



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales

**CARACTERIZACIÓN DE LAS
REACTANCIAS DE LA MÁQUINA
SÍNCRONA**

Autor:

Ossa Castaño, Juan Pablo

Tutor:

**Serrano Sanz, José Andrés
Departamento de Ingeniería
Eléctrica.**

Valladolid, febrero 2017.





RESUMEN

Se trata de determinar mediante ensayos las diversas reactancias asociadas a una máquina síncrona. Estos ensayos son:

- Ensayo de vacío.
- Ensayo de cortocircuito.
- Ensayo con carga reactiva.
- Ensayo de deslizamiento.
- Ensayo de cortocircuito brusco.
- Ensayo homopolar.
- Ensayo de cortocircuito asimétrico permanente.

Y las reactancias a determinar serán:

- Reactancia síncrona no saturada.
- Reactancia síncrona saturada.
- Reactancia de dispersión.
- Reactancia de eje directo y eje de cuadratura.
- Reactancia transitoria y subtransitoria.
- Reactancia directa, inversa y homopolar.

También hacemos un repaso a la normativa internacional vigente para la determinación de dichas reactancias mediante los ensayos correspondientes y sus correspondientes valores por unidad.

PALABRAS CLAVE

Máquina, síncrona, ensayos, reactancias, norma EN 60034-4:2008.



ÍNDICE

RESUMEN.....	3
PALABRAS CLAVE	3
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
ÍNDICE DE TABLAS	9
ÍNDICE DE FÓRMULAS	10
GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ABREVIATURAS.....	12
1. INTRODUCCIÓN.....	13
2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA MÁQUINA SÍNCRONA Y ELEMENTOS DE ENSAYO ^[9]	15
3. HERRAMIENTAS UTILIZADAS ^[7]	18
4. ENSAYOS DE LA MÁQUINA SÍNCRONA	21
4.1. ENSAYO DE VACÍO ^[1]	21
4.2. ENSAYO DE CORTOCIRCUITO ^[1]	23
4.3. DETERMINACIÓN DE LA REACTANCIA SÍNCRONA. MÉTODO DE BEHN-ESCHENBURG ^[1]	25
4.3.1. Reactancia de dispersión $X\sigma$	26
4.3.2. Reactancia de reacción de inducido X_p	26
4.4. REACTANCIA DE DISPERSIÓN. TRIÁNGULO DE POTIER ^[1]	33
4.4.1. Método gráfico. ^[1]	38
4.4.2. Método analítico. ^[1]	39
4.5. REACTANCIA DE CUADRATURA Y DE EJE DIRECTO. ENSAYO DE DESLIZAMIENTO ^{[1][2]}	41
4.6. REACTANCIA TRANSITORIA Y SUBTRANSITORIA. ENSAYO DE CORTOCIRCUITO BRUSCO ^{[1][4]}	45
4.7. COMPONENTES SIMÉTRICAS. REACTANCIA SÍNCRONA DIRECTA, INVERSA Y HOMOPOLAR ^[5]	51
4.7.1. Reactancia síncrona directa ^[5]	52
4.7.2. Ensayo para la determinación de la reactancia síncrona homopolar ^[4]	53
4.7.3. Ensayo de cortocircuito asimétrico permanente. Reactancia síncrona inversa ^[4]	56
5. VALORES POR UNIDAD (VPU) ^{[1][6]}	59
6. NORMALIZACIÓN TÉCNICA ^[2]	62
7. CONCLUSIONES.....	63



8. BIBLIOGRAFÍA65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Máquina síncrona del laboratorio de Máquinas Eléctricas.....	15
Figura 2. Cargas reactivas.....	16
Figura 2A. Características de las cargas reactivas.....	16
Figura 2B. Características del primario de los transformadores.....	17
Figura 3. Panel de medidas.....	18
Figura 4. Plataforma CompactRIO.....	18
Figura 5. Transductor.....	18
Figura 6. Imagen del software Gestión de ensayos eléctricos.....	19
Figura 7. Imagen del software Leer Datos Laboratorio Máquinas Eléctricas.....	20
Figura 8. Esquema de montaje del ensayo de vacío.....	21
Figura 9. Curva de vacío.....	22
Figura 10. Esquema de montaje del ensayo de cortocircuito.....	23
Figura 11. Curva de cortocircuito.....	24
Figura 12. Circuito equivalente por fase de la máquina síncrona.....	25
Figura 13. Flujo de dispersión en el estator.....	26
Figura 14. Reacción de inducido sin carga (A) y con carga resistiva (B).....	26
Figura 15. Reacción de inducido con carga inductiva (A) y carga capacitiva (B).....	27
Figura 16. Curva de la impedancia síncrona Z_s	28
Figura 17. Curva experimental de la impedancia síncrona Z_s	31
Figura 18. Curvas de vacío, cortocircuito y entrehierro.....	32
Figura 19A. Esquema de montaje del ensayo con carga inductiva.....	34
Figura 19B. Fotografía del montaje del ensayo con carga inductiva.....	34
Figura 20. Curvas de vacío y de carga reactiva	34
Figura 21. Curva reactiva.....	36



Figura 22. Curvas experimentales de vacío y de carga reactiva.....	37
Figura 23. Vista general de todas las curvas y los puntos O y A'	38
Figura 24. Triángulo de Potier.....	39
Figura 25. Eje de cuadratura y eje directo.....	41
Figura 26. Tensiones y Corrientes de reacción de inducido.....	42
Figura 27. Esquema de montaje del ensayo de deslizamiento.....	43
Figura 28. Curvas de la tensión y la corriente en el ensayo de deslizamiento.....	44
Figura 29. Onda de la corriente de cortocircuito brusco.....	45
Figura 30. Componente simétrica de la corriente de cortocircuito.....	46
Figura 31. Corriente permanente de cortocircuito.....	47
Figura 32. Circuito eléctrico equivalente con todas las reactancias.....	47
Figura 33. Circuito eléctrico equivalente en estado transitorio.....	48
Figura 34. Gráfico del ensayo de cortocircuito brusco para una fase.....	50
Figura 35. Componente simétrica de la corriente alterna	50
Figura 36. Componentes simétricas.....	52
Figura 37. Esquema de montaje para determinar la reactancia homopolar.....	53
Figura 38. Montaje para determinar la reactancia homopolar.....	54
Figura 39. Gráfico del ensayo homopolar.....	55
Figura 40. Esquema del ensayo de cortocircuito asimétrico permanente.....	56
Figura 41. Gráfico del ensayo de cortocircuito asimétrico.....	57



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos del ensayo de vacío.....	22
Tabla 2. Datos del ensayo de cortocircuito.....	24
Tabla 3. Datos de la impedancia síncrona.....	30
Tabla 4. Datos de la curva de reactiva.....	36
Tabla 5. Datos del ensayo de deslizamiento.....	43
Tabla 6. Datos del ensayo de cortocircuito brusco.....	49
Tabla 7. Datos del ensayo homopolar.....	55
Tabla 8. Datos del ensayo de cortocircuito asimétrico.....	57
Tabla 9. Reactancias en vpu normalizados vs. valores obtenidos en los ensayos.....	61



ÍNDICE DE FÓRMULAS

Fórmula 1. Circuito equivalente por fase de la máquina síncrona.....	25
Fórmula 2. Impedancia síncrona.....	25
Fórmula 3. Reactancia síncrona.....	26
Fórmula 4. Fuente de tensión en vacío.....	28
Fórmula 5. Fuente de tensión en cortocircuito.....	28
Fórmula 6. Fuente de tensión en cortocircuito reducida.....	28
Fórmula 7. Módulo de la impedancia síncrona.....	28
Fórmula 8. Módulo de la impedancia síncrona no saturada.....	29
Fórmula 9. Módulo de la impedancia síncrona saturada.....	29
Fórmula 10. Módulo de la reactancia síncrona.....	30
Fórmula 11. Curva de vacío.....	32
Fórmula 12. Curva de cortocircuito.....	32
Fórmula 13. Recta del entrehierro.....	32
Fórmula 14. Fuerza magneto motriz de excitación.....	35
Fórmula 15. Fuerza electro motriz resultante.....	35
Fórmula 16. Lados del triángulo de Potier.....	35
Fórmula 17. Curva reactiva.....	39
Fórmula 18. Recta paralela a la recta del entrehierro.....	40
Fórmula 19. Corriente y reactancia de eje de cuadratura y eje directo.....	41
Fórmula 20. Deslizamiento de la máquina síncrona.....	42
Fórmula 21. Expresión empírica de las reactancias de eje directo y eje de cuadratura.....	42
Fórmula 22. Corriente subtransitoria.....	48
Fórmula 23. Expresión empírica de la corriente subtransitoria.....	48
Fórmula 24. Corriente transitoria.....	48
Fórmula 25. Expresión empírica de la corriente transitoria.....	48



Fórmula 26. Reactancia homopolar.....	54
Fórmula 27. Reactancia inversa.....	56
Fórmula 28. Corriente base.....	59
Fórmula 29. Reactancia base.....	59
Fórmula 30. Reactancia en valores por unidad.....	59

GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ABREVIATURAS.

CEI	→	Comité Electrotécnico Internacional.
EII	→	Escuela de Ingenierías Industriales.
E_0	→	Fuente de tensión.
F_e	→	Fmm de excitación.
fem	→	Fuerza electromotriz.
F_i	→	Fmm de reacción de inducido.
fmm	→	Fuerza magnetomotriz.
F_R	→	Fmm resultante.
I	→	Corriente.
I'	→	Corriente transitoria.
I''	→	Corriente subtransitoria.
I_{cc}	→	Corriente de cortocircuito.
I_e	→	Corriente de excitación.
I_f	→	Corriente de fase.
I_L	→	Corriente de línea.
n	→	Velocidad de giro.
n_1	→	Velocidad síncrona.
R	→	Resistencia.
S	→	Deslizamiento.
TFG	→	Trabajo Fin de Grado.
V	→	Tensión.
V_f	→	Tensión de fase.
V_L	→	Tensión de línea.
vpu	→	Valores Por Unidad.
X_a	→	Reactancia de amortiguación.
X_e	→	Reactancia de excitación.
X_d	→	Reactancia de eje directo.
X_p	→	Reactancia de reacción de inducido.
X_q	→	Reactancia de eje de cuadratura.
X_s	→	Reactancia síncrona.
X_σ	→	Reactancia de dispersión.
X_0	→	Reactancia homopolar.
X_1	→	Reactancia directa.
X_2	→	Reactancia inversa.
X'	→	Reactancia subtransitoria.
X''	→	Reactancia transitoria.
Z_s	→	Impedancia síncrona.
Φ_0	→	Flujo magnético inicial.

1. INTRODUCCIÓN

Para empezar haremos un repaso a las características técnicas de la máquina síncrona empleada en los sucesivos ensayos y de las cargas reactivas utilizadas en uno de ellos.

Continuaremos con una descripción de algunas de las herramientas utilizadas para la gestión de los datos usados a lo largo de este TFG para finalmente pasar al tema central que nos ocupa en el que se trata de determinar mediante ensayos las diversas reactancias asociadas a una máquina síncrona.

Tenemos la denominada reactancia síncrona, que obtenemos mediante los ensayos de vacío y de cortocircuito a través del análisis de la zona lineal del comportamiento de dicha máquina. A continuación se analiza la parte no lineal de la máquina para que, teniendo en cuenta la saturación de la misma e introduciendo el concepto del triángulo de Potier, podamos obtener la reactancia de dispersión. Aplicando todo esto a la máquina síncrona de rotor cilíndrico.

Para la máquina de polos salientes, analizamos sus dos reacciones, estas son, la reacción del eje directo que nos brindará la reactancia de eje directo y la reacción del eje de cuadratura al que le corresponde la denominada como reactancia de cuadratura. Estas reactancias serán obtenidas a través del ensayo de deslizamiento.

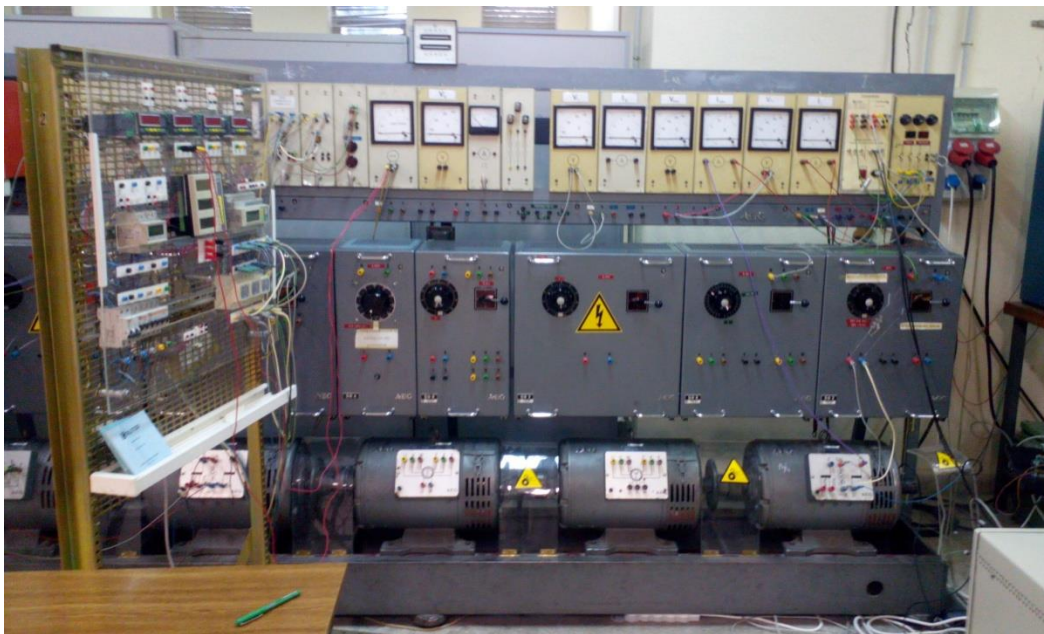
Luego tendremos las reactancias transitorias y subtransitorias que se obtienen mediante un ensayo denominado de cortocircuito brusco. Y como últimas reactancias que trataremos en este documento están las reactancias directa, indirecta y homopolar con sus componentes simétricas.

Por último, están los resultados de todas las anteriores reactancias en sus vpu comparando estas con las magnitudes marcadas como estándares internacionales. Además de hacer mención a la norma EN 60034-4:2008 con título "Máquinas eléctricas rotativas. Parte 4: Métodos para la determinación de las magnitudes de las máquinas síncronas a partir de los ensayos" del CEI adoptada como norma UNE.



2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA MÁQUINA SÍNCRONA Y ELEMENTOS DE ENSAYO ^[9]

Vamos a detallar a continuación las características más importantes de la máquina síncrona (figura 1), con la cual vamos a proceder a realizar los ensayos en el laboratorio del departamento de Máquinas Eléctricas de la escuela de Ingenierías Industriales en la sede Francisco Mendizábal.



	GENERADOR	MOTOR
Tipo	Gd Sy 150/150-4	Gd Sy 150/150-4
Potencia	3 kVA, $\cos \phi=1$	3 kW, $\cos \phi=1$
Revoluciones	1500 rev/min	1500 rev/min
Tensión	380/660 V ΔY	380/660 V ΔY
Frecuencia	50 Hz	50 Hz
Corriente	5,8/3,35 A	5,8/3,35 A
Clase aislamiento	E	E
Clase protección	P 22	P 22
Excitación	220 V	220 V
Número de polos	4	4
Resistencia estator	2,8 Ω en frío (<70°C)	2,8 Ω en frío (<70°C)

Figura 1. Máquina síncrona del laboratorio de Máquinas Eléctricas. ^[9]

En el caso de las de las cargas reactivas utilizadas para la determinación del triángulo de Potier, tenemos (figura 2):

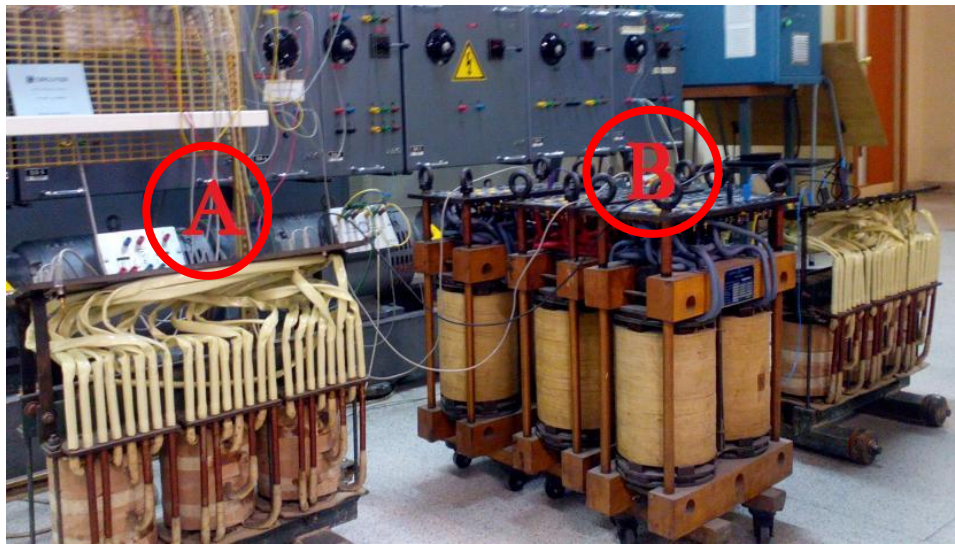
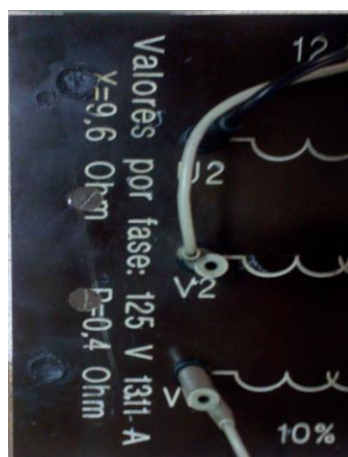


Figura 2. Cargas reactivas. [9]



Potencia	5 kVA
Frecuencia	50 Hz
Tensión	125 V
Corriente	13,11 A
Resistencia	0,4 Ω
Reactancia	9,6 Ω

Figura 2A. Características de las cargas reactivas. [9]

En el caso del ensayo para la determinación del triángulo de Potier, además de las cargas reactivas (Figura 2A) se necesitó hacer uso también de las reactancias de los primarios de 3 transformadores (Figura 2B) para alcanzar así la tensión nominal a la salida de la máquina síncrona, las características de estas bobinas son las siguientes:



Potencia	3 kVA
Frecuencia	50 Hz
Tensión	22 V x 10
Corriente	6,82 A

Figura 2B. Características del primario de los transformadores. [9]

Debemos advertir que todos los valores obtenidos a lo largo de este documento son magnitudes por fase y que la conexión de las bornas del inducido están conectadas en triángulo. Ambos casos son ciertos a no ser que se indique lo contrario. En el caso de las bornas de la máquina síncrona del laboratorio, tienen una nomenclatura diferente en comparación de como lo están en los documentos técnicos con aceptación internacional hoy en día, las cuales se especifican en el cuadro siguiente:

	ENTRADA			SALIDA		
MÁQUINA SÍNCRONA	\bar{U}	\bar{V}	\bar{W}	\bar{X}	\bar{Y}	\bar{Z}
NOMENCLATURA INTERNACIONAL ACTUAL	U	V	W	U'	V'	W'

Esta nomenclatura solo aparecerá en las fotografías correspondientes a la máquina síncrona del laboratorio, en todos los demás casos, la nomenclatura será la aceptada por los convenios internacionales actuales.

Por último, debemos llamar la atención sobre la labor didáctica que desempeña la máquina síncrona del laboratorio, debiendo así, centrarnos más en el aspecto cualitativo que no en el cuantitativo de los resultados obtenidos en los ensayos, ya que se pueden presentar algunas inexactitudes respecto a los valores de referencia a nivel internacional.

3. HERRAMIENTAS UTILIZADAS [7]

Para la adquisición de las variables más importantes tales como tensiones, corrientes, potencias y velocidad de giro en la máquina síncrona, se han utilizado una serie de dispositivos físicos de medida.

Uno de esos dispositivos de medida es el panel mostrado en la figura 3 que mide las variables eléctricas en estado estacionario y el otro es el módulo para la plataforma CompactRIO de National Instruments mostrado en la figura 4 que también realiza labores de ejecución práctica de los diferentes esquemas de montaje. CompactRIO es un sistema embebido y reconfigurable de control y adquisición de datos que puede ser programado con el software LabVIEW de la misma compañía.



Figura 3. Panel de medidas.[7]

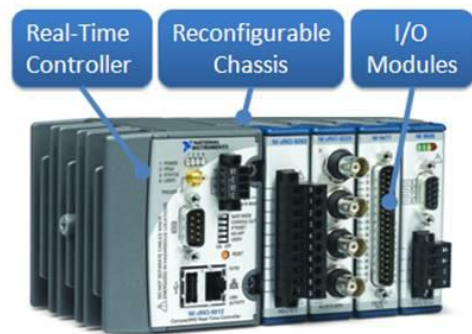


Figura 4. Plataforma CompactRIO.[7]

También se acondicionarán las magnitudes analógicas a señales digitales mediante un transductor que, en nuestro caso, será de tensión y corriente ya que a partir de ellas podremos hallar las demás magnitudes tales como potencia, energía, etc. Estos transductores han sido previamente montados sobre una placa de circuito impreso.



Figura 5. Transductor. [7]

Y como elemento central que realice el control y gestión de todos los dispositivos físicos que interactúan con la máquina síncrona hacemos uso de un software informático totalmente desarrollado en el Dpto. de Ingeniería Eléctrica. Este software tiene como nombre "Gestión de Ensayos Eléctricos" y su objetivo es el control y adquisición de datos de todos los dispositivos interconectados en la realización de los diferentes ensayos llevados a cabo (Figura 6).

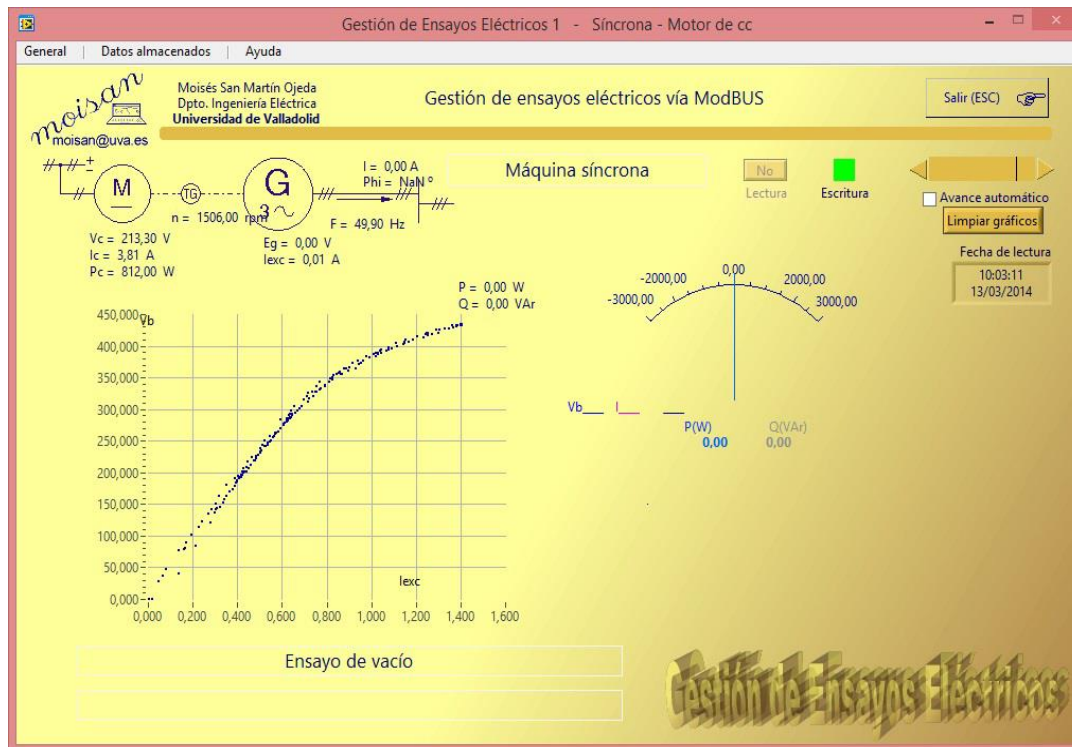


Figura 6. Imagen del software Gestión de Ensayos Eléctricos. [7]

Como complemento al programa anterior que proporciona valores medios y eficaces de las variables deseadas, tenemos un software específico para la adquisición de valores instantáneos llamado "Leer Datos Laboratorio Máquinas Eléctricas" (Figura 7).

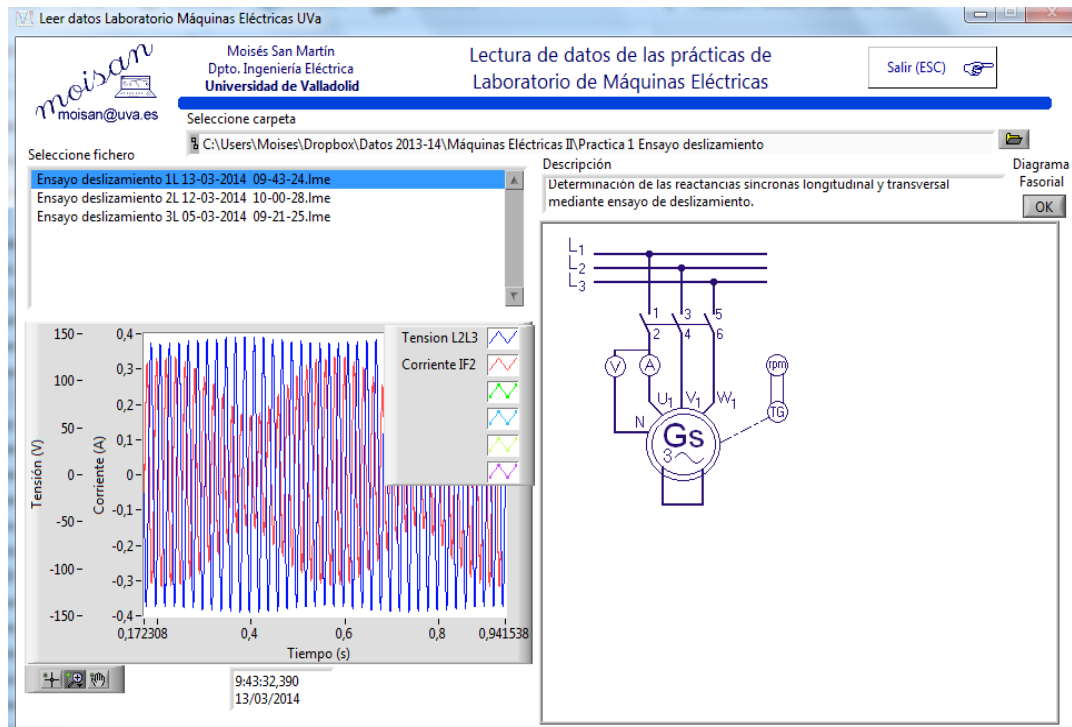


Figura 7. Imagen del software Leer Datos Laboratorio Máquinas Eléctricas.^[7]

Todos los ficheros que se han obtenido como resultado de llevar a cabo los diferentes ensayos de este TFG se pueden consultar a través del archivo TFG_00127_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII y ejecutarlos para su visualización mediante los programas informáticos citados en este apartado.

4. ENSAYOS DE LA MÁQUINA SÍNCRONA

4.1. ENSAYO DE VACÍO [1]

Este ensayo consiste en, mediante un motor primario externo, hacer girar el rotor de la máquina a la velocidad síncrona sin conectar ningún tipo de carga a la salida, y a continuación, alimentar al inductor con una corriente de excitación I_e proveniente de una fuente de corriente continua regulable hasta que se alcancen valores de tensión a la salida cercanos a la asignada. Hasta que se alcance este punto final de la tensión, vamos tomando nota de los pares de valores $V - I_e$. Se puede ver un esquema del montaje del ensayo en la Figura 8:

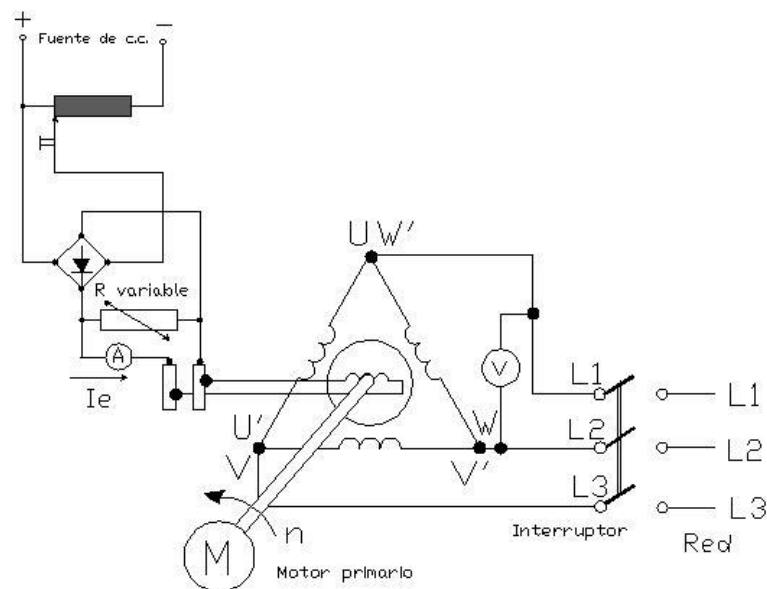


Figura 8. Esquema de montaje del ensayo de vacío. [1]

Una vez realizado el montaje y puesto en marcha el ensayo, hemos procedido a la toma de datos con el software “Gestión de ensayos eléctricos” del Dpto. de Ingeniería Eléctrica. Los mismos están disponibles en la Tabla 1 (Dicha tabla se puede consultar íntegramente en el archivo “Tabla 1.xls” dentro de TFG_00127_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII).

I_e (A)	V_b (V)
0,003	0
0,029	0
0,07	0
0,071	0
0,086	0
0,094	38,105
0,11	45,033
⋮	⋮
⋮	⋮
⋮	⋮
1,834	482,506
1,847	483,012
1,86	483,487
1,873	483,487
1,886	484,230
1,899	484,908

Tabla 1. Datos del ensayo de vacío. [9]

Representando los datos de la Tabla 1 hemos obtenido el gráfico de la figura 9:

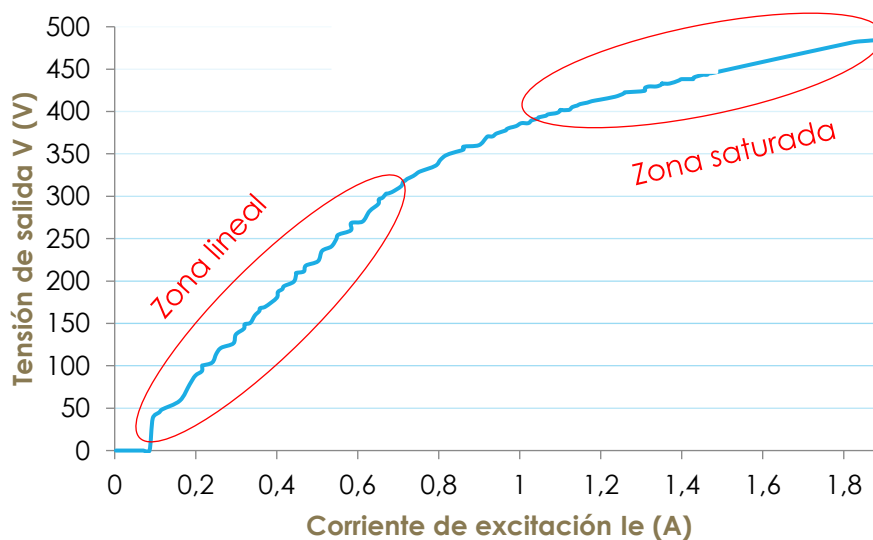


Figura 9. Curva de vacío. [9]

En este gráfico podemos observar como para valores entorno a los de la tensión asignada (380 V) se produce la saturación del circuito magnético de la máquina. Se puede apreciar también como antes de dicha saturación, podemos considerar el comportamiento de la máquina síncrona como lineal.

4.2. ENSAYO DE CORTOCIRCUITO [1]

Para realizar este ensayo se debe hacer girar el rotor a la velocidad de sincronismo, que en nuestro caso lo hacemos con un motor primario, a la vez que realizamos una conexión de cortocircuito a la salida de la máquina y es entonces cuando empezamos a aplicar una excitación ascendente de forma gradual hasta alcanzar valores cercanos a la corriente nominal a la salida, al mismo tiempo que vamos midiendo la corriente que circula por dicho cortocircuito. Se puede ver un esquema del montaje del ensayo en la Figura 10:

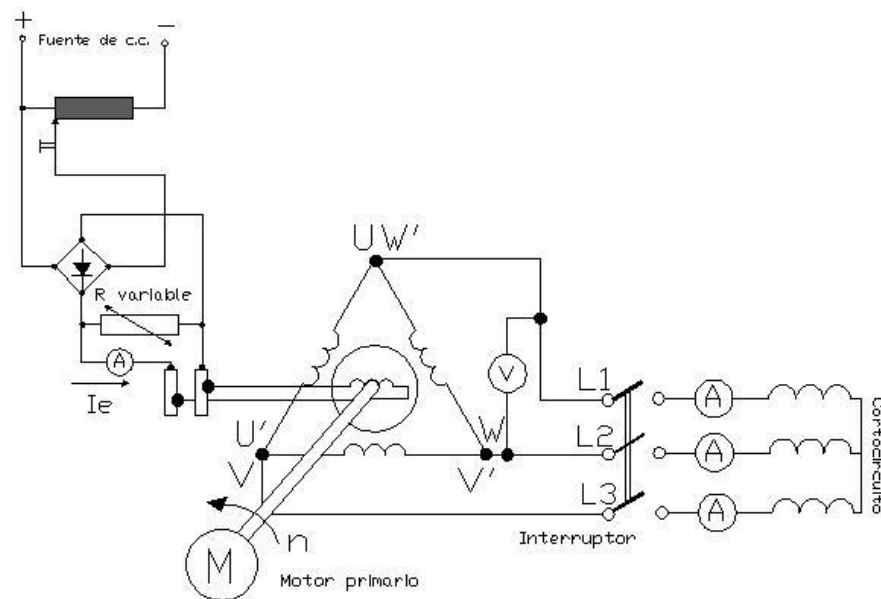


Figura 10. Esquema de montaje del ensayo de cortocircuito. [9]

Una vez realizado el montaje y puesto en marcha el ensayo, hemos procedido a la toma de datos con el software "Gestión de ensayos eléctricos" del Dpto. de Ingeniería Eléctrica. Los mismos están disponibles en la Tabla 2 (Dicha tabla se puede consultar íntegramente en el archivo "Tabla 2.xls" dentro de TFG_00127_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII).

I_e (A)	I_L (A)	I_f (A)
0,004	0	0
0,004	0	0
0,038	0	0
0,075	0,451	0,260
0,092	0,559	0,323
0,104	0,626	0,361
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮
0,93	5,974	3,449
0,96	6,158	3,555
0,99	6,297	3,636
0,998	6,44	3,718
1,065	6,583	3,801
1,097	7,03	4,059
1,1	7,366	4,253

Tabla 2. Datos del ensayo de cortocircuito. [9]

Representando los datos de la Tabla 2 para la corriente a la salida por fase, hemos obtenido el gráfico de la figura 11:

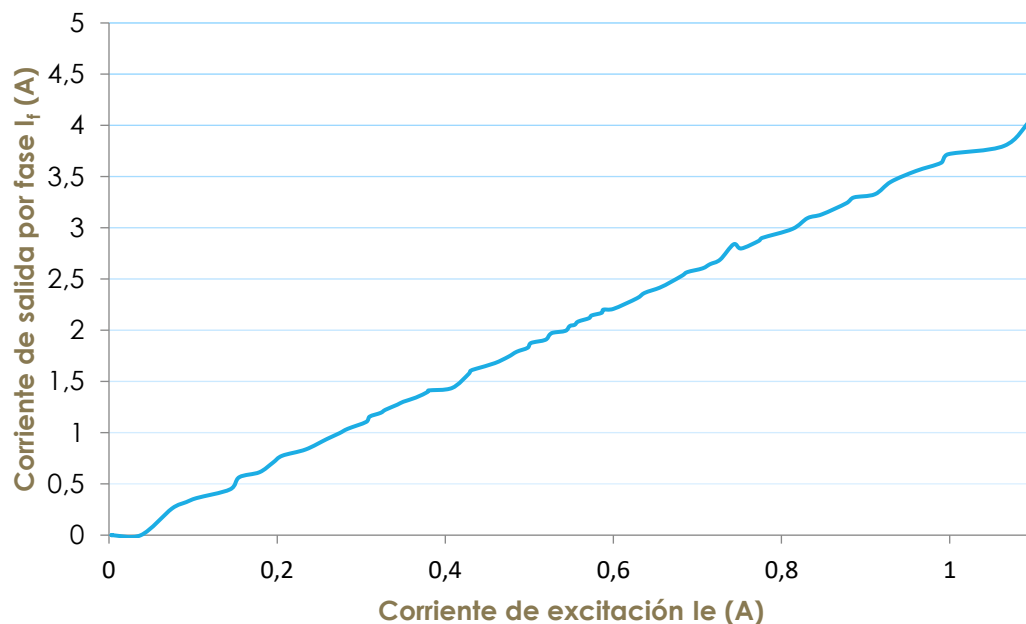


Figura 11. Curva de cortocircuito. [9]

En el gráfico podemos apreciar como esta curva es prácticamente una línea recta, esto es debido a que, bajo la situación actual, la excitación final y el flujo magnético son de pequeña magnitud, lo que da como resultado no llegar a la zona de saturación.

4.3. DETERMINACIÓN DE LA REACTANCIA SÍNCRONA. MÉTODO DE BEHN-ESCHENBURG [1]

Para la determinación de dicha reactancia nos centraremos únicamente en el estudio de la zona lineal del comportamiento de la máquina síncrona de polos salientes.

En el esquema de la Figura 12, podemos apreciar el circuito equivalente por fase de la máquina síncrona que está formado por una fuente de tensión E_o en serie con la impedancia síncrona Z_s . Esta última, a su vez está conformada por la resistencia interna R de la máquina y la reactancia síncrona X_s cuyo valor está determinado por la suma de la llamada reactancia de dispersión X_σ y la reactancia de reacción de inducido X_p .

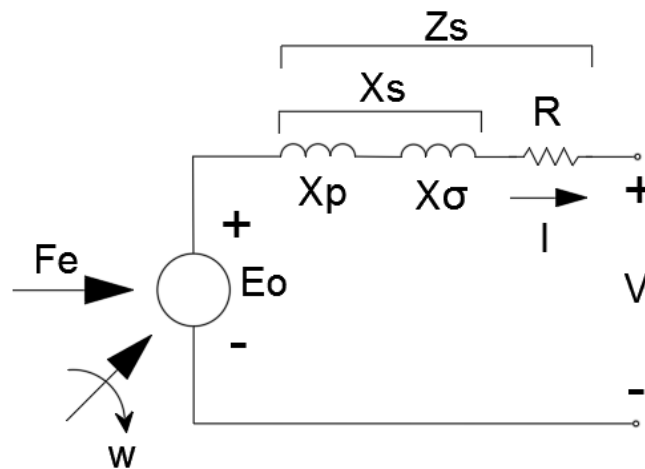


Figura 12. Circuito equivalente por fase de la máquina síncrona. [9]

Entonces tenemos, según la expresión 1, que:

$$E_o = V + (R + jX_s)I \quad (1)$$

Donde:

$$Z_s = R + jX_s \quad (2)$$

Y:

$$X_s = X_\sigma + X_p \quad (3)$$

4.3.1. Reactancia de dispersión X_σ

Viene provocada por el flujo de dispersión habido en el estator que aparece en las cabezas de las bobinas y en las ranuras donde estas van situadas (Figura 13). Este flujo de dispersión aparece cuando circula por el inducido una pequeña corriente fruto de la fmm del inductor, lo que desemboca en una caída de tensión en la salida de la máquina. Esta caída de tensión a plena carga puede alcanzar valores de hasta el 15% de la tensión asignada del inducido.

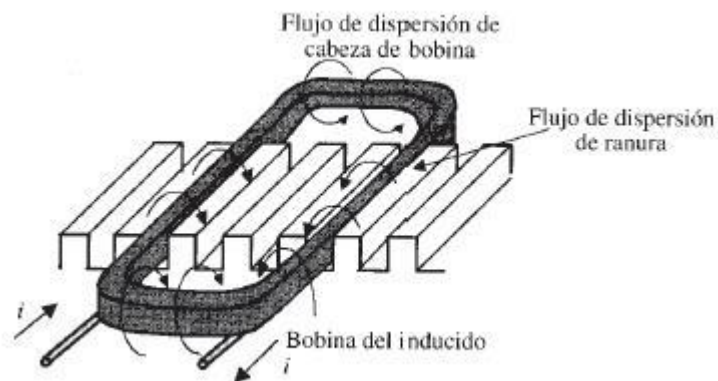


Figura 13. Flujo de dispersión en el estator. [1]

4.3.2. Reactancia de reacción de inducido X_p

Se produce por el efecto que ejerce la fmm del inducido sobre la fmm del inductor y su posterior modificación del flujo en el entrehierro de la máquina (Figura 14). Este efecto varía en función de la carga conectada y de la magnitud y la fase de la corriente en el estator.

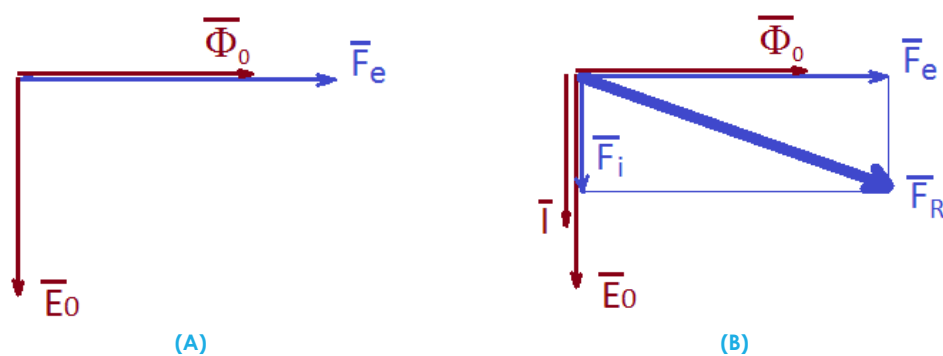


Figura 14. Reacción de inducido sin carga (A) y con carga resistiva (B). [9]

Para el caso en el que la máquina está en funcionamiento sin carga alguna (Figura 14A) y tomando a la fmm de excitación como referencia de fase, se observa como el flujo está en fase con esta y la fem total tiene un retraso de 90°. Este será el caso desde el que se tomará como referencia inicial para los demás que atenderemos a continuación.

La situación con carga resistiva (Figura 14B) plantea el mismo diagrama que en vacío, añadiendo además que la fmm de reacción de inducido está en fase con la fem total y la corriente de inducido. Sumando vectorialmente ambas fmm's tenemos una fmm resultante transversal.

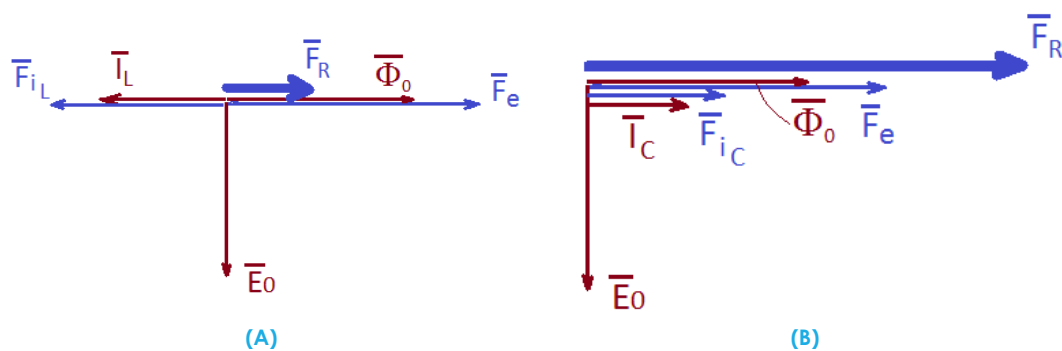


Figura 15. Reacción de inducido con carga inductiva (A) y carga capacitiva (B). [9]

En el caso de tener conectada a la máquina síncrona una carga inductiva (Figura 15A), vemos como la fmm de inducido y su corriente están en fase y en sentido opuesto (180°) con la fmm de excitación, lo que tiene como resultado una fmm resultante pequeña, lo que nos lleva a concluir que se sufre una fuerza desmagnetizante.

Para el último caso que se presenta, cuya carga es capacitiva (Figura 15B), tenemos el efecto contrario al anterior, esto es, una fuerza magnetizante resultante de tener a la fmm de inducido en fase con la fmm de excitación, por lo que, al realizar la suma vectorial de ambas, nos da una fmm resultante mayor que en el caso de la carga inductiva.

Una vez explicadas las reactancias de dispersión y reacción de inducido, acudimos a la expresión (1) que, junto a los parámetros obtenidos en los ensayos de vacío y cortocircuito, obtendremos la impedancia síncrona Z_s , esto es:

Para el **ensayo de vacío**:

$$E_o = V + (R+jX_s) I \quad (1)$$

Como este ensayo se desarrolla en circuito abierto, entonces no circula ninguna corriente I por la salida, por lo que $I = 0$, entonces tenemos que:

$$E_o = V \quad (4)$$

Para el **ensayo de cortocircuito**:

$$E_o = V + (R+jX_s)I_{cc}$$

Introduciendo la expresión (2) en (1) tenemos entonces que:

$$E_o = V + Z_s \cdot I_{cc} \quad (5)$$

Además, este ensayo, se desarrolla en cortocircuito, con lo cual no existe tensión a la salida, por lo que $V = 0$, entonces:

$$E_o = Z_s \cdot I_{cc} \quad (6)$$

De las expresiones (4) y (6) obtenemos finalmente el valor del **módulo de la impedancia síncrona**:

$$Z_s = \frac{E_o}{I_{cc}} \quad (7)$$

Si representamos los diferentes valores de Z_s que tendríamos en función de la tensión de salida en vacío y la corriente de cortocircuito, nos daría como resultado un gráfico similar al de la figura 16:

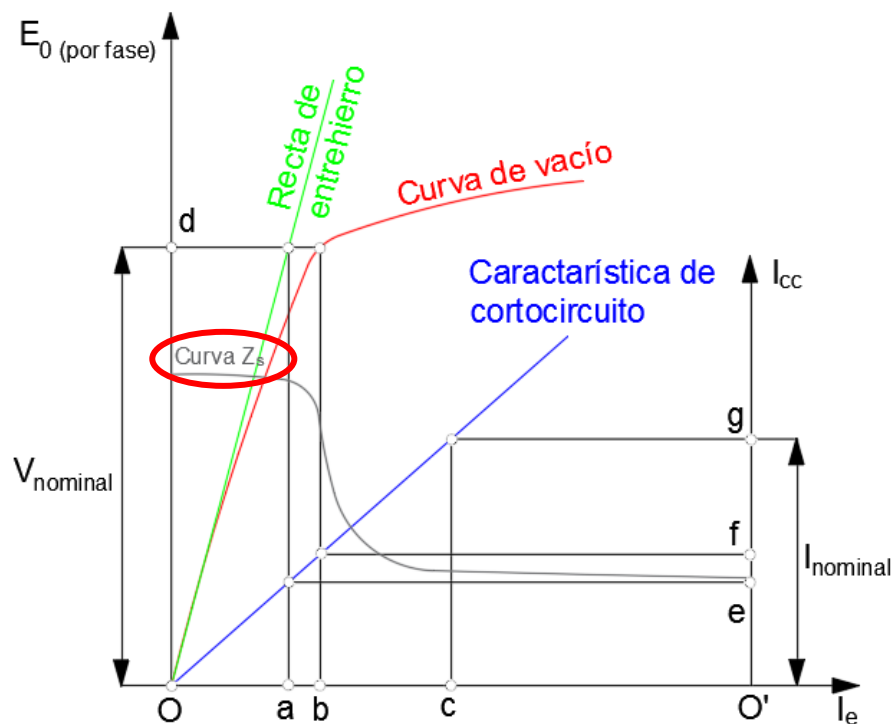


Figura 16. Curva de la impedancia síncrona Z_s . [9]

En dicha figura 16 podemos apreciar 4 curvas las cuales son:

- Curva de vacío.
- Curva de cortocircuito.
- Curva de la impedancia síncrona (hablaremos de ellas más adelante).
- Curva del entrehierro.

La curva del entrehierro es una recta tangente a la curva de vacío en la zona lineal. Esta recta representa el comportamiento de la máquina si esta careciera de la saturación del hierro, es decir, si la única reluctancia existente fuera la de entrehierro.

Como se mencionó antes, también podemos ver la curva de la impedancia síncrona Z_s y como esta tiene magnitudes constantes para valores pequeños de la corriente de excitación I_e , que es donde la curva de vacío coincide con la recta del entrehierro, es decir, donde no existe saturación, de aquí obtenemos la denominada impedancia síncrona no saturada que obtenemos a partir de la tensión asignada $\bar{O}\bar{a}$ a la que corresponde una excitación $\bar{O}\bar{a}$ y que tendría como resultado una corriente en el inducido $\bar{O}'\bar{e}$, por lo que finalmente obtenemos que:

$$Z_s \text{ (No saturada)} = \frac{\bar{O}\bar{a}}{\bar{O}'\bar{e}} \quad (8)$$

El funcionamiento habitual de estas máquinas suele ocurrir en la zona donde se hace palpable la pérdida de proporcionalidad y se inicia la saturación del hierro, esto es, en la zona llamada codo de la curva. Es a partir de ahí donde la anterior impedancia síncrona no saturada deja de tener sentido y hemos de recurrir a otro parámetro más adecuado a la nueva situación, para ello recurrimos a la impedancia síncrona saturada que obtenemos a partir de la tensión asignada $\bar{O}\bar{a}$ (al igual que antes), cuya excitación correspondiente es $\bar{O}\bar{b}$ y para la cual obtenemos una corriente en el inducido $\bar{O}'\bar{f}$, por lo que finalmente tenemos que:

$$Z_s \text{ (Saturada)} = \frac{\bar{O}\bar{a}}{\bar{O}'\bar{f}} \quad (9)$$

Y finalmente, para obtener el valor de la reactancia síncrona X_s acudimos a la expresión (2) de la cual despejamos dicha reactancia, quedándonos entonces:

$$X_s = \sqrt{z_s^2 + R^2} \quad (10)$$

Hemos procedido a la toma de datos con el software "Gestión de ensayos eléctricos" del Dpto. de Ingeniería Eléctrica. Los mismos están disponibles en la Tabla 3 (Dicha tabla se puede consultar íntegramente en el archivo "Tabla 3.xls" dentro de TFG_00127_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII).

I_e	Z_s
0,185	116,840
0,199	122,739
0,215	119,939
0,216	125,995
0,216	128,206
0,216	128,206
⋮	⋮
⋮	⋮
⋮	⋮
1,439	83,062
1,453	82,600
1,456	82,433
1,463	82,046
1,466	82,202
1,472	81,873

Tabla 3. Datos de la impedancia síncrona. ^[9]

Si representamos el valor de la impedancia frente a la magnitud de excitación tenemos el gráfico de la figura 17:

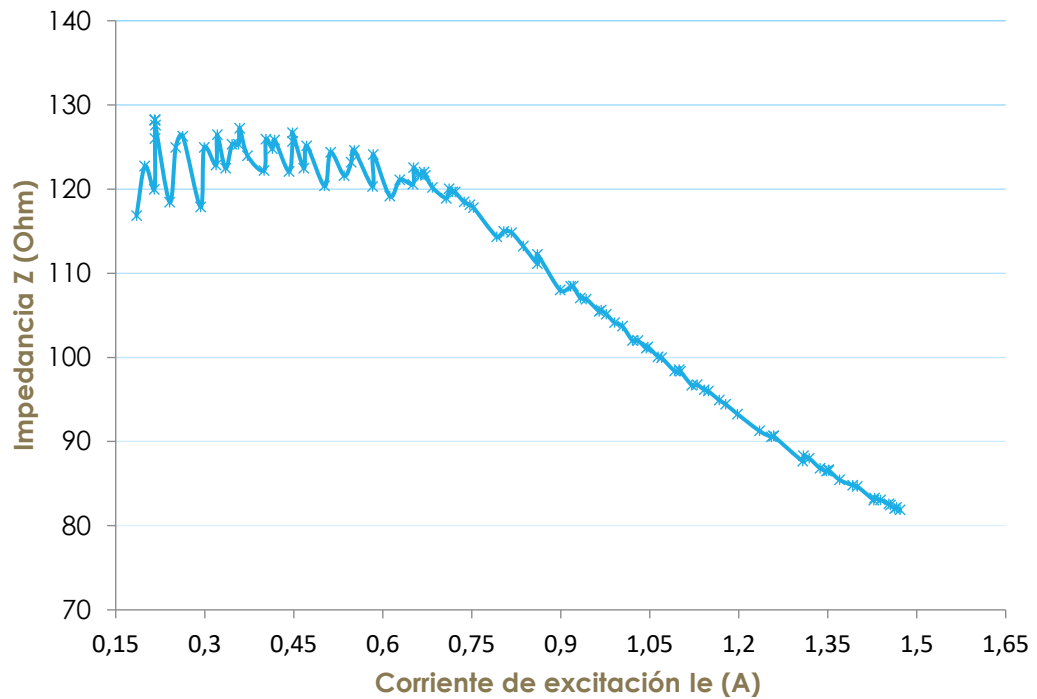


Figura 17. Curva experimental de la impedancia síncrona. [9]

En efecto y como comentábamos antes, para valores pequeños de la excitación, la impedancia tiene un comportamiento horizontal aunque oscilante entorno a un valor medio aproximado a los $123,566 \Omega$. Luego, tenemos los valores correspondientes a la zona saturada de la máquina, que es donde la recta de entrehierro deja de coincidir con la curva de vacío.

Si reflejamos las curvas de vacío, entrehierro y cortocircuito sobre un mismo gráfico como indica la figura 18, podremos obtener los valores de las impedancias síncronas saturada y no saturada. En nuestro caso tenemos que:

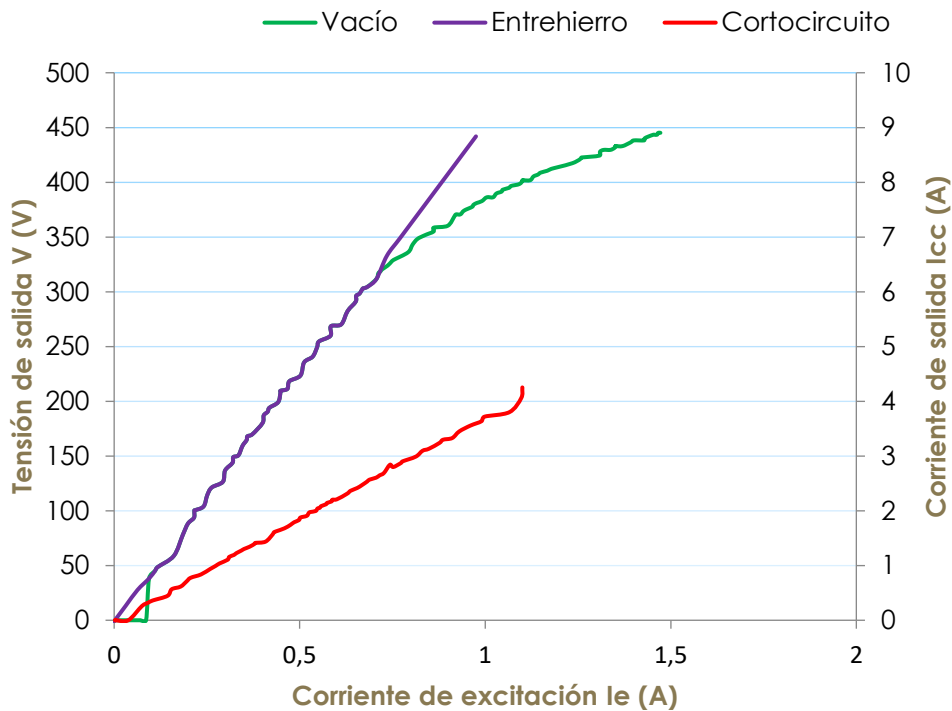


Figura 18. Curvas de vacío, cortocircuito y entrehierro. [9]

Estas curvas están regidas por las siguientes expresiones:

Curva de vacío: $V = 147,5I_e^4 - 435,7I_e^3 + 206,18I_e^2 + 485,05I_e - 17,458$ (11)

Curva de cortocircuito: $I = -0,0212I_e^3 - 0,0014I_e^2 + 3,7609I_e - 0,0285$ (12)

Recta del entrehierro: $V = 454,16I_e - 0,9262$ (13)

Según (8), $\overline{0a}$ es la tensión asignada del alternador que en este caso es $V_n = 380 \text{ V}$ y $\overline{0'e}$ es la corriente en el inducido en la zona no saturada. Para obtener este último valor hacemos uso de la expresión del entrehierro (13) de la cual hallamos la corriente de excitación correspondiente a dicha tensión asignada para después sustituir esta excitación en la ecuación de la curva de cortocircuito (12) y así tener finalmente el valor buscado de la corriente de inducido $\overline{0'e}$. Entonces tenemos que:

$$V = 454,16 \cdot I_e - 0,9262 \rightarrow I_e = \frac{V+0,9262}{454,16} \rightarrow \text{Como } V = 380 \text{ V} \rightarrow I_e = 0,839 \text{ A}$$

Ahora, con el valor de la excitación la sustituimos en (12) y tenemos que:

$$I_{cc} = 3,113 \text{ A}$$

Una vez tenemos los valores de la tensión asignada y de la corriente de salida correspondientes a la corriente de excitación $I_e = 0,839 \text{ A}$, sustituimos en

(8), llegando así, al valor de la impedancia síncrona no saturada:

$$Z_s \text{ (No saturada)} = \frac{\bar{O}d}{O_e} = \frac{380}{3,113} = 122,053 \Omega$$

Y como según (10):

$$X_s \text{ (No Saturada)} = \sqrt{z_s^2 + R^2} = \sqrt{70,632^2 + 2,8^2} = 122,08 \Omega$$

En el caso de la reactancia síncrona saturada, el procedimiento es similar, pero hacemos uso de la expresión (11) en lugar de la (13), por lo que tenemos que:

$$V = 147,5 \cdot I_e^4 - 435,7 \cdot I_e^3 + 206,18 \cdot I_e^2 + 485,05 \cdot I_e - 17,458$$

Para encontrar el valor de la excitación correspondiente a la tensión nominal usaremos un método iterativo el cual nos da como resultado que para $V = 379,964 \text{ V} \rightarrow I_e = 0,97$.

Con este valor sustituyéndolo en la expresión de cortocircuito tendremos la corriente de inducido $\bar{O}f$ que junto con la expresión (9) tenemos la impedancia síncrona saturada:

$$I_{cc} = 3,599 \text{ A} \rightarrow Z_s \text{ (Saturada)} = \frac{\bar{O}d}{O_f} = \frac{379,964}{3,599} = 105,578 \Omega$$

Por lo que tenemos entonces que:

$$X_s \text{ (Saturada)} = \sqrt{z_s^2 + R^2} = \sqrt{60,96^2 + 2,8^2} = 105,61 \Omega$$

4.4. REACTANCIA DE DISPERSIÓN. TRIÁNGULO DE POTIER [1]

Este método es aplicable a máquinas de rotor cilíndrico, aunque también es válido para máquinas de polos salientes si desarrollamos dicho triángulo con excitaciones equivalentes a 1,2-1,3 veces la tensión nominal.

El triángulo de Potier tiene su desarrollo en la zona de saturación de funcionamiento de los alternadores, al contrario que los métodos anteriores donde trabajábamos en la zona lineal (no saturada) de la máquina síncrona.

Con este proceso, determinamos el valor de la caída de tensión en la

reactancia de dispersión y la fmm de reacción de inducido F_i , lo que equivale a decir que obtenemos la corriente de reacción de inducido ya que $F_i = N_i \cdot I_i$, donde N_i es el número de espiras por polo del inducido.

Para este método es necesario la curva característica de vacío y la denominada curva de reactiva que se obtiene realizando un ensayo con carga inductiva pura en la que observaremos la evolución de la tensión de salida en función de la I_e , en la que mantenemos la corriente en el inducido constante e igual a la corriente nominal. Se puede ver un esquema del montaje del ensayo y una fotografía en la Figura 19A y 19B respectivamente:

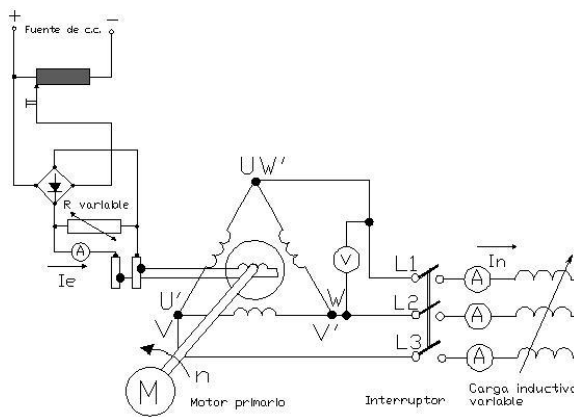


Figura 19A. Esquema de montaje del ensayo con carga inductiva. [9]



Figura 19B. Fotografía del montaje del ensayo con carga inductiva. [9]

Si representamos los datos que obtengamos en este ensayo, deberíamos obtener un gráfico similar al de la Figura 20:

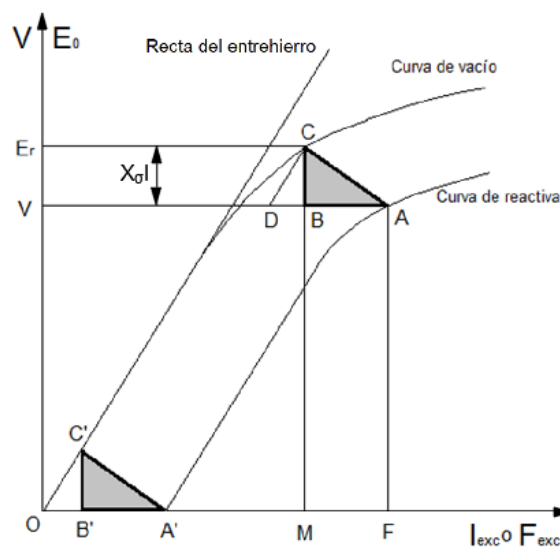


Figura 20. Curvas de vacío y de carga reactiva [9]

Si atendemos a la curva reactiva, vemos que para la tensión asignada V , necesitaríamos una excitación igual a \overline{OF} , si además $\overline{MF} \equiv \overline{AB}$ es la fmm de reacción de inducido (F_r), entonces la fmm resultante (F_e) sería \overline{OM} , ya que:

$$F_e = F_i + F_r \quad (14)$$

Dicha fmm resultante nos daría como resultado una fuerza electromotriz (en adelante "fem") igual a \overline{MC} (E_r). En una máquina síncrona en general, y en este ensayo en particular, para facilitar los cálculos, se suele despreciar la resistencia R , ya que la caída de tensión en esta, al paso de la corriente nominal, es de alrededor de un 1% de la tensión asignada. Luego, tenemos:

$$E_r = V + X_\sigma \cdot I \quad (15)$$

Atendiendo a la expresión anterior y a la figura 20, vemos que la caída de tensión provocada por la reactancia de dispersión es el tramo \overline{CB} . El tramo $\overline{OA'}$ corresponde a la excitación que se le aplica al sistema para obtener una corriente a plena carga en cortocircuito, por lo que este valor $\overline{OA'}$ se puede obtener del ensayo de cortocircuito. Del gráfico también tenemos que el tramo $\overline{DA} = \overline{OA'}$ y que la línea que une los puntos C y D es paralela a la recta del entrehierro, por lo que a partir de tan solo los puntos A y A' podemos definir el triángulo de Potier y por tanto hallar los valores de la reactancia de dispersión a través de la caída de tensión en esta y la excitación aplicada cuando se obtiene la tensión nominal de la máquina.

$$\overline{CB} = X_\sigma \cdot I \quad (16)$$

Una vez realizado el montaje y puesto en marcha el ensayo, hemos procedido a la toma de datos con el software "Gestión de ensayos eléctricos" del Dpto. de Ingeniería Eléctrica. Los mismos están disponibles en la Tabla 4 (Dicha tabla se puede consultar íntegramente en el archivo "Tabla 4.xls" dentro de TFG_00127_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII).

I_e	V	I
0,883	0	5,625
0,969	38	5,737
0,97	38	5,733
0,97	37	5,742
0,998	48	5,778
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮
2,697	452	5,715
2,7	452	5,809
2,709	453	5,813
2,776	458	5,813
2,853	463	5,697
2,92	466	5,697

Tabla 4. Datos de la curva de carga reactiva. [9]

Si hallamos la media aritmética de los valores obtenidos para la corriente de línea en la salida (esta debe ser constante y similar a la nominal) reflejados en la tabla 4 tenemos que es 5,76 A, un valor muy cercano a la corriente asignada de la misma (5,8 A), y transformando esta en la corriente de fase el resultado es $I_f=3,33$ A. Además, con dichos datos hemos obtenido el gráfico de la figura 21:

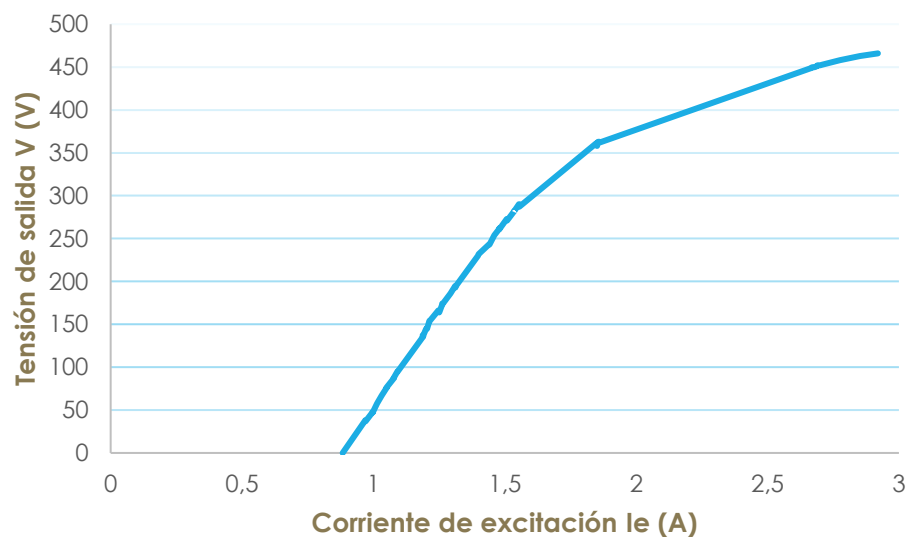


Figura 21. Curva reactiva. [9]

Si superponemos este último gráfico al de la curva de vacío, tenemos el resultado que vemos en la figura 22:

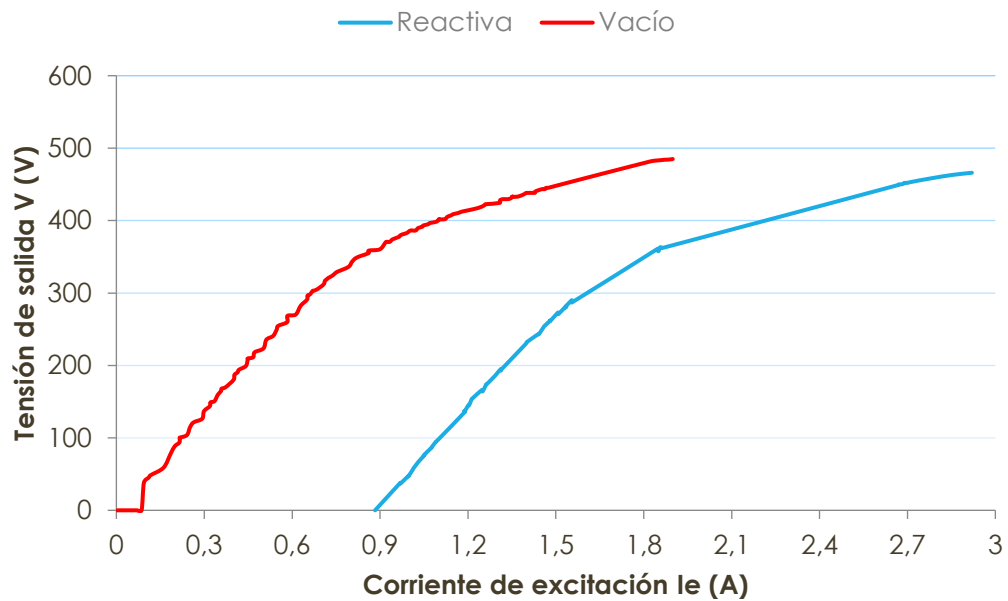


Figura 22. Curvas experimentales de vacío y de carga reactiva. [9]

Se puede apreciar lo similar de ambas curvas, lo cual es debido a que son producidas bajo el mismo circuito magnético. El desplazamiento en abscisas existente entre ambas no es más que el efecto de la fmm de reacción de inducido y a la fmm que hace falta para compensar la caída de tensión presentada en la reactancia de dispersión.

La construcción del triángulo de Potier podemos llevarlo a acabo de dos formas, una analítica y otra gráfica. Lo haremos de ambas formas y compararemos ambos resultados con el objetivo de apreciar la validez del ensayo.

4.4.1. Método gráfico. [1]

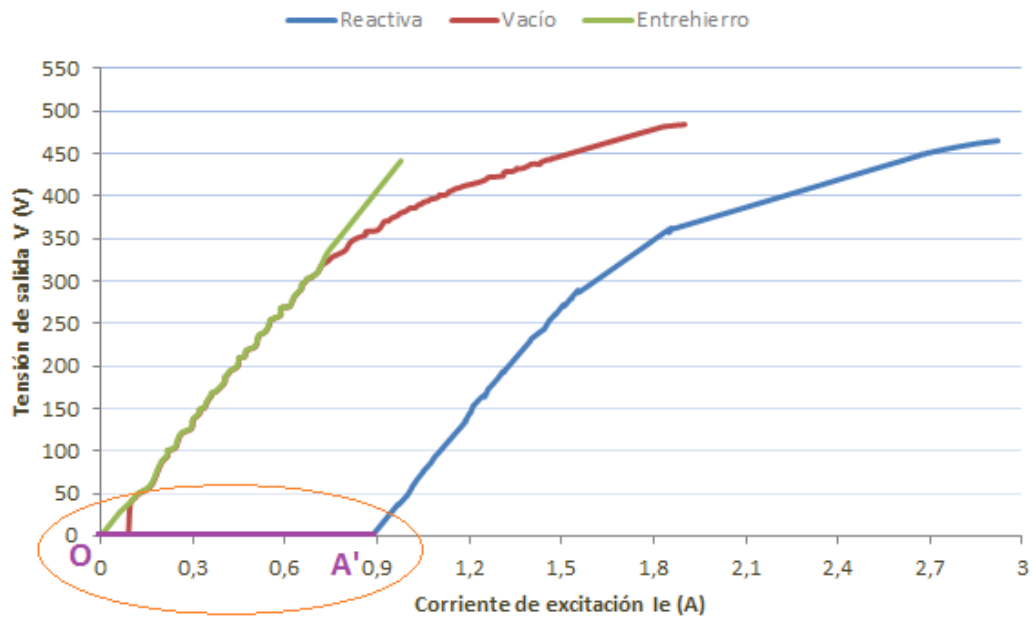


Figura 23. Vista general de todas las curvas y los puntos O y A'. [9]

Para este método, primero debemos multiplicar por 1,2 la tensión asignada (380 V), esto es $1,2 \times 380 = 456$ V. A continuación, hallamos el punto A sobre la curva reactiva.

Punto A \approx (2.76, 456)

Punto a partir del cual trazaremos una línea paralela al eje de abscisas que cruce todas las curvas y sobre la que estarán los puntos B y D. Como, según la figura 20, $\overline{DA} = \overline{OA'}$ llevamos ese tramo $\overline{OA'}$ sobre la paralela anterior anclado sobre el punto A. Tenemos entonces que:

Punto D \approx (1.88, 456)

Es desde ese punto D, desde el cual se hace pasar una línea paralela a la del entrehierro y que corte a la curva de vacío, punto al cual se le ha denominado C y que tiene unos valores aproximados de:

Punto C \approx (1.97, 487)

Finalmente, el punto B para completar el triángulo de Potier lo encontramos bajando perpendicularmente desde el punto C hasta que cruce con el tramo \overline{DA} , lo cual nos da como valores aproximados de dicho punto:

Punto B \approx (1.97, 456)

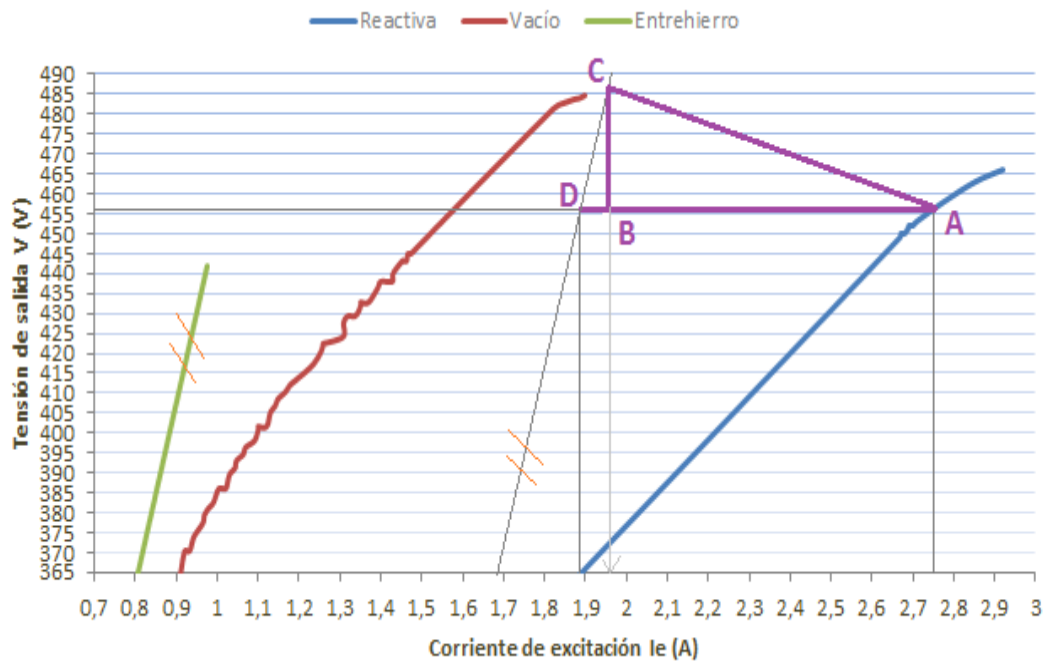


Figura 24. Triángulo de Potier. [9]

Es a partir de ahora cuando, con estos puntos, podemos hallar el valor de la reactancia de dispersión a través de la expresión (16):

$$\overline{CB} = X_{\sigma} \cdot I \rightarrow X_{\sigma} = \frac{\overline{CB}}{I_f} = \frac{31}{3,33} = \mathbf{9,31 \Omega}$$

4.4.2. Método analítico. [1]

En este método empezaremos hallando el punto A (Figura 20) a través de la expresión que determina la curva reactiva para la tensión asignada:

$$\text{Curva Reactiva: } V = 14,54 \cdot I_e^3 - 236,53 \cdot I_e^2 + 951,06 \cdot I_e - 678,31 \quad (17)$$

Entonces, atendiendo a que nuestra máquina es de polos salientes, debemos tomar un valor de la excitación equivalente a 1,2 veces la tensión nominal, por lo que:

$$1,2 \times V_n = 1,2 \times 380 \text{ V} = 456 \text{ V}$$

Si sustituimos el valor anteriormente hallado en (17) tenemos que:

$$V = 456 \text{ V} \rightarrow I_e = 2,69 \text{ A} \rightarrow \text{Punto A} = \mathbf{(2.69, 456)}$$

El punto D lo hallamos a través del segmento $\overline{AD} = \overline{OA'}$ que, según dijimos antes, es el valor de la excitación en el ensayo de cortocircuito para obtener la corriente nominal a la salida. Entonces vemos que, según (12), para $I_n = 3,35 \text{ A}$

(corriente de fase) $\rightarrow \overline{OA'} = \overline{AD} = I_e = 0,90$ A, así que, restamos a la componente 'X' del punto A la magnitud antes hallada para finalmente tener las coordenadas del punto D, esto es:

$$2,69 - 0,90 = 1,79 \rightarrow \text{Punto D} = (1,79, 456)$$

Ahora debemos operar para hallar el punto C, para lo cual debemos encontrar la paralela a la recta del entrehierro que pase por el punto D y buscar el punto de corte de esta con la curva de vacío, este punto de corte será el punto C buscado. Por pasos, esto es:

- a) La paralela a la recta del entrehierro tendrá la misma pendiente que esta y pasa por el punto D (pendiente obtenida de (13)):

$$V = 454,16 \cdot I_e - b \rightarrow b = 454,16 \cdot I_e - V = 454,16 \cdot 1,79 - 456 = 356,95$$

$$V = 454,16 \cdot I_e - 356,95 \quad (18)$$

- b) Ahora igualaremos las expresiones (11) y (18) cuyo corte de ambas curvas nos dará como resultado el punto C, tenemos entonces que:

$$147,5 \cdot I_e^4 - 435,7 \cdot I_e^3 + 206,18 \cdot I_e^2 + 485,05 \cdot I_e - 17,458 = 454,16 \cdot I_e - 356,95 \rightarrow$$

$$147,5 \cdot I_e^4 - 435,7 \cdot I_e^3 + 206,18 \cdot I_e^2 + 30,90 \cdot I_e + 339,49 = 0$$

Resolviendo la ecuación de 4º grado tenemos 4 raíces:

$$I_{e1} = 1,85 + 0,29i$$

$$I_{e2} = 1,85 - 0,29i$$

$$I_{e3} = -0,37 + 0,71i$$

$$I_{e4} = -0,37 - 0,71i$$

Vemos que las dos últimas raíces no son posibles debido a su carácter negativo en la parte real y de las 2 primeras cogeremos la primera por ser positiva en su parte real e imaginaria. Si bien, la parte imaginaria de las 2 primeras opciones está bastante cerca de cero (debería ser cero), lo cual se puede deber al carácter didáctico de dichos ensayos, lo que puede presentar pequeñas inexactitudes en la magnitud de los datos.

Sustituyendo esta solución en (18) tenemos que:

$$V = 454,16 \cdot 1,85 - 356,95 \rightarrow \text{Punto C} = (1,85, 483,25)$$

En el caso de este punto C, la componente 'Y' nos da el valor de la fem resultante E_r , de la que, atendiendo a la expresión (15), podemos obtener la caída de tensión en la reactancia de dispersión X_σ :

$$E_r - V = X_\sigma \cdot I = \overline{CB} = 483,25 - 456 = 27,25 \text{ V}$$

Y de esta última ecuación, tenemos entonces que la magnitud de la reactancia de dispersión es:

$$X_\sigma = \frac{\overline{CB}}{I_f} = \frac{27,25}{3,33} = 8,18 \Omega$$

4.5. REACTANCIA DE CUADRATURA Y DE EJE DIRECTO. ENSAYO DE DESLIZAMIENTO ^{[1][2]}

^[1]Se sabe que, en las máquinas síncronas de rotor cilíndrico, el espesor de su entrehierro es constante mientras que en las de polos salientes no lo es, siendo mayor en su eje transversal o de cuadratura, lo que produce una mayor reluctancia en este último que en el eje longitudinal o directo, entonces, deberíamos tener en cuenta dos reacciones de inducido, una para cada eje, teniendo así, una regulación de tensión más ajustada a la realidad. La figura 25 nos muestra la disposición de dichos ejes.

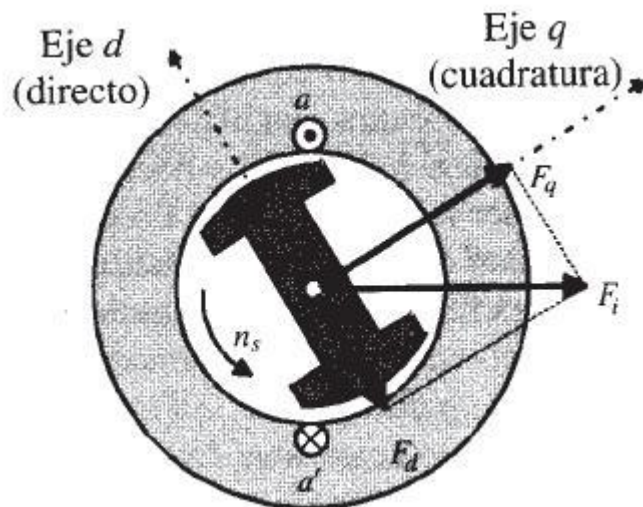


Figura 25. Eje de cuadratura y eje directo. ^[1]

Por tanto, a partir de estos ejes, también tendremos que:

$$I = I_d + I_q \quad X_s = X_d + X_q \quad (19)$$

Donde la corriente de reacción de inducido I es la suma de las corrientes de eje directo I_d y de eje de cuadratura I_q , caso análogo para la reactancia síncrona.

Para la determinación de las citadas reactancias, y por tanto, de la

reactancia síncrona final se acude al denominado ensayo de deslizamiento. Este ensayo consiste en conectar una fuente de tensión a los bornes de la máquina, aplicando a esta una tensión de pequeña magnitud que esté comprendida entre los valores correspondientes a la zona de trabajo lineal del alternador, a la vez que se hace girar su eje a una velocidad cercana a la de sincronismo, los valores más comunes, son lo que aportan un deslizamiento cercano al 1%, esto es:

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1} \approx 1\% \quad (20)$$

Donde n_1 es la velocidad síncrona de la máquina y n es la velocidad a la que la hacemos girar. En nuestro caso:

$$S = \frac{1500 - 1470}{1500} = 0,02 \equiv 2\%$$

Todo esto sin aplicar excitación alguna al sistema.

[2] La tensión aplicada con la fuente, generará unas tensiones y unas corrientes de reacción de inducido variables en el tiempo de forma cíclica como se muestra en la figura 26:

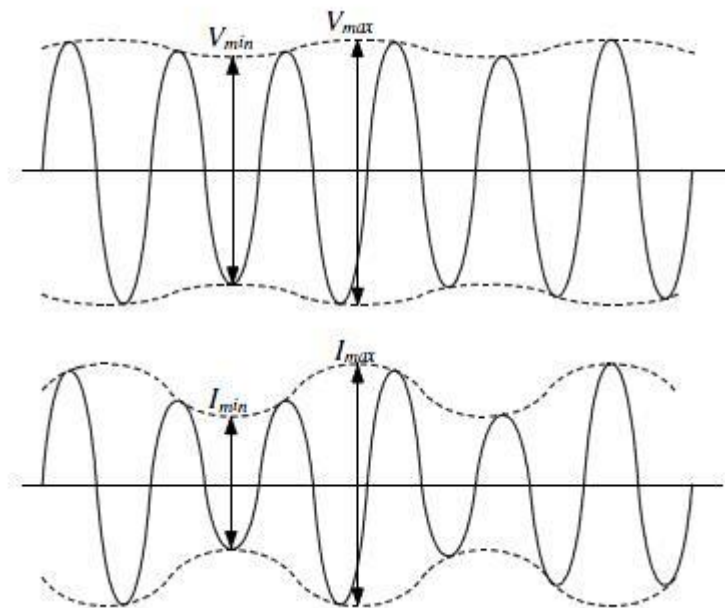


Figura 26. Tensiones y Corrientes de reacción de inducido. [2]

Con el valor de estas tensiones y corrientes podremos finalmente hallar las reactancias de eje directo y del eje de cuadratura según las expresiones:

$$X_d = \frac{V_{max.}}{I_{min}}, \quad X_q = \frac{V_{min}}{I_{max}} \quad (21)$$

El montaje para este ensayo de deslizamiento se puede ver en el

esquema de la figura 27:

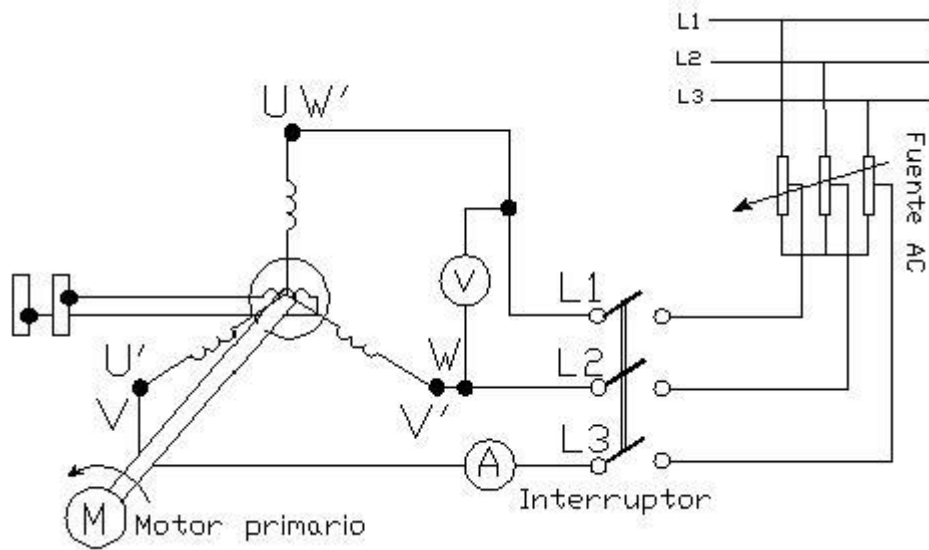


Figura 27. Esquema de montaje del ensayo de deslizamiento. [9]

Una vez realizado el montaje y puesto en marcha el ensayo, hemos procedido a la toma de datos con el software “Leer datos laboratorio Máquinas Eléctricas” del Dpto. de Ingeniería Eléctrica. Los mismos están disponibles en la Tabla 5 (Dicha tabla se puede consultar íntegramente en el archivo “Tabla 5.xls” dentro de TFG_00127_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII).

Tiempo (s)	Tensión Línea (V)	Tensión fase (V)	Corriente (A)
0	22,503	12,993	0,533
5,00E-05	22,851	13,193	0,549
0,0001	24,481	14,134	0,529
0,00015	26,550	15,329	0,597
0,0002	27,594	15,931	0,577
0,00025	29,718	17,158	0,560
⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮
0,7997	13,311	7,686	1,079
0,7998	14,996	8,658	1,071
0,7998	16,113	9,303	1,183
0,7999	17,303	9,990	1,158
0,7999	19,207	11,090	1,031
0,8	20,507	11,840	1,140

Tabla 5. Datos ensayo de deslizamiento. [9]

Al representar dichos datos sobre un gráfico, obtenemos el mostrado en la figura 28:

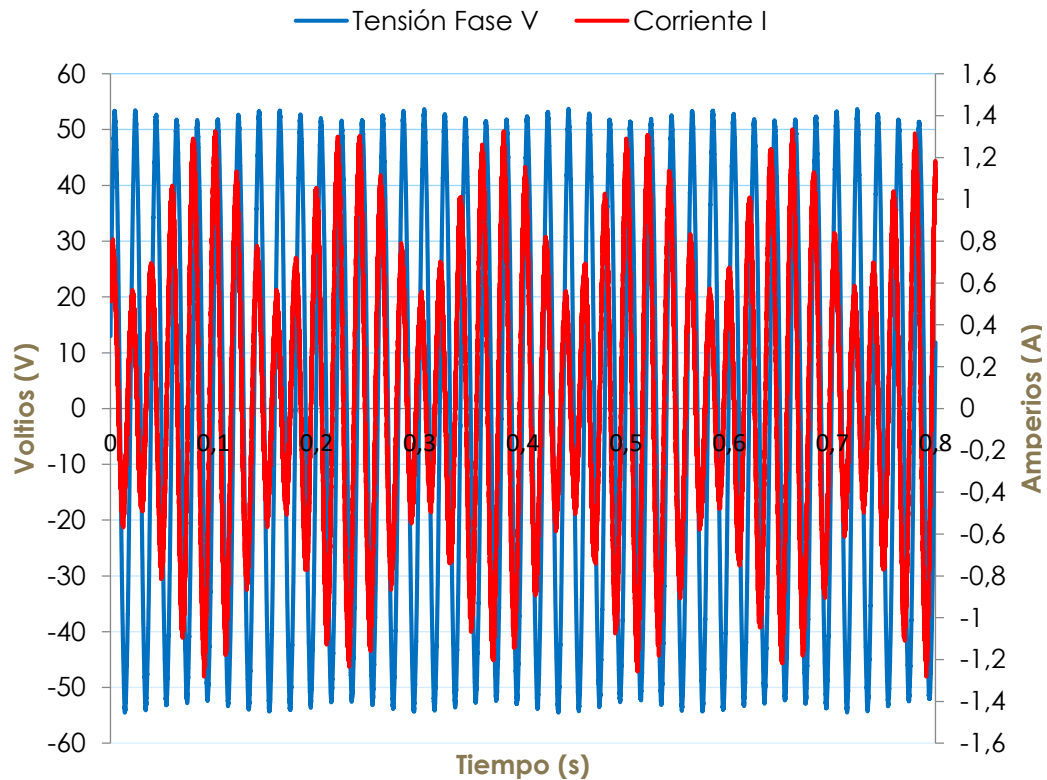


Figura 28. Curvas de la tensión y la corriente en el ensayo de deslizamiento. [9]

Como se mencionó antes, vemos como los valores de ambos parámetros, (Corriente y tensión), se repiten con carácter cíclico. A continuación, podemos apreciar, en una tabla, los valores máximo y mínimo de las envolventes de ambas sinusoides:

	Máximo	Mínimo	Tiempo de ciclo (s)
Corriente (A)	1,334	0,527	0,119
Tensión (V)	54,507	51,716	0,140

Con los valores anteriores y con las expresiones que relacionan las reactancias de eje directo y cuadratura con dichas tensiones y corrientes (21), podremos hallar sus magnitudes:

Reactancia de eje directo o longitudinal:

$$X_d = \frac{V_{max}}{I_{min}} = \frac{54,507}{0,527} = 103,43 \Omega$$

Reactancia de eje de cuadratura o transversal:

$$X_q = \frac{V_{min}}{I_{max}} = \frac{51,716}{1,334} = 38,77 \Omega$$

4.6. REACTANCIA TRANSITORIA Y SUBTRANSITORIA. ENSAYO DE CORTOCIRCUITO BRUSCO ^{[1][4]}

^[1]En el funcionamiento de la máquina síncrona, esta se llega a ver sometida a diferentes e inesperadas sollicitaciones, de entre las cuales, una de las más exigentes es la presencia de un cortocircuito estando la máquina en vacío con la tensión asignada en bornes. Estudiaremos entonces el comportamiento de la máquina en dicha situación para así, determinar las reactancias que en estas circunstancias aparecen, las cuales se denominan reactancia transitoria X'_s y reactancia subtransitoria X''_s .

En el ensayo de cortocircuito brusco se procede a conectar la salida de la máquina en cortocircuito de forma instantánea después de tenerla en funcionamiento de vacío. En esta situación, el comportamiento de la corriente en bornes será el que muestra la figura 29 para una de las fases. El dibujo en las otras dos fases diferirá del inicial puesto que se debe cumplir que la suma de las tres corrientes debe ser igual a cero en cualquier instante de tiempo.

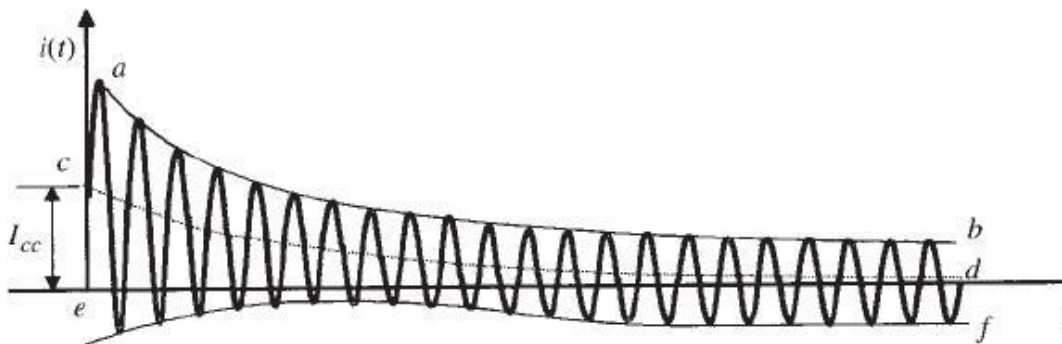


Figura 29. Onda de la corriente de cortocircuito brusco. ^[1]

Podemos observar que aparecen dos corrientes, una de tipo alterna cuyos picos máximos y mínimos están definidos por dos envolventes (\widehat{ab} y \widehat{ef}) que van decreciendo con el tiempo, y otra de tipo unidireccional (tramo \widehat{cd}) que está equidistante de las envolventes antes mencionadas, que es de igual magnitud pero opuesta a la alterna y que también decae según avanzan los segundos.

Si además situamos en un nuevo gráfico como eje de abscisas a la corriente unidireccional \widehat{cd} , tenemos que la componente alterna de la misma queda como muestra la figura 30:

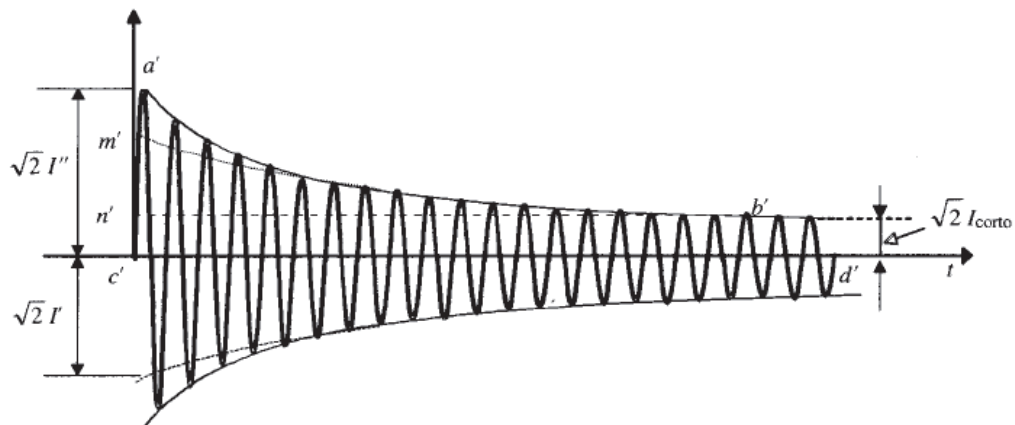


Figura 30. Componente simétrica de la corriente de cortocircuito. [1]

En esta figura el tramo $\widehat{c\hat{d}}$ pasa a ser $\widehat{c'\hat{d}'}$ y el $\widehat{a\hat{b}}$ en $\widehat{a'\hat{b}'}$. Como vemos, la envolvente ya tiene un perfil simétrico sobre la corriente unidireccional la cual se le conoce con el nombre de **componente simétrica de la corriente alterna de cortocircuito**.

Las apariciones de estas corrientes están relacionadas con la ley de Lenz que dice que ante el cambio del flujo habido en un instante de tiempo, el sistema reacciona con una fem's que a su vez provocan una serie de corrientes en los elementos afectados que tienden a oponerse a dichos cambios de flujo. En nuestro caso, se producen corrientes no solo en el inducido, sino también en el inductor y en el devanado amortiguador que intentan contrarrestar el cambio de flujo producido por el cortocircuito en el instante en que este aparece.

Analizando con más profundidad la componente simétrica, podremos dividir esta en 3 períodos:

- 1) Período subtransitorio: Es el instante inmediatamente posterior al cambio a cortocircuito. La magnitud de la corriente es bastante elevada y puede alcanzar del orden de unas 10 a 20 veces el valor de la corriente asignada, aunque decae muy rápidamente. [4]
- 2) Período transitorio: Tiempo después del subtransitorio y que acaba cuando la corriente adquiere un valor estable, permanente en el tiempo. Este período decae un poco más lento que el anterior. [1]
- 3) Período estacionario: En este período final, la corriente I_{ccp} alcanza su valor más estable, es permanente en el tiempo y su magnitud corresponde a la de excitación de la característica de cortocircuito, ver figura 31. [1]

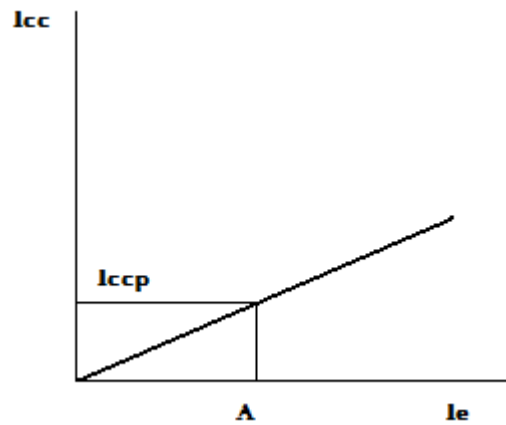


Figura 31. Corriente permanente de cortocircuito. [4]

Debido a la aparición de las corrientes mencionadas antes, deberemos tener en cuenta entonces las reactancias de dichos bobinados, que pasaremos a denominar reactancia de excitación X_e , reactancia de amortiguación X_a y reactancia de reacción de inducido X_p , además de la reactancia de dispersión X_σ que limita la corriente de cortocircuito en el estator durante el período subtransitorio.

En la figura 32 se puede apreciar el diagrama del circuito eléctrico equivalente con la disposición de dichas reactancias en la que podemos ver la asociación en paralelo de las reactancias de excitación, de amortiguación y de reacción de inducido, y en serie estas últimas con la de dispersión.

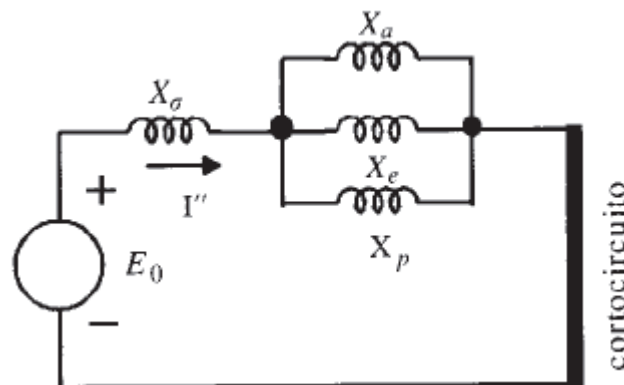


Figura 32. Circuito eléctrico equivalente con todas las reactancias. [1]

Finalmente, la asociación de estas reactancias nos da como resultado la **reactancia subtransitoria:**

$$X_s'' = X_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{X_a} + \frac{1}{X_e} + \frac{1}{X_p}}$$

Así que para obtener el valor eficaz de la corriente atendiendo a la figura 32 tenemos que:

$$I'' = \frac{E_0}{X_s''} \quad (22)$$

Y esta misma corriente atendiendo a la figura 30, será:

$$I'' = \frac{c' a'}{\sqrt{2}} \quad (23)$$

En este primer caso, la primera reactancia en desaparecer es la de amortiguación debido a que su resistencia es relativamente mayor que la de excitación, por lo que en el estado transitorio tiene un circuito equivalente similar al de la figura 33.

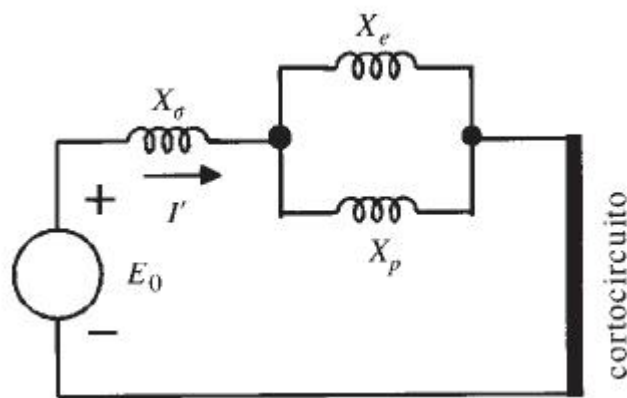


Figura 33. Circuito eléctrico equivalente en estado transitorio. [1]

En esta situación tenemos que el valor de la **reactancia síncrona transitoria** es:

$$X_s'' = X_\sigma + \frac{X_e \cdot X_p}{X_e + X_p}$$

Entonces tenemos que el valor eficaz de la corriente transitoria es:

$$I' = \frac{E_0}{X_s''} \quad (24)$$

Y esta misma corriente atendiendo a la figura 30, será:

$$I' = \frac{c' m'}{\sqrt{2}} \quad (25)$$

Y por último desaparecerá la reactancia de excitación dando lugar al régimen permanente en la cual tenemos la reactancia síncrona compuesta por la de dispersión y de reacción de inducido hallada en el apartado "DETERMINACIÓN DE LA REACTANCIA SÍNCRONA. MÉTODO DE BEHN-

ESCHENBURG".

Una vez realizado el montaje inicial (análogo al montaje del ensayo de vacío) y puesto en marcha el ensayo, hemos procedido a la toma de datos con el software "Leer datos laboratorio Máquinas Eléctricas" del Dpto. de Ingeniería Eléctrica. Los mismos están disponibles en la Tabla 6 (Dicha tabla se puede consultar íntegramente en el archivo "Tabla 6.xls" dentro de TFG_00127_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII).

Tiempo (s)	Corriente Línea (A)	Corriente Fase (A)
0,4749	-0,234	-0,135
0,47495	-0,128	-0,074
0,475	-0,122	-0,070
0,47505	-0,081	-0,047
0,4751	-0,178	-0,103
0,47515	-0,100	-0,058
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮
0,59975	0,267	0,155
0,5998	0,140	0,081
0,59985	0,246	0,142
0,5999	0,264	0,153
0,59995	0,326	0,188
0,6	0,241	0,139

Tabla 6. Datos del ensayo de cortocircuito brusco. ^[9]

Si representamos los datos obtenidos a partir del ensayo de cortocircuito brusco sobre un gráfico, tenemos lo que nos muestra la figura 34.

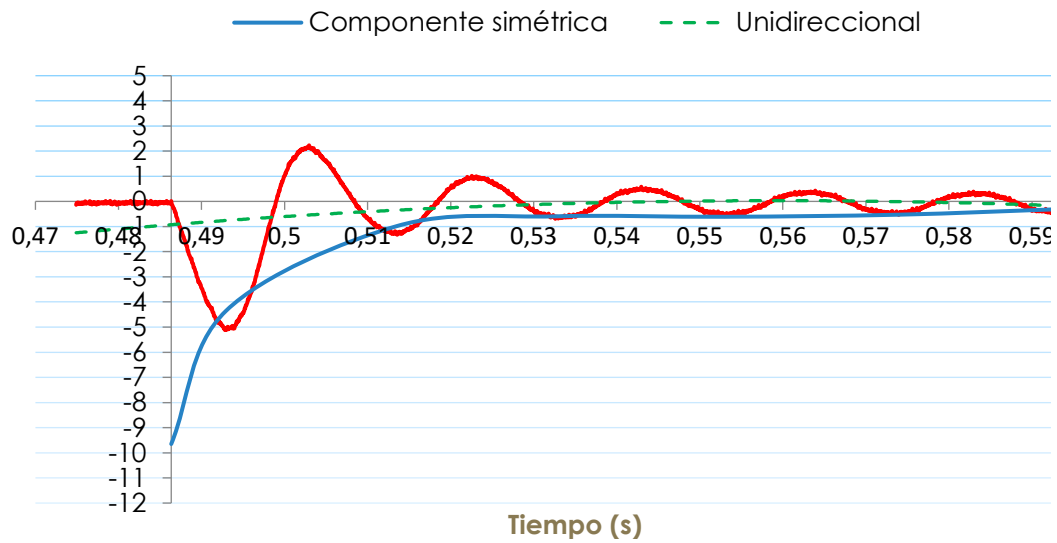


Figura 34. Gráfico del ensayo de cortocircuito brusco para una fase. [9]

En este gráfico podemos ver claramente el paso de circuito abierto a cortocircuito sobre los 0,48 segundos y como este cierre brusco del circuito provoca movimientos de grandes magnitudes en la corriente instantes después, para que, a partir de los 0,53 segundos aproximadamente, la corriente tome su nivel permanente y estable en el tiempo.

En el gráfico de la figura 35, tenemos la llamada componente simétrica de la corriente alterna de donde se puede obtener según indica la figura 30, las corrientes subtransitoria y transitoria del circuito.

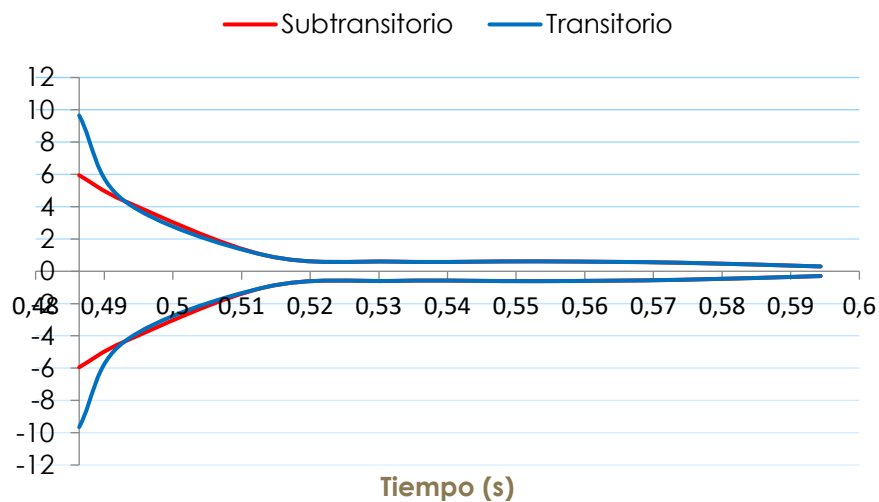


Figura 35. Componente simétrica de la corriente alterna. [9]

Reactancia subtransitoria:

Según (23) y la figura 30, tenemos que:

$$I'' = \frac{c'a'}{\sqrt{2}} = \frac{9,65}{\sqrt{2}} = 6,82 \text{ A}$$

Y ahora, usamos la expresión (22) para hallar la reactancia buscada junto con el valor de la E_0 con el que se realizó el ensayo y que tiene una magnitud de 88,06 V:

$$I'' = \frac{E_0}{X_s''} \rightarrow X_s'' = \frac{E_0}{I''} = \frac{88,06}{6,82} = \mathbf{12,91 \Omega}$$

Reactancia transitoria:

Según (25) y la figura 30, tenemos que:

$$I' = \frac{c'm'}{\sqrt{2}} = \frac{5,95}{\sqrt{2}} = 4,20 \text{ A}$$

Y ahora, usamos la expresión (24) para hallar la reactancia buscada junto con el valor de la E_0 con el que se realizó el ensayo y que tiene una magnitud de 88,06 V:

$$I' = \frac{E_0}{X_s'} \rightarrow X_s' = \frac{E_0}{I'} = \frac{88,06}{4,20} = \mathbf{20,93 \Omega}$$

4.7. COMPONENTES SIMÉTRICAS. REACTANCIA SÍNCRONA DIRECTA, INVERSA Y HOMOPOLAR [5]

Según el teorema de Fontescue, "Un sistema trifásico asimétrico, puede descomponerse en 3 sistemas simétricos: uno de secuencia directa, otro de secuencia indirecta y un tercero homopolar".

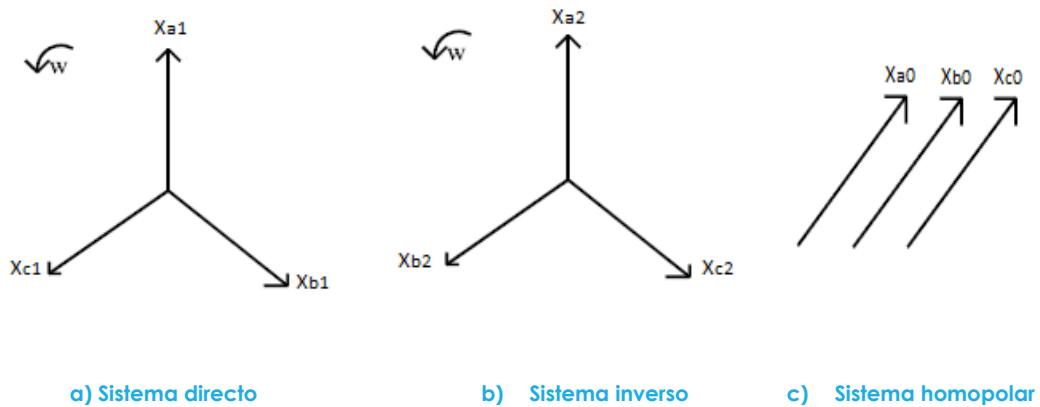


Figura 36. Componentes simétricas. [8]

- a) Sistema directo: Tres vectores giratorios de igual módulo separados un mismo ángulo (120°) entre sí cuya secuencia de paso o de fases por un punto de referencia es positiva, suelen distinguirse por el subíndice '1'.
- b) Sistema inverso: Tres vectores giratorios de igual módulo separados un mismo ángulo (120°) entre sí cuya secuencia de paso o de fases por un punto de referencia es negativa, suelen distinguirse por el subíndice '2'.
- c) Sistema de secuencia nula u homopolar: Se compone de 3 vectores en fase de igual módulo separados un mismo ángulo entre sí (0°) cuya secuencia se toma como nula, se les suele distinguir por el subíndice '0'.

Este teorema se aplica como fundamento en sistemas desequilibrados o asimétricos de tensiones, corrientes, reactancias y otras magnitudes. En el caso de las magnitudes de las citadas reactancias, sus valores directo, indirecto y homopolar para un período en régimen permanente son:

4.7.1. Reactancia síncrona directa [5]

En este caso, su valor coincide con el de la reactancia síncrona saturada, la cual se ha determinado en el ensayo "DETERMINACIÓN DE LA REACTANCIA SÍNCRONA. MÉTODO DE BEHN-ESCHENBURG".

$$X_{U1} = X_s \text{ (saturada)} = 105,61 \Omega$$

4.7.2. Ensayo para la determinación de la reactancia síncrona homopolar [4]

El ensayo para la determinación de esta reactancia consiste en hacer girar la máquina a la velocidad nominal de sincronismo con el devanado inductor cortocircuitado y las tres fases del devanado inducido conectadas en serie según muestra la figura siguiente.

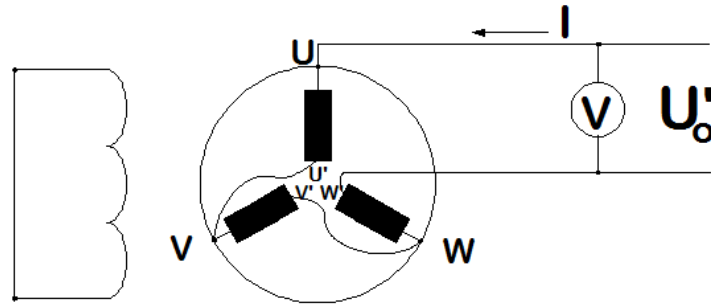
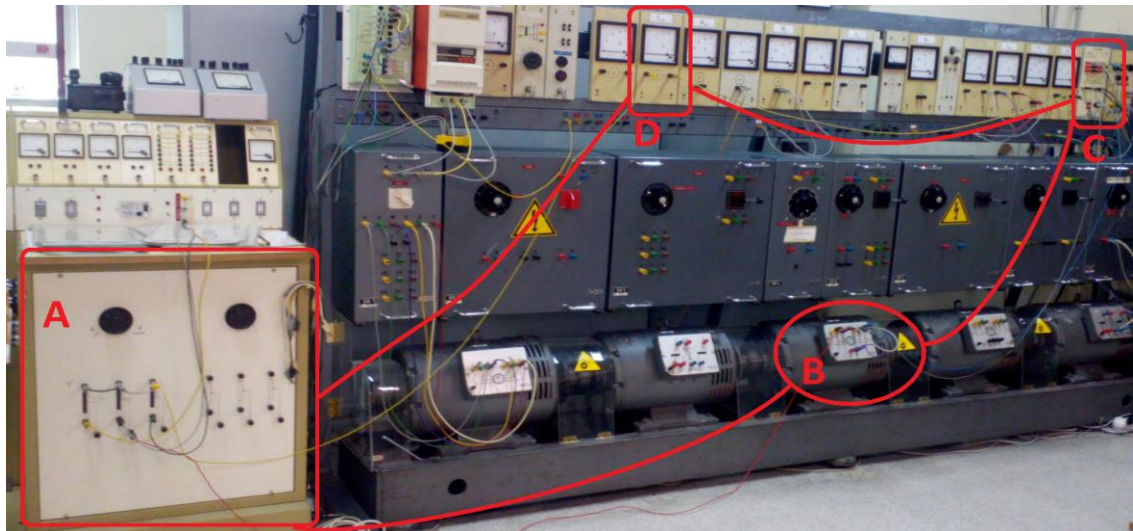


Figura 37. Esquema de montaje para determinar la reactancia homopolar. [4]



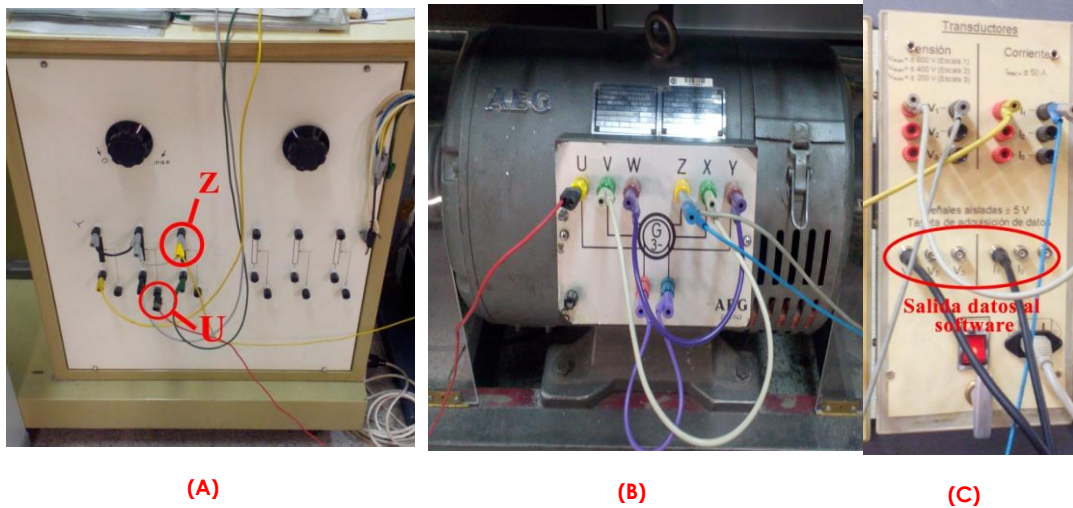


Figura 38. Montaje para determinar la reactancia homopolar. [9]

En el montaje anterior llevado a cabo en el laboratorio, tenemos los siguientes elementos:

- A → Rectificador trifásico de corriente cc/ca.
- B → Conexiones en la máquina síncrona donde se puede observar la conexión en serie de los bobinados del inducido.
- C → Transductor de señal para la transmisión de datos al software “Leer datos laboratorio Máquinas Eléctricas” del Dpto. de Ingeniería Eléctrica
- D → Amperímetro.

Aplicando al circuito monofásico del inducido una tensión creciente se leen los valores de esta tensión y los correspondientes de la corriente que absorbe el inducido hasta un valor de I igual, o lo más próximo posible, a la corriente nominal I_n .

En estas condiciones, si U'_0 es la tensión correspondiente a I_n , la reactancia homopolar es igual a:

$$X_0 = \frac{U'_0}{3 \cdot I_n} \quad (26)$$

Una vez realizado el montaje y puesto en marcha el ensayo, hemos procedido a la toma de datos con el software “Leer datos laboratorio Máquinas Eléctricas” del Dpto. de Ingeniería Eléctrica. Los mismos están disponibles en la Tabla 7 (Dicha tabla se puede consultar íntegramente en el archivo “Tabla 7.xls” dentro de TFG_00127_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII).

Tiempo (s)	Tensión (V)	Corriente (A)
0	27,363	-3,325
8,00E-05	26,132	-3,325
0,00016	26,132	-3,325
0,00024	24,257	-3,222
0,00032	23,671	-3,168
0,0004	23,027	-3,271
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮
0,0396	29,824	-3,374
0,0396	29,238	-3,271
0,0397	29,824	-3,271
0,0398	28,593	-3,271
0,0399	27,363	-3,222
0,04	26,132	-3,222

Tabla 7. Datos del ensayo homopolar. [9]

Si representamos los datos obtenidos a partir del ensayo homopolar sobre un gráfico, tenemos lo que nos muestra la figura 39.

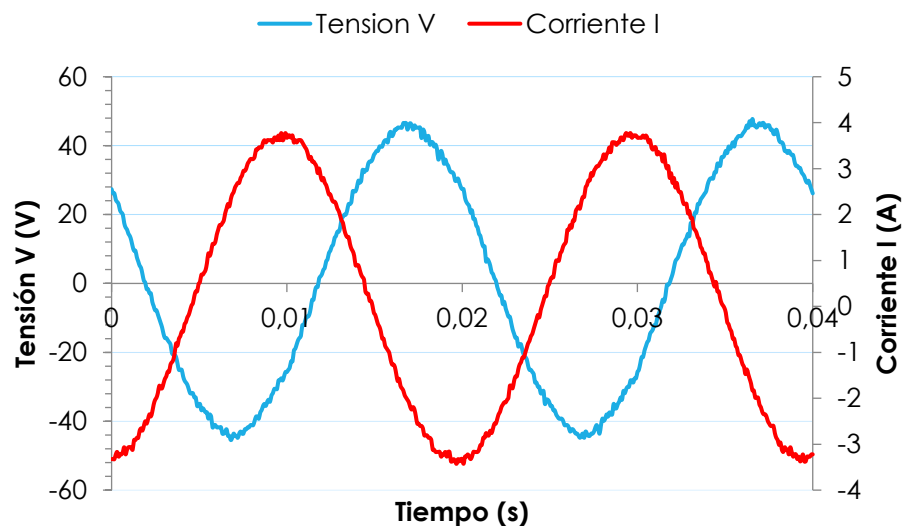


Figura 39. Gráfico del ensayo homopolar. [9]

Por lo tanto, a partir de la tabla de datos obtenidos y del gráfico anterior obtenemos los valores exactos de la corriente y tensión necesarios para que, atendiendo a la expresión mostrada en (26), tengamos el valor de la reactancia homopolar:

$$X_0 = \frac{U'_0}{3 \cdot I_n} = \frac{38,67}{3 \cdot 3,36} = 3,84 \Omega$$

4.7.3. Ensayo de cortocircuito asimétrico permanente. Reactancia síncrona inversa [4]

También llamada impedancia de secuencia negativa, esta puede determinarse a partir del ensayo de cortocircuito asimétrico permanente entre dos fases midiendo la corriente de cortocircuito y la tensión entre las dos fases cortocircuitadas y el extremo de la fase libre, todo esto con el valor de la excitación constante y la máquina girando a velocidad nominal. El montaje lo muestra la siguiente figura:

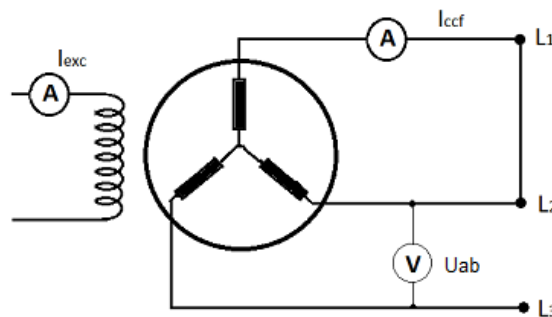


Figura 40. Esquema del ensayo de cortocircuito asimétrico permanente. [4]

Siendo I_{ccF} la corriente de cortocircuito fase-fase correspondiente a la tensión U_{ab} . Puesto que, como hemos dicho en apartados anteriores, la resistencia la podemos despreciar debido a lo pequeño de su valor frente la reactancia, entonces tenemos que:

$$X_{(2)} \sim Z_{(2)} = \frac{U_{ab}}{\sqrt{3} \cdot I_{ccF}} \quad (27)$$

Una vez realizado el montaje y puesto en marcha el ensayo con un valor de la excitación entre $I_e = [0.7, 0.8]$ A, hemos procedido a la toma de datos con el software "Leer datos laboratorio Máquinas Eléctricas" del Dpto. de Ingeniería Eléctrica. Los mismos están disponibles en la Tabla 8 (Dicha tabla se puede consultar íntegramente en el archivo "Tabla 8.xls" dentro de TFG_00127_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII).

Tiempo (s)	Tensión (V)	Corriente (A)
0	65,625	4,697
8,00E-05	64,394	4,443
0,00016	64,980	4,492
0,00024	61,933	4,389
0,00032	58,242	4,389
0,0004	57,597	4,233
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮
0,0396	62,519	4,902
0,0396	63,75	4,799
0,0397	64,980	4,697
0,0398	64,980	4,648
0,0399	63,75	4,594
0,04	64,980	4,594

Tabla 8. Datos del ensayo de cortocircuito asimétrico. [9]

Si representamos los datos obtenidos a partir del ensayo de cortocircuito asimétrico sobre un gráfico, tenemos lo que nos muestra la figura 41.

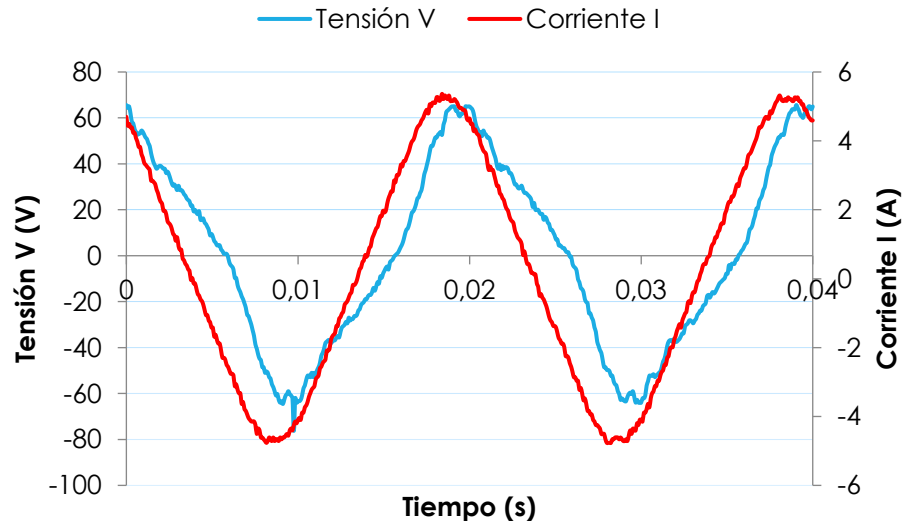


Figura 41. Ensayo de cortocircuito asimétrico. [9]

Por lo tanto, a partir de la tabla de datos obtenidos y del gráfico anterior obtenemos los valores pico de la tensión y de la corriente para que, atendiendo a la expresión mostrada en (27), tengamos el valor de la reactancia inversa:



$$X_{(2)} = \frac{U_{ab}}{\sqrt{3} \cdot I_{ccF}} = \frac{64,98}{\sqrt{3} \cdot 5,37} = \mathbf{6,99 \Omega}$$

5. VALORES POR UNIDAD (VPU) [1][6]

En este apartado vamos a proceder a hallar las magnitudes de las reactancias antes citadas en los diversos ensayos realizados en su correspondiente valor por unidad (vpu) y a compararlos con los valores de referencia a nivel internacional.

Como valores base para determinar los vpu tomaremos la tensión y la potencia asignadas de nuestra máquina síncrona, estos son:

$$V_n = V_b = 380 \text{ V} \quad S_n = S_b = 3 \text{ KVA}$$

A partir de estos valores de referencia podremos obtener tanto la corriente base I_b como la reactancia base X_b (recordemos que debido a lo despreciable de la resistencia $Z_b \sim X_b$) a través de:

$$I_n = I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot V_b} = \frac{3000}{\sqrt{3} \cdot 380} = 4,56 \text{ A} \quad (28)$$

$$Z_n = Z_b \sim X_b = \frac{\sqrt{3} \cdot V_b^2}{S_b} = \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot I_b^2} = \frac{\sqrt{3} \cdot 380^2}{3000} = 83,37 \Omega \quad (29)$$

Una vez obtenidos los valores base anteriores, procedemos a hallar las magnitudes en vpu de las diferentes reactancias mediante la siguiente expresión:

$$X_{vpu} = \frac{X}{X_b} \quad (30)$$

Donde "X" es el valor de las reactancias halladas en los diversos ensayos llevados a cabo en este documento. Por lo tanto tenemos que:

Reactancia síncrona no saturada:

$$X_{vpu}(\text{No saturada}) = \frac{122,08}{83,37} = 1,46$$

Reactancia síncrona saturada:

$$X_{vpu}(\text{Saturada}) = \frac{105,61}{83,37} = 1,27$$

Reactancia de dispersión:

Método Gráfico

Método Analítico

$$X_{\sigma-vpu} = \frac{11,41}{83,37} = 0,11$$

$$X_{\sigma-vpu} = \frac{8,18}{83,37} = 0,05$$

Reactancia de eje directo:

$$X_{d-vpu} = \frac{103,42}{83,37} = 1,24$$

Reactancia de eje de cuadratura:

$$X_{q-vpu} = \frac{38,77}{83,37} = 0,47$$

Reactancia transitoria:

$$X'_{s-vpu} = \frac{20,93}{83,37} = 0,25$$

Reactancia subtransitoria:

$$X''_{s-vpu} = \frac{12,91}{83,37} = 0,15$$

Reactancia directa (equivalente a la reactancia síncrona saturada):

$$X_{1-vpu} = \frac{105,61}{83,37} = 1,27$$

Reactancia inversa:

$$X_{2-vpu} = \frac{6,99}{83,37} = 0,08$$

Reactancia homopolar:

$$X_{0-vpu} = \frac{3,84}{83,37} = 0,046$$

Una vez hallados los vpu de las diferentes reactancias, estas se pueden ver en la siguiente tabla comparativa junto a las referencias internacionales.

Reactancia		Intervalo normalizado	Valor experimental obtenido
Reactancia síncrona [1]		0,8 - 1,2	1,27
Reactancia de dispersión [1]	Método gráfico	0,1 - 0,2	0,11
	Método analítico		0,1
Reactancia de eje directo (sin sat) [6]		0,6 - 1,5	1,24
Reactancia de eje de cuadratura [6]		0,4 - 0,8	0,47
Reactancia transitoria [1]		0,2 - 0,35	0,25
Reactancia subtransitoria [1]		0,13 - 0,3	0,15
Reactancia directa [1]		0,8 - 1,2	1,27
Reactancia inversa [1]		0,15 - 0,3	0,08
Reactancia homopolar [1]		0,04 - 0,2	0,046

Tabla 9. Reactancias en vpu normalizados vs. valores obtenidos en los ensayos. [9]

Como se puede observar, los valores obtenidos en los diversos ensayos llevados a cabo para la determinación de las reactancias buscadas, se encuentran dentro de los intervalos de referencia seguidos a nivel internacional, a excepción de la reactancia de dispersión en su método analítico y de la síncrona inversa en cuyos casos es probable que estos valores fuera de rango se deban al carácter didáctico tanto, de la máquina síncrona, como de las herramientas usadas en los ensayos correspondientes. Carácter didáctico este que ya se advirtió en el último párrafo del apartado "CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA MÁQUINA SÍNCRONA Y ELEMENTOS DE ENSAYO".



6. NORMALIZACIÓN TÉCNICA [2]

Todos los ensayos llevados a cabo en este documento han sido supeditados a la norma EN 60034-4:2008 con título "Máquinas eléctricas rotativas. Parte 4: Métodos para la determinación de las magnitudes de las máquinas síncronas a partir de los ensayos" del Comité Electrotécnico Internacional (CEI), que ha sido adoptado como norma española y se encuentra disponible para su consulta en AENOR. Esta norma se encuentra en un archivo .pdf con el mismo nombre y se puede consultar íntegramente dentro de TFG_00127_anejos.zip subido a la plataforma Mi TFG de la EII.

Según el Artículo 11 del RD2200/1995 el organismo de normalización debe cumplir, entre otras obligaciones, con disponer de las normas actualizadas para su consulta gratuita por parte del público que así lo necesite. A este efecto, AENOR dispone de oficinas físicas para este cometido en las capitales de las comunidades autónomas en todo el territorio nacional, en las cuales se pueden consultar la/s norma/s íntegra/s en formato papel o digital. En el caso de Valladolid, está sita en:

c/ Marina Escobar, 2 – entreplanta

47001 Valladolid

Tel: 983 549 740

dcyl@aenor.es

7. CONCLUSIONES

En los diversos esquemas de ensayo quedan patente las reactancias donde se producen las mayores pérdidas de flujo magnético útil, estas son, las reactancias síncronas saturada y no saturada, la reactancia directa y la reactancia de eje directo con valores que superan los 100 Ω . En el orden de magnitudes medio-bajas tenemos a la reactancia de eje de cuadratura y por debajo de esta a la reactancia transitoria con valores cercanos a los 38 y 20 Ohmios respectivamente. Y finalmente tenemos a las de menor orden que son las reactancias de dispersión, la homopolar, la inversa y la subtransitoria cuyos valores rondan los 10 Ω .

También se pone de manifiesto la validez del módulo para la plataforma CompactRIO de National Instruments usada como dispositivo de medida y adquisición de datos, así como las aplicaciones de software "Gestión de Ensayos Eléctricos" y "Leer Datos Laboratorio Máquinas Eléctricas".

La aplicación de los ensayos desarrollados de cara a la máquina síncrona del laboratorio de Máquinas Eléctricas de la EII deja demostrada la validez de los modelos habituales elegidos para caracterizar las diferentes reactancias de la citada máquina. Dicha validez se ve respaldada por los valores experimentales hallados, que en su magnitud en vpu, podemos ver en la tabla 9 de la página 61.

La norma EN 60034-4:2008 con título "Máquinas eléctricas rotativas. Parte 4: Métodos para la determinación de las magnitudes de las máquinas síncronas a partir de los ensayos" del Comité Electrotécnico Internacional (CEI) usada para la elaboración de este TFG es la última actualización de la norma EN 60034-4:1995 de idéntico título.





8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Máquinas eléctricas, 5ta Edición, Jesús Fraile Mora.
- [2] EN 60034-4:2008 Máquinas eléctricas rotativas. Parte 4: Métodos para la determinación de las magnitudes de las máquinas síncronas a partir de los ensayos. (Ratificado por AENOR en Octubre de 2011).
- [3] Teoría de las máquinas de corriente alterna, Alexander S.Langsdorf.
- [4] Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas, Tomo IV, Máquinas síncronas y motores de c.a. de colector, M. Cortés Cherta.
- [5] Cátedra: Electrotécnia II-Método de las componentes simétricas, Versión 1, año 2014, Universidad Tecnológica Nacional FRRo, Alberto G. Martínez.
- [6] Electrical Transmission and Distribution Reference Book de la Westinghouse Electric Corporation.
- [7] Generación sistemática de un modelo de gestión y control de ensayos de máquinas eléctricas para la determinación de sus parámetros característicos y su implementación en un entorno industrial. Tesis doctoral. Moisés San Martín Ojeda.
- [8] Sistemas desequilibrados. Teoría general de las componentes simétricas. Juan Antonio Martínez.
- [9] Elaboración propia.
- [10] Electrotecnia V. Máquinas eléctricas sincrónicas. J. Pichoir. Ed. Marcombo.
- [11] Power Systems Analysis. Second Edition. Arthur R. Bergen. Ed. Prentice Hall.