

Comité de Estudio A3 - Equipamiento de Alta Tensión

**MODELO DE UN CONVERTIDOR ASINCRÓNICO DE FRECUENCIA PARA LA
REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE TENSIÓN INDUCIDA EN
LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN.**

I.A. CALLE*
IITREE-LAT
Argentina

M.B. BARBIERI
IITREE-LAT
Argentina

P.L. ARNERA
IITREE-LAT
Argentina

Resumen – El Convertidor Asincrónico de Frecuencia (CAF) está conformado por una Máquina Asincrónica, de diseño especial, que se utiliza para la realización de ensayos de tensión inducida en Laboratorios de AT. Esta máquina convierte la frecuencia de la tensión a aplicar sobre el objeto bajo prueba. Un motor asincrónico sirve como máquina de impulso de la anterior y una serie de elementos accesorios son destinados a la operación y control del equipo.

Sobre esta máquina se realizaron mediciones, las cuales permiten determinar parámetros del modelo equivalente implementado en el programa ATP.

La validación del modelo fue hecha a partir de registros de tensiones, corrientes temporales y contenido armónico obtenidos durante distintos ensayos realizados sobre el CAF, como por ejemplo ensayo de cortocircuito a rotor bloqueado, ensayo de vacío y ensayo con carga balanceada y desbalanceada

Este modelo permite predecir el comportamiento del CAF cuando se realizan ensayos de tensión inducida de transformadores de potencia y de tensión. En estos ensayos el objeto bajo prueba y el sistema de elevación de tensión, su compensación y medición pueden presentar un comportamiento capacitivo y provocar la autoexcitación del CAF. Disponer de su modelo permite realizar la simulación del circuito correspondiente al respectivo ensayo, previendo situaciones que deberán evitarse

Palabras clave: Ensayo de tensión inducida – Alta Tensión – Convertidor Asincrónico de Frecuencia – Modelado y Validación.

1 INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presentan los resultados de los estudios realizados para el modelado de un sistema Convertidor Asincrónico de Frecuencia (CAF), utilizado para realizar ensayos de tensión inducida en transformadores.

El citado sistema está conformado por una Máquina Asincrónica (MA), de diseño especial, que sirve para realizar la conversión de frecuencia de la tensión a aplicar en el ensayo. Un motor asincrónico sirve como máquina de impulso de la anterior y una serie de elementos accesorios son destinados a la operación y control del equipo.

Para poder modelar el equipo descrito, se realizaron una serie de ensayos con el fin de determinar los parámetros característicos del mismo. A partir de ello, se elaboró y validó un modelo de simulación con el programa ATPDraw versión 5.0p7, con el fin de estudiar las diferentes condiciones de operación posibles.

2 ENSAYOS SOBRE EL CONVERTIDOR ASINCRÓNICO DE FRECUENCIA

2.1 Verificación de los datos nominales

En la Tabla I se muestran los datos nominales del motor de impulso. En la Tabla II se muestran los datos nominales del CAF.

Se realizó la puesta en marcha de la máquina, con la finalidad de comprobar las prestaciones de la misma. La prueba consistió en llevar la máquina a velocidad nominal, impulsada por el motor asincrónico, el que tiene un sistema de arranque por medio de un reóstato que produce la variación de resistencia del rotor. Una vez alcanzada la velocidad nominal, se elevó la tensión de excitación hasta el valor nominal.

Seguidamente se midió la frecuencia de la tensión de salida, dando como resultado 98,7 Hz. Este valor de frecuencia se debió a que se conectó la excitación de forma tal que generó el campo giratorio en el mismo sentido de rotación del rotor. Al invertir dos de las fases de la excitación, se obtuvo una tensión de salida de frecuencia próxima a los 200 Hz. Los resultados obtenidos, se ven en la Tabla III, en la que se indican las mediciones realizadas sobre el estator (Tensión de excitación- $U_{exc}(3\phi)$, Corriente de vacío- $I_0(1\phi)$ y Potencia de vacío- $P_0(3\phi)$), así como las mediciones realizadas sobre el rotor (Tensión- $U_{rot}(3\phi)$ y Frecuencia- f).

TABLA I. DATOS DEL MOTOR ASINCRÓNICO TRIFÁSICO

Nº de fases	3
Potencia	40 CV
Tensión de Rotor	D 220 V
	Y 380 V
Frecuencia	50 Hz
Velocidad	1450 rpm
Tipo de Servicio	Permanente

TABLA II. DATOS DEL GENERADOR ASINCRÓNICO TRIFÁSICO

Nº de fases	3
Nº de Polos	12
Potencia	30 kW
Cos ϕ	0,8
Tensión de Estator	500 V
Frecuencia	50 Hz
Velocidad	1450 rpm
Tensión de Rotor	No especificada
Frecuencia	200 Hz
Tipo de Servicio	Permanente

TABLA III. MEDICIONES REALIZADAS

Mediciones sobre el estator			Mediciones sobre el rotor	
$U_{exc}(3\phi)$	$I_0(1\phi)$	$P_0(3\phi)$	$U_{rot}(3\phi)$	f
250 [V]	17,5 [V]	730 [W]	518 [V]	198,6 [Hz]

Donde:

3ϕ indica cantidades de línea;

1ϕ indica cantidades de fase;

I_0 y P_0 indica corriente y potencia de vacío.

2.2 Determinación de los parámetros del circuito equivalente

Con el objetivo de determinar los parámetros del circuito equivalente monofásico del CAF, se realizaron ensayos en vacío y en corto circuito. Estos se hicieron siguiendo los lineamientos indicados por la norma IEEE Std 112, en los puntos 5.5 y 5.9 [1].

2.2.1 Ensayo de vacío

Este ensayo fue hecho con el rotor girando a velocidad nominal, movido por la máquina de impulso, y con sus terminales abiertos. La norma indica que la tensión de ensayo debe variarse desde el 125 % de la tensión nominal de la máquina ensayada, descendiendo hasta que la corriente de excitación se incremente por la pérdida de cupla. Como esto último no ocurre en este caso, porque la velocidad del CAF está impuesta por la máquina de impulso, la tensión de excitación se varió desde el 4 % hasta el 125 % de la tensión nominal.

De esta forma, se realizó la prueba en dos condiciones:

1. Con el campo giratorio en sentido contrario al movimiento del rotor, resultando un deslizamiento $s = 4$.
2. Con el campo giratorio en igual sentido que la rotación del rotor, resultando un deslizamiento $s = 2$.

En la Fig. 1 se representa el circuito equivalente correspondiente al estado de vacío, del que se desprecia R_m . La curva de vacío obtenida de este ensayo se muestra en la Fig. 2.

Se observa en esta curva que, a pesar de haber elevado la tensión un 25 % por encima de la tensión nominal, no se llega a la zona de saturación de la máquina. Por lo tanto, en las condiciones de trabajo nominales, la máquina se comporta en forma lineal.

Como resultado de estos ensayos se obtuvo la reactancia total de vacío ($X_{10} = X_1 + X_m$), como promedio de los valores calculados para los distintos estados de excitación, en las dos condiciones planteadas. Este

promedio pudo ser realizado debido a la escasa dispersión presente en el conjunto de valores obtenidos. El resultado se ve en la Tabla IV.

También se determinó la relación de transformación, entre estator y rotor, en las dos condiciones antes citadas y a rotor estático, cuyo resultado se muestra en la Tabla V.

TABLA IV. ENSAYO DE VACÍO

$X_{t0}=X_1+X_m$ (S=4)	$X_{t0}=X_1+X_m$ (S=2)
8,10 Ω	7,93 Ω

TABLA V. RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN

Deslizamiento s=4	Deslizamiento s=2	Deslizamiento s=1
2,07	1,03	0,53

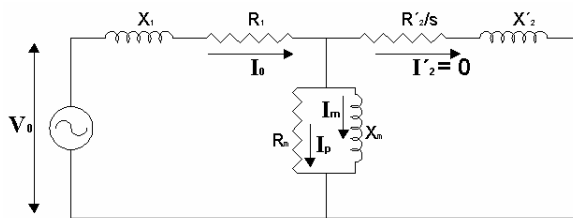


Fig. 1. Circuito equivalente del CAF en vacío

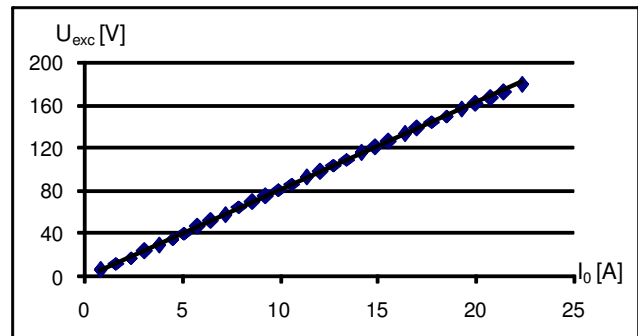


Fig. 2. Curva de vacío del CAF, por fase

2.2.2 Ensayo de corto circuito

Con este ensayo se obtiene la resistencia y reactancia total ($R_t = R_1 + R'_2$; $X_t = X_1 + X'_2$) de las ramas series del circuito de la Fig. 3, si se desprecia la rama derivación del circuito de la Fig. 2.

Este ensayo fue hecho con el rotor girando a velocidad nominal, movido por la máquina de impulso; y a rotor bloqueado. En ambos casos el rotor fue puesto en corto circuito y se realizaron mediciones con el campo giratorio en sus dos posibles sentidos de giro.

La tensión de excitación se varió de forma tal que la corriente de corto circuito varíe desde el 100 % de la corriente nominal del rotor hasta el 20 % de la misma, aproximadamente. Esto es indicado por la norma de aplicación, para que la temperatura de los bobinados sea prácticamente la misma en todos los instantes en los que se realizan lecturas de las variables de interés.

Las resistencias y reactancias calculadas en los distintos estados de carga, fueron promediadas debido a la escasa dispersión que presentan los valores obtenidos. Los resultados se muestran en la Tabla VI.

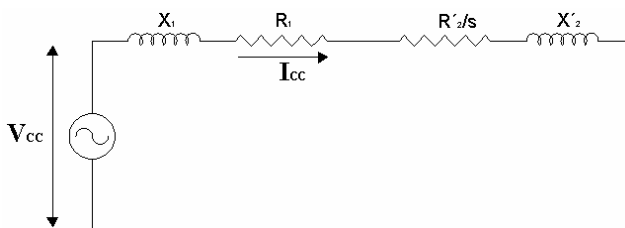


Fig. 3. Circuito simplificado del CAF en corto circuito

TABLA VI. ENSAYO DE CORTO CIRCUITO

Deslizamiento	$X_{tcc} = X_1+X'_2$	$R_{tcc} = R_1+(R'_2/s)$
s = 4	0,801 Ω	0,255 Ω
s = -2	0,778 Ω	- 0,084 Ω
s = 1	0,913 Ω	0,511 Ω

2.2.3 Parámetros

Con los valores de las Tabla IV y Tabla VI, y considerando que en máquinas de rotor bobinado se acepta que $X_1 = X'_2 = X_{tcc}/2$, se obtuvo el conjunto de parámetros mostrados en la Tabla VII.

Como puede observarse, se obtuvieron diversos resultados para cada parámetro. Para poder definir cuales son los valores adecuados que representen de la mejor manera el funcionamiento del CAF, en las condiciones necesarias para realizar el ensayo de tensión inducida, se elaboró un modelo de simulación por computadora. A partir del mismo se hicieron ajustes de los valores de los parámetros hasta obtener respuestas satisfactorias en diversas simulaciones realizadas para la validación del modelo.

2.3 Ensayos con carga

Con el objetivo de obtener una mayor cantidad de datos del CAF, para poder realizar la validación del modelo de simulación, se realizó un ensayo con carga trifásica y otro con carga bifásica, que a continuación se detallan.

2.3.1 Ensayo con carga trifásica

Para la realización de este ensayo se utilizó un banco de resistencias trifásico (BRT), conectado en Δ . Este fue conectado al rotor del CAF, como muestra el esquema de la Fig. 4.

TABLA VII. PARÁMETROS DEL CAF

R_1	R'_2	$X_1=X'_2$	X_m	
0,142 Ω	0,452 Ω	0,401 Ω	7,699 Ω	7,529 Ω
0,1143 Ω	0,397 Ω	0,389 Ω	7,711 Ω	7,541 Ω
0,17 Ω	0,341 Ω	0,457 Ω	7,643 Ω	7,473 Ω

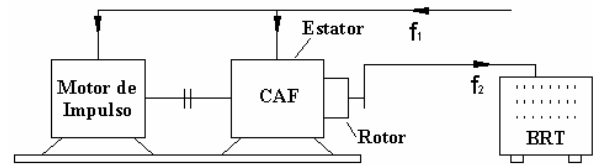


Fig. 4. Conexión del BRT al CAF

Se realizaron mediciones sobre el estator y el rotor, para distintas tensiones de excitación.

También se obtuvieron oscilogramas de las formas de onda de tensión y corriente, y se midió el contenido armónico de las mismas.

2.3.2 Ensayo con carga bifásica

Para la realización de este ensayo se utilizaron sólo dos ramas del BRT, conectándolo al rotor del CAF en forma bifásica. Se repitió el procedimiento de ensayo del punto anterior, variando la tensión de excitación para obtener distintas corrientes de carga.

Al utilizar el CAF en forma desbalanceada, era de esperar que apareciera en el rotor una componente de la corriente de carga próxima a los 200 Hz, pero de secuencia inversa, además de la componente de la misma frecuencia de secuencia directa. No hay posibilidad de que exista una componente homopolar, ya que no tiene forma de cerrarse en los bobinados del CAF.

Este efecto se comprobó a partir de un análisis de armónicos sobre la corriente del estator. La reacción de inducido de dicha componente de secuencia inversa del rotor, tendría que apreciarse en el estator con una componente próxima a los 350 Hz.

En las Fig. 5 y Fig. 6 se observa la forma de onda y contenido armónico de la corriente del estator durante el ensayo con carga desbalanceada.

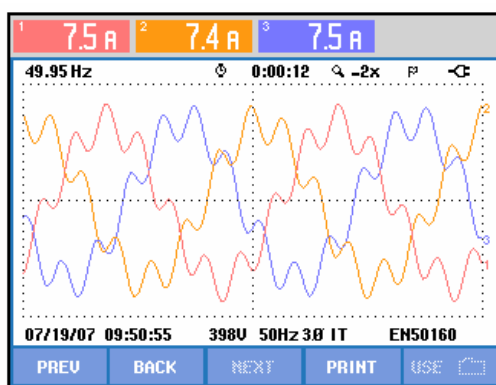


Fig. 5. Forma de onda de la corriente

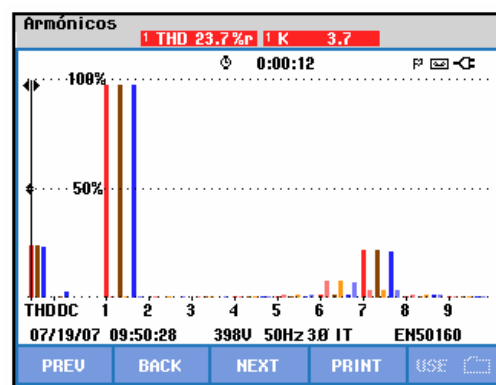


Fig. 6. Armónicos de corriente

Como puede apreciarse, las corrientes en las fases del estator sufren una importante deformación debido a la aparición del 7^{mo} armónico ya mencionado. En la Fig. 6 se muestra el resultado de las mediciones de contenido armónico. El porcentaje de este armónico respecto del fundamental es aproximadamente del 21 %.

3 MODELO DEL CONVERTIDOR ASINCRÓNICO DE FRECUENCIA

3.1 Introducción

Se realizó un modelo de simulación por computadora para reproducir el funcionamiento del CAF, con el objetivo de contar con una herramienta que permita realizar un estudio previo a la realización de un ensayo con esta máquina.

La ventaja de esto es tener una herramienta que permita predecir condiciones que se darán durante el ensayo de transformadores, y así evaluar la forma más segura de realizarlo.

El modelo fue realizado con el programa ATPDraw versión 5.0p7. En este programa existe un módulo denominado "UM_4 - Induction Machine" que representa una máquina de inducción de rotor bobinado con los bornes de estator y rotor accesibles. Este módulo trabaja con parámetros eléctricos de eje directo y cuadratura que se obtienen por medio de la transformada dq0, partiendo de los parámetros de fase de la máquina [2].

Para poder representar la relación de transformación estática del CAF, se agrega a la salida del módulo UM_4, un transformador ideal que adecua la tensión de salida a los valores reales.

Las condiciones mecánicas de funcionamiento se representan a través de una red eléctrica externa al módulo UM_4. Con esta red es posible fijar condiciones de deslizamiento y velocidad de la máquina.

Esquemáticamente el modelo se visualiza en la Fig. 7.

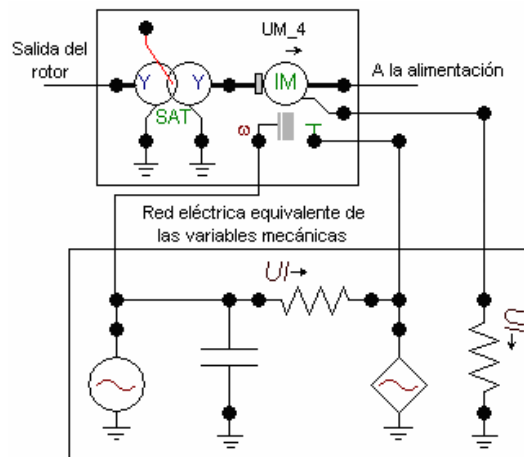


Fig. 7. Esquema del modelo de simulación

3.2 Parámetros ajustados para el módulo UM_4

El módulo UM_4 necesita como atributo para poder realizar la simulación, los valores de la inductancia de magnetización e inductancias y resistencias de las ramas serie del estator y rotor. Todos de eje directo y cuadratura, como ya fue indicado anteriormente.

Estos valores fueron ajustados por tanteos sucesivos, partiendo de los valores de la Tabla VII. Se simuló el ensayo de vacío, variando el parámetro de la rama magnetizante hasta que los resultados de las simulaciones tuvieron una aproximación suficientemente buena a lo medido en el CAF en los distintos ensayos realizados.

Una vez definido este parámetro, se lo mantuvo fijo y se simuló el ensayo de corto circuito. Nuevamente se variaron parámetros, en este caso los de las ramas serie, hasta alcanzar una aproximación lo suficientemente buena entre las simulaciones y los ensayos.

Establecidos los parámetros de las ramas serie y derivación, se realizaron las simulaciones bajo carga trifásica equilibrada y bifásica.

En la Tabla VIII se exponen los valores finalmente adoptados para los parámetros del modelo.

Con estos valores ajustados en el módulo UM_4, fijando la relación del transformador ideal en 1/0,55, y ajustando los parámetros de la red eléctrica equivalente de las variables mecánicas para obtener la frecuencia de 198,6 Hz en el rotor, se llevaron a cabo simulaciones para realizar la validación del modelo.

3.3 Comparación de resultados

En las Tablas IX a XII se presentan resultados de ensayos realizados sobre el CAF, y los propios obtenidos de simulaciones con el modelo citado.

Los valores medidos son promedio de las mediciones realizadas en las tres fases, y todos los valores mostrados son eficaces verdaderos.

Si bien se observan diferencias a partir del procedimiento de trabajo descrito en el punto 3.2, estas fueron minimizadas al punto de ser aceptables a los fines del presente trabajo.

En las Fig. 8 a 11 se muestra, a modo de ejemplo, los oscilogramas y análisis de armónicos realizados durante el ensayo del CAF con carga desbalanceada y los correspondientes a la simulación para el mismo estado de carga.

TABLA VIII. PARÁMETROS AJUSTADOS EN EL MÓDULO UM_4

$R_{1d} = R_{1q}$	$R'_{2d} = R'_{2q}$	$L_{1d} = L_{1q} = L'_{2d} = L'_{2q}$	$L_{md} = L_{mq}$
0,1143 Ω	0,397 Ω	0,00127 H	0,02451 H

TABLA IX. CONDICIÓN DE CARGA: VACÍO

Tensión de excitación	Variable	Resultados de Ensayo	Resultados de Simulación	Diferencia [%]
250 V	I_{exc} [A]	17,83	17,83	0,00
	U_{rot} [V]	519,00	520,05	-0,20
150 V	I_{exc} [A]	10,67	10,66	0,09
	U_{rot} [V]	311,00	310,98	0,01
51 V	I_{exc} [A]	3,87	3,62	6,46
	U_{rot} [V]	105,40	105,64	-0,23

TABLA X. CONDICIÓN DE CARGA: CORTO CIRCUITO

Tensión de excitación	Variable	Resultados de ensayo	Resultados de Simulación	Diferencia [%]
36 V	I_{exc} [A]	25,73	25,64	0,35
	I_{rot} [A]	45,00	44,26	1,64
25 V	I_{exc} [A]	17,63	17,62	0,06
	I_{rot} [A]	30,00	30,40	-1,33
8 V	I_{exc} [A]	6,10	5,68	6,89
	I_{rot} [A]	10,00	9,80	2,00

TABLA XI. CONDICIÓN DE CARGA: 17,78 Ω EN Y

Tensión de excitación	Variable	Resultados de ensayo	Resultados de Simulación	Diferencia [%]
91 V	I_{exc} [A]	7,63	7,32	4,06
	U_{rot} [V]	184,80	186,77	-1,07
	I_{rot} [A]	6,00	6,06	-1,00
61,5 V	I_{exc} [A]	5,27	4,95	6,07
	U_{rot} [V]	120,47	125,76	-4,39
	I_{rot} [A]	3,93	4,09	-4,25
31 V	I_{exc} [A]	2,77	2,47	10,83
	U_{rot} [V]	59,90	62,93	-5,06
	I_{rot} [A]	2,00	2,05	-2,50

TABLA XII. CONDICIÓN DE CARGA: 31 Ω BIFÁSICOS

Tensión de excitación	Variable	Resultados de ensayo	Resultados de Simulación	Diferencia [%]
93,2 V	I_{exc} [A]	7,47	7,24	3,08
	U_{rot} [V]	188,70	191,60	-1,54
	I_{rot} [A]	6,10	6,17	-1,15
63,1 V	I_{exc} [A]	5,17	4,90	5,22
	U_{rot} [V]	127,70	129,87	-1,70
	I_{rot} [A]	4,10	4,18	-1,95
31 V	I_{exc} [A]	2,83	2,55	9,89
	U_{rot} [V]	65,30	67,66	-3,61
	I_{rot} [A]	2,10	2,18	-3,81

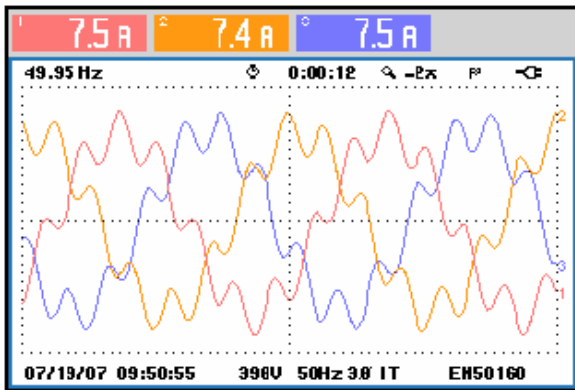


Fig. 8. Forma de onda de la corriente de excitación medida

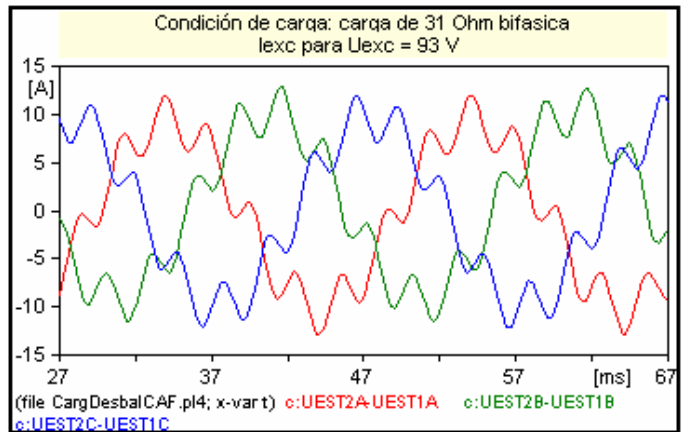


Fig. 9. Forma de onda de la corriente de excitación simulada

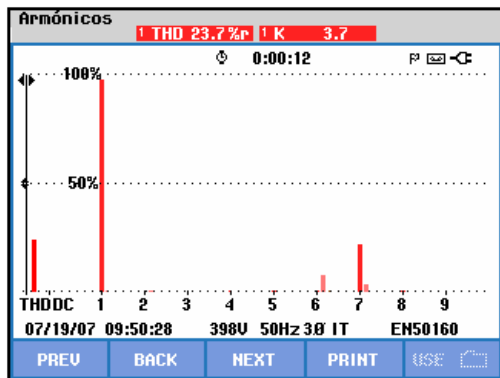


Fig. 10. Contenido armónico de la onda de corriente de excitación medida

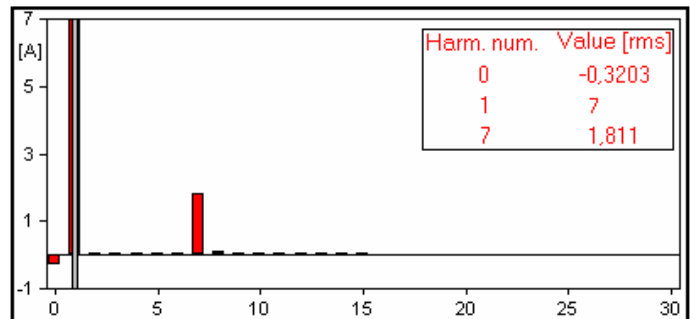


Fig. 11. Contenido armónico de la onda de corriente de excitación simulada

4 CONCLUSIONES.

Las actividades desarrolladas, han permitido obtener un modelo validado por mediciones del Convertidor Asíncrono de Frecuencia, utilizado para realizar ensayos de tensión inducida en transformadores. Este modelo de simulación permite verificar el comportamiento del sistema bajo ensayo, a fin de determinar el desempeño del equipamiento. En cumplimiento de dicho objetivo, se ha demostrado que:

- Se verificaron los valores indicados en la placa característica del CAF.
- Empleando los resultados de los ensayos realizados en el CAF, ha sido posible diseñar un modelo computacional validado. Dicho modelo presenta un comportamiento aceptable, acorde al alcance pretendido para el presente trabajo.

- c) Con este modelo se puede analizar el fenómeno de autoexcitación del CAF y establecer criterios para evitar el mismo.
- d) Este modelo permite predecir el comportamiento transitorio del CAF cuando se realizan ensayos de tensión inducida de transformadores de potencia y de tensión. En estos ensayos el objeto bajo prueba y el sistema de elevación de tensión, su compensación y medición pueden presentar un comportamiento capacitivo y provocar la autoexcitación del CAF. Disponer de su modelo permite realizar la simulación del circuito correspondiente al respectivo ensayo, previendo situaciones que deberán evitarse.
Para ello se deben obtener los parámetros del modelo del objeto bajo ensayo (OBE), y mediante simulaciones se puede establecer que tipo de sobretensiones y/o sobrecorrientes son esperables, y prevenir condiciones perniciosas sobre el OBE y el sistema de ensayo.

5 REFERENCIAS

- [1] IEEE Std 112™-2004, IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators.
- [2] Electromagnetic Transients Program Rule Book. Bonneville Power Administration, Portland, Oregon, April 1982.