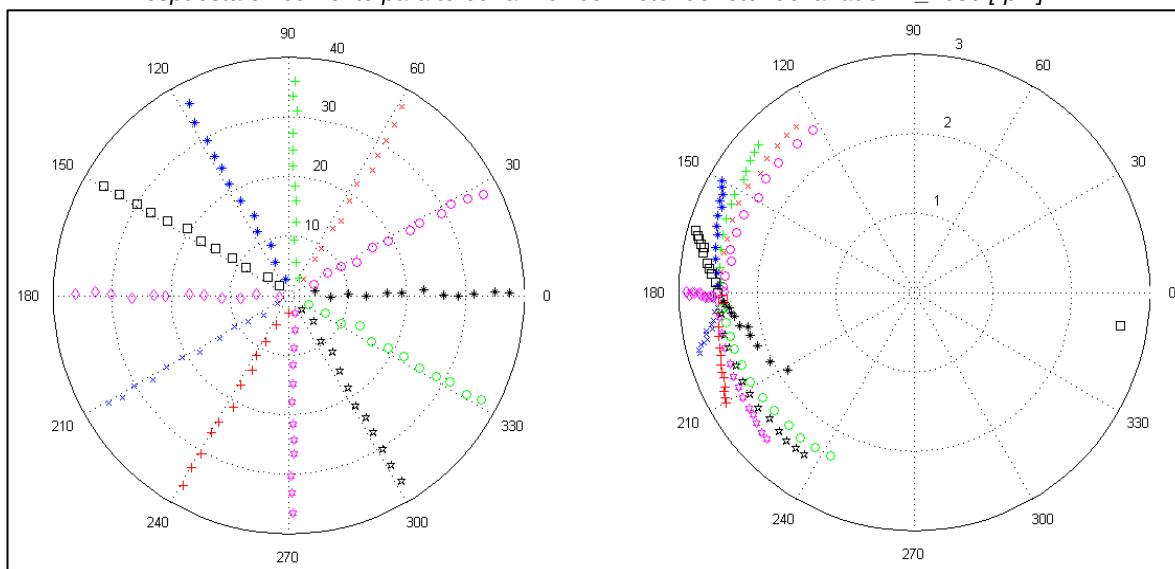
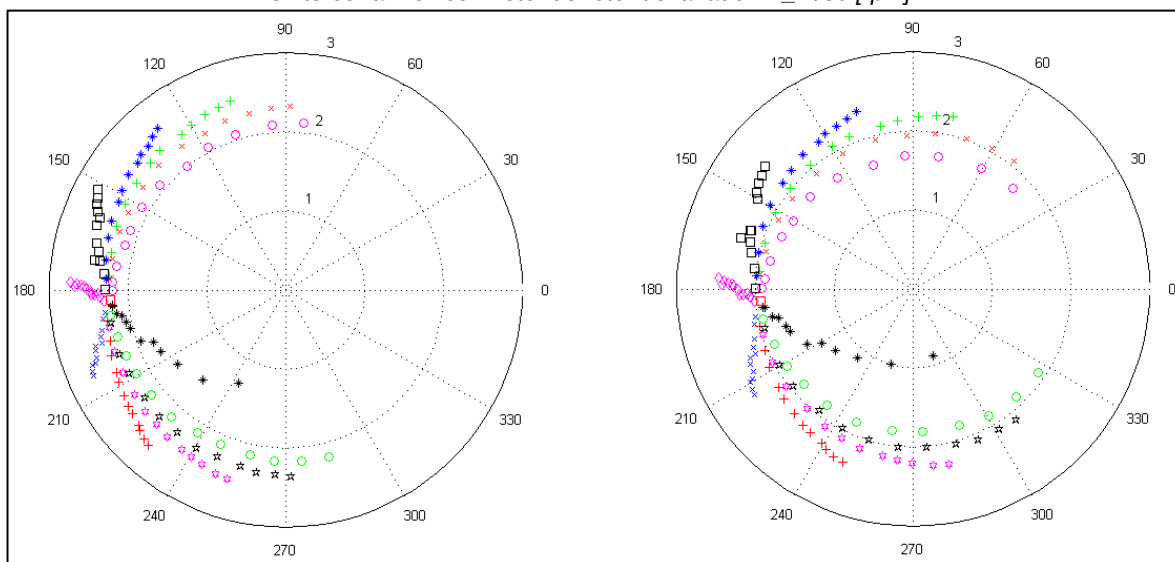


Figura 68. Respuesta en corriente para quinto (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en tercer armónico. Motor de rotor devanado V1_1680 [rpm].



- Quinto armónico

Figura 69. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en quinto armónico, (b) con respuesta en corriente para quinto armónico. Motor de rotor devanado V1_1680 [rpm].

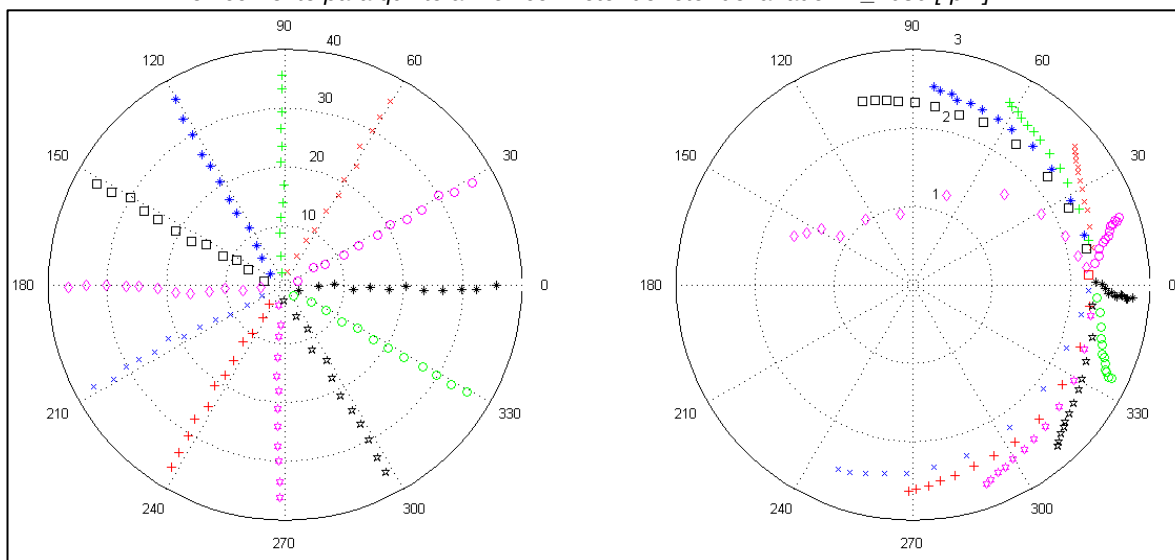
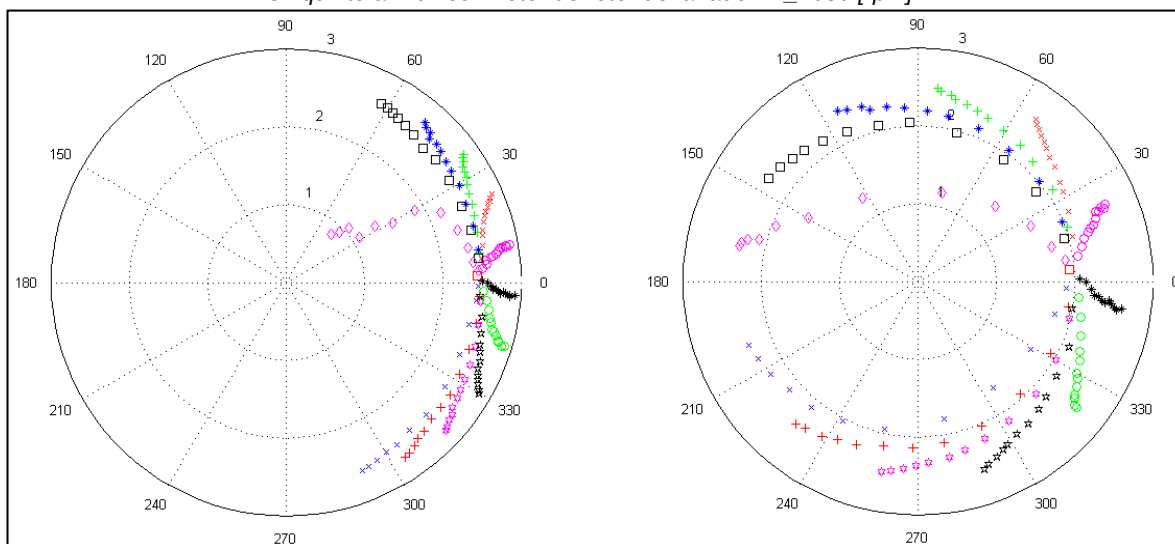


Figura 70. Respuesta en corriente para tercero (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en quinto armónico. Motor de rotor devanado V1_1680 [rpm].



- Séptimo armónico

Figura 71. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en séptimo armónico, (b) con respuesta en corriente para séptimo armónico. Motor de rotor devanado V1_1680 [rpm].

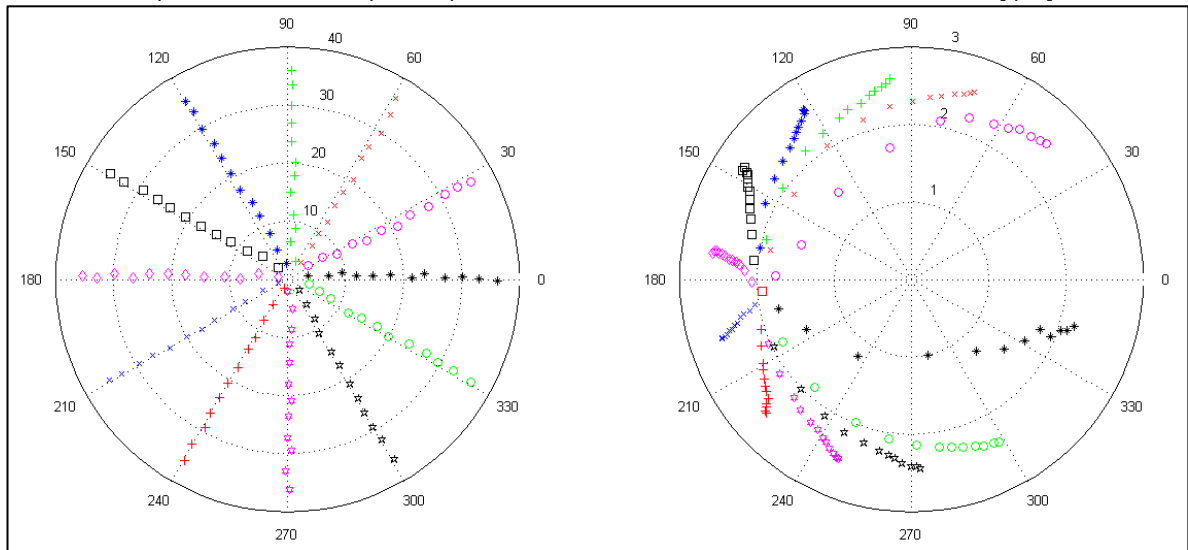
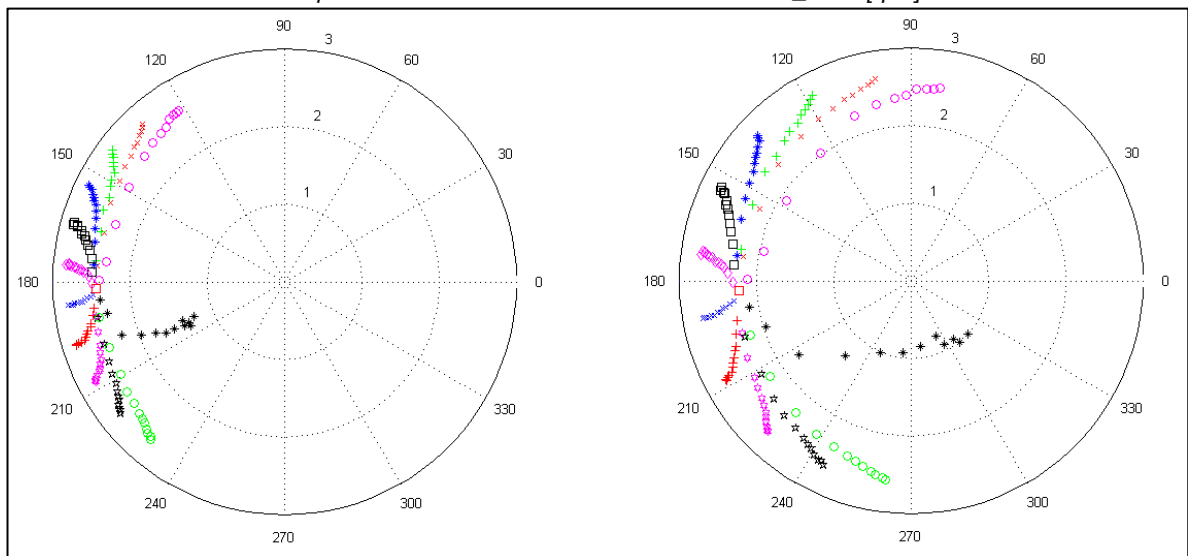


Figura 72. Respuesta en corriente para tercero (a) y quinto armónico (b), con señal distorsionada de tensión en séptimo armónico. Motor de rotor devanado V1_1680 [rpm].





6.3.2.1 Índice de auto-sensibilidad, sensibilidad cruzada (Matriz de admitancias), linealidad y asimetría.

Tabla 27. Índice de sensibilidad para motor de rotor devanado V1_1680 [rpm], unidades [mS].

Carga		Índice de sensibilidad		
		3	5	7
Vd_1_V60_motor_rotordevanado	3	28,91	37,66	36,20
	5	38,80	56,03	68,86
	7	32,01	49,85	67,57

Figura 73. Intensidad de índice de sensibilidad para motor de rotor devanado V1_1680 [rpm].

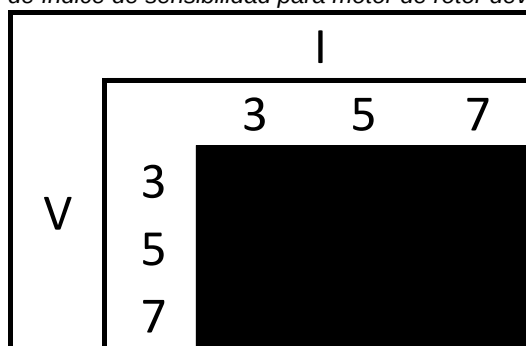


Tabla 28. Índice de linealidad para motor de rotor devanado V1_1680 [rpm], adimensional.

		Índice de linealidad		
		3	5	7
3		0,92	0,89	0,81
5		0,92	0,89	0,86
7		0,92	0,92	0,90

Tabla 29. Índice de asimetría para motor de rotor devanado V1_1680 [rpm], adimensional.

		Índice de asimetría _Mag		
		3	5	7
3		0,60	0,58	0,59
5		0,67	0,69	0,62
7		0,64	0,66	0,60
		Índice de asimetría _Ang		
		3	5	7



3	1,34	1,42	1,42
5	1,49	1,37	1,37
7	1,31	1,12	1,12

Al igual que con el motor Jaula de ardilla, para el motor de inducción rotor devanado también se practicaron mediciones utilizando los variadores de velocidad. Gráficamente el comportamiento de la distorsión es muy similar. En las gráficas Fingerprints se observa una gran distorsión armónica Figura 67, Figura 69, Figura 71 y referencia cruzada Figura 68, Figura 70, Figura 72, para todos los órdenes armónicos (3, 5, 7 armónico). Recordemos que el variador de velocidad está configurado para hacer girar el motor a velocidad nominal 1680 rpm.

Los elementos de la matriz presentan alta sensibilidad, como se muestra en la Figura 73 de intensidad). La linealidad calculada y mostrada en la *Tabla 28* para este experimento, no sobrepasa valores de 0.92. Además existe poca asimetría entre los brazos de los Fingerprints *Tabla 29*.

$$[Y] = \begin{Bmatrix} 29 & 39 & 32 \\ 38 & 56 & 50 \\ 36 & 69 & 68 \end{Bmatrix} [mS]$$

6.3.3 Motor de inducción rotor devanado con variador Eurotherm, velocidad 1336 [rpm], respuesta en corriente para 3, 5 y 7 armónico.

- Tercer armónico

Figura 74. (a) Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónico. Motor de rotor devanado V1_1336 [rpm].

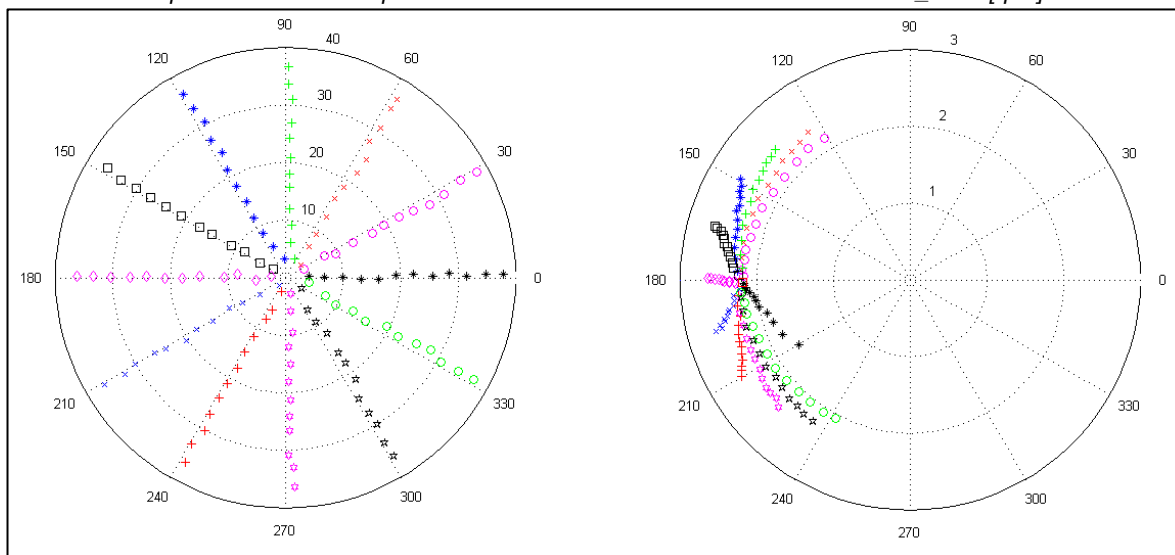
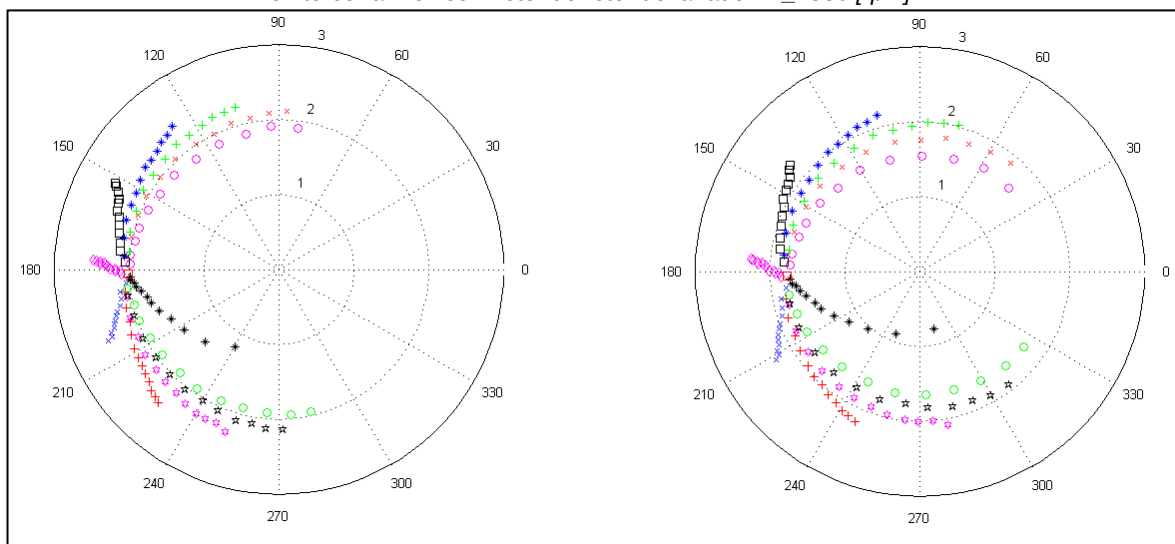


Figura 75. Respuesta en corriente para quinto (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en tercer armónico. Motor de rotor devanado V1_1336 [rpm].



- Quinto armónico

Figura 76. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en quinto armónico, (b) con respuesta en corriente para quinto armónico. Motor de rotor devanado V1_1336 [rpm].

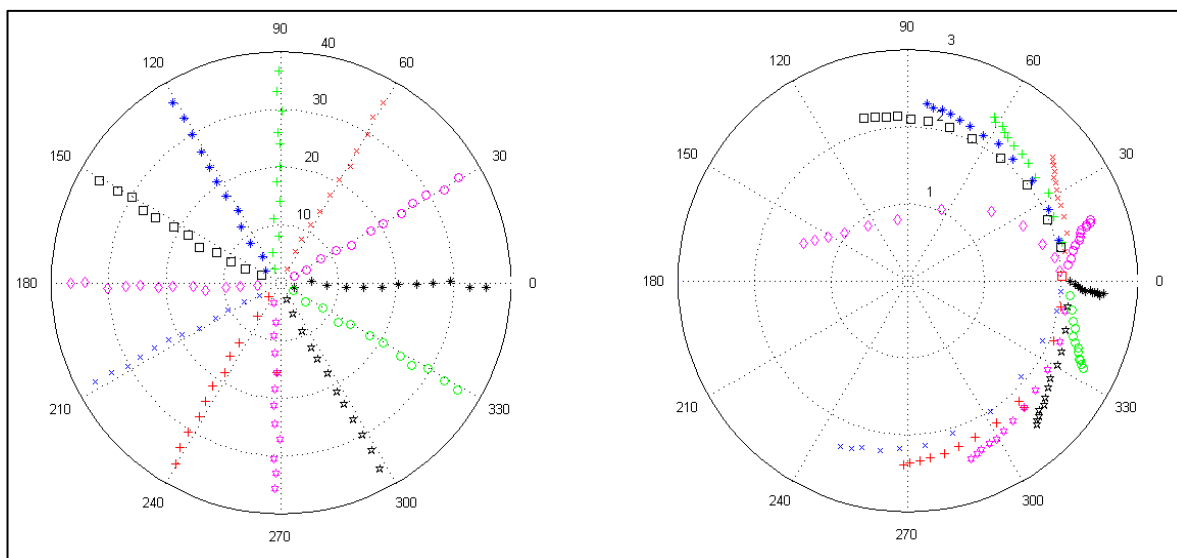
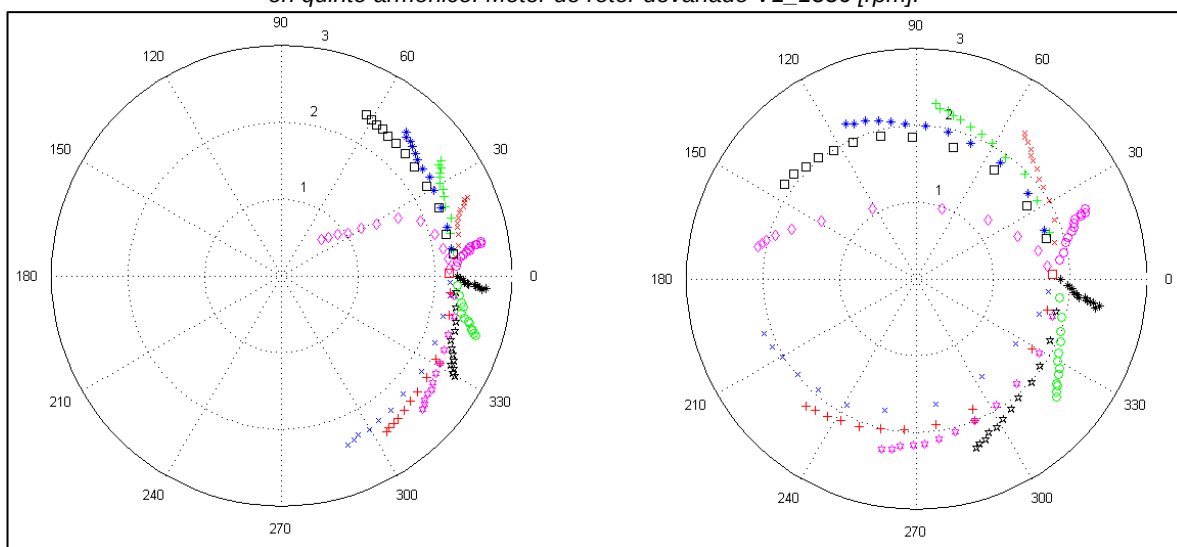


Figura 77. Respuesta en corriente para tercero (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en quinto armónico. Motor de rotor devanado V1_1336 [rpm].



- Séptimo armónico

Figura 78. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en séptimo armónico, (b) con respuesta en corriente para séptimo armónico. Motor de rotor devanado V1_1336 [rpm].

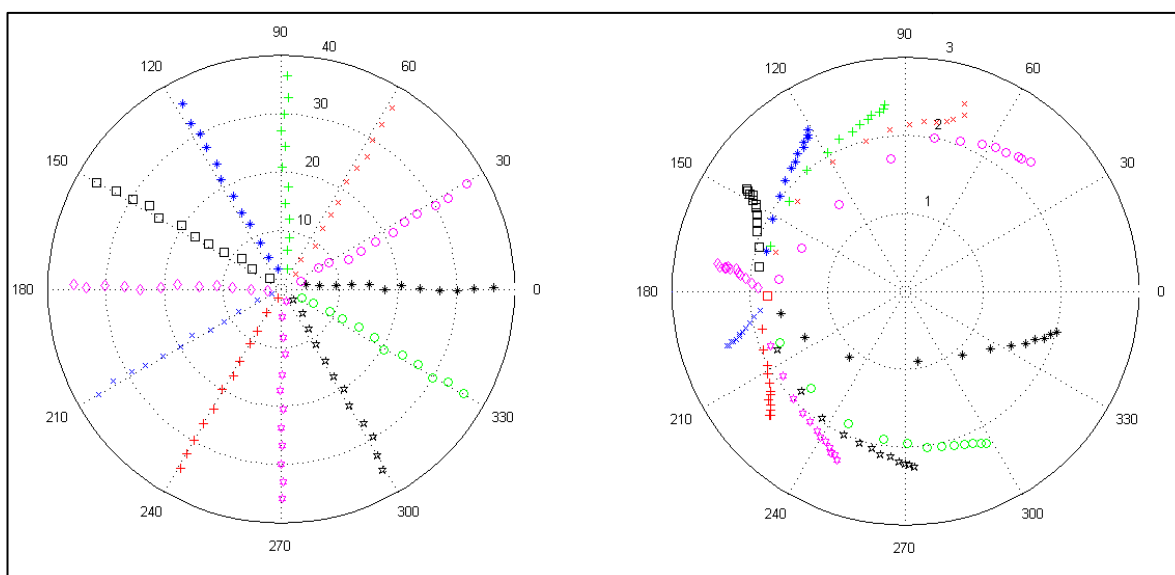
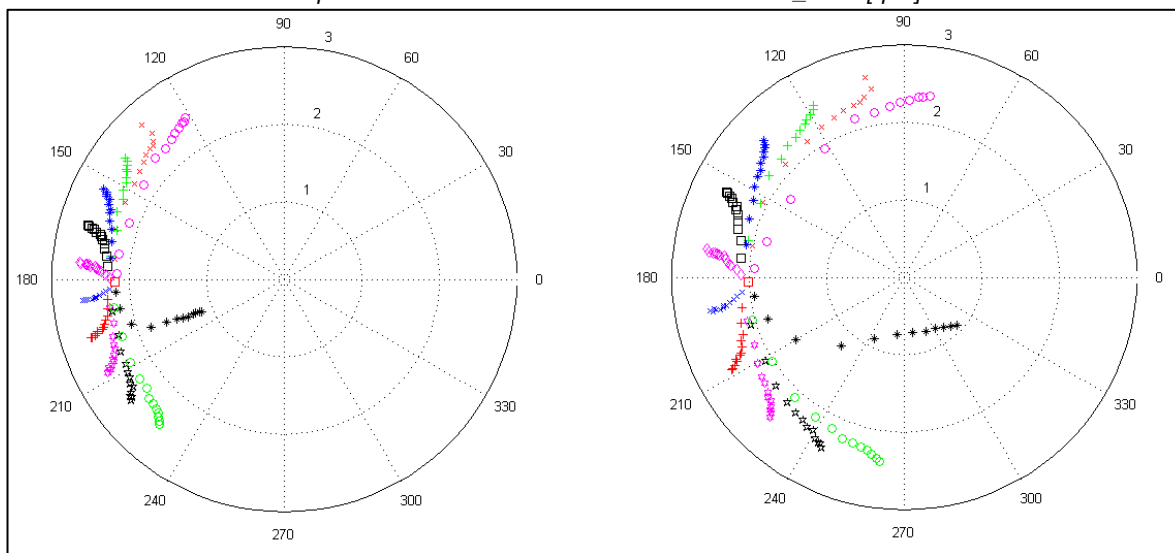


Figura 79. Respuesta en corriente para tercero (a) y quinto armónico (b), con señal distorsionada de tensión en séptimo armónico. Motor de rotor devanado V1_1336 [rpm].



6.3.3.1 Índice de auto-sensibilidad, sensibilidad cruzada (Matriz de admitancias), linealidad y asimetría.



Tabla 30. Índice de sensibilidad para motor de rotor devanado V1_1336 [rpm], unidades [mS].

Carga		Índice de sensibilidad		
		3	5	7
Vd_1_V47,7_motor_rotordevanado	3	26,65	34,81	33,45
	5	35,57	51,27	62,99
	7	29,85	46,45	62,90

Figura 80. Intensidad de índice de sensibilidad para motor rotor devanado V1_1336 [rpm].

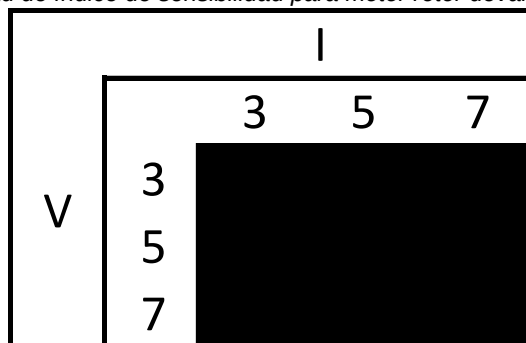


Tabla 31. Índice de linealidad para motor de rotor devanado V1_1336 [rpm], adimensional.

Índice de linealidad			
	3	5	7
3	0,94	0,90	0,82
5	0,94	0,89	0,85
7	0,93	0,93	0,91

Tabla 32. Índice de asimetría para motor de rotor devanado V1_1336 [rpm], adimensional.

Índice de asimetría _Mag			
	3	5	7
3	0,55	0,59	0,57
5	0,66	0,71	0,68
7	0,79	0,72	0,64
Índice de asimetría _Ang			
	3	5	7
3	1,32	1,36	1,36
5	1,47	1,32	1,32
7	1,26	1,07	1,07



En este caso el variador de velocidad está configurado para que el motor gire a una velocidad de 1336 rpm. Al igual que el experimento anterior, también se observa una gran distorsión armónica en corriente Figura 74, Figura 76, Figura 78, sumado a una alta sensibilidad cruzada Tabla 30. Aunque gráficamente la diferencia de la distorsión armónica en corriente entre el variador configurado a 1680 rpm y 1336 rpm presenta pocas diferencias, los índices revelan una mayor aproximación del comportamiento de la distorsión para el segundo caso.

Para el variador Eurotherm configurado a 1336 rpm, también se presenta alta linealidad para los elementos 3-3, 5-3, 7-3 y 7-5, con rangos de 0.94. Hay alta asimetría de fase Tabla 32 para las ramas del Fingerprint y poca asimetría de magnitud. Es interesante resaltar que existe una mayor asimetría de fase para el variador Eurotherm configurado a 1336 rpm que para el variador Eurotherm configurado a 1680 rpm en la respuesta al séptimo armónico Figura 79, pero menor en la respuesta al tercer armónico. Según la gráfica de intensidad Figura 80, todos los elementos de la matriz tienen alta sensibilidad.

A continuación, se presenta la matriz de sensibilidad, la cual es una aproximación de la matriz real de admitancias.

$$[Y] = \begin{Bmatrix} 27 & 36 & 30 \\ 35 & 51 & 46 \\ 33 & 63 & 63 \end{Bmatrix} [mS]$$

6.3.4 Motor de inducción rotor devanado con variador Schneider, velocidad 1680 [rpm], respuesta en corriente para 3, 5 y 7 armónico.

- Tercer armónico

Figura 81. (a) Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónico. Motor de rotor devanado V2_1680 [rpm].

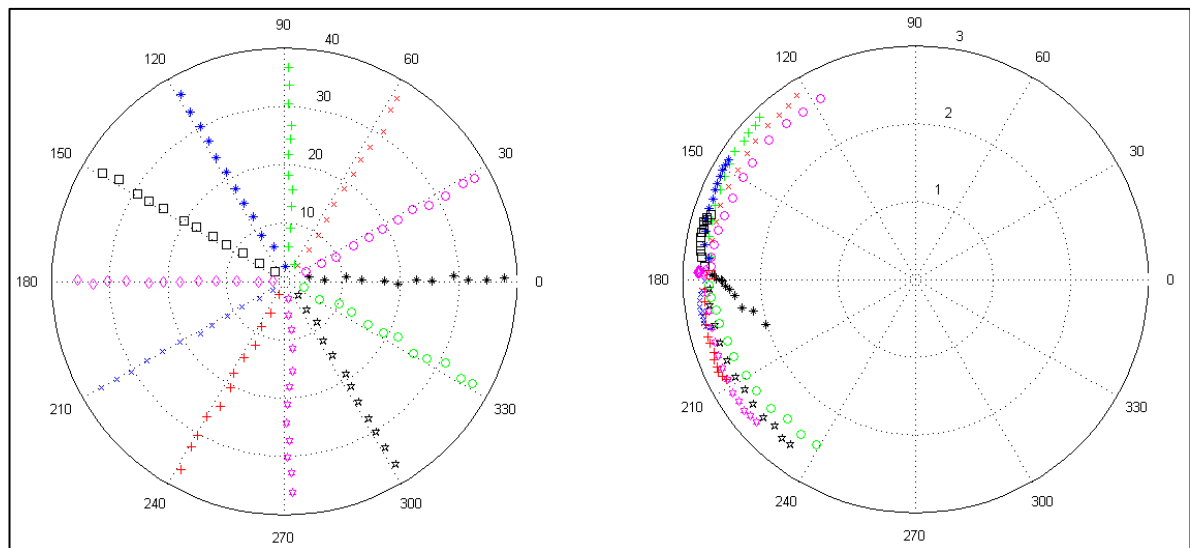
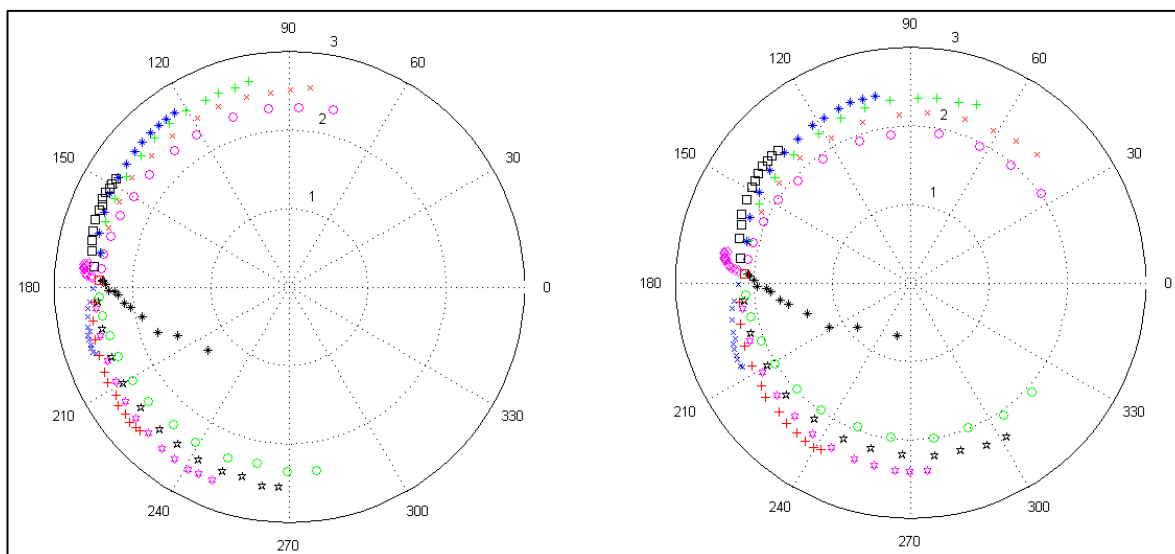


Figura 82. Respuesta en corriente para quinto (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en tercer armónico. Motor de rotor devanado V2_1680 [rpm].



- Quinto armónico

Figura 83. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en quinto armónico, (b) con respuesta en corriente para quinto armónico. Motor de rotor devanado V2_1680 [rpm].

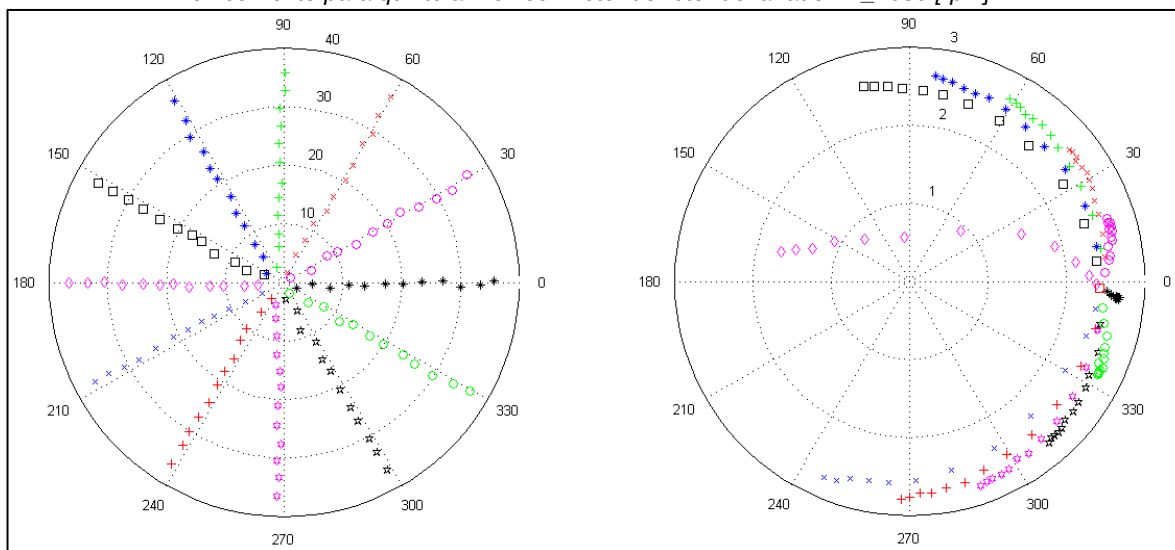
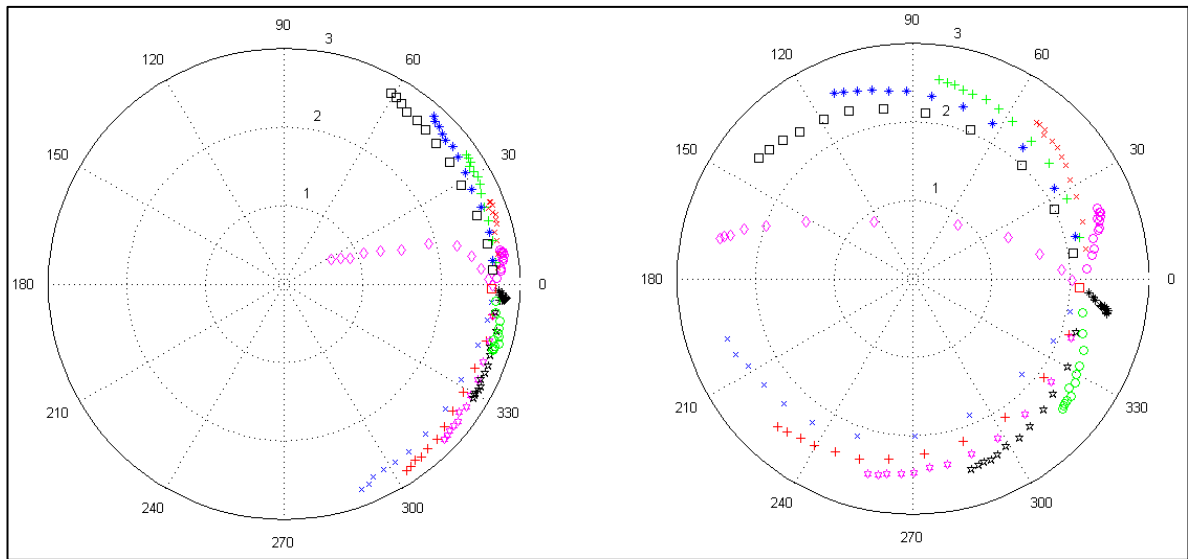


Figura 84. Respuesta en corriente para tercero (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en quinto armónico. Motor de rotor devanado V2_1680 [rpm].



- Séptimo armónico

Figura 85. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en séptimo armónico, (b) con respuesta en corriente para séptimo armónico. Motor de rotor devanado V2_1680 [rpm].

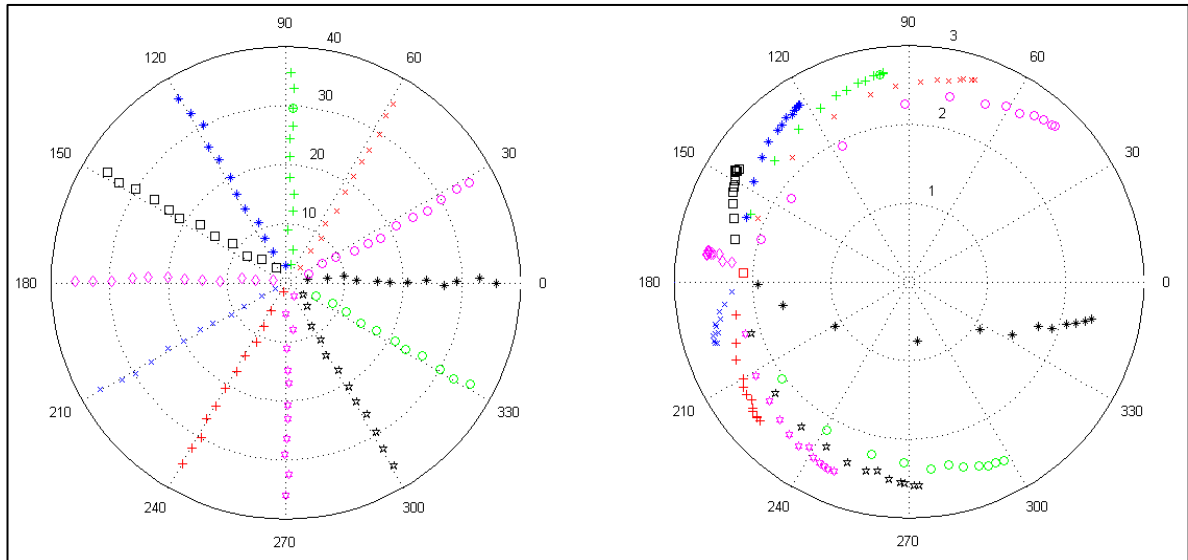
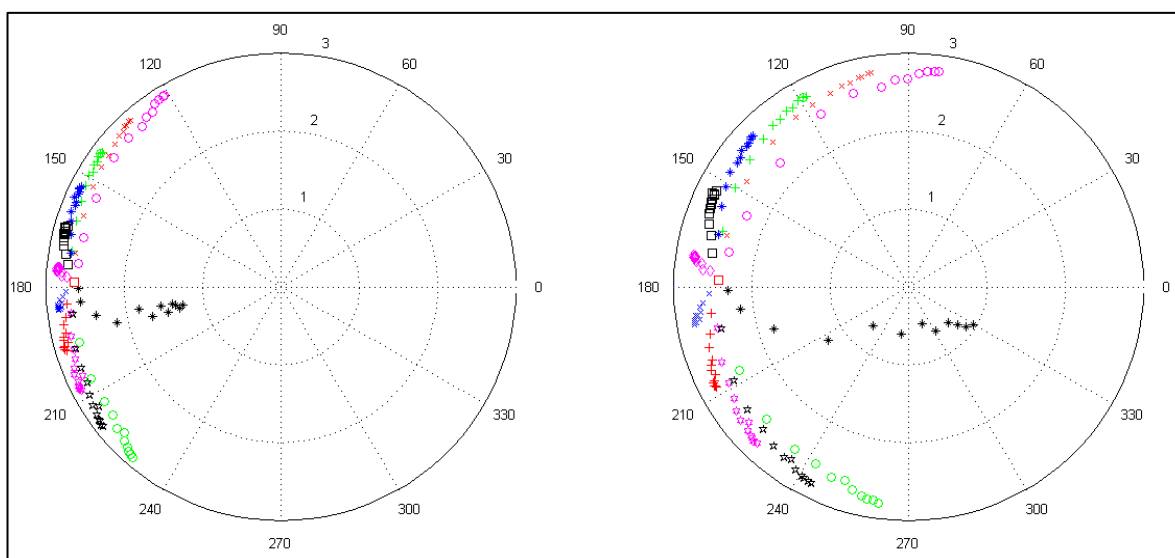


Figura 86. Respuesta en corriente para tercero (a) y quinto armónico (b), con señal distorsionada de tensión en séptimo armónico. Motor de rotor devanado V2_1680 [rpm].



6.3.4.1 Índice de auto-sensibilidad, sensibilidad cruzada (Matriz de admitancias), linealidad y asimetría.

Tabla 33. Índice de sensibilidad para motor de rotor devanado V2_1680 [rpm], unidades [mS].

Carga		Índice de sensibilidad		
		3	5	7
Vd_2_V60_motor_rotordevanado	3	26,94	37,27	36,97
	5	37,46	55,95	70,40
	7	31,66	51,07	69,24

Figura 87. Intensidad de índice de sensibilidad para motor de rotor devanado V2_1680 [rpm].

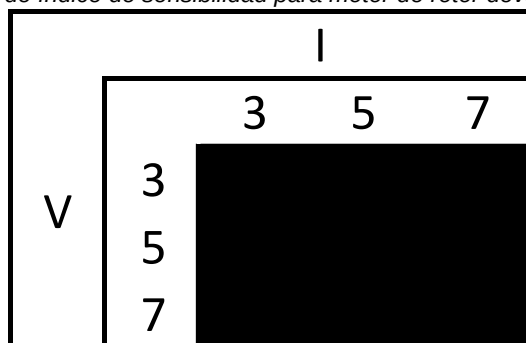


Tabla 34. Índice de linealidad para motor de rotor devanado V2_1680 [rpm], adimensional.

Índice de linealidad



	3	5	7
3	0,92	0,90	0,81
5	0,87	0,90	0,84
7	0,72	0,87	0,88

Tabla 35. Índice de asimetría para motor rotor devanado V2_1680 [rpm], adimensional.

Índice de asimetría _Mag			
	3	5	7
3	0,63	0,64	0,61
5	0,64	0,73	0,66
7	0,73	0,78	0,77
Índice de asimetría _Ang			
	3	5	7
3	1,26	1,30	1,30
5	1,44	1,29	1,29
7	1,19	1,08	1,08

$$[Y] = \begin{Bmatrix} 27 & 37 & 32 \\ 37 & 56 & 51 \\ 37 & 70 & 69 \end{Bmatrix} [mS]$$

La respuesta en corriente para la señal fundamental en este experimento tiene alta distorsión armónica para el caso de 3, 5 y 7 como se puede observar en las Figura 81, Figura 83, Figura 85. Se da interferencia cruzada para los tres casos de órdenes armónicos Figura 82, Figura 84, Figura 86, con aproximadamente igual intensidades de corriente respecto a la respuesta de la fundamental corriente ante la tensión.

Solo en la respuesta de tercer armónico (3-3) se presenta una linealidad mayor a 0.92, mientras que las demás respuestas tienen linealidades por debajo de 0.9. Las gráficas de respuesta cruzada Figura 82, Figura 84, Figura 86 sugieren que la carga es de comportamiento no lineal.

Hay poca asimetría de ángulo entre las ramas de los Fingerprints. Por el lado de la asimetría de magnitud, se encuentran rangos tolerables Tabla 35.



No se nota una diferencia aparente en la respuesta de corriente con respecto del motor de inducción jaula de ardilla, pero claramente la matriz de sensibilidad aproximada cambia el valor de las componentes que la conforman.

Se puede apreciar en la

Figura 87 de la gráfica de intensidad, que todos los elementos de la matriz presentan alta sensibilidad tanto en la diagonal como en los extremos.

Se realizó el mismo experimento, donde se conservó el variador, la velocidad de 1680 [rpm], pero la medición se realizó para la mitad de los datos o sea para un barrido de hasta 12% en magnitud pero con pasos de 2% y los mismos ángulos de fase del experimento anterior, esto con el fin de probar si es necesario tomar un rango de datos tan cercanos como lo hacen en [8], para indagar acerca de los índices y de la matriz de admitancias para el modelo aproximado propuesto para la carga. Los resultados son los siguientes:

En la Figura 88 y Figura 89, se muestra el barrido con pasos de 2% para el tercer armónico

Figura 88. Barrido de 2% en tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónico. Motor de rotor devanado V2_1680 [rpm].

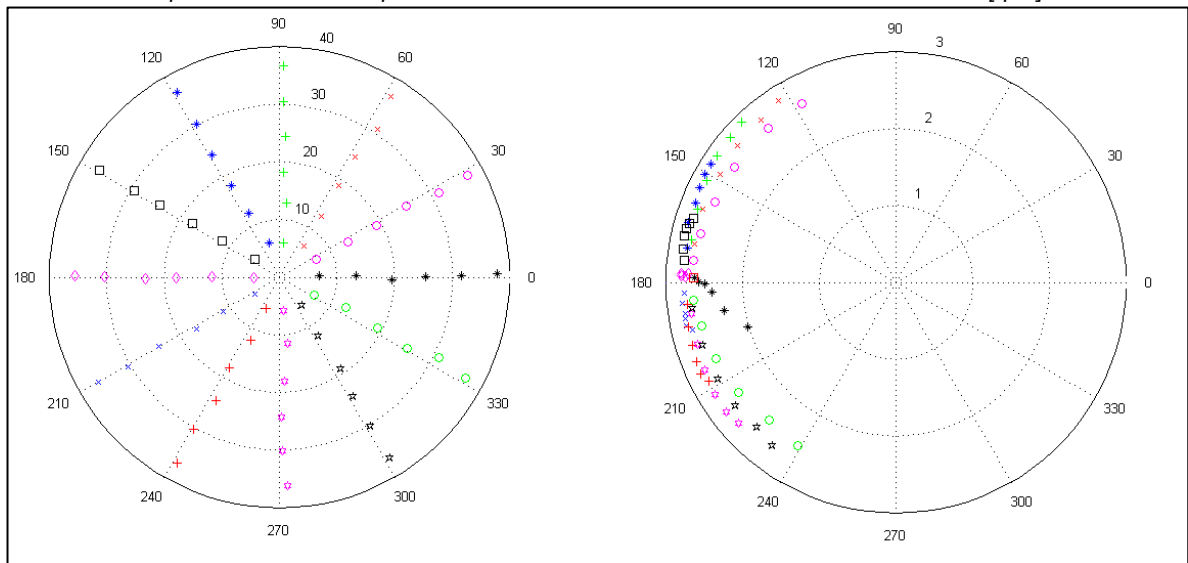


Figura 89. Respuesta en corriente para quinto (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en tercer armónico. Motor de rotor devanado V2_1680 [rpm].

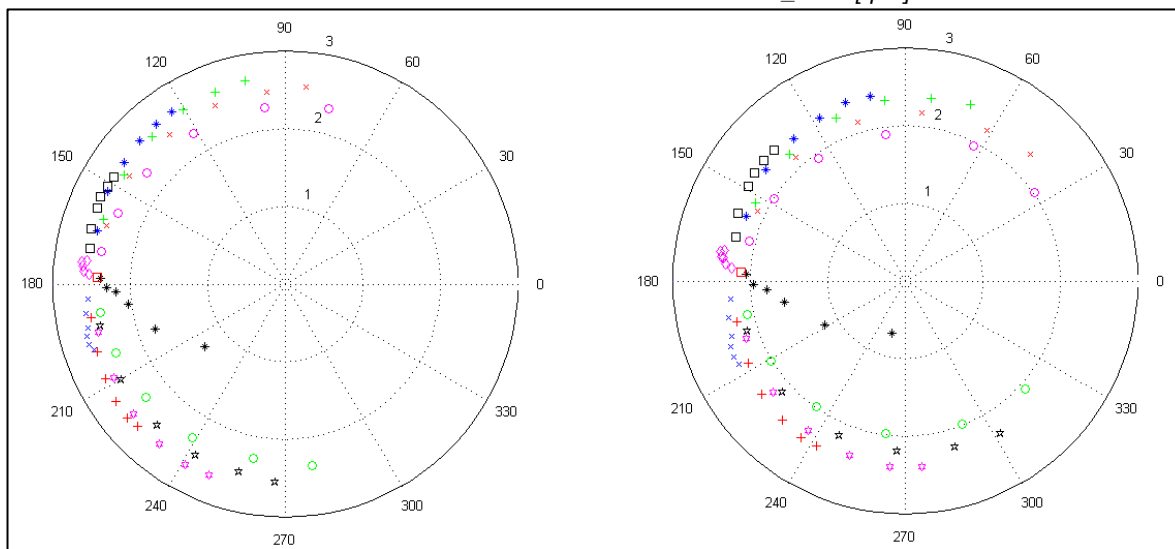


Tabla 36. Índice de sensibilidad para motor de rotor devanado V2_1680 [rpm] barrido de a 2%, unidades [mS].

Carga	Índice de sensibilidad			
		3	5	7
b_2%	3	22,71	37,83	37,83
Vd_2_V60_motor_	5	37,62	56,17	70,40
rotordevanado	7	32,06	51,36	70,61

Figura 90. Intensidad de índice de sensibilidad para motor de rotor devanado V2_1680 [rpm] barrido de a 2%.

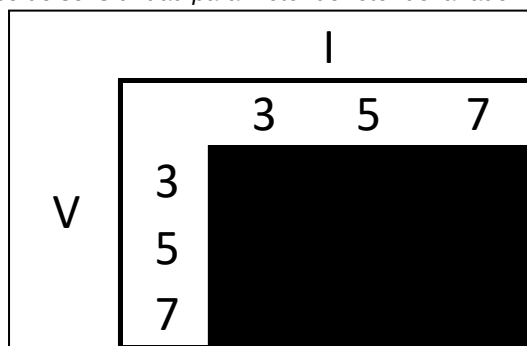




Tabla 37. Índice de linealidad para motor de rotor devanado V2_1680 [rpm] barrido de a 2%, adimensional.

Índice de linealidad			
	3	5	7
3	0,94	0,90	0,81
5	0,93	0,92	0,86
7	0,91	0,93	0,90

Tabla 38. Intensidad de índice de asimetría para motor de rotor devanado V2_1680 [rpm] barrido de a 2%, adimensional.

Índice de asimetría _Mag			
	3	5	7
3	0,63	0,64	0,62
5	0,70	0,73	0,70
7	0,68	0,68	0,68
Índice de asimetría _Ang			
	3	5	7
3	1,28	1,33	1,33
5	1,39	1,22	1,22
7	1,20	1,04	1,04

$$[Y] = \begin{Bmatrix} 23 & 38 & 32 \\ 38 & 56 & 51 \\ 38 & 70 & 71 \end{Bmatrix} [mS]$$

Haciendo una comparación de los datos obtenidos para esta segunda prueba con los obtenidos en el experimento base, vemos como un barrido de tensión de a 2% en magnitud, también provee una muy buena información acerca de los elementos que deben conformar la matriz de sensibilidad aproximada a través del cálculo y análisis de los datos. Por ejemplo comparando las tablas de sensibilidad Tabla 33 y Tabla 36.

6.3.5 Motor de inducción rotor devanado con variador Schneider, velocidad 1336 [rpm], respuesta en corriente para 3, 5 y 7 armónico.

- Tercer armónico

Figura 91.(a) Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en tercer armónico, (b) con respuesta en corriente para tercer armónico. Motor de rotor devanado V2_1336 [rpm].

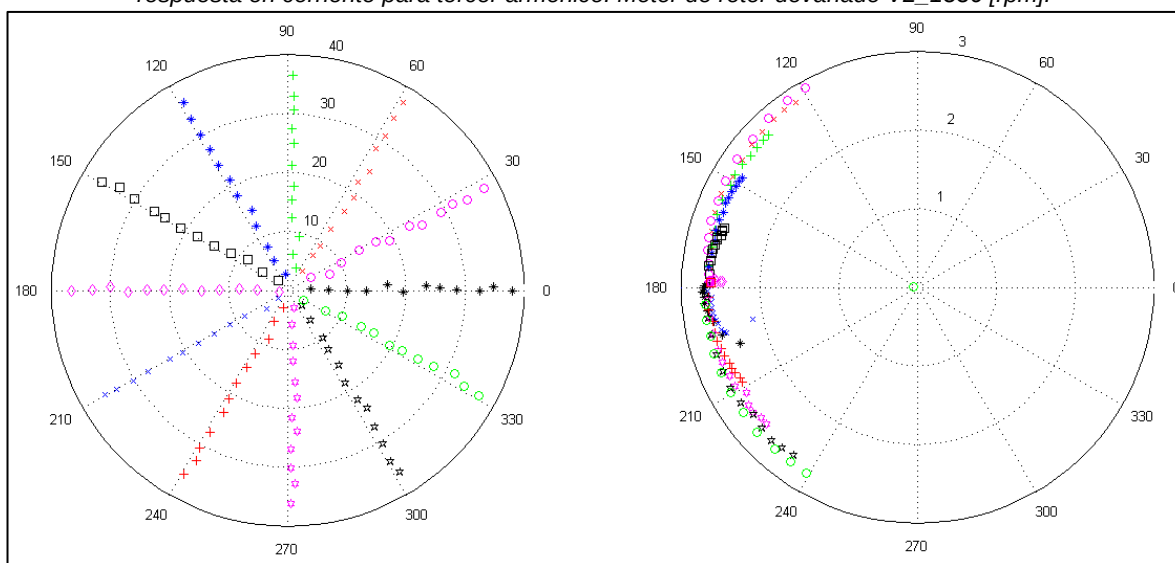
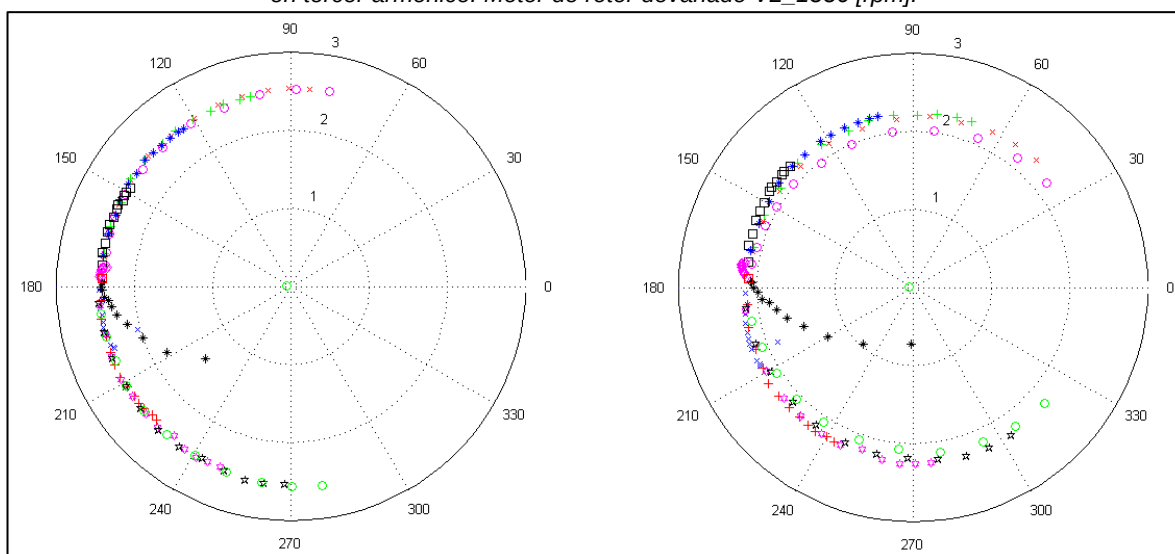


Figura 92. Respuesta en corriente para quinto (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en tercer armónico. Motor de rotor devanado V2_1336 [rpm].



- Quinto armónico

Figura 93. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en quinto armónico, (b) con respuesta en corriente para quinto armónico. Motor de rotor devanado V2_1336 [rpm].

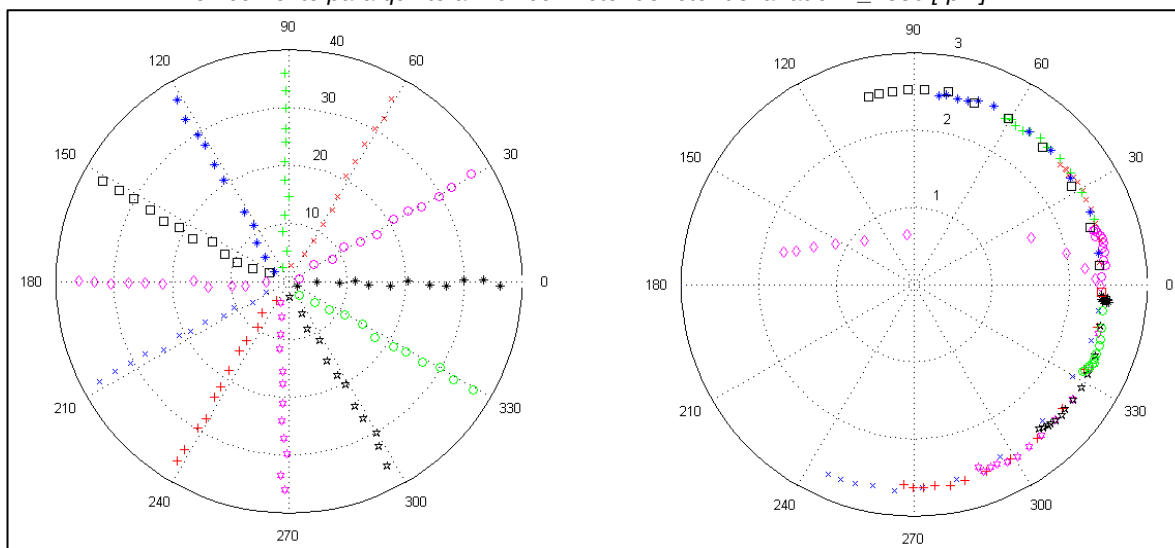
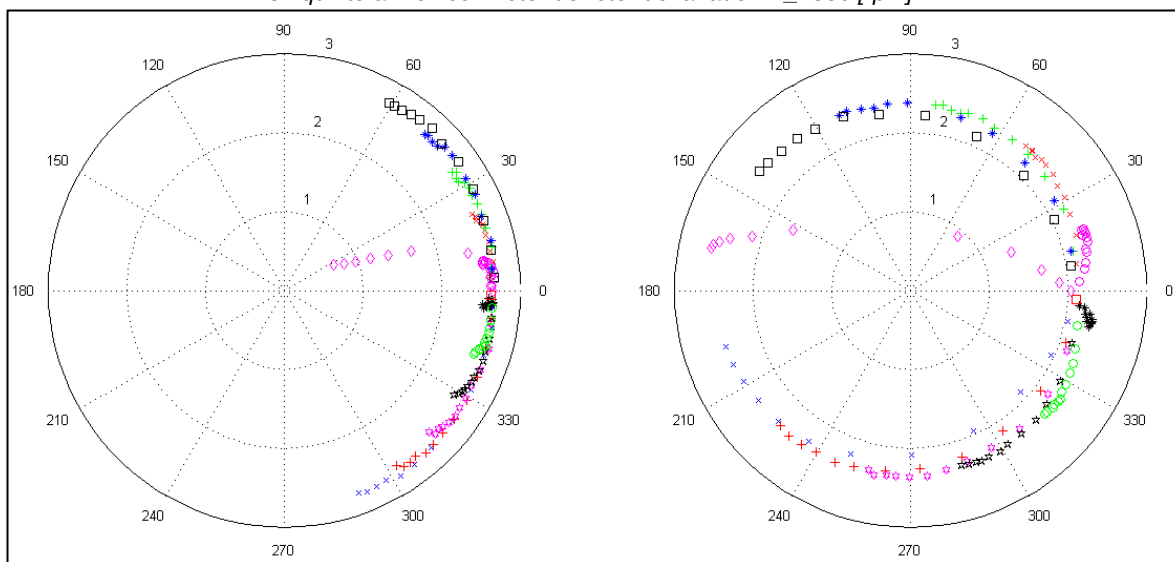


Figura 94. Respuesta en corriente para tercero (a) y séptimo armónico (b), con señal distorsionada de tensión en quinto armónico. Motor de rotor devanado V2_1336 [rpm].



- Séptimo armónico

Figura 95. Barrido de tensión para señal distorsionada de alimentación en séptimo armónico, (b) con respuesta en corriente para séptimo armónico. Motor de rotor devanado V2_1336 [rpm].

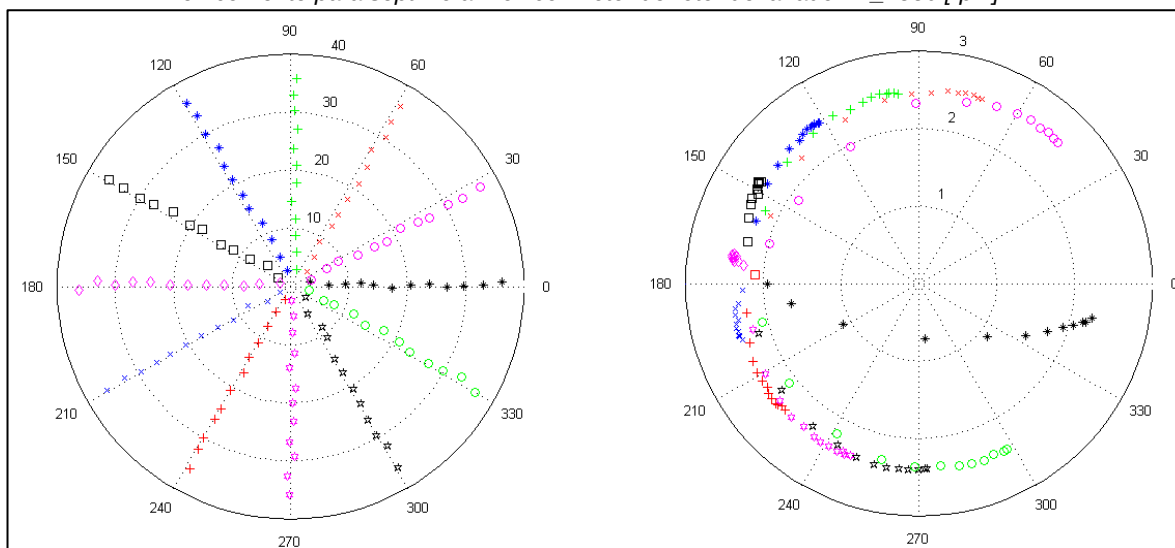
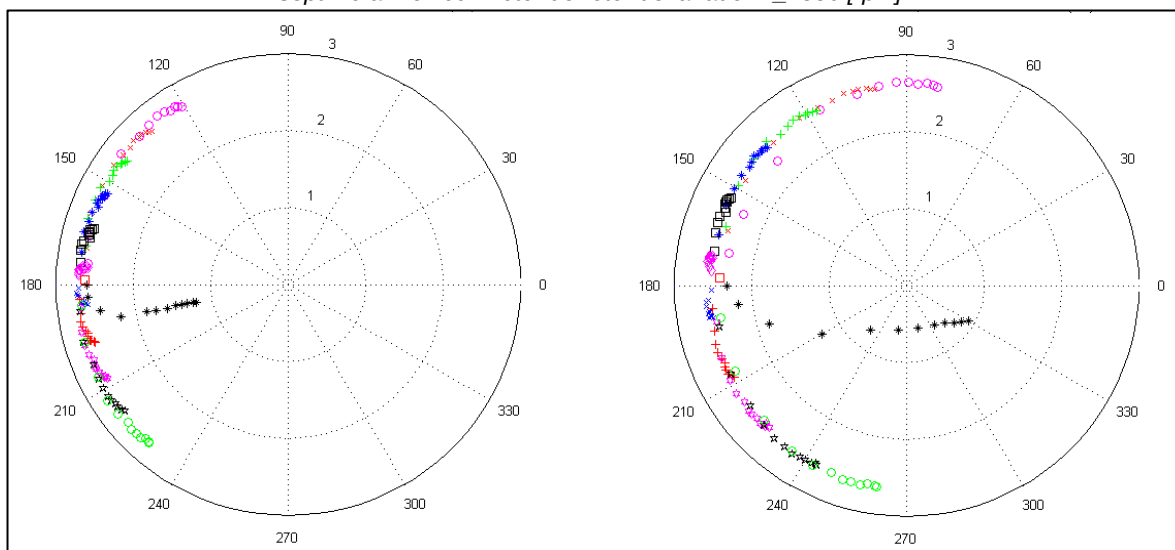


Figura 96. Respuesta en corriente para tercero (a) y quinto armónico (b), con señal distorsionada de tensión en séptimo armónico. Motor de rotor devanado V2_1336 [rpm].





6.3.5.1 Índice de auto-sensibilidad, sensibilidad cruzada (Matriz de admitancias), linealidad y asimetría.

Tabla 39. Índice de sensibilidad para motor de rotor devanado V2_1336 [rpm], unidades [mS].

Carga		Índice de sensibilidad		
		3	5	7
Vd_2_V47,7_motor_rotordevanado	3	24,80	47,81	51,21
	5	25,31	46,72	66,78
	7	19,87	42,95	63,97

Tabla 40. Índice de linealidad para motor de rotor devanado V2_1336 [rpm], adimensional.

Índice de linealidad			
	3	5	7
3	0,77	0,82	0,77
5	0,69	0,84	0,74
7	0,85	0,90	0,86

Figura 97. Intensidad de índice de sensibilidad para motor de rotor devanado V2_1336 [rpm].

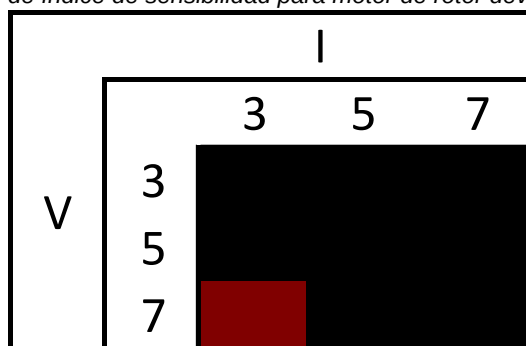


Tabla 41. Índice de asimetría para motor de rotor devanado V2_1336 [rpm], adimensional.

Índice de asimetría _Mag			
	3	5	7
3	0,72	0,72	0,71
5	0,70	0,74	0,71
7	0,65	0,70	0,70
Índice de asimetría _Ang			
	3	5	7
3	1,72	1,82	1,82
5	1,91	1,64	1,64
7	1,74	1,32	1,32



$$[Y] = \begin{Bmatrix} 25 & 25 & 20 \\ 48 & 47 & 43 \\ 51 & 67 & 64 \end{Bmatrix} [mS]$$

Este experimento evidencia que para una velocidad más baja, aumentan la respuesta en corriente de las distorsiones armónicas en 3, 5 y 7 Figura 91, Figura 93, Figura 95. Al igual que una respuesta alta para la interferencia cruzada en todos los tres casos de orden armónico Figura 92, Figura 94, Figura 96.

Tanto la linealidad y la asimetría de ángulo para los brazos de los Fingerprints, son bastante bajas Tabla 40, Tabla 41.

También es importante aclarar que los datos en este caso, muestran un aumento importante de la no linealidad Tabla 40, comparado con el experimento a 1680 [rpm] Tabla 34.

Se puede apreciar en la

Figura 97 de la gráfica de intensidad, que todos los elementos de la matriz presentan alta sensibilidad tanto en la diagonal como en los extremos, excepto el elemento 7-3 que se encuentra en el límite de cambio de color.

6.4 ESTUDIOS COMPARATIVOS DE LA MATRIZ DE SENSIBILIDAD

Adicionalmente se busca evidenciar si la matriz de sensibilidad es una buena aproximación para la matriz real de admitancias en la representación del modelo de Norton y modelo de Norton acoplado. Recordemos que el modelo de Norton utiliza sólo los elementos de la diagonal principal de la matriz de admitancias, mientras que Norton acoplado tiene en cuenta todos los elementos de la matriz [35][36].

El modelo en el dominio de la frecuencia de Norton y Norton acoplado, se expresa de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_3 \\ \dots \\ \bar{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{I}_{N1} \\ \bar{I}_{N3} \\ \dots \\ \bar{I}_{Nn} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \bar{Y}_{33} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \bar{Y}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_3 \\ \dots \\ \bar{U}_n \end{bmatrix} \rightarrow \text{M. Norton}$$



$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_3 \\ \dots \\ \bar{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{I}_{N1} \\ \bar{I}_{N3} \\ \dots \\ \bar{I}_{Nn} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{13} & \dots & \bar{Y}_{1n} \\ \bar{Y}_{31} & \bar{Y}_{33} & \dots & \bar{Y}_{3n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{Y}_{n1} & \bar{Y}_{n3} & \dots & \bar{Y}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_3 \\ \dots \\ \bar{U}_n \end{bmatrix} \rightarrow \text{M. Norton acoplado}$$

Donde:

$[\bar{I}_n]$ Son las corrientes dependientes de las tensiones armónicas.

$[\bar{I}_{Nn}]$ Armónicos de corriente en condiciones de tensión sinusoidal.

$[\bar{Y}_{nn}]$ Matriz de admitancias armónicas.

$[\bar{U}_n]$ Vector armónico de tensión (suministro de la fuente de alimentación).

Por medio de un análisis grafico se muestra, qué tan precisa es la matriz de sensibilidad para efectos de uso en el modelo de Norton y Norton acoplado. Se compara la señal real (Medida con FLUKE 435 Serie II), con la señal reconstruida por medio del modelo de frecuencia que involucra la matriz de sensibilidad de la carga. El respectivo análisis se hizo para dos de los experimentos propuestos anteriormente: Taladro y Motor Jaula de Ardilla con variador de velocidad Schneider a velocidad de 1700 [rpm].

El estudio se hace para diferentes tensiones de alimentación. La gráfica en azul corresponde a la señal medida, mientras que la roja corresponde a la reconstruida con el modelo de frecuencia.

6.4.1 Taladro. De acuerdo al análisis gráfico Figura 98, Figura 99, Figura 100, Figura 101, Figura 102. Es evidente que la matriz de sensibilidad es una gran aproximación a la matriz de admitancias armónicas utilizada en los modelos de frecuencia de Norton y Norton acoplado.

Para el caso de esta carga, tanto el modelo de Norton como el modelo de Norton acoplado cumplen con un modelado altamente aproximado. Teniendo en cuenta que los cálculos son hechos con la matriz de sensibilidad en lugar de la matriz de admitancias.

Hacemos mención a que la gráfica de la Figura 101 y Figura 102, muestran la respuesta en corriente de la carga alimentada con una señal que contiene distorsiones armónicas de distinto orden. Y de igual manera el modelo logra una correcta reconstrucción de la señal.



Figura 98. Tensión de alimentación nominal 120 [V] con distorsión en tercer armónico a 12% en magnitud y 240° de fase respecto de la fundamental. Modelo de Norton acoplado.

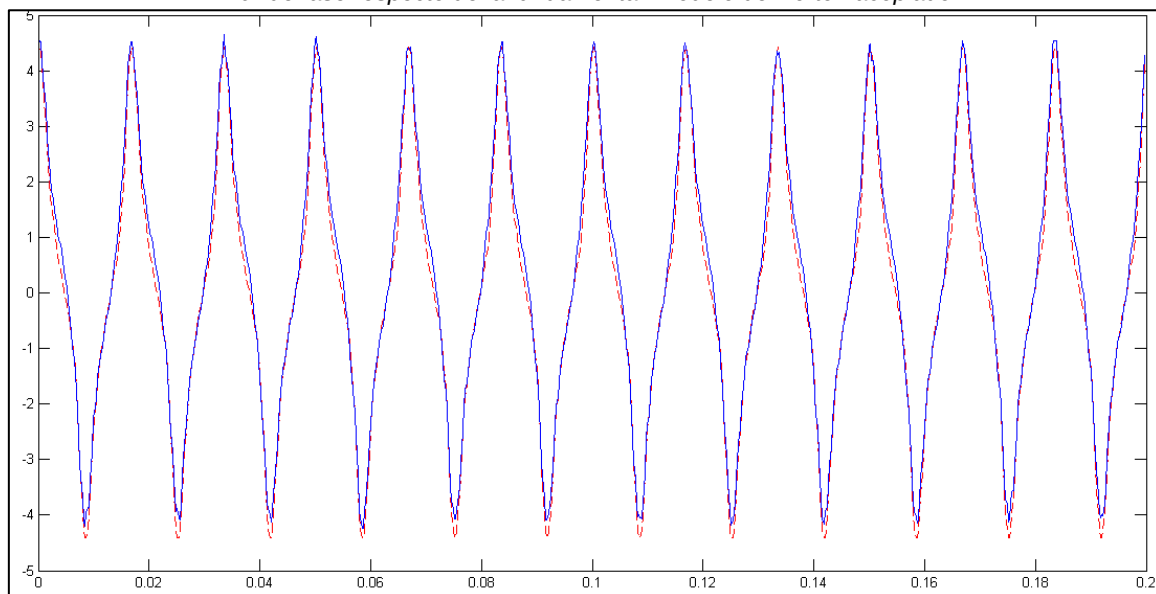
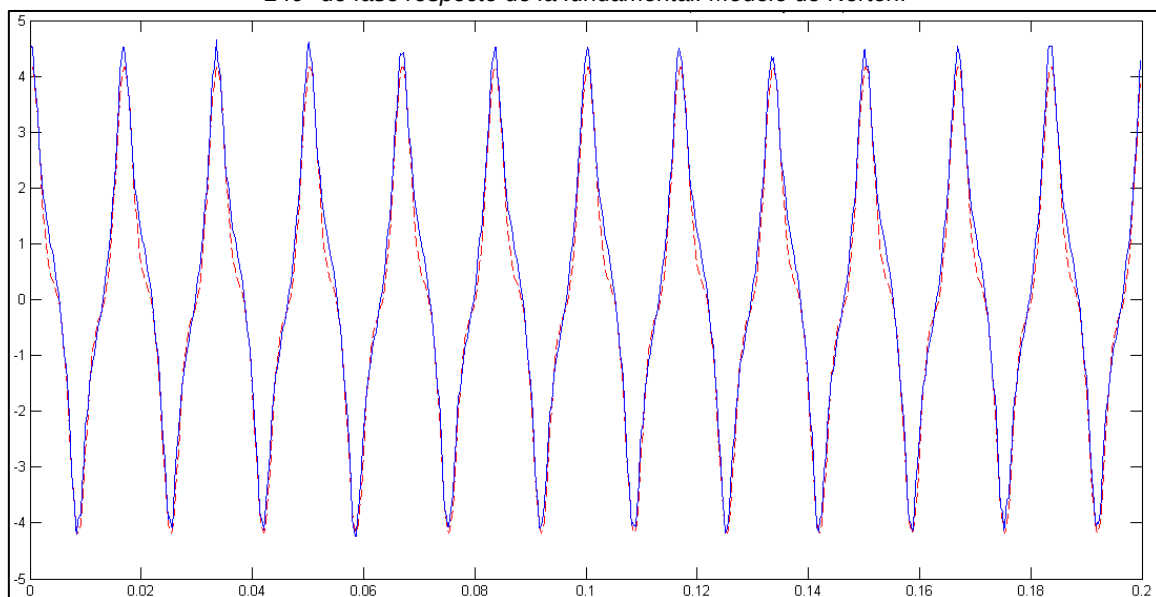


Figura 99. Tensión de alimentación nominal 120 [V] con distorsión en tercer armónico a 12% en magnitud y 240° de fase respecto de la fundamental. Modelo de Norton.





Se utiliza el THD (Total Harmonic Distorsion) y una comparación punto a punto, para comparar los errores entre la señal medida en la carga y la reconstrucción hecha a partir del modelo de Norton y Norton acoplado, bajo las mismas condiciones de alimentación y operación de la carga.

- THD para taladro de mano, señal medida, alimentado con tercer armónico.

$$\text{THD}_R = 25,32\%$$

- THD para taladro de mano, matriz de sensibilidad de (3, 5 y 7 armónico), modelo de Norton acoplado, alimentado con tercer armónico, Figura 98.

$$\text{THD}_{NA} = 29,15\% \text{ Error} = 15,12\% - \text{Resta punto a punto}$$

$$\text{Error} = 6,32\%$$

- THD para taladro de mano, matriz de sensibilidad de (3, 5 y 7 armónico), modelo de Norton, alimentado con tercer armónico, Figura 99.

$$\text{THD}_N = 28,42\% \text{ Er} = 12,24\% - \text{Resta punto a punto}$$

$$\text{Error} = 5,02\%$$

Figura 100. Distorsión en séptimo armónico a 12% en magnitud y 120° de fase respecto de la fundamental. Modelo de Norton.

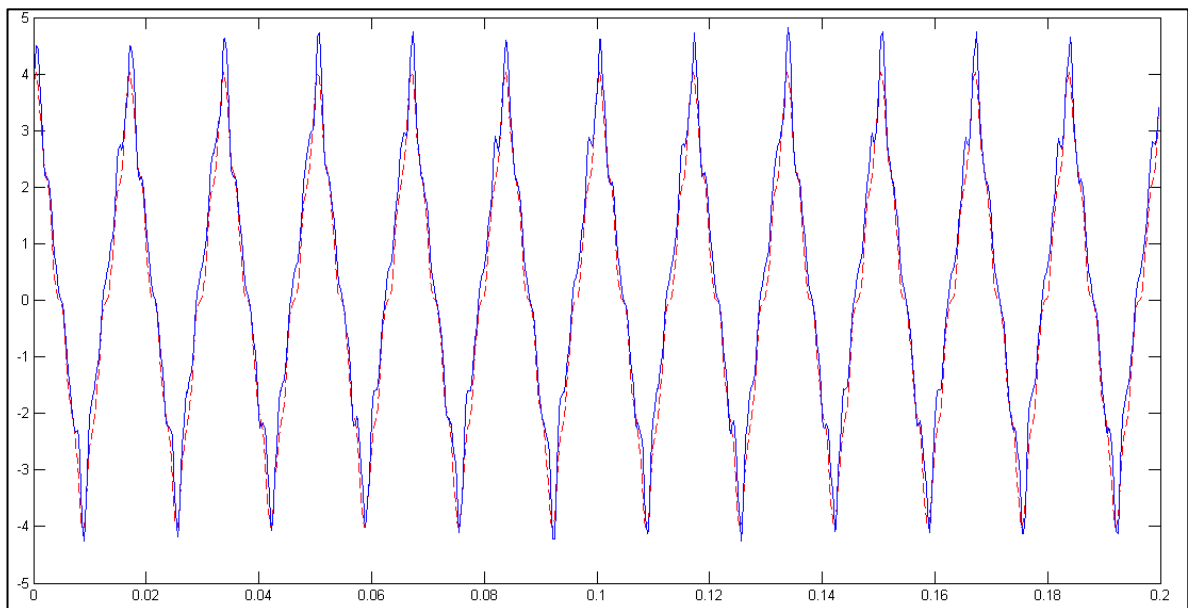




Figura 101. Distorsión en quinto armónico a 12% en magnitud y 210° de fase más séptimo armónico a 10% en magnitud y 300° de fase respecto de la fundamental. Modelo de Norton acoplado.

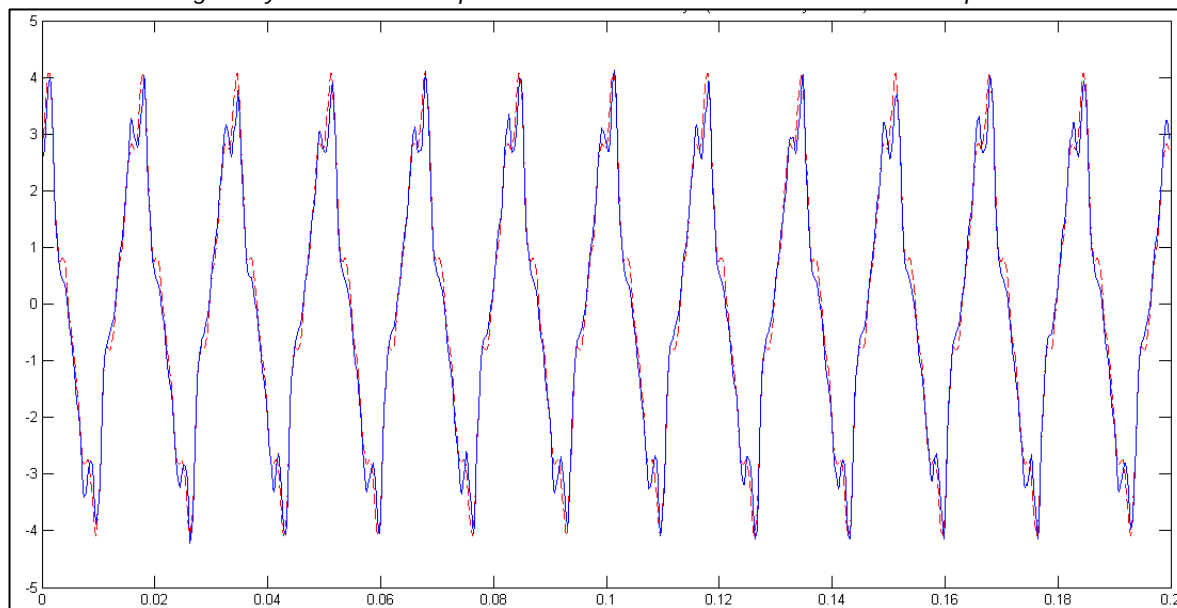
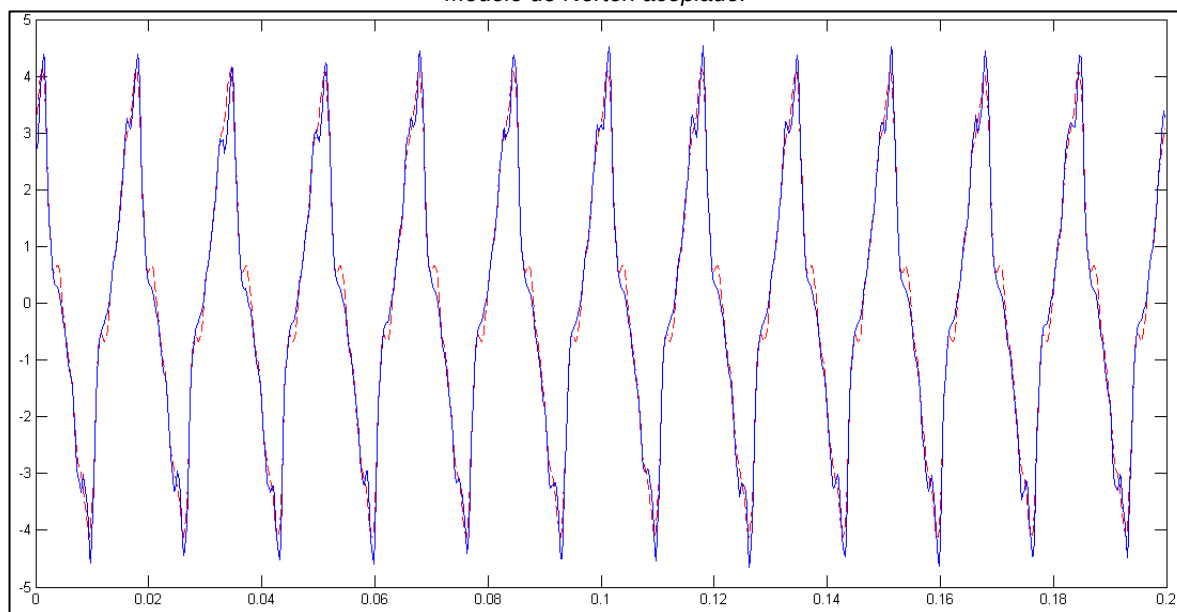


Figura 102. Distorsión en tercer armónico a 8% en magnitud y 150° de fase más quinto armónico a 12% en magnitud y 210° de fase y séptimo armónico a 10% en magnitud y 300° de fase respecto de la fundamental. Modelo de Norton acoplado.





- THD para taladro de mano, señal medida, alimentado con séptimo armónico, quinto más séptimo armónico, tercero más quinto más séptimo armónico, Figura 100, Figura 101, Figura 102.

$$\text{THD}_R=15,47\%, \text{THD}_R=30,09\%, \text{THD}_R=33,76\%.$$

- THD para taladro de mano, matriz de sensibilidad de (3, 5 y 7 armónico), modelo de Norton, alimentado con séptimo armónico, Figura 100.

$$\text{THD}_{NA}=20,47\% \text{ Error}=32,32\%$$

- THD para taladro de mano, matriz de sensibilidad de (3, 5 y 7 armónico), modelo de Norton Acoplado, alimentado con quinto más séptimo armónico, Figura 101.

$$\text{THD}_N=33,10\% \text{ Error}=10\%$$

- THD para taladro de mano, matriz de sensibilidad de (3, 5 y 7 armónico), modelo de Norton Acoplado, alimentado con tercer más quinto más séptimo armónico, Figura 102.

$$\text{THD}_{NA}=39,28\% \text{ Error}=16,35\%$$

6.4.2 Motor Jaula de Ardilla con variador de velocidad Schneider a velocidad de 1700 [rpm]. La Figura 103 muestra la reconstrucción de la señal a partir del modelo de Norton acoplado utilizando una matriz de sensibilidad que comprende solo los armónicos de orden 3, 5 y 7. En primera instancia, tomando sólo estos tres órdenes armónicos, la matriz de sensibilidad no refleja una buena aproximación. Pero como se ve en la Figura 104, al tomar una mayor ventana de órdenes armónicos (3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17 y 19) para armar la matriz de sensibilidad, se obtiene una buena aproximación en la reconstrucción de la señal.

Por lo anterior, para esta carga en particular, es necesario tener en cuenta la influencia de un número mayor de órdenes armónicos a comparación del experimento base, que solo toma 3, 5 y 7 armónico.

En la Figura 105 se observa la reconstrucción de la señal utilizando el modelo de Norton y tomando los órdenes armónicos 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17 y 19. En la cual también se ve una buena aproximación en la reconstrucción de la señal.

En la Figura 106, se hace un zoom de la Figura 104 y la Figura 105, con el fin de evidenciar cómo cambia el aspecto de la señal al utilizar el modelo de Norton (Figura 105) y Norton acoplado (Figura 104) para el mismo experimento en la reconstrucción de la señal. Es claro que, para este caso en particular, las diferencias son pocas entre un modelo y el otro.

Figura 103. Reconstrucción de la señal a partir del modelo de Norton Acoplado. Ordenes armónicos 3,5 y 7.

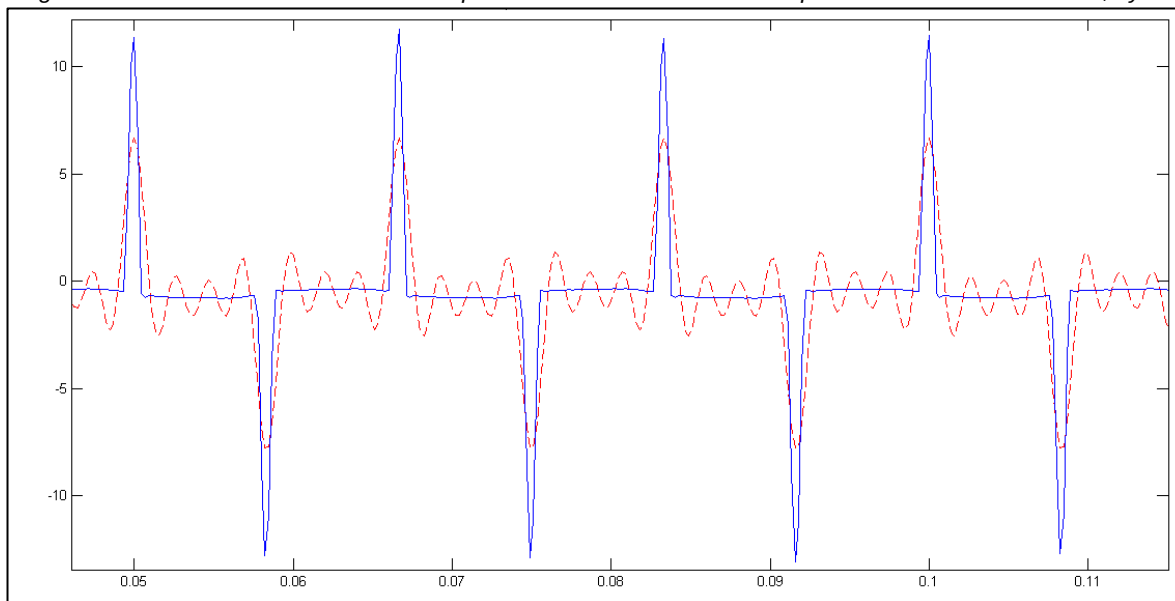


Figura 104. Reconstrucción de la señal a partir del modelo de Norton Acoplado. Ordenes armónicos 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17 y 19.

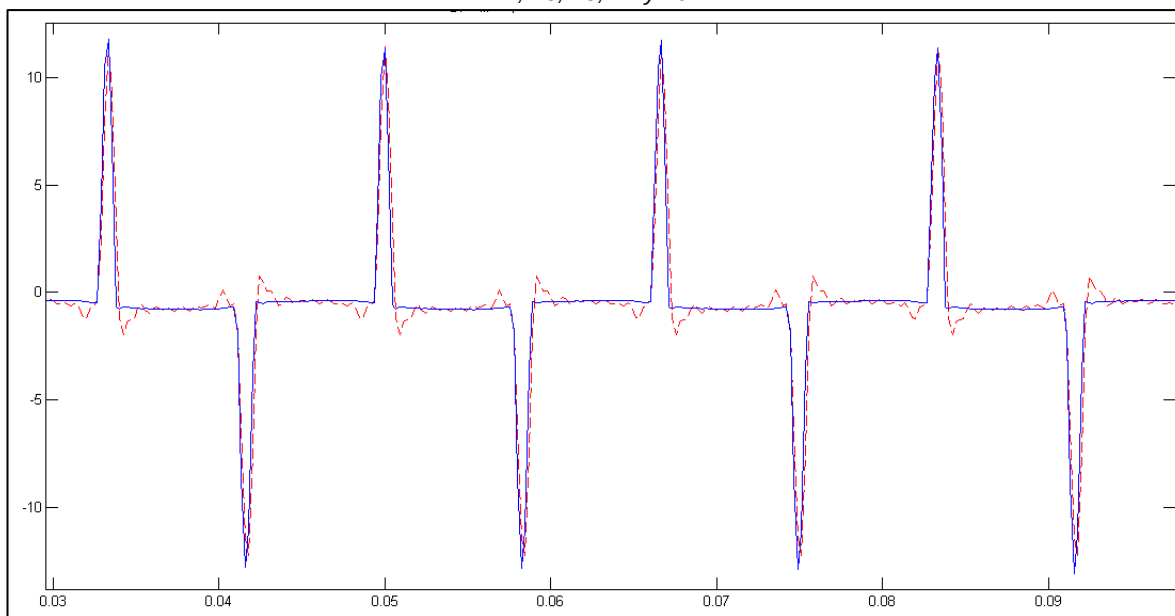
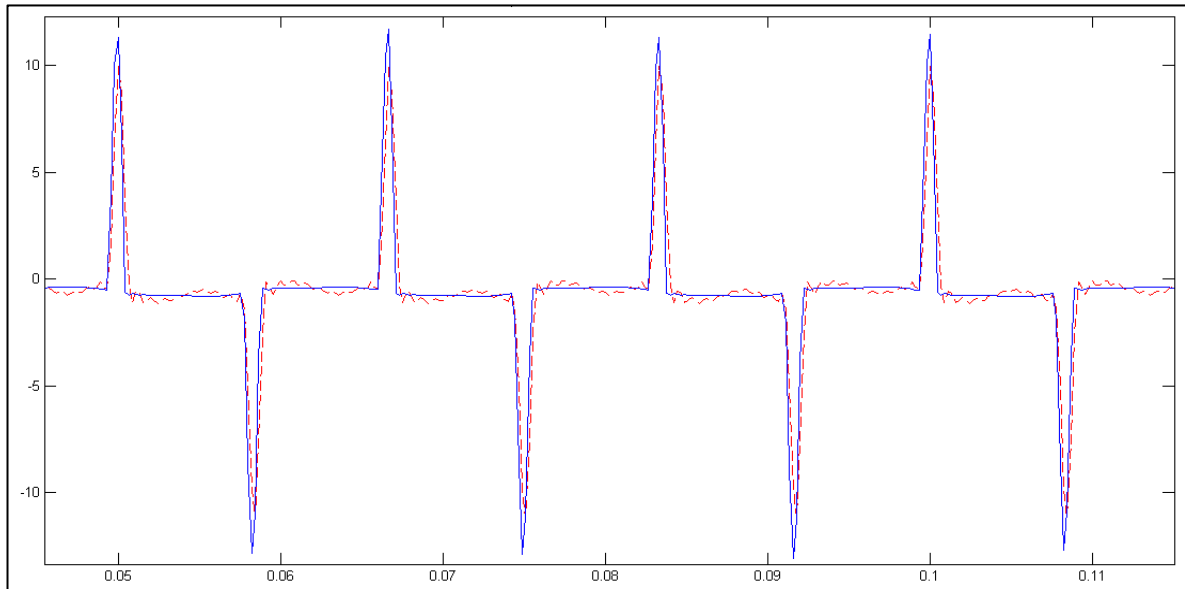


Figura 105. Reconstrucción de la señal a partir del modelo de Norton. Ordenes armónicos 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17 y 19.



Se utiliza el THD (Total Harmonic Distorsion) y una comparación punto a punto, para comparar los errores entre la señal medida en la carga y la reconstrucción hecha a partir del modelo de Norton y Norton acoplado, bajo las mismas condiciones de alimentación y operación de la carga.

- THD para motor jaula con variador Schneider, señal medida, alimentado con tercer armónico.

$$\text{THD}_R = 200,73\%$$

- THD para motor jaula con variador Schneider, matriz de sensibilidad de (3, 5 y 7 armónico), modelo de Norton acoplado, alimentado con tercer armónico, Figura 103.

$$\text{THD}_{NA} = 187,77\%, \text{ Error} = 6,5\% - \text{Resta punto a punto}$$

$$\text{Error} = 40,23\%$$

- THD para motor jaula con variador Schneider, matriz de sensibilidad de (3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17 y 19 armónico), modelo de Norton acoplado, alimentado con tercer armónico, Figura 104.

$$\text{THD}_{NA} = 227,601\%, \text{ Error} = 13,4\% - \text{Resta punto a punto}$$

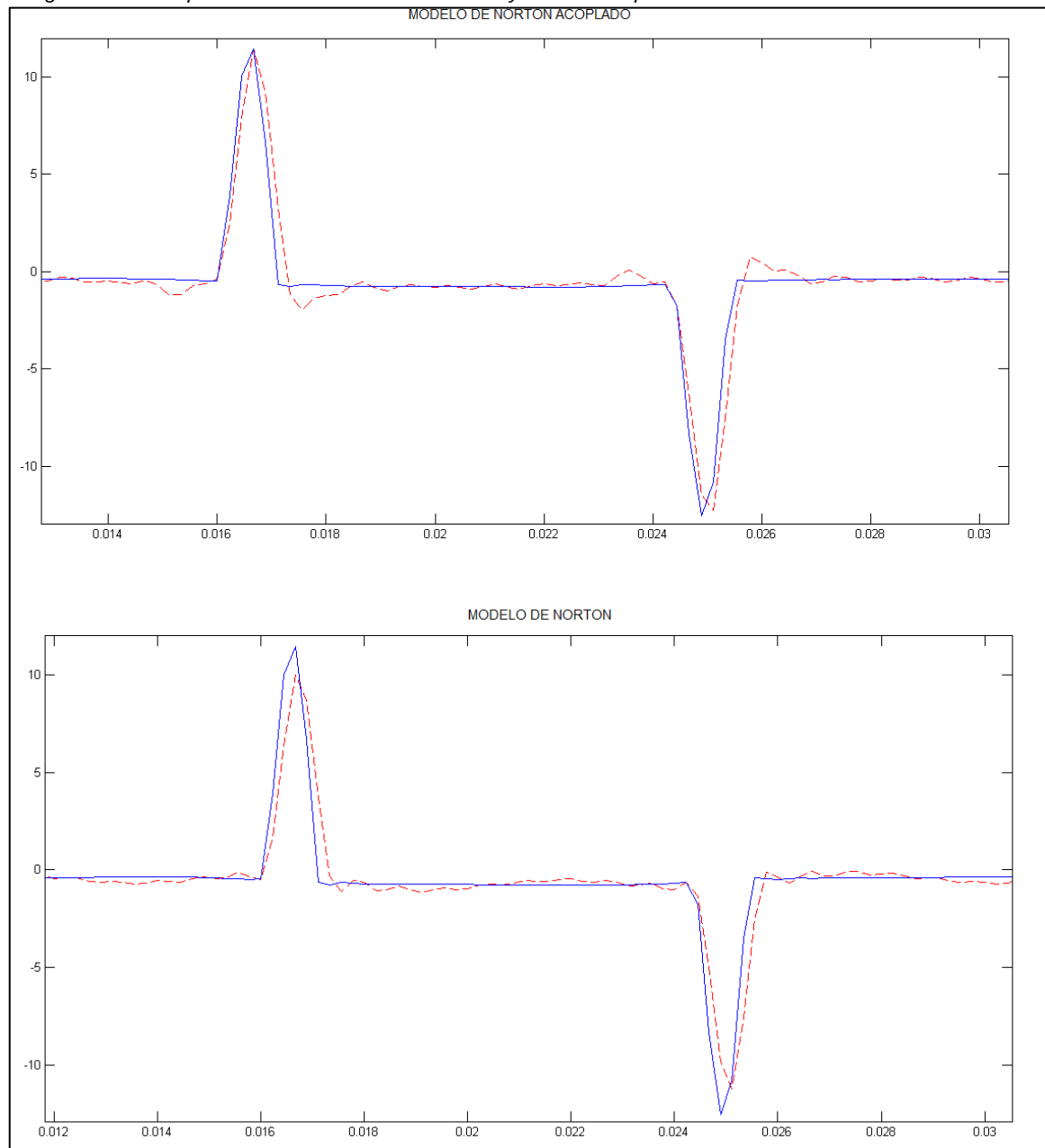
$$\text{Error} = 3,70\%$$



- THD para motor jaula con variador Schneider, matriz de sensibilidad de (3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17 y 19 armónico), modelo de Norton, alimentado con tercer armónico, Figura 105.

THD_N=198,17%, Error=1,3% - Resta punto a punto Error=5,66%

Figura 106. Comparación entre Modelo de Norton y Norton Acoplado utilizando la matriz de sensibilidad.





6.5 CONCLUSIONES

Para el caso de los motores trifásicos conectados en Y a tensión nominal, se puede concluir que al no haber una conexión física del neutro y la fuente, no hay influencia del tercer armónico circulando por el motor, debido a que los armónicos de secuencia cero son los que fluyen por la fase neutra.

En el caso del variador Eurotherm conectado con el motor jaula de ardilla, la influencia del tercer armónico es notoria. Pero se debe tener en cuenta que para ángulos de fase entre 90 y 270 grados es cuando hay baja asimetría de fase, y por este hecho la magnitud de la respuesta en corriente del tercer armónico aumenta claramente. De igual manera la influencia del tercer armónico en el quinto y séptimo para este tipo de variador es alta, ya que muestra magnitudes del mismo orden. Además de una influencia de los mismos ángulos de fase que aumentan la distorsión armónica.

Los resultados para el variador Eurotherm conectado con cualquiera de los dos motores, presentan una mayor magnitud de distorsión armónica de quinto orden, esto evidencia la influencia del quinto armónico en este tipo de variadores que es de 6 pulsos como se puede ver en el anexo B, donde se explican las características de los variadores utilizados en este trabajo de grado. De igual manera la influencia del quinto armónico sobre el tercero es alta dando como resultado magnitudes grandes sin importar el tipo de motor que se le conectó.

La respuesta del tercer y quinto armónico en corriente es bastante alta, habiendo gran sensibilidad cruzada entre estos dos armónicos más que con el séptimo para el variador Schneider. Su influencia de quinto armónico permite deducir que es de 6 pulsos como se explica en el anexo B. Y no cambia para los dos motores utilizados en las pruebas.

Se puede concluir también que, en los dos casos de variadores utilizados, para ángulos de fase de entre 90 y 270 grados, la magnitud de la distorsión armónica aumenta drásticamente sin importar el tipo de motor con el que se conectó. Aclarando claro está, que para el motor de inducción rotor devanado, la magnitud de la distorsión armónica evidenciada, es mayor que para la del motor de inducción jaula de ardilla.



REFERENCIAS

- [1] A. Mansoor , W. M. Grady , A. H. Chowdhury and M. J. Samotyi, "An investigation of harmonics attenuation and diversity among distributed single-phase power electronic loads," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, pp. 467 - 473, Jan 1995.
- [2] J. A. Suárez, G. F. Di Mauro, D. Anaut and C. Agüero, "Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales," *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, vol. 3, no. 5, pp. 429-435, DECEMBER 2005.
- [3] G. A. Malagon Carvajal, Evaluacion y prediccion del impacto de armonicos en sistemas de distribucion de baja tension mediante metodos estocasticos., BUCARAMANGA: Universidad Industrial de Santander, 18 de diciembre de 2014.
- [4] Amit Abraham and Willie A. Cronje, "Power quality surrounding Variable Speed Drives," in *Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa (PowerAfrica), 2012 IEEE*, Johannesburg, 9-13 July 2012.
- [5] E. C. Quispe Oqueña, "Efectos del Desbalance y los Armónicos de Voltaje en la Operación de los Motores de Inducción," in *Grupo de Investigación en Energías GIEN-UAO, Departamento de Energética y Mecánica*, Cali, Colombia..
- [6] A. M. CASTRO BELTRAN and E. RAMOS GONZALEZ, EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS EN LOS MOTORES DE INDUCCION., BOGOTA D.C.: Universidad De La Salle, 2008.
- [7] A. Mansoor , EPRI Power Electron. Applications Center, Knoxville and W. M. Grady, "Analysis of Compensation Factors Influencing the Net Harmonic Current Produced by Single-phase Non-Linear Loads," in *Harmonics and Quality of Power Proceedings, 1998. Proceedings. 8th International Conference On*, Athens, 14 Oct 1998-16 Oct 1998.
- [8] M.F. Romero-L, L.E. Gallego, S. Müller and J. Meyer, "Characterization of non-linear household loads for frequency domain modeling," *Ingenieria e Investigacion*, vol. 35, no. 1, pp. 65-72, November, 2015.
- [9] Chroma, *Manual of Programmable AC Power Source Model 61511/61512/61611/61612*, Vol. 1.1, 2009.
- [10] FLUKE, *Manual de uso de Fluke 434-II/435-II/437-II, Analizador trifásico de energía y calidad de la energía eléctrica*, FLUKE, Enero de 2012 rev.1 06/12 .
- [11] S. Müller, J. Meyer, P. Schegner and S. Djokic, "Harmonic Modeling of Electric Vehicle Chargers in Frequency Domain," in *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'15)*, La Coruña (Spain), 2015.



- [12] R. D. Patidar , I. I. o. T. R. Department of Electrical Engineering and S. P. Singh, "Harmonics estimation and modeling of residential and commercial loads," in *Power Systems, 2009. ICPS '09. International Conference on*, Kharagpur, 27-29 Dec. 2009.
- [13] B. N. , P. S. and R. P. F , "Harmonic Levels and Television Events," in *Power Engineering Society General Meeting. IEEE*, Tampa, FL, June 2007.
- [14] S. Cobben, W. Kling and J. Myrzik, "THE MAKING AND PURPOSE OF HARMONIC FINGERPRINTS," in *19th International Conference on Electricity Distribution*, Vienna, 21-24 May 2007.
- [15] Vladimir Cuk , Joseph F. G. Cobben, Wil L. Kling and Paulo F. Ribeiro, "Analysis of harmonic current summation based on field measurements," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 7, no. Issue: 12, pp. 1391 - 1400, December 2013.
- [16] W. G. Mansoor, "Analysis of compensation factors influencing the net harmonic current produced by single-phase nonlinear loads," in *IEEE, Harmonics and Quality of Power Proceedings, 1998. Proceedings. 8th International Conference On (Volume: 2),*, 1998.
- [17] E. S. M. L. a. H. M. L. Kutt, "Current harmonics of EV chargers and effects of diversity to charging load current distortions in distribution networks," in *IEEE, Connected Vehicles and Expo (ICCVE), 2013 International Conference on*, Date of Conference: 2-6 Dec., 2013.
- [18] A. M. Blanco , S. Yanchenko, J. Meyer and P. Schegner, "The impact of supply voltage distortion on the harmonic current emission of non-linear loads," *Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia*, vol. 82, no. 192, pp. 150-159, Agosto 2015.
- [19] M. Mora-Barajas and P. Bañuelos-Sánchez , "Harmonic Pollution Produced by Low Power Nonlinear Loads: mathematical model and practical cases," *Ingeniería Investigación y Tecnología.*, vol. XI, no. 2, pp. 189-198, 2010.
- [20] R. Redl and L. Balogh, "Power-factor correction in bridge and voltage-doubler rectifier circuits with inductors and capacitors," *IEEE, Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1995. APEC '95. Conference Proceedings 1995., Tenth Annual*, vol. 1, pp. 466 - 472, 5-9 Mar 1995.
- [21] Bhag S. Guru and Hüseyin R. Hiziroglu, Máquinas eléctricas y transformadores Tercera Edicion, Mexico: OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2003.
- [22] J. Fraile Mora, Máquinas Eléctricas, Aravaca(Madrid): McGrawHill, 2003.
- [23] C. A. J. , A. J. L. , H. B. P. and D. S. Z. , "Component-based aggregate load models for combined power flow and harmonic analysis," in *Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010), 7th Mediterranean Conference and Exhibition on*, Agia Napa, 7-10 Nov. 2010.



- [24] I. s. 519-2014, 519-2014 - *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, June 11 2014.
- [25] A. I. Maswood , Sch. of Electr. & Electron. Eng., Nanyang Technol. and Zhu Jun, "Attenuation and diversity effect in harmonic current propagation study," *Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE*, vol. 3, pp. 1480 - 1485, 13-17 July 2003.
- [26] John Grajales, José Ramírez and Diego Cadavid, "Efectos de los armónicos en los motores de inducción: una revisión," *Revista Facultad de Ingeniería*, no. 31, pp. 116-123, Junio, 2004.
- [27] E. F. Fuchs, University of Colorado, Boulder, CO, K. P. Kovacs and D. J. Roesler, "Aging of Electrical Appliances Due to Harmonics of the Power System's Voltage," *IEEE Power Engineering Review*, Vols. PER-6, pp. 65 - 66, July 1986, Date of Current Version :29 julio 2010.
- [28] Percy R. Viego, Vladimir Sousa, Julio R. Gómez and Marco A. de Armas, "Consideraciones sobre el efecto de los armónicos de tiempo en motores trifásicos asíncronos," *TRABAJOS TEORICOEXPERIMENTALES*, vol. XXIX, no. 1, 2008.
- [29] E. R. Collins , J. R. Shirley and J. Curtiss Fox, "An experimental investigation of third harmonic current distortion in single-phase induction motors," in *IEEE, 2008 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Wollongong, NSW, Sept. 28 2008-Oct. 1 2008.
- [30] D. Sasa Z. and C. Adam J. , "Cancellation and attenuation of harmonics in low voltage networks," in *2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Bucharest, 25-28 May 2014.
- [31] Ayush Bhandari , Pina Marziliano and Temasek Labs., Nanyang Technol. Univ., Singapore, , "Sampling and Reconstruction of Sparse Signals in Fractional Fourier Domain," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 17, no. Issue: 3, pp. 221 - 224, 30 octubre 2009.
- [32] Kaveh Malekian , Chemnitz Univ. of Technol., Chemnitz, Germany , Akif Gürlek and Wolfgang Schufft, "Analysis and modeling of time-varying harmonics in frequency domain," in *2015 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE)*, Costa da Caparica, 24-26 June 2015.
- [33] I. 61000-3-2, *IEC 61000-3-2, «Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)*, Vol. 3.2, 2009.
- [34] Sasa Vlahinic , . U. o. R. R. Dept. of Autom., Electron. & Comput., Dalibor Brnobic and Nino Stojkovic, "Indices for Harmonic Distortion Monitoring of Power Distribution Systems," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, no. Issue: 5, pp. 1771 - 1777, 09 enero 2009, Date of Current Version :07 abril 2009.



- [35] Anna S. Fölting, Johanna M. A. Myrzik and Thomas Wiesner, "Practical implementation of the coupled norton approach for nonlinear harmonic models," in *Power Systems Computation Conference*, 18-22 Aug. 2014.
- [36] A. S. Koch, J. M. A. Myrzik and T. Wiesner, "Evaluation and validation of Norton approaches for nonlinear harmonic models," in *PowerTech (POWERTECH)*, 2013 *IEEE Grenoble*, 16-20 June 2013.



BIBLIOGRAFÍA

ROMERO, M... *et al* Characterization of non-linear household loads for frequency domain modeling. *Ingenieria e Investigacion*, vol. 35, no. 1, pp. 65-72, November, 2015.[cited: 4 Nov. 2016] Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S012056092015000400010&lng=en&nrm=iso&tlng=en

MÜLLER, S... *et al* Harmonic Modeling of Electric Vehicle Chargers in Frequency Domain. in *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'15)*, La Coruña (Spain), 2015 [cited: 4 Nov. 2016] Disponible en: <http://www.icrepq.com/icrepq'15/337-15-mueller.pdf>

MANSOOR, A... *et al* Analysis of compensation factors influencing the net harmonic current produced by single-phase nonlinear loads. in *IEEE, Harmonics and Quality of Power Proceedings, 1998. Proceedings. 8th International Conference On (Volume: 2)*, [cited: 5 Nov. 2016] Disponible en: <http://ezproxy.uis.edu.co:2237/document/760159/>

COBBEN, Sjeff; KLING, Wil; MYRZIK, Johanna THE MAKING AND PURPOSE OF HARMONIC FINGERPRINTS, in *19th International Conference on Electricity Distribution*, Vienna, 21-24 May 2007. [cited: 5 Nov. 2016] Disponible en: http://www.cired.net/publications/cired2007/pdfs/CIRED2007_0764_paper.pdf

BLANCO, Ana Maria... *et al* The impact of supply voltage distortion on the harmonic current emission of non-linear loads, *Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia*, vol. 82, no. 192, pp. 150-159, Agosto 2015. [cited: 5 Nov. 2016] Disponible en: <http://www.crossref.org/iPage?doi=10.15446%2Fdyna.v82n192.48591>

BHANDARI, Ayush; MARZILIANO, Pina; Sampling and Reconstruction of Sparse Signals in Fractional Fourier Domain, *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 17, no. Issue: 3, pp. 221 - 224, 30 octubre 2009. [cited: 6 Nov. 2016] Disponible en: <http://ezproxy.uis.edu.co:2237/document/5299025/>

KOCH, A. S... *et al* Evaluation and validation of Norton approaches for nonlinear harmonic models, in *PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE Grenoble*, 16-20 June 2013. [cited: 7 Nov. 2016] Disponible en: <http://ezproxy.uis.edu.co:2237/document/6652270/>

FÖLTING, Anna S... *et al* Practical implementation of the coupled norton approach for nonlinear harmonic models," in *Power Systems Computation Conference*, 18-22 Aug. 2014. [cited: 8 Nov. 2016] Disponible en: <http://ezproxy.uis.edu.co:2237/document/7038372/>



MALAGON C.; Gabriel A.; Evaluacion y prediccion del impacto de armonicos en sistemas de distribucion de baja tension mediante metodos estocasticos.", BUCARAMANGA: Universidad Industrial de Santander, 18 de diciembre de 2014.

ANEXOS

ANEXO A. PROGRAMACIÓN DE LA FUENTE CHROMA

La fuente Chroma tiene una interfaz en inglés, su menú es sencillo a la hora de ser programada y brinda al operario una gran variedad de formas de onda, ya sean las predeterminadas en la fuente, o creadas manualmente. Además, proporciona tensión en corriente alterna $1\phi/3\phi$, y en corriente directa.

Entre las formas de onda predeterminadas por la fuente estala Flat-top y la Point-top. También permite manipular a conveniencia, el nivel de distorsión en la onda de tensión de salida.

A continuación, presentaremos los pasos de programación de la fuente para obtener una salida en corriente alterna ya sea monofásica o trifásica, según el caso a experimentar.

Figura 107. Fuente Chroma.



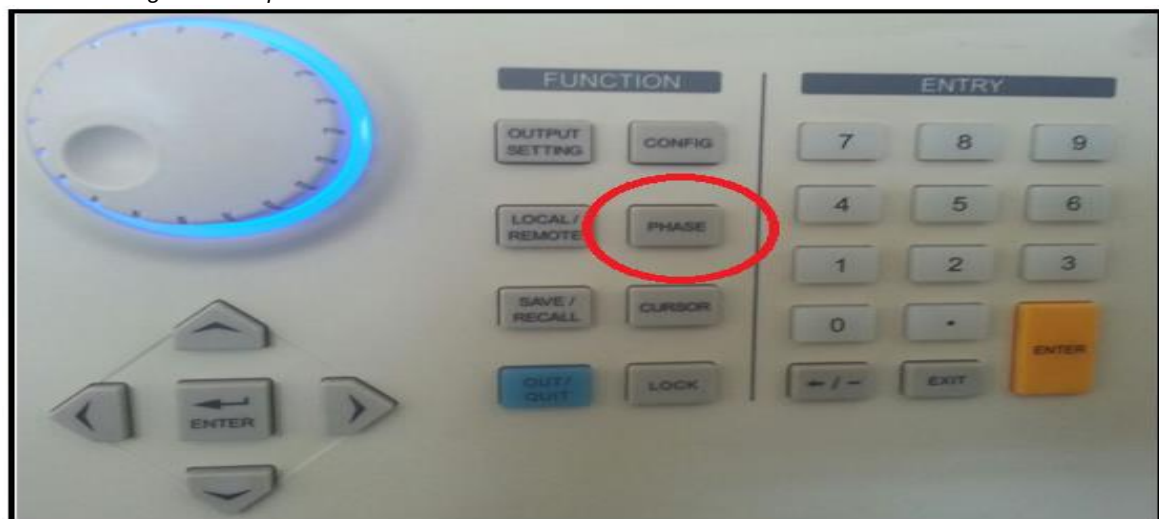
1) Encendido de la fuente

Figura 108. Interfaz de la fuente, botón de encendido.



2) Selección de modo monofásica o trifásica.

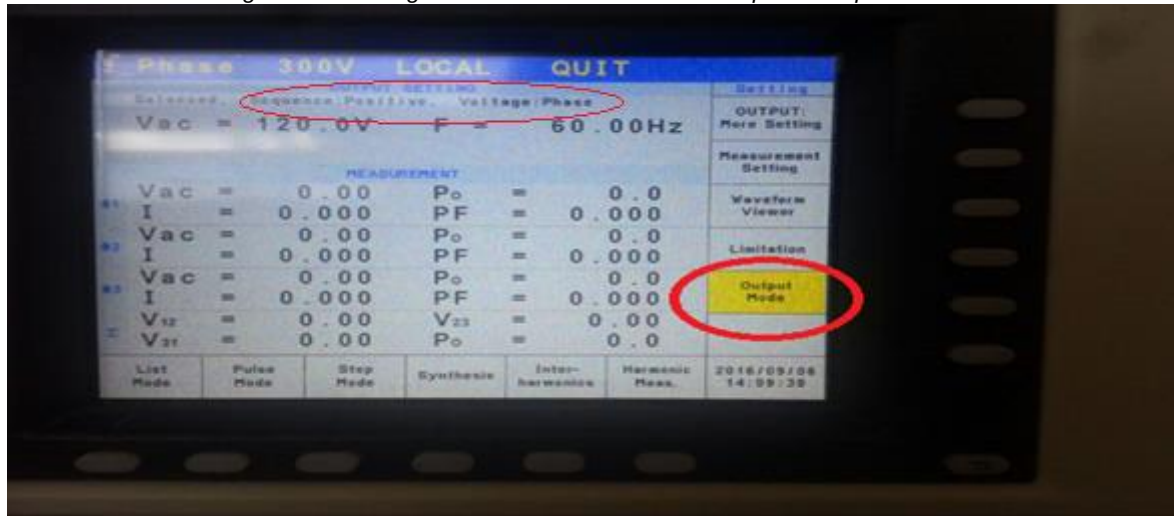
Figura 109. Opción monofásica o trifásica de la fuente Chroma. Cursores de la fuente.



Al pulsar el botón PHASE, en la pantalla nos saldrán las opciones de 1 ϕ o 3 ϕ . Seleccionamos la opción deseada.

3) Configuración de la onda de salida.

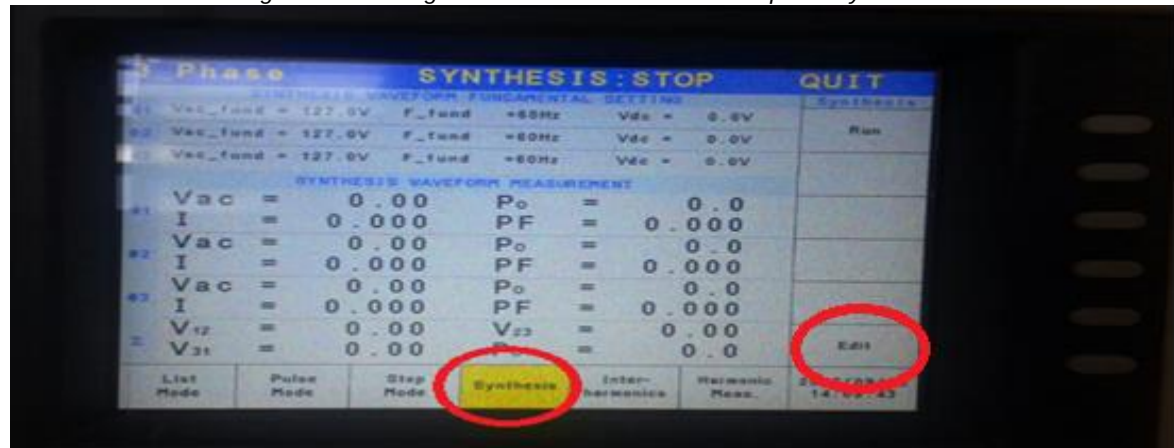
Figura 110. Configuración de la onda de salida. Opción Output Mode.



En la parte superior podemos observar la secuencia y la tensión a configurar, en este caso se configura la tensión de fase.

Pulsamos la opción OUTPUT MODE mostrada en la imagen.

Figura 111. Configuración de la onda de salida. Opción Synthesis.



Luego entramos y seleccionamos la opción SYNTHESIS mostrada en pantalla. Finalmente pulsamos EDIT para acceder a la magnitud y ángulo de fase de la tensión fundamental y de las componentes armónicas deseadas.

Hasta el momento, el procedimiento es el mismo para una salida monofásica, más adelante se indicará si existe alguna variante para el caso 1 ϕ .

4) Opciones internas en la interfaz de la configuración de la onda.

Figura 112. Datos de la onda de salida. Opciones necesarias para configuración.



Estas son todas las opciones relevantes para la configuración de la onda de salida.

- Vac fundamental: Valor de la tensión fundamental a inyectar a la carga. Recordemos que el valor programado es el de la tensión de fase (Figura 110).
- Degree: Este es el ángulo de fase de la onda fundamental. Es necesario tener cuidado con la opción superior derecha de la pantalla EDIT ALL, ya que los valores programados se aplican a todas las fases, incluyendo el ángulo de referencia, y recordemos que un sistema trifásico balanceado cada una de las fases están desfasadas 120° entre sí.
- Edit ALL: Esta opción puede ser modificada con los cursores mostrados en la Figura 109. Si se encuentra en ALL modifica todas las fases en opción 3 ϕ , pero también muestra 1 ϕ , 2 ϕ y 3 ϕ , lo que hace alusión a cada fase por separado de la señal de salida.
- Como podemos observar en la Figura 112, tenemos un ejemplo de quinto armónico, doce por ciento y sesenta grados con respecto a la señal fundamental. No es



necesario desfazar el ángulo del armónico, ya que la fuente se encarga automáticamente de hacerlo en todas las fases.

- View Waveform: Permite visualizar la forma de la onda en cualquier estado de la configuración.
- Execution Page: Si pulsamos esta opción salimos de la configuración de la onda y regresamos a la parte mostrada en la Figura 111. Si pulsamos EXECUTION PAGE, salimos sin perder la configuración hecha anteriormente ya que queda guardada automáticamente.
- Una vez finalizado todo, la fuente queda lista para arrojar la onda, para esto pulsamos RUN Figura 111.

ANEXO B. MONTAJE DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES EN EL LABORATORIO

Como se explicó en el capítulo 5, este proyecto de grado consiste en alimentar cargas de manera individual, haciendo un barrido de magnitud y ángulo de fase para armónicos de orden 3,5 y 7, con el fin de evidenciar el comportamiento en corriente. A continuación, se describen los montajes y los equipos utilizados en el laboratorio.

- Motor jaula de ardilla en vacío, con arranque por resistencias.

Se alimentó con la fuente Chroma, un motor de inducción jaula de ardilla trifásico en conexión Y a 220 [V] en vacío. Debido a que la corriente de arranque puede alcanzar un valor entre 2,5 a 3 veces la corriente nominal, fue necesario utilizar una resistencia de arranque por fase para limitar la corriente Figura 113 b. Transcurrido el transitorio del arranque, se toma la medida de tensión y corriente absorbida por la carga en estado estable Figura 114.

Figura 113. (a) Motor de inducción jaula de ardilla. (b) Resistencia de arranque.

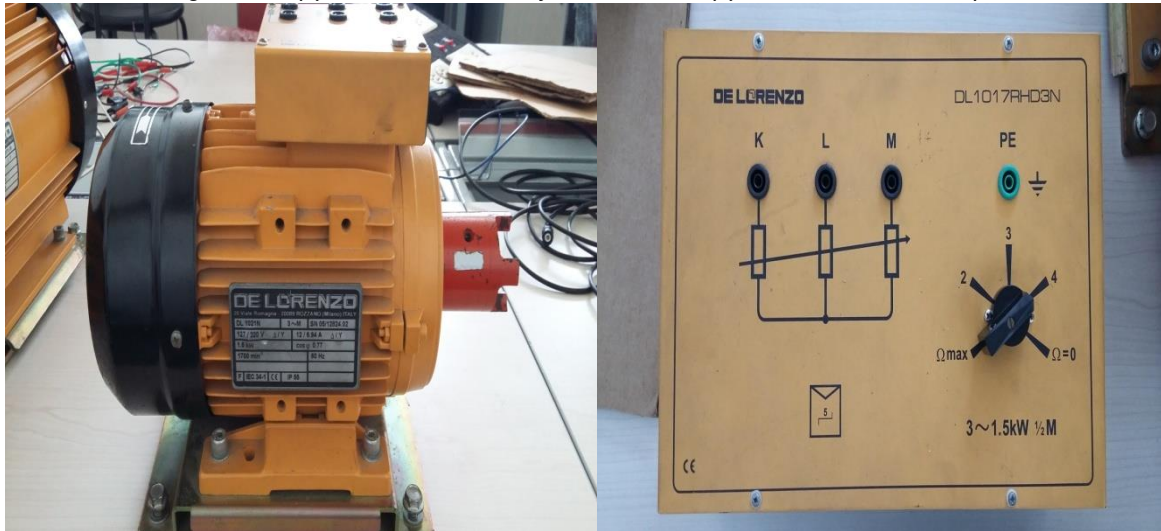


Figura 114. Montaje de motor jaula de ardilla con resistencias de arranque.



- Motor de inducción rotor devanado en vacío, con arranque por resistencias.

Se alimentó con la fuente Chroma, un motor de inducción rotor devanado trifásico en conexión Y a 220 [V] en vacío. Debido a que la corriente de arranque puede alcanzar un valor entre 2,5 a 3 veces la corriente nominal, fue necesario utilizar una resistencia de arranque por fase para limitar la corriente. Transcurrido el transitorio de arranque, se toma medida de tensión y de corriente absorbida por la carga en estado estable Figura 115.

Figura 115. Montaje de motor rotor devanado, resistencias de arranque y equipo de medida Fluke 435.



- Motor jaula de ardilla en vacío, arrancado por medio de variador de velocidad.

En esta prueba se conectó el motor a través del variador de velocidad Eurotherm, el cual fue alimentado monofásicamente a la fuente Chroma. La tensión fue de 220 [V] para el variador y la salida al motor fue trifásica. Esta prueba se llevó a cabo para dos velocidades, la nominal 1700 [rpm] y 1352 [rpm] Figura 116.

De igual forma se repitió la prueba para el variador de velocidad Schneider Telemecanique, con las dos velocidades de 1680 y 1336 [rpm] Figura 117. Se configuró una rampa de aceleración y descenso de 5 [Seg] en los dos variadores y se inició la toma de medida una vez el motor se encontrará en estado estable.

Figura 116. Conexión motor jaula, variador Eurotherm y equipo de medida Fluke 435.



Figura 117. Conexión motor jaula, variador Schneider y equipo de media Fluke 435.



- Motor de inducción rotor devanado en vacío, arrancado por variador de velocidad.

A este tipo de motor se le practicó la misma prueba de laboratorio explicada para el motor de jaula de ardilla con los dos variadores de velocidad Figura 118, Figura 119. El cambio en este motor es su velocidad nominal de 1680 [rpm] y la segunda velocidad de prueba fue de 1336 [rpm]. La rampa de aceleración y descenso fue la misma que para el caso anteriormente nombrado.

Figura 118. Conexión motor rotor devanado, variador Eurotherm y equipo de media Fluke 435.



Figura 119. (a) Motor de inducción rotor devanado. (b) Variador de velocidad Schneider.



➤ Taladro de mano.

Se alimentó con la fuente Chroma un taladro de mano monofásico marca Black & Decker de 500 [W] a 120 [V] Figura 120. Se le aplico un barrido de tensión fundamental con porcentaje armónico y cambio del ángulo de fase en función de la señal fundamental, se tomaron medidas una vez la carga se encontraba en funcionamiento de estado estable.

Figura 120. Taladro de mano conexión monofásico.



➤ Variador de velocidad marca Eurotherm.

La configuración del variador se hace con los cursores mostrados en la Figura 121, al pulsar al mismo tiempo los botones celestes para desplazamiento, el variador nos permite realizar manualmente la configuración de varios parámetros importantes como la corriente de limitación, rampa de subida y bajada, frecuencia de funcionamiento asociada a la velocidad del motor. Una vez configurado a conveniencia, sostenemos los mismos dos botones celestes durante unos segundos hasta que la pantalla muestre que se han guardado los cambios y nos dirija a la pantalla de inicio donde el variador está listo para funcionar. Con el botón rojo M le damos marcha al motor conectado y con el botón verde E paramos. Cuenta con dos entradas para conexión monofásica y una conexión a tierra, además tres salidas para conexión trifásica (Motor).

Figura 121. Variador de velocidad 1.



➤ Variador de velocidad marca Schneider.

En este variador podemos configurar varios parámetros, entre los más relevantes encontramos los datos de placa del motor a conectar, protección térmica, protección contra corriente de sobrecarga, protección contra corriente de cortocircuito, rampas de subida y bajada. Además, es necesario configurar las señales lógicas, debido a que el control de arranque/parada en este modelo sólo se puede hacer con una entrada de DC. Por esta razón se utilizó adicionalmente una fuente de corriente directa de máximo 24 voltios (especificaciones internas) y la para el control de velocidad un potenciómetro de 10 [kΩ].

Figura 122. Variador de velocidad 2.



Tabla 42. Contenido armónico típico para convertidores de 6 y 12 pulsos.

6 Pulsos		12 Pulsos	
Armónicos	AMP. %	Armónicos	AMP.%
5	20	5	-
7	14,29	7	-
11	9,09	11	9,09
13	7,69	13	7,69
17	5,88	17	-
19	5,26	19	-
23	4,35	23	4,35
25	4	25	4
29	3,45	29	-
31	3,23	31	-
35	2,86	35	2,86
37	2,7	37	2,7

Figura123. Espectro armónico, respuesta ante una señal fundamental, variador Eurotherm.

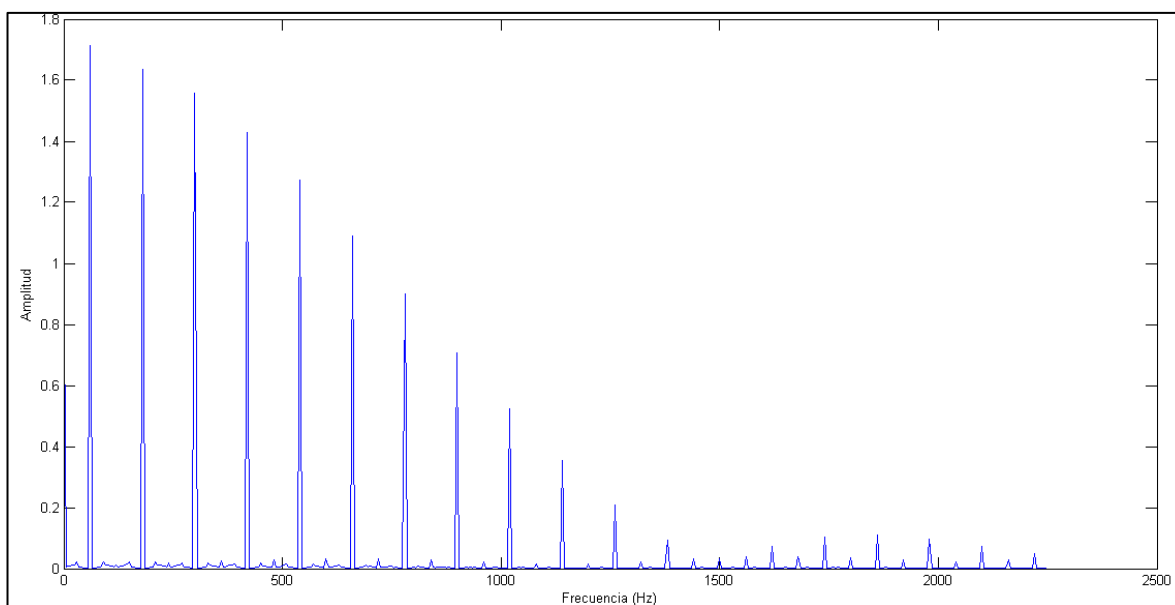
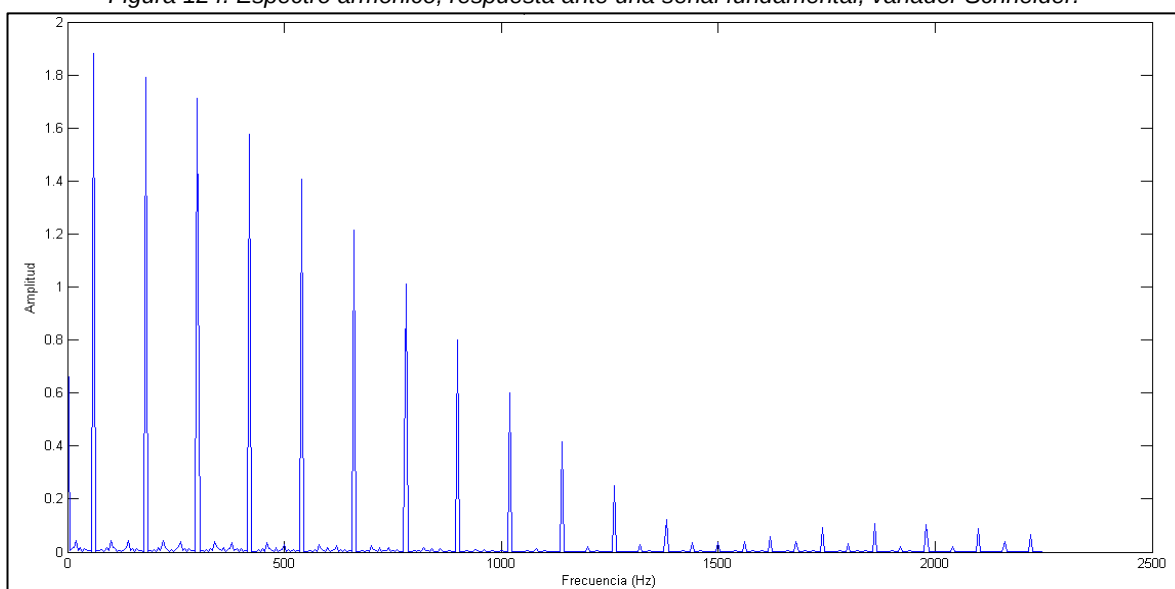


Figura 124. Espectro armónico, respuesta ante una señal fundamental, variador Schneider.



En la

Figura 123 y Figura 124, se observan los espectros de corriente para el motor de inducción jaula de ardilla conectado con cada uno de los variadores de velocidad. La respuesta de los órdenes armónicos más influyentes son el 5 y 7 con respecto a los de mayor orden como por ejemplo el 11 y 13, esto describe un comportamiento para un variador de 6 pulsos Tabla 42, como es el caso de los utilizados en este proyecto de grado.

- Fuente de corriente directa (DC).

Fuente de DC doble marca Protek, serie 3015B. Con una capacidad máxima de 0 a 30 [Vdc] ajustables, con la posibilidad de conexión a tierra.

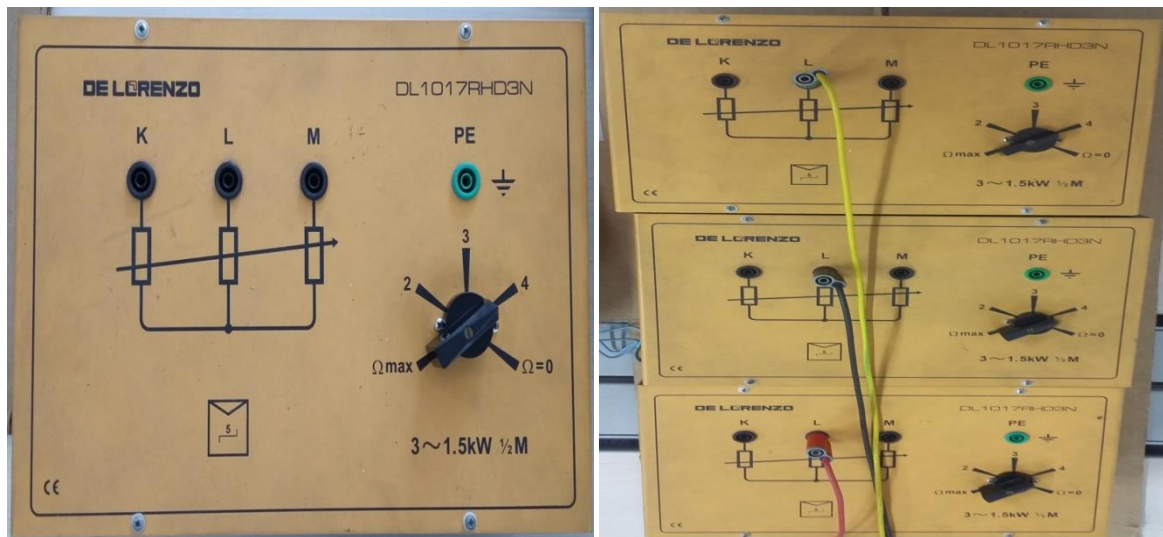
Figura 125. Fuente de DC.



- Resistencia de arranque.

Resistencia marca De Lorenzo serie DL1017RHD3N de 3-1.5 [kW].

Figura 126. Resistencia monofásica de arranque De Lorenzo.



ANEXO C. PROGRAMACIÓN DEL EQUIPO DE MEDIDA FLUKE 435 SERIE II

El Fluke 435 serie II es el equipo utilizado en la toma de datos de los experimentos propuestos en el laboratorio para este proyecto de grado. Su confiabilidad es bastante alta, además de su calidad de medida y las múltiples opciones para medir la calidad de la energía. A continuación, se dará una explicación de la configuración necesaria del equipo, para realizar la medición de los casos propuestos con el tema de la distorsión armónica en tensión y corriente.

Primero encendemos en equipo pulsando el botón verde de la Figura 127(a), luego nos aparece la interfaz mostrada en la figura. Pulsamos SETUP Figura 127 (b) para acceder a la configuración del tipo de conexión, pinzas amperimétricas, tensión nominal, umbral de eventos, estándar de referencia de medida para calidad de la energía, frecuencia y acceso de a la memoria de almacenamiento, entre otros.

Figura 127. Botón (a) Encendido. (b) Setup.



Ahora pulsamos F3 y de esta forma seleccionamos la opción SETUPWIZARD Figura 128 (a). Encontramos el tipo de conexión realizada en la carga, pulsando F4 en la opción CHANGE se puede cambiar a conveniencia. Pulsando F5 en la opción NEXT Figura 128 (b) se puede acceder a la configuración de la pinza de corriente utilizada para medir (este opción es muy importante, debido a que dependiendo de la cantidad de corriente que se maneje las pinzas varían de escala).

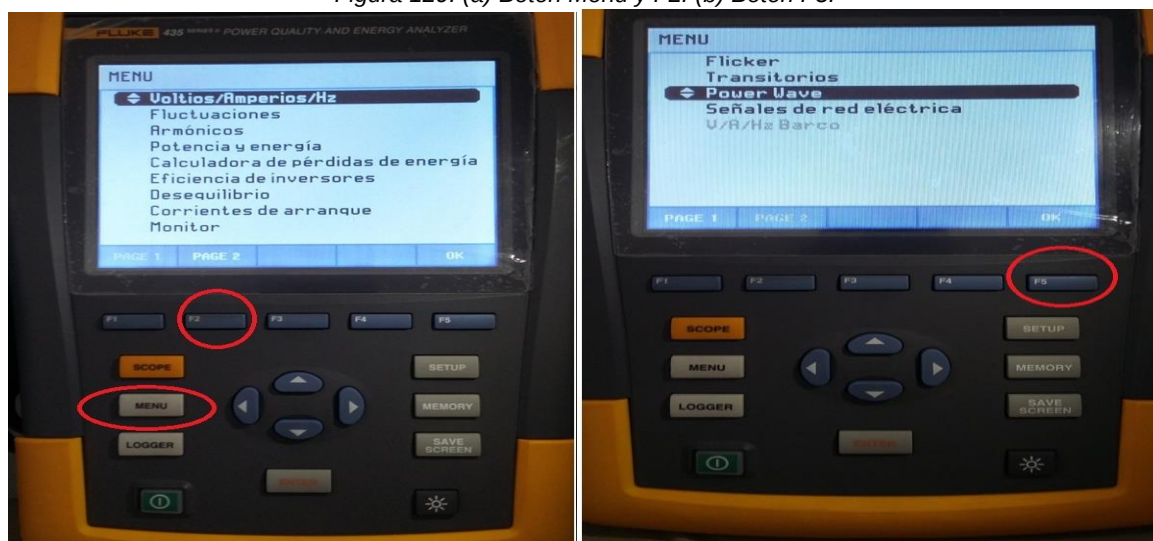
Si oprimimos F5 nuevamente en la opción NEXT, aparecerán los parámetros de voltaje, umbral de eventos y estándares de calidad de la energía. Para este caso la única variable a tener en cuenta es la tensión asignada para la carga.

Figura 128. (a) Botón F3, F4 y F5. (b) Configuraciones.



Una vez configurado todo, pulsamos la tecla Menú Figura 129 (a). De esta manera podemos ver las diferentes formas de medida con las que cuenta el aparato, ahora pulsamos la tecla F2 en Page 2 y seleccionamos POWER WAVE con la tecla F5 Figura 129. Se tomó la opción POWER WAVE debido a que permite acceder a la forma de onda a la hora de descargar los datos en el controlador.

Figura 129. (a) Botón Menú y F2. (b) Botón F5.



Una vez se empieza a medir pulsando la tecla F5, nos debe aparecer en la pantalla el tiempo de medida y la línea de continuidad de señal que se está midiendo (estabilidad de la señal medida en el nivel de voltaje de funcionamiento) Figura 130. Para guardar la medida pulsamos la tecla F5 en la opción HOLD RUN y por último GUARDAR.

Figura 130. Interfaz de medida en la pantalla.

