

Comité de Estudio C4 - Desempeño Técnico del Sistema

**MEDICIÓN DE LA EMISIÓN ARMÓNICA EN VARIADORES DE VELOCIDAD Y
DESARROLLO DE MODELOS DE SIMULACIÓN**

P. E. ISSOURIBEHHERE*
IITREE FI-UNLP
Argentina

G. A. BARBERA
IITREE FI-UNLP
Argentina

F. ISSOURIBEHHERE
IITREE FI-UNLP
Argentina

H. G. MAYER
IITREE FI-UNLP
Argentina

Resumen – Los variadores de velocidad de motores cumplen un rol cada vez más importante en los distintos tipos de industrias. Entre sus principales aplicaciones se encuentran el control de velocidad de bombas [1], compresores, y ventiladores.

Por otro lado, la electrónica de potencia presente en estos variadores de velocidad, lo convierten en una importante carga a lineal dentro de los sistemas de potencia. Naturalmente, como toda carga a lineal, emiten corrientes armónicas hacia la red de suministro.

En la actualidad existen severas normas internacionales referidas a Compatibilidad Electromagnética, como así también reglamentos de carácter local a cumplir tanto por las empresas prestatarias del servicio eléctrico como por los propios usuarios.

Por lo tanto, si determinado usuario desea incorporar este tipo de cargas en sus instalaciones deberá analizar previamente si los niveles de armónicas por éstas emitidos no sobrepasan los valores permitidos por la normativa vigente.

La forma más directa y precisa de conocer los niveles de emisión por parte de estos equipos es a través de ensayos, en los cuales se hace trabajar al motor bajo las condiciones de interés y se registra, con un equipo medidor de armónicas apropiado, el nivel de corrientes armónicas emitido en cada estado de carga. Luego, se comparan los valores registrados con aquellos establecidos en la normativa en cuestión (IEC, IEEE, Resoluciones Locales; etc.)

En el presente trabajo se detallan los ensayos realizados sobre variadores de velocidad de motores de CA en baja tensión, con potencias del orden de 200 kW. Se describe además la topología implementada para llevar a cabo este tipo de pruebas – tal como lo requieren las normas de emisión – y se presentan finalmente los resultados obtenidos en dichos ensayos.

Como complemento a los ensayos realizados, se han desarrollado modelos de variadores de velocidad en el programa de simulación MATLAB. Estos modelos fueron validados a partir de los resultados de los ensayos y resultarán de gran interés para ser utilizados a futuro en redes en las que se requiera instalar este tipo de equipamiento. De esta forma, será posible obtener por medio de una simulación realista el impacto que provocarán los variadores de velocidad sobre determinada red o carga susceptible allí presente.

Palabras clave: Armónicas – Compatibilidad Electromagnética – Emisión – Ensayo – Modelo – Motor – Variador de Velocidad.

1 INTRODUCCIÓN

La Figura 1 muestra un diagrama en bloques general de un variador de velocidad [2].

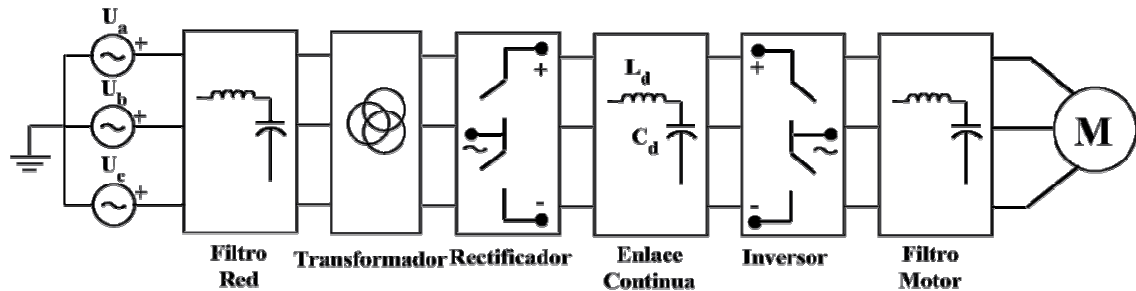


Fig. 1. Diagrama en bloques general de un variador de velocidad.

Una descripción sintética de cada uno de los bloques que componen al variador de velocidad es la siguiente:

- **Filtro lado red:** Reduce el contenido armónico y mejora el factor de potencia.
- **Transformador:** Suele ser un transformador con múltiples secundarios para la reducción de las corrientes armónicas.
- **Rectificador:** Convierte la tensión alterna del sistema a una tensión continua fija o ajustable. Las topologías más comunes incluyen rectificadores multipulso con diodos, rectificadores controlados y rectificadores PWM.
- **Enlace de continua:** Puede ser un capacitor que provee una tensión de continua estable para los convertidores tipo fuente de tensión (*VSC*) o un inductor para suavizar la corriente de continua en los convertidores tipo fuente de corriente (*CSI*).
- **Inversor:** Se clasifica generalmente en convertidores tipo fuente de tensión (*VSC*) y convertidores tipo fuente de corriente (*CSI*). Los *VSC* convierten la tensión continua en tres tensiones alternas con magnitud y frecuencia ajustables. Los *CSI*, en cambio, convierten la corriente continua en tres corrientes alternas ajustables.
- **Filtro lado motor:** La acción de conmutación del rectificador y del inversor genera señales de modo común. Si no se mitigan, estas señales aparecen en el neutro del bobinado de estator del motor lo que puede provocar un fallo prematuro de la aislación de los bobinados del motor.

2 ENSAYOS REALIZADOS

2.1 Justificación de su realización

Por cuestiones inherentes a su funcionamiento, los variadores de velocidad de motores (“*drives*”) emiten armónicas hacia la red de suministro. Dichas armónicas deben ser contenidas dentro de determinados límites ya que de lo contrario, aquellos usuarios que posean este tipo de cargas en sus instalaciones serán pasibles de penalidad.

Previo a la adquisición del producto, los futuros usuarios de variadores velocidad encuentran que los propios fabricantes no suelen brindar información detallada sobre la correspondiente emisión de armónicas por parte de los equipos. Adicionalmente, cuando lo hacen, esta información es brindada sólo para la situación óptima en términos de emisión, que es justamente cuando el equipo funciona en condiciones nominales de carga.

Es por esta razón que los usuarios de *drives* de gran porte deben analizar pormenorizadamente tanto el impacto que éstos producirán dentro de sus propias instalaciones como las perturbaciones que serán emitidas en el futuro hacia la red. Como parte de este análisis de impacto, normalmente se efectúan ensayos para determinar de forma práctica y fehaciente las armónicas que producen los variadores de velocidad, bajo las condiciones de funcionamiento en las que éstos trabajarán una vez puestos en servicio.

2.2 Descripción de su implementación

En lo que se refiere a Normas IEC, en [3] se detalla el procedimiento que debe emplearse para realizar el ensayo de emisión de armónicas de un equipo de baja tensión y corriente nominal mayor a 16 A.

La topología que debe implementarse para el caso de equipos trifásicos es la que aparece en la Figura 2. En este caso en particular el *Equipo Bajo Ensayo* (de sus siglas en Inglés *EUT*, *Equipment Under Test*) es justamente el *drive* del cual se quiere determinar la emisión de armónicas. Se requiere básicamente de un

generador de tensión trifásico con bajos niveles de armónicas (en [3] se explicitan los niveles máximos permitidos para cada componente) y de un medidor de corrientes armónicas trifásico que cumpla con las especificaciones establecidas en [4].

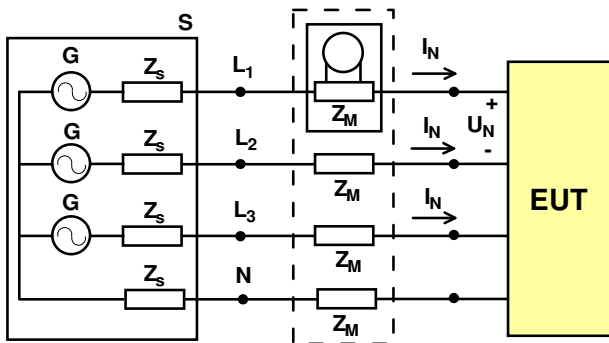


Fig. 2. Esquema para determinar la emisión de armónicas de un equipo trifásico según Normas IEC.

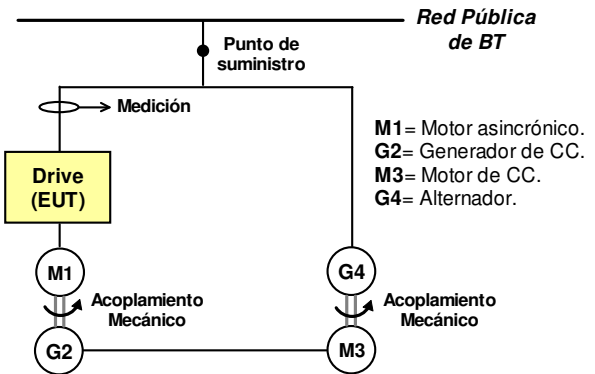


Fig. 3. Topología implementada para el ensayo.

Para el ensayo particular que se llevó a cabo, sobre un variador de velocidad de BT de 18 Pulsos con autotransformador, la implementación utilizada fue la que se muestra en la Figura 3. La potencia del equipo bajo ensayo era 200 kW, por lo que resultó impráctico en laboratorio utilizar un circuito sencillo como el de la Figura 2 en el que toda la potencia eléctrica puesta en juego fuera realmente utilizada en forma mecánica para accionar cierto dispositivo. Por lo tanto, se decidió implementar el circuito *electromecánico* (compuesto por dos motores y dos generadores) en forma de “lazo” de la Figura 3 en el que la potencia que toma el *drive* es finalmente “devuelta” hacia la red, consumiéndose así solamente las pérdidas allí presentes.

A través del lazo electromecánico implementado la energía eléctrica (de tensión y frecuencia variable) entregada por el *drive* al Motor comandado por éste (M1) es convertida a mecánica y entregada al Generador de CC (G2) a través de un acoplamiento mecánico. Luego de esto, la energía eléctrica es provista a un Motor de CC (M3), cuya salida es entregada por medio de otro acoplamiento mecánico a un Alternador (G4) el que finalmente provee la energía eléctrica de 50 Hz que es devuelta a la red pública.

2.3 Resultados obtenidos

Una vez implementada la topología de la Figura 3 se efectuaron las mediciones de armónicas a la entrada del variador, tal como se indica en dicha figura.

Previo al comienzo de las mediciones se dejó que el sistema ingrese a régimen permanente con el *drive* funcionando en condiciones nominales de par y velocidad. Una vez logrado esto se registraron armónicas hasta la 40ª durante un período de tiempo considerable.

Las formas de onda de las corrientes se muestran en la Figura 4, mientras que las componentes armónicas hasta la 20ª junto al THD (*Total Harmonic Distortion*) aparecen en la Figura 5, expresadas como porcentaje de la componente fundamental.

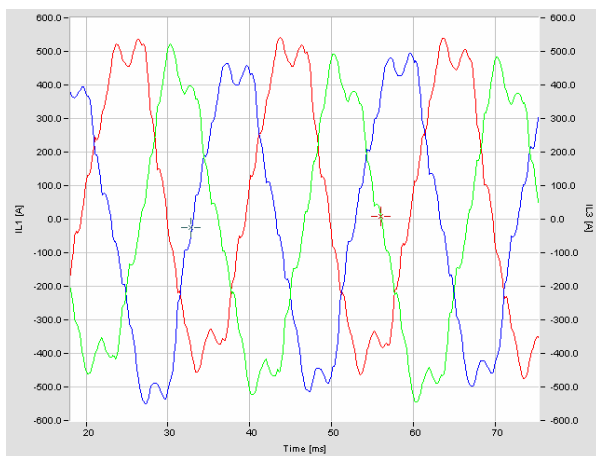


Fig. 4. Oscilogramas de las tres corrientes a la entrada del variador, funcionando a plena carga.

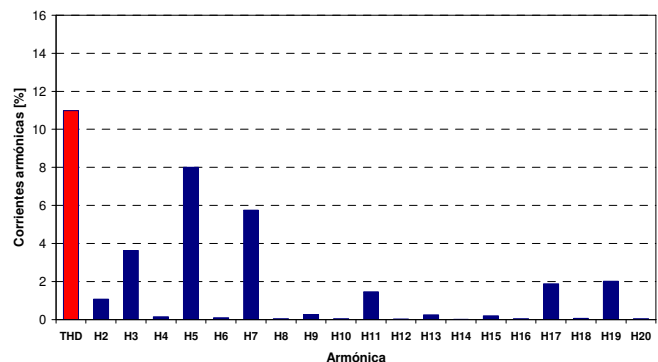


Fig. 5. THD y armónicas de la corriente de entrada del variador, funcionando a plena carga.

Se observa que el *THD* resultó del orden de 10 %. Las armónicas que presentaron valores más elevados fueron las impares no múltiplos de 3, como es característico en este tipo de cargas.

En la Tabla I se reproducen los niveles de referencia hasta la armónica 20ª de [3] para el caso más exigente, es decir aquel en el que la relación entre la potencia de cortocircuito del lugar donde el equipo será instalado y su potencia nominal es mayor o igual a 33. A esta Tabla se la han agregado los valores de emisión que resultaron del ensayo.

TABLA I. NIVELES DE REFERENCIA SEGÚN IEC

Armónica	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20
Límite	4.00	21.60	2.00	10.70	1.33	7.20	1.00	3.80	0.80	3.10	0.67	2.00	0.57	0.70	0.50	1.20	0.44	1.10	0.40
Valores medidos	1.07	3.63	0.15	8.00	0.11	5.75	0.06	0.27	0.04	1.45	0.03	0.25	0.02	0.19	0.04	1.89	0.07	2.01	0.1

Los valores de armónicas registrados, en general, cumplieron con los niveles establecidos. Sólo las armónicas 17ª y 19ª (resaltadas en amarillo) resultaron superiores a sus respectivos límites.

En la Norma se brindan tablas adicionales con valores de emisión más permisivos, las que pueden ser empleadas sólo en caso de asegurarse valores de la relación *potencia de cortocircuito/potencia nominal* de, al menos, el doble que el anterior.

Por lo comentado anteriormente en cuanto a la mayor emisión de armónicas cuando el variador funciona en condiciones distintas a la nominal, resultó de interés repetir el mismo ensayo, pero con el *drive* trabajando a la mitad de su potencia. Los resultados obtenidos son los que se muestran en las Figuras 6 y 7.

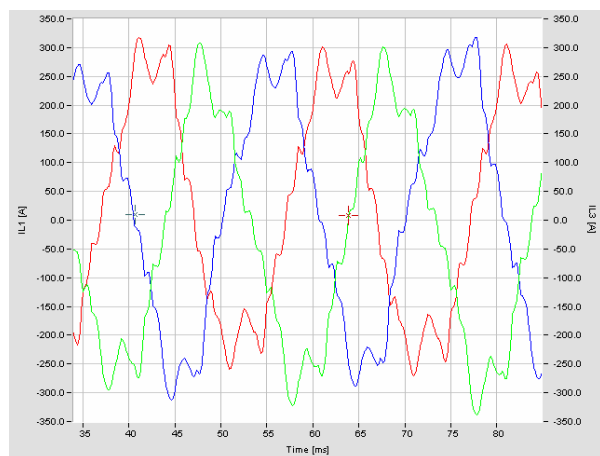


Fig. 6. Oscilogramas de las tres corrientes a la entrada del variador, funcionando a media carga

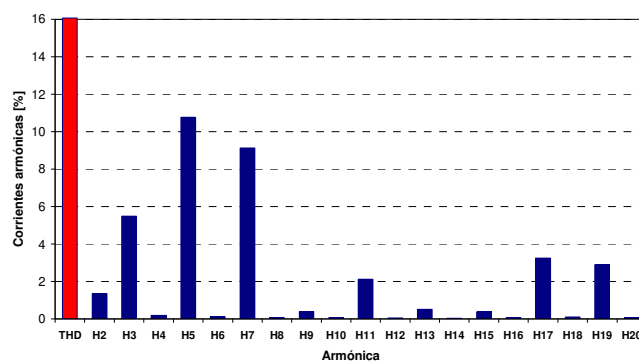


Fig. 7. THD y armónicas de la corriente de entrada del variador, funcionando a media carga.

La forma de onda de la corriente registrada fue similar a la del caso anterior, aunque un tanto más deformada. Esto hizo que el contenido armónico, expresado en valores referidos a la componente fundamental, ascienda considerablemente con respecto al caso del *drive* funcionando a plena carga.

De todos modos, según lo establecido en [3] las armónicas individuales de la corriente deben ser siempre referidas a la corriente nominal del equipo. Es por ello que, si bien el contenido armónico porcentual fue sensiblemente superior al del caso anterior, al expresar las armónicas en términos de la corriente nominal del equipo, estos niveles serían aproximadamente la mitad de los mostrados en la Figura 7.

Resulta muy importante determinar la variación del contenido armónico en función de la carga para las distintas topologías que pueden implementarse en el convertidor lado red. Con este fin se realizó un modelo completo del variador de velocidad en el programa SIMULINK de MATLAB, en el cual es posible variar la topología del rectificador, como así también el esquema de control, y los parámetros del controlador del convertidor lado motor. Dado que no fue posible disponer de los parámetros de chapa del motor utilizado como carga del *drive* en el ensayo, en las simulaciones se utilizó un motor asíncrono trifásico de porte similar a éste (150 kW) del cual sí se conocen todos los parámetros característicos.

El modelo de variador de velocidad y motor asociado, implementado en MATLAB, se detalla en el punto siguiente.

3 ESTUDIO DE LA EMISIÓN ARMÓNICA DEL VARIADOR A TRAVÉS DE SIMULACIONES

3.1 Determinación de los componentes del modelo.

Con el fin de caracterizar el comportamiento del variador de velocidad como carga perturbadora se realizó un modelo completo del mismo, adoptando como estructura de control del convertidor lado motor el control orientado al campo (COC) lo que actualmente es un estándar industrial en los variadores de media y baja tensión y gran potencia. El objeto de las simulaciones fue determinar la emisión del variador de velocidad en cuatro estados de carga del motor: 25 %, 50 %, 75 % y 100 %. En cada uno de los estados de carga mencionados se analizó la emisión de corrientes armónicas del convertidor lado red, adoptando las siguientes configuraciones: rectificador con diodos de 6, 12 y 18 pulsos y rectificador con PWM.

En la Figura 8 se presenta el diagrama general del variador de velocidad y del motor controlado en el programa SIMULINK de MATLAB.

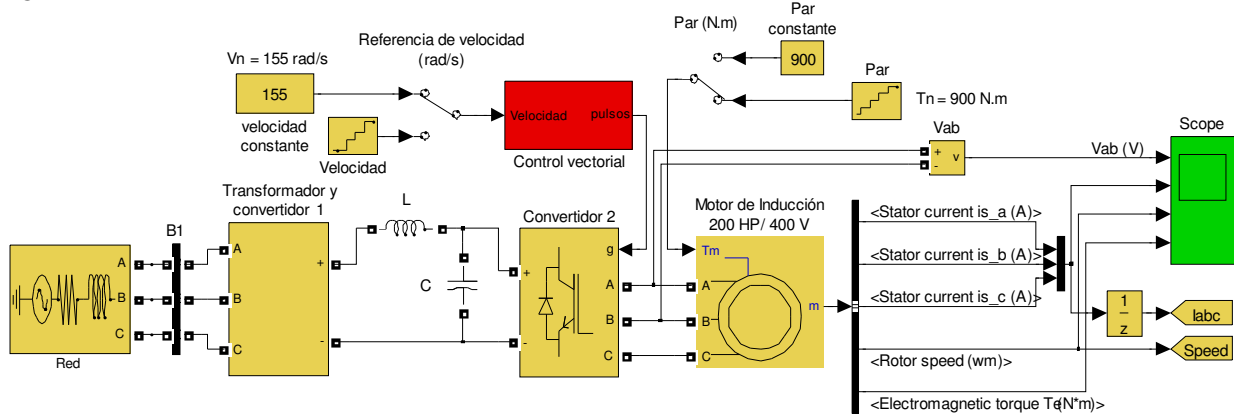


Fig. 8. Modelo SIMULINK del variador de velocidad y el motor de inducción.

A continuación se describen brevemente los parámetros característicos del motor y la estrategia de control del convertidor lado motor.

Datos de chapa y parámetros del motor

Parámetros característicos del motor
Frecuencia: 50 Hz
Potencia de salida: 200 HP (150 kW)
Tensión de línea: 400 V
Corriente nominal de estator: 255 A
Velocidad nominal: 1487 rpm
Cupla nominal: 900 N.m
Pares de polos (P): 2 (4 polos)
Momento de Inercia: $J = 2.9 \text{ Kg.m}^2$
Factor de fricción: 0.05658 N.m.s
Resistencia del estator: $R_s = 0.01379 \Omega$
Inductancia del estator: $L_{Ls} = 0.000152 \text{ H}$
Resistencia del rotor: $R_r = 0.007728 \Omega$
Inductancia del rotor: $L_{Lr} = 0.000152 \text{ H}$
Inductancia mutua: $L_M = 0.00769 \text{ H}$

$$\omega_m = \frac{1487 \cdot 2 \cdot \pi}{60} = 155.7 \text{ rad/s}$$

$$\omega_s = \frac{2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50)}{4} = 157.08 \text{ rad/s}$$

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} = 0.879 \%$$

$$Z_i = \frac{-X_m (X_s + X_r) + jX_m (R_s + R_r / s)}{R_s + R_r / s + j(X_m + X_s + X_r)} = 0.996e^{j27.29^\circ} \text{ A}$$

$$I_i = \frac{U_f}{Z_i} = 231.89e^{-j27.29^\circ} \Omega \quad \cos \phi = 0.89$$

$$P_i = 3 \cdot U_f \cdot I_i \cdot \cos \phi = 142.66 \text{ kW}$$

$$T_d = \frac{3 \cdot R_r \cdot U_f^2}{s \cdot \omega_s \cdot \left[\left(R_s + \frac{R_r}{s} \right)^2 + (X_s + X_r)^2 \right]} = 896.6 \text{ N.m}$$

Control orientado al campo (COC)

El *control orientado al campo (COC)* también conocido como *control vectorial* para motores de inducción emula el control de un motor de continua. Utilizando una orientación del campo adecuada, la corriente del estator puede ser descompuesta en una componente que produce flujo y en una componente que produce par. El vector de corriente en el estator i_s puede descomponerse en dos componentes en el sistema de referencia $d-q$. La componente de corriente en el eje d (i_{ds}) se conoce como *corriente que produce el flujo*, mientras que la componente de corriente en el eje q (i_{qs}) se conoce como *corriente que produce el par*. En el COC i_{ds} se mantiene normalmente en su valor nominal, mientras que i_{qs} se controla en forma independiente. Con este

control desacoplado es posible lograr un variador de gran desempeño. En la Figura 9 se presenta un diagrama en bloques general del control.

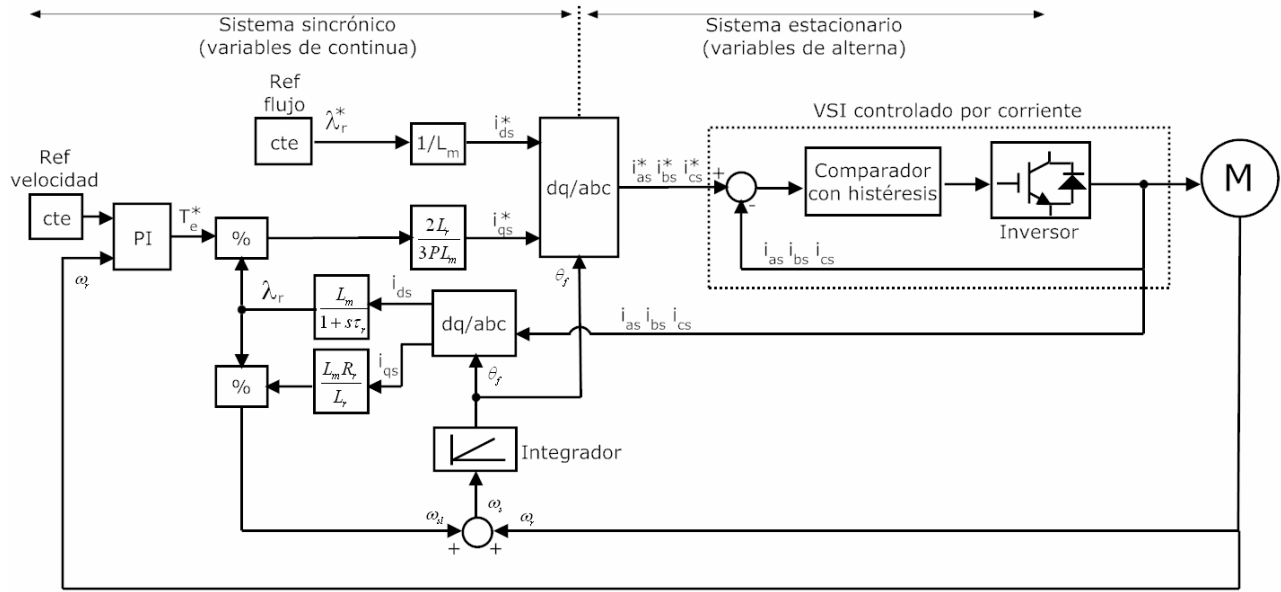


Fig. 9. Diagrama en bloques del Control Orientado al Campo Indirecto.

A continuación se describen las ecuaciones del sistema de control *COC* indirecto y en la Figura 10 se presentan los resultados de las simulaciones de la velocidad (ω) y de la cupla (T) del motor cuando se producen escalones de carga del motor del 25 %, 50 %, 75 % y 100 % de T_n , con el motor girando a velocidad ω_n .

$$T_e^* = k_p (\omega_{ref} - \omega_r) + k_i \int (\omega_{ref} - \omega_r) dt$$

$$\lambda_r^* = K_r$$

$$i_{ds}^* = \frac{1}{L_m} \lambda_r^*$$

$$i_{qs}^* = \frac{2L_r}{3PL_m} \cdot \frac{T_e^*}{\lambda_r^*}$$

$$\lambda_r = \frac{L_m}{\left(1 + s \frac{L_r}{R_r}\right)} \cdot i_{ds}$$

$$\omega_{sl} = \frac{L_m R_r}{L_r \lambda_r} \cdot i_{qs}$$

$$\theta_f = \int (\omega_r + \omega_{sl}) dt$$

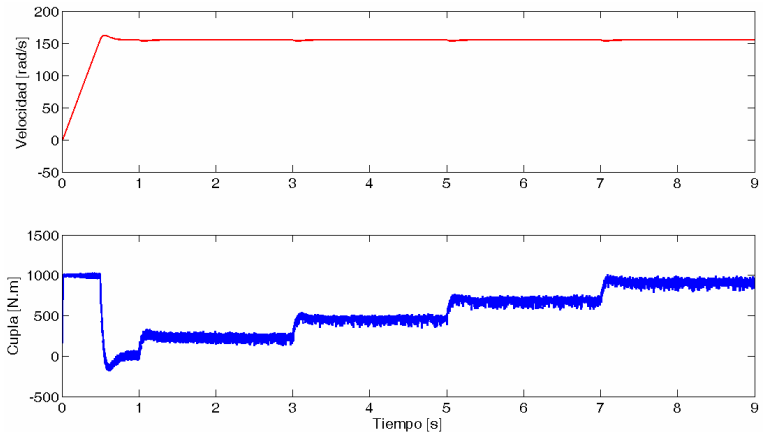


Fig. 10. Escalones de carga del 25 al 100 % con el motor girando a la velocidad nominal.

Los resultados de las simulaciones para la distorsión de corriente en las distintas condiciones de operación mencionadas se presentan en las Tablas desde la II a la V.

TABLA II. DISTORSIÓN DE CORRIENTE EN [%]. RECTIFICADOR PWM.

Operación	$I_{l_{cf}}$ [A]	THDI	H3	H5	H7	H9	H11	H13	H15	H17	H19	H21	H23	H25	H27	H29	H31
$\omega = \omega_n, T = 0.25T_n$	63.70	12.33	0.30	1.25	3.24	0.39	1.08	0.73	0.26	0.90	0.35	1.18	0.36	0.53	0.28	0.61	8.36
$\omega = \omega_n, T = 0.5T_n$	127.90	6.18	1.25	0.54	0.84	0.24	0.83	0.58	0.26	0.20	0.17	0.66	0.35	0.23	0.20	0.69	4.05
$\omega = \omega_n, T = 0.75T_n$	194.80	4.89	2.05	0.52	0.83	1.08	0.15	0.25	0.30	0.16	0.35	0.31	0.20	0.26	0.17	0.58	2.92
$\omega = \omega_n, T = T_n$	265.20	4.05	0.80	1.97	0.25	0.45	0.57	0.29	0.11	0.27	0.43	0.19	0.14	0.37	0.05	0.55	2.37
$\omega = 0.25\omega_n, T = T_n$	68.27	11.72	0.99	2.43	2.99	1.28	1.19	0.55	0.47	0.88	0.31	0.96	0.41	0.32	0.35	0.53	7.75
$\omega = 0.5\omega_n, T = T_n$	132.0	6.04	0.75	0.52	0.66	0.70	0.88	0.59	0.31	0.44	0.18	0.59	0.34	0.29	0.17	0.72	4.01
$\omega = 0.75\omega_n, T = T_n$	197.0	5.02	2.45	0.38	1.00	1.02	0.14	0.22	0.24	0.16	0.39	0.30	0.17	0.25	0.17	0.59	2.86

TABLA III. DISTORSIÓN DE CORRIENTE EN [%]. RECTIFICADOR 6 PULSOS CON DIODOS.

Operación	I_{1ef} [A]	THDI	H3	H5	H7	H9	H11	H13	H15	H17	H19	H21	H23	H25	H27	H29	H31
$\omega = \omega_n, T = 0.25T_n$	57.47	79.14	0.15	64.94	42.67	0.20	10.25	7.96	0.27	5.19	3.37	0.33	2.82	2.06	0.38	1.56	1.39
$\omega = \omega_n, T = 0.5T_n$	113.98	54.35	0.20	46.88	24.96	0.23	8.04	5.57	0.29	3.95	2.53	0.33	2.42	1.57	0.36	1.63	1.10
$\omega = \omega_n, T = 0.75T_n$	171.21	43.30	0.37	38.65	16.44	0.34	7.99	4.06	0.29	3.85	2.16	0.26	2.20	1.42	0.26	1.32	0.98
$\omega = \omega_n, T = T_n$	230.51	37.47	0.05	33.98	12.38	0.11	7.54	3.74	0.15	3.49	2.20	0.17	1.88	1.42	0.18	1.08	0.91
$\omega = 0.25\omega_n, T = T_n$	59.71	78.33	0.27	64.48	41.97	0.31	9.89	8.02	0.37	4.96	3.36	0.42	2.71	2.05	0.45	1.49	1.42
$\omega = 0.5\omega_n, T = T_n$	117.71	53.19	0.17	46.04	24.12	0.21	8.00	5.39	0.27	3.89	2.47	0.31	2.36	1.55	0.33	1.57	1.09
$\omega = 0.75\omega_n, T = T_n$	173.31	43.01	0.35	38.41	16.24	0.33	7.99	4.04	0.28	3.85	2.15	0.26	2.20	1.42	0.25	1.32	0.98

TABLA IV. DISTORSIÓN DE CORRIENTE EN [%]. RECTIFICADOR 12 PULSOS CON DIODOS.

Operación	I_{1ef} [A]	THDI	H3	H5	H7	H9	H11	H13	H15	H17	H19	H21	H23	H25	H27	H29	H31
$\omega = \omega_n, T = 0.25T_n$	56.74	17.35	0.24	0.19	0.13	0.16	14.79	7.51	0.29	0.29	0.12	0.13	3.92	2.18	0.42	0.44	0.10
$\omega = \omega_n, T = 0.5T_n$	112.70	13.93	0.27	0.24	0.17	0.19	11.96	5.33	0.30	0.30	0.15	0.13	3.57	2.28	0.35	0.33	0.12
$\omega = \omega_n, T = 0.75T_n$	169.85	12.79	0.13	0.19	0.11	0.15	10.88	5.13	0.19	0.22	0.15	0.16	3.23	2.27	0.23	0.26	0.13
$\omega = \omega_n, T = T_n$	228.54	12.06	0.25	0.23	0.19	0.22	10.19	5.13	0.25	0.22	0.17	0.17	2.89	2.14	0.27	0.27	0.12
$\omega = 0.25\omega_n, T = T_n$	58.78	17.09	0.22	0.17	0.13	0.15	14.60	7.30	0.27	0.26	0.11	0.12	3.90	2.17	0.41	0.41	0.08
$\omega = 0.5\omega_n, T = T_n$	116.12	13.86	0.26	0.27	0.22	0.20	11.88	5.32	0.30	0.30	0.17	0.14	3.56	2.30	0.36	0.33	0.13
$\omega = 0.75\omega_n, T = T_n$	171.52	12.75	0.17	0.15	0.13	0.14	10.85	5.12	0.18	0.21	0.14	0.15	3.21	2.26	0.22	0.25	0.13

TABLA V. DISTORSIÓN DE CORRIENTE EN [%]. RECTIFICADOR 18 PULSOS CON DIODOS.

Operación	I_{1ef} [A]	THDI	H3	H5	H7	H9	H11	H13	H15	H17	H19	H21	H23	H25	H27	H29	H31
$\omega = \omega_n, T = 0.25T_n$	60.86	14.05	0.14	10.66	8.12	0.02	0.98	0.37	0.04	2.76	2.95	0.06	0.23	0.57	0.01	0.13	0.19
$\omega = \omega_n, T = 0.5T_n$	118.15	6.048	0.15	3.85	2.67	0.07	1.60	1.01	0.04	2.45	2.04	0.07	0.33	0.30	0.05	0.33	0.23
$\omega = \omega_n, T = 0.75T_n$	176.28	4.712	0.04	2.61	1.93	0.05	2.11	1.44	0.04	1.49	1.54	0.04	0.54	0.34	0.01	0.16	0.30
$\omega = \omega_n, T = T_n$	234.97	4.344	0.11	2.71	1.81	0.07	2.15	1.53	0.04	0.52	0.78	0.09	0.40	0.21	0.07	0.25	0.34
$\omega = 0.25\omega_n, T = T_n$	63.78	13.26	0.06	10.00	7.66	0.05	0.87	0.26	0.04	2.75	2.86	0.06	0.20	0.55	0.04	0.09	0.17
$\omega = 0.5\omega_n, T = T_n$	121.65	5.92	0.14	3.72	2.56	0.06	1.66	1.06	0.05	2.42	2.03	0.08	0.36	0.29	0.05	0.35	0.25
$\omega = 0.75\omega_n, T = T_n$	178.45	4.68	0.05	2.63	1.88	0.06	2.12	1.44	0.04	1.43	1.51	0.04	0.54	0.33	0.01	0.15	0.29

En la Figura 11 se presenta un gráfico de barras con el *THDI* [%] para el variador con rectificador *PWM* y con distintos valores de par y velocidad del motor. Se observa que, como fue comentado anteriormente, los valores más bajos de distorsión en [%] se dan en condiciones nominales de ambos. En las Figuras 12, 13 y 14 se presentan gráficos similares pero para rectificadores de 6, 12 y 18 pulsos, respectivamente. En estos gráficos se presentan condiciones de operación que no están descritas en las tablas previas.

En las Figuras 15 y 16 se presenta el *THDI* en [A] de los distintos tipos de convertidores de entrada y para distintos valores de par y velocidad, respectivamente. Se observa en ambas figuras que el *THDI* [A] permanece prácticamente constante en el caso del rectificador de 18 pulsos y en el rectificador *PWM*.

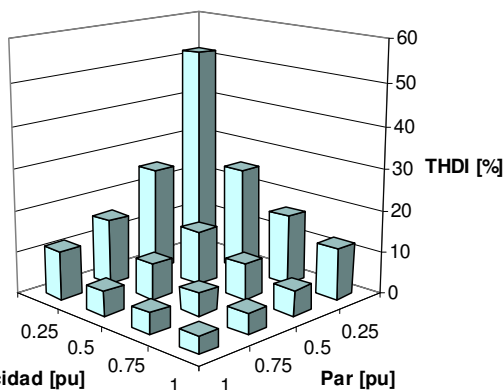


Fig. 11. Rectificador PWM. Variación del THD en función del par y de la velocidad.

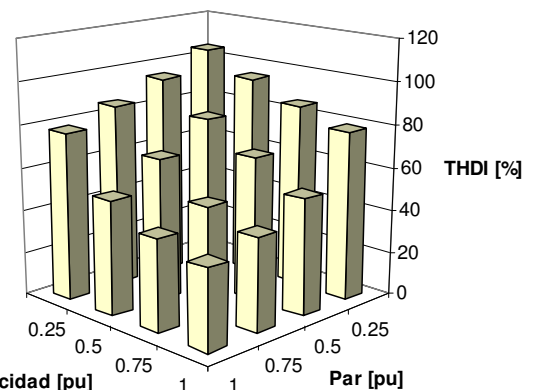


Fig. 12. Rectificador 6 pulsos. Variación del THD en función del par y de la velocidad.

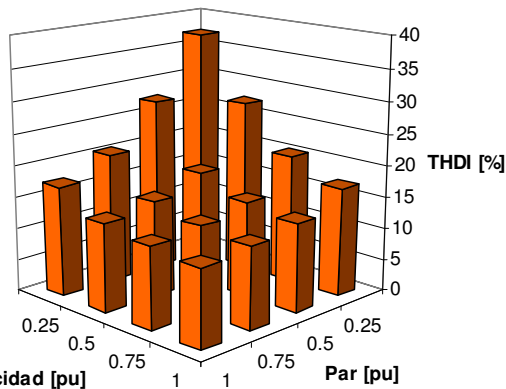


Fig. 13. Rectificador 12 pulsos. Variación del THD en función del par y de la velocidad.

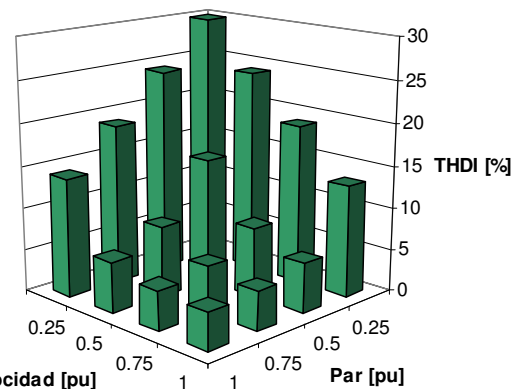


Fig. 14. Rectificador 18 pulsos. Variación del THD en función del par y de la velocidad.

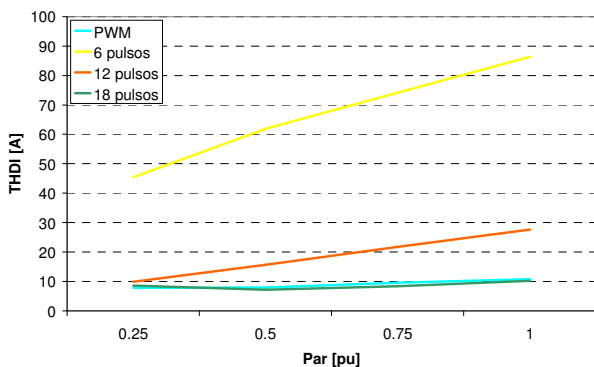


Fig. 15. THD [A] en función del par para la velocidad nominal.

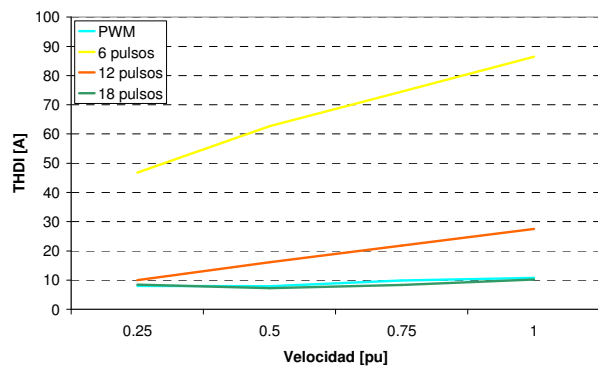


Fig. 16. THD [A] en función de la velocidad para el par nominal.

4 CONCLUSIONES

- Los variadores de velocidad de motores son cargas fuertemente alineales y por lo tanto generan armónicas que se propagan hacia la red de suministro. Estos niveles de emisión deben ser controlados ya que de lo contrario los usuarios pueden recibir importantes penalidades.
- La información brindada por los fabricantes, en cuanto a niveles de emisión de armónicas, suele no ser suficiente. Esto conlleva a determinar dichos niveles de emisión en forma práctica, es decir a través de un ensayo normalizado.
- Se ensayó un variador de velocidad de BT de gran potencia con el propósito de obtener experimentalmente los niveles de emisión. Los resultados obtenidos cumplieron, en general, con los límites establecidos en las Normas IEC.
- Mediante un modelo detallado del variador de velocidad y sus sistemas de control asociados se determinó la distorsión de corriente para los distintos tipos de convertidores lado red y para distintas condiciones de carga y velocidad. En el ensayo el contenido armónico del variador comercial duplicó al valor obtenido en el modelo. Esta diferencia es atribuible básicamente a la ineficaz cancelación de armónicas lograda en la implementación del sofisticado transformador que forma parte del variador ensayado.

5 CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. Issouribehere, G. Barbera, F. Issouribehere, "Compatibilización de perturbaciones de variadores de velocidad de motores con redes de AT". XI ERIAC - *Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRE*. Ciudad del Este, Paraguay, Mayo 2005.
- [2] Bin Wu, *High-Power Converters and AC Drives*. IEEE Press, 2006.
- [3] IEC 61000-3-4. "Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-4: Limits - Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A".
- [4] IEC 61000-4-7. "Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto".