

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**COMPARACIÓN ENTRE LA METODOLOGÍA DE
ENSAYOS PROPUESTOS POR LAS NORMAS
INTERNACIONALES IEC Y ANSI/IEEE PARA
CARACTERIZAR LAS MÁQUINAS SINCRÓNICAS**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. John J. Rangel G.
para optar al título de
Ingeniero Electricista

Caracas, 2013

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

COMPARACIÓN ENTRE LA METODOLOGÍA DE ENSAYOS PROPUESTOS POR LAS NORMAS INTERNACIONALES IEC Y ANSI/IEEE PARA CARACTERIZAR LAS MÁQUINAS SINCRÓNICAS

Prof. Guía: Ing. Julián Pérez

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. John J. Rangel G.
para optar al título de
Ingeniero Electricista

Caracas, 2013

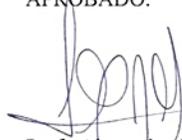
CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Caracas, 26 de junio de 2013

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller John J. Rangel G., titulado:

**“COMPARACIÓN ENTRE LA METODOLOGÍA DE ENSAYOS
PROPUESTOS POR LAS NORMAS INTERNACIONALES IEC Y
ANSI/IEEE PARA CARACTERIZAR LAS MÁQUINAS SINCRÓNICAS”**

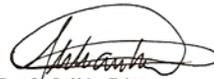
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Electricista en la mención Potencia, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



Prof. Alexander Cepeda
Jurado



Prof. Patricia Sánchez
Jurado



Prof. Julián Pérez
Prof. Guía

DEDICATORIA

A mis Madre, quien con su bendición, amor incondicional y paciencia ha servido de soporte e impulso tanto en mí formación profesional y como persona.

A mi Padre, por ayudarme a alcanzar este importante logro en mi vida.

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradezco a Dios por darme fortaleza, constancia y perseverancia en mis estudios, ayudándome en todo momento a alcanzar mis sueños y mis metas.

A mi tutor y para aquellos profesores por haberme brindado sus consejos y orientación en el desarrollo de este proyecto.

A mis compañeros de clases por su apoyo, por haber compartido tantas experiencias y gratos momentos en el transcurso de la carrera.

Rangel G., John J.

**COMPARACIÓN ENTRE LA METODOLOGÍA DE
ENSAYOS PROPUESTOS POR LAS NORMAS
INTERNACIONALES IEC Y ANSI/IEEE PARA
CARACTERIZAR LAS MÁQUINAS SINCRÓNICAS**

Profesor Guía: Julián Pérez. Tesis. Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Ingeniero Electricista. Opción: Potencia. Institución: UCV. 2013, 172 h. +anexos.

Palabras claves: Comparación entre las metodologías de ensayos, Máquinas Sincrónicas, IEEE, IEC, ángulo de carga.

Resumen: Se realizó una comparación entre las metodologías de ensayos propuestos por las normas IEC y ANSI/IEEE para caracterizar a las Máquinas Sincrónicas ubicados en el Laboratorio de Máquinas Rotativas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la U.C.V. En primer lugar, se hace una descripción general sobre las distintas pruebas y mediciones que recomiendan las normas bajo estudio y ver la posibilidad o no de su aplicación, en base a los equipos de medición e instrumentos que se requieren. En segundo lugar, se hace un análisis comparativo entre los ensayos que se realizan en las instalaciones del Laboratorio de Máquinas Rotativas y las descritas en las normas ANSI/IEEE e IEC relacionados a los parámetros eléctricos. Por último, se determina la logística necesaria para la obtención del ángulo de carga en base a un método no descrito en las normas consultadas.

ÍNDICE GENERAL

Pág.

CONSTANCIA DE APROBACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
LISTA O ÍNDICE DE TABLAS	xi
LISTA O ÍNDICE DE FIGURAS	xv

INTRODUCCIÓN	1
--------------------	---

CAPÍTULO I

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3 METODOLOGÍA	4
1.4 MARCO TEÓRICO	5
1.4.1 Máquinas Sincrónicas	5
1.4.2 Características internas en las máquinas sincrónicas	6
1.4.2.1 Curva característica en vacío	6
1.4.2.2 Curva en cortocircuito	8
1.4.2.3 Curva a factor de potencia cero	10
1.4.3 Método de Blondel para máquinas de polos salientes	11
1.4.4 Determinación de las reactancias síncronas longitudinal y transversal para la máquina síncrona	14

CAPÍTULO II

2 IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers)	18
---	----

2.1	Historia de IEEE	19
2.2	Objetivos de IEEE.....	20
2.2.1	Científicos / Educativos.....	20
2.2.2	Profesionales	20
2.2.3	Con la Sociedad.....	21
2.3	Misión de IEEE	21
2.4	Visión de IEEE	21
2.5	Normas IEEE asociadas a las pruebas con Máquinas Sincrónicas	22
2.5.1	IEEE Std.115-2009: “IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines”	22
2.5.1.1	Medición de la resistencia.....	22
2.5.1.2	Curva de Saturación en circuito abierto.....	23
2.5.1.3	Curva de Saturación en Cortocircuito.....	25
2.5.1.4	Curva de saturación a factor de potencia cero	25
2.5.1.5	Métodos para determinar la reactancia de Potier (X_p)	26
2.5.1.5.1	A Factor de Potencia cero	26
2.5.1.6	Métodos de cálculo de excitación para condiciones específicas de carga.....	28
2.5.1.6.1	Método 1. Análisis por diagrama fasorial	28
2.5.1.6.1.1	Para máquinas de polo salientes	29
2.5.1.6.1.2	Para máquinas de rotor cilíndrico	33
2.5.1.6.2	Método 2. Cálculo de la corriente de excitación a través del método de Potier	34
2.5.1.7	Pruebas para determinar valores de los parámetros para condición en estado estable	38
2.5.1.7.1	Reactancia sincrónica del eje directo (X_{du})	38
2.5.1.7.2	Prueba de deslizamiento para el cálculo de la reactancia del eje de cuadratura (X_{qu}).....	39
2.5.1.8	Determinación del ángulo interno de carga (δ).....	41
2.5.1.8.1	Por Ecuación.....	42
2.5.1.8.2	Por técnica de medición estroboscópica	42
2.5.2	IEEE Std.118-1978: “IEEE Standard Test Code for Resistance Measurement”	42
2.5.2.1	Método Voltímetro-Amperímetro (caída de potencial)	44

2.5.2.2 Método del Amperímetro.....	45
2.5.2.3 Método del Voltímetro.....	46
2.5.2.4 Amperímetro	47
2.5.2.5 Puente de Kelvin.....	48
2.5.2.6 Puente de Wheatstone	50
2.5.3 ANSI/IEEE C57.12.91.1979: “ IEEE Standard test code for Dry-Type Distribution and Power Transformers”	51
2.5.3.1 Métodos de medición de resistencia	51
2.5.3.1.1 Método de puente	51
2.5.3.1.2 Método Voltímetro-Amperímetro	52

CAPÍTULO III

3 IEC (International Electrotechnical Commission).....	54
3.1 Historia de IEC	55
3.2 Valores de IEC.....	56
3.3 Misión de IEC.....	57
3.4 Normas IEC asociadas a las pruebas con Máquinas Síncronas	57
3.4.1 IEC 60034-4 1985: “Methods for determining Synchronous Machine quantities from test”	57
3.4.1.1 Determinación de la resistencia en corriente continua de un devanado	58
3.4.1.2 Ensayo de saturación en vacío	61
3.4.1.3 Ensayo en corto circuito trifásico permanente	62
3.4.1.4 Ensayo en sobreexcitación con factor de potencia cero	63
3.4.1.5 Determinación de la reactancia de Potier	63
3.4.1.6 Determinación de las magnitudes a partir de las características de saturación en vacío y en cortocircuito trifásico permanente	65
3.4.1.7 Determinación de la corriente de excitación bajo carga por métodos gráficos	66
3.4.1.7.1 Determinación de la corriente de excitación bajo carga por el diagrama de Potier	66
3.4.1.7.2 Determinación de la corriente de excitación bajo carga por medio del diagrama A.S.A (American Standards Association)	68
3.4.1.8 Ensayo a bajo deslizamiento	69

3.4.1.9 Ensayo en carga con medición del ángulo de carga (δ).....	72
3.5 Otras normas consultadas	72
3.5.1 Norma Venezolana COVENIN 3172-1995: “Transformadores de Potencia. Métodos de ensayo”	72
3.5.1.1 Ensayo de medición de resistencia de los devanados.....	73

CAPITULO IV

4 Descripción de la máquina sincrónica bajo prueba.....	75
4.1 Comparación entre los procedimientos descritos por las normas ANSI/IEEE e IEC	87
4.2 Metodología para la medición del ángulo de carga (δ).....	95
4.3 Análisis de resultados.....	101

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES	170
RECOMENDACIONES	171
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	172
ANEXOS.....	173

ÍNDICE DE TABLAS

1. Métodos de aplicación para la medición de resistencia	44
2. Datos de placa de la Máquina sincrónica 1 (MQ 1).....	76
3. Datos de placa de la Máquina sincrónica 2 (MQ2)	77
4. Valores de resistencia eléctrica de los conductores conectores sobre los devanados de armadura (MQ1)	81
5. Valores de resistencia eléctrica de los conductores conectores sobre los devanados de armadura (MQ2)	81
6. Datos de placa del motor DC usado como motor de arranque	84
7. Valores medidos de resistencia eléctrica en los conductores	86
8. Comparación entre los procedimientos para medición de resistencia en el devanado	88
9. Comparación entre los procedimientos para encontrar la curva en vacío..	89
10. Comparación entre los procedimientos para encontrar la curva de cortocircuito.....	90
11. Comparación entre los procedimientos para encontrar la curva a factor de potencia cero.....	91
12. Comparación entre los procedimientos para encontrar la reactancia de Potier	92
13. Comparación entre los procedimientos para encontrar el ángulo de carga (δ).....	93
14. Comparación entre los procedimientos para encontrar la reactancia del eje directo (X_d)	94
15. Comparación entre los procedimientos para encontrar la reactancia del eje de cuadratura (Ensayo de deslizamiento) (X_q)	95
16. Resultados en la medición de la resistencia del devanado de armadura realizado sobre MQ1 con puente de Kelvin	101
17. Resultados en la medición de la resistencia entre los bornes del devanado de armadura de conexión realizado sobre MQ1 con puente de Kelvin	102
18. Valor final de la resistencia del devanado de armadura por fase realizado sobre MQ1 con puente de Kelvin	103

19. Resultados en la medición de la resistencia del devanado de armadura sobre MQ1 con puente de Wheatstone	104
20. Resultados en la medición de la resistencia entre bornes del devanado de armadura sobre MQ1 con puente de Wheatstone	105
21. Resultados en la medición real de la resistencia entre bornes del devanado de armadura sobre MQ1	105
22. Valor final de la resistencia del devanado de armadura por puente de Wheatstone sobre MQ1	105
23. Resultados en la medición de la resistencia del devanado de armadura sobre MQ1 con puente de Wheatstone II	106
24. Resultados en la medición de la resistencia entre bornes del devanado de armadura sobre MQ1 con puente de Wheatstone II	106
25. Resultados en la medición de la resistencia real entre bornes del devanado de armadura sobre MQ1 con puente de Wheatstone II	107
26. Valor final de la resistencia del devanado de armadura por fase con el puente de Wheatstone II sobre MQ1	107
27. Resultados en la medición de la resistencia del devanado de armadura con el método voltímetro-amperímetro sobre MQ1	108
28. Resultados en la medición de la resistencia entre bornes del devanado de armadura con el método voltímetro-amperímetro sobre MQ1	109
29. Valor final de la resistencia del devanado de armadura por fase con el método voltímetro-amperímetro sobre MQ1	109
30. Resultados en la medición de la resistencia del devanado de armadura con el puente de Kelvin sobre MQ2	110
31. Resultados en la medición de la resistencia entre los bornes del devanado de armadura con el puente de Kelvin sobre MQ2	110
32. Valores finales en la medición de la resistencia entre los bornes del devanado de armadura con el puente de Kelvin sobre MQ2	111
33. Valor final de la resistencia del devanado de armadura con el puente de Kelvin sobre MQ2	111
34. Resultados en la medición de la resistencia del devanado de armadura con el puente de Wheatstone sobre MQ2	112
35. Resultados en la medición de la resistencia en los bornes de conexión del devanado de armadura con el puente de Wheatstone sobre MQ2	112
36. Valores finales de la resistencia entre los bornes de conexión del devanado de armadura con el puente de Wheatstone sobre MQ2	112
37. Valor de la resistencia del devanado de armadura por fase con el puente de Wheatstone sobre MQ2	113

38. Valores registrados de la resistencia del devanado de armadura con el puente de Wheatstone II sobre MQ2	113
39. Resultados en la medición de la resistencia entre los bornes del devanado de armadura con el puente de Wheatstone II sobre MQ2	114
40. Resultados finales en la medición de la resistencia entre los bornes del devanado de armadura con el puente de Wheatstone II sobre MQ2	114
41. Valor final de la resistencia del devanado de armadura por fase con el puente de Wheatstone II sobre MQ2	114
42. Resultados en la medición de la resistencia del devanado de armadura con el método voltímetro-amperímetro sobre MQ2.....	115
43. Valores reales en la medición de la resistencia entre los bornes de conexión del devanado de armadura con el método voltímetro-amperímetro sobre MQ2.....	115
44. Valor final de la resistencia del devanado de armadura por fase con el método voltímetro-amperímetro sobre MQ2	116
45. Resultados de la medición para obtener la curva de saturación en vacío descrito en 2.5.1.2 sobre MQ1.....	118
46. Resultados de la medición para obtener la curva de saturación en vacío sobre MQ1 descrito en 3.4.1.2.....	120
47. Resultados de la medición para obtener la curva de saturación en vacío bajo el procedimiento según 2.5.1.2 sobre MQ2.....	123
48. Resultados de la medición para obtener la curva de saturación en vacío bajo el procedimiento según 3.4.1.2 sobre MQ2.....	125
49. Resultados de la medición sobre MQ1 para obtener la curva de saturación en cortocircuito bajo el procedimiento según 2.5.1.3	129
50. Resultados de la medición sobre MQ1 para obtener la curva de saturación en cortocircuito bajo el procedimiento según 3.4.1.3	130
51. Resultados de la medición sobre MQ2 para obtener la curva de saturación en cortocircuito bajo el procedimiento según 2.5.1.3	132
52. Resultados de la medición sobre MQ2 para obtener la curva de saturación en cortocircuito bajo el procedimiento según 3.4.1.3	133
53. Resultados de la medición para obtener la curva con factor de potencia cero bajo el procedimiento según 2.5.1.4 sobre MQ1	136
54. Resultados de la medición para obtener la curva con factor de potencia cero bajo el procedimiento descrito en 3.4.1.4 sobre MQ1.....	137
55. Comparación de los valores de la reactancia de Potier (X_p)	142
56. Comparación de los valores obtenidos para la reactancia del eje directo y del eje de cuadratura	152

57. Puntos de operación de la máquina sincrónica sobreexcitada a factor de potencia cero en sistema por unidad.	152
58. Resultados bajo la hipótesis de una máquina polos salientes	155
59. Puntos de operación trabajados con el método descrito en 2.5.1.6.2.....	156
60. Resultados de la corriente de excitación aplicando 2.5.1.6.2	158
61. Tensiones de armadura generadas por ambos generadores con una carga resistiva @ P=2200W	159
62. Tensiones de armadura generadas por ambos generadores con una carga resistiva @ P=2400W	161
63. Resultados de la medición del ángulo de carga (δ) para una carga resistiva	163
64. Tensiones de armadura generadas por ambos generadores con la carga inductiva.....	164
65. Resultados de la medición del ángulo de carga (δ) para una carga inductiva.....	166
66. Tensiones de armadura generadas por ambos generadores con la carga capacitiva.....	167
67. Resultados de la medición del ángulo de carga (δ) con una carga capacitiva.....	168

ÍNDICE DE FIGURAS

1. Partes de una máquina síncrona de polos salientes y de rotor cilíndrico de 4 polos	6
2. Curva característica en circuito abierto (<i>occ</i>).....	7
3. Diagrama circuital para el ensayo de saturación en vacío.....	8
4. Curva característica en cortocircuito (<i>scc</i>).....	9
5. Diagrama circuital para el ensayo de saturación en cortocircuito	9
6. Curva característica a factor de potencia cero $U = f(I_e)$	10
7. Diagramas circuitales para obtener la curva de saturación a factor de potencia cero.....	11
8. Diagrama vectorial de tensiones de Blondel de la máquina síncrona de polos salientes.....	13
9. Determinación gráfica de la reactancia longitudinal.....	15
10. Variación de la reluctancia del circuito magnético de reacción de inducido en las máquinas de polos salientes.....	16
11. Determinación experimental de las reluctancias X_d y X_q	16
12. Oscilograma de tensiones y de corriente de inducido en el ensayo de deslizamiento.....	17
13. Método gráfico para la determinación de la reactancia de Potier.....	28
14. Diagrama fasorial para calcular E_{GU} en modo generador.....	30
15. Diagrama fasorial para calcular E_{GU} en modo motor.....	31
16. Ejemplo ilustrativo que muestra la ubicación de E_{GU} , I_{FU} e I_{FS} sobre la curva de saturación en vacío y la línea del entrehierro	33
17. Diagrama fasorial para el cálculo aproximado de E_p para una máquina síncrona en modo generador.....	37
18. Método gráfico para determinar la corriente de campo bajo régimen sobreexcitado para generador o motor.....	38
19. Método gráfico para determinar la corriente de campo bajo régimen subexcitado para generador o motor	38
20. Método de deslizamiento para obtener la reactancia del eje de cuadratura no saturada (X_{qu}).....	40

21. Circuito Voltímetro-Amperímetro para la medición de resistencia de bajo valor	45
22. Circuito Voltímetro-Amperímetro para la medición de resistencia de valor intermedio.....	46
23. Método del Amperímetro para medir resistencia de bajo valor	47
24. Método del Voltímetro para la medición de resistencia.....	48
25. Amperímetro.....	49
26. Puente de Kelvin	50
27. Puente de Wheatstone	51
28. Procedimiento gráfico para la determinación de la reactancia de Potier .	65
29. Gráficos para la determinación de X_d	66
30. Método para determinar la corriente de excitación nominal por diagrama de Potier	67
31. Método para determinar la corriente de excitación por diagrama ASA...	69
32. Método gráfico para la determinación de X_{qu} y X_{du}	71
33. Máquina sincrónica 1(MQ1) bajo prueba	77
34. Máquina sincrónica (MQ2) bajo prueba	78
35. Configuración de los bornes de armadura de MQ1	78
36. Configuración de los bornes de la armadura de MQ2	79
37. Esquema de conexión entre los bornes de armadura	79
38. Conexión en estrella de los bornes de la armadura de MQ1 y MQ2	80
39. Mecanismo que controla el ángulo eléctrico en MQ2	84
40. Conexión del reóstato de arranque para el motor DC de arranque	85
41. Ángulo de carga	96
42. Diagrama de conexión para determinar el ángulo de carga	97
43. Medición de la resistencia de los devanados de armadura con el medidor de puente de Kelvin	101
44. Medición de la resistencia de los devanados de armadura con el medidor de puente de Wheatstone.....	104
45. Medición de la resistencia de los devanados de armadura con el método del voltímetro-amperímetro.....	108
46. Esquema de conexión sobre la máquina sincrónica bajo prueba (MQ1)	117
47. Curva de saturación en vacío obtenida bajo el procedimiento descrito en 2.5.1.2.....	119

48. Curva de saturación en vacío obtenida bajo el procedimiento según 3.5.1.2.....	121
49. Comparación entre las curvas de saturación en vacío obtenida bajo el procedimiento según 2.5.1.2 y 3.4.1.2	122
50. Curva de saturación en vacío obtenida bajo el procedimiento según 2.5.1.2.....	124
51. Curva de saturación en vacío obtenida bajo el procedimiento según 3.4.1.2.....	126
52. Comparación entre las curvas de saturación en vacío obtenidas bajo el procedimiento según 2.5.1.2 y 3.4.1.2	127
53. Esquema de conexión sobre la máquina sincrónica bajo prueba (MQ1)	128
54. Curva de saturación en cortocircuito de MQ1 obtenida bajo el procedimiento según 2.5.1.3.....	129
55. Curva de saturación en cortocircuito de MQ1 obtenida bajo el procedimiento según 3.4.1.3.....	130
56. Comparación de las curvas de saturación en cortocircuito obtenida sobre MQ1 bajo el procedimiento según 2.5.1.3 y 3.4.1.3.....	131
57. Curva de saturación en cortocircuito de MQ2 obtenida bajo el procedimiento según 2.5.1.3.....	132
58. Curva de saturación en cortocircuito de MQ2 obtenida bajo el procedimiento según 3.4.1.3.....	133
59. Comparación de las curvas de saturación en cortocircuito obtenida bajo el procedimiento según 2.5.1.3 y 3.4.1.3	134
56. Esquema de conexión sobre la máquina sincrónica bajo prueba (MQ1)	135
57. Curvas de saturación con factor de potencia cero sobre MQ1 obtenida bajo el procedimiento descrito en 2.5.1.4	137
58. Curvas de saturación con factor de potencia cero obtenida bajo el procedimiento descrito en 3.4.1.4.....	138
59. Comparación entre las curvas de saturación con factor de potencia cero obtenida bajo los procedimientos descritos en 2.5.1.4 y 3.4.1.4	138
60. Método gráfico para calcular del valor de la reactancia de Potier obtenida bajo el procedimiento descrito en 2.5.1.5	139
61. Método gráfico para calcular del valor de la reactancia de Potier obtenida bajo el procedimiento según 3.4.1.5	140
62. Método gráfico para calcular del valor de la reactancia del eje directo no saturado (X_{du}) obtenida bajo el procedimiento según 2.5.1.7	142
63. Método gráfico para calcular del valor de la reactancia del eje directo no saturado (X_{du}) obtenida bajo el procedimiento según 3.4.1.6.....	144

64. Diagrama circuital correspondiente a la prueba a bajo deslizamiento ...	145
65. Medición de la tensión entre las fases de la armadura IEEE.....	146
66. Medición de la caída de tensión sobre la resistencia de prueba (R_{shunt}) IEEE.....	147
67. Medición de la caída de tensión sobre la resistencia (R_{shunt}) IEC.....	149
68. Medición de la tensión de armadura generada IEC	150
69. Corriente de excitación obtenida por el método descrito en 2.5.1.6.1 ...	154
70. Corriente de excitación obtenida por el método descrito en 2.5.1.6.2...	157
71. Registro de las tensiones de armadura generadas por ambas máquinas con una carga resistiva a P=2200W ampliada (Time/Div=500µseg).....	159
72. Registro de las tensiones de armadura generadas por ambas máquinas con una carga resistiva a P=2400W ampliada (Time/Div=500µseg).....	161
73. Registro de las tensiones de armadura generadas por ambas máquinas con una carga inductiva (Time/Div=250µseg).....	164
74. Registro de las tensiones de armadura generadas por ambas máquinas con una carga capacitiva (Time/Div=500µseg)	166

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo consiste en realizar la comparación entre la metodología que existen entre las normas ANSI/IEEE e IEC específicamente para la caracterización de las máquinas sincrónicas del Laboratorio de Máquinas Rotativas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la U.C.V.

En primer lugar, se hará una descripción general sobre las distintas pruebas y mediciones que recomiendan las normas bajo estudio y ver si es posible o no su aplicación en base a los equipos de medición e instrumentos especiales que se requieran a la hora de realizar dichos ensayos y ejecutarlas.

En segundo lugar, se hará un análisis comparativo entre los ensayos que se realizan en las instalaciones del laboratorio de Máquinas Rotativas y las pruebas o ensayos descritos en las normas ANSI/IEEE e IEC relacionados a los parámetros eléctricos.

Por último, se determinará la logística necesaria para la obtención del ángulo de carga en base a un método no descrito en las normas ANSI/IEEE e IEC.

CAPÍTULO I

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el Laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UCV se realizan los ensayos necesarios para caracterizar las máquinas sincrónicas, siguiendo las pautas establecidas por las norma IEEE Std.113-1985: “IEEE Guide for Test Procedure for Direct Current Machines”. Las normas IEC no han consultado para la elaboración de los métodos de ensayo, y de ahí la importancia de analizar las posibles diferencias tanto en los procedimientos como en los parámetros que se puedan obtener. Para el Laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas es de especial importancia incluir, de ser posible, la medición del ángulo de carga (δ) de la máquina sincrónica.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Establecer una comparación entre la metodología de ensayos propuestos por las normas internacionales IEC y ANSI/IEEE para caracterizar las máquinas sincrónicas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar los métodos de ensayos propuestos por las normas IEC y ANSI/IEEE.
- Determinar la factibilidad para la realización de los ensayos propuestos por las normas en las instalaciones del Laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la U.C.V.
- Realizar un análisis comparativo entre los ensayos propuestos en la guía de laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas y su correlación con las pruebas propuestas por las normas IEC y ANSI/IEEE relacionando la caracterización de los parámetros eléctricos involucrados en el funcionamiento de la máquina sincrónica.
- Determinar la logística necesaria para la obtención del ángulo de carga (δ) de la máquina sincrónica.

1.3 METODOLOGÍA

- Estudiar las normas IEC, ANSI/IEEE, la guía de Laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas y cualquier otro material que puede aportar al estudio de las máquinas sincrónicas.
- Comprobar que el Laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UCV cuente con los equipos necesarios para la realización de las pruebas de máquinas sincrónicas bajo las normas IEC y ANSI/IEEE.
- Ejecutar las pruebas de las máquinas sincrónicas bajo las normas IEC y ANSI/IEEE que cumplan con el equipamiento requerido para los ensayos en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UCV.
- Hacer una comparación metodológica, cuantitativa y cualitativa para la ejecución de cada prueba bajo las normas IEC y ANSI/IEEE.
- Realizar las pruebas que se requieren para determinar el ángulo de carga (δ) de las máquinas sincrónicas.

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 Máquinas Sincrónicas

Las máquinas sincrónicas son dispositivos de corriente alterna que se caracterizan por tener una velocidad del eje (n) que depende directamente de la frecuencia del sistema (f) que está conectado durante la operación en régimen permanente y del número de polos presentes en la máquina, es decir:

$$f = n * p$$

Esta máquina es un convertidor electromecánico de energía que posee una pieza giratoria denominada **rotor (campo)** cuyo devanado es construido en forma de arrollamiento concentrado o distribuido en ranuras y se excita mediante la inyección de corriente continua con la finalidad de producir un campo magnético de magnitud constante semejante a la de un imán permanente. Otra pieza fija denominada **estator (armadura)** cuyo devanado distribuido forma un arrollamiento trifásico donde circula corriente alterna que producen un campo magnético rotatorio que gira en el entrehierro de la máquina con la frecuencia angular de las corrientes de armadura y obliga al rotor girar a la misma velocidad del campo magnético rotatorio producido por el estator [1].

El propósito de esta máquina sincrónica en general es trabajar como generador, pero puede trabajar sin ningún problema tanto en régimen de generador o como motor debido a que posee devanados de amortiguamiento

que permiten un arranque asincrónico hasta que se active el circuito de campo y permita llevar a la máquina sincrónica a su velocidad nominal.

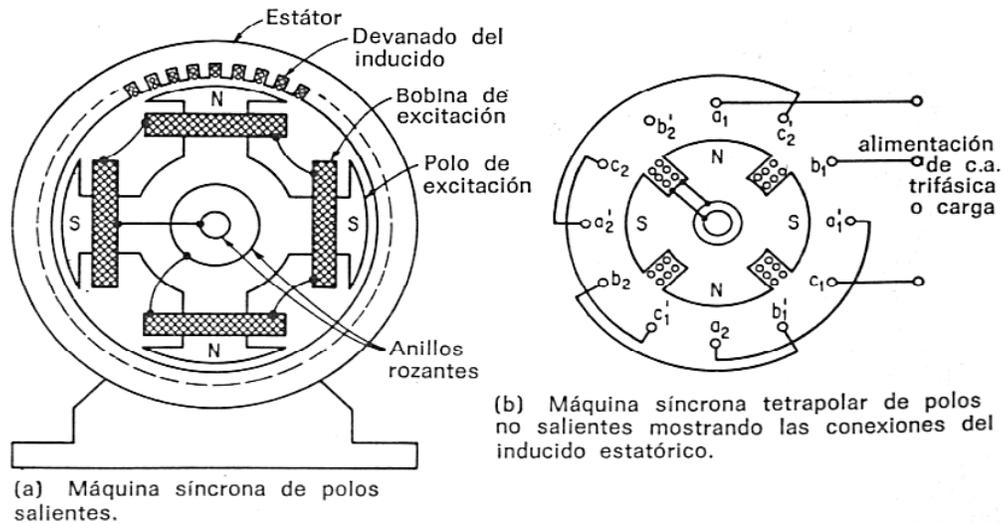


Figura 1. Partes de una máquina sincrónica de polos salientes y de rotor cilíndrico de 4 polos [5]

1.4.2 Características internas en las máquinas sincrónicas

1.4.2.1 Curva característica en vacío

Es la curva representativa de la diferencia de tensión en los bornes del generador en vacío en función de la corriente de excitación y a velocidad constante, en donde la corriente de armadura es nula $E_o = f(I_{exc})$.

La característica de circuito abierto representa la relación que hay entre la componente fundamental espacial del flujo del entrehierro y la fuerza magnetomotriz (f.f.m) que actúa sobre el circuito magnético cuando el inducido del campo constituye la única fuente de f.f.m. Los efectos de la saturación magnética pueden observarse cuando se aumenta la corriente de

excitación, en donde la saturación del material magnético reduce la eficacia de la corriente de campo de producir el flujo magnético necesario [2] .

La característica de circuito abierto inicialmente es lineal y representa el voltaje característico de circuito abierto de la máquina que corresponde a la operación sin saturación.

En una máquina real la característica de saturación en circuito abierto se obtiene de forma experimental. La velocidad se mantiene durante toda la medición en su valor nominal y anotando los valores de tensión en los bornes de la armadura para valores decrecientes de la corriente de campo hasta un valor nulo de corriente de campo, y después para valores crecientes actuando sobre el reóstato de excitación. La curva representativa para este tipo de fenómeno es el siguiente (figura 2):

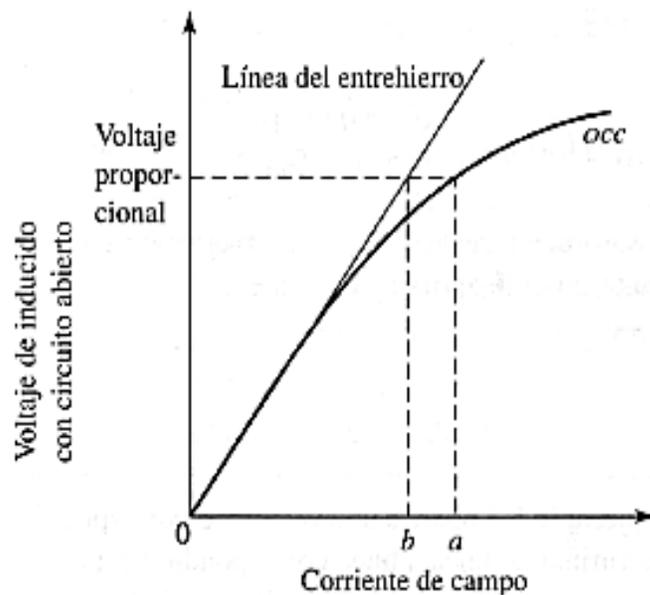


Figura 2. Curva característica en circuito abierto (*occ*) [2]

Para un generador trifásico no es necesario obtener todas las tensiones por fase de armadura de la máquina, sino asegurarse de que se mantenga la igualdad de tensión entre las tres fases para algunos puntos. El rotor se hace

girar mediante un motor DC o cualquier otro motor que tenga suficiente par de arranque y manteniendo siempre la velocidad nominal durante la medición. El esquema circuital para obtener la curva de saturación en vacío es el siguiente (figura 3):

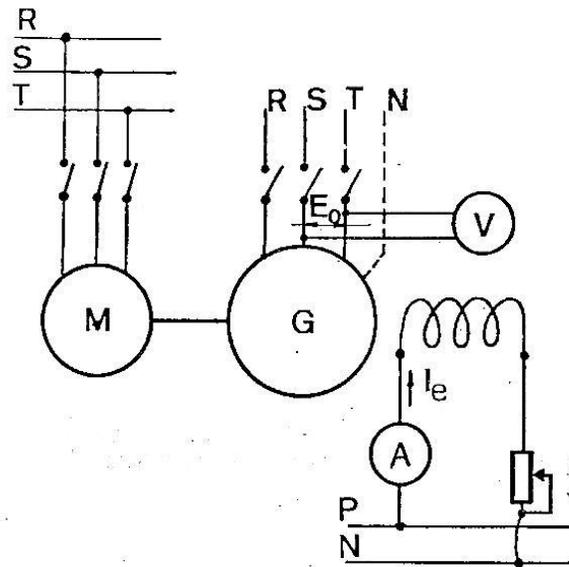


Figura 3. Diagrama circuital para el ensayo de saturación en vacío [4]

1.5.2.2 Curva en cortocircuito

Es la curva de la corriente suministrada de armadura en función de la corriente de excitación $I_{arm} = f(I_{exc})$.

El sistema magnético resulta no saturado y por lo tanto la característica de cortocircuito tiene carácter rectilíneo y solo tiene una curvatura cuando las magnitudes de la corriente exceden considerablemente de la corriente nominal de armadura. Al trazar la característica de cortocircuito siendo la velocidad de rotación variable, la corriente de cortocircuito no dependerá prácticamente de la velocidad de rotación, ya que las inductancias y la f.e.m

inducida por el devanado de excitación varían proporcionalmente a la frecuencia y por consiguiente es proporcional a la velocidad de rotación [4].

La curva representativa de este fenómeno es el siguiente (figura 4):

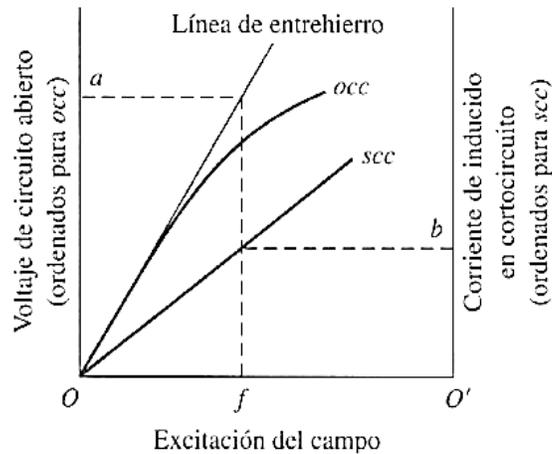


Figura 4. Curva característica en cortocircuito (*scc*) [2]

Para trazar esta característica de saturación en cortocircuito, se tiene que cortocircuitar al generador sobre tres amperímetros de baja resistencia, se coloca un amperímetro en el circuito de excitación y se anotan los valores de la corriente de armadura haciendo variar la excitación con la ayuda de un reóstato. El esquema circuital para obtener la curva característica en cortocircuito lo podemos observar en la figura 5.

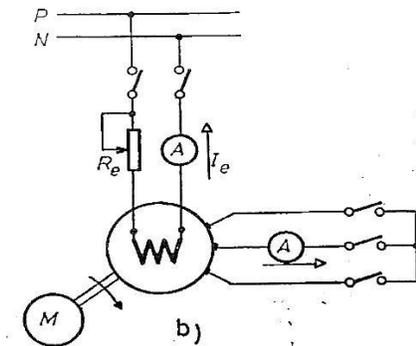


Figura 5. Diagrama circuital para el ensayo de saturación en cortocircuito [3]

1.5.2.3 Curva a factor de potencia cero

Es la curva que representa el voltaje en los bornes de armadura en función de la corriente de excitación, cuando la máquina se encuentra trabajando a corriente de armadura nominal y a factor de potencia cero inductivo $U = f(I_{exc})$. Esta característica se asemeja a la característica de saturación en vacío para corrientes desfasadas en retraso sobre la tensión de armadura y para trazarla se requiere como mínimo conocer dos puntos sobre esta curva. La curva representativa de este fenómeno es la siguiente (figura 6):

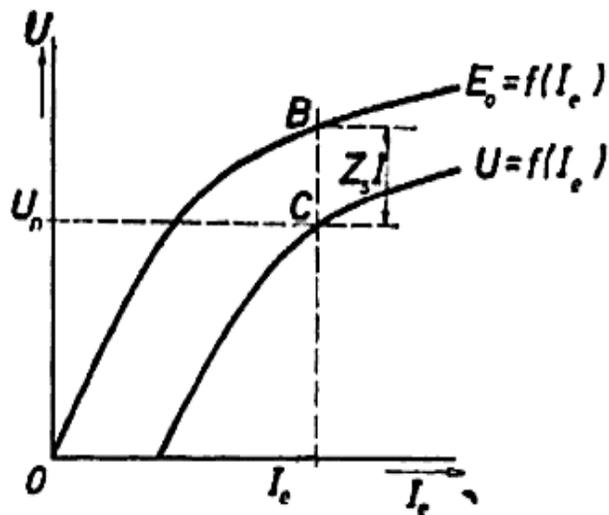


Figura 6. Curva característica a factor de potencia cero $U = f(I_e)$ [3]

El ensayo para determinar esta curva se debe realizar a velocidad nominal, no es indispensable que el factor de potencia sea exactamente igual a cero pues para factores de potencia entre 0,1 y 0,2 se obtienen resultados similares [3].

El esquema circuital para obtener la curva característica es la siguiente (figura 7):

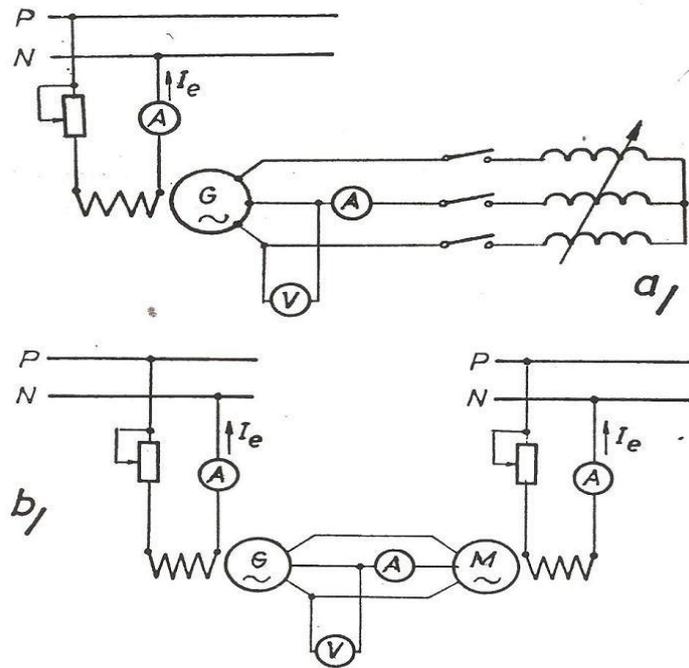


Figura 7. Diagramas circuitales para obtener la curva de saturación a factor de potencia cero: a) Mediante reactancias. b) Mediante una máquina síncrona similar [3].

En la figura 7 refleja dos maneras de obtener la curva característica a factor de potencia cero en una máquina síncrona. El primero de ellos (figura superior) se utiliza como carga reactancias inductivas que permiten llevar a la máquina bajo prueba lo más cerca posible al factor de potencia requerido, sabiendo que estas reactancias no son puramente reactivas. La segunda de esta (figura inferior) es utilizando otra máquina síncrona similar y mediante la modificación de la corriente de campo tanto de la máquina bajo prueba como de la máquina que sirve de carga inductiva.

1.5.3 Método de Blondel para máquinas de polos salientes [3]

Al estudiar el fenómeno de reacción de inducido se presenta el hecho de que la posición relativa de la onda de f.m.m de la reacción del inducido respecto a

la onda de f.m.m de excitación, depende de la diferencia de fase entre la corriente del inducido (I) y la f.e.m resultante (E_r) inducida por el flujo resultante.

En las máquinas de rotor cilíndrico, la reluctancia del circuito magnético de este flujo es independiente de su posición en el espacio, de allí es que estas máquinas el efecto de la dispersión del flujo del inducido y de la reacción del inducido pueda ser tenido en cuenta por una reactancia única (X_{SS}), cuyo valor es independiente de la diferencia de fase entre I y E_r .

En las máquinas de polos salientes, al no ser el entrehierro uniforme, la reluctancia del circuito magnético del flujo resultante depende de la posición de los polos con relación a la onda de f.m.m de la reacción del inducido del estator.

La teoría de las dos reacciones de Blondel es mucho más exacta en las máquinas de polos salientes, ya que tiene en cuenta la dependencia de la reluctancia del circuito magnético del campo resultante, con la posición angular de los polos respecto a este circuito.

Los ingenieros americanos Doherty y Nickel, conservando la idea original de Blondel, introdujeron una simplificación considerando solamente dos reactancias: la reactancia síncrona longitudinal (X_d) y la reactancia síncrona transversal (X_q). Estas reactancias surgen como consecuencia de descomponer la caída de tensión reactiva ($X_\sigma I$) en dos componentes ortogonales, en fase respectivamente con la corriente I_d e I_q . De la figura 8 se deduce que:

$$\begin{aligned}\overline{BF} &= X_\sigma I \operatorname{sen}(\psi) = X_\sigma I_d \\ \overline{CF} &= X_\sigma I \operatorname{cos}(\psi) = X_\sigma I_q\end{aligned}$$

directo (I_d), ambas en régimen permanente y a la frecuencia fundamental. La ecuación que define a la reactancia síncrona longitudinal es la siguiente (3):

$$X_d = \frac{E_{td}}{I_d} \quad (3)$$

La reactancia síncrona transversal (X_q) es la relación entre la componente fundamental de la tensión total de la reactancia del inducido (E_{tq}) debida a la componente fundamental de la corriente del inducido según el eje transversal (I_q), en régimen permanente y a la frecuencia nominal. La ecuación que define a la reactancia síncrona transversal es la siguiente (4):

$$X_q = \frac{E_{tq}}{I_q} \quad (4)$$

1.5.4 Determinación de las reactancias síncronas longitudinal y transversal

La reactancia síncrona longitudinal no saturada (X_d), se obtienen a partir de la característica lineal del entrehierro (característica de vacío convencional) y de la característica de cortocircuito. El cociente entre la tensión nominal medido sobre la recta del entrehierro a la corriente de cortocircuito correspondiente a la misma excitación nos da (5):

$$X_d = \frac{U_n}{I_{cc}} \quad (5)$$

Si estas características vienen dadas en por unidad (p.u) (Figura 9), la reactancia síncrona longitudinal (X_d) se halla directamente como el cociente de la corriente de excitación que en cortocircuito permanente da la corriente nominal (I_{ecc}), a la corriente de excitación que en vacío determina la tensión nominal sobre la parte lineal extendida de la curva en vacío (I_{eoc})

$$X_d = \frac{I_{ecc}}{I_{eoc}} \quad (6)$$

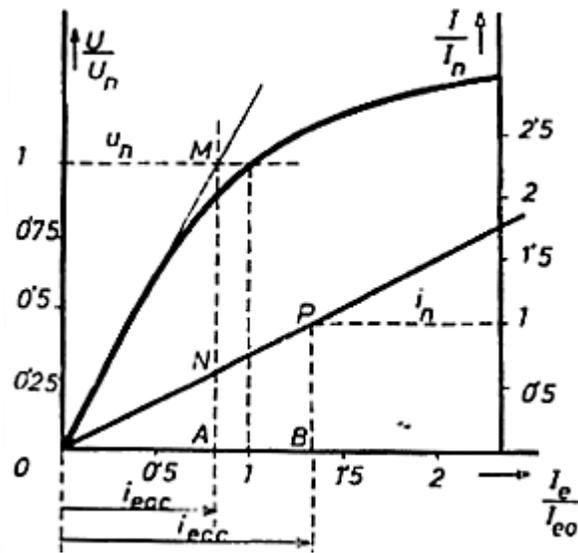


Figura 9. Determinación gráfica de la reactancia longitudinal [3]

La reactancia síncrona transversal (X_q) puede determinarse experimentalmente a través del ensayo de deslizamiento. Según este ensayo, se hace girar la máquina síncrona bajo prueba accionada por un motor auxiliar, a una velocidad ligeramente distinta de la de sincronismo (por encima o debajo de la misma), pero en todo caso con un deslizamiento pequeño. A su vez, se le aplica al devanado inducido (estator) un sistema de tensiones trifásicas equilibrado de reducido valor y se mantiene abierto el devanado inductor (rotor).

La diferencia de velocidades entre el campo giratorio que generan las corrientes del inducido y el rotor, da lugar a que alternativamente los ejes del campo del inducido coincidan con los de los ejes inductores o estén en cuadratura con los mismos. Cuando ambos ejes coinciden, la f.m.m del inducido actúa sobre el circuito longitudinal de reluctancia mínima, por lo

tanto, el flujo será máximo (Figura 10-a). Cuando están en cuadratura actúa sobre el circuito transversal de reluctancia máxima y el flujo será mínimo (Figura 10-b).

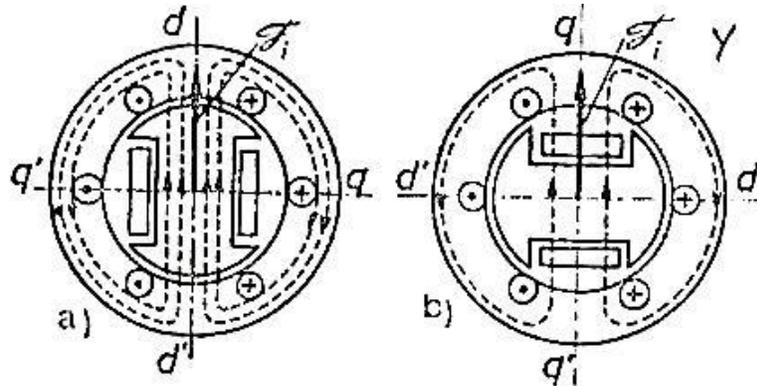


Figura 10. Variación de la reluctancia del circuito magnético de reacción de inducido en las máquinas de polos salientes [3]

Conectando un voltímetro y un amperímetro tal cual muestra la figura 11, si el deslizamiento es suficientemente pequeño, las agujas de estos aparatos oscilarán lentamente desde un máximo a un mínimo, correspondiendo a la tensión mínima a la corriente máxima y viceversa.

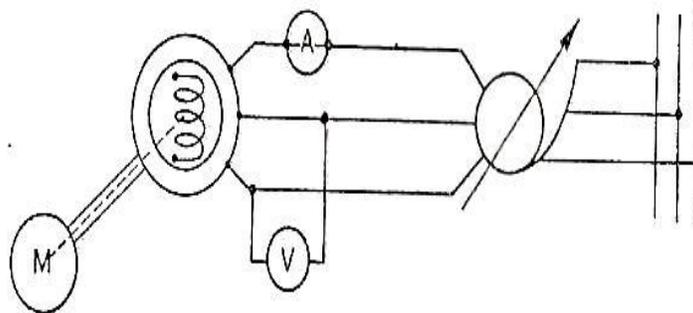


Figura 11. Determinación experimental de las reluctancias X_d y X_q [3]

Para evitar que la inercia de las partes móviles de los aparatos de medida influya en la exactitud de las lecturas es preferible registrar mediante un oscilógrafo calibrado, las oscilaciones de la tensión y de la corriente del inducido (figura 12).

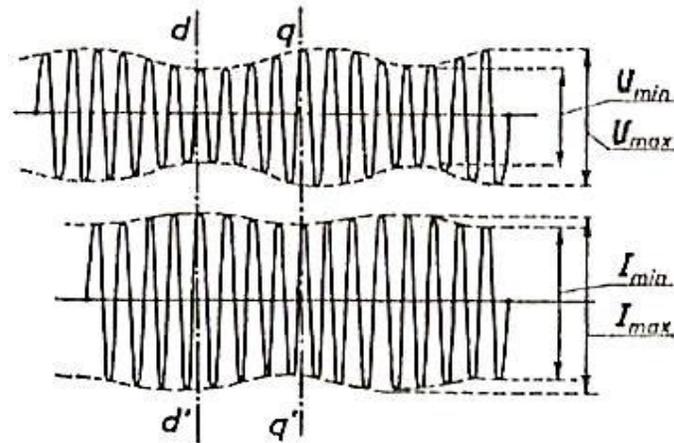


Figura 12. Oscilograma de tensiones y de corriente de inducido en el ensayo de deslizamiento [3]

La reactancia síncrona transversal (X_q) viene dada por la relación del valor mínimo de la tensión y la corriente del inducido máximo (5):

$$X_q = \frac{U_{\min}}{I_{\max}} \quad (5)$$

La reactancia síncrona longitudinal (X_d) viene dada por la relación del valor máximo de la tensión y la corriente del inducido mínimo (6):

$$X_d = \frac{U_{\max}}{I_{\min}} \quad (6)$$

Se obtienen resultados más precisos de X_q utilizando los registros oscilográficos del ensayo de deslizamiento para encontrar la relación entre X_q/X_d , y multiplicar esta relación por el valor de X_d obtenido por los ensayos de vacío y cortocircuito (7).

$$X_{qu} = X_{du} * \left(\frac{X_q}{X_d} \right) \quad (7)$$

CAPÍTULO II

2 IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) [7]

IEEE es una asociación técnico profesional mundial dedicada a la estandarización y es la mayor asociación sin fines de lucro formada por profesionales de las nuevas tecnologías, tales como: Ingenieros Electricistas, Ingenieros Electrónicos, Ingenieros de Sistemas e Ingenieros de Telecomunicaciones.

A través de sus miembros (alrededor de 395.000 en 160 países), IEEE es una autoridad líder y de máximo prestigio en las áreas derivadas de la Electricidad desde la Ingeniería Computacional, Tecnologías Biomédica y Aeroespacial hasta las áreas de Energía Eléctrica, Telecomunicaciones y Electrónica de consumo, entre otras.

Mediante sus actividades de publicación técnicas, conferencias y estándares basados en consenso, IEEE produce más del 30% de la literatura publicada en el mundo sobre Ingeniería Eléctrica, Ingeniería en Computación, Telecomunicaciones y Tecnologías de Control. Además, organiza más de 350 grandes conferencias al año en todo el mundo y posee cerca de 900 estándares activos y con otros 700 que están bajo desarrollo.

2.1 Historia de IEEE [7]

El Instituto Norteamericano de Ingenieros Eléctricos (AIEE) surgió durante un período de optimismo y entusiasmo. En 1884, las aplicaciones en electricidad se estaban incrementando rápidamente, el progreso en la teoría de la electricidad y en su práctica se aceleraba y los científicos y electricistas, así como los empresarios e inversionistas vislumbraban ante ellos un gran desarrollo. Con tal crecimiento, la tecnología eléctrica se empezó a volver más compleja y los practicantes empezaron a sentir la necesidad de un foro para intercambiar ideas y experiencias y de una organización para definir esa nueva profesión.

A mediados de 1884, se convocó a una reunión para formar una sociedad eléctrica nacional, y después de algunas reuniones preliminares, se estableció el Instituto Norteamericano de Ingenieros Eléctricos en la ciudad de Nueva York, el 13 de Mayo de ese mismo año. Se le dio ímpetu a la nueva organización mediante la planeación de una exhibición eléctrica nacional que sería albergada más tarde en ese año por el instituto Franklin de Filadelfia, así el AIEE rápidamente ganó reputación como el vocero de los ingenieros eléctricos en Norteamérica.

Desde el comienzo, las comunicaciones por cable, los sistemas de luz y potencia fueron los intereses principales del AIEE. Como antiguo y activo participante en el desarrollo de normas para la industria, el instituto fundó las bases para todos los trabajos en normas eléctricas hechos en los Estados Unidos. Durante las tres primeras décadas de su existencia, el AIEE enfrentó y resolvió asuntos internos tales como establecer oficinas principales permanentes de la organización, proporcionar mecanismos para tener

contacto con la amplia membresía y con los estudiantes, y patrocinar nuevos intereses técnicos a través de comités que se establecieron para enfrentar el reto de la creciente especialización e incluso su expansión más allá de las fronteras de los Estados Unidos con la formación en 1903 de la sección Toronto y en 1922 con la formación de la sección México.

Sin embargo, para 1912 los intereses y necesidad de aquellos que se especializaron en el creciente campo de la radio ya no podía estar satisfechos con un comité que se reunía dos o tres veces por año. En ese mismo año, dos organizaciones importantes en radio (la sociedad de Ingenieros, Telegrafía Inalámbrica y el Instituto Inalámbrico) se fusionaron para formar una sociedad nacional de científicos e ingenieros involucrados en el desarrollo de las comunicaciones inalámbricas, el Instituto de Ingenieros en Radio (IRE).

El desarrollo estructural y las actividades generales del IRE eran similares a las del AIEE. Los segmentos especializados se agrupaban en grupos profesionales bajo un cuerpo regente central, luego se formaron las unidades geográficas y las ramas estudiantiles, la creación de un amplio acervo literario y el intercambio de conocimientos se facilitó a través de reuniones y publicaciones, luego se establecieron los grados de membresía y las normas fueron desde un principio el mayor interés. La naturaleza de la tecnología del radio significó que los intereses del IRE se extendieran más allá de las fronteras de Estados Unidos, y en consecuencia, la nueva asociación atrajo y buscó miembros en muchos países.

En 1930, la palabra “electrónica” se volvió parte del vocabulario en ingeniería. Los ingenieros en electrónica tendieron a ser miembros del IRE, pero las aplicaciones de la tecnología de bulbos llegaron a ser extensas que los límites técnicos que diferenciaban al IRE del AIEE se volvieron difíciles de distinguir. Después de la segunda guerra mundial, las dos organizaciones se volvieron crecientemente competitivas y se presentaron problemas de

sobreposición y duplicación de esfuerzos que solo se resolvieron parcialmente mediante comités y reuniones conjuntas.

Finalmente en 1961, las dirigencias tanto del IRE como del AIEE resolvieron buscarle término a esas dificultades a través de la consolidación. Al año siguiente, se formuló y aprobó un plan de fusión, en cual entró en vigor el 1 de Enero de 1963. Se hicieron planes para unificar las actividades técnicas y las unidades geográficas de las dos organizaciones para establecer un programa de publicaciones unificado para la nueva organización, el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE).

Hoy en día, IEEE es la organización técnica profesional más grande y prestigiada del mundo, sus actividades se extienden mucho más allá de lo que sus predecesores podrían haber previsto y el presente año se encuentra celebrando 128 años de trayectoria mundial en aporte científico y tecnológico para la humanidad.

2.2 Objetivos de IEEE [7]

2.2.1 Científicos / Educativos

- Promover el avance de las teorías y prácticas de la electrotecnologías y tecnologías de la información.

2.2.2 Profesionales

- Fomentar el progreso y evolución de los miembros en la profesión.

2.2.3 Con la Sociedad

- Mejorar la calidad de vida a través de la aplicación de las electrotecnologías y tecnologías de la información.
- Promover el entendimiento público de las electrotecnologías y tecnologías de la información.

2.3 Misión de IEEE [7]

- Promover los procesos de creación, desarrollo, integración y aplicación del conocimiento de las electrotecnologías y tecnologías de la información para beneficio de la humanidad y de la profesión.

2.4 Visión de IEEE [7]

- Impulsar la prosperidad global promoviendo la innovación tecnológica, fomentando la formación continua de los miembros y potenciando la comunidad global.

2.5 Normas IEEE asociadas a las pruebas con Máquinas Síncronas

2.5.1 IEEE Std. 115-2009: “IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines” [9]

Esta norma contiene una serie de instrucciones para la realización de las pruebas de aplicación más general y aceptada para determinar las características de rendimiento de las máquinas síncronas. Aunque, las pruebas descritas allí son aplicables en general a generadores síncronos, motores síncronos (de potencia fraccionaria), condensadores síncronos y cambiadores de frecuencia síncronos, principalmente se hacen referencia a los generadores y motores síncronos.

A continuación se hace una descripción de las mediciones y pruebas que se realizan a la máquina síncrona en base a lo sugerido por [9]:

2.5.1.1 Medición de la resistencia [9]

- Para obtener las mediciones de resistencia de los bobinados del inducido y de campo se deben utilizar los procedimientos descritos en [10].
- Cuando la resistencia (R_t) de un bobinado haya sido determinada por ensayo a una temperatura del devanado (T_t), la resistencia puede ser corregida a una temperatura específica (T_s) utilizando la siguiente expresión (8):

$$R_s = R_t \left(\frac{T_s + k}{T_t + k} \right) \quad (8)$$

Donde:

R_s : Es la resistencia del devanado corregida a la temperatura específica T_s , en ohmios.

T_s : Es la temperatura específica, en grados Celsius.

T_t : Es la temperatura del devanado cuando la resistencia fue medida, en grados Celsius.

k : Es la constante característica del material del devanado (234,5°C para el cobre puro y 225°C para el aluminio).

- La resistencia se mide comúnmente con el rotor en reposo con el fin de obtener un valor de la resistencia de referencia (R_t). Es importante que el método de medición que se utilice no altere la temperatura del devanado ya que las pérdidas por efecto Joule no deben causar un cambio significativo en la medición.

2.5.1.2 Curva de Saturación en circuito abierto [9]

- La curva de saturación en circuito abierto se obtiene mediante la conducción de la máquina bajo prueba a la velocidad nominal en modo generador, con el circuito abierto de la armadura, y registrando la tensión en los terminales de la armadura, la corriente del campo y la velocidad del eje o la frecuencia.
- Para obtener la curva de saturación en vacío de la máquina bajo prueba se debe proceder de la siguiente manera:
 - a) Seis lecturas que deben ser tomadas por debajo del 60% de la tensión nominal (incluyendo una lectura con excitación cero).

- b) Lecturas entre el 60% a 110% de la tensión nominal, con un incremento del 5% en el voltaje nominal (como mínimo 10 puntos). Esta área es una zona crítica y donde se debe conseguir tantos puntos como nos permita el control de excitación.
- c) Lecturas por encima de 110% de la tensión nominal. Estas lecturas se deben tomar como mínimo dos puntos, incluyendo un punto a 120% de la corriente de campo nominal sin carga.
- d) Se deben tomar lecturas de la tensión línea a línea de las tres fases para comprobar el equilibrio de fases y es válido tomar el promedio de las tensiones medidas, y se deben hacer bajo condiciones constantes de velocidad y excitación.
- e) Las lecturas para esta curva siempre deben tomarse con el aumento progresivo de la excitación. Si por alguna razón es necesario disminuir la corriente de campo, se debe reducir completamente a cero y luego aumentar cuidadosamente hasta el valor deseado para eliminar así los efectos de histéresis en los resultados.
- f) Las máquinas deben funcionar por varios minutos en cada punto de tensión para evitar incluir las perturbaciones causadas por la variación en la velocidad y la excitación.

2.5.1.3 Curva de Saturación en Cortocircuito [9]

- La curva de saturación de cortocircuito se obtiene mediante la conducción de la máquina bajo prueba en modo generador, a la velocidad nominal, en cortocircuito la armadura y registrando la corriente de campo y de armadura.

- Para obtener la curva de saturación en cortocircuito se debe proceder de la siguiente manera:
 - a) Las lecturas deben registrarse para las corrientes en aproximadamente al 125%, 100%, 75%, 50% y 25% de la corriente de armadura nominal.

 - b) Las lecturas deben ser tomadas con la corriente de campo disminuida ya que puede producir una corriente de armadura igual o superior a la máxima permitida. El punto más alto de corriente se debe medir primero de modo que la temperatura del devanado se mantenga constante como sea posible durante su funcionamiento.

 - c) Se deben tomar lecturas de las corrientes en las tres fases para revisar el balance de corriente.

2.5.1.4 Curva de saturación a factor de potencia cero [9]

- La curva de saturación a factor de potencia cero se obtiene sobreexcitando la máquina bajo prueba (modo generador) mientras se conecta con una carga que consiste de una máquina síncrona subexcitada (modo motor) y trabajando en vacío. Mediante el ajuste

adecuado de la excitación de la máquina bajo prueba y la de su carga, el voltaje de armadura se puede variar mientras que la corriente de armadura de la máquina durante la prueba debe mantenerse constante en cada punto de medición (preferiblemente a corriente nominal).

- Esta característica se utiliza para obtener el valor de la reactancia de Potier (X_p).

2.5.1.5 Métodos para determinar la reactancia de Potier (X_p) [9]

2.5.1.5.1 A Factor de Potencia cero [9]

La reactancia de Potier se determina a partir de la curva de saturación en vacío y de la corriente nominal de la curva de saturación a factor de potencia cero sobreexcitado. Las curvas típicas que se obtienen se representan gráficamente en la figura 13.

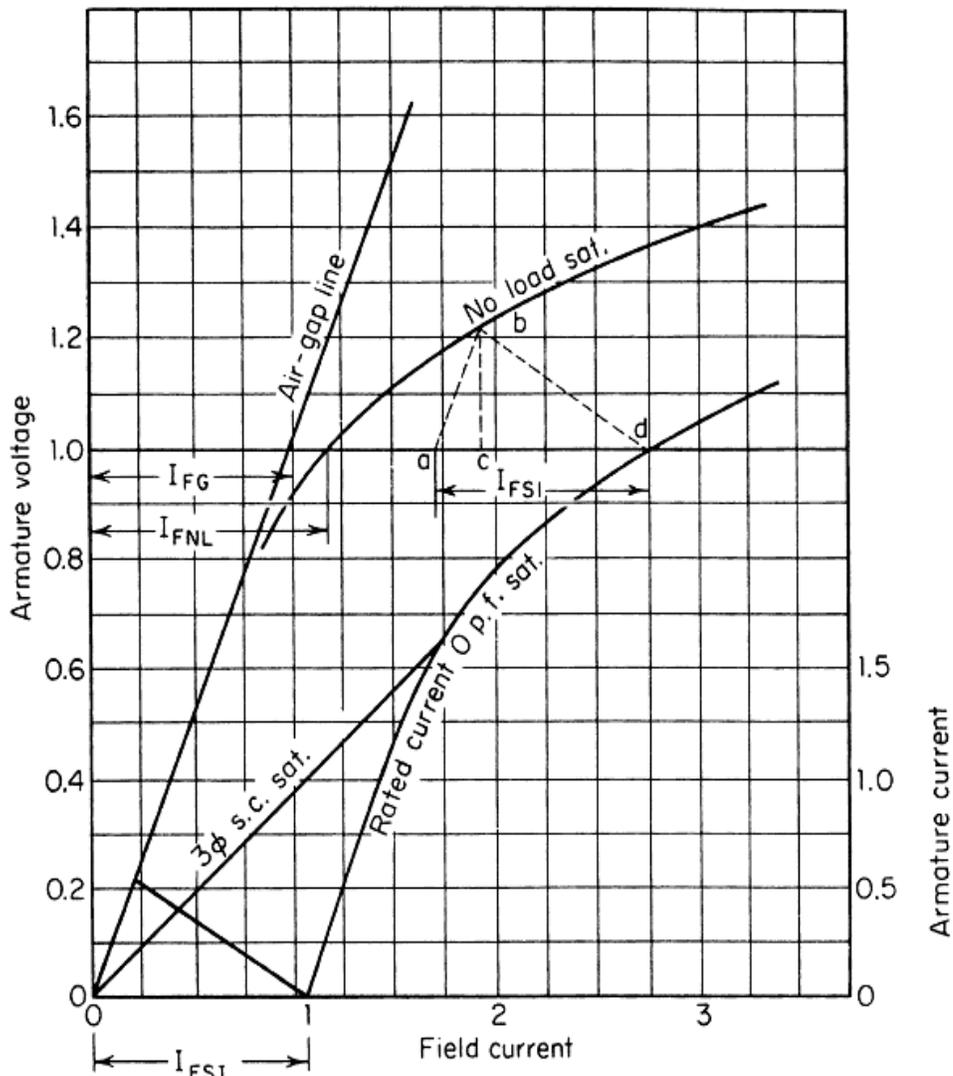


Figura 13. Método gráfico para la determinación de la reactancia de Potier [9]

- a) La intersección de la curva de saturación a factor de potencia cero con el valor del voltaje nominal se localiza el punto *d*, como se muestra en la figura 13.
- b) A la izquierda del punto *d* sobre la ordenada del voltaje nominal se ubica el punto *a*, en donde la longitud \overline{ad} es igual al valor de la

corriente de campo (I_{FSI}) para una tensión nula sobre la curva de saturación factor de potencia cero.

- c) A través del punto **a** se dibuja una línea paralela con la línea del entrehierro. La intersección de esta línea dibujada con la curva de saturación en vacío forma el punto **b**.
- d) Desde el punto **b** se traza una línea vertical y que corte con la ordenada de tensión nominal y se forma el segmento \overline{bc} , que es igual al producto de la corriente nominal de inducido y la reactancia de Potier (X_p), es decir:

$$I_a X_p = \overline{bc} \rightarrow X_p = \frac{\overline{bc}}{I_a} \quad (9)$$

2.5.1.6 Métodos de cálculo de excitación para condiciones específicas de carga [9]

La corriente de campo para una determinada corriente de armadura, tensión de armadura y factor de potencia de una máquina síncrona se pueden obtener por los métodos siguientes:

2.5.1.6.1 Método 1. Análisis por diagrama fasorial [9]

Las siguientes terminologías son usados en 2.5.1.6.1.1 y 2.5.1.6.1.2 en el cual se describen los pasos para el análisis por diagrama fasorial:

E_a : La tensión en el terminal de la máquina.

I_a : La corriente de armadura de la máquina.

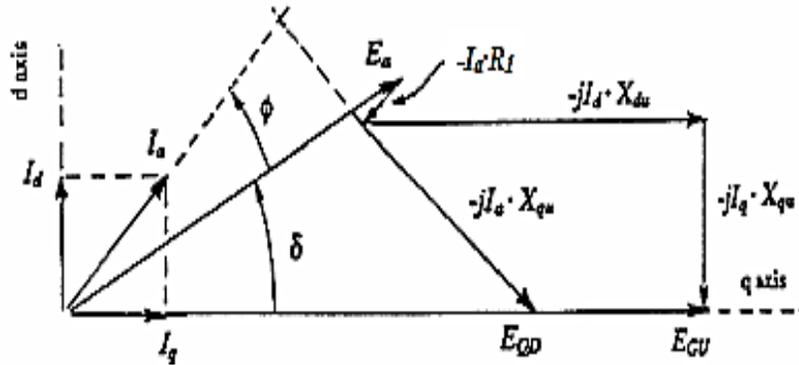


Figura 15. Diagrama fasorial para calcular E_{GU} en modo motor [9]

La ecuación (10) representa la expresión general para la obtención del ángulo de carga (δ) en función de los parámetros medidos en la máquina bajo prueba.

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{|I_a| R_1 \sin(\varphi) + |I_a| X_{qu} \cos(\varphi)}{|E_a| \pm |I_a| R_1 \cos(\varphi) |I_a| \mp X_{qu} \sin(\varphi)} \right] \quad (10)$$

Para la operación en modo generador, la ecuación (10) cambia de la siguiente manera (11):

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{|I_a| R_1 \sin(\varphi) + |I_a| X_{qu} \cos(\varphi)}{|E_a| + |I_a| R_1 \cos(\varphi) |I_a| - X_{qu} \sin(\varphi)} \right] \quad (11)$$

Según los pasos establecidos por [9] en la determinación de la magnitud y fase de E_{GU} e I_{FU} son los siguientes:

- a) Se calcula el valor del ángulo de carga (δ) mediante la expresión (10), teniendo en cuenta que el ángulo de fase (φ) es negativo cuando I_a retrase a E_a y es positivo cuando ocurre lo contrario.

- b) Se calcula el valor de la magnitud y fase de la corriente en el eje directo y de cuadratura utilizando las ecuaciones fasoriales (12) y (13):

$$I_d = |I_a| \operatorname{sen}(\delta - \phi) < \delta - 90^\circ \quad (12)$$

$$I_q = |I_a| \operatorname{cos}(\delta - \phi) < \delta \quad (13)$$

- c) Se calcula el valor de la caída de tensión generada no saturada (E_{GU}) (14)

$$E_{GU} = E_a + I_a R_1 + j I_q X_{qu} + j I_d X_{du} \quad (14)$$

- d) Se determina el valor aproximado de la corriente de excitación (I_{FU}) localizando el valor de la caída de tensión generada no saturada (E_{GU}) sobre la línea del entrehierro.
- e) Se calcula el valor de la caída de tensión de la reactancia de Potier (E_p) utilizando la siguiente ecuación fasorial (15):

$$E_p = E_a + I_a R_1 + j I_a X_p \quad (15)$$

- f) Se encuentra el valor de la corriente de excitación (I_{FS}), la cual representa la diferencia entre la corriente de excitación requerido para inducir la caída de tensión sobre la reactancia de Potier (E_p) sobre la línea del entrehierro (I_{FG}) y el valor de la corriente de excitación correspondiente con la misma tensión sobre la curva de saturación en vacío (I_{FSI}) (figura12), es decir (16):

$$I_{FS} = I_{FG} - I_{FSI} \quad (16)$$

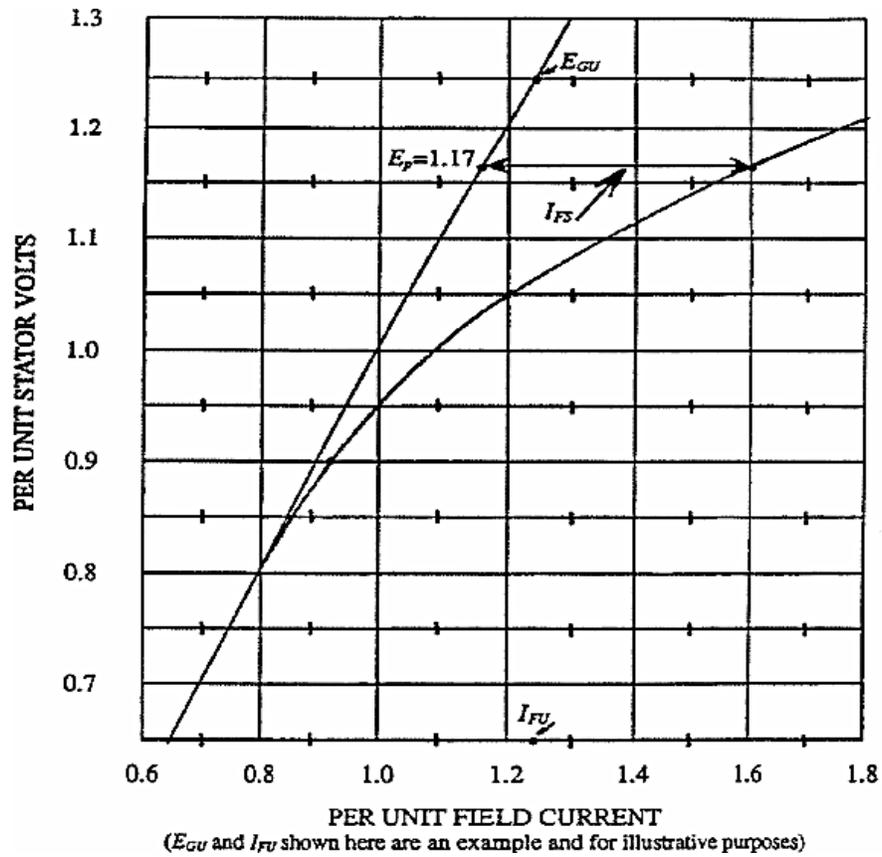


Figura 16. Ejemplo ilustrativo que muestra la ubicación de E_{GU} , I_{FU} e I_{FS} sobre la curva de saturación en vacío y la línea del entrehierro [9]

- g) La corriente de campo total incógnita (I_F) se calcula con la suma de los efectos de la corriente de excitación en saturación (I_{FS}) y no saturación (I_{FU}), y es igual a lo siguiente (17):

$$I_F = I_{FU} + I_{FS} \quad (17)$$

2.5.1.6.1.2 Para máquinas de rotor cilíndrico [9]

El procedimiento para las máquinas de rotor cilíndrico es más simple ya que $X_{qu} = X_{du}$, en donde la notación como generador se sigue asumiendo y se utiliza como punto de partida para explicar los pasos establecidos por [9] en la determinación de la magnitud y fase de E_{GU} e I_{FU} , en la cual son los siguientes:

- a) Calculamos el voltaje generado no saturado (E_{GU}) con la ecuación fasorial (18):

$$E_{GU} = E_a + I_a R_1 + j I_a X_{du} \quad (18)$$

- b) Encontramos el valor de la corriente de excitación (I_{FU}) para el valor del voltaje generado no saturado (E_{GU}) sobre la recta del entrehierro.
- c) Calculamos el voltaje de la reactancia de Potier (E_p) con la ecuación fasorial (19):

$$E_p = E_a + I_a R_1 + j I_a X_p \quad (19)$$

- d) Encontramos la corriente de campo saturado (I_{FS}) de la misma forma que en el caso anterior y utilizando la ecuación (16).
- e) La corriente de campo total (I_F) es la suma de los efectos de la saturación y la no saturación y se calcula utilizando (17).

2.5.1.6.2 Método 2. Cálculo de la corriente de excitación a través del método de Potier [9]

- Si una máquina trabaja en régimen sobreexcitado, el ángulo del factor de potencia (φ) es positiva y se dibuja por encima del eje de las abscisas (eje de corriente). En cambio, para una máquina en régimen subexcitado el ángulo de factor de potencia (φ) es negativo y se dibuja por debajo del eje de las abscisas. En la siguiente ilustración (Figura 13), se asume la notación como generador y se utiliza como punto de partida para explicar los pasos establecidos por [9], en la cuales son los siguientes:
 - a) Obtenidos la curvas de saturación en vacío, la recta del entrehierro y el valor de la reactancia de Potier (X_p), se procede a dibujar el valor de la magnitud de del fasor tensión de armadura (E_a), con un ángulo de inclinación positivo igual al factor de potencia (φ) y por encima del eje de las abscisas (eje de corriente) (Figura 13).
 - b) Se proyecta la magnitud del fasor tensión de armadura (E_a) sobre el eje de las ordenadas (tensión de la armadura). Luego se encuentra el valor aproximado de la corriente de excitación (I_{FG}), intersectando dicho valor de tensión sobre la recta del entrehierro (Figura 13).
 - c) Se dibuja la magnitud del fasor caída de tensión sobre la resistencia de armadura ($I_a R_1$), apuntando hacia la derecha y en paralelo al eje de las abscisas (corriente de excitación) (Figura 13).
 - d) Se dibuja el fasor $I_a X_p$ perpendicular al eje de las abscisas (eje de corriente) apuntando hacia arriba, ya que se está considerando la máquina en modo generador y en régimen sobreexcitado (Figura 13).

- e) La suma total de los fasores encontrados anteriormente es igual al fasor tensión sobre la reactancia de Potier (E_p), es decir (20):

$$E_p = E_a + I_a R_1 + I_a X_p \quad (20)$$

- f) Teniendo la magnitud del fasor E_p , se proyecta sobre el eje de las ordenadas (Eje de tensión) (Figura 13). También puede calcularse la magnitud de la reactancia de Potier utilizando la ecuación (21):

$$E_p = \sqrt{(E_a \cos(\varphi) \pm I_a R_1)^2 + (E_a \operatorname{sen}(\varphi) + I_a X_p)^2} \quad (21)$$

Para la operación en modo generador, la ecuación (21) cambia de la siguiente manera (22):

$$E_p = \sqrt{(E_a \cos(\varphi) + I_a R_1)^2 + (E_a \operatorname{sen}(\varphi) + I_a X_p)^2} \quad (22)$$

- g) El valor aproximado de las corrientes de excitación (I_{FS}) se encuentra de la misma forma como se planteó en 2.5.1.5.1, y se utiliza la ecuación (17).
- h) El valor de la corriente de excitación (I_{FSI}) se consigue utilizando los pasos del apartado (g).
- i) La corriente de campo para una corriente de armadura específica, factor de potencia y voltaje de armadura puede ser obtenida como se muestra en las figuras 14 y 15. Los valores deberían ser llevados a una escala por unidad, con el ángulo de factor de potencia (φ) a la derecha de la vertical para una máquina en régimen sobreexcitado o a la

izquierda de la vertical para una máquina en régimen subexcitado. El ángulo entre I_{FG} e I_{FL} corresponde al valor del ángulo de carga (δ).

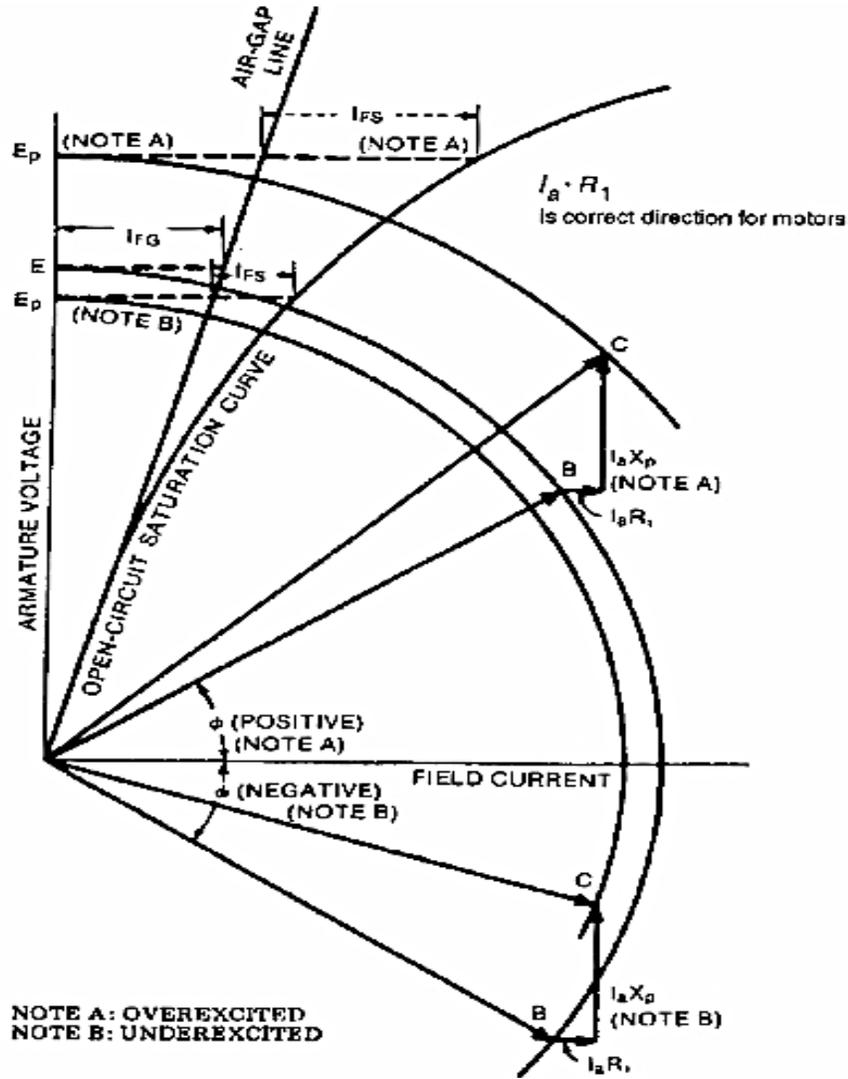


Figura 17. Diagrama fasorial para el cálculo aproximado de E_p para una máquina sincrónica en modo generador [9]

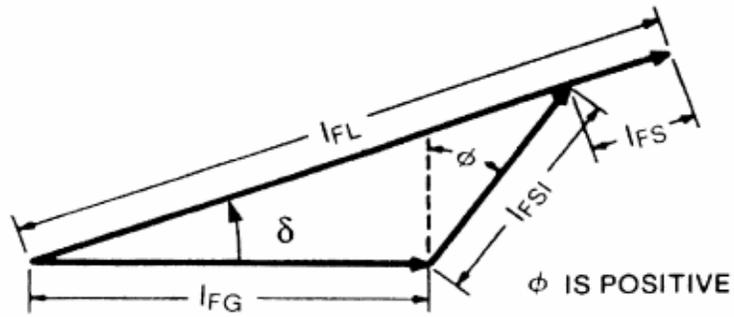


Figura 18. Método gráfico para determinar la corriente de campo bajo régimen sobreexcitado para generador o motor [9]

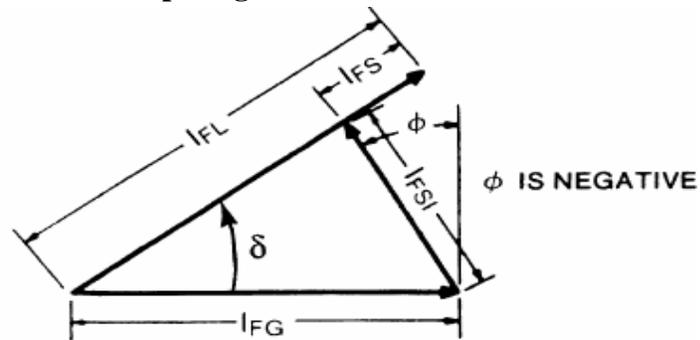


Figura 19. Método gráfico para determinar la corriente de campo bajo régimen subexcitado para generador o motor [9]

- j) El valor de la corriente de campo bajo carga (I_{FL}) se puede obtener utilizando siguiente ecuación (23):

$$I_{FL} = I_{FS} + \sqrt{(I_{FG} + I_{FSI} \text{sen}(\varphi))^2 + (I_{FSI} \text{cos}(\varphi))^2} \quad (23)$$

Donde:

φ : Es el ángulo del factor de potencia, positivo para operación sobreexcitado y negativo para la operación subexcitado, con el fasor de la corriente de armadura como referencia.

I_{FG} : Es la corriente de campo para la línea del entrehierro a un voltaje de armadura específica.

I_{FSI} : Es la corriente de campo correspondiente a una corriente de armadura específica sobre la curva de saturación en cortocircuito.

I_{FS} : Es la diferencia entre la corriente de campo sobre la curva de saturación en circuito abierto y la corriente de campo sobre la línea del entrehierro, ambos para un voltaje E_p .

Todos los valores de la corriente de campo pueden estar en Amperios o en por unidad sobre una base adecuada.

2.5.1.7 Pruebas para determinar valores de los parámetros para condición en estado estable [9]

2.5.1.7.1 Reactancia sincrónica del eje directo (X_{du}) [9]

La impedancia sincrónica del eje directo no saturado (X_{du}) se obtiene de los resultados de la prueba de saturación de circuito abierto y la prueba de saturación de cortocircuito. Esta impedancia sincrónica es igual a la relación de corriente de campo en base a la corriente del inducido nominal a partir de la curva de saturación en cortocircuito (I_{FSI}) y la corriente de campo en base a la tensión de la armadura nomina sobre la línea del entrehierro (I_{FG}).

La reactancia sincrónica del eje directo se puede calcular utilizando la ecuación (24):

$$X_{du} = \frac{I_{FSI}}{I_{FG}} \quad (24)$$

Donde:

I_{FSI} : Es la corriente de campo correspondiente a la corriente de armadura base sobre la curva de saturación en cortocircuito.

I_{FG} : Es la corriente de campo correspondiente a la tensión base sobre la línea del entrehierro.

X_{du} : Es la reactancia sincrónica del eje directo no saturado.

2.5.1.7.2 Prueba de deslizamiento para el cálculo de la reactancia del eje de cuadratura (X_{qu}) [9]

- a) El ensayo de deslizamiento se realiza mediante el accionamiento del rotor de la máquina sincrónica bajo prueba a una velocidad ligeramente diferente por debajo del sincronismo, con el circuito de campo abierto y el circuito de armadura energizado por las tres fases con una fuente de alimentación AC y a un valor de tensión por debajo de la curva de saturación en circuito abierto. El montaje y la forma de onda de cada variable se muestran en la figura 20.

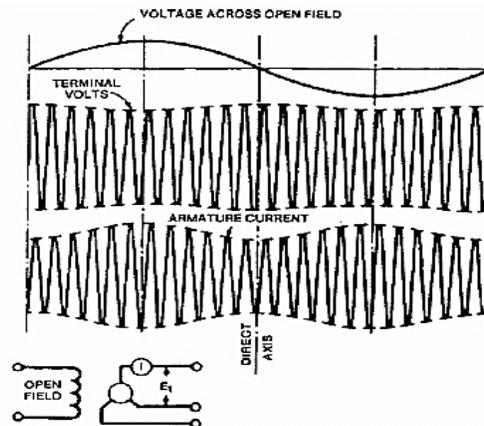


Figura 20. Método de deslizamiento para obtener la reactancia del eje de cuadratura no saturada (X_{qu}) [9]

- b) Mantener la velocidad constante se dificulta cuando el deslizamiento es lo suficientemente bajo para una determinación de la reactancia sincrónica del eje en cuadratura (X_{qu}) debido a los efectos de los polos salientes y las corrientes inducidas en el arrollado de amortiguamiento que produce un par pulsante. Cuando se requiere una mayor precisión en los resultados, se deben realizar las mediciones comenzando con el deslizamiento más pequeño posible y luego tomar tres o más valores con el aumento progresivo del deslizamiento (si la velocidad del conjunto no se mantenga constante durante la prueba).
- c) La tensión inducida en el circuito de campo puede alcanzar valores peligrosos cuando el deslizamiento es grande (mayores al 5% del deslizamiento nominal). Debido a la dificultad de mantener el deslizamiento deseado durante la prueba, es necesario observar continuamente la tensión en el devanado de campo y estar preparado para cortocircuitar el mismo inmediatamente para minimizar el riesgo de daño en los equipos de medición debido al aumento de la tensión.
- d) Las relaciones entre los mínimos y máximos valores del voltaje y de la corriente de armadura se obtienen para deslizamiento muy pequeño. Los valores aproximados de la reactancia del eje directo (X_d) y de la reactancia del eje de cuadratura (X_q) se obtienen a través de las ecuaciones (25) y (26), pero no se toman en cuenta como valores definitivos ya que este método sólo es factible para el cálculo de la reactancia en el eje de cuadratura no saturado (X_{qu}).
- e) El valor de la reactancia del eje de cuadratura no saturada obtenida bajo el procedimiento descrito por [9] se puede calcular su valor de la siguiente manera usando la ecuación (27):

$$X_q = \frac{E_{min}}{I_{m\acute{a}x}} \quad (25)$$

$$X_d = \frac{E_{m\acute{a}x}}{I_{min}} \quad (26)$$

$$X_{qu} = X_{du} \left(\frac{X_q}{X_d} \right) = X_{du} \left(\frac{E_{min}}{E_{m\acute{a}x}} \right) \left(\frac{I_{min}}{I_{m\acute{a}x}} \right) \quad (27)$$

Donde:

X_{du} : Valor de la reactancia del eje directo no saturado obtenido bajo el procedimiento descrito en el numeral 2.5.1.7.1 del presente trabajo.

2.5.1.8 Determinación del ángulo interno de carga (δ) [9]

Existen varios métodos para la determinación del ángulo de carga (δ) de una máquina bajo prueba, en las cuales son las siguientes:

2.5.1.8.1 Por Ecuación [9]

Un método del cálculo aproximado de δ se puede realizar utilizando la ecuación (28):

$$\delta = \text{tag}^{-1} \left(\frac{I_a X_{qs} \cos(\varphi)}{E_a + I_a X_{qs} \text{sen}(\varphi)} \right) \quad (28)$$

Donde:

E_a : Es la tensión del inducido en valor p.u.

I_a : La corriente del inducido en valor p.u.

X_{qs} : Es la reactancia sincrónica del eje de cuadratura saturado.

φ : Es el ángulo del factor de potencia.

2.5.1.8.2 Por técnica de medición estroboscópica [9]

- a) Este tipo de ensayo particular se efectúa observando el cambio en la posición del rotor (ángulo de carga) cuando se cambia la carga a una potencia específica, factor de potencia y voltaje, con condición sincronizada y con el mismo voltaje especificado (frecuencia nominal).
- b) La señal generada por el tacómetro óptico se compara con la forma de onda de tensión sinusoidal en los bornes y se anota cuantos cruces por cero ocurren en un determinado tiempo, justo cuando la onda sinusoidal pasa tener un valor positivo.
- c) El ángulo de carga (δ) en radianes eléctricos, se calcula utilizando la siguiente ecuación (29):

$$\delta = 2\pi f \cdot \Delta t \quad (29)$$

Donde:

f : Es la frecuencia. Δt : Es la diferencia en tiempo en el cambio de señal.

2.5.2 IEEE Std.118-1978: “IEEE Standard Test Code for Resistance Measurement” [10]

El propósito de esta norma es presentar métodos de medición de la resistencia eléctrica que se utilizan comúnmente para determinar las características de la máquina y equipos eléctricos. La elección del método en cualquier caso depende del grado de precisión requerido y el tipo de circuito a medir y se resumen en la siguiente tabla (tabla 1):

Tabla 1. Métodos de aplicación para la medición de resistencia [10]

Resistencia a ser medido	Precisión requerida	Métodos de puente	Métodos de medición directa	Métodos alternativos
Resistencia baja ($R_d < 5\Omega$)	Mayor que 0,1%	<ul style="list-style-type: none"> • Kelvin. • Comparador de corriente. 	No aplica	No aplica
	0,1%-1%	Kelvin	<ul style="list-style-type: none"> • Medidor integrador doble pendiente • Dispositivo en relación bobina cruzada 	No aplica
	Mayor que 1%	Cualquier otro circuito tipo puente	<ul style="list-style-type: none"> • Óhmetro de medición directa • Dispositivo en relación bobina cruzada 	Amperímetro
Valor intermedio de resistencia ($5\Omega < R_d < 10\Omega$)	Mayor que 0,01%	<ul style="list-style-type: none"> • Wheatstone. • Comparadores. • Comparador de corriente. 	No aplica	No aplica
	0,01%-1%	Wheatstone	<ul style="list-style-type: none"> • Medidor de integración doble puente 	<ul style="list-style-type: none"> • Amplificador operacional • Óhmetro de corriente constante
	Mayor que 1%	Cualquier otro circuito tipo puente	Amperímetro de medición directa	<ul style="list-style-type: none"> • Voltímetro/ amperímetro • Dispositivo de relación bobina cruzada • Método voltímetro

A continuación se describen brevemente algunos de los métodos de medición de resistencia presente en [10]:

2.5.2.1 Método Voltímetro-Amperímetro (caída de potencial) [10]

El esquema circuital del método Voltímetro-Amperímetro se muestra en la figura 21, y es el indicado para la medición de resistencias de bajo valor (por debajo de 5Ω).

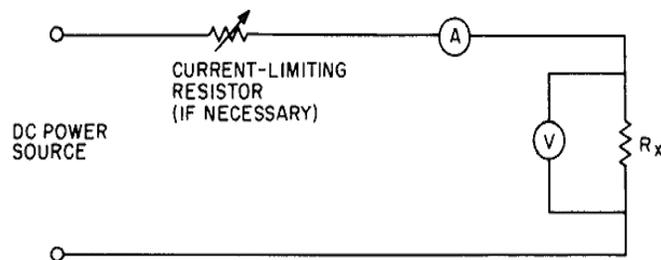


Figura 21. Circuito Voltímetro-Amperímetro para la medición de resistencia de bajo valor [10]

La ecuación (30) es usada para el cálculo de la resistencia de bajo valor:

$$R_x = \frac{V}{I - \frac{V}{R_V}} \quad (30)$$

Donde:

V: Es la lectura del Voltímetro.

I: Es la lectura del Amperímetro.

R_V : Es la resistencia interna del Voltímetro.

El esquema circuital del método Voltímetro-Amperímetro se muestra en la figura 22 es el recomendado para la medición de la resistencia de valor intermedio (entre 5Ω y 10Ω):

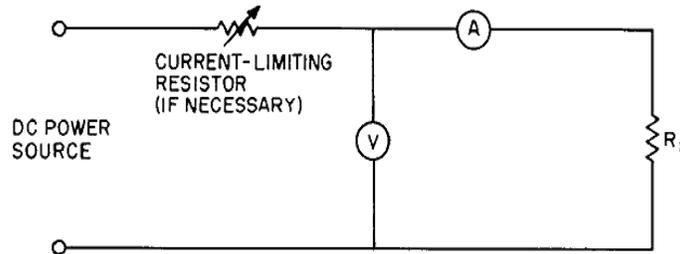


Figura 22. Circuito Voltímetro-Amperímetro para la medición de resistencia de valor intermedio [10]

La ecuación (31) es usada para el cálculo de la resistencia de valor intermedio (entre 5Ω y 10Ω):

$$R_x = \frac{V - IR_a}{I} \quad (31)$$

Donde:

V : Es la lectura del Voltímetro,

I : Es la lectura del Amperímetro

R_a : Es el valor de la resistencia interna del Amperímetro.

2.5.2.2 Método del Amperímetro [10]

Este método es conveniente para la medición de la resistencia de bajo valor (por debajo de 5Ω). El circuito básico utilizado para este método se muestra en la figura 23. Una lectura del Amperímetro (I_1) se toma con el interruptor

(S) abierto, luego el interruptor (S) se cierra y una nueva lectura (I_2) es tomada. El circuito del método del Amperímetro para la medición de la resistencia de valor bajo (debajo de 5Ω) es el siguiente:

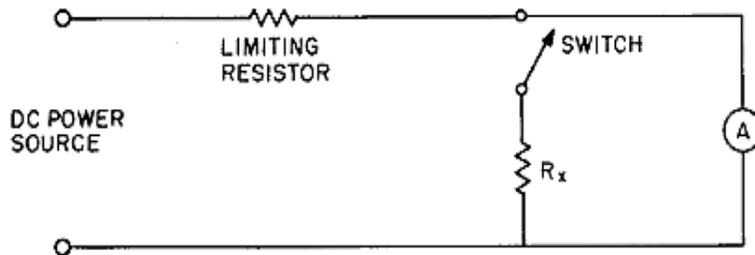


Figura 23. Método del Amperímetro para la medición de resistencia de bajo valor [10]

Para valores grandes de la resistencia de protección, está dada por la siguiente ecuación (32):

$$R_x = \frac{I_2 R_a}{I_1 - I_2} \quad (32)$$

Donde:

R_a : Es la resistencia interna del Amperímetro.

I_1 : El valor de la corriente medida antes de cerrar el interruptor.

I_2 : El valor de la corriente medida después de cerrar el interruptor.

2.5.2.3 Método del Voltímetro [10]

El método Voltímetro permite medirse tanto la tensión como la corriente con un mismo instrumento. Se deben tomar dos lecturas: con el interruptor en la

posición 1 se mide la tensión de alimentación, y con el interruptor en la posición 2 se mide la tensión entre la fuente DC y la resistencia incógnita. El esquema circuital del método del Voltímetro para la medición de la resistencia de valor bajo (entre 5Ω y 10Ω) es el siguiente (figura 24):

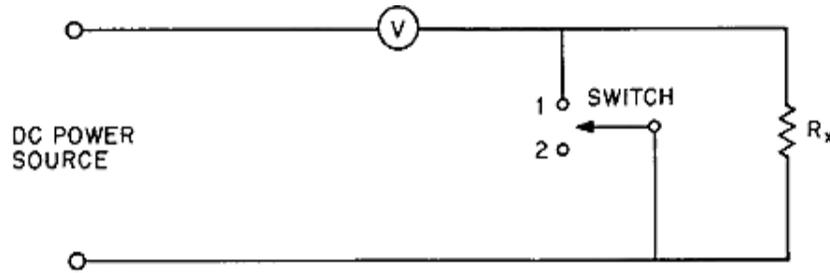


Figura 24. Método del Voltímetro para la medición de resistencia [10]

El valor de la resistencia incógnita se calcula usando la ecuación (33):

$$R_x = \frac{V_1 - V_2}{V_2} R_V \quad (33)$$

Donde:

R_V : Es la resistencia interna del Voltímetro.

V_1 : Es la tensión leída por el Voltímetro con el switch en la posición 1.

V_2 : Es la tensión leída por el Voltímetro con el switch en la posición 2.

2.5.2.4 Amperímetro [10]

Este método es adecuado para la medición de resistencias de bajo valor (Por debajo de 5Ω). El circuito básico se muestra en la figura 25. Con la resistencia a medir (R_x) desconectado, la resistencia de control (R) se ajusta

de manera que el instrumento lea en la escala completa. La lectura se toma con R_x conectado.

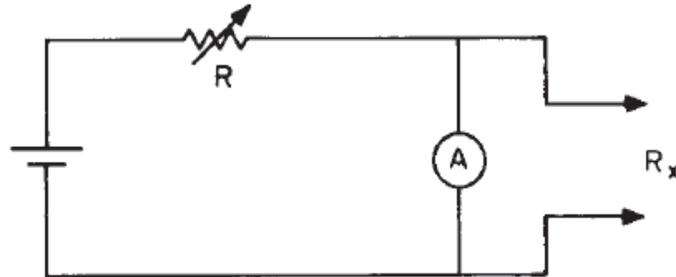


Figura 25. Amperímetro [10]

El valor de R_x está dado por la siguiente ecuación (34):

$$R_x = \frac{mR_a}{1 - m} \quad (34)$$

Donde R_a es la resistencia del amperímetro y m es la fracción de la escala que el instrumento indica.

2.5.2.5 Puente de Kelvin [10]

Cuando se quiere medir resistencia de valor bajo (generalmente por debajo de 5Ω), utilizando una configuración de resistencias de cuatro terminales, el puente de Kelvin es frecuentemente usado (Figura 26). Este puente es similar al puente de Wheatstone, aunque el circuito contiene un elemento adicional de resistencias (a y b). Este arreglo permite esencialmente eliminar los efectos de carga en los cables y el error de medición de resistencia de los contactos. Cuando el puente está balanceado es indicado por una lectura nula

en el detector D , entonces la resistencia desconocida es dada por la siguiente ecuación (35):

$$R_x = R_s \frac{R_A}{R_B} + \left[\frac{R_b R_y}{R_a + R_b + R_y} \right] \left[\frac{R_A}{R_B} - \frac{R_a}{R_b} \right] \quad (35)$$

Donde R_a y R_b son los valores de la resistencia a y b del puente y R_y es el valor de la rama Y. Si $\frac{R_A}{R_B}$ es exactamente igual a la relación $\frac{R_a}{R_b}$, entonces tenemos que (36):

$$R_x = R_s \frac{R_A}{R_B} \quad (36)$$

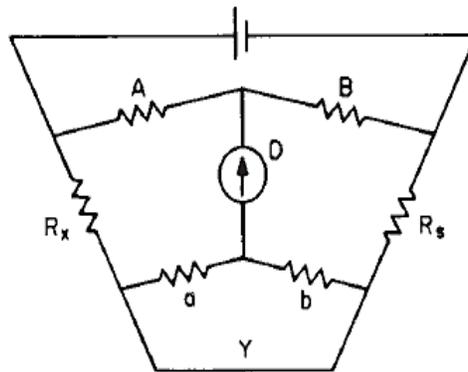


Figura 26. Puente de Kelvin [10]

La relación (36) es útil ya que mantenemos el valor de la resistencia de la rama Y lo más pequeña posible para así poder reducir al mínimo el error causado por el cobre y el contacto con resistencias distintas a lo presente en el circuito del dispositivo. Para obtener la mayor precisión posible, se debe tener cuidado el equilibrio del circuito ya que R_y no es despreciable.

2.5.2.6 Puente de Wheatstone [10]

El circuito del Puente de Wheatstone (Figura 27) se compone de cuatro ramas de resistencia, una fuente de corriente (generalmente una batería) y un detector D . La medición de la resistencia R_x se hace en términos de las tres resistencias conocidas. El ajuste de las tres resistencias se hace con el ajuste de la corriente a cero mediante con el detector llevando a equilibrio el circuito.

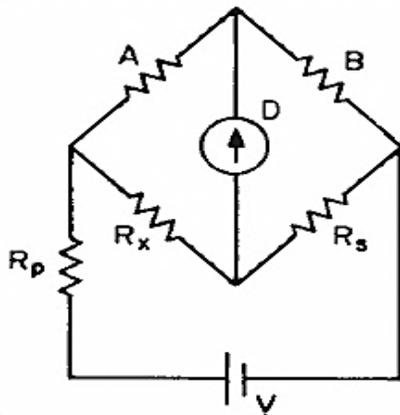


Figura 27. Puente de Wheatstone [10]

Cuando el puente está balanceado, indicando en el detector D una lectura nula, la resistencia desconocida es dada por la siguiente ecuación (37):

$$R_x = \frac{R_A}{R_B} R_s \quad (37)$$

Donde R_A y R_B son los valores de la relación de resistencia del circuito, mientras que R_s es el valor de una resistencia estándar. Esta resistencia puede ser ajustable de forma continua o por pasos. Una resistencia de protección R_p se utiliza para proteger los elementos del puente.

2.5.3 ANSI/IEEE C57.12.91.1979 IEEE Standard test code for Dry-Type Distribution and Power Transformers [11]

Los métodos de ensayos especificados en [11] son aplicables a transformadores de distribución y potencia tipo seco, excepto los transformadores de medida, reguladores de voltaje de inducción y de paso de voltaje, transformadores rectificadores, transformadores especiales y autotransformadores. Sólo se van a tomar los procedimientos descritos para la medición de la resistencia eléctrica de los devanados, ya que en [10] no se tienen las condiciones de ensayo ni tampoco el tipo o clase de instrumento que debemos utilizar a la hora de realizar la medición.

2.5.3.1 Métodos de medición de resistencia [11]

2.5.3.1.1 Método de puente [11]

- El método de puente es generalmente preferido debido a su precisión y conveniencia y suele ser empleados para la medición de resistencias hasta 10000Ω . Se deben utilizar en los casos en que la corriente nominal a medir en el devanado es menor de 1 amperio.
- Para valores de resistencia mayor de 1Ω se recomienda el uso del puente de Wheatstone. Para valores de resistencia menor de 1Ω es recomendado el uso del puente de Kelvin.

2.5.3.1.2 Método voltímetro-amperímetro [11]

- El método de voltímetro-amperímetro es a veces más conveniente que el método de puente. Se debe utilizar sólo si la corriente nominal del devanado es de 1 ampere o más.
- La medición es realizada en corriente directa y se toman lecturas simultáneas de corriente y tensión. La resistencia requerida se calcula a partir de las lecturas y de acuerdo con la ley de Ohm. Una batería o un rectificador filtrado se encontrarán generalmente más satisfactorio como una fuente DC o una máquina de conmutación de red. Este último puede causar que la aguja del voltímetro vibre debido al voltaje de rizado.
- Los instrumentos de medición deben tener escalas tales que abarquen todo el rango de medición.
- Los cables del voltímetro deberán ser independientes y se conectan lo más cerca posible de los terminales del devanado a medir, para evitar la inclusión en la lectura de las resistencias de los cables y la de sus contactos.
- Si la caída de tensión es inferior de 1 voltio se utilizará un milivoltímetro o potenciómetro.
- No se tomarán las lecturas hasta que los valores se estabilicen en los instrumentos.
- Para reducir el tiempo necesario en donde la corriente alcance su valor estable, debe añadirse una resistencia externa no inductiva en serie con la

fuente DC, y debe ser grande en comparación con la resistencia del devanado.

- Se tomarán por lo menos cuatro valores de corriente y tensión cuando se utilicen instrumentos deflexivos. El promedio de las resistencias calculadas a partir de estas mediciones se considera como la resistencia del devanado.
- La corriente no deberá exceder del 15% de la corriente nominal del bobinado cuya resistencia se va a medir ya que a valores grandes de corriente pueden causar inexactitud por calentamiento del devanado, cambiando de ese modo el valor de la resistencia.
- Si la corriente es demasiado baja para ser leída en un amperímetro deflexivo, debe ser usado un milivoltímetro digital o potenciómetro.

CAPÍTULO III

3 IEC (INTERNACIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION) [8]

Es la organización líder a nivel mundial para la preparación y publicación de estándares internacionales para todas las tecnologías eléctricas, electrónicas y relacionadas. IEC ofrece una plataforma para las empresas, industrias y gobiernos, encuentro de discusión y desarrollo de las normas internacionales que lo requieran.

Todas las normas internacionales IEC son totalmente basadas en el consenso y representa las necesidades de los actores claves de todas las naciones que participan en el trabajo de la organización, en donde, cada país miembro tiene un voto y una voz dentro de la organización. Más de 10000 expertos de la industria, los grupos de comercio, gobierno, instituciones académicas, laboratorios de investigación y de consumidores participan en la obra de normalización de IEC.

La IEC coopera con la norma ISO (International Organization for Standardization) o de la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) para asegurarse de que las normas internacionales encajen a la perfección y se complementen entre sí. Los comités conjuntos deben asegurarse de que las normas internacionales combinen todos los conocimientos de expertos que trabajan en las áreas relacionadas.

3.1 Historia de IEC [8]

IEC fue fundada oficialmente en Junio de 1906, en Londres, Inglaterra, donde se estableció la primera oficina central de comités técnicos.

En 1914, IEC se habían formado cuatro comités técnicos para hacer frente a la nomenclatura, símbolos, grado de maquinaria eléctrica y maquinaria primaria. La comisión también había publicado una primera lista de términos y definiciones que cubren maquinaria y aparatos eléctricos, una lista de letras de los símbolos internacionales para las cantidades y signos para los nombres de las unidades, una norma internacional para la resistencia del cobre, una lista de definiciones relacionadas con las turbinas hidráulicas, y una serie de definiciones y recomendaciones relativas a las máquinas rotativas y transformadores.

En 1930, IEC estableció las unidades eléctricas siguientes: Hertz (unidad de frecuencia), Oersted (unidad de fuerza del campo magnético), Gauss (unidad de densidad de flujo magnético), Maxwell (unidad de flujo magnético), Gilbert (unidad de fuerza magnetomotriz), Var (unidad de potencia reactiva) y Weber (unidad del flujo magnético). Se decidió ampliar la serie existente de unidades prácticas en un sistema integral de unidades, que se convirtió en el Sistema de Giorgi, y ahora se conoce comúnmente como el Sistema Internacional (SI).

En 1938, IEC produjo la primera edición del Vocabulario Electrotécnico Internacional (VEI). La unificación de la terminología electrotécnica fue una de las principales tareas ejecutadas por el organismo. Con sus 2000 términos en francés, inglés, italiano y español, y sus definiciones en francés y en inglés, el VEI se consideró como un logro excepcional y que despertó gran interés entre los organismos técnicos internacionales fuera del campo electrotécnico.

En 1948, la oficina central de la IEC se trasladó a su actual sede en Ginebra, Suiza.

De 1948 a 1980, el número de comisiones técnicas pasa de 34 a 80, se comenzó a incluir nuevas tecnologías como condensadores, resistencias, dispositivos semiconductores, equipos eléctricos en la práctica médica y la navegación marítima y sistemas de radiocomunicación.

En 1974, IEC creó comités técnicos para hacer frente a las normas relativas a los láseres, con especial énfasis en la seguridad. Este comité ha desarrollado el sistema de cuatro clases de láser de referencia mundial y que son utilizados en la medicina, la educación, la investigación, el entretenimiento y en la industria.

En las dos últimas décadas del siglo 20, IEC haciendo frente a las nuevas tecnologías, se crearon nuevos comités técnicos para la elaboración de normas para la protección contra descargas atmosféricas, la fibra óptica, ultrasonidos, sistemas de turbinas eólicas y la automatización del diseño.

En 2005, IEC publicó la edición más reciente del diccionario IEC multilingüe, que contiene 19400 definiciones electrotécnicas de términos en francés e inglés y su equivalente en 13 idiomas.

3.2 Valores de IEC [8]

- La Comisión Electrotécnica Internacional sirve a los mercados mundiales y la sociedad a través de la estandarización y la labor de evaluación de la conformidad para todas las tecnologías eléctricas, electrónicas y afines (conocidas colectivamente como electrotécnicas).

- IEC promueve el comercio mundial, el crecimiento económico y fomenta el desarrollo de productos, sistemas y servicios que son seguros, eficientes y ambientalmente amigables.

3.3 Misión de IEC [8]

- Ser reconocida a nivel mundial como el principal proveedor de los estándares, en conformidad con los sistemas de evaluación y servicios relacionados que son necesarios para facilitar el comercio internacional y mejorar el valor de usuario en los campos de la electricidad, la electrónica y en las tecnologías asociadas.

3.4 Normas IEC asociadas a las pruebas con Máquinas Sincrónicas

3.4.1 IEC 60034-4 1985: “Methods for determining synchronous machine quantities from test” [13] [14]

El objeto de esta norma es establecer métodos para determinar las magnitudes características de las máquinas sincrónicas trifásicas a partir de los resultados de los ensayos. Esta norma es aplicable a las máquinas sincrónicas trifásicas de potencia nominal igual o mayor a 1 kVA, y en las cuales la frecuencia nominal no sea superior a 400 Hz ni inferior a 15 Hz.

A continuación la descripción de los ensayos y determinación de las magnitudes de las máquinas a partir de estos ensayos:

3.4.1.1 Determinación de la resistencia en corriente continua de un devanado, a partir de las mediciones en corriente continua por el método del voltímetro y del amperímetro o por el método del puente [13] [14]

- a) Para medir las resistencias en corriente continua por el método del voltímetro y del amperímetro o por el método del puente, se pueden utilizar cualquier fuente de corriente continua (batería, generador, etc.) que tenga una potencia suficiente y que suministre una tensión estable.
- b) La resistencia se debe medir directamente en los bornes del devanado con el rotor en reposo.
- c) La resistencia del devanado del inducido se debe medir en cada fase por separado. Si no se pudiera medir directamente la resistencia de cada fase, las medidas se efectúan sucesivamente entre cada par de bornes de línea del devanado del inducido.
- d) La corriente no debe ser mayor del 10% de la corriente nominal y no se debe aplicarse durante más de un minuto.
- e) Los aparatos utilizados para determinar las resistencias en corriente continua deben corresponder a una clase de exactitud igual o mayor a 0,5.
- f) El momento de las mediciones debe ser tal que en el instante en que las agujas de los aparatos estén inmóviles (los fenómenos transitorios deben haber desaparecido, tanto en los aparatos mismos como en los circuitos de los cuales se miden las resistencias).
- g) Para determinar la resistencia en corriente continua del devanado del inducido y la del devanado de excitación por el método del voltímetro y

del amperímetro, se recomienda efectuar tres a cinco mediciones para diferentes valores de corriente.

- h) Las resistencias de los devanados se calculan a partir de las mediciones realizadas por la ley de Ohm (38):

$$R = \frac{U}{I} \quad \Omega \quad (38)$$

Dónde:

U: Tensión aplicada al devanado, en voltios.

I: Corriente en el devanado, en amperios.

- i) El promedio de los resultados se toma como valor de la resistencia. En la determinación de este valor promedio, no se tienen en cuenta los resultados de medición que difieran en más de $\pm 0,01$ del valor promedio.
- j) Si las mediciones de la resistencia se efectúan sucesivamente entre cada par de bornes de línea del devanado del inducido, la resistencia de la fase 1 (R_1) se calcula por medio de una de las fórmulas siguientes (39) y (40):

Para los devanados conectados en estrella:

$$R_1 = \frac{R_{12} + R_{31} - R_{23}}{2} \quad \Omega \quad (39)$$

Para los devanados conectados en triángulo:

$$R_1 = \frac{2R_{12}R_{23}}{R_{12} + R_{23} - R_{31}} - \frac{R_{12} + R_{23} - R_{31}}{2} \quad \Omega \quad (40)$$

Donde:

R_{12} , R_{23} y R_{31} designan las resistencias medidas entre los bornes 1-2, 2-3 y 3-1 respectivamente.

- k) Al medir por el método del puente, las resistencias en corriente continua del devanado del inducido y/o devanado de excitación, es necesario efectuar al menos tres lecturas, cambiando cada vez el equilibrio del puente.
- l) La resistencia de un devanado inductor se debe medir a partir de los anillos o de los extremos del devanado, al fin de que no intervengan las resistencias de estos.
- m) El promedio de los resultados se toma como valor de la resistencia, y al determinar este valor promedio, no se tienen en cuenta los resultados de medición que difieran en más de $\pm 0,01$ del valor promedio.
- n) Si las mediciones de resistencia se efectúan en forma sucesiva entre cada par de bornes de línea del devanado del inducido, las resistencias de fase se calculan de acuerdo a las ecuaciones (39) y (40).
- o) El medidor de puente sencillo no es recomendable para medir valores de resistencia menores a 1Ω .

3.4.1.2 Ensayo de saturación en vacío [13] [14]

El ensayo de saturación en vacío se efectúa:

Activando la máquina a ensayar como generador mediante un motor adecuado:

- a) Durante el ensayo en vacío, se deben medir en forma simultánea la corriente de excitación, la tensión en los terminales y la frecuencia (o la velocidad de rotación).
- b) Para efectuar el ensayo en vacío, la variación de la corriente de excitación se debe efectuar por escalones progresivos avanzando desde las tensiones más elevadas hacia las tensiones más bajas, con los puntos distribuidos uniformemente. En lo posible, el ensayo se debe iniciar a la tensión que corresponda a la excitación a plena carga y al menos a 1,3 veces la tensión nominal de la máquina ensayada, y proseguir hasta 0,2 veces esa tensión nominal. Cuando la corriente de excitación se reduzca a cero, se mide la tensión residual.

Haciendo rotar la máquina como motor en vacío mediante una fuente de tensión trifásica simétrica:

- a) Si el ensayo de saturación en vacío se efectúa haciendo rotar la máquina sincrónica como motor en vacío, también es necesario medir además de las magnitudes mencionadas anteriormente, la corriente en el devanado del inducido.

- b) En cada escalón de tensión, es necesario hacer varias lecturas con el propósito de determinar el valor mínimo de aquella corriente que corresponda a un factor de potencia igual a la unidad.

Si se produce una tensión residual elevada, donde la característica en vacío corta el eje de las ordenadas por encima del origen, es necesario introducir una corrección. Para este efecto, la parte rectilínea de la curva de vacío se prolonga hasta su punto de intersección con el eje de las abscisas. La longitud del eje de las abscisas, limitada por ese prolongamiento de la curva, representa el valor de la corrección que se deberá agregar a todos los valores medidos de la corriente de excitación.

3.4.1.3 Ensayo en corto circuito trifásico permanente [13] [14]

El ensayo en corto circuito trifásico permanente se efectúa:

Activando la máquina ensayada como un generador, por medio de un motor adecuado:

- a) El corto circuito se debe realizar tan cerca como sea posible de los bornes de la máquina, aplicando la corriente de excitación después de establecer el cortocircuito.
- b) Durante el ensayo en corto circuito trifásico permanente, la corriente de excitación y la corriente en línea del inducido se deben medir en forma simultánea. Una de las lecturas se hace a una corriente cercana de la corriente de inducido nominal. La velocidad de rotación (o la frecuencia) puede diferir de su valor nominal, pero no debe ser inferior a 0,2 veces el valor nominal.

3.4.1.4 Ensayo en sobreexcitación con factor de potencia cero [13] [14]

- a) El ensayo de sobreexcitación a factor de potencia cero se efectúa con la máquina funcionando como generador o como motor.
- b) Cuando la máquina funcione como motor, la carga en el eje debe ser cero.
- c) Durante el ensayo se determinan de preferencia los valores de la corriente de excitación que corresponda a los valores de la tensión y de la corriente del inducido que no difiera en menos de $\pm 0,15$ de los valores respectivos nominales, a un factor de potencia cero en funcionamiento sobreexcitado.

3.4.1.5 Determinación de la reactancia de Potier a partir de las características en vacío y en corto circuito trifásico permanente, y de la corriente de excitación correspondiente a la tensión nominal y a la corriente del inducido nominal con factor de potencia cero (sobreexcitación) [13] [14]

- a) La reactancia de Potier se determina gráficamente utilizando las características de saturación en vacío y saturación en corto circuito trifásico permanente, en el cual se representan en un mismo diagrama en por unidad (Figura 28). El punto **A** cuya ordenada corresponde a la tensión nominal y la abscisa es la corriente de excitación medida relacionado con la corriente del inducido nominal y a un factor de potencia nominal cero en sobreexcitación.

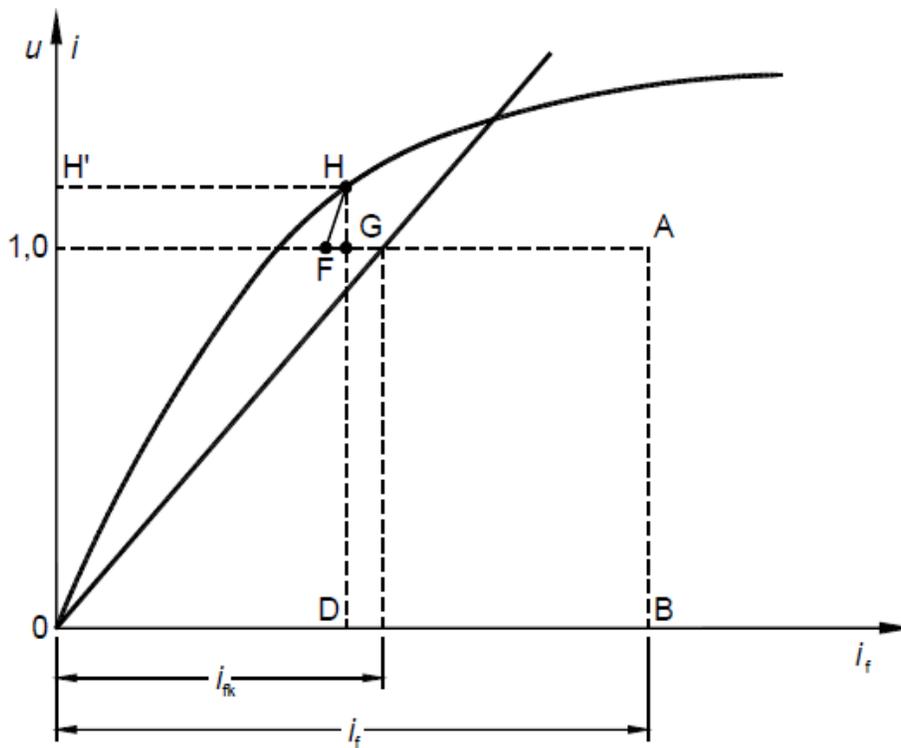


Figura 28. Procedimiento gráfico para la determinación de la reactancia de Potier [13] [14]

- b) A la izquierda del punto **A** y paralelamente al eje de las abscisas se traza una longitud \overline{AF} igual a la corriente de excitación (i_{fk}) que corresponde a la corriente del inducido nominal a la característica en corto circuito. A partir del punto **F** se traza una línea que es paralela a la parte inferior rectilínea de la característica de saturación en vacío, hasta su intersección (**punto H**) con la parte superior de la característica en vacío. La longitud \overline{HG} de la perpendicular desde el punto **H** sobre la línea \overline{AF} representa la caída de tensión en la reactancia X_p para la corriente del inducido nominal.
- c) En valor de la reactancia de Potier es (41): $X_p I_a = \overline{HG}$ (41)

caso de un generador sobreexcitado) que corresponde al factor de potencia nominal.

- c) El extremo del vector de tensión, perpendicularmente al vector de la corriente del inducido, se traza el vector de caída de tensión ($i_n X_p$) en la reactancia de Potier para la corriente del inducido nominal, despreciando la caída de tensión en la resistencia del devanado del inducido.
- d) Este vector se debe disponer en el diagrama (figura 30) en el sentido del vector de la corriente del inducido para los generadores y en el sentido contrario para los motores.
- e) La suma vectorial de la tensión nominal y de la caída de tensión en la reactancia X_p da el vector e_p de la f.e.m. La corriente de excitación i_{fp} correspondiente a esta f.e.m se determina en la característica en vacío y se traza en el diagrama a partir del origen y a 90° del vector de la f.e.m.
- f) La componente de la corriente de excitación que compensa la reacción del inducido a la corriente del inducido nominal (i_{fa}) se determina mediante la diferencia entre la corriente de excitación que corresponde a la corriente del inducido nominal de la característica en cortocircuito trifásico permanente y la corriente de excitación que corresponda a la caída de tensión en X_p debido a la corriente del inducido nominal sobre la característica de saturación en vacío. El vector i_{fa} se traza a partir del extremo del vector i_{fp} paralelamente al vector de la corriente del inducido. La corriente de excitación nominal i_{fn} es la suma vectorial de i_{fp} e i_{fa} .

Partiendo de su extremo, a la derecha de la vertical y siguiendo un ángulo φ_n (considerando como positivo en el caso de un generador sobreexcitado) correspondiente al factor de potencia nominal, se traza el vector de la corriente de excitación i_{fk} correspondiente a la corriente del inducido nominal de la característica en cortocircuito trifásico permanente.

- c) A lo largo del vector de la suma geométrica de estas corrientes de excitación, se traza un vector de corriente correspondiente a la diferencia (Δi_f) entre las corrientes de excitación de la característica de saturación en vacío (i_{fp}) y de la parte rectilínea de esta (i_{fep}), ambas para la tensión e_p . La suma de estos tres vectores mencionados anteriormente corresponde a la corriente de excitación nominal.

3.4.1.8 Ensayo a bajo deslizamiento [13] [14]

- a) Durante el ensayo a bajo deslizamiento, en los bornes del inducido de la máquina bajo prueba se aplica una tensión trifásica simétrica inferior a la nominal (entre $0,01V_n$ a $0,2V_n$). El devanado de excitación se debe poner en circuito abierto y el rotor debe ser accionado por un motor en tal forma que rote con un deslizamiento inferior al 1%.
- b) La corriente y la tensión en el devanado del inducido, así como el deslizamiento y la tensión de excitación se miden por medio de aparatos indicadores o se registran mediante el oscilógrafo.
- c) Si la tensión residual (U_{res}) medida antes del ensayo es superior al 30% de la tensión utilizada para el ensayo, el rotor debe ser desmagnetizado.

- d) Para determinar X_q por medio del ensayo a bajo deslizamiento se mide la tensión en los bornes y la corriente del inducido en el momento en que la tensión en los bornes del devanado de excitación (U_{fo}) sea máxima se calcula por la fórmula (43):

$$X_q = \frac{U_{min}}{\sqrt{3}I_{max}} \Omega \quad (43)$$

- e) Si en el curso del ensayo la tensión residual (U_{res}) está comprendida entre el 10% y 30% de la tensión de suministro utilizada para el ensayo, el valor de la corriente se determina por medio de la fórmula (44):

$$I_{max} = \sqrt{I_{av}^2 - \left(\frac{U_{res}}{\sqrt{3}X_d}\right)^2} \Omega \quad (44)$$

En donde I_{av} es la semisuma de dos máximos consecutivos de la curva envolvente de la corriente (Figura 27)

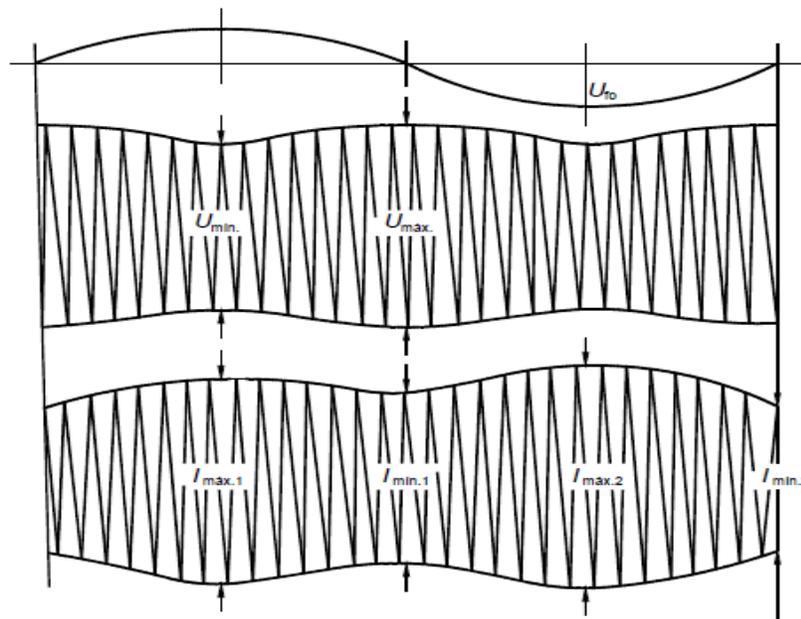


Figura 32. Método gráfico para la determinación de X_{qu} y X_{du} [13] [14]

- f) Se puede verificar el valor medido mediante el cálculo de X_d a partir del mismo ensayo, lo cual se logra midiendo la tensión y la corriente en el momento en que la tensión en los bornes del devanado de excitación con circuito abierto sea nula y se calcula de la siguiente manera (45):

$$X_d = \frac{U_{m\acute{a}x}}{\sqrt{3}I_{m\acute{i}n}} \Omega \quad (45)$$

- g) Si la tensión residual es inferior al 30% de la tensión de suministro utilizada para el ensayo, el valor de $I_{m\acute{i}n}$ está representada por la semisuma de dos mínimos consecutivos de la curva envolvente de la corriente (Figura 32).
- h) Los resultados de la medición de X_q por el método de ensayo a bajo deslizamiento, sólo pueden ser considerados como correctos si el valor de X_d obtenido con este ensayo coincida prácticamente con el obtenido en el numeral 3.5.1.6. En caso de no cumplirse esta condición se debe reiniciar el ensayo con valores cada vez más bajos del deslizamiento y extrapolar los valores sucesivos de X_q hasta un deslizamiento nulo.
- i) El valor de la reactancia sincrónica del eje en cuadratura obtenido por medio de este ensayo corresponde prácticamente al valor no saturado.

3.4.1.9 Ensayo en carga con medición del ángulo de carga (δ) [13] [14]

- a) El ensayo se ejecuta con la máquina funcionando en paralelo con la red y a una carga al menos igual a la mitad de la potencia nominal y a factor de potencia nominal.

- b) En el curso del ensayo se mide la corriente del inducido (i), la tensión en los bornes del inducido (u), el ángulo entre la tensión y la corriente por el método de dos vatímetros (φ) y el ángulo de carga (δ). Para medir el ángulo de carga se debe utilizar el método estroboscópico o cualquier otro método de precisión.

3.5 Otras normas consultadas

3.5.1 Norma Venezolana COVENIN 3172-1995: “Transformadores de Potencia. Métodos de ensayo” [16]

Esta norma venezolana describe los métodos de ensayo para verificar los requisitos que deben cumplir los transformadores de potencia. Aquí solo se va a extraer el procedimiento que describe la medición de resistencia de los devanados y qué equipos se utilizan y así tener una referencia distinta a las consultadas en [9], debido a que no aparecen las condiciones de ensayo ni tampoco el tipo o la clase de precisión de los instrumentos que se deben utilizar para obtener la medición de la resistencia.

3.5.1.1 Ensayo de medición de resistencia de los devanados [16]

El valor de resistencia de los devanados es de fundamental importancia para los siguientes propósitos:

- Cálculo de la componente I^2R en las pérdidas debidas a la carga.
- Cálculo de la temperatura de los devanados al final del ensayo de aumento de la temperatura.
- Como base de comprobación de posibles daños en campo.

Los equipos e instrumentos utilizados para este ensayo son:

- Medición de resistencia por el método de puente: Puente de Wheatstone, Thompson, Kelvin o instrumentos digitales de alta precisión especialmente diseñados para este ensayo.
- Mediciones de resistencia por el método del voltímetro-amperímetro: Fuente de corriente continua con bajo contenido de rizado, amperímetro de corriente continua, voltímetro de corriente continua, reóstato.

Al fin de minimizar los errores y proteger los instrumentos, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- a) Los instrumentos de medición deben estar en los rangos que den mayor deflexión del instrumento.
- b) A fin de evitar incluir en el cálculo de resistencia la de los conductores y terminales del circuito de corriente, se debe conectar el voltímetro lo más cerca posible al devanado a ser medido.
- c) Si la caída de tensión es menor de 1V, se puede emplear un milivoltímetro o un potenciómetro.
- d) Las lecturas, tanto de tensión como de corriente, se tomarán después que el régimen transitorio haya desaparecido.
- e) Cuando se usen instrumentos de deflexión, se deben tomar al menos cuatro lecturas, la media de las resistencias calculadas de estas mediciones se considera como la resistencia del devanado.

- f) La corriente utilizada no debe exceder el 15% de la corriente nominal del devanado cuya resistencia se quiere medir. Corrientes mayores pueden causar imprecisión por el calentamiento del devanado de tal modo que cambia los valores de resistencia y temperatura.

Se procede a medir la resistencia del devanado por uno de los siguientes métodos:

- Método del puente: Los métodos de puente se prefieren por su precisión y conveniencia porque pueden ser empleados para mediciones de resistencia de hasta $10\text{k}\Omega$. Para valores de resistencia de 1Ω o mayores, el puente de Wheatstone es el más usado; y para valores de resistencia inferiores a 1Ω el puente de Kelvin o doble Thompson es el más usado.
- Método del voltímetro y amperímetro: El método del voltímetro-amperímetro es algunas veces más conveniente que el método del puente. Este se debe emplear preferiblemente si la corriente nominal del devanado es de 1A o mayor. Las mediciones se realizan en corriente continua, las lecturas de tensión y de corriente se deben tomar simultáneamente. La resistencia se calcula de los valores medidos de acuerdo con la Ley de Ohm. Como fuente de corriente continua es preferible utilizar una batería; en caso de utilizar otro tipo de fuente, es necesario asegurarse que el factor de rizado de la misma sea tan bajo que no produzca vibraciones en las agujas de los instrumentos.

CAPITULO IV

4 DESCRIPCIÓN DE LA MÁQUINA BAJO PRUEBA

Para realizar las respectivas pruebas se va a trabajar sobre el grupo de máquinas sincrónicas de la marca Cenemesa-Westinghouse ubicados en el Laboratorio de Máquinas Rotativas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la U.C.V, cuyos valores nominales de placa se muestran a continuación:

Tabla 2. Datos de placa de la Máquina sincrónica 1 (MQ 1)

TIPO: W-326	NUM: 83959	MOTOR SINCRÓNICO
POTENCIA: 3kVA	RPM: 1200	FREC: 60
V: 220	AMP: 7,9	REND: 90%
FASES: 1-2-3-6-12		
EXCITACIÓN		
V: 125		AMP: 2,7

TIPO: W-326	NUM: 83959	MOTOR SINCRÓNICO
POTENCIA: 6HP	RPM: 1200	FREC: 60
V: 220	AMP: 15,2	REND: 90%
FASES: 1-2-3-6-12		
EXCITACIÓN		
V: 125		AMP: 2,7

La máquina sincrónica 1(MQ1) bajo estudio se muestra a continuación (Figura 28):



Figura 28. Máquina sincrónica 1(MQ1) bajo prueba

Tabla 3. Datos de placa de la Máquina sincrónica 2 (MQ2)

TIPO: W-326	NUM: 83952	ALTERNADOR
POTENCIA: 3kVA	RPM: 1200	FREC: 60
V: 110/220	AMP: 15,8/7,9	REND: 90%
FASES: 1-3-6		
EXCITACIÓN		
V: 125		AMP: 2,5

TIPO: W-326	NUM: 83952	ALTERNADOR
POTENCIA: 6HP	RPM: 1200	FREC: 60
V: 110/220	AMP: 15,8/7,9	REND: 90%
FASES: 1-3-6		
EXCITACIÓN		
V: 125		AMP: 3

La máquina síncrona 2 (MQ2) bajo estudio se muestra a continuación (Figura 29):



Figura 29. Máquina síncrona (MQ2) bajo prueba

La configuración de los bornes de la armadura presentes en MQ1 y MQ2 esta enumerados de forma diferente en relación a las otras máquinas presentes en el lugar. En la figura 30 y 31 se muestra mejor esta afirmación.



Figura 30. Configuración de los bornes de armadura de MQ1



Figura 31. Configuración de los bornes de la armadura de MQ2

Para este caso se procedió a consultar [12] y [15]. En base a lo recopilado en las normas consultadas, la conexión entre los bornes de la armadura de MQ1 y MQ2 se realiza de la siguiente manera:

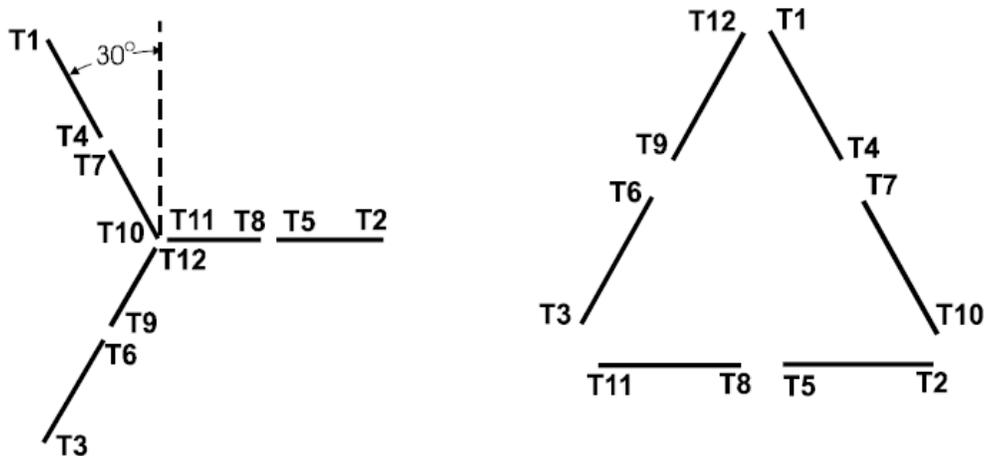


Figura 32. Esquema de conexión entre los bornes de armadura [12] [15]



Figura 33. Conexión en estrella de los bornes de la armadura de MQ1 y MQ2

El tipo de conexión en los devanados de la armadura ejecutado sobre ambas máquinas es en estrella y se va a mantener esta configuración en todas las pruebas que se hagan sobre las máquinas (Figura 33). Los bornes 1, 2 y 3 son los terminales de conexión del devanado de armadura, los bornes R1 y R2 son los bornes de conexión del devanado de campo. Los devanados a conectar entre ambas máquinas serán: T5-T8, T6-T9, T4-T7, T10-T11, T11-T12, T10-T12. Para la conexión de los devanados de armadura de ambas máquinas se utilizó cables de calibre grueso para evitar así la influencia de estos en las mediciones respectivas debido a la falta de los conectores originales de la máquina sincrónica. Se verificó la calidad de los cables de conexión midiendo la resistencia de los mismos utilizando el medidor de mayor precisión como el puente de Thomson Metrapont. A continuación la medición de la resistencia de los conductores seleccionados:

Para la máquina síncrona 1 (MQ1):

Tabla 4. Valores de resistencia eléctrica de los conductores conectores sobre los devanados de armadura (MQ1)

Resistencia de los conductores medidos (Ω)
$C_{4-7}:0,0016\pm0,0001$
$C_{5-8}:0,0021\pm0,0001$
$C_{6-9}:0,0024\pm0,0001$
$C_{10-11}:0,0024\pm0,0001$
$C_{11-12}:0,0016\pm0,0001$
$C_{10-12}:0,0017\pm0,0001$

Para la máquina síncrona 2 (MQ2):

Tabla 5. Valores de resistencia eléctrica de los conductores conectores sobre los devanados de armadura (MQ2)

Resistencia de los conductores medidos (Ω)
$C_{4-7}:0,0018\pm0,0001$
$C_{5-8}:0,0025\pm0,0001$
$C_{6-9}:0,0021\pm0,0001$
$C_{10-11}:0,0015\pm0,0001$
$C_{11-12}:0,0016\pm0,0001$
$C_{10-12}:0,0021\pm0,0001$

Hay que acotar que estas mediciones de resistencia de los conductores seleccionados para conectar los bornes de las máquinas síncronas bajo prueba incluyen el valor de la resistencia de los conectores.

Los valores nominales de placa de MQ1 son las siguientes:

- La corriente nominal:

$$I_{nom} = \frac{S_{nom}}{\sqrt{3}V_{nom}} = \frac{3kVA}{\sqrt{3} * 220V} = 7,873 A \cong 7,9 A$$

- Potencia activa nominal (como generador):

$$P_{nom} = 0,8 * S_{nom} = 2,4kW$$

- Factor de potencia nominal (como generador):

$$f_{p(nom)} = \frac{2,4kW}{\sqrt{3} * 220V * 7,9A} = 0,8$$

- Potencia activa nominal (como motor):

$$P_{nom} = 745,7 \left(\frac{W}{HP} \right) * 6HP = 4,47kW$$

- Factor de potencia nominal (como motor):

$$f_{p(nom)} = \frac{4,47kW}{\sqrt{3} * 220V * 15,2A * 0,9} = 0,8575 \cong 0,86$$

- Pares de polos de la máquina:

$$p = \frac{60 * f}{n} = \frac{60 * (60Hz)}{1200 rpm} = 3$$

Los valores nominales de placa de MQ2 son las siguientes:

- La corriente nominal para ambos niveles de tensión nominal:

$$I_{nom} = \frac{S_{nom}}{\sqrt{3}V_{nom}} = \frac{3kVA}{\sqrt{3} * 220V} = 7,873 A \cong 7,9 A$$

$$I_{nom} = \frac{S_{nom}}{\sqrt{3}V_{nom}} = \frac{3kVA}{\sqrt{3} * 110V} = 15,745 A \cong 15,8 A$$

- Potencia activa nominal (como generador):

$$P_{nom} = 0,8 * S_{nom} = 2,4kW$$

- Factor de potencia nominal (como generador):

$$f_{p(nom)} = \frac{2,4kW}{\sqrt{3} * 220V * 7,9A} = 0,797 \cong 0,8$$

$$f_{p(nom)} = \frac{2,4kW}{\sqrt{3} * 110V * 15,8 A} = 0,797 \cong 0,8$$

- Potencia activa nominal (como motor):

$$P_{nom} = 745,7 \left(\frac{W}{HP} \right) * 6HP = 4,47kW$$

- Factor de potencia nominal (como motor):

$$f_{p(nom)} = \frac{4,47kW}{\sqrt{3} * 220V * 15,2A * 0,9} = 0,8575 \cong 0,86$$

$$f_{p(nom)} = \frac{4,47kW}{\sqrt{3} * 110V * 30,4A * 0,9} = 0,8575 \cong 0,86$$

- Pares de polos de la máquina:

$$p = \frac{60 * f}{n} = \frac{60 * (60Hz)}{1200 rpm} = 3$$

La máquina sincrónica 2 (MQ2) posee un mecanismo que permite cambiar la referencia del estator en base a los ángulos eléctricos, el cual me permite mover la señal de salida con respecto al tiempo (Figura 34). Para algunas pruebas realizadas sobre la misma este control no se modificó y se mantuvo siempre con el indicador a cero grados eléctricos.



Figura 34. Mecanismo que controla el ángulo eléctrico en MQ2

En algunos ensayos, específicamente en la prueba de saturación a factor de potencia cero, prueba de bajo deslizamiento y prueba de medición del ángulo de carga se va a utilizar como primer motor un motor DC de la marca CENEMESA con las siguientes características de placa:

Tabla 6. Datos de placa del motor DC usado como motor de arranque

HP: 7,5	TIPO: SMK-43
VOLTIOS: 125	NUM: 47404
AMP: 55	SERVICIO: CONTINUO
RPM: 1200	ELEV TEMP: 50°
EXC: COMPOUND	

Además, se va a utilizar un arrancador conectado al primo motor con las siguientes características:

GENERAL ELECTRIC	
CR: 1240 B1	
SERVICE: MACH	
CAT: 2248455	
HP: 26	V: 115

Se adopta el procedimiento de arranque establecido en [6], la cual dicta lo siguiente:

- Se conecta la fuente de poder ajustada a la tensión nominal del motor.
- Se pone $R_{excitación} = 0\Omega$ para tener la máxima excitación y máximo par de arranque.
- Se lleva la palanca del reóstato de arranque sobre el primer TAP (START). Se deja que el motor suba en velocidad para luego continuar el recorrido de la palanca, con suavidad hasta su posición final (ON).
- No se puede regresar en el recorrido.
- Para apagar el motor se desconecta la alimentación.
- El sentido de giro lo determina el cambio de conexión en los bornes del campo (F1, F2).

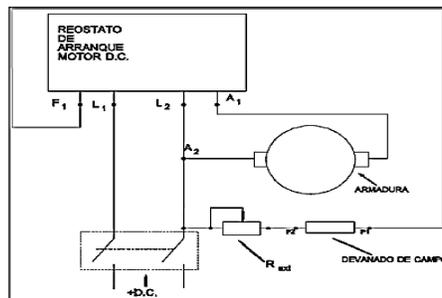


Figura 35. Conexión del reóstato de arranque para el motor DC de arranque

Por otra parte, se midieron la resistencia de los conductores de distintos calibres utilizados para las conexiones respectivas entre los instrumentos y la máquina bajo prueba con el medidor del puente de Thomson Metrapont. El listado de cables utilizados son los siguientes:

Tabla 7. Valores medidos de resistencia eléctrica en los conductores

Cables utilizados	Valor de resistencia experimental (Ω)	Resistencia Estándar @ 25°C (Ω)
Calibre #18	$0,018 \pm 0,001 < R_{cond} < 0,032 \pm 0,001$	0,0277
Calibre #16	$0,012 \pm 0,001 < R_{cond} < 0,027 \pm 0,001$	0,0173
Calibre #14	$0,0075 \pm 0,0001 < R_{cond} < 0,016 \pm 0,001$	0,0107
Calibre #12	$0,0043 \pm 0,0001 < R_{cond} < 0,0089 \pm 0,0001$	0,00673

Hay que tomar en cuenta que estas mediciones de resistencia de los cables utilizados incluyen la resistencia de los conectores.

Antes de realizar las mediciones respectivas y conseguir los parámetros característicos de las máquinas sincrónicas bajo estudio se realizó un inventario sobre los equipos presentes en el laboratorio de Máquinas Rotativas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la U.C.V y lo que se requieren para realizar las respectivas pruebas bajo las normas consultadas.

El listado de los equipos encontrado es el siguiente:

- Voltímetro Trüb Tauber, clase 0,5, escala: 1,2V-30V.
- Milivoltímetro Cassinelli Milano, clase 0,5, escala: 0-60mV.
- Amperímetro Yokogawa, clase 0,5, escala: 0,1A-3A.
- Milivoltímetro Trüb Tauber, clase 0,2, escala: 0mV-50mV.
- Puente de Kelvin Trüb Tauber, 2V.
- Puente de Wheatstone Metrapont, 6V.

- Instrumento de precisión (Voltímetro) Trüb Tauber, clase 0,2, escala 0V-150V, $9,1\Omega/V$, Electrodinámico.
- Instrumento de precisión (Amperímetro) Trüb Tauber, clase 0,2, escala: 0A-1A, $0,5\Omega/6,8A$, Electrodinámico.
- Instrumento de precisión (Voltímetro) Trüb Tauber, clase 0,2, escala: 0V-600V, $32,93\Omega/V$, Electrodinámico.
- Instrumento de precisión (Amperímetro) Trüb Tauber, clase 0,2, escala: 0A-5A, $1,12\Omega/2,5A$, Electrodinámico.
- Instrumento de precisión (Watímetro) Trüb Tauber, clase 0,2, escala: 0A-5A/ 0V-600V, Electrodinámico.
- Fuente de poder DC BK Precision, escala: 0V-30V.
- Osciloscopio electrónico Tektronik TDS 1002 60MHz.
- Tacómetro Hasler-Bern, 0-1000 rpm.
- Multímetro digital Rish ABH.
- Trazador de calor Scotchtrak 3M.
- Puente de Thomson Metrapont, $2V_{DC}$ -2,5A, bobina móvil.

En el laboratorio de Máquinas Rotativas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la U.C.V se realizan una serie de ensayos para la obtención de los parámetros eléctricos de una máquina sincrónica representativa del comportamiento en régimen permanente. Entre los ensayos que se realizan tenemos los siguientes:

- Medición de la Resistencia Estatórica.
- Curva de vacío.
- Curva de cortocircuito.
- Curva en carga para $\text{Cos } (\delta)=0$.
- Curva en carga para $\text{Cos } (\delta)=1$.
- Curva en V a Potencia Constante.

4.1 Comparación entre los procedimientos descritos por las normas IEEE e IEC

4.1.1 Ensayo de medición de resistencia

Tabla 8. Comparación entre los procedimientos para medición de resistencia en el devanado

Guía de laboratorio de máquinas rotativas	NORMA IEEE	NORMA IEC
<p>Para resistencia menor a 5Ω:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Puente de Kelvin (precisión entre 0,1% a 1%). • Otro tipo de medidor de puente y el método del amperímetro (precisión mayor al 1%). • Método voltímetro/amperímetro (conexión corta). <p>Para resistencia entre 5Ω y 10Ω:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Puente de Wheatstone (precisión entre 0,01% y 1%). • Otro tipo de medidor de puente (precisión menor a 1%). • Método voltímetro/amperímetro (conexión larga). <p>Consideraciones para el método voltímetro-amperímetro:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La corriente no deberá exceder del 15% de la corriente nominal. • Si la caída de tensión es inferior a 1V, se utilizará un milivoltímetro. • Los cables del voltímetro se conectan lo más cerca posible de los terminales. • Corrección del valor de la temperatura a 75°C. 		<p>Método Voltímetro/Amperímetro:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La corriente aplicada no debe ser superior al 10% de la corriente nominal y menor a un minuto de aplicación. • Efectuar de tres a cinco mediciones para diferentes valores de corriente. • Se utiliza la ecuación de la Ley de Ohm para el cálculo de la resistencia. • El promedio de los resultados se toma como valor de la resistencia. • La clase de precisión de los instrumentos es de 0,5 o superior. <p>Método del puente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Efectuar al menos tres lecturas, cambiando cada vez el equilibrio del puente. • Si la resistencia es menor a 1Ω se recomienda el medidor de puente doble (Kelvin u otro). <p>Consideraciones generales:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Medición directa en los bornes del devanado y con el rotor en reposo. • No se tienen en cuenta resultados de medición que difieran en más del 1% del valor promedio.

4.1.2 Ensayo para obtener la curva en vacío

Tabla 9. Comparación entre los procedimientos para encontrar la curva en vacío

Guía de laboratorio de máquinas rotativas	NORMA IEEE	NORMA IEC
Activando la máquina bajo prueba en modo generador, accionada por un motor auxiliar (primo-motor).		
Tomar simultáneamente valores de tensión de armadura y corriente de excitación (velocidad nominal).		
<p>Para el trazado de la curva se procede de la forma siguiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se anota la parte ascendente del ciclo de histéresis hasta un valor de E_o (valor de la fase) correspondiente a 1.25 veces la tensión nominal de placa; luego la parte decreciente hasta $I_{exc} = 0$ (valor de remanencia). • Se tomará como única curva de vacío el valor promedio de las dos ramas. 	<p>Para el trazado de la curva se procede de la forma siguiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 6 lecturas por debajo del 60% de la tensión nominal (una lectura a excitación cero). • 10 lecturas o más entre el 60% al 110% de la tensión nominal, con incremento del 5% (en lo posible). • Al menos 2 lecturas por encima del 110% de la tensión nominal, incluyendo una lectura al 120% de la corriente de campo nominal. 	<p>Para el trazado de la curva se procede de la forma siguiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se debe iniciar a la tensión que corresponda a la excitación en plena carga y al menos a 1.3 veces la tensión nominal de la máquina bajo prueba y proseguir hasta 0.2 veces la tensión nominal (puntos distribuidos uniformemente en lo posible). • Tomar la lectura de la tensión residual ($I_{exc} = 0$).
No indica	Medir simultáneamente la tensión de la armadura en las tres fases (El promedio se toma como valor final de tensión)	No indica

4.1.3 Ensayo para obtener la curva en cortocircuito

Tabla 10. Comparación entre los procedimientos para encontrar la curva de cortocircuito

Guía de laboratorio de máquinas rotativas	NORMA IEEE	NORMA IEC
Se activa la máquina sincrónica bajo ensayo en modo generador, a velocidad nominal y cortocircuitado los bornes de la armadura hecho en estrella.		
<p>Para trazar la curva se procede de la siguiente manera:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se tomarán dos o tres puntos de corrientes de excitación e inducido con un punto máximo cercano al valor nominal. 	<p>Para trazar la curva se procede de la siguiente manera:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se mide en forma simultánea la corriente de excitación y la corriente de armadura, donde los valores considerados son el 125%, 100%, 75%, 50% y 25% de la corriente nominal. 	<p>Para trazar la curva se procede de la siguiente manera:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se mide en forma simultánea la corriente de excitación y la corriente en línea del inducido, donde una de las lecturas se toma a una corriente cercana de la corriente nominal.
No indica	Las lecturas de la corriente de armadura se deben tomar en las tres fases para verificar el balance de corriente.	No indica

4.1.4 Ensayo a factor de potencia cero

Tabla 11. Comparación entre los procedimientos para encontrar la curva a factor de potencia cero

Guía de laboratorio de máquinas rotativas	NORMA IEEE	NORMA IEC
<ul style="list-style-type: none"> • Se activa el alternador y a velocidad nominal, la máquina de inducción como carga y se toma el punto: $(I_{a(nom)}, I_{exc}) @ V=V_{nom}$ • Se carga el alternador con la caja de condensadores variable y se toman puntos tales que: $V=f(I_{exc}) @$ $I_a=cte=I_{a(nom)}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Se activa la máquina bajo prueba en modo generador y conectando una carga que consiste en otra máquina sincrónica, en modo motor y en vacío. • Se ajusta la corriente de excitación de la máquina bajo prueba como la de su carga. • La corriente de armadura debe permanecer constante durante todo en ensayo (valor nominal). 	<ul style="list-style-type: none"> • El ensayo se efectúa con la máquina funcionando como generador o como motor. • Cuando la máquina funcione como motor la carga en el eje debe ser cero. • Durante el ensayo se determinan los valores de la corriente de excitación que corresponda a los valores de tensión y corriente del inducido que no difiera en menos de $\pm 0,15$ de los valores nominales respectivos, a un factor de potencia y en funcionamiento en atraso.

4.1.5 Ensayo para la obtención de la reactancia de Potier (X_p)

Tabla 13. Comparación entre los procedimientos para encontrar la reactancia de Potier

Guía del laboratorio de máquinas rotativas	NORMA IEEE	NORMA IEC
<ul style="list-style-type: none"> • Obtener la curva de saturación en vacío, la curva de saturación en cortocircuito y un punto A cuya ordenada es la tensión nominal y la abscisa es la corriente de excitación correspondiente a esa tensión y a un factor de potencia cero en atraso. • \overline{AF} a la izquierda del punto A y paralelamente al eje de las abscisas se traza una longitud \overline{AF} igual a la corriente de excitación correspondiente a la corriente del inducido nominal de la característica en cortocircuito. • A partir de F se traza una línea paralela a la característica lineal en vacío, hasta su intersección con la curva de saturación en vacío y obtenemos un punto H. • Desde H se traza una línea perpendicular sobre la línea \overline{AF}, encontrando un punto G. • La longitud \overline{HG} representa la caída de tensión de la reactancia X_p en p.u, por lo tanto: $\overline{HG} = X_p I_a \rightarrow X_p = \frac{\overline{HG}}{I_a}$ • Si la medida de la longitud \overline{HG} está en por unidad, entonces: $\overline{HG} = X_p$ <p style="text-align: center;">Nota: Ver figura 29</p>		

4.1.6 Ensayo para obtener el ángulo interno de carga (δ)

Tabla 12. Comparación entre los procedimientos para encontrar el ángulo de carga (δ)

Guía del laboratorio de máquinas rotativas	NORMA IEEE	NORMA IEC
<p>No indica métodos para medición del ángulo de carga (δ).</p>	<ul style="list-style-type: none"> Un método de cálculo aproximado de del ángulo de carga (δ) se puede realizar utilizando la siguiente ecuación: $\delta = \text{tag}^{-1} \left(\frac{I_a X_{qs} \cos(\varphi)}{E_a + I_a X_{qs} \text{sen}(\varphi)} \right)$ <p>X_{qs}: Es la reactancia del eje de cuadratura considerando el efecto de la saturación.</p> <p>φ: Ángulo del factor de potencia.</p> Por técnica de medición estroboscópica <p>La señal generada por un tacómetro óptico se compara con la forma de onda de tensión sinusoidal en los bornes y se anota cuantos cruces por cero ocurren en un determinado tiempo, justo cuando la onda sinusoidal pasa a tener un valor positivo. El ángulo de carga es:</p> $\delta = 2\pi f \cdot \Delta t$	<ul style="list-style-type: none"> El ensayo se ejecuta con la máquina bajo prueba funcionando en paralelo con la red y conectando una carga de al menos igual a la mitad de la potencia nominal y a un factor de potencia nominal. Se mide la corriente del inducido (i), la tensión en los bornes del inducido (u), el ángulo entre la tensión y la corriente por el método de dos vatímetros (φ), y el ángulo de carga (δ). Para medir el ángulo de carga se debe utilizar el método estroboscópico o cualquier otro método de precisión.

4.1.7 Valores de los parámetros en régimen de estado estable

Tabla 14. Comparación entre los procedimientos para encontrar la reactancia del eje directo (X_d)

Guía del laboratorio de máquinas rotativas	NORMA IEEE	NORMA IEC
<p>No indica métodos para medir la reactancia del eje directo (X_d)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Se determina a partir de las curvas de vacío y de la curva de cortocircuito. • Es la relación entre la tensión que corresponda en la parte lineal de la característica de saturación en vacío prolongada (línea del entrehierro) a una corriente de excitación (U_n) y el valor de la corriente de cortocircuito que corresponda a esta misma corriente de excitación sobre la característica en cortocircuito trifásico permanente (I_{BC}). $X_d = \frac{U_n}{\sqrt{3} * I_{BC}} \Omega$ <ul style="list-style-type: none"> • También se puede calcular como la relación de corriente de excitación en base a la corriente del inducido nominal sobre la curva en cortocircuito (i_{fk}) y la corriente de excitación en base a la tensión de la armadura nomina sobre la parte lineal de la curva en vacío (i_{fg}). $X_d = \frac{OH}{OC} = \frac{i_{fk}}{i_{fg}}$ <ul style="list-style-type: none"> • El valor de X_d determinado de esta manera corresponde a un estado no saturado de la máquina. <p style="text-align: center;">Nota: Ver figura 29</p>	

Tabla 15. Comparación entre los procedimientos para encontrar la reactancia del eje de cuadratura (Ensayo de deslizamiento) (X_q)

Guía del laboratorio de máquinas rotativas	NORMA IEEE	NORMA IEC
No indica métodos para medir la reactancia del eje de cuadratura (X_d)	Se acciona el rotor de la máquina sincrónica bajo prueba mediante un motor DC con una velocidad ligeramente diferente por debajo del sincronismo (deslizamiento menor al 1%), con el circuito de campo abierto y con el circuito de armadura conectado en una fuente de tensión trifásica.	
	Se aplica una tensión trifásica cuya magnitud de estar por debajo de un valor de tensión sobre la curva de vacío en donde se desvía de zona lineal.	Se aplica una tensión trifásica simétrica en la armadura entre $0,01V_n$ a $0,2V_n$.
	Se registran la tensión y la corriente de armadura así como la tensión entre los bornes de excitación mediante un osciloscopio.	
	La magnitud de la tensión inducida sobre el circuito de campo es peligrosa cuando el deslizamiento aplicado es superior al 5% del valor nominal.	
	El valor de la reactancia del eje de cuadratura (X_q) se obtiene de la siguiente manera: $X_q = X_d \left(\frac{E_{min}}{E_{max}} \right) \left(\frac{I_{min}}{I_{max}} \right)$	Si la tensión residual en el ensayo es menor al 30% de la tensión aplicada sobre el circuito de armadura, entonces: $I_{max} = \sqrt{I_{av}^2 - \left(\frac{U_{res}}{\sqrt{3}X_d} \right)^2}$ $I_{av} = \frac{I_{max1} + I_{max2}}{2}$ $I_{min} = \frac{I_{min1} + I_{min2}}{2}$ X_d : Valor de la reactancia del eje directo calculado (tabla 14). $X_d = \frac{U_{max}}{\sqrt{3}I_{min}} \quad X_q = \frac{U_{min}}{\sqrt{3}I_{max}}$

4.2 Metodología para la medición del ángulo de carga (δ)

Para obtener el valor del ángulo de carga (δ) no se va a implementar los métodos sugeridos por las normas consultadas ya que en el laboratorio de máquinas rotativas no cuenta con los equipos para realizar la medición en forma directa (método de medición estroboscópica u otro) y obtener el valor de dicho parámetro bajo condiciones específicas.

Por definición, sabemos que el ángulo de carga (δ) es la diferencia de fase entre la fuerza magnetomotriz producida por la circulación de corriente alterna en el devanado de campo y el flujo resultante en el entrehierro (la combinación de la fuerza magnetomotriz del campo y la fuerza magnetomotriz de la reacción de armadura)

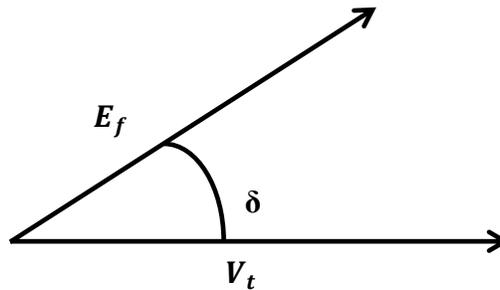


Figura 37. Ángulo de carga

La fuerza magnetomotriz de campo se manifiesta como un voltaje inducido en los devanados del estator (Voltaje interno E_f) cuando el generador opera en vacío, de igual manera el flujo resultante en el entrehierro se manifiesta como un voltaje inducido en los devanados del estator al operar bajo carga.

Con el método de medición propuesto en el presente trabajo busca obtener estas variables con la activación de dos generadores con las mismas características, en donde uno de los generadores se coloca en vacío y el otro se le coloca una carga para de esta manera observar el desfasaje en el tiempo

entre las tensiones de las armaduras. El esquema circuital con que se va a obtener en forma indirecta el valor del ángulo de carga es el siguiente (Figura 38):

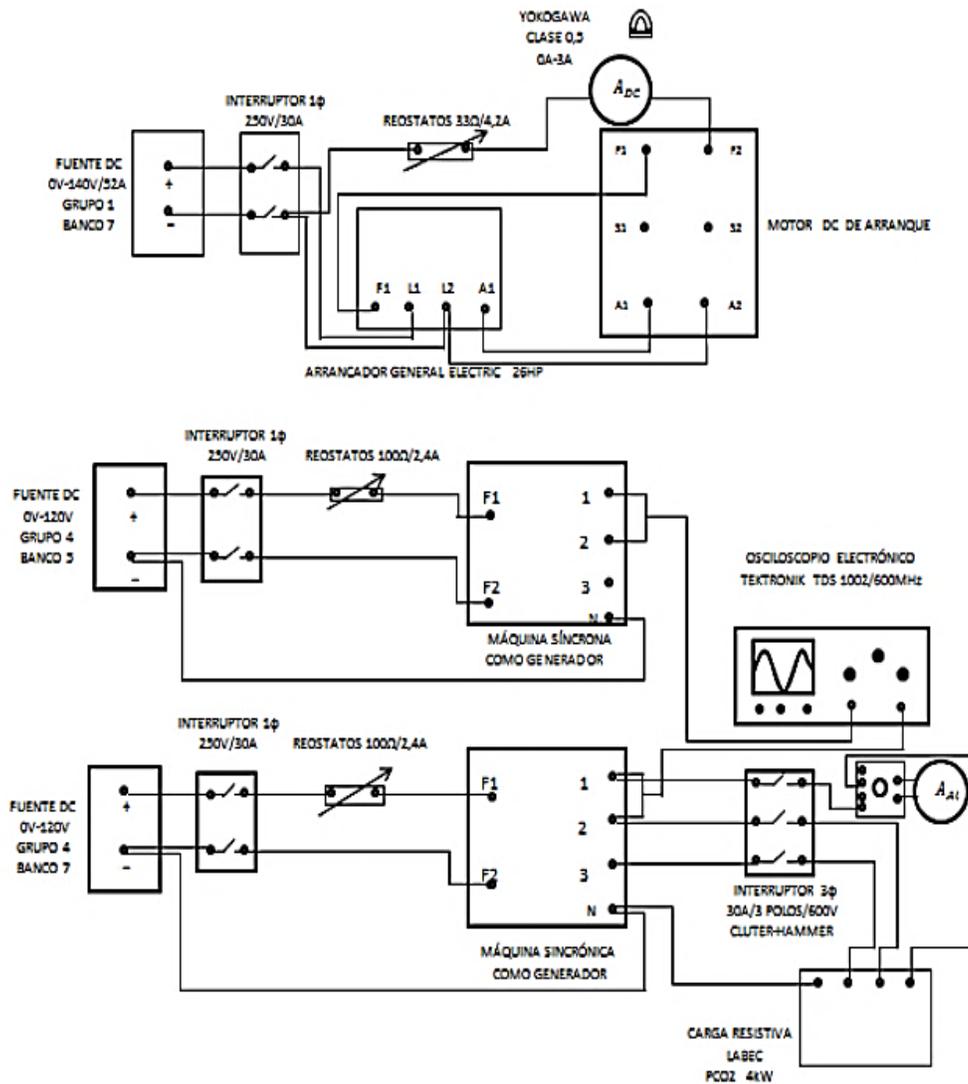


Figura 38. Diagrama de conexión para determinar el ángulo de carga

La metodología a utilizar para la medición directa del ángulo de carga (δ) con el método planteado es el siguiente:

- Utilizar el motor DC como motor de arranque, conectado con su respectivo arrancador y acoplado mecánicamente con ambas máquinas síncronas.
- Se ponen en marcha el grupo motor DC-máquinas síncrona, llevándolas a la respectiva velocidad nominal.
- Ambas máquinas sincrónicas bajo prueba en modo generador y en vacío.
- Se debe conectar el neutro entre ambas máquinas síncronas bajo prueba.
- Se deben sincronizar ambas máquinas síncronas con respecto a la tensión de armadura que ambos generan. Para lograr este paso se procede de la siguiente manera:
 - a) Se conectan puntas de prueba atenuadas entre dos fase cualquiera del borne de armadura o de una fase y el neutro del sistema de cada máquina, para comparar la tensión de armadura generada por ambos generadores síncronos mediante un osciloscopio electrónico.
 - b) Las señales de salida de ambos generadores deben quedar sin ningún desplazamiento en el tiempo. Para lograrlo se cambia la referencia estática de la máquina 2 (MQ2) moviendo el volante, hasta lograr que ambas señales no existan ningún desfasaje.
 - c) Si no se puede lograr poner ambas señales sin ningún desfasaje con lo dicho en el paso (b), se debe apagar las máquinas y proceder a mover el acople mecánico de uno de los generadores, ajustando y desajustando con una llave Allen adecuado.

- d) Se encienden de nuevo el grupo de máquinas. Se verifica de nuevo que ambas señales generadas por los generadores estén en fase con respecto al tiempo. Si todavía no se ha logrado el objetivo, se repite el paso (c).
- e) Cuando se haya logrado ajustar las señales sin desplazamiento en el tiempo, se procede a agregar una carga a cualquiera de los generadores síncronos bajo estudio, dejando una máquina sin carga.
- f) Se aumenta el nivel de potencia de la carga para así verificar que exista en desfasaje entre la señal patrón (tensión de la armadura del generador en vacío) y la caída de tensión sobre la carga, siempre manteniendo la velocidad nominal.
- g) Se verifica el valor del ángulo de desfasaje que existe entre las señales bajo estudio y se calcula dicho valor a través de la siguiente ecuación (44):

$$\alpha = 2\pi * f * \Delta T \quad (44)$$

Donde:

f : Es la frecuencia del sistema.

ΔT : Es el desfasaje existente entre las señales bajo estudio.

- h) Se debe acotar que el ángulo α se refiere a la diferencia entre el ángulo de carga (δ) y el ángulo del factor de potencia del sistema (φ).

Para explicar mejor la descripción del fenómeno tenemos lo siguiente:

- Sean V_1 y V_2 las tensiones de armadura generadas por la máquina sincrónica 1 y 2 respectivamente, en el cual tienen las siguientes características:

$$V1 = V_1 \cos(\omega t) \quad V2 = V_2 \cos(\omega t - \alpha)$$

- Supongamos que ambas señales generan un cierto valor de potencia, entonces se puede decir que la potencia promedio es:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T V1 * V2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T V_1 V_2 \cos(\omega t) \cos(\omega t - \varphi) dt$$

Para resolver la ecuación se aplica la propiedad trigonométrica:

$$\cos(A) \cos(B) = \frac{1}{2} [\cos(A - B) + \cos(A + B)]$$

Tenemos que:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{V_1 V_2}{2} [\cos(\varphi) + \cos(2\omega t - \varphi)] dt$$

- La tensión eficaz generada se calcula de la siguiente manera:

$$V_{ef1} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (V_1 \cos(\omega t))^2 dt} \quad V_{ef2} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (V_2 \cos(\omega t - \alpha))^2 dt}$$

- El cálculo del ángulo entre la señal patrón y la señal desplazada en el tiempo es el siguiente:

$$\begin{aligned} \cos(\delta - \beta) &= \frac{P}{V_{ef1} * V_{ef2}} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{V_1 V_2}{2} [\cos(\varphi) + \cos(2\omega t - \varphi)] dt}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (V_1 \cos(\omega t))^2 dt} * \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (V_2 \cos(\omega t - \varphi))^2 dt}} \\ \cos(\delta - \beta) &= \frac{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{V_1 V_2}{2} [\cos(\varphi) + \cos(2\omega t - \varphi)] dt}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (V_1 \cos(\omega t))^2 dt} * \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (V_2 \cos(\omega t - \varphi))^2 dt}} \end{aligned}$$

4.3 Análisis de resultados

4.3.1 Medición de la resistencia del estator (MQ1)

La medición de la resistencia de armadura es en base a lo establecido en los numerales 2.5.1.1, 2.5.2, 2.5.3, 3.4.1.1 y 3.5 del presente trabajo. El montaje circuital para medir el valor de la resistencia del devanado de armadura con el medidor de puente de Kelvin es el siguiente (figura 36):

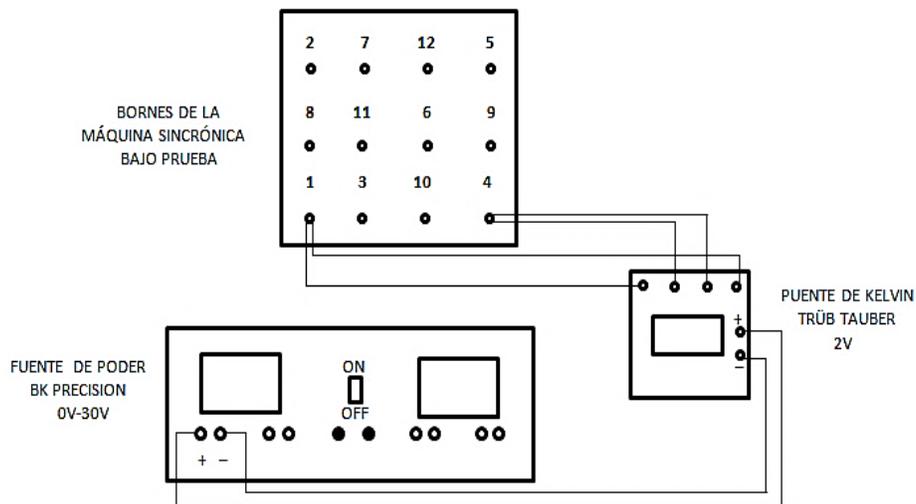


Figura 39. Medición de la resistencia de los devanados de armadura con el medidor de puente de Kelvin

4.3.1.1 Método de medición de puente (Kelvin)

Los valores de la resistencia de cada devanado de armadura es el siguiente:

Tabla 13. Resultados en la medición de la resistencia del devanado de armadura realizado con puente de Kelvin

	$R_{1-4} (\Omega)$	$R_{2-5} (\Omega)$	$R_{3-6} (\Omega)$	$R_{7-10} (\Omega)$	$R_{8-11} (\Omega)$	$R_{9-12} (\Omega)$
IEEE	$0,176 \pm 0,005$	$0,176 \pm 0,005$	$0,174 \pm 0,005$	$0,173 \pm 0,005$	$0,174 \pm 0,005$	$0,171 \pm 0,005$
IEC	$0,177 \pm 0,005$	$0,175 \pm 0,005$	$0,175 \pm 0,005$	$0,172 \pm 0,005$	$0,173 \pm 0,005$	$0,172 \pm 0,005$

Los valores medidos de la resistencia entre los bornes de conexión de la armadura es la siguiente:

Tabla 14. Resultados en la medición de la resistencia entre los bornes del devanado de armadura de conexión realizado con puente de Kelvin

	$R_{1-2} (\Omega)$	$R_{2-3} (\Omega)$	$R_{3-1} (\Omega)$
IEEE	0,690±0,005	0,695±0,005	0,685±0,005
IEC	0,710±0,005	0,695±0,005	0,700±0,005

Como la conexión establecida en el devanado de armadura es en estrella, entonces el valor de la resistencia real entre los bornes del devanado de armadura se obtiene bajo la ecuación (44):

$$R_{1-2 (real)} = \frac{R_{1-2 (medido)}}{2} = \frac{0,690 \pm 0,005}{2} = 0,3450 \pm 0,0025 [\Omega] \quad (44)$$

Los valores reales de la resistencia entre los bornes del devanado de armadura de conexión es el siguiente:

	$R_{1-2} (\Omega)$	$R_{2-3} (\Omega)$	$R_{3-1} (\Omega)$
IEEE	0,3450±0,0025	0,3475±0,0025	0,3425±0,0025
IEC	0,3550±0,0025	0,3475±0,0025	0,3500±0,0025

Para el cálculo del valor de la resistencia de armadura por fase bajo el procedimiento según el numeral 3.4.1.1 se utilizó la ecuación (37), entonces tenemos que:

$$R_1 = \frac{R_{1-2(medido)} + R_{3-1(medido)} - R_{2-3(medido)}}{2}$$

$$R_1 = \frac{(0,710 \pm 0,005)\Omega + (0,700 \pm 0,005)\Omega - (0,695 \pm 0,005)\Omega}{2} = 0,3575 \pm 0,0025 \Omega$$

Para el cálculo del valor de la resistencia de armadura por fase se tomó como referencia el método descrito en [6] ya que en 2.5.1.1 y 2.5.2 no me indican el procedimiento para obtener este valor.

El valor final de la resistencia de armadura por fase es el siguiente (45):

$$R_1 = \frac{R_{1-2(real)} + R_{2-3(real)} + R_{3-1(real)}}{3} \quad (45)$$

$$R_1 = \frac{(0,3450 \pm 0,0025)\Omega + (0,3475 \pm 0,0025)\Omega + (0,3425 \pm 0,0025)}{3} = 0,3450 \pm 0,0025 \Omega$$

Se debe acotar que la temperatura promedio en el ambiente al momento de la medición fue de 25°C, donde fueron medidos en varios puntos sobre el equipo. Se llevó el valor de la resistencia obtenida hacia una temperatura de funcionamiento de 75°C según [6], se utilizó la ecuación (8), obteniendo lo siguiente:

Tabla 15. Valor final de la resistencia del devanado de armadura por fase realizado con puente de Kelvin

	$R_1 @ 25^\circ\text{C} (\Omega)$	$R_1 @ 75^\circ\text{C} (\Omega)$
IEEE	0,3450±0,0025	0,4115±0,0030
IEC	0,3575±0,0025	0,4264±0,0030

Se puede detallar que aplicando los métodos reseñados principalmente en 2.5.2 y 3.4.1.1 se adquieren resultados muy cercanos (Tabla 13, 14 y 15) ya que el instrumento de medición usado tiene la particularidad de eliminar los efectos de caída de tensión en los cables y en los conectores. La diferencia radica es en el cálculo del valor final de la resistencia del devanado de armadura por fase se utilizan dos ecuaciones distintas para obtener dicho

valor. Además, la cantidad de muestras que se deben tomar, condiciones de medición y precisión requeridas influyen en el resultado final obtenido.

4.3.1.2 Método de medición de puente (Wheatstone)

El montaje circuitual para medir el valor de la resistencia del devanado de armadura con el medidor de puente de Wheatstone es el siguiente (Figura 37):

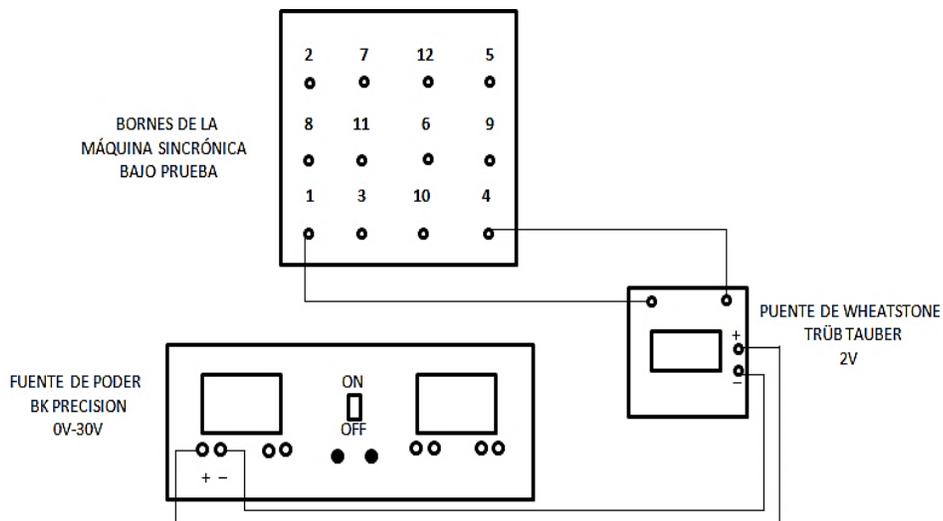


Figura 40. Medición de la resistencia de los devanados de armadura con el medidor de puente de Wheatstone

Los valores medidos de la resistencia de cada devanado de la armadura es lo siguiente (Tabla 16):

Tabla 16. Resultados en la medición de la resistencia del devanado de armadura con puente de Wheatstone

	$R_{1-4} (\Omega)$	$R_{2-5} (\Omega)$	$R_{3-6} (\Omega)$	$R_{7-10} (\Omega)$	$R_{8-11} (\Omega)$	$R_{9-12} (\Omega)$
IEEE	0,174±0,005	0,177±0,005	0,173±0,005	0,171±0,005	0,171±0,005	0,172±0,005

Los valores medidos de la resistencia entre los bornes de conexión de la armadura es el siguiente (Tabla 17):

Tabla 17. Resultados en la medición de la resistencia entre bornes del devanado de armadura con puente de Wheatstone

	$R_{1-2} (\Omega)$	$R_{2-3} (\Omega)$	$R_{3-1} (\Omega)$
IEEE	0,695±0,005	0,690±0,005	0,685±0,005

Para obtener el valor de la resistencia real entre los bornes de conexión se utilizó la ecuación (44), cuyo resultado es el siguiente (Tabla 18):

Tabla 18. Resultados en la medición real de la resistencia entre bornes del devanado de armadura

	$R_{1-2} (\Omega)$	$R_{2-3} (\Omega)$	$R_{3-1} (\Omega)$
IEEE	0,3475±0,0025	0,3450±0,0025	0,3425±0,0025

El valor final de la resistencia de armadura por fase y referirla a la temperatura de funcionamiento se utilizó las ecuaciones (8) y (45), cuyo resultado es el siguiente (Tabla 19):

Tabla 19. Valor final de la resistencia del devanado de armadura por puente de Wheatstone

	$R_1 @ 25^\circ\text{C} (\Omega)$	$R_1 @ 75^\circ\text{C} (\Omega)$
IEEE	0,3450±0,0025	0,4115±0,0030

Para este caso, los valores de la resistencia conseguidos con el puente de Wheatstone son cercanos a los datos tomados con el puente de Kelvin (Tabla 16, 17 y 19). A pesar de que el efecto de la caída de tensión en los cables y en

los conectores influye en las mediciones con este instrumento, se puede tomar como método alternativo para la medición de resistencia ya que se encuentra dentro del rango de precisión requerida por [10]

4.3.1.3 Método de medición de puente (Wheatstone II)

El montaje circuital para medir el valor de la resistencia del devanado de armadura con el medidor de puente de Wheatstone II es el mismo utilizado con el medidor de puente de Wheatstone (Figura 40), con la única diferencia es que el voltaje requerido para alimentar al medidor de puente mencionado es de 6 V.

Los valores obtenidos de la resistencia en cada devanado de armadura es el siguiente (Tabla 20):

Tabla 20. Resultados en la medición de la resistencia del devanado de armadura con puente de Wheatstone II

	$R_{1-4} (\Omega)$	$R_{2-5} (\Omega)$	$R_{3-6} (\Omega)$	$R_{7-10} (\Omega)$	$R_{8-11} (\Omega)$	$R_{9-12} (\Omega)$
IEEE	0,19±0,01	0,18±0,01	0,18±0,01	0,18±0,01	0,18±0,01	0,18±0,01

Los valores obtenidos de la resistencia entre los bornes de conexión de la armadura es el siguiente (Tabla 21):

Tabla 21. Resultados en la medición de la resistencia entre bornes del devanado de armadura con puente de Wheatstone II

	$R_{1-2} (\Omega)$	$R_{2-3} (\Omega)$	$R_{3-1} (\Omega)$
IEEE	0,73±0,01	0,72±0,01	0,74±0,01

Utilizando la ecuación (45) para el cálculo real de la resistencia entre los bornes de la armadura tenemos lo siguiente (Tabla 22):

Tabla 22. Resultados en la medición de la resistencia real entre bornes del devanado de armadura

	$R_{1-2} (\Omega)$	$R_{2-3} (\Omega)$	$R_{3-1} (\Omega)$
IEEE	0,365±0,005	0,360±0,005	0,370±0,005

El valor final de la resistencia del devanado de armadura por fase a una temperatura de funcionamiento específica se obtiene usando las ecuaciones (8) y (45), cuyo resultado es el siguiente:

Tabla 23. Valor final de la resistencia del devanado de armadura por fase con el puente de Wheatstone II

	$R_1 @ 25^\circ\text{C}$	$R_1 @ 75^\circ\text{C}$
IEEE	0,365±0,005	0,435±0,006

Se puede observar que los valores de resistencia conseguidos con el medidor de puente Wheatstone II resultan superiores a los que se obtienen con el medidor del puente de Kelvin y Wheatstone. Se puede decir que este método se puede tomar como referencia a la hora de tener un valor aproximado al real de la resistencia de armadura, pero esta fuera del rango de precisión requerida según el requerimiento dado en [10].

4.3.1.4 Método de medición Voltímetro-Amperímetro

El montaje circuital para medir el valor de la resistencia del devanado de armadura con el método voltímetro-amperímetro se ve reflejado en la figura

41. Cuando se ejecuta el procedimiento descrito en 3.4.1.1 se va a colocar instrumentos de medición clase 0,5 (milivoltímetro y amperímetro), manteniendo intacto el esquema de conexión establecido.

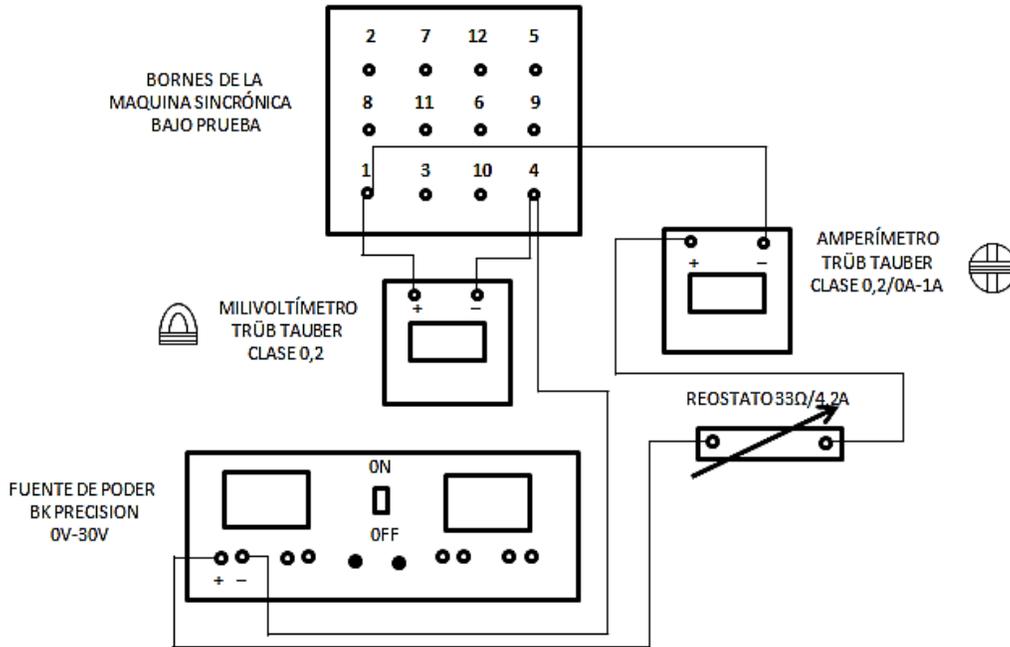


Figura 41. Medición de la resistencia de los devanados de armadura con el método del voltímetro-amperímetro

Los valores obtenidos de la resistencia de cada borne en la armadura es la siguiente (Tabla 24):

Tabla 24. Resultados en la medición de la resistencia del devanado de armadura con el método voltímetro-amperímetro

	$R_{1-4} (\Omega)$	$R_{2-5} (\Omega)$	$R_{3-6} (\Omega)$	$R_{7-10} (\Omega)$	$R_{8-11} (\Omega)$	$R_{9-12} (\Omega)$
IEEE	0,1724±0,0046	0,1750±0,0045	0,1735±0,0045	0,1733±0,0045	0,1735±0,0045	0,1717±0,0045
IEC	0,1698±0,0035	0,1688±0,0035	0,1679±0,0035	0,1689±0,0035	0,1671±0,0035	0,1675±0,0035

Para calcular el valor real de la resistencia entre los bornes de conexión de la armadura se utiliza la ecuación (46), (47) y (48), teniendo lo siguiente:

$$R_{1-2(real)} = \frac{R_{1-4(medido)} + R_{7-10(medido)} + R_{8-11(medido)} + R_{2-5(medido)}}{2} \quad (46)$$

$$R_{2-3(real)} = \frac{R_{2-5(medido)} + R_{8-11(medido)} + R_{9-12(medido)} + R_{3-6(medido)}}{2} \quad (47)$$

$$R_{3-1(real)} = \frac{R_{3-6(medido)} + R_{9-12(medido)} + R_{7-10(medido)} + R_{1-4(medido)}}{2} \quad (48)$$

Los valores obtenidos de la resistencia entre los bornes de conexión de la armadura son los siguientes (Tabla 25):

Tabla 25. Resultados en la medición de la resistencia entre bornes del devanado de armadura con el método voltímetro-amperímetro

	$R_{1-2} (\Omega)$	$R_{2-3} (\Omega)$	$R_{3-1} (\Omega)$
IEEE	0,3471±0,0023	0,3469±0,0023	0,3455±0,0023
IEC	0,3373±0,0070	0,3356±0,0070	0,3371±0,0070

Para obtener el valor final de la resistencia del devanado de armadura por fase a una temperatura específica se usaron las ecuaciones (8) y (45), obteniéndose lo siguiente (Tabla 26):

Tabla 26. Valor final de la resistencia del devanado de armadura por fase con el método voltímetro-amperímetro

	$R_1 @ 25^\circ\text{C}$	$R_1 @ 75^\circ\text{C}$
IEEE	0,3465±0,0025	0,4133±0,0030
IEC	0,3387±0,0070	0,4040±0,0083

Se puede observar que las mediciones adquiridas por el método voltímetro-amperímetro aplicando las pautas establecidas en 2.5.2 y 3.4.1.1 son ligeramente distintas (Tabla 24, 25 y 26). Esta diferencia radica en que bajo el

procedimiento dado en 2.5.2 se toma en consideración la resistencia interna que presenta el milivoltímetro en el momento de conseguir la caída de tensión sobre el devanado, cuyo resultado se logra utilizando la ecuación 28. Mientras que, bajo el procedimiento explicado en 3.4.1.1 se aplica directamente la ley de Ohm (Ecuación 36) para el cálculo de la resistencia y selecciona las muestras obtenidas que no difieran del 1% del valor promedio.

4.3.2 Medición de la resistencia del estator (MQ2)

4.3.2.1 Método de medición de puente (Kelvin)

El montaje circuital para medir el valor de la resistencia del devanado de armadura con el medidor de puente de Kelvin es el mismo representado en la figura 39. Los valores obtenidos de la resistencia de cada borne en la armadura es la siguiente (Tabla 27):

Tabla 27. Resultados en la medición de la resistencia del devanado de armadura con el puente de Kelvin

	$R_{1-4} (\Omega)$	$R_{2-5} (\Omega)$	$R_{3-6} (\Omega)$	$R_{7-10} (\Omega)$	$R_{8-11} (\Omega)$	$R_{9-12} (\Omega)$
IEEE	0,182±0,005	0,179±0,005	0,181±0,005	0,181±0,005	0,193±0,005	0,182±0,005
IEC	0,183±0,005	0,180±0,005	0,180±0,005	0,180±0,005	0,190±0,005	0,183±0,005

Los valores medidos de la resistencia entre los bornes de conexión son las siguientes (Tabla 28):

Tabla 28. Resultados en la medición de la resistencia entre los bornes del devanado de armadura con el puente de Kelvin

	$R_{1-2} (\Omega)$	$R_{2-3} (\Omega)$	$R_{3-1} (\Omega)$
IEEE	0,740±0,005	0,735±0,005	0,725±0,005
IEC	0,730±0,005	0,725±0,005	0,735±0,005

Utilizando la ecuación (44) para el cálculo del valor real de la resistencia entre los bornes de conexión de la armadura, resulta lo siguiente (Tabla 29):

Tabla 29. Valores finales en la medición de la resistencia entre los bornes del devanado de armadura con el puente de Kelvin

	$R_{1-2} (\Omega)$	$R_{2-3} (\Omega)$	$R_{3-1} (\Omega)$
IEEE	0,3700±0,0025	0,3675±0,0025	0,3625±0,0025
IEC	0,3650±0,0025	0,3625±0,0025	0,3675±0,005

Para obtener el valor final de la resistencia del devanado de armadura por fase a una temperatura específica se usaron las ecuaciones (8) y (45), obteniéndose lo siguiente (Tabla 30):

Tabla 30. Valor final de la resistencia del devanado de armadura con el puente de Kelvin

	$R_1 @ 25^\circ\text{C} (\Omega)$	$R_1 @ 75^\circ\text{C} (\Omega)$
IEEE	0,3660±0,0025	0,4365±0,0030
IEC	0,3625±0,0025	0,4323±0,0030

Se puede detallar que los resultados obtenidos con el medidor de puente de Kelvin en base a los métodos establecidos por ambos métodos son muy cercanos (Tabla 27 y 28). Sin embargo, en los valores finales de la resistencia de armadura por fase se nota una diferencia en el resultado debido principalmente a la cantidad de muestras que se toman y en el cálculo para lograr obtener el valor final de la misma.

4.3.2.2 Método de medición de puente (Wheatstone)

El montaje circuital para medir el valor de la resistencia del devanado de armadura con el medidor de puente de Kelvin es el mismo representado en la figura 40. Los valores de la resistencia de cada borne en la armadura es la siguiente (Tabla 31):

Tabla 31. Resultados en la medición de la resistencia del devanado de armadura con el puente de Wheatstone

	$R_{1-4} (\Omega)$	$R_{2-5} (\Omega)$	$R_{3-6} (\Omega)$	$R_{7-10} (\Omega)$	$R_{8-11} (\Omega)$	$R_{9-12} (\Omega)$
IEEE	0,183±0,005	0,187±0,005	0,187±0,005	0,188±0,005	0,193±0,005	0,186±0,005

Los valores medidos de la resistencia de los bornes de conexión de la armadura es el siguiente:

Tabla 32. Resultados en la medición de la resistencia entre los bornes de conexión del devanado de armadura con el puente de Wheatstone

	$R_{1-2} (\Omega)$	$R_{2-3} (\Omega)$	$R_{3-1} (\Omega)$
IEEE	0,756±0,005	0,758±0,005	0,745±0,005

Usando la ecuación (44) se obtuvo los valores finales de la resistencia entre los bornes de conexión del devanado de armadura, la cuales son los siguientes (Tabla 33):

Tabla 33. Valores finales de la resistencia entre los bornes de conexión del devanado de armadura con el puente de Wheatstone

	$R_{1-2} (\Omega)$	$R_{2-3} (\Omega)$	$R_{3-1} (\Omega)$
IEEE	0,3780±0,0025	0,3790±0,0025	0,3725±0,0025

Usando las ecuaciones (8) y (45) se obtienen el valor de la resistencia del devanado de armadura por fase a una temperatura de funcionamiento, el cual es el siguiente (Tabla 34):

Tabla 34. Valor de la resistencia del devanado de armadura por fase con el puente de Wheatstone

	$R_1 @ 25^{\circ}\text{C} (\Omega)$	$R_1 @ 75^{\circ}\text{C} (\Omega)$
IEEE	0,3765±0,0025	0,4490±0,0030

Se puede notar que la medición de la resistencia con el puente de Wheatstone y siguiendo las condiciones dadas en 2.5.2 son similares a las realizadas con el puente de Kelvin (Tabla 30 y 31). Sin embargo, el valor final de la resistencia de armadura se verifica una diferencia notable de alrededor del 3% en comparación con el resultado obtenido en 4.3.2.1.

4.3.2.3 Método de medición de puente (Wheatstone II)

El montaje circuital para medir el valor de la resistencia del devanado de armadura con el medidor de puente de Wheatstone II es similar al utilizado en 4.3.1.3. Los valores obtenidos de la resistencia en los devanados de la armadura son los siguientes (Tabla 35):

Tabla 35. Valores registrados de la resistencia del devanado de armadura con el puente de Wheatstone II

	$R_{1-4} (\Omega)$	$R_{2-5} (\Omega)$	$R_{3-6} (\Omega)$	$R_{7-10} (\Omega)$	$R_{8-11} (\Omega)$	$R_{9-12} (\Omega)$
IEEE	0,19±0,01	0,20±0,01	0,19±0,01	0,20±0,01	0,21±0,01	0,20±0,01

Los valores medidos de la resistencia entre los bornes de conexión de la armadura son los siguientes (Tabla 36):

Tabla 36. Resultados en la medición de la resistencia entre los bornes del devanado de armadura con el puente de Wheatstone II

	$R_{1-2} (\Omega)$	$R_{2-3} (\Omega)$	$R_{3-1} (\Omega)$
IEEE	0,78±0,01	0,80±0,01	0,79±0,01

Usando la ecuación (44) se obtiene el valor de la resistencia entre los bornes de conexión de la armadura, la cual es la siguiente (Tabla 37):

Tabla 36. Resultados finales en la medición de la resistencia entre los bornes del devanado de armadura con el puente de Wheatstone II

	$R_{1-2} (\Omega)$	$R_{2-3} (\Omega)$	$R_{3-1} (\Omega)$
IEEE	0,390±0,005	0,400±0,005	0,380±0,005

Usando las ecuaciones (8) y (45) se obtienen el valor de la resistencia del devanado de armadura por fase a una temperatura de operación, el cual es el siguiente (Tabla 38):

Tabla 38. Valor final de la resistencia del devanado de armadura por fase con el puente de Wheatstone II

	$R_1 @ 25^\circ\text{C} (\Omega)$	$R_1 @ 75^\circ\text{C} (\Omega)$
IEEE	0,393±0,005	0,469±0,006

Los valores de resistencia obtenidos con el medidor de puente Wheatstone II son ligeramente superiores en comparación con los otros medidores de puente utilizados (Tabla 35, y 36) ya que el instrumento no evita incluir el fenómeno de la caída de tensión en cables y conectores, cuya diferencia es del 7% del valor obtenido en 4.3.2.1.

4.3.2.4 Método de medición Voltímetro-Amperímetro

El montaje circuital para medir el valor de la resistencia del devanado de armadura con el método voltímetro-amperímetro se ve reflejado en la figura 41. Los valores de la resistencia en los bornes de la armadura se obtienen utilizando las ecuaciones (28) y (36), resultando lo siguiente (Tabla 39):

Tabla 39. Resultados en la medición de la resistencia del devanado de armadura con el método voltímetro-amperímetro

	$R_{1-4} (\Omega)$	$R_{2-5} (\Omega)$	$R_{3-6} (\Omega)$	$R_{7-10} (\Omega)$	$R_{8-11} (\Omega)$	$R_{9-12} (\Omega)$
IEEE	0,1846±0,0049	0,1842±0,0049	0,1837±0,0049	0,1879±0,0050	0,1936±0,0050	0,1832±0,0049
IEC	0,1717±0,0039	0,1711±0,0039	0,1712±0,0035	0,1725±0,0039	0,1720±0,0036	0,1723±0,0036

Los valores reales de la resistencia entre los bornes de conexión del devanado de armadura se obtienen utilizando las ecuaciones (46), (47) y (48), resultando lo siguiente (Tabla 40):

Tabla 40. Valores reales en la medición de la resistencia entre los bornes de conexión del devanado de armadura con el método voltímetro-amperímetro

	$R_{1-2} (\Omega)$	$R_{2-3} (\Omega)$	$R_{3-1} (\Omega)$
IEEE	0,3752±0,0100	0,3723±0,0090	0,3697±0,0099
IEC	0,3437±0,0077	0,3433±0,0073	0,3439±0,0075

El valor final de la resistencia de la armadura se obtiene utilizando las ecuaciones (8) y (45), resultando lo siguiente (Tabla 41):

Tabla 41. Valor final de la resistencia del devanado de armadura por fase con el método voltímetro-amperímetro

	$R_1 @ 25^\circ\text{C} (\Omega)$	$R_1 @ 75^\circ\text{C} (\Omega)$
IEEE	0,3724±0,0096	0,4442±0,0114
IEC	0,3442±0,0078	0,4105±0,0093

Se puede visualizar que las mediciones obtenidas por el método voltímetro-amperímetro y siguiendo las pautas establecidas son ligeramente distintas (Tabla 39, 40 y 41) debido a que se utilizan instrumentos de medición de distintas clases para tomar la medición, por lo que la precisión influye en el resultado final. Además, para el cálculo del valor de la resistencia se aplican ecuaciones diferentes y se considera la resistencia interna del milivoltímetro en uno de los casos.

4.3.3 Curva de saturación en vacío Máquina 1 (MQ1)

El registro de la curva de saturación en vacío es en base a lo establecido en los numerales 2.5.1.2 y 3.4.1.2 del presente trabajo. El montaje circuital para obtener la curva de saturación en vacío es el siguiente (figura 42):

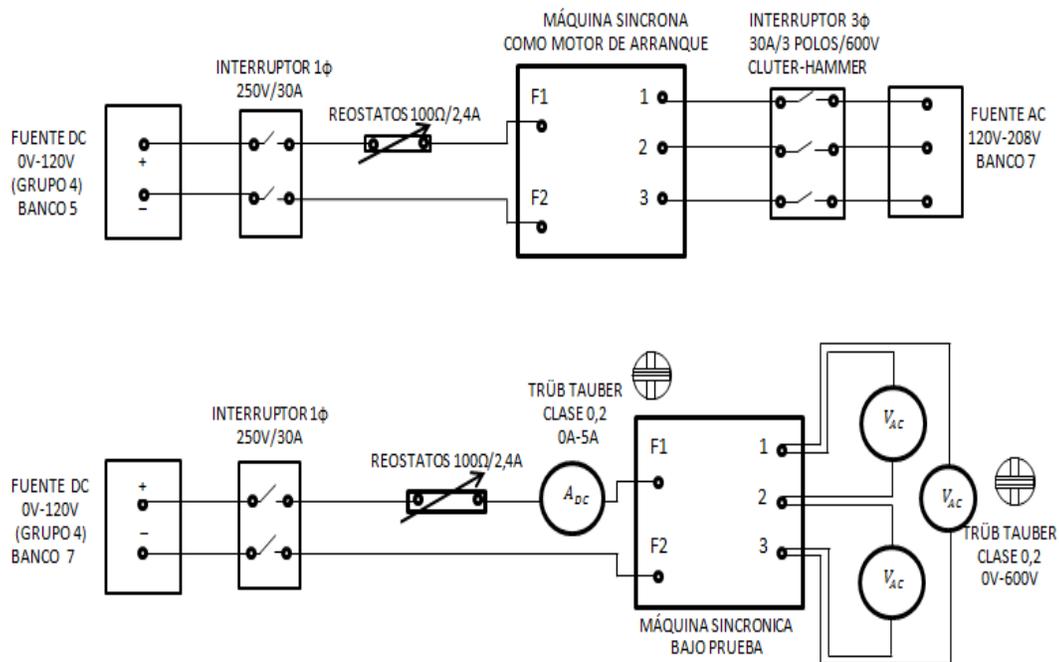


Figura 42. Esquema de conexión sobre la máquina síncrona bajo prueba (MQ1)

Como motor de arranque se utilizó la máquina síncrona 2 (MQ2) ya que en [9] me indica que un motor síncrono tiene una buena ventaja sobre las pruebas se deben realizarse a la velocidad nominal ya que se mantiene constante la velocidad, pero debe tener un buen torque de arranque para que se pueda mantener esta condición. En [13] y [14] no me indican la característica que debe tener el motor de arranque para realizar dicha prueba.

Los resultados de las mediciones obtenidas por el método descrito en 2.5.1.2 son las siguientes (Tabla 42):

Tabla 42. Resultados de la medición para obtener la curva de saturación en vacío descrito en 2.5.1.2

Corriente de campo (A)	Tensión de Armadura V1-2 (V)	Tensión de Armadura V2-3 (V)	Tensión de Armadura V3-1 (V)	Tensión de Armadura promedio (V)
0	7,2±0,2	7,2±0,2	7,2±0,2	7,20±0,20
0,64±0,02	88±1	88±1	88±1	88,00±1,00
0,72±0,02	98±1	98±1	98±1	98,00±1,00
0,82±0,02	110±1	110±1	110±1	110,00±1,00
0,92±0,02	120±1	120±1	119±1	119,67±1,00
1,02±0,02	130±1	130±1	130±1	130,00±1,00
1,12±0,02	140±1	140±1	140±1	140,00±1,00
1,20±0,02	150±2	152±2	150±2	150,67±2,00
1,32±0,02	160±2	160±2	160±2	160,00±2,00
1,42±0,02	170±2	170±2	170±2	170,00±2,00
1,54±0,02	180±2	180±2	180±2	180,00±2,00
1,64±0,02	190±2	192±2	190±2	190,67±2,00
1,76±0,02	200±2	200±2	200±2	200,00±2,00
1,90±0,02	210±2	210±2	210±2	210,00±2,00
2,04±0,02	220±2	220±2	220±2	220,00±2,00
2,18±0,02	230±2	230±2	232±2	230,67±2,00
2,36±0,02	242±2	242±2	242±2	242,00±2,00
2,50±0,04	250±2	252±2	250±2	250,67±2,00
2,70±0,04	260±2	260±2	260±2	260,00±2,00
2,92±0,04	270±2	270±2	270±2	270,00±2,00
3,20±0,04	280±2	280±2	280±2	280,00±2,00

La curva de saturación en vacío resultante aplicando el procedimiento descrito en 2.5.1.2 es la siguiente (Figura 43):

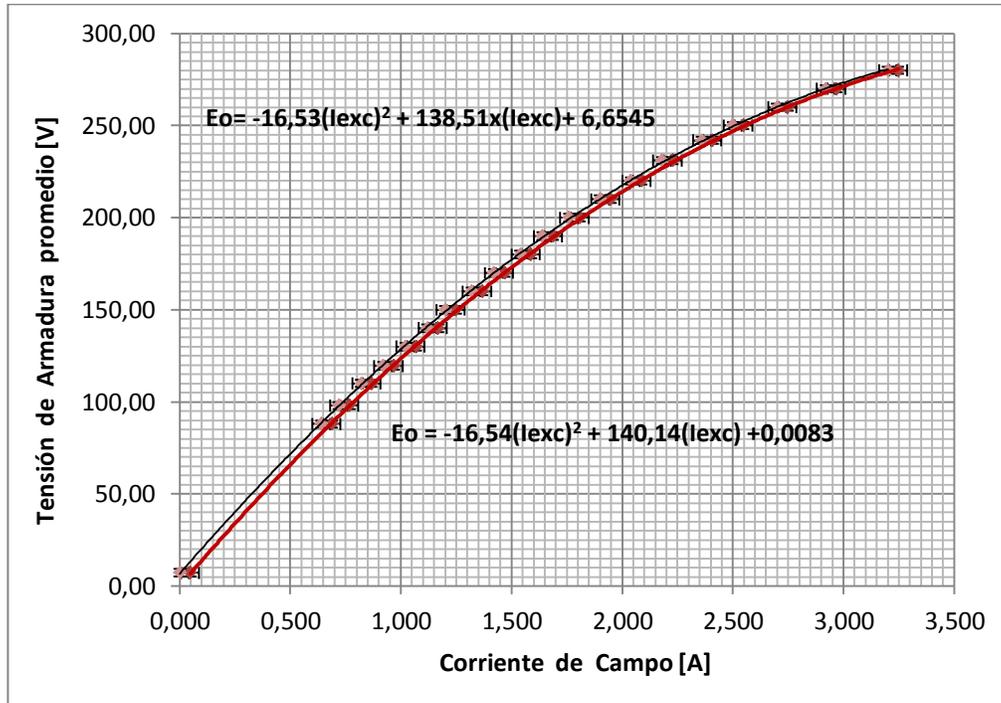


Figura 43. Curva de saturación en vacío obtenida bajo el procedimiento descrito en 2.5.1.2

La curva proyectada en el lado izquierdo es la curva de tendencia de las mediciones obtenidas bajo el procedimiento reseñado en 2.5.1.2. Como la característica en vacío presenta una tensión residual diferente de cero ($V_{res} = 7,20 \pm 0,20$), se debe realizar una corrección, que consiste en buscar el punto de corte de la curva obtenida con el eje de las abscisas, cuyo valor es aproximadamente de $\Delta i_{exc} = 0,0476$. Este valor se debe agregar a todos los valores medidos de la corriente de excitación y se grafica de nuevo con esta corrección. La curva proyectada hacia la derecha es la curva resultante con la inclusión de esa corrección.

Los resultados de las mediciones obtenidas por el método descrito en 3.4.1.2 son las siguientes (Tabla 43):

Tabla 43. Resultados de la medición para obtener la curva de saturación en vacío

Corriente de Campo (A)	Tensión de Armadura V_{1-2} (V)	Tensión de Armadura V_{2-3} (V)	Tensión de Armadura V_{3-1} (V)	Tensión de Armadura promedio (V)
3,20±0,04	284±2	284±2	284±2	284,00±2,00
2,84±0,04	270±2	272±2	270±2	270,67±2,00
2,60±0,04	260±2	260±2	260±2	260,00±2,00
2,40±0,02	250±2	250±2	252±2	250,67±2,00
2,24±0,02	240±2	240±2	240±2	240,00±2,00
2,08±0,02	230±2	230±2	230±2	230,00±2,00
1,96±0,02	220±2	222±2	220±2	220,67±2,00
1,80±0,02	210±2	208±2	210±2	209,33±2,00
1,68±0,02	200±2	200±2	200±2	200,00±2,00
1,58±0,02	190±2	190±2	190±2	190,00±2,00
1,48±0,02	182±2	182±2	180±2	181,33±2,00
1,38±0,02	170±2	170±2	172±2	170,67±2,00
1,26±0,02	160±2	160±2	160±2	160,00±2,00
1,16±0,02	150±2	152±2	150±2	150,67±2,00
1,06±0,02	141±1	140±1	140±1	140,33±1,00
0,96±0,02	130±1	131±1	130±1	130,33±1,00
0,88±0,02	120±1	120±1	121±1	120,33±1,00
0,78±0,02	110±1	110±1	110±1	110,00±1,00
0,70±0,02	100±1	100±1	102±1	100,67±1,00
0,62±0,02	90±1	90±1	90±1	90,00±1,00
0,54±0,02	80±1	80±1	80±1	80,00±1,00
0,46±0,02	70±1	71±1	71±1	70,67±1,00
0,00	8,2±0,2	8,2±0,2	8,2±0,2	8,20±0,20

La curva de saturación en vacío resultante aplicando el procedimiento descrito en 3.4.1.2 es la siguiente (figura 44):

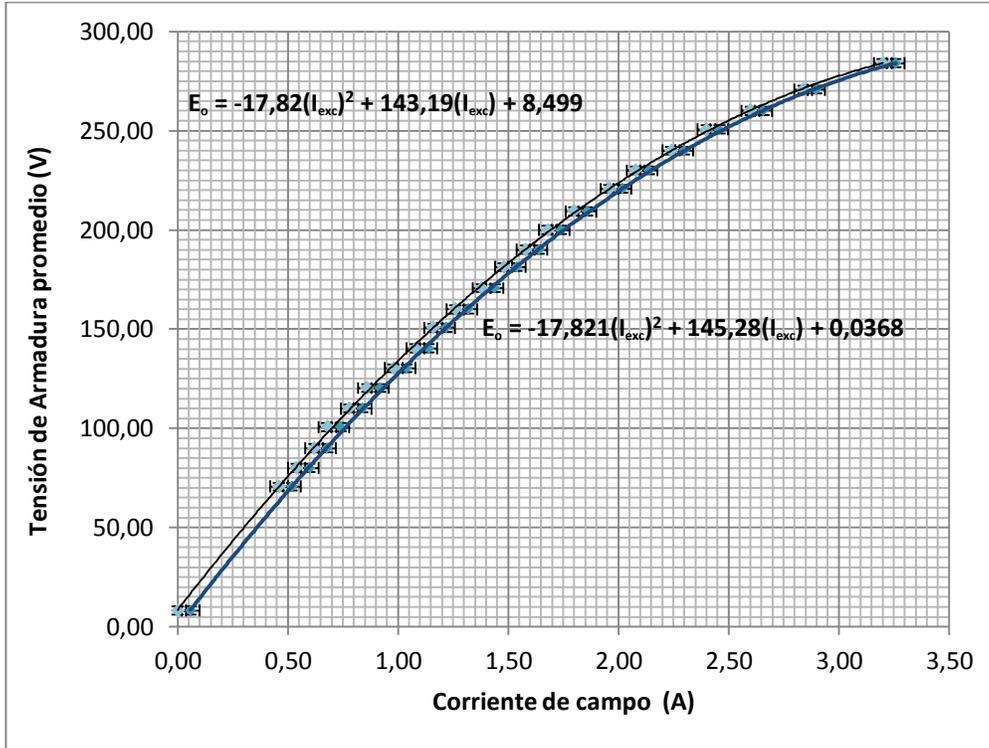


Figura 44. Curva de saturación en vacío obtenida bajo el procedimiento según 3.5.1.2

La curva trazada en el lado izquierdo es la curva de tendencia de las mediciones obtenidas bajo el procedimiento según 3.4.1.2. Como la característica en vacío presenta una tensión residual diferente de cero ($V_{res} = 8,20 \pm 0,20$) se debe realizar una corrección, que consiste en buscar el punto de corte de la curva obtenida con el eje de las abscisas, cuyo valor es aproximadamente de $\Delta i_{exc} = 0,0587$. Este valor se debe agregar a todos los valores medidos de la corriente de excitación y graficar de nuevo con esta corrección. La curva proyectada hacia la derecha es la curva resultante con la inclusión de esa corrección.

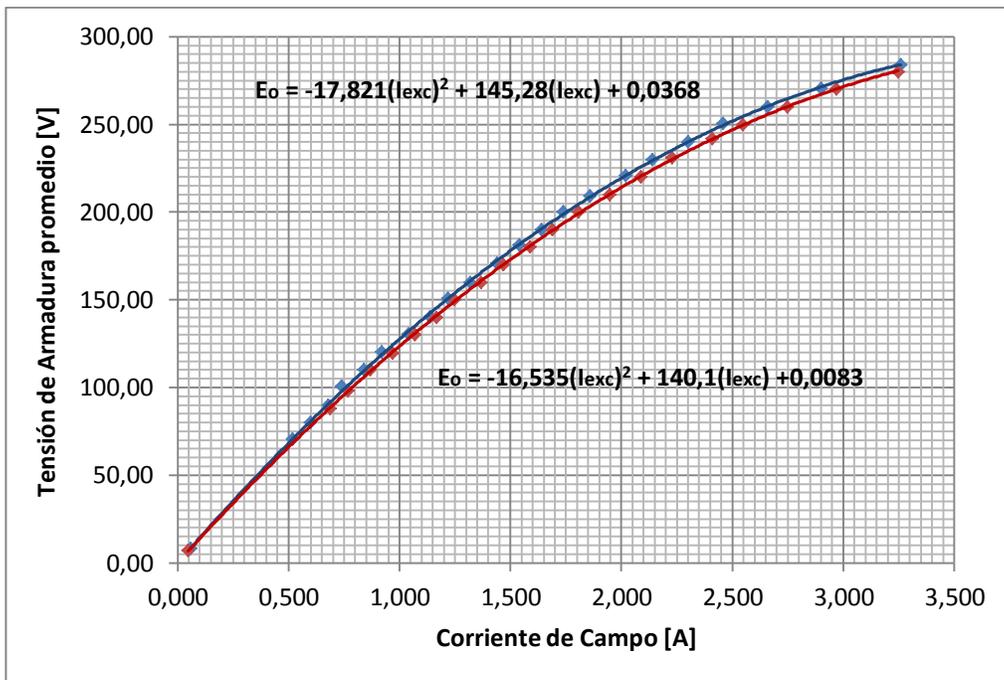


Figura 45. Comparación entre las curvas de saturación en vacío obtenida bajo el procedimiento según 2.5.1.2 y 3.4.1.2

Haciendo las comparaciones respectivas entre las curvas de saturación de vacío obtenidas bajo los procedimientos descritos en 2.5.1.2 y 3.4.1.2 (Figura 45), se puede observar que ambas curvas de tendencia son muy similares. Sin embargo, la curva de dispersión obtenida bajo 3.4.1.2 (Curva superior) tiene un mayor valor nivel de tensión de armadura debido a que el trazado de dicha curva se realiza desde 1,3 veces la tensión nominal reduciendo progresivamente la corriente de excitación, por lo cual comienza de un estado saturado y finaliza en un estado no saturado. En la curva de dispersión obtenida bajo 2.5.1.2 (Curva inferior) la tensión de armadura es menor debido a que dicha curva se traza con mínima corriente de excitación aumentando la misma hasta llegar a 1,2 veces la tensión nomina, es decir, parte de un estado no saturado y finaliza en un estado saturado.

4.3.4 Curva en vacío Máquina 2 (MQ2)

Como motor de arranque o primo motor se utilizó la máquina sincrónica 1 (MQ1) ya que utilizando esta máquina se mantiene la velocidad constante durante las mediciones [8]. El esquema de conexión usada para obtener la curva de saturación en vacío en MQ2 es el mismo usado en 4.3.3 (figura 46). Los resultados de las mediciones obtenidas por el método descrito en 2.5.1.2 son las siguientes (Tabla 44):

Tabla 44. Resultados de la medición para obtener la curva en vacío bajo el procedimiento según 2.5.1.2

Corriente de Campo (A)	Tensión de Armadura 1-2 (V)	Tensión de Armadura 2-3 (V)	Tensión de Armadura 3-1 (V)	Tensión de Armadura promedio (V)
0	7,0±0,2	7,0±0,2	7,0±0,2	7,00±0,20
0,52±0,02	64±1	64±1	65±1	64,33±1,00
0,62±0,02	76±1	76±1	75±1	75,67±1,00
0,74±0,02	88±1	87±1	87±1	87,33±1,00
0,86±0,02	102±1	102±1	103±1	102,33±1,00
0,96±0,02	110±1	110±1	110±1	110,00±1,00
1,10±0,02	125±1	124±1	125±1	124,67±1,00
1,28±0,02	140±1	139±1	140±1	139,67±1,00
1,36±0,02	146±1	146±1	147±1	146,33±1,00
1,44±0,02	152±2	150±2	152±2	151,33±2,00
1,54±0,04	160±2	160±2	160±2	160,00±2,00
1,64±0,04	170±2	170±2	170±2	170,00±2,00
1,76±0,04	178±2	180±2	180±2	179,33±2,00
1,94±0,04	190±2	190±2	190±2	190,00±2,00
2,06±0,04	200±2	198±2	200±2	199,33±2,00
2,18±0,04	208±2	210±2	210±2	209,33±2,00
2,42±0,04	220±2	220±2	220±2	220,00±2,00
2,62±0,04	232±2	230±2	230±2	230,67±2,00
2,80±0,04	240±2	240±2	240±2	240,00±2,00
2,96±0,04	250±2	250±2	250±2	250,00±2,00

La curva de saturación en vacío resultante aplicando el procedimiento descrito según 2.5.1.2 es la siguiente (Figura 45):

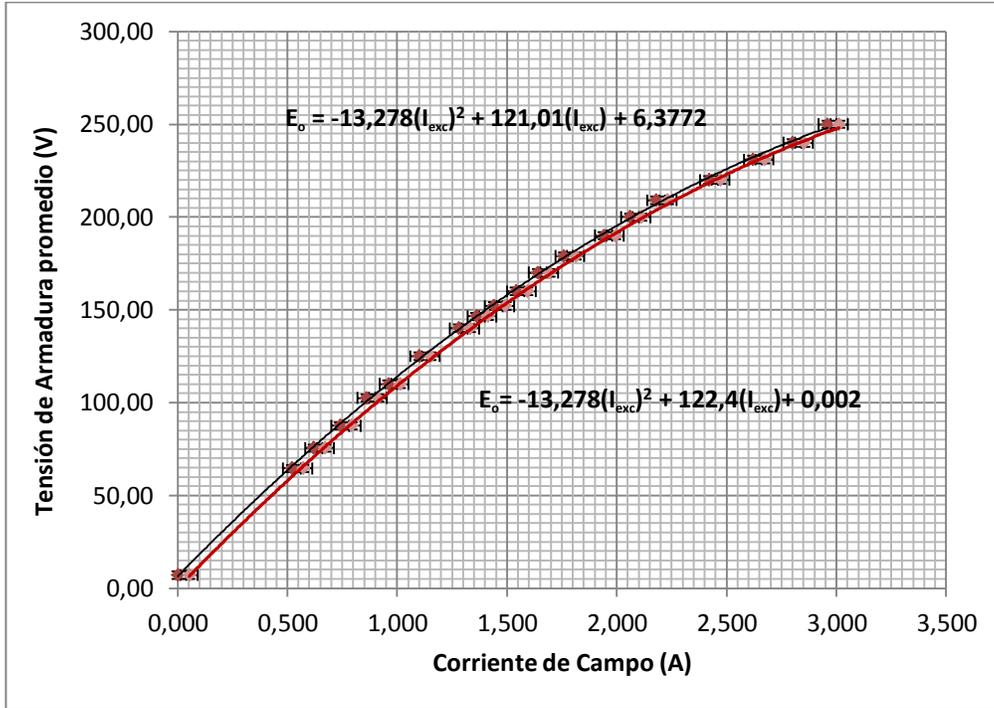


Figura 46. Curva de saturación en vacío obtenida bajo el procedimiento según 2.5.1.2

La curva proyectada hacia la izquierda es la curva de tendencia de las mediciones obtenidas bajo el procedimiento según 2.5.1.2. Como la característica en vacío presenta una tensión residual diferente de cero ($V_{res} = 7,00 \pm 0,20$), se busca el punto de corte de la curva obtenida con el eje de las abscisas, cuyo valor es aproximadamente de $\Delta i_{exc} = 0,0524$. Este valor se debe agregar a todos los valores medidos de la corriente de excitación y se grafica de nuevo con esta corrección. La curva dibujada hacia la derecha es la curva resultante con la inclusión de esa corrección.

Los resultados de las mediciones obtenidas por el método descrito en 3.4.1.2 son las siguientes (Tabla 45):

Tabla 45. Resultados de la medición para obtener la curva en vacío bajo el procedimiento según 3.4.1.2

Corriente de Campo (A)	Tensión de Armadura 1-2 (V)	Tensión de Armadura 2-3 (V)	Tensión de Armadura 3-1 (V)	Tensión de Armadura promedio (V)
3,00±0,04	244±2	244±2	244±2	244,00±2,00
2,84±0,04	236±2	236±2	236±2	238,00±2,00
2,60±0,04	228±2	228±2	228±2	228,00±2,00
2,40±0,02	220±2	220±2	220±2	220,00±2,00
2,18±0,02	210±2	210±2	210±2	210,00±2,00
2,00±0,02	200±2	200±2	200±2	200,00±2,00
1,86±0,02	190±2	190±2	190±2	190,00±2,00
1,70±0,02	180±2	180±2	180±2	180,00±2,00
1,56±0,02	170±2	170±2	170±2	170,00±2,00
1,42±0,02	160±2	160±2	160±2	160,00±2,00
1,30±0,02	148±2	150±2	150±2	149,33±2,00
1,22±0,02	140±1	140±1	140±1	140,00±1,00
1,16±0,02	135±1	135±1	135±1	135,00±1,00
1,10±0,02	130±1	130±1	130±1	130,00±1,00
1,04±0,02	125±1	125±1	125±1	125,00±1,00
1,00±0,02	120±1	120±1	120±1	120,00±1,00
0,94±0,02	115±1	115±1	115±1	115,00±1,00
0,90±0,02	110±1	110±1	110±1	110,00±1,00
0,84±0,02	105±1	105±1	105±1	105,00±1,00
0,80±0,02	100±1	100±1	100±1	100,00±1,00
0,76±0,02	95±1	95±1	95±1	95,00±1,00
0,70±0,02	90±1	90±1	90±1	90,00±1,00
0,64±0,02	85±1	85±1	85±1	85,00±1,00
0,60±0,02	80±1	80±1	80±1	80,00±1,00
0,54±0,02	75±1	75±1	75±1	75,00±1,00
0,50±0,02	70±1	70±1	70±1	69,33±1,00
0,44±0,02	65±1	65±1	65±1	64,77±1,00
0	7,8±0,2	7,8±0,2	7,8±0,2	7,80±0,20

La curva de saturación en vacío resultante aplicando el procedimiento descrito en 3.4.1.2 es la siguiente (Figura 47):

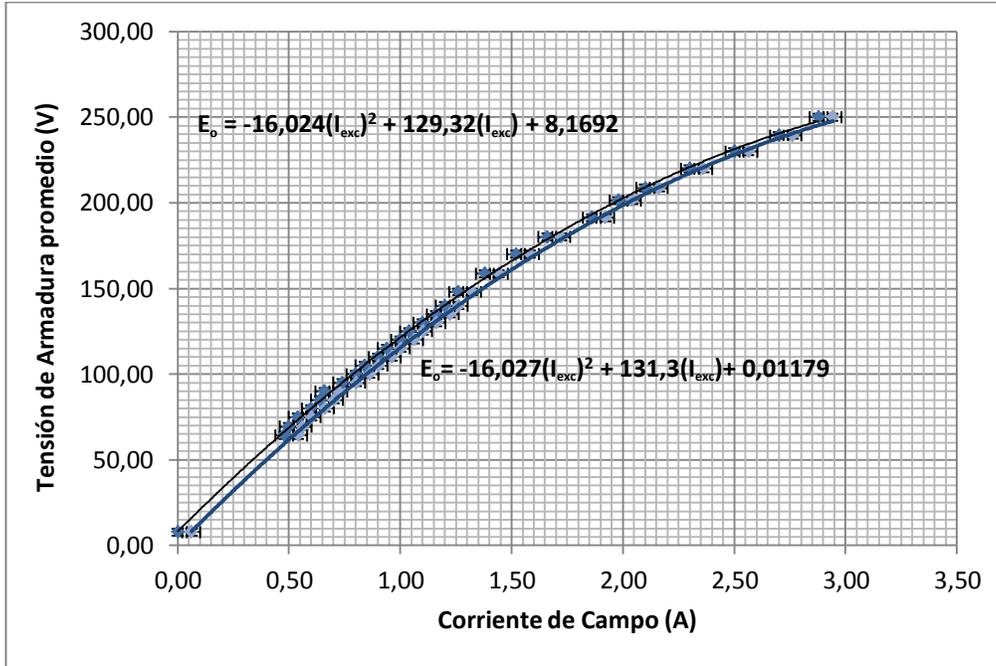


Figura 47. Curva de saturación en vacío obtenida bajo el procedimiento según 3.4.1.2

La curva trazada hacia la izquierda es la curva de dispersión de las mediciones obtenidas bajo el procedimiento según 3.4.1.2. Como la característica en vacío presenta una tensión residual diferente de cero ($V_{res} = 7,80 \pm 0,20$) se encuentra el punto de corte de la curva obtenida con el eje de las abscisas, cuyo valor es aproximadamente de $\Delta i_{exc} = 0,0629$. Este valor se debe agregar a todos los valores medidos de la corriente de excitación y se traza de nuevo con esta corrección. La curva dibujada a la derecha es la curva resultante con la inclusión de esa corrección.

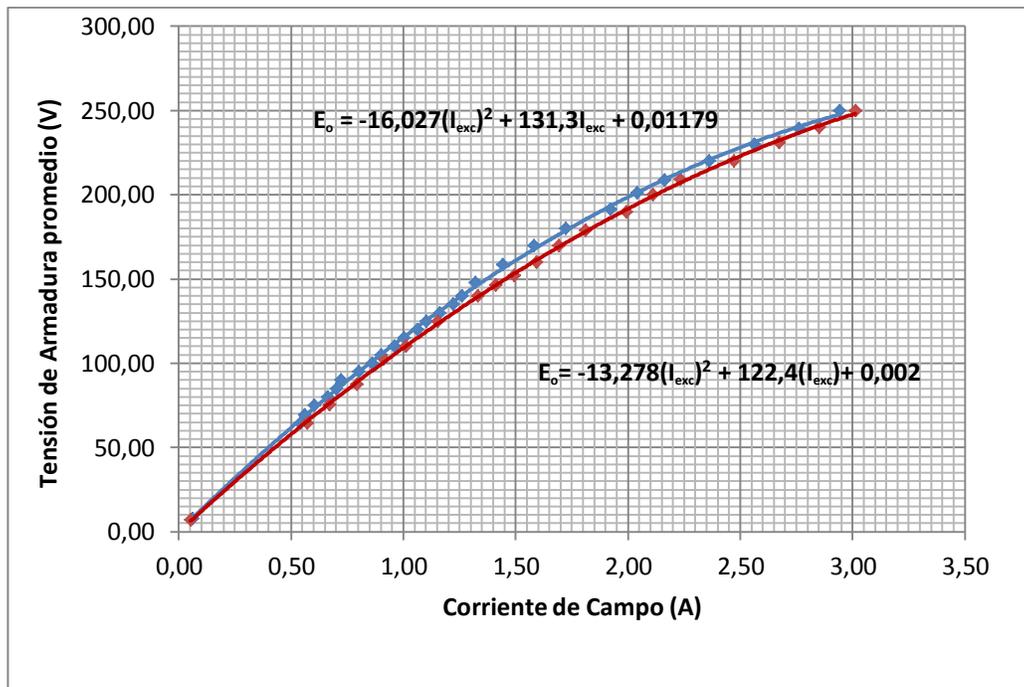


Figura 48. Comparación entre las curvas de saturación en vacío obtenidas bajo el procedimiento según 2.5.1.2 y 3.4.1.2

Haciendo las comprobaciones respectivas entre las curvas de saturación de vacío obtenidas bajo los procedimientos descritos en 2.5.1.2 y 3.4.1.2 (Figura 48), se puede observar que ambas curvas de dispersión son muy similares. Sin embargo, la curva de dispersión obtenida bajo 3.4.1.2 (Curva superior) tiene un mayor efecto de histéresis ya que el trazado de dicha curva se realiza desde 1,1 veces la tensión nominal reduciendo progresivamente la corriente de excitación partiendo de un estado saturado. En la curva de tendencia obtenida bajo 2.5.1.2 (Curva inferior) se observa un menor efecto de histéresis ya que la curva se traza desde un estado no saturado con un aumento progresivo de la corriente de excitación hasta llegar a 1,2 veces el valor de la misma.

4.3.5 Curva en cortocircuito máquina 1 (MQ1)

Las mediciones a realizar en este apartado están bajo los procedimientos descritos en los numerales 2.5.1.3 y 3.4.1.3 del presente trabajo. El esquema de conexión usada para obtener la curva de saturación en cortocircuito es el siguiente (figura 49):

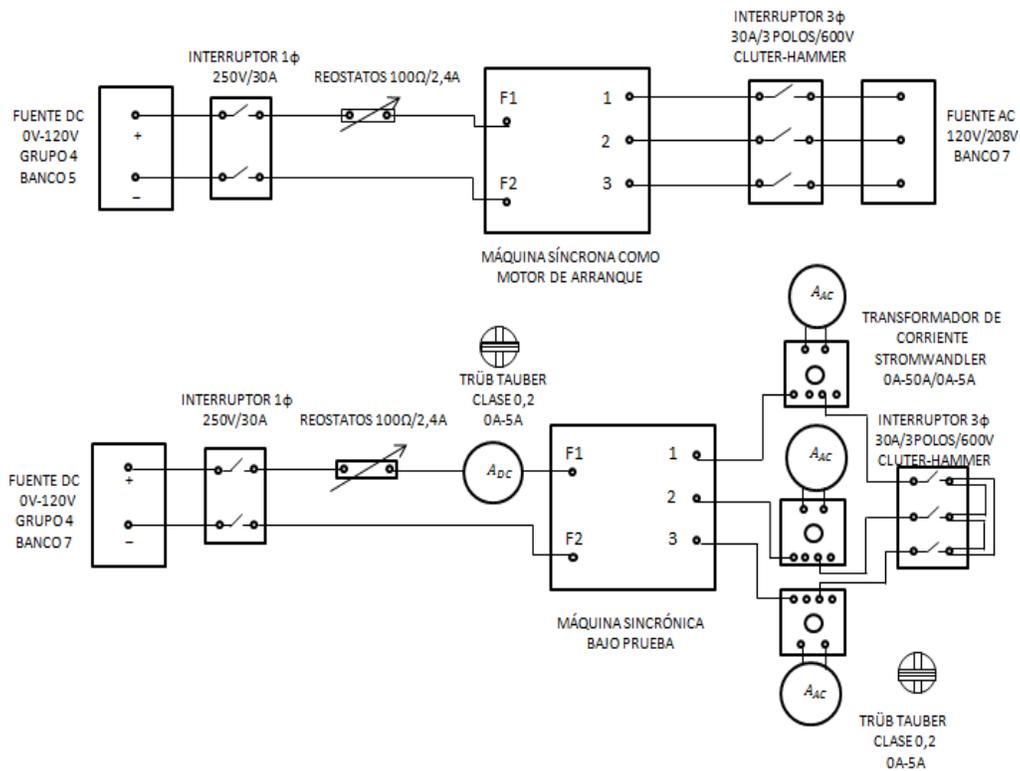


Figura 49. Esquema de conexión sobre la máquina síncrona bajo prueba (MQ1)

Como motor de arranque o primo motor se utilizó la máquina síncrona 2 (MQ2) ya que me permite alcanzar una velocidad constante durante las mediciones [8]. Los resultados de las mediciones realizadas sobre la máquina síncrona bajo prueba son las siguientes (Tabla 41):

Tabla 41. Resultados de la medición sobre MQ1 para obtener la curva de saturación en cortocircuito bajo el procedimiento según 2.5.1.3

Corriente de Campo (A)	Corriente de Armadura I_{1-2} (A)	Corriente de Armadura I_{2-3} (A)	Corriente de Armadura I_{3-1} (A)	Corriente de Armadura promedio (A)
1,22±0,02	9,9±0,1	9,8±0,1	9,9±0,1	9,87±0,10
0,98±0,02	7,9±0,1	8,0±0,1	7,9±0,1	7,93±0,10
0,74±0,02	5,9±0,1	5,8±0,1	5,9±0,1	5,87±0,10
0,48±0,02	4,0±0,1	3,9±0,1	4,0±0,1	3,97±0,10

La curva de saturación en cortocircuito resultante aplicando el procedimiento descrito en el numeral 2.5.1.3 es la siguiente (Figura 50):

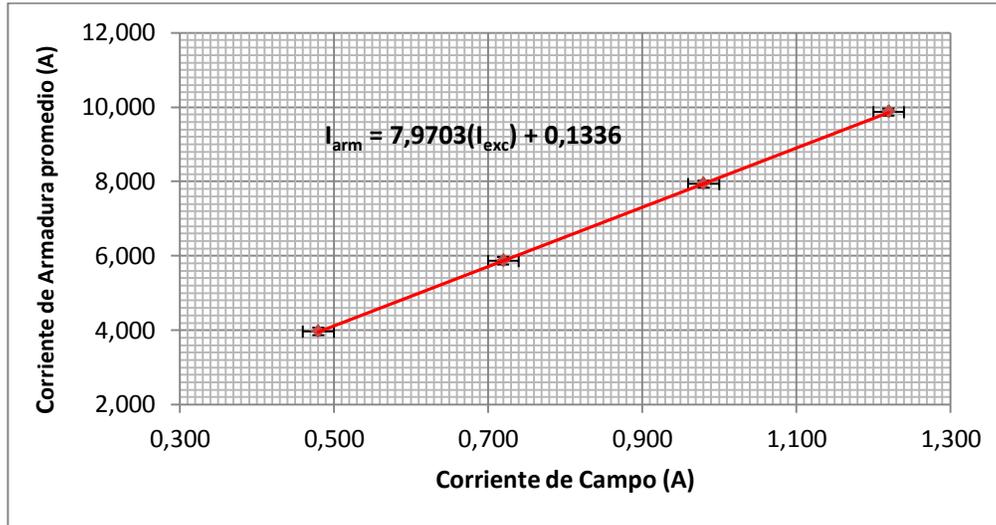


Figura 50. Curva de saturación en cortocircuito de MQ1 obtenida bajo el procedimiento según 2.5.1.3

Los resultados de las mediciones obtenidas por el método descrito por el numeral 3.4.1.3 son las siguientes (Tabla 42):

Tabla 42. Resultados de la medición sobre MQ1 para obtener la curva de saturación en cortocircuito bajo el procedimiento según 3.4.1.3

Corriente de Campo (A)	Corriente de Armadura 1-2 (A)	Corriente de Armadura 2-3 (A)	Corriente de Armadura 3-1 (A)	Corriente de Armadura promedio (A)
0,98±0,02	7,9±0,1	7,9±0,1	8,0±0,1	7,93±0,10
0,84±0,02	7,0±0,1	6,9±0,1	7,0±0,1	6,97±0,10
0,72±0,02	6,0±0,1	6,0±0,1	6,0±0,1	6,00±0,10
0,64±0,02	5,3±0,1	5,3±0,1	5,4±0,1	5,33±0,10
0,56±0,02	4,7±0,1	4,6±0,1	4,6±0,1	4,63±0,10
0,48±0,02	4,0±0,1	4,0±0,1	4,1±0,1	4,03±0,10

La curva de saturación en cortocircuito resultante aplicando el procedimiento descrito en el numeral 3.4.1.3 es la siguiente (Figura 51):

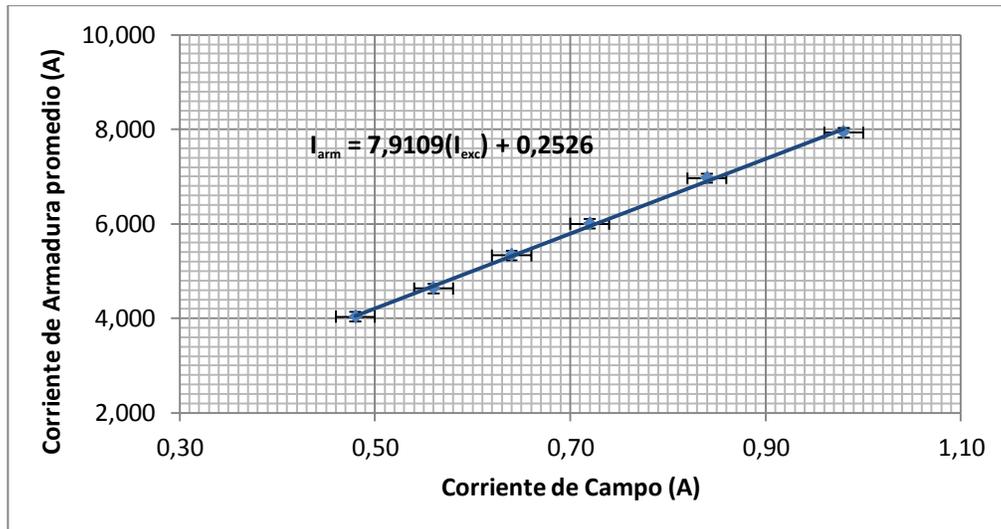


Figura 51. Curva de saturación en cortocircuito de MQ1 obtenida bajo el procedimiento según 3.4.1.3

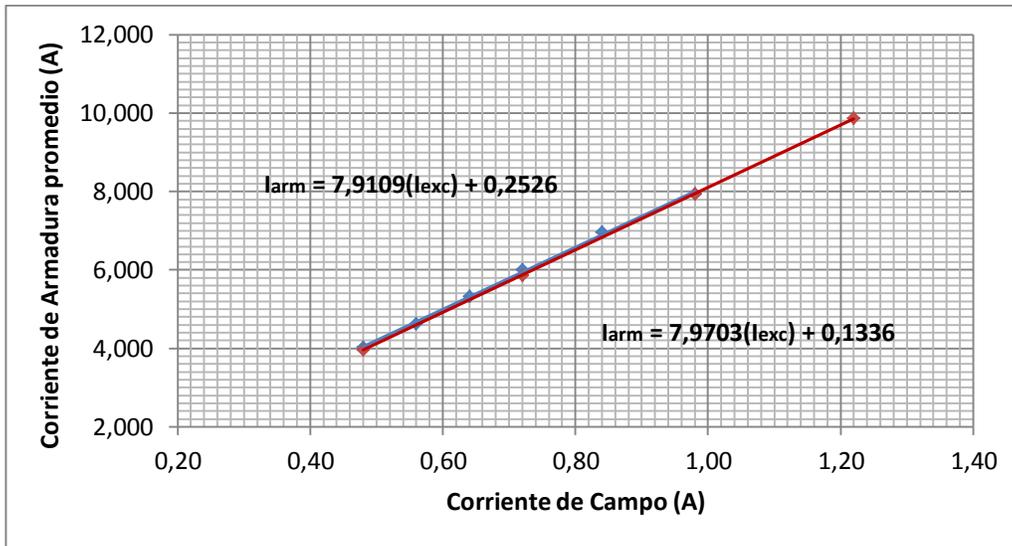


Figura 52. Comparación de las curvas de saturación en cortocircuito obtenida sobre MQ1 bajo el procedimiento según 2.5.1.3 y 3.4.1.3

Realizando una comparación respectiva entre las curvas de saturación en cortocircuito obtenidas bajo los procedimientos descritos por los numerales 2.5.1.3 y 3.4.1.3 se puede observar que son muy similares (Figura 52). La recta de dispersión obtenida bajo el procedimiento descrito en 2.5.1.3 (recta inferior) es la que tiene mejor aproximación al punto de corte con el origen, a pesar de que el menor valor de corriente de armadura sugerido no se pudo tomar debido a que el rango de medición del amperímetro para la corriente de campo abarcaba un rango entre 0,4 A hasta 1,5 A. Ambas curvas representan un sistema magnético no saturado con dos formas distintas de distribuir las muestras obtenidas.

4.3.6 Curva de saturación en cortocircuito máquina 2 (MQ2)

Las mediciones a realizar en este apartado están bajo los procedimientos descritos en los numerales 2.5.1.3 y 3.4.1.3 del presente trabajo. El esquema de conexión usada para obtener la curva de saturación en cortocircuito es la misma utilizada en el numeral 4.3.5. Se va a usar como motor de arranque a MQ1 siguiendo las recomendaciones dadas en [8]. Los resultados de las mediciones sobre MQ2 para obtener la curva de saturación en cortocircuito son las siguientes (Tabla 43):

Tabla 43. Resultados de la medición sobre MQ2 para obtener la curva de saturación en cortocircuito bajo el procedimiento según 2.5.1.3

Corriente de campo (A)	Corriente de Armadura A1-2 (A)	Corriente de Armadura A2-3(A)	Corriente de Armadura A3-1(A)	Corriente de Armadura promedio (A)
1,10±0,02	9,9±0,1	9,8±0,1	9,9±0,1	9,87±0,10
0,88±0,02	7,9±0,1	7,9±0,1	8,0±0,1	7,93±0,10
0,64±0,02	5,9±0,1	5,8±0,1	5,9±0,1	5,87±0,10
0,44±0,02	4,0±0,1	4,1±0,1	4,0±0,1	4,03±0,10

La curva de saturación en cortocircuito resultante aplicando el procedimiento descrito en 2.5.1.3 es la siguiente (Figura 53):

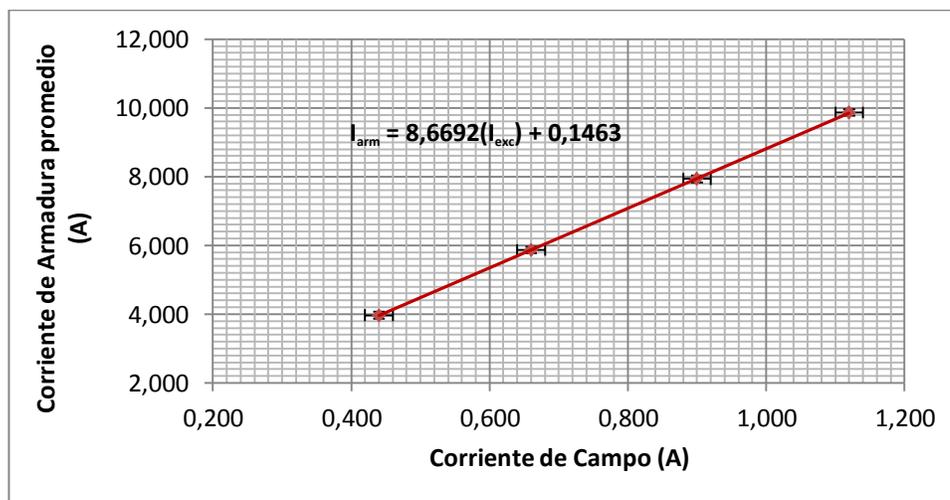


Figura 53. Curva de saturación en cortocircuito de MQ2 obtenida bajo el procedimiento según 2.5.1.3

Los resultados de las mediciones obtenidas sobre MQ2 para obtener la curva de saturación en cortocircuito por el método descrito en 3.4.1.3 son las siguientes (Tabla 44):

Tabla 44. Resultados de la medición sobre MQ2 para obtener la curva de saturación en cortocircuito bajo el procedimiento según 3.4.1.3

Corriente de Campo (A)	Corriente de Armadura I_{1-2} (A)	Corriente de Armadura I_{2-3} (A)	Corriente de Armadura I_{3-1} (A)	Corriente de Armadura promedio (A)
0,84±0,02	7,9±0,1	8,0±0,1	8,0±0,1	7,95±0,10
0,64±0,02	6,1±0,1	6,1±0,1	6,1±0,1	6,10±0,10
0,44±0,02	4,3±0,1	4,3±0,1	4,2±0,1	4,25±0,10
0,74±0,02	7,1±0,1	7,1±0,1	7,0±0,1	7,05±0,10
0,58±0,02	5,6±0,1	5,5±0,1	5,5±0,1	5,55±0,10
0,50±0,02	4,9±0,1	4,9±0,1	4,8±0,1	4,85±0,10

La curva de saturación en cortocircuito resultante sobre MQ2 aplicando el procedimiento descrito en 3.4.1.3 es la siguiente (Figura 54):

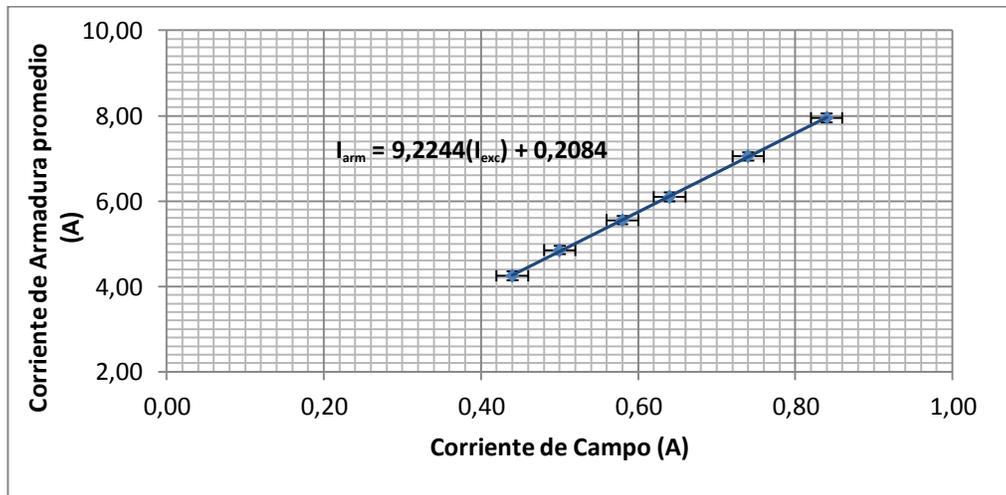


Figura 54. Curva de saturación en cortocircuito de MQ2 obtenida bajo el procedimiento según 3.4.1.3

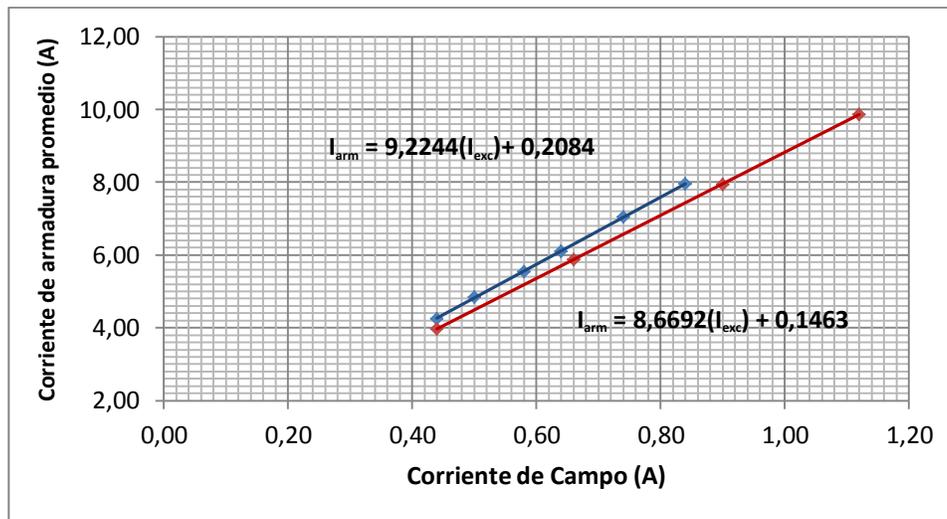


Figura 55. Comparación de las curvas de saturación en cortocircuito obtenida bajo el procedimiento según 2.5.1.3 y 3.4.1.3

Haciendo la comparación respectiva entre las curvas de saturación en cortocircuito sobre MQ2 conseguidas bajo el procedimiento descrito por los numerales 2.5.1.3 y 3.4.1.3 se puede observar que ambas rectas de dispersión tienen similitudes (Figura 55). En este rango de valores de corriente de excitación la máquina síncrona bajo prueba no ha entrado a un estado de saturación, por lo que se obtiene dicha característica sin dificultades, a pesar de que ambas normas reflejan procedimientos distintos en cuanto a la toma de patrones de medición. La recta de dispersión obtenida bajo el método descrito en 3.4.1.3 (Recta superior) tiene una mayor inclinación y el punto de corte con el eje de las ordenadas cercano a cero pero superior a la recta obtenida bajo el procedimiento según 2.5.1.3 (Recta inferior).

4.3.7 Curva de saturación a factor de potencia cero en la máquina 1 (MQ1)

Las mediciones a realizar están en base a los procedimientos descritos en 2.5.1.4 y 3.4.1.4 del presente trabajo. Como motor de arranque se va a utilizar un motor DC con conexión en derivación, siguiendo las pautas sobre el arranque descritas en 4.1. El esquema circuital a utilizar para obtener la curva de saturación a factor de potencia cero es la siguiente (Figura 55):

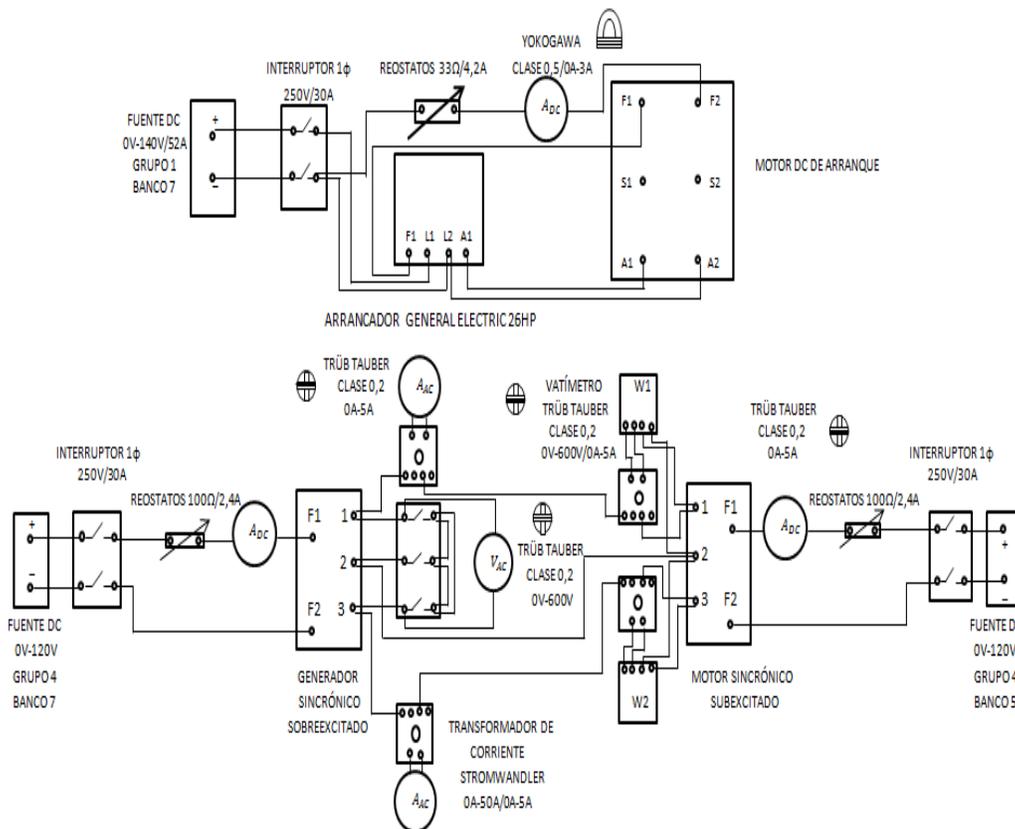


Figura 56. Esquema de conexión sobre la máquina sincrónica bajo prueba (MQ1)

Antes de realizar las mediciones respectiva, se debe primeramente tomar el valor de la corriente de campo para la corriente de armadura nominal con el interruptor 3φ cerrado, ya que este valor representa el punto de corte de la curva de saturación a factor de potencia cero con el eje de las abscisas

(corriente de excitación). Cuando se empieza a medir los otros valores requeridos para construir la curva, el interruptor se abre. Con esta condición se conserva el ángulo de fase que existe entre la tensión y la corriente. Los resultados de las mediciones obtenidas para encontrar la curva de saturación a factor de potencia cero bajo el método descrito en 2.5.1.4 son las siguientes (Tabla 45):

Tabla 45. Resultados de la medición para obtener la curva de saturación con factor de potencia cero bajo el procedimiento según 2.5.1.4

Corriente de Campo (A)	Tensión de Armadura (V)	Corriente de Armadura (A)	W1(W)	-W2(W)	tag ϕ	cos ϕ
1,02±0,02	0	7,9±0,1	0	0	0	0
1,96±0,02	115±1	7,9±0,1	35±5	40±5	-25,98	0,038
2,02±0,02	121±1	7,9±0,1	35±5	40±5	-25,98	0,038
2,12±0,02	131±1	7,9±0,1	40±5	45±5	-29,45	0,034
2,26±0,02	144±1	7,9±0,1	45±5	50±5	-32,91	0,030
2,36±0,02	154±2	7,9±0,1	45±5	50±5	-32,91	0,030
2,42±0,02	160±2	7,9±0,1	50±5	55±5	-36,37	0,027
2,70±0,04	180±2	7,9±0,1	55±5	60±5	-39,84	0,025
2,84±0,04	190±2	7,9±0,1	60±5	65±5	-43,30	0,023
3,00±0,04	200±2	7,9±0,1	65±5	70±5	-46,76	0,021
3,20±0,04	212±2	7,9±0,1	65±5	70±5	-46,76	0,021
3,36±0,04	220±2	7,9±0,1	70±5	75±5	-50,23	0,020

La curva de saturación a factor de potencia cero obtenida sobre MQ1 sobreexcitada bajo el procedimiento descrito en 2.5.1.4 es la siguiente (Figura 57):

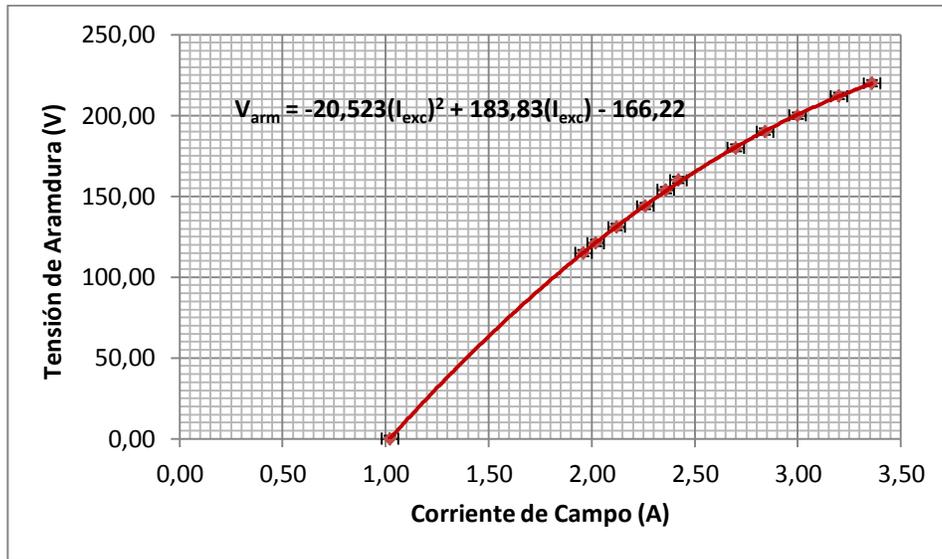


Figura 57. Curvas de saturación con factor de potencia cero sobre MQ1 obtenida bajo el procedimiento descrito en 2.5.1.4

Los resultados de las mediciones para obtener la curva de saturación a factor de potencia cero sobre MQ1 por el método descrito en 3.4.1.4 son los siguientes (Tabla 46):

Tabla 46. Resultados de la medición para obtener la curva de saturación con factor de potencia cero bajo el procedimiento descrito en 3.4.1.4

Corriente de Campo (A)	Tensión de Armadura (V)	Corriente de Armadura (A)	W1(W)	-W2(W)	tag(ϕ)	cos(ϕ)
3,36±0,04	220±2	7,9±0,1	70±5	75±5	-50,23±3,46	0,020
3,20±0,04	208±2	7,9±0,1	65±5	70±5	-46,76±3,46	0,021
2,96±0,04	194±2	7,9±0,1	65±5	70±5	-46,76±3,46	0,021
2,84±0,04	188±2	7,9±0,1	60±5	65±5	-43,30±3,46	0,023
0,98±0,02	0	7,9±0,1	0	0	0	0

La curva de saturación a factor de potencia cero sobre MQ1 sobreexcitada obtenida bajo el procedimiento descrito en 3.4.1.4 es la siguiente (Figura 58):

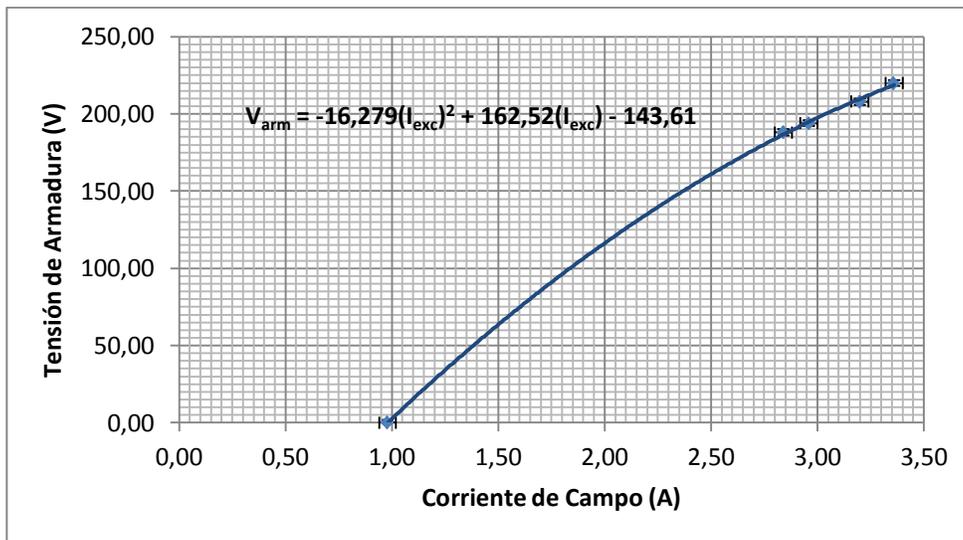


Figura 58. Curvas de saturación con factor de potencia cero obtenida bajo el procedimiento descrito en 3.4.1.4

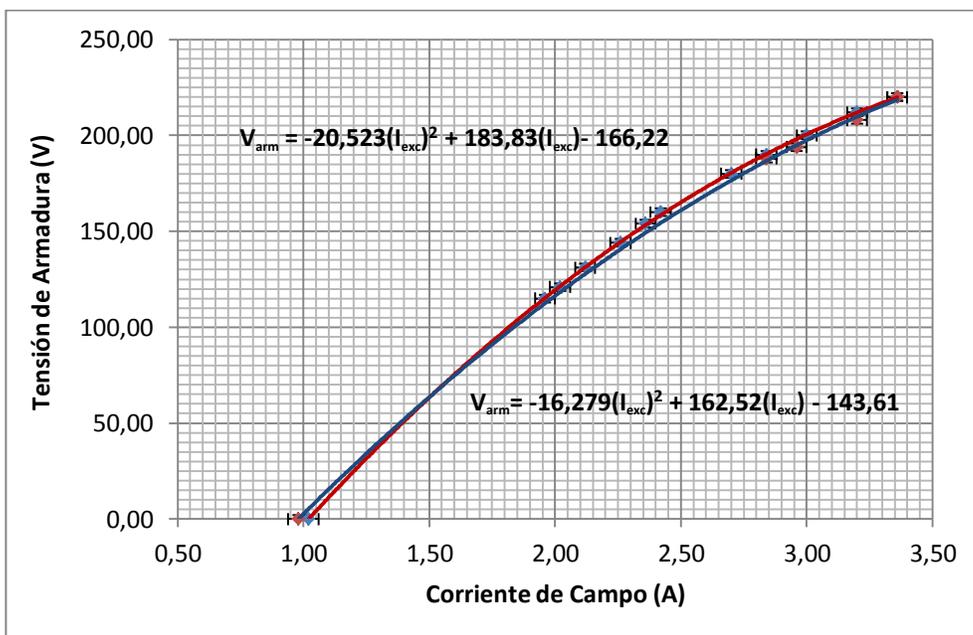


Figura 59. Comparación entre las curvas de saturación con factor de potencia cero obtenida bajo los procedimientos descritos en 2.5.1.4 y 3.4.1.4

Si se observa la comparación entre las gráficas obtenidas bajo los procedimientos descritos en 2.5.1.4 y 3.4.1.4 para construir la curva de saturación a factor de potencia cero con MQ1 sobreexcitado se pueden notar

similitudes (Figura 59). Los puntos de corte con respecto al eje de la corriente de campo son 0,98 A y 1,02 A respectivamente. Los puntos correspondientes a la tensión de armadura nominal tienen igual valor.

4.3.8 Determinación de la reactancia de Potier sobre la máquina 1 (MQ1)

La forma de determinar el valor de la reactancia de Potier (X_p) se realiza basándose en los procedimientos descritos en 2.5.1.5 y 3.4.1.5 del presente trabajo. El método gráfico para el cálculo de la reactancia de Potier (X_p) bajo 2.5.1.5 es el siguiente (Figura 60):

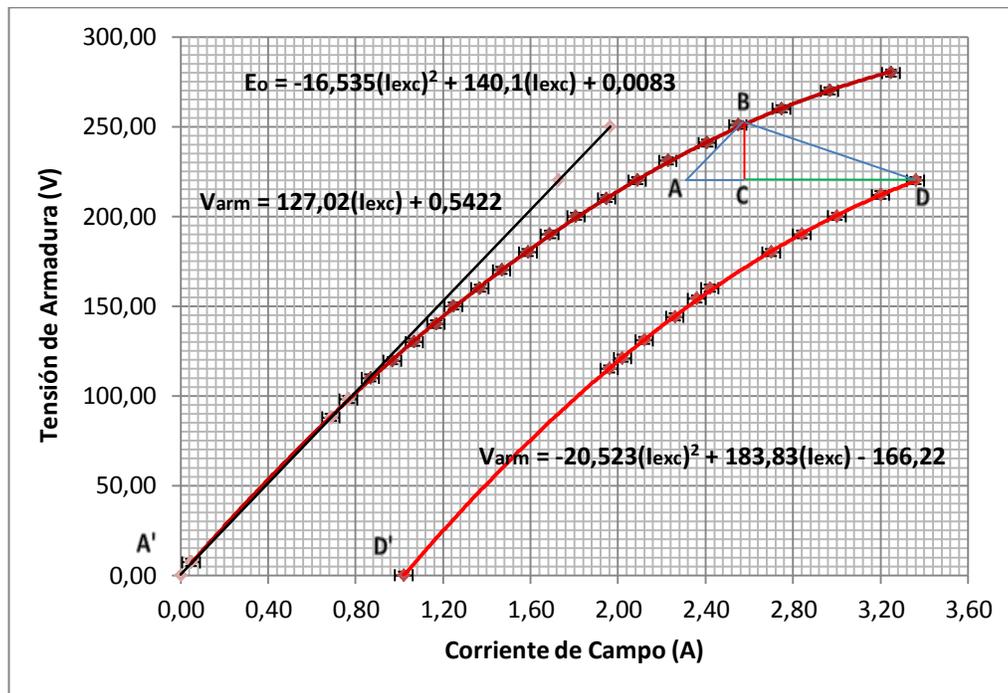


Figura 60. Método gráfico para calcular del valor de la reactancia de Potier obtenida bajo el procedimiento descrito en 2.5.1.5

El valor de la reactancia de Potier (X_p) se obtiene de la siguiente manera:

$$X_p I_a = \overline{BC} = \frac{35 \pm 5}{\sqrt{3}} V \rightarrow X_{p(Fase)} = \frac{\frac{35 \pm 5}{\sqrt{3}} V}{7,9 \pm 0,1 A} = 2,56 \pm 0,40 \Omega$$

El segmento \overline{AD} en el gráfico tiene igual longitud al segmento $\overline{A'D'}$, cuya magnitud representa el valor de la corriente de campo cuando se tiene la corriente de armadura nominal obtenida de la prueba de saturación en cortocircuito.

El valor de la reactancia de Potier (X_p) en sistema por unidad es igual a:

$$X_{P(fase)p.u} = \frac{2,56 \pm 0,40 \Omega}{\left(\frac{(220 V)^2}{3 kVA}\right)} = 0,16 \pm 0,02 p.u$$

El método gráfico para el cálculo de la reactancia de Potier (X_p) bajo 3.4.1.5 es el siguiente (Figura 61):

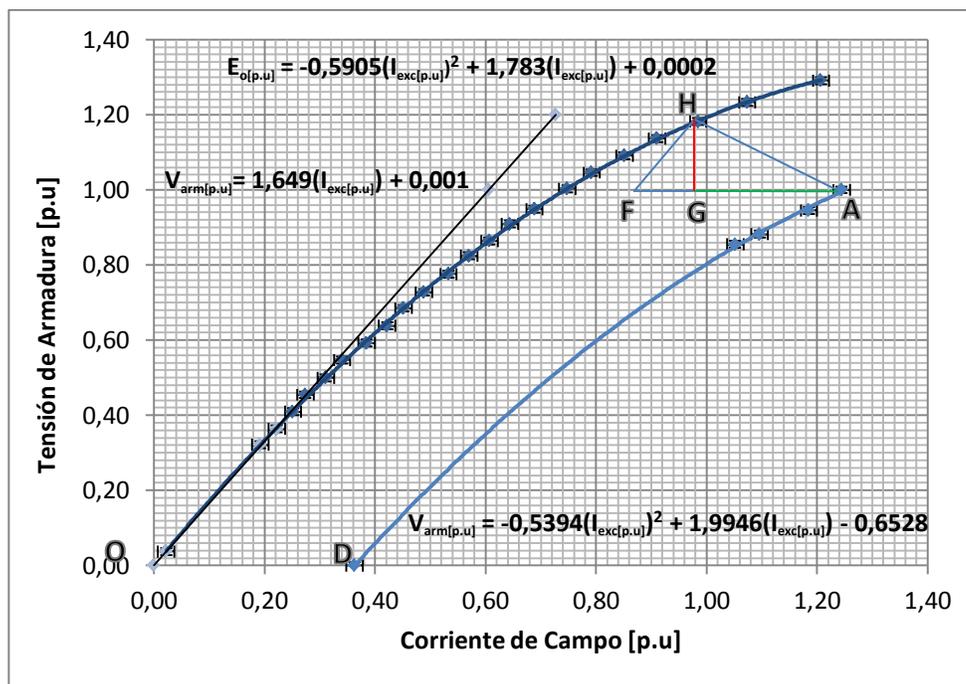


Figura 61. Método gráfico para calcular del valor de la reactancia de Potier obtenida bajo el procedimiento según 3.4.1.5

En este caso ambas curvas (curva de saturación en vacío y la curva de saturación a factor de potencia cero en régimen sobreexcitado) fueron elaboradas con los valores obtenidos y transformados a por unidad, como

sugieren en 3.4.1.5. El valor de la reactancia de Potier (X_p) resulta lo siguiente:

$$X_p I_a = \overline{HG} \rightarrow X_p = \frac{\overline{HG}}{I_a} = \frac{0,18 \pm 0,02 \text{ p.u}}{1,00 \pm 0,01 \text{ p.u}} = 0,18 \pm 0,02 \text{ p.u}$$

El segmento \overline{OD} es igual al segmento \overline{AF} , cuya magnitud es el valor de la corriente de campo cuando se tiene la corriente de armadura nominal obtenida de la prueba de saturación en cortocircuito.

El valor de la reactancia de Potier (X_p) es la siguiente:

$$X_{p(fase)} = (0,18 \pm 0,02) * \left(\frac{(220 \text{ V})^2}{3 \text{ kVA}} \right) = 2,90 \pm 0,32 \Omega$$

Haciendo la comparación entre los resultados obtenidos bajo el procedimiento descrito se puede destacar que los valores de la reactancia de Potier son cercanos. Utilizando el procedimiento dado por 2.5.1.5 el valor de la reactancia de Potier es de aproximadamente $X_p = 2,56 \Omega$, mientras que el valor obtenido bajo el procedimiento descrito en 3.4.1.5 es de aproximadamente $X_p = 2,90 \Omega$. Estos valores obtenidos son cercanos a los valores convencionales de dicho parámetro en máquinas sincrónicas (Tabla 47).

Tabla 47. Comparación de los valores de la reactancia de Potier (X_P)

	X_P [p.u]	Valores típicos [p.u] (Westinghouse) ANEXOS
Con el procedimiento detallado en 2.5.1.5	0,16±0,02	0,17-0,40
Con el procedimiento detallado en 3.4.1.5	0,18±0,02	

4.3.9 Determinación de los valores de los parámetros en condición de estado estable en la máquina 1 (MQ1)

4.3.9.1 Reactancia sincrónica del eje directo (X_{du})

En base al procedimiento explicado en el numeral 2.5.1.7, el valor de la reactancia del eje directo no saturado (X_{du}) se obtiene de la siguiente manera (Figura 62):

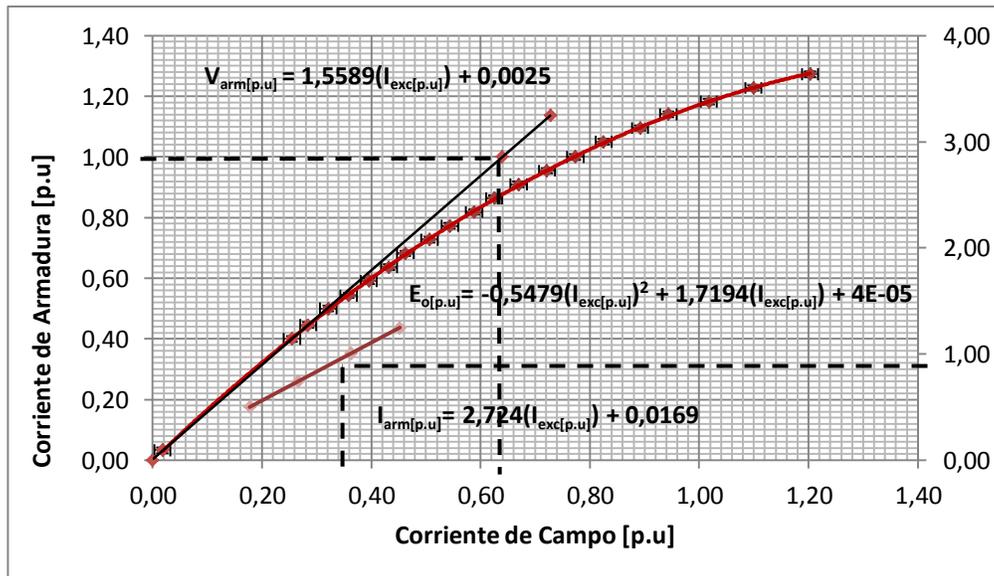


Figura 62. Método gráfico para calcular del valor de la reactancia del eje directo no saturado (X_{du}) obtenida bajo el procedimiento según 2.5.1.7

Aquí se llevó todos los valores obtenidos en por unidad y se trazó los gráficos correspondientes (curva de saturación en vacío, curva de saturación en cortocircuito y curva de la línea del entrehierro).

Se busca el valor de la corriente de campo correspondiente al voltaje de armadura nominal del sistema sobre la recta del entrehierro (I_{FG}), obteniendo un valor aproximado de 0,64 p.u. El valor de la corriente de campo correspondiente a la corriente de armadura nominal del sistema sobre la curva de saturación en cortocircuito (I_{FSI}), se obtiene un valor aproximado de 0,36 p.u.

En base a estos resultados tenemos lo siguiente:

$$X_{du[p.u]} = \frac{I_{FSI[p.u]}}{I_{FG[p.u]}} = \frac{0,36 \pm 0,02}{0,64 \pm 0,02} = 0,56 \pm 0,05 p.u$$

El valor de la reactancia del eje directo no saturado (X_{du}) por fase es la siguiente:

$$X_{du} = (0,56 \pm 0,05) \left(\frac{(220 V)^2}{3kVA} \right) = 9,04 \pm 0,81 \Omega$$

En base al procedimiento descrito en 3.4.1.6 tenemos lo siguiente (Figura 63):

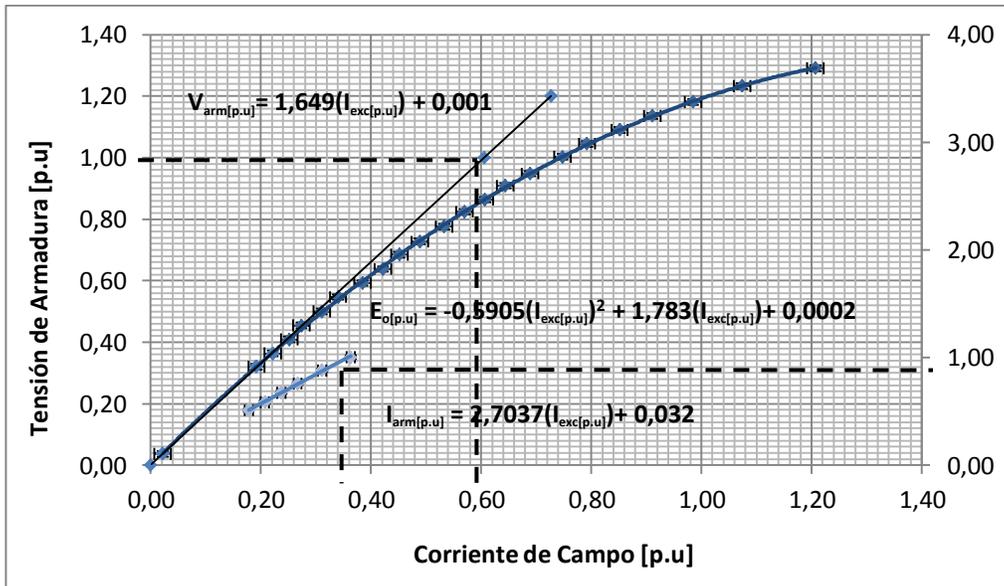


Figura 63. Método gráfico para calcular del valor de la reactancia del eje directo no saturado (X_{du}) obtenida bajo el procedimiento según 3.4.1.6

El valor de la corriente de campo correspondiente a la tensión base nominal sobre la recta del entrehierro trazado (i_{fg}) vale aproximadamente 0,61p.u. El valor de la corriente de campo para la corriente de armadura nominal y sobre la curva de saturación en cortocircuito (i_{fk}) vale aproximadamente 0,36 p.u.

En base a estos resultados, el valor de la reactancia del eje directo no saturado en por unidad es la siguiente:

$$X_{du[p.u]} = \frac{i_{fk}}{i_{fg}} = \frac{0,36 \pm 0,02 p.u.}{0,60 \pm 0,02 p.u.} = 0,60 \pm 0,05 p.u.$$

Si llevamos el valor de la reactancia del eje directo no saturado a ohmios tenemos que:

$$X_{du} = (0,60 \pm 0,05) * \left(\frac{(220 V)^2}{3kVA} \right) = 9,68 \pm 0,81 \Omega$$

De acuerdo a los resultados conseguidos se puede detallar que los valores de la reactancia del eje directo no saturado por ambos métodos descritos por

2.5.1.6 y 3.4.1.6 son casi equivalentes. Debido a que la línea del entrehierro en el gráfico obtenido bajo 3.4.1.6 es un poco más inclinada que la línea del entrehierro sobre el gráfico conseguido por 2.5.1.6, implica que la corriente de excitación a la tensión de armadura nominal es menor y produce un mayor valor de la reactancia del eje directo no saturado. Debemos acotar que estos valores obtenidos corresponden a una tensión nominal, además estos valores están cercanos al rango de valores típicos para un generador sincrónico Westinghouse (Ver ANEXOS).

4.3.10 Reactancia sincrónica del eje de cuadratura (X_{qu})

El esquema circuital necesario para conseguir la reactancia sincrónica del eje de cuadratura no saturada (X_{qu}) bajo los procedimientos descritos en 2.6.1.7.2 y 3.4.1.8 es la siguiente (Figura 64):

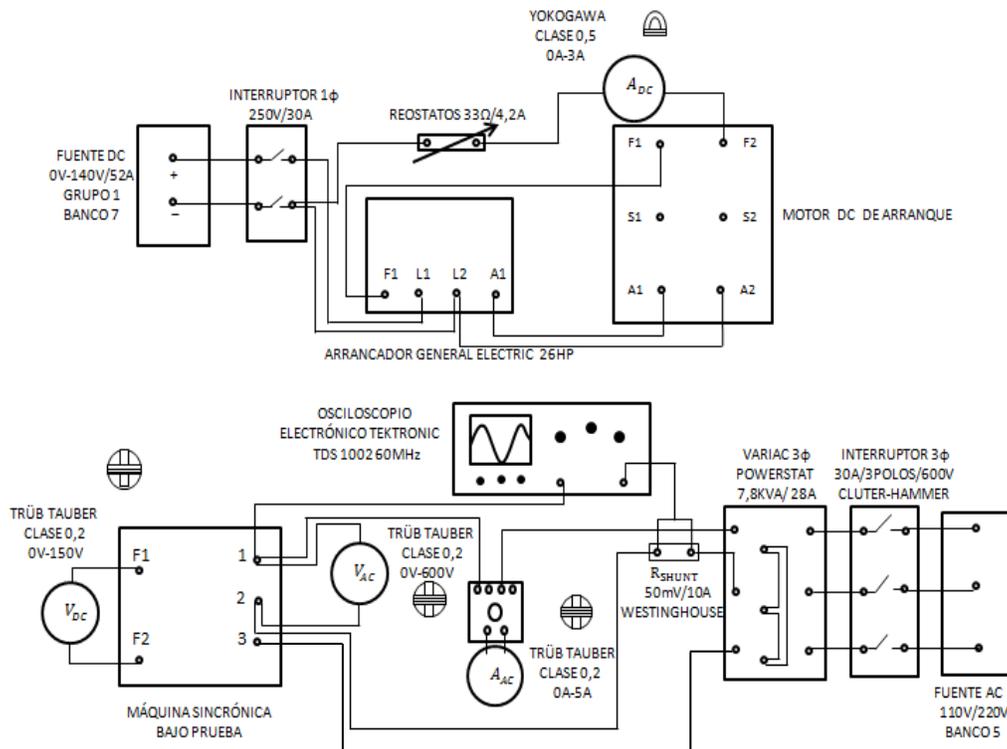


Figura 64. Diagrama circuital correspondiente a la prueba a bajo deslizamiento

Se utilizó como máquina de arranque el motor DC en modo derivación ya que se requiere un control de velocidad (reóstato colocado en el circuito de campo), y llevar el conjunto a un deslizamiento distinto de cero. En este caso, se espera que las agujas de los instrumentos conectados a la máquina sincrónica bajo prueba oscilen desde un valor mínimo hasta un valor máximo, teniendo cuidado de los valores picos riesgosos para los equipos. Por eso se hace necesario registrar estas oscilaciones a través del osciloscopio digital.

En base a las condiciones establecidas en el numeral 2.5.1.6.2 tenemos el siguiente resultado (Figuras 65 y 66):

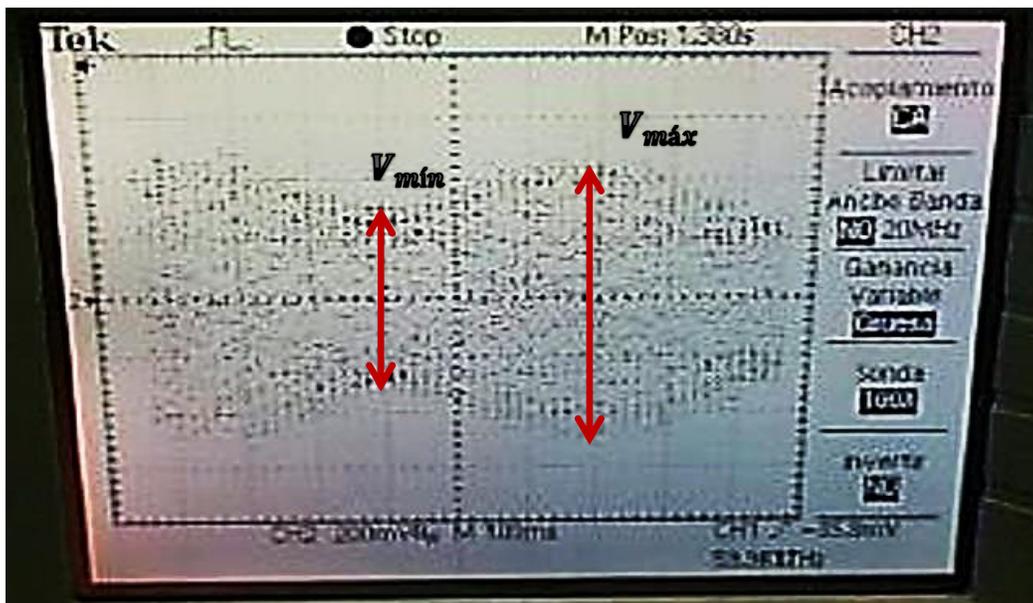


Figura 65. Medición de la tensión entre las fases de la armadura IEEE

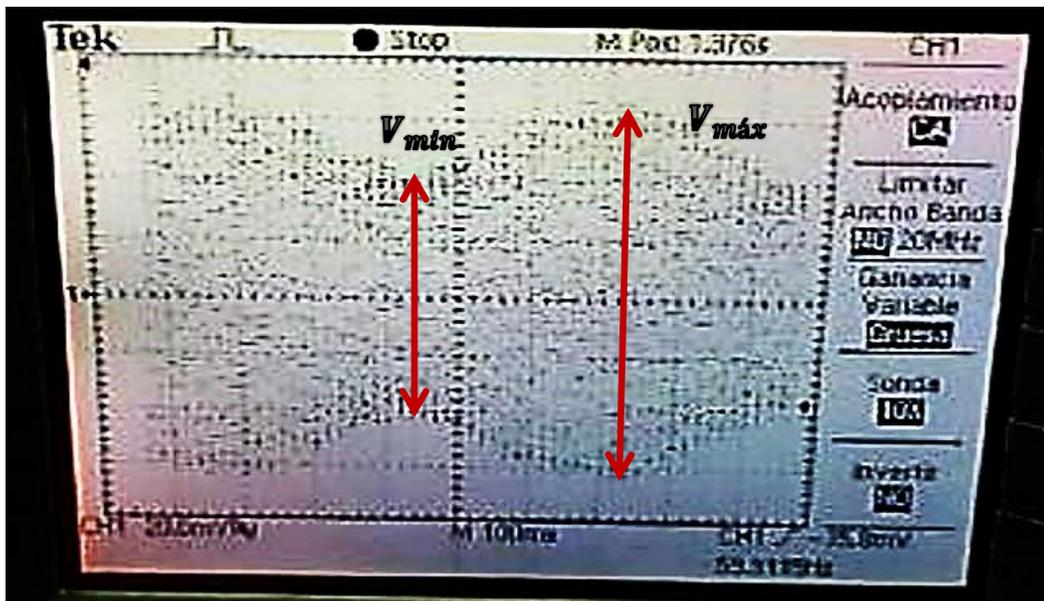


Figura 66. Medición de la caída de tensión sobre la resistencia de prueba (R_{shunt}) IEEE

- La escala de medición establecida sobre el osciloscopio digital para obtener la caída de tensión sobre la resistencia de prueba fue de:

$$\text{Time/div}=100\text{mseg/div} \text{ y } \text{Volt/div}=20\text{mV/div}$$

- La escala de medición establecida sobre el osciloscopio digital para obtener la caída de tensión sobre los devanados de la armadura fue de:

$$\text{Time/div}=100\text{mseg/div} \text{ y } \text{Volt/div}=200\text{mV/div}$$

- La tensión sobre los devanados de armadura se llevó hasta un valor con la ayuda del Variac trifásico de $V_{1-2} = 32,6 \pm 0,2 \text{ V}$, cuyo valor está por debajo del codo de saturación de la máquina y se mantuvo constante durante toda la prueba.
- El grupo Motor DC-Máquina Sincrónica MQ1 se llevó a una velocidad a una velocidad de aproximadamente de $1192 \pm 2 \text{ rpm}$, cuyo valor está por debajo del 1% del deslizamiento requerido.

- Se puede observar en la figura 64 que la tensión de armadura generada tiene dos valores:

$$V_{m\acute{a}x} = 400 \pm 40 \text{ mV} \quad \text{y} \quad V_{m\acute{i}n} = 360 \pm 40 \text{ mV}$$

Como se usó una punta de osciloscopio atenuada X100, tenemos que los valores reales de la tensión de armadura generada son las siguientes:

$$V_{m\acute{a}x} = 40 \pm 4 \text{ V} \quad \text{y} \quad V_{m\acute{i}n} = 36 \pm 4 \text{ V}$$

- Se puede observar en la figura 65 que la caída de tensión sobre la resistencia de prueba R_{shunt} tiene dos valores:

$$V_{m\acute{a}x} = 64 \pm 4 \text{ mV} \quad \text{y} \quad V_{m\acute{i}n} = 44 \pm 4 \text{ mV}$$

Como se usó una punta de osciloscopio atenuada X10 y una resistencia de prueba (100mV/10A), tenemos que los valores reales de la caída de tensión sobre la misma son las siguientes:

$$I_{m\acute{a}x} = 6,4 \pm 0,4 \text{ A} \quad \text{y} \quad I_{m\acute{i}n} = 4,4 \pm 0,4 \text{ A}$$

- Para calcular el valor de las reactancias aproximadas del eje directo (X_d) y del eje de cuadratura (X_q), se usan las ecuaciones (23) y (24) dadas en 2.5.1.6.2, resultando lo siguiente:

$$X_d = \frac{V_{m\acute{a}x}}{I_{m\acute{i}n}} = \frac{40 \pm 4 \text{ V}}{4,4 \pm 0,4 \text{ A}} = 9,09 \pm 1,74 \Omega$$

$$X_q = \frac{V_{m\acute{i}n}}{I_{m\acute{a}x}} = \frac{36 \pm 4 \text{ V}}{6,4 \pm 0,4 \text{ A}} = 5,63 \pm 0,98 \Omega$$

- El valor de la reactancia del eje de cuadratura no saturado (X_{qu}) se calcula a través de la ecuación (26):

$$X_{qu} = X_{du} \left(\frac{X_q}{X_d} \right) = (9,09 \pm 0,81 \Omega) \left(\frac{5,63 \pm 0,98 \Omega}{9,09 \pm 1,74 \Omega} \right) = 5,63 \pm 0,81 \Omega$$

El valor de la reactancia del eje de cuadratura no saturado (X_{qu}) en por unidad es lo siguiente:

$$X_{qu[p.u]} = \frac{5,63 \pm 0,81 \Omega}{\left(\frac{(220 V)^2}{3kVA} \right)} = 0,35 \pm 0,05 p.u$$

En base al procedimiento descrito en el numeral 3.4.1.8 tenemos lo siguiente:

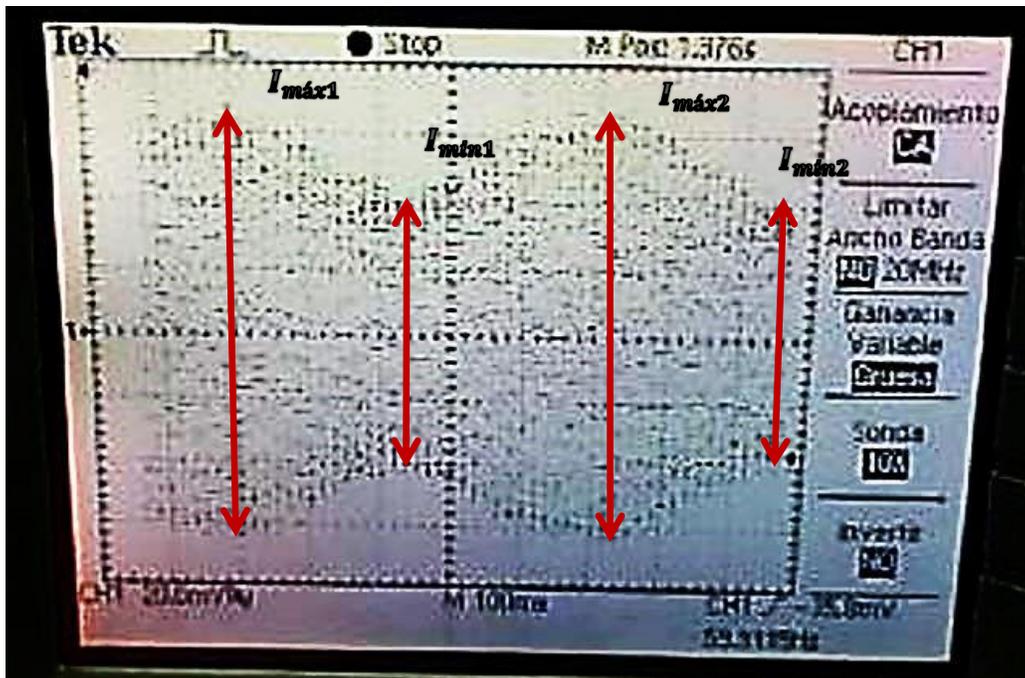


Figura 67. Medición de la caída de tensión sobre la resistencia R_{shunt}

IEC

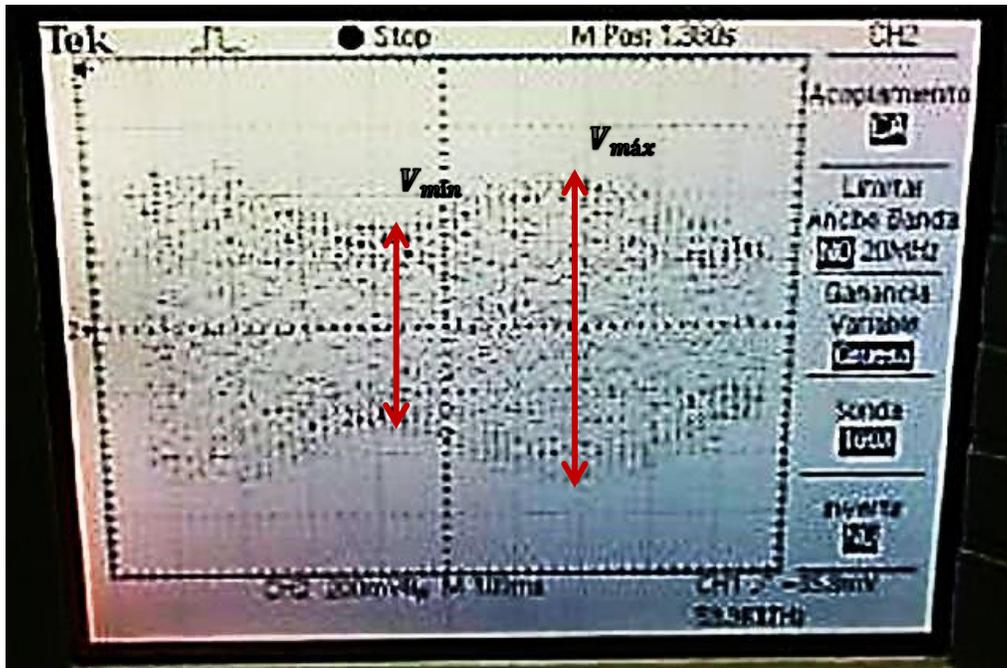


Figura 68. Medición de la tensión de armadura generada IEC

- Los valores de la tensión generada en la armadura y de la corriente que pasa sobre la resistencia R_{shunt} son las siguientes:

$$V_{m\acute{a}x} = 44 \pm 4 V \quad y \quad V_{m\acute{i}n} = 36 \pm 4 V$$

$$I_{m\acute{a}x} = 6,4 \pm 0,4 A \quad y \quad I_{m\acute{i}n} = 4,4 \pm 0,4 A$$

- Antes de conectar el Variac trifásico se midió la tensión residual producida por la máquina sincrónica bajo prueba (MQ1) es de $V_{res} = 7,90 \pm 0,02 V$. Se mantuvo el valor de la tensión de suministro utilizado bajo el procedimiento dictado en 2.5.1.6.2 ($V_{1-2} = 32,6 \pm 0,2 V$).
- Como la tensión residual para este caso está entre el 10% y el 30% de la tensión de suministro, se utilizan las ecuaciones (42) y (43) para calcular la corriente máxima presente en la medición y X_{du} por fase respectivamente, por lo tanto:

$$X_{du} = \frac{U_{m\acute{a}x}}{\sqrt{3}I_{m\acute{i}n}} = \frac{44 \pm 4 V}{\sqrt{3} * \left(\frac{4,4 A + 4,4 A}{2}\right)} = 5,77 \pm 1,44 \Omega$$

El valor de I_{av} se toma como el promedio la magnitud de los dos máximos consecutivos sobre la señal (Figura 67):

$$I_{m\acute{a}x} = \sqrt{(I_{av})^2 - \left(\frac{V_{res}}{\sqrt{3} * X_d}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{6,4 A + 6,4 A}{2}\right)^2 - \left(\frac{7,9 V}{\sqrt{3} * 5,773 \Omega}\right)^2}$$

$$I_{m\acute{a}x} = 6,35 \pm 0,44 A$$

- El valor resultante de la reactancia del eje de cuadratura no saturado (X_{qu}) por fase es el siguiente:

$$X_{qu} = \frac{U_{m\acute{i}n}}{\sqrt{3}I_{m\acute{a}x}} = \frac{36V}{\sqrt{3} * (6,35 \pm 0,44 A)} = 3,27 \pm 0,57 \Omega$$

- El valor de la reactancia del eje directo no saturado (X_{du}) obtenido bajo el procedimiento descrito en 3.4.1.6 es de $\frac{X_{du}}{\sqrt{3}} = 5,50 \pm 0,47 \Omega$. Si se compara con el valor obtenido en esta experiencia $X_{du} = 5,77 \pm 1,44 \Omega$, se poder observar que ambos resultados son muy cercanos.
- El valor de la reactancia del eje de cuadratura en por unidad es el siguiente:

$$X_{qu[p.u]} = \frac{\sqrt{3} * (3,27 \pm 0,57 \Omega)}{\left(\frac{(220 V)^2}{3kVA}\right)} = 0,35 \pm 0,06 p.u$$

Si se verifica los resultados obtenidos bajo los procedimientos reseñados en 2.5.1.6.2 y 3.4.1.8 se puede notar que los valores de X_{qu} determinados son relativamente cercanos. Esto es debido principalmente al error generado en la toma de las magnitudes sobre las señales obtenidas, pero se escogió esta vía

para evitar el error causado por la deflexión de las agujas de los instrumentos de medición.

En resumen, tenemos lo siguiente:

Tabla 48. Comparación de los valores de la reactancia del eje directo y del eje de cuadratura no saturados

	X_{du} [p.u]	X_{qu} [p.u]
Métodos determinados por IEEE	0,56±0,05	0,35±0,05
Métodos determinados por IEC	0,60±0,05	0,35±0,06
Valores típicos Westinghouse (ANEXOS)	0,60-1,50	0,40-0,80

4.3.11 Métodos de cálculo de excitación bajo condiciones específicas de carga

4.3.11.1 Análisis por diagrama fasorial

En base al método descrito en 2.5.1.6.1 tenemos lo siguiente:

- Tomando como hipótesis que la máquina bajo estudio es de polos salientes, con los puntos de operación obtenidas en la prueba de saturación a factor de potencia cero llevados al sistema por unidad (Sección 4.3.7) (Tabla 49), se tiene lo siguiente:

Tabla 49. Puntos de operación de la máquina sincrónica sobreexcitada a factor de potencia cero en sistema por unidad.

Corriente de Campo [p.u]	Tensión de Armadura [p.u]	Corriente de Armadura [p.u]	Factor de potencia (φ°)
1,24	1,00	1,00	0,020
1,19	0,96	1,00	0,021
1,11	0,91	1,00	0,021

- Se selecciona el punto de operación para comprobar la veracidad del método a estudiar:

$$E_a[p.u] = 1 p.u; i_a[p.u] = 1 p.u; i_f[p.u] = 1, p.u; fp = 0,02$$

El valor del ángulo de carga para esta condición es:

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{|I_a|R_1 \sin(\varphi) + |I_a|X_{qu} \cos(\varphi)}{|E_a| + |I_a|R_1 \cos(\varphi) - |I_a|X_{qu} \sin(\varphi)} \right]$$

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{|1| * 0,0214 * \sin(-(\cos^{-1}0,02)) + |1| * 0,36 * 0,02}{|1| + |1| * 0,0214 * 0,02 - |1| * 0,36 * \sin(-(\cos^{-1}0,02))} \right]$$

$$\delta = -0,6108^\circ$$

El valor de la corriente en el eje directo y del eje de cuadratura es:

$$i_d = i_a * \sin(\delta - \varphi) < \delta - 90^\circ = 0,9996 < -92,417^\circ$$

$$i_q = i_a * \cos(\delta - \varphi) < \delta = 0,0273 < -0,4217^\circ$$

El valor de la tensión del entrehierro es:

$$E_{GU} = V + i_a * R_1 + jX_{qu} * i_q + jX_{du} * i_d$$

$$E_{GU} = 1 < 0^\circ + ((1 < -88,854^\circ) * 0,021) + (j0,36 * (0,0273 < -0,4217^\circ)) + (j0,564 * (0,9996 < -92,417^\circ))$$

$$E_{GU} = 1,5263 < -10,1076^\circ p.u$$

- Se busca el valor de la corriente de excitación (I_{GU}) con respecto al punto E_{GU} , evaluando dicho valor sobre la recta del entrehierro generada (Figura 68), cuyo valor de corriente de excitación será aproximadamente de 0,98p.u.

- Se busca el valor de la caída de tensión sobre la reactancia de Potier (E_p):

$$E_p = 1 \angle 0^\circ + ((1 \angle -88,854^\circ) * 0,021) + (j0,16 * (1 \angle -88,854^\circ))$$

$$E_p = 0,9945 \angle 80,721^\circ \text{ p.u}$$

- Se encuentra el valor de la corriente de excitación correspondiente a E_p , evaluando dicho valor tanto en la recta del entrehierro como en la curva de saturación en vacío:

$$I_{FS} = I_{FG} - I_{FSI} = 0,80 - 0,64 = 0,16 \text{ p.u}$$

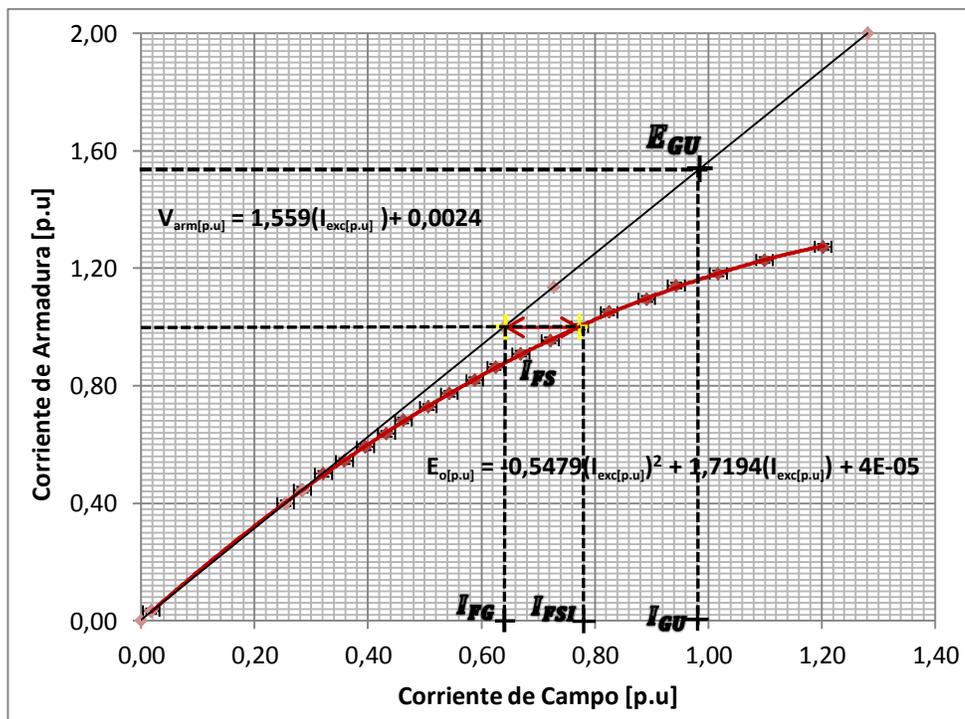


Figura 68. Corriente de excitación obtenido por el método descrito en 2.5.1.6.1

- El valor de la corriente de campo (I_F) para el punto de operación asignado es:

$$I_F = I_{FG} + I_{FS} = 0,98 + 0,16 = 1,14 \text{ p.u}$$

Si se sigue aplicando el método de cálculo para la corriente de excitación sobre los puntos de operación restantes se consiguen los siguientes resultados (Tabla 50):

Tabla 50. Resultados bajo la hipótesis de una máquina polos salientes

I_{Fexp} (p.u)	I_F (p.u)	ΔI_F (%)
1,24	1,14	8,06
1,19	1,12	5,88
1,11	1,02	8,81

Si se compara los resultados conseguidos con los valores de la corriente de excitación (Tabla 50) se puede apreciar que las estimaciones son diferentes, con una incertidumbre que ronda entre el 5% al 9%. Esto se debe a la apreciación de la escala de los valores de las corrientes de excitación involucrada en los cálculos sobre la gráfica de la curva de vacío y la recta del entrehierro.

4.3.11.2 Cálculo de la corriente de excitación por medio del diagrama de Potier

En relación al método descrito en 2.5.1.6.2 se obtiene lo siguiente:

El diagrama de conexión usado para obtener los datos de la máquina bajo prueba en régimen sobreexcitado se observa en la figura 56, con la diferencia de que el factor de potencia es distinto de cero. Se pretende a través de este

esquema buscar puntos de operación que permitan hacer la comparación de resultados con el método gráfico para el cálculo de la corriente de excitación. Los valores obtenidos son los siguientes:

Tabla 51. Puntos de operación trabajados con el método descrito en 2.5.1.6.2

Corriente de Campo [p.u]	Tensión de Armadura [p.u]	Corriente de Armadura [p.u]	Factor de potencia
0,926	0,773	1,000	0,92
0,81	0,709	1,000	0,87

El punto de operación a analizar (en por unidad) es el siguiente:

$$E_{a[p.u]} = 0,773 \text{ p.u}; i_{a[p.u]} = 1 \text{ p.u}; i_{f[p.u]} = 0,926 \text{ p.u}; \cos(\varphi) = 0,92$$

- Con la curva de saturación de vacío, la recta del entrehierro y el valor de la reactancia de Potier (X_p) obtenidas anteriormente, se dibuja la magnitud del fasor de la tensión de armadura (E_a) con un ángulo de inclinación por encima del eje de la corriente de excitación (condición de sobreexcitación) (Figura 69).
- Se proyecta la magnitud del fasor E_a al eje de la tensión de armadura. Se interseca dicho valor sobre la recta del entrehierro generada para conseguir la corriente de excitación (I_{FG}), cuyo valor encontrado es de aproximadamente de 0,50 p.u (Figura 69).
- Sobre la figura 69 se dibuja el fasor $I_a X_p$, perpendicular al eje de las abscisa (corriente de excitación) y apuntando hacia arriba, cuya magnitud es de aproximadamente de 0,16 p.u (obtenida bajo el procedimiento según 2.5.1.5).

- Se encuentra el valor de la tensión sobre la reactancia de Potier (E_p), proyectando sobre el eje vertical (eje de voltaje) la suma vectorial entre el fasor de tensión de armadura y el fasor $I_a X_p$, cuyo valor es de aproximadamente de 0,88 p.u.
- Para encontrar la corriente de excitación (I_{FS}) se utilizó el mismo procedimiento planteado en 2.5.1.6.1. El valor resultante de la corriente de excitación (I_{FS}) fue aproximadamente de 0,08 p.u.
- El valor de la corriente de excitación (I_{FSI}) es de 0,56 p.u aproximadamente, y el valor de la corriente de campo bajo carga (I_{FL}) es la siguiente:

$$I_{FL} = I_{FS} + \sqrt{(I_{FG} + I_{FSI} \text{sen}(\varphi))^2 + (I_{FSI} \text{cos}(\varphi))^2}$$

$$I_{FL} = 0,08 + \sqrt{(0,50 + 0,56 \text{sen}(23,073^\circ))^2 + (0,56 \text{cos}(23,073^\circ))^2}$$

$$I_{FL} = 0,965 \text{ p.u}$$

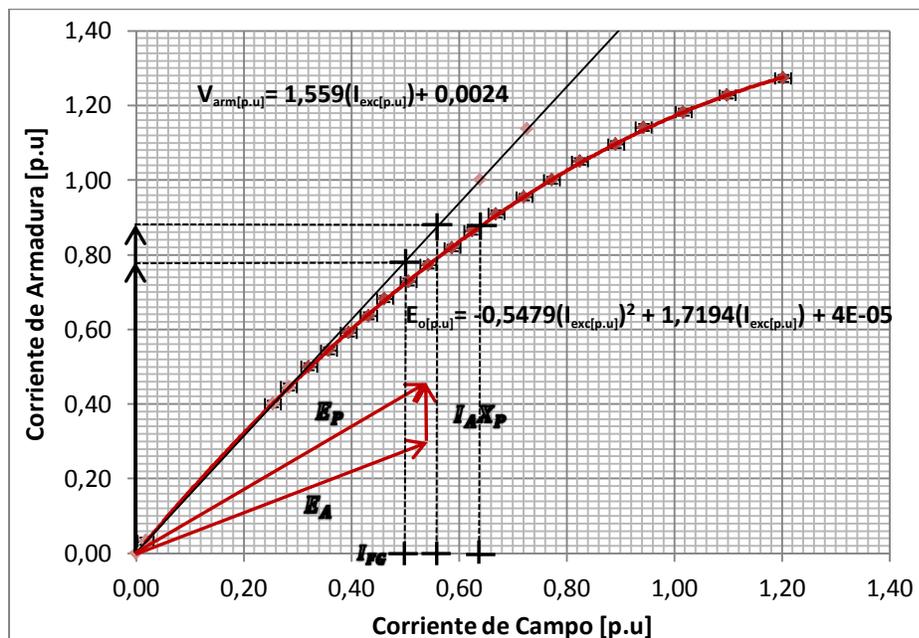


Figura 69. Corriente de excitación obtenido por el método descrito en 2.5.1.6.2

Si se compara el valor de la corriente de excitación obtenida por medio de este método y la corriente conseguida en el ensayo bajo carga, se puede apreciar que los valores son cercanos, con una precisión que rodea entre el 3% al 7%, lo que indica que este método arroja valores aproximados de la corriente de excitación bajo condiciones de carga precisas. En resumen (Tabla 52):

Tabla 52. Resultados de la corriente de excitación aplicando 2.5.1.6.2

Tensión de Armadura [p.u]	Corriente de Armadura [p.u]	Factor de potencia	Corriente de excitación [p.u]	Corriente de excitación dado por 2.6.1.5.2 [p.u]	$\Delta i_{exc}(\%)$
0,773	1,00	0,92	0,93	0,96	3,13
0,709	1,00	0,87	0,81	0,87	6,89

4.4 Metodología para la medición del ángulo de carga (δ)

En base a los procedimientos descritos en 4.2 se tiene lo siguiente:

- Se le agregó la carga a la máquina sincrónica 1 (MQ1) dejando en vacío a la máquina sincrónica 2 (MQ2). Para este caso se usó una carga resistiva con diferentes niveles de potencia. Midiendo la caída de tensión entre fases generado por ambas máquinas, la corriente suministrada hacia la carga, conservando en todo momento la velocidad nominal se tiene lo siguiente:

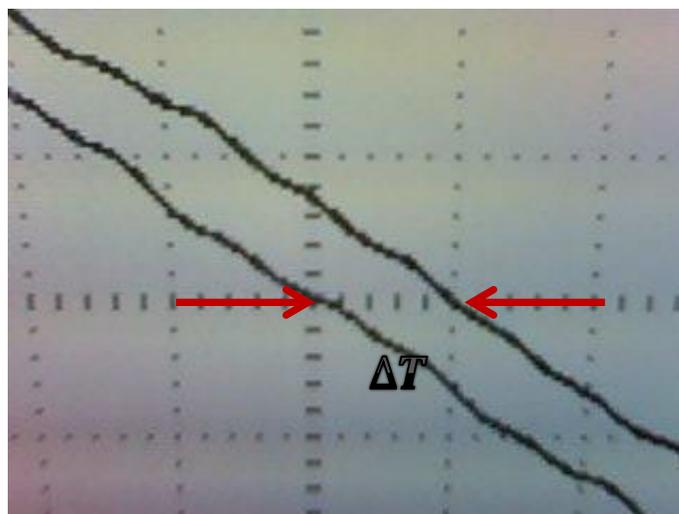


Figura 70. Registro de las tensiones de armadura generadas por ambas máquinas con una carga resistiva a P=2200W ampliada (Time/Div=500μseg)

- Se midió la caída de tensión entre las fases de la armadura de ambas máquinas y la corriente de suministro hacia la carga, teniendo que:

$$I_{carga} = 4,08 \pm 0,08 \text{ (A)}$$

Tabla 53. Tensiones de armadura generadas por ambos generadores a P=2200W

	$V_{1-2} \text{ (V)}$	$V_{2-3} \text{ (V)}$	$V_{3-1} \text{ (V)}$
Tensión de la armadura sobre la máquina en vacío	187,8±0,1	188,1±0,1	188,3±0,1
Tensión de la armadura sobre la máquina con carga	176,7±0,1	177,3±0,1	177,1±0,1

- Se calcula el valor aproximado del ángulo de carga (δ):

La escala con respecto al tiempo de las señales obtenidas se modificó para apreciar mejor el desplazamiento en el tiempo entre ambas señales, llevando a una escala time/div de 500 μ seg, obteniendo un $\Delta t = 500 \pm 100$ μ seg:

$$\alpha = 2\pi * 60 * (500 \pm 100\mu\text{seg}) = 0,189 \pm 0,038 \text{ rad}$$

El ángulo α representa la diferencia entre el ángulo de carga y el ángulo de desfases entre las señales. Si calculamos la integral de P para $T=1000$, y tomando el promedio de las tensiones, entonces:

$$\cos(\delta - \beta) = \frac{\frac{1}{1000} \int_0^{1000} \frac{177,03 * 188,07}{2} [\cos(0,1885) + \cos(240\pi t - 0,1885)] dt}{\sqrt{\frac{1}{1000} \int_0^{1000} (188,07 \cos(120\pi t))^2 dt} * \sqrt{\frac{1}{1000} \int_0^T (177,03 \cos(240\pi t - 0,1885))^2 dt}}$$

$$\cos(\delta - \beta) = 0,9823 \rightarrow \cos(\delta) \cos(\beta) + \text{sen}(\delta) \text{sen}(\beta) = 0,9823$$

Como el desfase entre la corriente y la tensión sobre la carga es nulo ($\beta=0$), entonces:

$$\cos(\delta) \cos(0) + \text{sen}(\delta) \text{sen}(0) = 0,9823 \rightarrow \cos(\delta) = 0,9823 \rightarrow \delta = 10,796^\circ$$

- Para verificar el resultado se calcula el ángulo de carga utilizando los parámetros hallados anteriormente, lo cual se tiene lo siguiente:

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{|I_a| R_1 \text{sen}(\varphi) + |I_a| X_{qu} \cos(\varphi)}{|E_a| + |I_a| R_1 \cos(\varphi) - |I_a| X_{qu} \text{sen}(\varphi)} \right]$$

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{|0,519| * 0,0214 * \text{sen}(0^\circ) + |0,519| * 0,36 * \cos(0^\circ)}{|0,805| + |0,519| * 0,0214 * \cos(0^\circ) - |0,519| * 0,36 * \text{sen}(0^\circ)} \right]$$

$$\delta = 12,891^\circ$$

$$i_d = i_a * \text{sen}(\delta - \varphi) < \delta - 90^\circ = 0,1158 < -77,109^\circ$$

$$i_q = i_a * \cos(\delta - \varphi) < \delta = 0,5059 < 12,891^\circ$$

$$E_{GU} = V + i_a * R_1 + jX_{qu} * i_q + jX_{du} * i_d$$

$$E_{GU} = 0,805 < 0^\circ + ((0,519 < 0^\circ) * 0,021) + (j0,36 * (0,5059 < 12,891^\circ)) + (j0,564 * (0,1158 < -77,109^\circ))$$

$$E_{GU} = 0,854 < 10,932^\circ \text{ p.u}$$

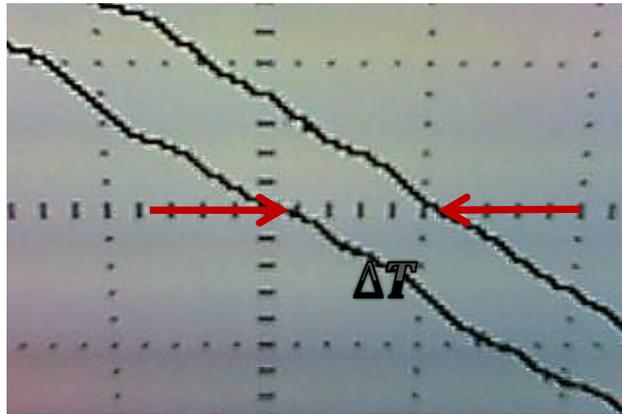


Figura 71. Registro de las tensiones de armadura generadas por ambas máquinas con una carga resistiva a P=2400W ampliada (Time/Div=500μseg)

- Se midió la caída de tensión entre las fases de la armadura de ambas máquinas y la corriente de suministro hacia la carga, teniendo que:

$$I_{carga} = 4,6 \pm 0,08 \text{ (A)}$$

Tabla 54. Tensiones de armadura generadas por ambos generadores a P=2400W

	$V_{1-N} \text{ (V)}$	$V_{2-N} \text{ (V)}$	$V_{3-N} \text{ (V)}$
Tensión de la armadura sobre la máquina en vacío	186,4±0,1	185,6±0,1	185,8±0,1
Tensión de la armadura sobre la máquina con carga	172,4±0,1	172,6±0,1	173,1±0,1

- Se calcula el valor aproximado del ángulo de carga (δ)

La escala con respecto al tiempo de las señales obtenidas con un time/div de 500 μ seg, obteniendo un $\Delta t = 600 \pm 100$ μ seg. Se toma el promedio de las tensiones generadas tanto en la carga como en el generador en vacío. Calculando el valor de α , tenemos que:

$$\alpha = 2\pi * 60 * (600 \pm 100 \mu\text{seg}) = 0,226 \pm 0,038 \text{ rad}$$

El ángulo α representa la diferencia entre el ángulo de carga y el ángulo de fase de la carga. En este caso, por ser una carga resistiva ($\beta = 0$), entonces:

$$\cos(\delta - \beta) = \frac{\frac{1}{1000} \int_0^{1000} \frac{185,933 * 172,7}{2} [\cos(0,2262) + \cos(240\pi t - 0,2262)] dt}{\sqrt{\frac{1}{1000} \int_0^{1000} (185,933 \cos(120\pi t))^2 dt} * \sqrt{\frac{1}{1000} \int_0^T (172,7 \cos(240\pi t - 0,1885))^2 dt}}$$

$$\cos(\delta - \beta) = 0,97452 \rightarrow \cos(\delta) \cos(\beta) + \text{sen}(\delta) \text{sen}(\beta) = 0,97452$$

$$\cos(\delta) \cos(0) + \text{sen}(\delta) \text{sen}(0) = 0,97452 \rightarrow \cos(\delta) = 0,97452 \rightarrow \delta = 12,962^\circ$$

- Para verificar la veracidad del resultado, se compara utilizando la ecuación siguiente:

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{|I_a| R_1 \text{sen}(\varphi) + |I_a| X_{qu} \cos(\varphi)}{|E_a| + |I_a| R_1 \cos(\varphi) - |I_a| X_{qu} \text{sen}(\varphi)} \right]$$

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{|0,5823| * 0,0214 * \text{sen}(0^\circ) + |0,5823| * 0,36 * \cos(0^\circ)}{|0,785| + |0,5823| * 0,0214 * \cos(0^\circ) - |0,5823| * 0,36 * \text{sen}(0^\circ)} \right]$$

$$\delta = 14,725^\circ$$

$$i_d = i_a * \text{sen}(\delta - \varphi) < \delta - 90^\circ = 0,148 < -75,275^\circ$$

$$i_q = i_a * \cos(\delta - \varphi) < \delta = 0,5632 < 14,725^\circ$$

$$E_{GU} = V + i_a * R_1 + jX_{qu} * i_q + jX_{du} * i_d$$

$$E_{GU} = 0,785 \angle 0^\circ + ((0,5823 \angle 0^\circ) * 0,021) + (j0,36 * (0,5632 \angle 14,725^\circ)) \\ + (j0,564 * (0,148 \angle -75,275^\circ))$$

$$E_{GU} = 0.8467 \angle 12,196^\circ \text{ p.u}$$

Se siguió aumentando la carga hasta llegar a 3000W (Valor nominal de funcionamiento de la máquina síncrona bajo carga a $f_p=1$) y se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 55. Resultados de la medición del ángulo de carga con una carga resistiva

	P=2200W	P=2600W	P=3000W
Ángulo de carga aplicando 4.3 (°)	10,796	12,96	15,12
Cálculo analítico (°)	10,932	12,196	14,59

Se puede observar que el resultado de aplicar el método descrito en 4.2 con una carga resistiva produce valores cercanos para algunos niveles de potencia de la carga (Tabla 55). Si se compara con el método analítico se nota un error entre el 1% al 5%, lo que me indica una aproximación bastante conservadora en cuanto a la medición del ángulo de carga, con parámetros en régimen no saturado.

Ahora cambiando la carga resistiva por una carga inductiva, se tiene que (Figura 72):

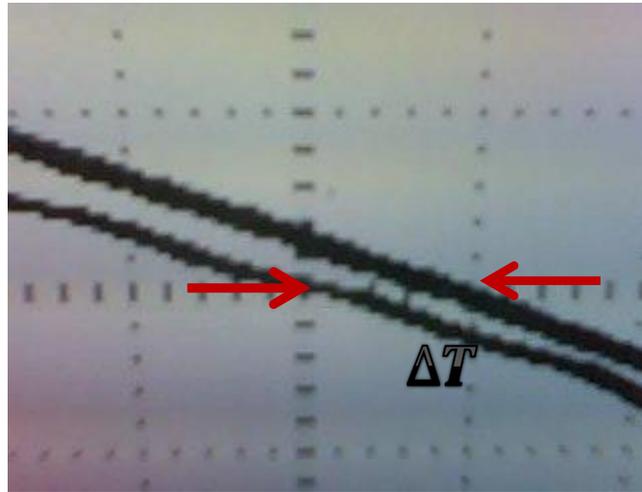


Figura 72. Registro de las tensiones de armadura generadas por ambas máquinas con una carga inductiva (Time/Div=250μseg)

- El desfase con respecto al tiempo de las señales generadas de voltaje entre ambas máquinas es de $\Delta T = 250\mu\text{seg}$. Se tomó mediciones de voltaje en las armaduras (Tabla 55) y de la corriente de la carga:

$$i_{carga} = 2,72 \pm 0,04 \text{ A}$$

Tabla 56. Tensiones de armadura generadas por ambos generadores con la carga inductiva

	$V_{1-2} (V)$	$V_{2-3} (V)$	$V_{3-1} (V)$
Tensión de la armadura sobre la máquina en vacío	$188,9 \pm 0,1$	$189,5 \pm 0,1$	$189,3 \pm 0,1$
Tensión de la armadura sobre la máquina con carga	$149,6 \pm 0,1$	$150,3 \pm 0,1$	$150,1 \pm 0,1$

- Se calcula el valor aproximado del ángulo de carga (δ):

La escala con respecto al tiempo de las señales obtenidas con un time/div de 250 μ seg, obteniendo un $\Delta T=300\pm 50\mu$ seg, entonces:

$$\alpha = 2\pi * 60 * (300 \pm 50\mu\text{seg}) = 0,113 \pm 0,019 \text{ rad}$$

El ángulo α representa la diferencia entre el ángulo de carga y el ángulo de fase de la carga. En este caso, por ser una carga inductiva ($\beta = -90^\circ$), entonces:

$$\cos(\delta - \beta) = \frac{\frac{1}{1000} \int_0^{1000} \frac{189,233 * 150}{2} [\cos(0,1131) + \cos(240\pi t - 0,1131)] dt}{\sqrt{\frac{1}{1000} \int_0^{1000} (189,233 \cos(120\pi t))^2 dt} * \sqrt{\frac{1}{1000} \int_0^T (150 \cos(240\pi t - 0,1131))^2 dt}}$$

$$\cos(\delta - \beta) = 0,99361 \rightarrow \cos(\delta) \cos(\beta) + \text{sen}(\delta) \text{sen}(\beta) = 0,99361$$

$$\cos(\delta) \cos(-90^\circ) + \text{sen}(\delta) \text{sen}(-90^\circ) = 0,99361 \rightarrow \delta = -90^\circ + \text{sen}^{-1}(0,99361) \rightarrow \delta = -6,48^\circ$$

- Para verificar el resultado, se utilizan las ecuaciones siguientes:

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{|I_a| R_1 \text{sen}(\varphi) + |I_a| X_{qu} \cos(\varphi)}{|E_a| + |I_a| R_1 \cos(\varphi) - |I_a| X_{qu} \text{sen}(\varphi)} \right]$$

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{|0,3443| * 0,0214 * \text{sen}(-90^\circ) + |0,3443| * 0,36 * \cos(-90^\circ)}{|0,68| + |0,3443| * 0,0214 * \cos(-90^\circ) - |0,3443| * 0,36 * \text{sen}(-90^\circ)} \right]$$

$$\delta = -0,525^\circ$$

$$i_d = i_a * \text{sen}(\delta - \varphi) < \delta - 90^\circ = 0,3443 < -90,525^\circ$$

$$i_q = i_a * \cos(\delta - \varphi) < \delta = 0,0315 < -0,525^\circ$$

$$E_{GU} = V + i_a * R_1 + jX_{qu} * i_q + jX_{du} * i_d$$

$$E_{GU} = 0,68 \angle 0^\circ + ((0,3443 \angle 0^\circ) * 0,021) + (j0,36 * (0,0315 \angle -0,525^\circ)) + (j0,564 * (0,3443 \angle -90,525^\circ))$$

$$E_{GU} = 0.8598 \angle -6,302^\circ \text{ p.u}$$

- Si seguimos aumentando el valor de la carga tenemos lo siguiente (Tabla 57):

Tabla 57. Resultados de la medición del ángulo de carga (δ) con una carga inductiva

	Primer paso de carga	Segundo paso de carga
Ángulo de carga (δ) aplicando 4.3 ($^\circ$)	-6,48	-8,64
Cálculo analítico (δ) ($^\circ$)	-6,302	-8,726

De acuerdo a los resultados obtenidos trabajando con una carga inductiva, se puede observar que los valores del ángulo de carga aplicando el procedimiento según 4.2 son cercanos en comparación con los cálculos analítico, produciendo un error entre 1% al 3%.

Por último, se colocó una carga capacitiva y se obtiene lo siguiente (Figura 73):

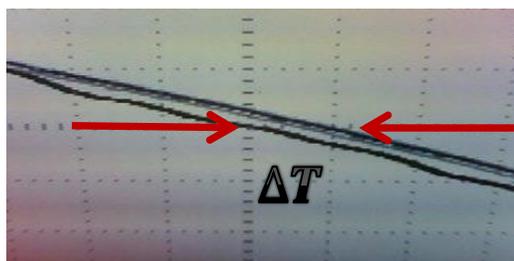


Figura 73. Registro de las tensiones de armadura generadas por ambas máquinas con una carga capacitiva (Time/Div=500 μ seg)

Se obtienen las mediciones de tensión de armadura de ambas máquinas y la corriente que consume la carga en ese instante:

Tabla 58. Tensiones de armadura generadas por ambos generadores con la carga capacitiva

	$V_{1-N} (V)$	$V_{2-N} (V)$	$V_{3-N} (V)$
Tensión de la armadura sobre la máquina en vacío	168,1±0,1	167,8±0,1	168,2±0,1
Tensión de la armadura sobre la máquina con carga	229,6±0,1	230,3±0,1	230,4±0,1

$$i_{carga} = 3,84 \pm 0,04 A$$

- Se calcula el valor aproximado del ángulo de carga (δ)

La escala con respecto al tiempo de las señales obtenidas con un time/div de 500µseg, obteniendo un $\Delta T=500\pm 100 \mu\text{seg}$

$$\alpha = 2\pi * 60 * (500\mu\text{seg}) = 0,1885$$

El ángulo α representa la diferencia entre el ángulo de carga y el ángulo de desfases entre las señales. En este caso, $\beta = 90^\circ$ por ser una carga capacitiva, entonces:

$$\cos(\delta - \beta) = \frac{\frac{1}{1000} \int_0^{1000} \frac{168,03 * 230,1}{2} [\cos(0,1885) + \cos(240\pi t - 0,1885)] dt}{\sqrt{\frac{1}{1000} \int_0^{1000} (168,03 \cos(120\pi t))^2 dt} * \sqrt{\frac{1}{1000} \int_0^T (230,1 \cos(240\pi t - 0,1885))^2 dt}}$$

$$\cos(\delta - \beta) = 0,982286 \rightarrow \cos(\delta) \cos(\beta) + \text{sen}(\delta) \text{sen}(\beta) = 0,982286$$

$$\cos(\delta) \cos(90^\circ) + \text{sen}(\delta) \text{sen}(90^\circ) = 0,982286 \rightarrow \delta = 90^\circ - \text{sen}^{-1}(0,982286) \rightarrow \delta = 10,80^\circ$$

- Para verificar el resultado, se procede con lo siguiente:

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{|I_a| R_1 \sin(\varphi) + |I_a| X_{qu} \cos(\varphi)}{|E_a| + |I_a| R_1 \cos(\varphi) - |I_a| X_{qu} \sin(\varphi)} \right]$$

$$\delta = \tan^{-1} \left[\frac{|1| * 0,0214 * \sin(90^\circ) + |0,48734| * 0,36 * \cos(90^\circ)}{|1| + |0,48734| * 0,0214 * \cos(90^\circ) - |0,48734| * 0,36 * \sin(90^\circ)} \right]$$

$$\delta = 0.7246^\circ$$

$$i_d = i_a * \sin(\delta - \varphi) < \delta - 90^\circ = -0,4873 < -89,2754^\circ$$

$$i_q = i_a * \cos(\delta - \varphi) < \delta = 0,0061 < 0,7246^\circ$$

$$E_{GU} = V + i_a * R_1 + jX_{qu} * i_q + jX_{du} * i_d$$

$$E_{GU} = 1 < 0^\circ + ((0,48734 < 0^\circ) * 0,021) + (j0,36 * (0,006 < 0,7246^\circ)) + (j0,564 * (-0,4873 < -89,285^\circ))$$

$$E_{GU} = 0,7643 < 9,97^\circ \text{ p.u}$$

Se sigue aumentando el valor de la carga para verificar el valor del ángulo de carga, lo cual tenemos lo siguiente (Tabla 59):

Tabla 59. Resultados de la medición del ángulo de carga (δ) con una carga capacitiva

	primer paso de carga	Segundo paso de carga
Ángulo de carga (δ) aplicando 4.2 (°)	8,64	10,80
Cálculo analítico (δ) (°)	7,56	9,97

De acuerdo a los resultados obtenidos trabajando con una carga capacitiva, se puede observar que los valores del ángulo de carga aplicando el procedimiento según 4.2 son diferentes en relación al cálculo analítico

realizado, que producen un margen de error que va desde el 7% al 13%. Esto es debido a que la apreciación del desfasaje con respecto al tiempo entre las señales de tensión y el ruido existente en las señales al momento de verificar este valor.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

- A pesar de las diferencias que existen en cuanto al procedimiento y la toma de muestras en la toma de las mediciones de resistencia de armadura y campo, curvas de saturación, parámetros X_d y X_d' , reactancia de Potier, estimación de la corriente de excitación bajo consideraciones de carga, los resultados fueron cercanos, tanto en la utilización de los instrumentos de medición electrodinámicos clase 0,2 y en algunos caso con instrumentos de clase 0,5 bobina móvil.
- La metodología planteada en este proyecto para obtener el ángulo de carga (δ) bajo condiciones específicas de carga arroja resultados con una incertidumbre de hasta un 12%. Comparándolo con el modelo matemático de la teoría de las dos reacciones de Blondel se verifica que dicho resultado se aproxima al valor esperado, siempre y cuando se considere los parámetros que se utilizan como lo establece IEEE Std.115-2009 y para cargas específicas utilizadas en el ensayo.
- Se comprobó que con los métodos gráficos para el cálculo de la corriente de excitación para una condición específica de carga se obtiene valores aproximados acorde con la medición directa.

- Con el metodología de la medición del ángulo de carga planteado en este proyecto se puede calcular otros parámetros necesarios para completar la caracterización de la máquinas sincrónica, como lo es el valor de la reactancia de saturación en el eje de cuadratura (X_{qs}), ya que en la normas consultadas indican que se debe referir los parámetros que caracterizar a la máquina sincrónica en régimen no saturado y en régimen saturado y bajo las condiciones de carga específicas.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar los ensayos sobre la Máquina Sincrónica 2 (MQ2), con la única diferencia solo en la prueba para determinar la curva de carga a factor de potencia cero que se utilizaría como carga una caja de inductores. En el caso de realizar los métodos gráficos de verificación de la corriente de excitación para una carga específica solo se puede trabajar con las cargas de pruebas presentes en el laboratorio de Máquinas Rotativas de la escuela de Ingeniería Eléctrica de la U.C.V.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] José Manuel Aller, *Máquinas Eléctricas Rotativas. Introducción a la teoría general*. Caracas, Venezuela: Equinoccio, 2007.
- [2] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, and Stephen Umans, *Máquinas Eléctricas*. McGraw Hill, 2004.
- [3] Manuel Cortes, *Curso Moderno de Máquinas Eléctricas rotativas, Tomo IV. Máquinas sincrónicas y motores C.a de colector*. Barcelona, España: Técnicos Asociados c.a, 1977.
- [4] Kostenko M.P and Piotrovski L.M, *Máquinas Eléctricas II*. Moscú. Editorial MIR, 1973.
- [5] Kosow Irwing, *Máquinas Eléctricas y Transformadores*, Pearson Education, 1993.
- [6] Jean Pierre Chassande, Alexander Cepeda, Julio César Molina, Nerio Ojeda, Rigel Rangel, *Guía de laboratorio de Máquinas Eléctricas: Máquinas de Corriente Continua, Máquinas Asincrónicas y Máquinas Sincrónicas*, 2008.
- [7] Institute of Electrical and Electronic Engineers. <www.ieee.org/index.html>.
- [8] International Electrotechnical Commission. < www.iec.ch >.
- [9] IEEE Std.115-2009. *IEEE Guide for test procedures for Synchronous Machines*.
- [10] IEEE Std.118-1978. *IEEE Standard test code for resistance measurement*.
- [11] ANSI/IEEE C57.12.90-1999. *IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating*

Transformers.

- [12] NEMA Standards publication MG1-1998 (Revision 3,2002).
Motors and Generators.
- [13] IEC 60034-4-1985 , *Rotating Electrical Machines.Methods for determining Synchronous Machines quantities from test.*
- [14] NTC 1515-1999 (EQV IEC 34-4). *Máquinas Eléctricas Rotatorias. Métodos para determinar mediante ensayos las magnitudes de Máquinas Sincrónicas.*
- [15] NTC 1545-2010 (EQV IEC 34-8 2007), *Máquinas Eléctricas Rotatorias. Marcado de terminales y sentido de giro.*
- [16] COVENIN 3172-1995. *Transformadores de Potencia. Métodos de Ensayo.*
- [17] FONDONORMA 200:2004 (7ª. Revisión). **CÓDIGO ELÉCTRICO NACIONAL.**

ANEXOS

Resultados de las mediciones

MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DEL DEVANADO DE ARMADURA BAJO LA NORMA IEEE (MÁQUINA 1)

- Por método de medición de puente (Kelvin o Thompson)

$R_{1-4} [\Omega]$
0,175±0,005
0,175±0,005
0,180±0,005
0,175±0,005
0,175±0,005
0,175±0,005
$R_{1-4[prom]} = 0,176±0,005$

$R_{2-5} [\Omega]$
0,175±0,005
0,175±0,005
0,175±0,005
0,180±0,005
0,175±0,005
0,175±0,005
$R_{2-5[prom]} = 0,176±0,005$

$R_{3-6} [\Omega]$
0,175±0,005
0,175±0,005
0,175±0,005
0,175±0,005
0,170±0,005
0,175±0,005
$R_{3-6[prom]} = 0,174±0,005$

$R_{7-10} [\Omega]$
0,170±0,005
0,170±0,005
0,175±0,005
0,170±0,005
0,175±0,005
0,175±0,005
$R_{8-11[prom]} = 0,173±0,005$

$R_{8-11} [\Omega]$
0,175±0,005
0,170±0,005
0,175±0,005
0,175±0,005
0,175±0,005
0,175±0,005
$R_{8-11[prom]} = 0,174±0,005$

$R_{9-12} [\Omega]$
0,170±0,005
0,175±0,005
0,170±0,005
0,170±0,005
0,170±0,005
0,170±0,005
$R_{9-12[prom]} = 0,171±0,005$

Como la configuración de los devanados de armadura es en estrella, entonces el valor de la resistencia entre cada borne de conexión es:

$$R_{1-2} (real) = \frac{R_{1-4[prom]} + R_{7-10[prom]} + R_{8-11[prom]} + R_{2-5[prom]}}{2} = 0,3495 \pm 0,0025 [\Omega]$$

$$R_{2-3} (real) = \frac{R_{2-5[prom]} + R_{8-11[prom]} + R_{9-12[prom]} + R_{3-6[prom]}}{2} = 0,3475 \pm 0,0025 [\Omega]$$

$$R_{3-1} (real) = \frac{R_{3-6[prom]} + R_{9-12[prom]} + R_{7-10[prom]} + R_{1-4[prom]}}{2} = 0,3470 \pm 0,0025 [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura por fase es:

$$R_{1} (real)_{25^{\circ}C} = \frac{R_{1-2}(real) + R_{2-3}(real) + R_{3-1}(real)}{3} = 0,3480 \pm 0,0025 [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura final con respecto a su temperatura de referencia (20°C) es:

$$R_{1}(final) = R_{1} (real)_{25^{\circ}C} \left[\frac{234,5^{\circ}C + 20^{\circ}C}{234,5^{\circ}C + 25^{\circ}C} \right] = 0,3413 \pm 0,0025 [\Omega]$$

Haciendo las mediciones con respecto a los bornes de conexión de la armadura:

$R_{1-2}[\Omega]$
0,695±0,005
0,690±0,005
0,705±0,005
0,700±0,005
0,700±0,005
0,700±0,005
0,700±0,005
$R_{1-2[prom]} = 0,698 \pm 0,005$

$R_{2-3}[\Omega]$
0,695±0,005
0,695±0,005
0,695±0,005
0,700±0,005
0,690±0,005
0,695±0,005
$R_{2-3[prom]} = 0,695 \pm 0,005$

$R_{3-1} [\Omega]$
0,690±0,005
0,695±0,005
0,700±0,005
0,690±0,005
0,690±0,005
0,695±0,005
$R_{3-1[prom]} = 0,693 \pm 0,005$

Como la configuración de los devanados de armadura está en estrella, entonces el valor de la resistencia entre cada borne de conexión es:

$$R_{1-2 (real)} = \frac{R_{1-2 [prom]}}{2} = 0,3490 \pm 0,0025 \text{ } [\Omega]$$

$$R_{2-3 (real)} = \frac{R_{2-3 [prom]}}{2} = 0,3475 \pm 0,0025 \text{ } [\Omega]$$

$$R_{3-1 (real)} = \frac{R_{3-1 [prom]}}{2} = 0,3465 \pm 0,0025 \text{ } [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura por fase es:

$$R_{1(real)@25^{\circ}C} = \frac{R_{1-2(real)} + R_{2-3(real)} + R_{3-1(real)}}{3} = 0,3477 \pm 0,0025 \text{ } [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura final con respecto a su temperatura nominal (75°C) es:

$$R_1 = R_{1 (real)@25^{\circ}C} \left[\frac{234,5^{\circ}C + 75^{\circ}C}{234,5^{\circ}C + 25^{\circ}C} \right] = 0,4147 \pm 0,0030 \text{ } [\Omega]$$

- Por método de medición de puente (Wheatstone)

$R_{1-4} [\Omega]$
0,175±0,005
0,175±0,005
0,175±0,005
0,170±0,005
0,175±0,005
0,175±0,005
$R_{1-4[prom]} = \mathbf{0,174\pm0,005}$

$R_{2-5} [\Omega]$
0,175±0,005
0,175±0,005
0,180±0,005
0,175±0,005
0,180±0,005
0,175±0,005
$R_{2-5[prom]} = \mathbf{0,177\pm0,005}$

$R_{3-6} [\Omega]$
0,170±0,005
0,170±0,005
0,170±0,005
0,175±0,005
0,175±0,005
0,175±0,005
$R_{3-6[prom]} = \mathbf{0,173\pm0,005}$

$R_{7-10} [\Omega]$
0,170±0,005
0,170±0,005
0,170±0,005
0,170±0,005
0,175±0,005
0,170±0,005
$R_{7-10[prom]} = \mathbf{0,171\pm0,005}$

$R_{8-11} [\Omega]$
0,170±0,005
0,170±0,005
0,175±0,005
0,170±0,005
0,170±0,005
0,170±0,005
$R_{8-11[prom]} = \mathbf{0,171\pm0,005}$

$R_{9-12} [\Omega]$
0,170±0,005
0,175±0,005
0,170±0,005
0,170±0,005
0,170±0,005
0,175±0,005
$R_{9-12[prom]} = \mathbf{0,172\pm0,005}$

Como la configuración de los devanados de armadura es en estrella, entonces el valor de la resistencia entre cada borne de conexión es:

$$R_{1-2} (real) = \frac{R_{1-4[prom]} + R_{7-10[prom]} + R_{8-11[prom]} + R_{2-5[prom]}}{2} = 0,3465 \pm 0,0025 \quad [\Omega]$$

$$R_{2-3} (real) = \frac{R_{2-5[prom]} + R_{8-11[prom]} + R_{9-12[prom]} + R_{3-6[prom]}}{2} = 0,3465 \pm 0,0025 \quad [\Omega]$$

$$R_{3-1} (real) = \frac{R_{3-6}[prom] + R_{9-12}[prom] + R_{7-10}[prom] + R_{1-4}[prom]}{2} = 0,3450 \pm 0,0025 \quad [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura por fase es:

$$R_{1} (real)@25^{\circ}C = \frac{R_{1-2}(real) + R_{2-3}(real) + R_{3-1}(real)}{3} = 0,3460 \pm 0,0025 \quad [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura final con respecto a su temperatura de referencia (75°C) es:

$$R_1 = R_{1} (real)@25^{\circ}C \left[\frac{234,5^{\circ}C + 75^{\circ}C}{234,5^{\circ}C + 25^{\circ}C} \right] = 0,4127 \pm 0,0030 \quad [\Omega]$$

Midiendo con respecto a las conexiones de los bornes de armadura tenemos que:

$R_{1-2} [\Omega]$	$R_{2-3} [\Omega]$	$R_{3-1} [\Omega]$
0,690±0,005	0,685±0,005	0,685±0,005
0,690±0,005	0,690±0,005	0,690±0,005
0,700±0,005	0,695±0,005	0,690±0,005
0,685±0,005	0,700±0,005	0,685±0,005
0,700±0,005	0,695±0,005	0,690±0,005
0,690±0,005	0,695±0,005	0,695±0,005
$R_{1-2}[prom] = 0,693 \pm 0,005$	$R_{2-3}[prom] = 0,693 \pm 0,005$	$R_{3-1}[prom] = 0,689 \pm 0,005$

Como la configuración de los devanados de armadura está en estrella, entonces el valor de la resistencia entre cada borne de conexión es:

$$R_{1-2} (real) = \frac{R_{1-2} [prom]}{2} = 0,3465 \pm 0,0025 \quad [\Omega]$$

$$R_{2-3} (real) = \frac{R_{2-3} [prom]}{2} = 0,3465 \pm 0,0025 \quad [\Omega]$$

$$R_{3-1(real)} = \frac{R_{3-1[prom]}}{2} = 0,3445 \pm 0,0025 \text{ } [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura por fase es:

$$R_{1(real)@25^{\circ}C} = \frac{R_{1-2(real)} + R_{2-3(real)} + R_{3-1(real)}}{3} = 0,3458 \pm 0,0025 \text{ } [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura final con respecto a su temperatura de referencia (75°C) es:

$$R_1 = R_{1(real)@25^{\circ}C} \left[\frac{234,5^{\circ}C + 75^{\circ}C}{234,5^{\circ}C + 25^{\circ}C} \right] = 0,4124 \pm 0,0030 \text{ } [\Omega]$$

- **Por método de medición de puente (Wheastone II)**

$R_{1-4} [\Omega]$
0,18±0,01
0,19±0,01
0,19±0,01
0,18±0,01
0,19±0,01
0,18±0,01
$R_{1-4[prom]} = \mathbf{0,19\pm0,01}$

$R_{2-5} [\Omega]$
0,19±0,01
0,18±0,01
0,18±0,01
0,18±0,01
0,18±0,01
0,18±0,01
$R_{2-5[prom]} = \mathbf{0,18\pm0,01}$

$R_{3-6} [\Omega]$
0,18±0,01
0,18±0,01
0,19±0,01
0,18±0,01
0,18±0,01
0,18±0,01
$R_{3-6[prom]} = \mathbf{0,18\pm0,01}$

$R_{7-10} [\Omega]$
0,18±0,01
0,18±0,01
0,19±0,01
0,18±0,01
0,18±0,01
0,18±0,01
$R_{7-10[prom]} = \mathbf{0,18\pm0,01}$

$R_{8-11} [\Omega]$
0,18±0,01
0,18±0,01
0,18±0,01
0,18±0,01
0,19±0,01
0,18±0,01
$R_{8-11[prom]} = \mathbf{0,18\pm0,01}$

$R_{9-12} [\Omega]$
0,18±0,01
0,19±0,01
0,18±0,01
0,18±0,01
0,18±0,01
0,19±0,01
$R_{9-12[prom]} = \mathbf{0,18\pm0,01}$

Como la configuración de los devanados de armadura está en estrella, entonces el valor de la resistencia entre cada borne de conexión es:

$$R_{1-2} (real) = \frac{R_{1-4[prom]} + R_{7-10[prom]} + R_{8-11[prom]} + R_{2-5[prom]}}{2} = 0,365 \pm 0,005 \quad [\Omega]$$

$$R_{2-3} (real) = \frac{R_{2-5[prom]} + R_{8-11[prom]} + R_{9-12[prom]} + R_{3-6[prom]}}{2} = 0,360 \pm 0,005 \quad [\Omega]$$

$$R_{3-1} (real) = \frac{R_{3-6[prom]} + R_{9-12[prom]} + R_{7-10[prom]} + R_{1-4[prom]}}{2} = 0,365 \pm 0,005 \quad [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura por fase es:

$$R_{1 (real)25^{\circ}C} = \frac{R_{1-2(real)} + R_{2-3(real)} + R_{3-1(real)}}{3} = 0,363 \pm 0,005 \quad [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura final con respecto a su temperatura de referencia (75°C) es:

$$R_1 = R_{1 (real)25^{\circ}C} \left[\frac{234,5^{\circ}C + 75^{\circ}C}{234,5^{\circ}C + 25^{\circ}C} \right] = 0,4329 \pm 0,0060 \quad [\Omega]$$

Midiendo con respecto a las conexiones de los bornes de armadura tenemos que:

$R_{1-2} [\Omega]$
0,73±0,01
0,73±0,01
0,74±0,01
0,72±0,01
0,74±0,01
0,72±0,01
$R_{1-2[prom]} = 0,73 \pm 0,01$

$R_{2-3} [\Omega]$
0,73±0,01
0,73±0,01
0,73±0,01
0,72±0,01
0,73±0,01
0,73±0,01
$R_{2-3[prom]} = 0,73 \pm 0,01$

$R_{3-1} [\Omega]$
0,72±0,01
0,74±0,01
0,75±0,01
0,72±0,01
0,73±0,01
0,73±0,01
$R_{3-1[prom]} = 0,73 \pm 0,01$

Como la configuración de los devanados de armadura es en estrella, entonces el valor de la resistencia entre cada borne de conexión es:

$$R_{1-2 (real)} = \frac{R_{1-2 [prom]}}{2} = 0,365 \pm 0,005 \quad [\Omega]$$

$$R_{2-3 (real)} = \frac{R_{2-3 [prom]}}{2} = 0,365 \pm 0,005 \quad [\Omega]$$

$$R_{3-1 (real)} = \frac{R_{3-1 [prom]}}{2} = 0,365 \pm 0,005 \quad [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura por fase es:

$$R_{1(real)@25^{\circ}C} = \frac{R_{1-2(real)} + R_{2-3(real)} + R_{3-1(real)}}{3} = 0,365 \pm 0,005 \text{ } [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura final con respecto a su temperatura de referencia (75°C) es:

$$R_1 = R_{1(real)25^{\circ}C} \left[\frac{234,5^{\circ}C + 75^{\circ}C}{234,5^{\circ}C + 25^{\circ}C} \right] = 0,4353 \pm 0,0060 \text{ } [\Omega]$$

- **Por método de medición Voltímetro-Amperímetro**

El cálculo de la resistencia se realizó bajo las condiciones del numeral 2.5.2.1 y 2.5.3. La resistencia interna del milivoltímetro (R_V) usado par las mediciones es de $1\Omega/mV$.

El cálculo de los errores de medición se realizó con la expansión de la serie de Taylor y cuyo error máximo de exactitud absoluto es:

$$\Delta R = \left| \frac{\partial R}{\partial V} \right| \Delta V + \left| \frac{\partial R}{\partial I} \right| \Delta I = \left| \frac{I}{\left(I - \frac{V}{R_V}\right)^2} \right| \Delta V + \left| -\frac{V}{\left(I - \frac{V}{R_V}\right)^2} \right| \Delta I$$

Voltaje (mV)	Corriente (A)	Resistencia de Armadura $R_{1-4}(\Omega)$
25,6±0,4	0,1500±0,0025	0,1707±0,0055
27,6±0,4	0,1625±0,0025	0,1699±0,0051
30,0±0,4	0,1750±0,0025	0,1715±0,0047
32,4±0,4	0,1875±0,0025	0,1728±0,0044
34,4±0,4	0,2000±0,0025	0,1720±0,0042
36,4±0,4	0,2125±0,0025	0,1713±0,0039
38,8±0,4	0,2250±0,0025	0,1725±0,0037
40,8±0,4	0,2375±0,0025	0,1725±0,0035
	PROMEDIO (Ω)	0,1715±0,0045

Voltaje (mV)	Corriente (A)	Resistencia de Armadura $R_{2-5}(\Omega)$
26,0±0,4	0,1500±0,0025	0,1734±0,0056
28,0±0,4	0,1625±0,0025	0,1723±0,0051
30,4±0,4	0,1750±0,0025	0,1737±0,0048
32,8±0,4	0,1875±0,0025	0,1750±0,0045
34,8±0,4	0,2000±0,0025	0,1740±0,0042
37,2±0,4	0,2125±0,0025	0,1751±0,0039
39,2±0,4	0,2250±0,0025	0,1743±0,0037
41,6±0,4	0,2375±0,0025	0,1752±0,0035
PROMEDIO (Ω)		0,1741±0,0044

Voltaje (mV)	Corriente (A)	Resistencia de Armadura $R_{3-6}(\Omega)$
25,6±0,4	0,1500±0,0025	0,1707±0,0055
28,0±0,4	0,1625±0,0025	0,1723±0,0051
30,4±0,4	0,1750±0,0025	0,1737±0,0048
32,4±0,4	0,1875±0,0025	0,1729±0,0044
34,4±0,4	0,2000±0,0025	0,1720±0,0042
36,8±0,4	0,2125±0,0025	0,1732±0,0039
38,8±0,4	0,2250±0,0025	0,1725±0,0037
41,2±0,4	0,2375±0,0025	0,1735±0,0035
PROMEDIO (Ω)		0,1726±0,0043

Voltaje (mV)	Corriente (A)	Resistencia de Armadura $R_{7-10}(\Omega)$
26,0±0,4	0,1500±0,0025	0,1734±0,0056
28,0±0,4	0,1625±0,0025	0,1723±0,0051
30,0±0,4	0,1750±0,0025	0,1715±0,0047
32,4±0,4	0,1875±0,0025	0,1728±0,0044
34,4±0,4	0,2000±0,0025	0,1720±0,0042
36,8±0,4	0,2125±0,0025	0,1732±0,0039
38,8±0,4	0,2250±0,0025	0,1725±0,0037
40,8±0,4	0,2375±0,0025	0,1718±0,0035
PROMEDIO (Ω)		0,1724±0,0044

Voltaje (mV)	Corriente (A)	Resistencia de Armadura $R_{8-11}(\Omega)$
26,0±0,4	0,1500±0,0025	0,1734±0,0056
28,0±0,4	0,1625±0,0025	0,1723±0,0051
30,0±0,4	0,1750±0,0025	0,1715±0,0047
32,4±0,4	0,1875±0,0025	0,1728±0,0044
34,4±0,4	0,2000±0,0025	0,1720±0,0042
36,8±0,4	0,2125±0,0025	0,1732±0,0039
38,8±0,4	0,2250±0,0025	0,1725±0,0037
41,2±0,4	0,2375±0,0025	0,1736±0,0035
PROMEDIO (Ω)		0,1727±0,0043

Voltaje (mV)	Corriente (A)	Resistencia de Armadura $R_{9-12}(\Omega)$
25,6±0,4	0,1500±0,0025	0,1707±0,0055
27,6±0,4	0,1625±0,0025	0,1699±0,0051
30,0±0,4	0,1750±0,0025	0,1715±0,0047
32,0±0,4	0,1875±0,0025	0,1707±0,0044
34,0±0,4	0,2000±0,0025	0,1700±0,0041
36,4±0,4	0,2125±0,0025	0,1713±0,0039
38,4±0,4	0,2250±0,0025	0,1707±0,0037
40,8±0,4	0,2375±0,0025	0,1718±0,0035
PROMEDIO(Ω)		0,1708±0,0044

Como la configuración de los devanados de armadura está en estrella, entonces el valor de la resistencia entre cada borne de conexión es:

$$R_{1-2} (real) = \frac{R_{1-4}[prom] + R_{7-10}[prom] + R_{8-11}[prom] + R_{2-5}[prom]}{2} = 0,3454 \pm 0,0088 [\Omega]$$

$$R_{2-3} (real) = \frac{R_{2-5}[prom] + R_{8-11}[prom] + R_{9-12}[prom] + R_{3-6}[prom]}{2} = 0,3451 \pm 0,0087 [\Omega]$$

$$R_{3-1 (real)} = \frac{R_{3-6[prom]} + R_{9-12[prom]} + R_{7-10[prom]} + R_{1-4[prom]}}{2} = 0,3437 \pm 0,0088 [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura por fase es:

$$R_{1 (real)25^{\circ}C} = \frac{R_{1-2(real)} + R_{2-3(real)} + R_{3-1(real)}}{3} = 0,3447 \pm 0,0088 [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura final con respecto a su temperatura de referencia (75°C) es:

$$R_1 = R_{1 (real)25^{\circ}C} \left[\frac{234,5^{\circ}C + 75^{\circ}C}{234,5^{\circ}C + 25^{\circ}C} \right] = 0,4111 \pm 0,0105 [\Omega]$$

MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DEL DEVANADO DE ARMADURA EN BASE A LOS PRODECIEMIENTOS DESCRITOS POR IEEE (MÁQUINA 2)

- Por método de medición de puente (Kelvin o Thompson)

$R_{1-4} [\Omega]$
0,180±0,005
0,185±0,005
0,180±0,005
0,180±0,005
0,185±0,005
0,180±0,005
$R_{1-4[prom]} = 0,182 \pm 0,005$

$R_{2-5} [\Omega]$
0,175±0,005
0,180±0,005
0,180±0,005
0,185±0,005
0,180±0,005
0,175±0,005
$R_{2-5[prom]} = 0,179 \pm 0,005$

$R_{3-6} [\Omega]$
0,180±0,005
0,185±0,005
0,180±0,005
0,180±0,005
0,175±0,005
0,185±0,005
$R_{3-6[prom]} = 0,181 \pm 0,005$

$R_{7-10} [\Omega]$
0,180±0,005
0,185±0,005
0,180±0,005
0,180±0,005
0,180±0,005
0,180±0,005
$R_{7-10[prom]} = 0,181±0,005$

$R_{8-11} [\Omega]$
0,185±0,005
0,180±0,005
0,185±0,005
0,185±0,005
0,190±0,005
0,185±0,005
$R_{8-11[prom]} = 0,185±0,005$

$R_{9-12} [\Omega]$
0,180±0,005
0,185±0,005
0,180±0,005
0,185±0,005
0,180±0,005
0,180±0,005
$R_{9-12[prom]} = 0,182±0,005$

Como la configuración de los devanados de armadura está en estrella, entonces el valor de la resistencia entre cada borne de conexión de armadura es:

$$R_{1-2} (real) = \frac{R_{1-4[prom]} + R_{7-10[prom]} + R_{8-11[prom]} + R_{2-5[prom]}}{2} = 0,3635 \pm 0,0100 [\Omega]$$

$$R_{2-3} (real) = \frac{R_{2-5[prom]} + R_{8-11[prom]} + R_{9-12[prom]} + R_{3-6[prom]}}{2} = 0,3635 \pm 0,0100 [\Omega]$$

$$R_{3-1} (real) = \frac{R_{3-6[prom]} + R_{9-12[prom]} + R_{7-10[prom]} + R_{1-4[prom]}}{2} = 0,3630 \pm 0,0100 [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura por fase es:

$$R_{1 (real)25^{\circ}C} = \frac{R_{1-2(real)} + R_{2-3(real)} + R_{3-1(real)}}{3} = 0,3633 \pm 0,0100 [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura final con respecto a su temperatura de referencia (75°C) es:

$$R_1 = R_{1 (real)25^{\circ}C} \left[\frac{234,5^{\circ}C + 75^{\circ}C}{234,5^{\circ}C + 25^{\circ}C} \right] = 0,4333 \pm 0,0119 [\Omega]$$

Midiendo la resistencia de la armadura por fase en función del valor de resistencia entre los bornes de conexión de la armadura tenemos que:

$R_{1-2} [\Omega]$
0,730±0,005
0,740±0,005
0,735±0,005
0,740±0,005
0,735±0,005
0,730±0,005
$R_{1-2[prom]} = \mathbf{0,735\pm0,005}$

$R_{2-3} [\Omega]$
0,730±0,005
0,740±0,005
0,735±0,005
0,745±0,005
0,730±0,005
0,735±0,005
$R_{2-3[prom]} = \mathbf{0,736\pm0,005}$

$R_{3-1} [\Omega]$
0,720±0,005
0,740±0,005
0,720±0,005
0,725±0,005
0,720±0,005
0,725±0,005
$R_{3-1[prom]} = \mathbf{0,725\pm0,005}$

Como la configuración de los devanados de armadura está en estrella, entonces el valor de la resistencia entre cada borne de conexión es:

$$R_{1-2 (real)} = \frac{R_{1-2 [prom]}}{2} = 0,3675 \pm 0,0025 [\Omega]$$

$$R_{2-3 (real)} = \frac{R_{2-3 [prom]}}{2} = 0,3680 \pm 0,0025 [\Omega]$$

$$R_{3-1 (real)} = \frac{R_{3-1 [prom]}}{2} = 0,3625 \pm 0,0025 [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura por fase es:

$$R_1 = \frac{R_{1-2} + R_{2-3} + R_{3-1}}{3} = 0,3660 \pm 0,0025 [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura final con respecto a su temperatura de referencia (75°C) es:

$$R_1 = R_{1 (real)25^\circ C} \left[\frac{234,5^\circ C + 75^\circ C}{234,5^\circ C + 25^\circ C} \right] = 0,4365 \pm 0,0030 [\Omega]$$

- Por el método de puente (Wheatstone)

$R_{1-4} [\Omega]$
0,185±0,005
0,180±0,005
0,185±0,005
0,180±0,005
0,185±0,005
0,185±0,005
$R_{1-4[prom]} = \mathbf{0,183\pm0,005}$

$R_{2-5} [\Omega]$
0,185±0,005
0,185±0,005
0,190±0,005
0,185±0,005
0,190±0,005
0,185±0,005
$R_{2-5[prom]} = \mathbf{0,187\pm0,005}$

$R_{3-6} [\Omega]$
0,185±0,005
0,185±0,005
0,190±0,005
0,185±0,005
0,185±0,005
0,190±0,005
$R_{3-6[prom]} = \mathbf{0,187\pm0,005}$

$R_{7-10} [\Omega]$
0,190±0,005
0,185±0,005
0,185±0,005
0,190±0,005
0,190±0,005
0,185±0,005
$R_{7-10[prom]} = \mathbf{0,188\pm0,005}$

$R_{8-11} [\Omega]$
0,190±0,005
0,195±0,005
0,190±0,005
0,195±0,005
0,195±0,005
0,190±0,005
$R_{8-11[prom]} = \mathbf{0,193\pm0,005}$

$R_{9-12} [\Omega]$
0,185±0,005
0,185±0,005
0,185±0,005
0,190±0,005
0,185±0,005
0,185±0,005
$R_{9-12[prom]} = \mathbf{0,186\pm0,005}$

Como la configuración de los devanados de armadura está en estrella, entonces el valor de la resistencia entre cada borne de conexión es:

$$R_{1-2} (real) = \frac{R_{1-4[prom]} + R_{7-10[prom]} + R_{8-11[prom]} + R_{2-5[prom]}}{2} = 0,3755 \pm 0,0100 [\Omega]$$

$$R_{2-3} (real) = \frac{R_{2-5[prom]} + R_{8-11[prom]} + R_{9-12[prom]} + R_{3-6[prom]}}{2} = 0,3765 \pm 0,0100 [\Omega]$$

$$R_{3-1} (real) = \frac{R_{3-6[prom]} + R_{9-12[prom]} + R_{7-10[prom]} + R_{1-4[prom]}}{2} = 0,3720 \pm 0,0100 [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura por fase es:

$$R_{1 (real)25^{\circ}C} = \frac{R_{1-2(real)} + R_{2-3(real)} + R_{3-1(real)}}{3} = 0,3747 \pm 0,0100 \text{ } [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura final con respecto a su temperatura de referencia (75°C) es:

$$R_1 = R_{1 (real)25^{\circ}C} \left[\frac{234,5^{\circ}C + 75^{\circ}C}{234,5^{\circ}C + 25^{\circ}C} \right] = 0,4469 \pm 0,0119 \text{ } [\Omega]$$

Midiendo la resistencia de la armadura por fase en función de la resistencia entre los bornes de conexión de la armadura tenemos que:

$R_{1-2} \text{ } [\Omega]$
0,765±0,005
0,750±0,005
0,760±0,005
0,745±0,005
0,760±0,005
0,755±0,005
$R_{1-2[prom]} = 0,756 \pm 0,005$

$R_{2-3} \text{ } [\Omega]$
0,760±0,005
0,755±0,005
0,765±0,005
0,760±0,005
0,750±0,005
0,760±0,005
$R_{2-3[prom]} = 0,758 \pm 0,005$

$R_{3-1} \text{ } [\Omega]$
0,745±0,005
0,730±0,005
0,745±0,005
0,755±0,005
0,745±0,005
0,750±0,005
$R_{3-1[prom]} = 0,745 \pm 0,005$

Como la configuración de los devanados de armadura es en estrella, entonces el valor de la resistencia entre cada borne de conexión es:

$$R_{1-2 (real)} = \frac{R_{1-2 [prom]}}{2} = 0,3780 \pm 0,0025 \text{ } [\Omega]$$

$$R_{2-3 (real)} = \frac{R_{2-3 [prom]}}{2} = 0,3790 \pm 0,0025 \text{ } [\Omega]$$

$$R_{3-1 (real)} = \frac{R_{3-1 [prom]}}{2} = 0,3725 \pm 0,0025 \text{ } [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura por fase es:

$$R_1 = \frac{R_{1-2} + R_{2-3} + R_{3-1}}{3} = 0,3765 \pm 0,0025 \text{ } [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura final con respecto a su temperatura de referencia (75°C) es:

$$R_1 = R_{1 \text{ (real) } 25^\circ\text{C}} \left[\frac{234,5^\circ\text{C} + 75^\circ\text{C}}{234,5^\circ\text{C} + 25^\circ\text{C}} \right] = 0,4490 \pm 0,0030 \text{ } [\Omega]$$

- **Por el método de puente (Wheatstone II)**

$R_{1-4} \text{ } [\Omega]$
0,19±0,01
0,20±0,01
0,20±0,01
0,19±0,01
0,20±0,01
0,20±0,01
$R_{1-4}[\text{prom}] = 0,20 \pm 0,01$

$R_{2-5} \text{ } [\Omega]$
0,20±0,01
0,19±0,01
0,19±0,01
0,20±0,01
0,19±0,01
0,20±0,01
$R_{2-5}[\text{prom}] = 0,20 \pm 0,01$

$R_{3-6} \text{ } [\Omega]$
0,19±0,01
0,20±0,01
0,19±0,01
0,19±0,01
0,19±0,01
0,19±0,01
$R_{3-6}[\text{prom}] = 0,19 \pm 0,01$

$R_{7-10} \text{ } [\Omega]$
0,20±0,01
0,19±0,01
0,20±0,01
0,20±0,01
0,19±0,01
0,20±0,01
$R_{7-10}[\text{prom}] = 0,20 \pm 0,01$

$R_{8-11} \text{ } [\Omega]$
0,20±0,01
0,21±0,01
0,21±0,01
0,21±0,01
0,20±0,01
0,20±0,01
$R_{8-11}[\text{prom}] = 0,21 \pm 0,01$

$R_{9-12} \text{ } [\Omega]$
0,19±0,01
0,20±0,01
0,19±0,01
0,20±0,01
0,19±0,01
0,20±0,01
$R_{9-12}[\text{prom}] = 0,20 \pm 0,01$

Como la configuración de los devanados de armadura es en estrella, entonces el valor de la resistencia entre cada borne de conexión es:

$$R_{1-2 (real)} = \frac{R_{1-4[prom]} + R_{7-10[prom]} + R_{8-11[prom]} + R_{2-5[prom]}}{2} = 0,405 \pm 0,020 \text{ } [\Omega]$$

$$R_{2-3 (real)} = \frac{R_{2-5[prom]} + R_{8-11[prom]} + R_{9-12[prom]} + R_{3-6[prom]}}{2} = 0,400 \pm 0,020 \text{ } [\Omega]$$

$$R_{3-1 (real)} = \frac{R_{3-6[prom]} + R_{9-12[prom]} + R_{7-10[prom]} + R_{1-4[prom]}}{2} = 0,395 \pm 0,020 \text{ } [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura por fase es:

$$R_{1 (real)25^{\circ}C} = \frac{R_{1-2(real)} + R_{2-3(real)} + R_{3-1(real)}}{3} = 0,400 \pm 0,020 \text{ } [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura final con respecto a su temperatura de referencia (75°C) es:

$$R_1 = R_{1 (real)25^{\circ}C} \left[\frac{234,5^{\circ}C + 75^{\circ}C}{234,5^{\circ}C + 25^{\circ}C} \right] = 0,4771 \pm 0,024 \text{ } [\Omega]$$

Midiendo la resistencia del devanado de armadura por fase en función de la resistencia entre los bornes de conexión de la armadura tenemos que:

$R_{1-2} [\Omega]$
0,78±0,01
0,79±0,01
0,81±0,01
0,80±0,01
0,78±0,01
0,79±0,01
$R_{1-2[prom]} = \mathbf{0,79\pm0,01}$

$R_{2-3} [\Omega]$
0,77±0,01
0,80±0,01
0,78±0,01
0,79±0,01
0,76±0,01
0,79±0,01
$R_{2-3[prom]} = \mathbf{0,78\pm0,01}$

$R_{3-1} [\Omega]$
0,76±0,01
0,78±0,01
0,78±0,01
0,77±0,01
0,78±0,01
0,80±0,01
$R_{3-1[prom]} = \mathbf{0,78\pm0,01}$

Como la conexión de los devanados de armadura es en estrella, entonces el valor de la resistencia entre cada borne de conexión es:

$$R_{1-2 (real)} = \frac{R_{1-2 [prom]}}{2} = 0,395 \pm 0,005 [\Omega]$$

$$R_{2-3 (real)} = \frac{R_{2-3 [prom]}}{2} = 0,390 \pm 0,005 [\Omega]$$

$$R_{3-1 (real)} = \frac{R_{3-1 [prom]}}{2} = 0,395 \pm 0,005 [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura por fase es:

$$R_1 = \frac{R_{1-2} + R_{2-3} + R_{3-1}}{3} = 0,393 \pm 0,005 [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura final con respecto a su temperatura de referencia (75°C) es:

$$R_1 = R_{1 (real)25^\circ C} \left[\frac{234,5^\circ C + 75^\circ C}{234,5^\circ C + 25^\circ C} \right] = 0,4687 \pm 0,006 [\Omega]$$

- **Por método de medición Voltímetro-Amperímetro**

El cálculo de la resistencia se realizó bajo las condiciones del numeral 2.5.2.1 y 2.5.3

La resistencia interna del milivoltímetro (R_V) usado par las mediciones es de $1\Omega/mV$.

El cálculo de los errores de medición se realizó con la expansión de la serie de Taylor y cuyo error máximo de exactitud absoluto es:

$$\Delta R = \left| \frac{\partial R}{\partial V} \right| \Delta V + \left| \frac{\partial R}{\partial I} \right| \Delta I = \left| \frac{1}{\left(I - \frac{V}{R_V}\right)^2} \right| \Delta V + \left| -\frac{V}{\left(I - \frac{V}{R_V}\right)^2} \right| \Delta I$$

Voltaje (mV)	Corriente (A)	Resistencia de Armadura R_{1-4} (Ω)
25,6±0,4	0,1375±0,0025	0,1862±0,0063
28,0±0,4	0,1500±0,0025	0,1867±0,0058
29,6±0,4	0,1625±0,0025	0,1822±0,0053
32,0±0,4	0,1750±0,0025	0,1829±0,0049
34,4±0,4	0,1875±0,0025	0,1835±0,0046
36,4±0,4	0,2000±0,0025	0,1820±0,0043
38,8±0,4	0,2125±0,0025	0,1826±0,0040
45,6±0,4	0,2500±0,0025	0,1824±0,0034
	PROMEDIO (Ω)	0,1836±0,0048

Voltaje (mV)	Corriente (A)	Resistencia de Armadura R_{2-5} (Ω)
25,6±0,4	0,1375±0,0025	0,1862±0,0063
27,6±0,4	0,1500±0,0025	0,1840±0,0057
29,6±0,4	0,1625±0,0025	0,1822±0,0053
32,0±0,4	0,1750±0,0025	0,1829±0,0049
34,4±0,4	0,1875±0,0025	0,1814±0,0046
36,4±0,4	0,2000±0,0025	0,1820±0,0043
38,8±0,4	0,2125±0,0025	0,1826±0,0040
41,2±0,4	0,2250±0,0025	0,1831±0,0038
	PROMEDIO (Ω)	0,1831±0,0049

Voltaje (mV)	Corriente (A)	Resistencia de Armadura R_{3-6} (Ω)
25,2±0,4	0,1375±0,0025	0,1833±0,0062
27,6±0,4	0,1500±0,0025	0,1840±0,0057
29,6±0,4	0,1625±0,0025	0,1822±0,0053
32,0±0,4	0,1750±0,0025	0,1829±0,0049
34,4±0,4	0,1875±0,0025	0,1835±0,0046
36,4±0,4	0,2000±0,0025	0,1820±0,0043
38,8±0,4	0,2125±0,0025	0,1826±0,0040
40,8±0,4	0,2250±0,0025	0,1814±0,0038
	PROMEDIO (Ω)	0,1827±0,0049

Voltaje (mV)	Corriente (A)	Resistencia de Armadura R_{7-10} (Ω)
25,6±0,4	0,1375±0,0025	0,1862±0,0063
27,6±0,4	0,1500±0,0025	0,1840±0,0057
30,0±0,4	0,1625±0,0025	0,1846±0,0053
32,4±0,4	0,1750±0,0025	0,1852±0,0049
34,4±0,4	0,1875±0,0025	0,1835±0,0046
36,8±0,4	0,2000±0,0025	0,1840±0,0043
38,8±0,4	0,2125±0,0025	0,1826±0,0040
41,6±0,4	0,2250±0,0025	0,1849±0,0038
	PROMEDIO (Ω)	0,1844±0,0050

Voltaje (mV)	Corriente (A)	Resistencia de Armadura R_{8-11} (Ω)
26,8±0,4	0,1375±0,0025	0,1949±0,0065
28,8±0,4	0,1500±0,0025	0,1920±0,0059
31,2±0,4	0,1625±0,0025	0,1920±0,0054
34,0±0,4	0,1750±0,0025	0,1943±0,0051
36,0±0,4	0,1875±0,0025	0,1920±0,0047
38,4±0,4	0,2000±0,0025	0,1920±0,0044
40,8±0,4	0,2125±0,0025	0,1920±0,0041
43,2±0,4	0,2250±0,0025	0,1920±0,0039
	PROMEDIO (Ω)	0,1927±0,0050

Voltaje (mV)	Corriente (A)	Resistencia de Armadura R_{9-12} (Ω)
25,2±0,4	0,1375±0,0025	0,1833±0,0062
27,2±0,4	0,1500±0,0025	0,1814±0,0057
29,6±0,4	0,1625±0,0025	0,1822±0,0053
32,0±0,4	0,1750±0,0025	0,1829±0,0049
34,4±0,4	0,1875±0,0025	0,1835±0,0046
36,4±0,4	0,2000±0,0025	0,1820±0,0043
38,4±0,4	0,2125±0,0025	0,1807±0,0040
41,2±0,4	0,2250±0,0025	0,1831±0,0038
	PROMEDIO (Ω)	0,1824±0,0049

Como la conexión de los devanados de armadura está en estrella, entonces el valor de la resistencia entre cada borne de conexión es:

$$R_{1-2} (real) = \frac{R_{1-4[prom]} + R_{7-10[prom]} + R_{8-11[prom]} + R_{2-5[prom]}}{2} = 0,3719 \pm 0,0099 \text{ } [\Omega]$$

$$R_{2-3} (real) = \frac{R_{2-5[prom]} + R_{8-11[prom]} + R_{9-12[prom]} + R_{3-6[prom]}}{2} = 0,3705 \pm 0,0099 \text{ } [\Omega]$$

$$R_{3-1} (real) = \frac{R_{3-6[prom]} + R_{9-12[prom]} + R_{7-10[prom]} + R_{1-4[prom]}}{2} = 0,3665 \pm 0,0098 \text{ } [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura por fase es:

$$R_1 (real)_{25^\circ C} = \frac{R_{1-2} (real) + R_{2-3} (real) + R_{3-1} (real)}{3} = 0,3696 \pm 0,0099 \text{ } [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura final con respecto a su temperatura de referencia (75°C) es:

$$R_1 = R_1 (real)_{25^\circ C} \left[\frac{234,5^\circ C + 75^\circ C}{234,5^\circ C + 25^\circ C} \right] = 0,4408 \pm 0,0118 \text{ } [\Omega]$$

MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DEL DEVANADO DE ARMADURA EN BASE A LA NORMA IEC (MÁQUINA 1)

- **Por método de medición de puente (Kelvin o Thompson)**

$R_{1-4} [\Omega]$
0,175±0,005
0,180±0,005
0,180±0,005
0,175±0,005
0,175±0,005
$R_{1-4[prom]} = 0,177±0,005$

$R_{2-5} [\Omega]$
0,175±0,005
0,175±0,005
0,175±0,005
0,180±0,005
0,175±0,005
$R_{2-5[prom]} = 0,176±0,005$

$R_{3-6} [\Omega]$
0,175±0,005
0,170±0,005
0,175±0,005
0,175±0,005
0,170±0,005
$R_{3-6[prom]} = 0,173±0,005$

$R_{7-10} [\Omega]$
0,170±0,005
0,170±0,005
0,175±0,005
0,170±0,005
0,175±0,005
$R_{7-10[prom]} = 0,172±0,005$

$R_{8-11} [\Omega]$
0,175±0,005
0,170±0,005
0,175±0,005
0,175±0,005
0,175±0,005
$R_{8-11[prom]} = 0,174±0,005$

$R_{9-12} [\Omega]$
0,170±0,005
0,175±0,005
0,170±0,005
0,170±0,005
0,175±0,005
$R_{9-12[prom]} = 0,172±0,005$

Como la conexión de los devanados de armadura está en estrella, entonces el valor de la resistencia entre cada borne de conexión es:

$$R_{1-2} (med) = R_{1-4[prom]} + R_{7-10[prom]} + R_{8-11[prom]} + R_{2-5[prom]} = 0,699 \pm 0,020 [\Omega]$$

$$R_{2-3} (med) = R_{2-5[prom]} + R_{8-11[prom]} + R_{9-12[prom]} + R_{3-6[prom]} = 0,695 \pm 0,020 [\Omega]$$

$$R_{3-1} (med) = R_{3-6[prom]} + R_{9-12[prom]} + R_{7-10[prom]} + R_{1-4[prom]} = 0,694 \pm 0,020 [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura por fase es:

$$R_{1 (real)25^{\circ}C} = \frac{R_{1-2(med)} + R_{3-1(med)} - R_{2-3(med)}}{2} = 0,349 \pm 0,010 [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura final con respecto a su temperatura de referencia (75°C) es:

$$R_1 = R_{1 (real)25^{\circ}C} \left[\frac{234,5^{\circ}C + 75^{\circ}C}{234,5^{\circ}C + 25^{\circ}C} \right] = 0,4162 \pm 0,0119 [\Omega]$$

Midiendo la resistencia de la armadura por fase en función de la resistencia entre los bornes de conexión de la armadura tenemos que:

$R_{1-2} [\Omega]$
0,695±0,005
0,690±0,005
0,685±0,005
0,700±0,005
0,695±0,005
$R_{1-2[prom]} = 0,693 \pm 0,005$

$R_{2-3} [\Omega]$
0,685±0,005
0,690±0,005
0,695±0,005
0,695±0,005
0,685±0,005
$R_{2-3[prom]} = 0,690 \pm 0,005$

$R_{3-1} [\Omega]$
0,690±0,005
0,695±0,005
0,700±0,005
0,700±0,005
0,690±0,005
$R_{3-1[prom]} = 0,695 \pm 0,005$

El valor de la resistencia de armadura por fase es:

$$R_{1 (real)25^{\circ}C} = \frac{R_{1-2(prom)} + R_{3-1(prom)} - R_{2-3(prom)}}{2} = 0,3490 \pm 0,0025 [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura final con respecto a su temperatura de referencia (75°C) es:

$$R_1 = R_{1 (real)25^{\circ}C} \left[\frac{234,5^{\circ}C + 75^{\circ}C}{234,5^{\circ}C + 25^{\circ}C} \right] = 0,4162 \pm 0,0030 [\Omega]$$

- **Por método de medición Voltímetro-Amperímetro**

El cálculo de la resistencia se realizó bajo las condiciones establecidas en el numeral 3.4.1.1.

El cálculo de los errores de medición se realizó con la expansión de la serie de Taylor y cuyo error máximo de exactitud absoluto es:

$$\Delta R = \left| \frac{\partial R}{\partial V} \right| \Delta V + \left| \frac{\partial R}{\partial I} \right| \Delta I = \left| \frac{1}{I} \right| \Delta V + \left| -\frac{V}{(I)^2} \right| \Delta I$$

Voltaje (mV)	Corriente (A)	Resistencia de Armadura R_{1-4} (Ω)
33,5±0,5	0,198±0,002	0,1692±0,0042
37,0±0,5	0,220±0,002	0,1682±0,0038
41,0±0,5	0,240±0,002	0,1708±0,0035
44,5±0,5	0,260±0,002	0,1712±0,0032
47,5±0,5	0,280±0,002	0,1696±0,0030
PROMEDIO(Ω)		0,1698±0,0035

Voltaje (mV)	Corriente (A)	Resistencia de Armadura R_{2-5} (Ω)
34,0±0,5	0,200±0,002	0,1700±0,0042
37,0±0,5	0,220±0,002	0,1682±0,0038
40,5±0,5	0,240±0,002	0,1688±0,0035
44,0±0,5	0,260±0,002	0,1692±0,0032
47,0±0,5	0,280±0,002	0,1679±0,0030
PROMEDIO(Ω)		0,1688±0,0035

Voltaje (mV)	Corriente (A)	Resistencia de Armadura R_{3-6} (Ω)
33,5±0,5	0,200±0,002	0,1675±0,0042
37,0±0,5	0,220±0,002	0,1682±0,0038
40,5±0,5	0,240±0,002	0,1688±0,0035
43,5±0,5	0,260±0,002	0,1673±0,0032
47,0±0,5	0,280±0,002	0,1679±0,0030
PROMEDIO (Ω)		0,1679±0,0035

Voltaje (mV)	Corriente (A)	Resistencia de Armadura R_{7-10} (Ω)
34,0±0,5	0,200±0,002	0,1700±0,0042
37,5±0,5	0,220±0,002	0,1705±0,0038
40,0±0,5	0,240±0,002	0,1667±0,0035
44,0±0,5	0,260±0,002	0,1692±0,0032
47,0±0,5	0,280±0,002	0,1679±0,0030
	PROMEDIO (Ω)	0,1689±0,0035

Voltaje (mV)	Corriente (A)	Resistencia de Armadura R_{8-11} (Ω)
33,5±0,5	0,200±0,002	0,1675±0,0042
36,5±0,5	0,220±0,002	0,1659±0,0038
40,5±0,5	0,240±0,002	0,1688±0,0035
43,5±0,5	0,260±0,002	0,1673±0,0032
46,5±0,5	0,280±0,002	0,1661±0,0030
	PROMEDIO (Ω)	0,1671±0,0035

Voltaje (mV)	Corriente (A)	Resistencia de Armadura R_{9-12} (Ω)
33,5±0,5	0,200±0,002	0,1675±0,0042
36,5±0,5	0,220±0,002	0,1659±0,0038
40,5±0,5	0,240±0,002	0,1688±0,0035
43,5±0,5	0,260±0,002	0,1673±0,0032
47,0±0,5	0,280±0,002	0,1679±0,0030
	PROMEDIO(Ω)	0,1675±0,0035

Como la configuración de los devanados de armadura está en estrella, entonces el valor de la resistencia entre cada borne de conexión es:

$$R_{1-2} (med) = R_{1-4[prom]} + R_{7-10[prom]} + R_{8-11[prom]} + R_{2-5[prom]} = 0,6746 \pm 0,0140 \text{ } [\Omega]$$

$$R_{2-3} (med) = R_{2-5[prom]} + R_{8-11[prom]} + R_{9-12[prom]} + R_{3-6[prom]} = 0,6713 \pm 0,0140 \text{ } [\Omega]$$

$$R_{3-1} (med) = R_{3-6[prom]} + R_{9-12[prom]} + R_{7-10[prom]} + R_{1-4[prom]} = 0,6741 \pm 0,0140 \text{ } [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura por fase es:

$$R_{1 (real)25^{\circ}C} = \frac{R_{1-2(med)} + R_{3-1(med)} - R_{2-3(med)}}{2} = 0,3387 \pm 0,0070 \text{ } [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura final con respecto a su temperatura de referencia (75°C) es:

$$R_1 = R_{1 (real)25^{\circ}C} \left[\frac{234,5^{\circ}C + 75^{\circ}C}{234,5^{\circ}C + 25^{\circ}C} \right] = 0,4040 \pm 0,0083 \text{ } [\Omega]$$

MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DEL DEVANADO DE ARMADURA EN BASE A IEC (MÁQUINA 2)

- Por método de medición de puente (Kelvin o Thompson)

$R_{1-4} \text{ } [\Omega]$
0,180±0,005
0,185±0,005
0,180±0,005
0,180±0,005
0,185±0,005
$R_{1-4[prom]} = 0,182 \pm 0,005$

$R_{2-5} \text{ } [\Omega]$
0,170±0,005
0,180±0,005
0,180±0,005
0,185±0,005
0,180±0,005
$R_{2-5[prom]} = 0,179 \pm 0,005$

$R_{3-6} \text{ } [\Omega]$
0,180±0,005
0,185±0,005
0,180±0,005
0,180±0,005
0,175±0,005
$R_{3-6[prom]} = 0,180 \pm 0,005$

$R_{7-10} \text{ } [\Omega]$
0,180±0,005
0,185±0,005
0,180±0,005
0,180±0,005
0,180±0,005
$R_{7-10[prom]} = 0,181 \pm 0,005$

$R_{8-11} \text{ } [\Omega]$
0,185±0,005
0,190±0,005
0,185±0,005
0,185±0,005
0,190±0,005
$R_{8-11[prom]} = 0,187 \pm 0,005$

$R_{9-12} \text{ } [\Omega]$
0,180±0,005
0,185±0,005
0,180±0,005
0,185±0,005
0,180±0,005
$R_{9-12[prom]} = 0,182 \pm 0,005$

Como la configuración de los devanados de armadura está en estrella, entonces el valor de la resistencia entre cada borne de conexión es:

$$R_{1-2} (med) = R_{1-4[prom]} + R_{7-10[prom]} + R_{8-11[prom]} + R_{2-5[prom]} = 0,729 \pm 0,020 \text{ } [\Omega]$$

$$R_{2-3} (med) = R_{2-5[prom]} + R_{8-11[prom]} + R_{9-12[prom]} + R_{3-6[prom]} = 0,728 \pm 0,020 \text{ } [\Omega]$$

$$R_{3-1} (med) = R_{3-6[prom]} + R_{9-12[prom]} + R_{7-10[prom]} + R_{1-4[prom]} = 0,725 \pm 0,020 \text{ } [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura por fase es:

$$R_{1 (real)25^{\circ}C} = \frac{R_{1-2(med)} + R_{3-1(med)} - R_{2-3(med)}}{2} = 0,363 \pm 0,010 \text{ } [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura final con respecto a su temperatura de referencia ($75^{\circ}C$) es:

$$R_1 = R_{1 (real)25^{\circ}C} \left[\frac{234,5^{\circ}C + 75^{\circ}C}{234,5^{\circ}C + 25^{\circ}C} \right] = 0,4329 \pm 0,0120 \text{ } [\Omega]$$

Encontrando el valor de la resistencia de la armadura por fase en función de la resistencia en los bornes de conexión de la armadura tenemos que:

$R_{1-2} [\Omega]$
0,730±0,005
0,740±0,005
0,735±0,005
0,740±0,005
0,735±0,005
$R_{1-2[prom]} = \mathbf{0,736\pm0,005}$

$R_{2-3} [\Omega]$
0,730±0,005
0,740±0,005
0,735±0,005
0,745±0,005
0,730±0,005
$R_{2-3[prom]} = \mathbf{0,736\pm0,005}$

$R_{3-1} [\Omega]$
0,725±0,005
0,735±0,005
0,730±0,005
0,725±0,005
0,730±0,005
$R_{3-1[prom]} = \mathbf{0,729\pm0,005}$

El valor de la resistencia de armadura por fase es:

$$R_{1 (real)25^{\circ}C} = \frac{R_{1-2(prom)} + R_{3-1(prom)} - R_{2-3(prom)}}{2} = 0,3645 \pm 0,0025 [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura final con respecto a su temperatura de referencia (75°C) es:

$$R_1 = R_{1 (real)25^{\circ}C} \left[\frac{234,5^{\circ}C + 75^{\circ}C}{234,5^{\circ}C + 25^{\circ}C} \right] = 0,4347 \pm 0,0030 [\Omega]$$

- **Por método de medición Voltímetro-Amperímetro**

El cálculo de la resistencia se realizó bajo las condiciones establecidas en el numeral 3.4.1.1

El cálculo de los errores de medición se realizó con la expansión de la serie de Taylor y cuyo error máximo de exactitud absoluto es:

$$\Delta R = \left| \frac{\partial R}{\partial V} \right| \Delta V + \left| \frac{\partial R}{\partial I} \right| \Delta I = \left| \frac{1}{I} \right| \Delta V + \left| -\frac{V}{(I)^2} \right| \Delta I$$

Voltaje (mV)	Corriente (A)	Resistencia de Armadura R_{1-4} (Ω)
30,5±0,5	0,178±0,002	0,1713±0,0047
34,5±0,5	0,200±0,002	0,1725±0,0042
38,0±0,5	0,220±0,002	0,1727±0,0038
41,0±0,5	0,240±0,002	0,1708±0,0035
44,5±0,5	0,260±0,002	0,1712±0,0032
PROMEDIO (Ω)		0,1717±0,0039

Voltaje (mV)	Corriente (A)	Resistencia de Armadura R_{2-5} (Ω)
31,0±0,5	0,180±0,002	0,1722±0,0047
34,0±0,5	0,200±0,002	0,1700±0,0042
37,5±0,5	0,220±0,002	0,1705±0,0038
41,0±0,5	0,240±0,002	0,1708±0,0035
45,0±0,5	0,262±0,002	0,1718±0,0032
PROMEDIO (Ω)		0,1711±0,0039

Voltaje (mV)	Corriente (A)	Resistencia de Armadura R_{3-6} (Ω)
34,0±0,5	0,200±0,002	0,1700±0,0042
37,5±0,5	0,220±0,002	0,1705±0,0038
41,5±0,5	0,240±0,002	0,1729±0,0035
44,5±0,5	0,260±0,002	0,1712±0,0032
48,0±0,5	0,280±0,002	0,1714±0,0030
PROMEDIO (Ω)		0,1712±0,0035

Voltaje (mV)	Corriente (A)	Resistencia de Armadura R_{7-10} (Ω)
31,5±0,5	0,182±0,002	0,1731±0,0046
34,5±0,5	0,200±0,002	0,1725±0,0042
38,0±0,5	0,220±0,002	0,1727±0,0038
41,5±0,5	0,240±0,002	0,1729±0,0035
44,5±0,5	0,260±0,002	0,1712±0,0032
	PROMEDIO (Ω)	0,1725±0,0039

Voltaje (mV)	Corriente (A)	Resistencia de Armadura R_{8-11} (Ω)
34,5±0,5	0,200±0,002	0,1725±0,0042
37,5±0,5	0,218±0,002	0,1720±0,0039
41,5±0,5	0,240±0,002	0,1729±0,0035
44,5±0,5	0,260±0,002	0,1712±0,0032
48,0±0,5	0,280±0,002	0,1714±0,0030
	PROMEDIO (Ω)	0,1720±0,0036

Voltaje (mV)	Corriente (A)	Resistencia de Armadura R_{9-12} (Ω)
34,5±0,5	0,200±0,002	0,1725±0,0042
37,5±0,5	0,218±0,002	0,1720±0,0039
41,5±0,5	0,240±0,002	0,1729±0,0035
45,0±0,5	0,260±0,002	0,1731±0,0033
48,0±0,5	0,278±0,002	0,1727±0,0030
	PROMEDIO(Ω)	0,1723±0,0036

Como la configuración de los devanados de armadura esta en estrella, entonces el valor de la resistencia entre cada borne de conexión es:

$$R_{1-2} (med) = R_{1-4}[prom] + R_{7-10}[prom] + R_{8-11}[prom] + R_{2-5}[prom] = 0,6873 \pm 0,0153 \quad [\Omega]$$

$$R_{2-3} (med) = R_{2-5}[prom] + R_{8-11}[prom] + R_{9-12}[prom] + R_{3-6}[prom] = 0,6866 \pm 0,0146 \quad [\Omega]$$

$$R_{3-1} (med) = R_{3-6}[prom] + R_{9-12}[prom] + R_{7-10}[prom] + R_{1-4}[prom] = 0,6877 \pm 0,0149 \quad [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura por fase es:

$$R_{1 (real)25^{\circ}C} = \frac{R_{1-2(med)} + R_{3-1(med)} - R_{2-3(med)}}{2} = 0,3442 \pm 0,0078 [\Omega]$$

El valor de la resistencia de armadura final con respecto a su temperatura de referencia (75°C) es:

$$R_1 = R_{1 (real)25^{\circ}C} \left[\frac{234,5^{\circ}C + 75^{\circ}C}{234,5^{\circ}C + 25^{\circ}C} \right] = 0,4105 \pm 0,0093 [\Omega]$$