

# Inversor + Inductor:

## Dimensionamiento e Implicaciones

Francisco M. Gonzalez-Longatt

[flongatt@elecristic.ing.ucv.ve](mailto:flongatt@elecristic.ing.ucv.ve)

Venezuela, Octubre, 2003

**Resumen** - En este documento, las implicaciones del dimensionamiento del inductor serie para un inversor en supuestos reales y la idealización de forma de onda senoidal son examinados. A través de un estudio práctico detallado en régimen permanente, se efectúa el dimensionamiento del inductor a través de un método gráfico-analítico que considera las limitaciones reales impuestas por la red y por el mismo inversor, es luego es incorporado al inversor. Una evaluación comparativa de regulación de voltaje y distorsión total armónica en voltaje y corriente se efectúa, para contrastar el supuesto de onda senoidal ideal y la salida obtenida de un inversor con modulación por ancho de pulso real.

**Palabras Claves:** Inversor, Inductor, Armónicos

### I. INTRODUCCIÓN

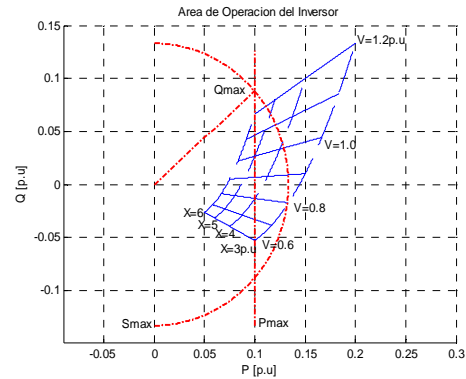
Las nuevas tecnologías de generación y almacenamiento de energía poseen el potencial para significativamente impactar el desempeño de los sistemas de potencia [1]. Las denominadas micro fuentes, requieren virtualmente electrónica de potencia para interactuar con la red de potencia. En todos los casos, la fuente de voltaje DC debe ser convertido en una fuente voltaje AC a la frecuencia y magnitud y fase requeridos [2]. En la mayoría de los casos la conversión es efectuada usando un inversor alimentado por voltaje. La inductancia entre los terminales del inversor y la red AC debe ser cuidadosamente dimensionada para lograr entregar el valor de potencia activa y reactiva requerido, sin que se alcance inestabilidad. Una alternativa de fácil implementación es considerar el efecto del flujo de potencia en régimen permanente solo en su fundamental, y mediante un método gráfico determinar el tamaño del inductor. En este documento, se ajusta el valor del inductor a las condiciones de la red y las limitaciones del inversor, y luego se verifica el desempeño en régimen permanente del inversor, contrastándolo el desempeño ideal senoidal puro.

### II. CONSIDERACIONES GENERALES

El flujo de potencia a través de un inductor serie, de reactancia  $X_L$ , queda dado por:

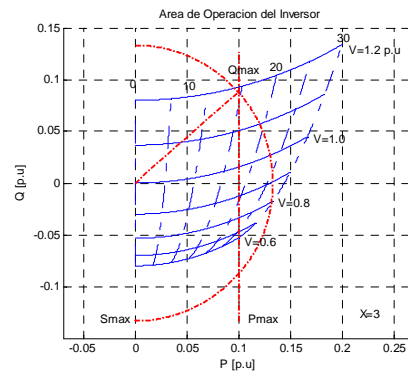
$$\begin{aligned} \delta_p &= \delta_v - \delta_E \\ P &= \frac{VE}{X_L} \sin(\delta_p) \\ Q &= \frac{V^2 - VE \cos(\delta_p)}{X_L} \end{aligned} \quad (1)$$

Siendo,  $V$  y  $E$  la magnitud de los voltajes en los extremos del inductor y  $\delta_v$ ,  $\delta_E$  los respectivos ángulos. De (1) resulta evidente que una inductancia de gran valor permite una menor entrega de potencia que una de pequeño valor. En tal sentido hay un tamaño óptimo de inductor. Si el inductor es menor que esa cantidad, entonces se garantiza que se pueden entregar el valor de potencia especificado. La condición de inestabilidad es lograda siempre que el ángulo  $\delta_p$  entre los dos voltajes se aproxima a los  $90^\circ$ . Es común que el diseño de tal inductor sea tal que la potencia de la fuente pueda ser entregada sin que se excedan los  $30^\circ$ . Esta condición asegura una propiedad deseada en todos los controladores: *linealidad*. Esto es debido al hecho de que la función seno se comporta aproximadamente lineal entre  $[0, \pi/6]$ .



**Figura 1. Plano P-Q con voltaje e impedancia constante**

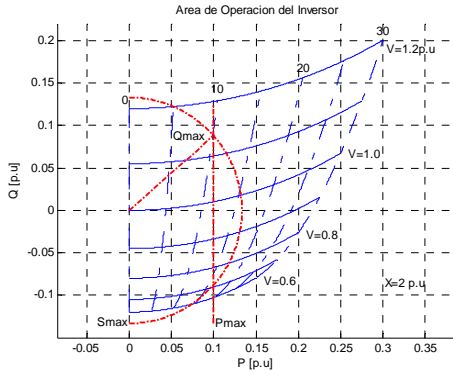
Si se asume que la magnitud de voltaje del inversor,  $V$  puede variar entre 0.6 y 1.2 p.u., operando a  $\delta_{pmax} = 30^\circ$ , con un voltaje de red de 480 voltios ( $E = 1.0$  p.u.), entonces se puede construir la curva de potencia activa y reactiva inyectada a la red. Cada valor de inductancia, define una cierta región en el espacio que puede ser alcanzada, variando el ángulo entre  $0^\circ$  y  $\delta_{pmax} = 30^\circ$ . Supóngase que se tiene una fuente con potencia nominal de 100kVA, sobre las bases de  $S_{base} = 1$ MVA, las cantidades de  $P$  y  $Q$  de alrededor de 0.1 p.u., pueden ser alcanzadas por el inversor.



**Figura 2. Plano P-Q de capacidad con voltaje constante y ángulo,  $X = 3$ p.u.**

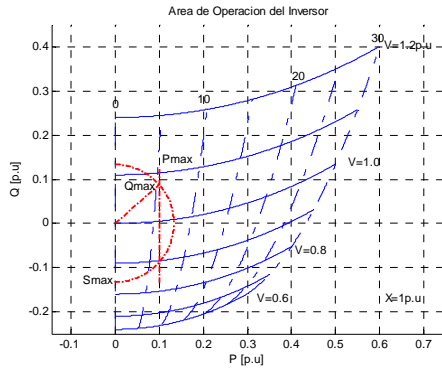
La Figura 2, muestra el plano  $P$ - $Q$ , con los lugares geométricos correspondientes a voltaje  $V \in [0.6; 1.2]$  y ángulo  $\delta_p \in [0^\circ, 30^\circ]$  para un valor fijo de  $X = 3$  p.u.; lo cual traza un mapa de los diferentes puntos de operación  $[P, Q]$  del inversor. A medida que disminuye el valor de la inductancia, es posible alcanzar una región más grande en el plano  $P$ - $Q$ . Para  $X = 2$  p.u., se muestra que la disminución en la inductancia permite que el área de operación del inversor, arrope una mayor cantidad de puntos operativos. De hecho, la capacidad agrada permite alcanzar el punto  $P = 0$  y la  $Q = \pm 0.1$  p.u. La Figura 4, muestra el plano  $P$ - $Q$ , trazado para  $X = 1.0$  p.u., donde se evidencia que es posible que ocupar mayor

área sobre el plano  $P$ - $Q$ , que para valores mayores del inductor.



**Figura 3. Plano  $P$ - $Q$  de capacidad con voltaje constante y ángulo,  $X = 2$  p.u.**

La región de espacio en el plano  $P$ - $Q$  mostrado en las Figuras 2, 3, y 4, son denominadas región  $\Omega$ .



**Figura 4. Plano  $P$ - $Q$  de capacidad con voltaje constante y ángulo,  $X = 1$  p.u.**

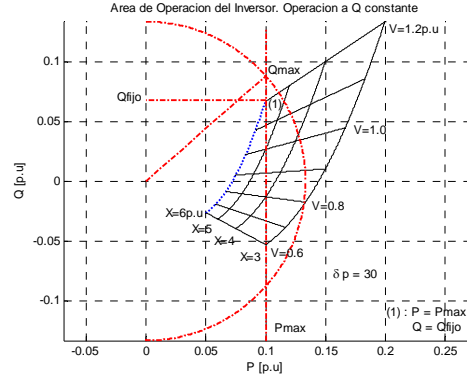
La región  $\Omega$  es un área sobre el plano  $P$ - $Q$  que son alcanzables dadas los requerimientos de  $E$ ,  $V$  y  $\delta_p$  y un dado  $X$ . Es importante notar que a medida que el tamaño del inductor disminuye, la región  $\Omega$  se incrementa en tamaño, mientras que en buena aproximación se puede afirmar que preserva la forma. El *área de operación del inversor* (AOI), es la región del espacio en el plano  $P$ - $Q$  necesario para alcanzar las especificaciones del fabricante. El tamaño ideal para  $X$  es la máxima impedancia tal que la condición es satisfecha.

**a) Límite de Factor de Potencia**

Como se muestra la Figura 2, el hacer cumplir el requerimiento de la máxima potencia activa, no es solo suficiente para satisfacer la condición  $AOI \in \Omega$ , del tamaño ideal de  $X$ . De tal modo, para  $X = 3$  p.u., muestra que la potencia nominal puede ser entregada pero regiones como  $P = 0$  y  $Q = \pm 0.1$  p.u. no son alcanzables. La Figura 4,  $X = 1$  p.u., muestra que llegando a los puntos  $P = 0$  y  $Q = \pm 0.1$  p.u., la condición  $AOI \in \Omega$ , es satisfecha con seguridad.

**b) Ajuste de  $Q$  Fijo**

La Figura siguiente, ayuda a entender la condición que permite la mejor inductancia.

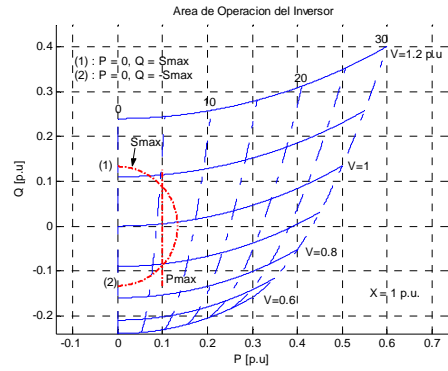


**Figura 5. Haciendo cumplir las Restricciones para  $Q_{fijo}$**

Aquí  $X$  es tal que satisface las ecuaciones para  $P$  y  $Q$  en el punto (1) con  $E$  especificado y  $V$  dentro de los límites y  $\delta_p$  a su valor máximo.

**c) Máxima Capacidad Volt-Amperes**

Al observar la Figura 2, es posible notar que la intersección de  $\Omega$  con el eje  $P = 0$ , es tal que la máxima potencia reactiva,  $Q$ , es ligeramente mayor que la máxima  $Q$  negativa. Esto es debido a la elección de  $V_{max}$ . Otra elección del máximo voltaje puede lograr efectos opuestos.



**Figura 6. Haciendo cumplir las restricciones para la capacidad VA**

La Figura 6, ha sido dibujada de acuerdo con la misma elección de máximo voltaje que el de la Figura 1. De Figura 1 se ve que este es suficiente para garantizar que el punto (2) es alcanzable en razón de satisfacer la condición  $AOI \in \Omega$ . El tamaño de la inductancia es el valor de inductancia que satisface las ecuaciones de  $P$  y  $Q$  en los puntos (1) y (2) con  $V$  dentro de los límites especificados con  $\delta_p$  a su valor máximo.

**d) Máxima magnitud de corriente**

El enfoque es muy similar al caso de máxima capacidad en volt-amperes, con la única excepción que el valor del máximo valor de voltaje amperes es definido dependiendo del límite de máxima corriente. Ya que un límite de magnitud corriente debe ser satisfecho, el mayor valor de Volt-Amperes que necesita ser entregado por la inductancia ocurre en la condición de voltaje máximo:

$$S_{max} = V_{max} I_{max}$$

Con el valor de  $S_{max}$ , es posible repetir la misma lógica de c) para encontrar el tamaño óptimo del inductor.

**III. SELECCIÓN DEL INDUCTOR**

Un simple análisis de las Figuras 2, 3 y 4, permiten seleccionar el inductor para un tamaño de  $X = 1$  p.u., ya que

es el valor que permite satisfacer los criterios de fabricación del inversor.

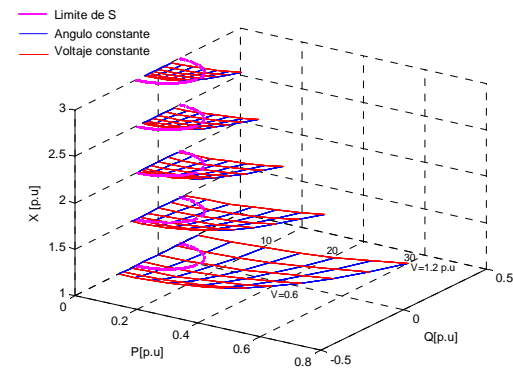


Figura 7. Superficies P-Q para V, X y  $\delta$

Como el inversor tiene una capacidad máxima de 100 kW, factor de potencia mínimo de 0.75, se tiene que la base de impedancia para los cálculos es:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{(480V_{oltios})^2}{100kW} = 2.304\Omega$$

De modo que el inductor queda dado por:

$$L = \frac{X [p.u.] Z_{base}}{2\pi f} = \frac{1 p.u. \times 2.304\Omega}{2\pi 60Hz} = 0.006111549814Hy$$

#### IV. CONSIDERACIONES GENERALES

##### IV.1. Inversor Hipotético

Para efectuar la verificación practica, se procedió a construir el modelo circuital del inversor, el inductor, y la carga. Para la efectuar las simulaciones, se hizo una serie de suposiciones:

1. El inversor fue simulado como una fuente ideal de voltaje, considerando por simplicidad que la onda que entrega es perfectamente senoidal, y de magnitud y amplitud constante.
2. La carga se simulada como una red R-L serie, con parámetros concentrados.

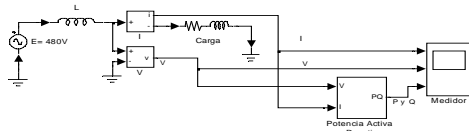


Figura 8. Modelo Hipotético del Inversor con Carga

##### IV.2. Resultados

Se procedió a efectuar simulaciones para diferentes valores de carga. Se ha seleccionado, verificar el voltaje y la corriente que entrega el inversor en sus terminales, cuatro niveles de carga: 100%, 75%, 50%, 25%, 10%, para tres factores de potencia:  $\cos \phi = 1$ ,  $\cos \phi = 0.9$ , y  $\cos \phi = 0.75$ .

Tabla 1. Magnitud de Voltaje y Corriente a la Salida del Inversor Ideal

S [kVA]	Cos $\phi = 1$			
	V [Volt]	I [Amp]	$\delta_v$	$\delta_i$
100	339.4	147.3	-45	-45
75	384	125	-36.87	-36.87
50	429.3	93.17	-26.57	-26.57
25	465.7	50.53	-14.04	-14.04
10	477.6	20.73	-5.71	-5.71

S [kVA]	Cos $\phi = 0.9$			
	V [Volt]	I [Amp]	$\delta_v$	$\delta_i$
100	284.1	123	-32.19	-57.72
66.6	337.4	97.59	-24.94	-50.74
33.3	405.5	58.65	-14.68	-40.48
13.3	450.8	26.08	-6.47	-32.27

S [kVA]	Cos $\phi = 0.75$			
	V [Volt]	I [Amp]	$\delta_v$	$\delta_i$
100	286.8	111.9	-26.63	-60.10
66.6	336.7	87.96	-20.53	-54.35
33.3	402.7	52.39	-12.11	-45.58
13.3	448.3	23.33	-5.36	-38.84

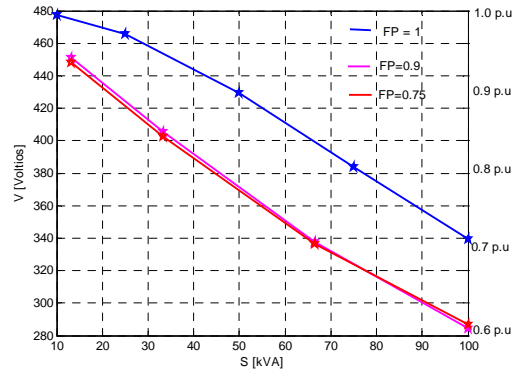


Figura 9. Voltaje en Terminales del Inversor para varios factores de potencia

Una vez simulado los diferentes niveles de carga para diferentes factores de potencia, se demuestra que al aumentar la carga (S), el voltaje en terminales (V) disminuye, siendo la magnitud de la disminución, mayor a medida que el factor de potencia disminuye. Para los estados de carga simulados, al mas pesimista factor de potencia (el mínimo), el voltaje en terminales no sale de los limites de regulación considerados,  $V \in [0.6; 1.2]$ .

##### IV.3. Inversor Real

El inversor real, dista mucho de una fuente ideal de voltaje perfectamente senoidal, por lo que resulta importante evaluar el desempeño real, del inversor. Para ello se construyo el modelo real de un inversor, del tipo alimentado por una fuente de voltaje (V/S), al cual le fue incorporado el inductor ya calculado, y una carga. La carga es simulada por un modelo R-L serie. El inductor serie,  $L = 0.0061$  Henry, ha sido dimensionado para permitir que el inversor entregue a la carga, una potencia máxima de 100 kW, a una tensión nominal, fundamental de 480 voltios RMS, siendo el mínimo factor de potencia 0.75.

El inversor esta compuesto por un puente universal de dos ramas con IGBT, cada uno de los dispositivos posee su diodo rueda libre, y la respectiva red snubber. Por simplicidad, se ha implementado una técnica de modulación de ancho de pulso para la modulación del inversor, con una frecuencia de muestreo de 1080 Hz, y un índice de modulación de 0.8.

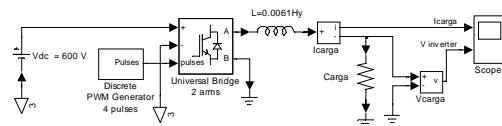


Figura 10. Modelo de Inversor Real con Carga

Se trata de un inversor monopolar cuya fuente de potencia primaria, DC, ha sido modelado por una fuente ideal de

voltaje constante a 600 Voltios, de modo que la magnitud de la fundamental que entregará el inversor, a un índice de modulación de 0.8, queda dado por:

$$V_{fund} = mV_{DC,max} = 0.8 \times 600 \text{ Voltios} = 480 \text{ Voltios}$$

#### IV.4. Resultados

Para evaluar el desempeño del inversor, se emplea la técnica de transformada rápida de Fourier y la Distorsión Total

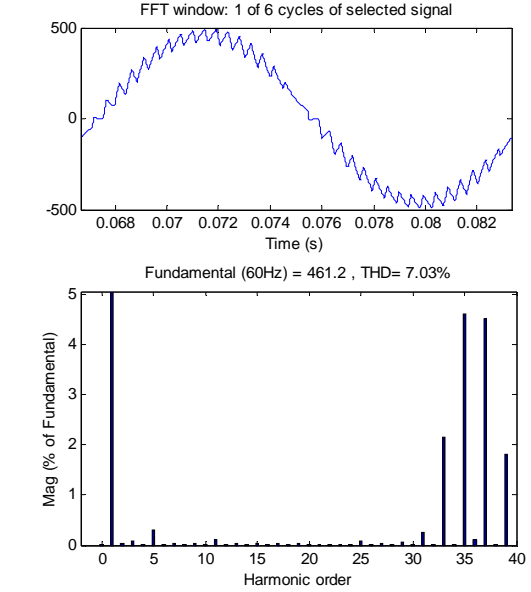
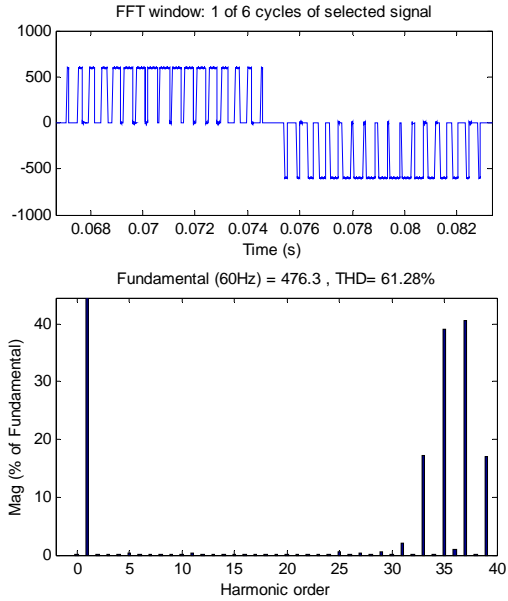


Figura 11. Voltaje en Terminales del inversor, en vacío y a 25kW @  $\cos\phi=1$

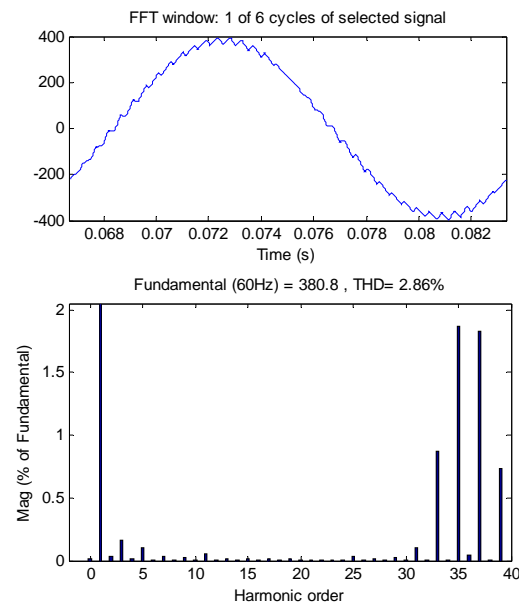
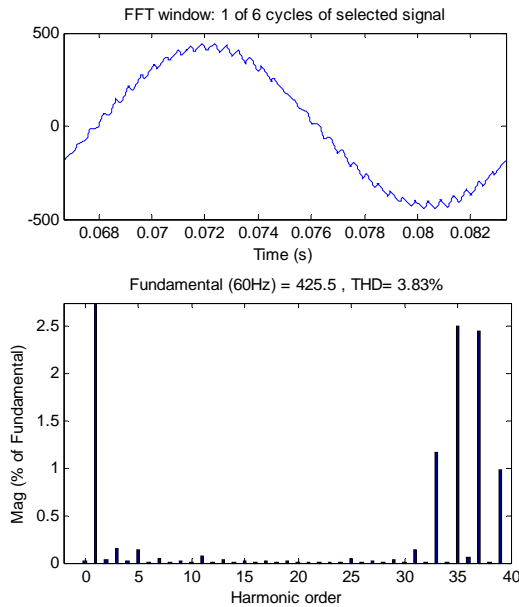


Figura 12. Voltaje en Terminales del inversor, a 50kW y 75 kW @  $\cos\phi=1$

Armónica (THD) a las variables voltaje y corriente en la salida del inversor.

Cuando el inversor, se encuentra en vacío, la onda de voltaje en sus terminales evidencia claramente la técnica de modulación por ancho de pulso, con un THD de 61.28%, y una fundamental de 476.3 Voltios.

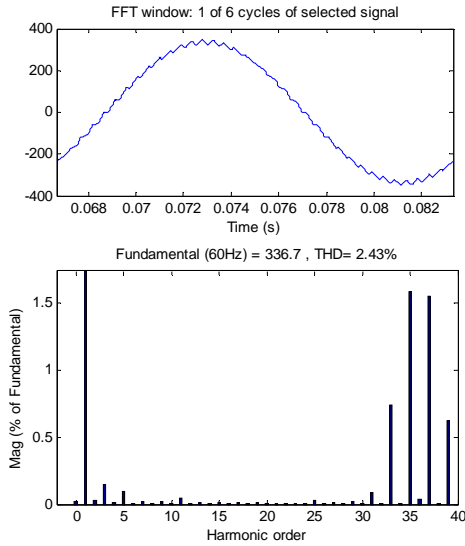


Figura 13. Voltaje en Terminales del inversor, a 100kW @  $\cos\phi=1$

S [kVA]	Cos $\phi = 1$			
	V [Volt]	I [Amp]	THD <sub>v</sub> %	THD <sub>i</sub> %
100	336.7	146.1	2.43	2.43
75	380.8	123.9	2.86	2.86
50	425.5	92.34	3.83	3.83
25	461.2	50.05	7.03	7.03
0	476.3	0	61.28	0

Las simulaciones indican que a medida que aumenta la carga en terminales del inversor, el voltaje fundamental en sus terminales tiende a disminuir, siendo mayor la magnitud de

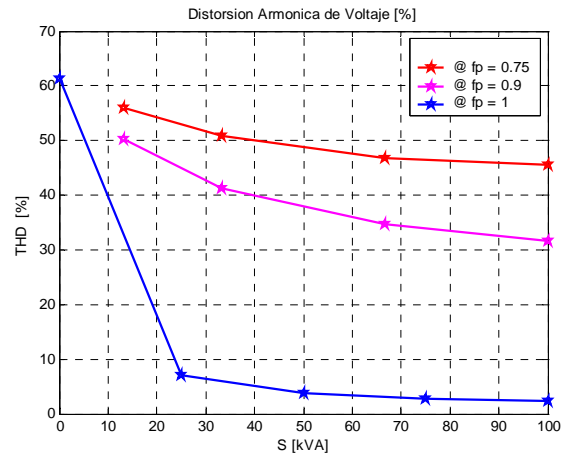
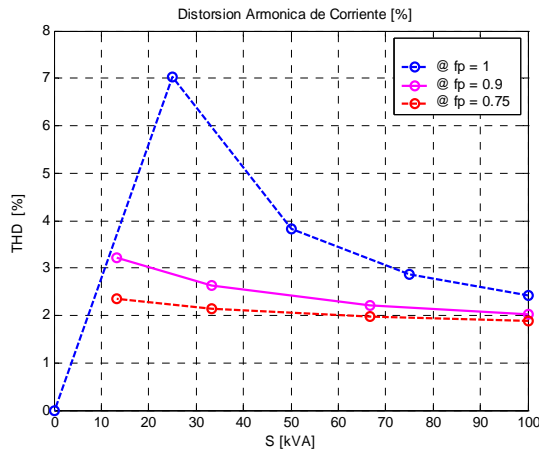


Figura 15. Distorsión Armónica Total [%], para el Voltaje y la Corriente a la salida del inversor

Como se ha mostrado con las simulaciones, las ondas de voltaje y corriente que entrega el inversor real, posee distorsión respecto a la senoidal pura, de hecho la transformada rápida de Fourier revela un contenido de armónicas. Al respecto la descomposición de Fourier de las ondas, confirma lo que la teoría indica sobre la anulación de armónicas, en inversores con técnica de modulación de ancho de pulso. Se muestra que para las armónicas apreciables se presentan a frecuencias superiores a la frecuencia de la portadora. Pero el contenido de armónicas en la onda de tensión y corriente, respecto al factor de potencia, poseen un comportamiento inverso. El THD de voltaje es mayor a bajos

esta disminución a medida que disminuye el factor de potencia.

S [kVA]	Cos $\phi = 0.9$			
	V [Volt]	I [Amp]	THD <sub>v</sub> %	THD <sub>i</sub> %
100	281.3	122.1	41.64	2.03
66.6	334.8	96.79	34.65	2.22
33.3	402.1	58.17	41.31	2.64
13.3	446.8	50.21	25.85	3.21

S [kVA]	Cos $\phi = 0.75$			
	V [Volt]	I [Amp]	THD <sub>v</sub> %	THD <sub>i</sub> %
100	261.6	113.6	45.57	1.88
66.6	312.6	90.43	46.67	1.97
33.3	382.2	55.31	50.94	2.15
13.3	435.9	25.2	55.90	2.36

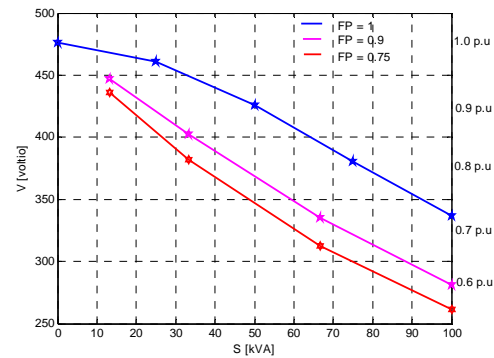


Figura 14. Voltaje fundamental (60Hz) en terminales del inversor @  $\cos\phi = 1, 0.9, 0.75$

factores de potencia, mientras que la corriente muestra lo contrario.

## V. CONCLUSIONES

Se mostró el procedimiento gráfico para dimensionar adecuadamente el inductor serie para un inversor alimentado por fuente de voltaje (VSI), empleando las superficies  $P-Q$  dada por las condiciones de la red ( $E, V, X$  y  $\delta$ ) y el área de operación del inversor, definido por las especificaciones del inversor. El enfoque empleado quedó demostrado con la simulación, empleando un modelo hipotético del inversor, como una fuente de voltaje senoidal, y empleando un modelo real de inversor con técnica de modulación por ancho de pulso. Como resultado, se verificó que la discrepancias entre

las magnitudes en los voltajes para diferentes niveles de carga y factor de potencia, en el mas desfavorable de los caso no supera 13%. De hecho, el error entre ambos modelos tiende a disminuir conforme el factor de potencia de la carga es mejor y aumenta su potencia. Con lo que se evidencia que suponer el VSI como una fuente ideal de voltaje senoidal puro es factible. Esta aproximación es valida para niveles de carga mayores al 15% de la capacidad del inductor y factor de potencia mayor al mínimo aceptable por el inductor.

#### **VI. REFERENCIAS DOCUMENTALES**

- [1] CIGRE, TF 38.01.10, "*Technical Brochure on Modeling New Forms of Generation and Storage*", 2000
- [2] Lasseter, R., Tomsovic, K. Piagi P. "*Scenarios for Distributed Technology Applications with Steady State and Dynamic Models of Loads and Micro-Sources*", CERTS 2000.
- [3] Piagi, P., Lasseter L., "Consortium for Electric Reliability Technology Solutions Industrial Application of MicroGrids", CERTS, 2001
- [4] Lasseter, R., Tomsovic K., y Piagi P. "*Scenarios for Distributed Technology Applications with Steady State and Dynamic Models of Loads and Micro-Sources*", 2000
- [5] Lasseter, Akhil, Marnay, Stevens, Dagle, y otros. "*Integration of Distributed Energy Resources. The CERTS MicroGrid Concept*", CERTS, 2002
- [6] CIRED Working Group No 4 on Dispersed Generation Preliminary Report for Discussion at CIRED 1999, Nice, 2 June.