

## 1.5.- LA RED DE ESTABILIZACIÓN DE IMPEDANCIA

La amplitud y carácter de las perturbaciones que generadas por los convertidores conmutados llegan a la red de alimentación, depende tanto de la impedancia de red como de la impedancia de la fuente EMI. Dependiendo del valor relativo que tengan estas impedancias tendremos un comportamiento del generador EMI como fuente de corriente o de tensión. El conocimiento de la naturaleza de la fuente EMI es determinante a la hora de elegir un filtro adecuado.

En cuanto a la impedancia de la red de alimentación cabe decir que es un parámetro difícil de determinar con precisión, puesto que depende de muchos factores cambiantes: topología de la instalación, longitud de cableado hasta el transformador, cargas conectadas a ella entre las que cabe destacar las baterías de condensadores de compensación de energía reactiva y las luminarias, etc. Por otra parte se debe tener en cuenta que el valor la impedancia de red debe ser determinado en un amplio margen de frecuencias (de 10kHz hasta 30MHz).

En la literatura se pueden encontrar resultados de los diversos estudios llevados a cabo para determinar el valor de la impedancia de la red de alimentación [42][43]. En la Figura 1.19, que ha sido extraída de [44], aparece el valor del módulo de la impedancia de la red de alimentación pública en Europa y los EEUU en función de la frecuencia.

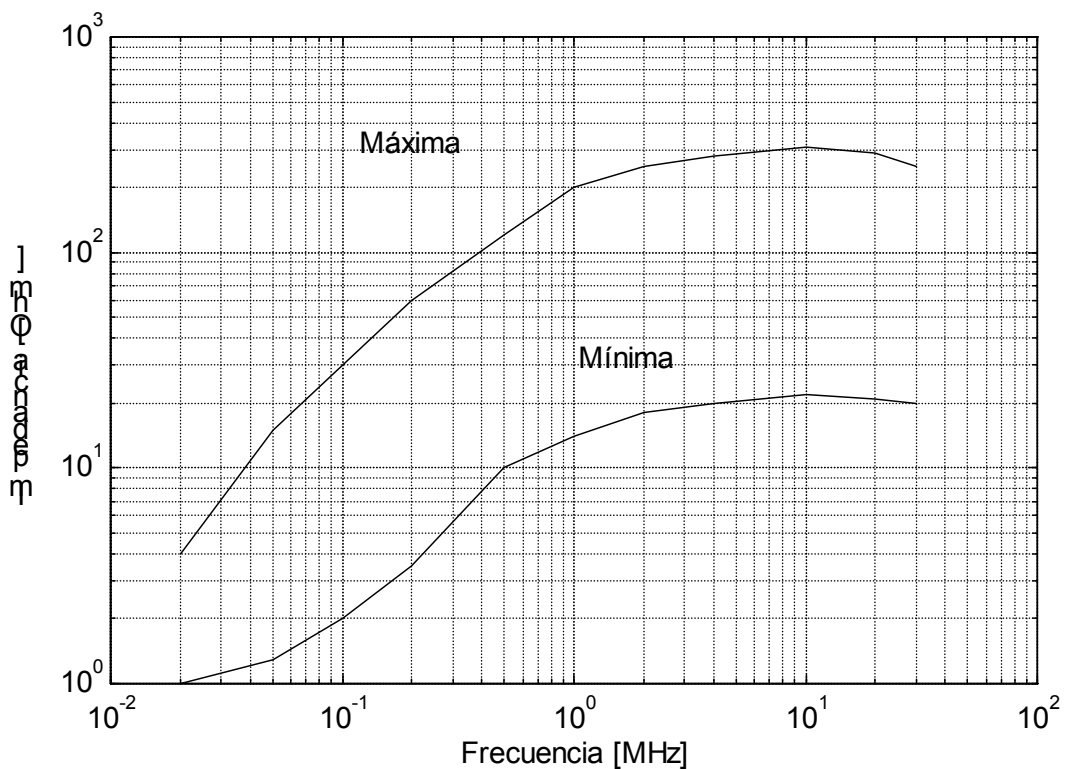


Fig. 1.19 Estimación del valor de la impedancia de la red de alimentación en función de la frecuencia

En [45] se puede encontrar el valor de la impedancia de la red de alimentación en función de otros parámetros, tales como carga, tipo de instalación, etc.

Aunque los resultados mostrados en la Figura 1.19 tienen una validez restringida y no son universales, sí ponen de manifiesto que la dispersión de los valores encontrados hace que no sea posible dar un valor concreto para la impedancia de la red de alimentación. Ésta tomará valores diferentes en distintos puntos de la misma. Incluso en un mismo punto puede variar a lo largo del tiempo, dependiendo de la carga de la red, etc. Es decir, la red de alimentación ofrece a la perturbación una impedancia variable difícil de estimar. Como consecuencia de ello, los resultados obtenidos al ensayar un convertidor dado conectado a una misma red en puntos e instantes diferentes pueden ser muy distintos. En otras palabras, las medidas obtenidas conectando el equipo bajo ensayo directamente a la red no son repetibles.

En definitiva, se hace necesario algún dispositivo que permita ofrecer a la perturbación una impedancia conocida establecida de antemano. De esta forma los resultados obtenidos serán repetibles. Este dispositivo es la llamada red de estabilización de impedancia de red o red artificial, también conocida como LISN, acrónimo del inglés Line Impedance Stabilization Network. La red artificial es un filtro pasivo que se conecta entre la red de alimentación y el equipo bajo ensayo y debe ofrecer a la perturbación una impedancia que se encuentra definida en las normas. La correspondiente a la norma [46] es la que aparece en la Figura 1.20.

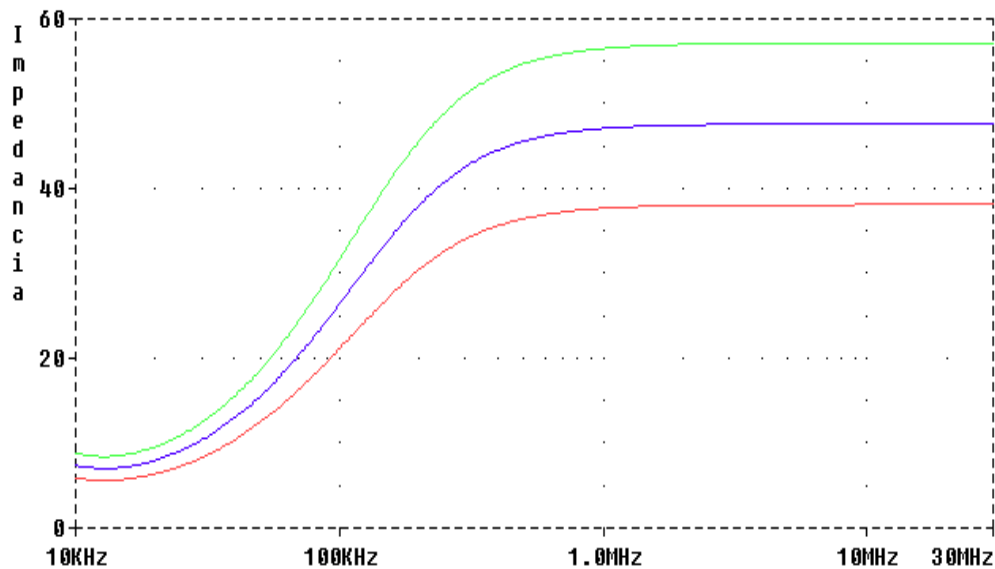


Fig. 1.20 Impedancia de la red artificial

Como se puede observar, la red artificial debe ofrecer una impedancia dentro del margen de frecuencias estudiado de unos  $50\Omega$ . El trazo azul representa el valor exigido, mientras que los trazos rojo y verde son el 20% de tolerancia admitida. Además de ofrecer a la perturbación una impedancia conocida la red artificial desempeña otras funciones:

- evitar que las perturbaciones existentes en la red de alimentación alcancen al medidor de EMI
- ofrecer una adaptación de impedancias apropiada para el receptor EMI

- permitir, a la frecuencia de la red, la alimentación del equipo bajo ensayo, sin alterar las características de amplitud, frecuencia de la misma

Un modelo simplificado de una red artificial se muestra en la Figura 1.21.

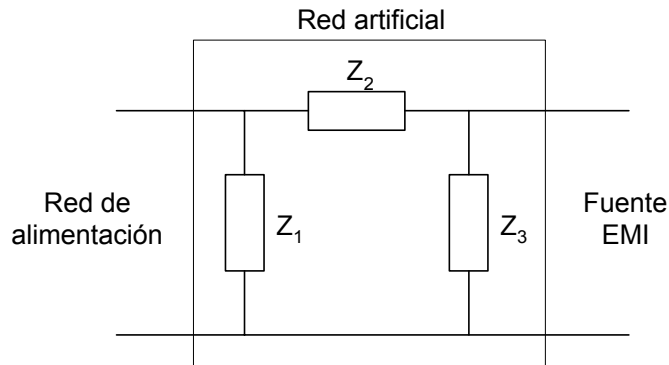


Fig. 1.21 Diagrama equivalente de un red artificial

Para cumplir con los anteriores requisitos las impedancias deberían idealmente tomar los valores de la Tabla 1.3

TABLA 1.3

Impedancias	Frecuencia de red	Frecuencia de las perturbaciones
$Z_1$	$\infty$	0
$Z_2$	0	$\infty$
$Z_3$	$\infty$	50Ω

Existen dos tipos de redes artificiales: las delta ( $\Delta$ ) y la V. Las primeras permiten la discriminación del modo común y diferencial y son utilizadas para medir las perturbaciones conducidas en líneas de comunicaciones y datos [44].

Sin embargo, las redes artificiales que se utilizan para la medida de las perturbaciones en Electrónica de Potencia son las del tipo V. En la literatura se encuentran diferentes modelos de redes artificiales del tipo V. [47]. Algunas de ellas presentan resonancias dentro del margen de frecuencia de medida. Un inconveniente que presentan las redes artificiales tipo V es que no pueden discriminar por si solas entre las perturbaciones que se propagan en modo común de las que lo hacen en modo diferencial. Esto se puede ilustrar con la ayuda de la Figura 1.22, en la que aparece el esquema de una red artificial simplificada y una fuente EMI conectada a ella. Puesto que el ruido en modo común se propaga en el mismo sentido por los conductores activos su contribución a la lectura tiene el mismo signo en ambos terminales de medida (L1-GND y L2-GND). Sin embargo, el ruido en modo diferencial se propaga en sentidos opuestos por los conductores activos. Por lo tanto, su contribución a la medida en ambos terminales es de signo opuesto.

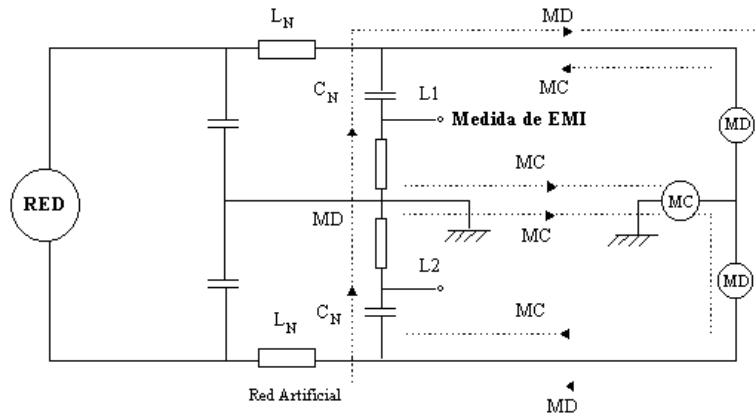


Fig. 1.22 Medida de perturbaciones conducidas con red artificial tipo V

Es decir, la tensión que obtenemos en los dos terminales de medida se puede expresar como :

$$V_{L1} = V_{mc} - \frac{V_{md}}{2} \quad V_{L2} = V_{mc} + \frac{V_{md}}{2} \quad (1.37)$$

Puesto que el medidor EMI tiene únicamente en cuenta el módulo e ignora la fase, tal como se vio en el Apartado 1.4, los resultados obtenidos midiendo en los terminales L1 y L2 deben ser teóricamente iguales. Si bien las normas establecen límites máximos para estas medidas combinadas del ruido, es muy conveniente conocer cual es la contribución de cada modo de propagación al total del ruido emitido con objeto de arbitrar soluciones a un problema determinado. El Apartado 1.5.2 está dedicado a los diferentes métodos de separación de los modos de propagación en la medida de perturbaciones conducidas con redes artificiales.

La red artificial utilizada en esta Tesis es una red monofásica normativa, cuyo esquema aparece en la Figura 1.23. Sin embargo, también se han utilizado otros métodos de medida no normativos para poner de relieve el comportamiento de los convertidores bajo estudio.

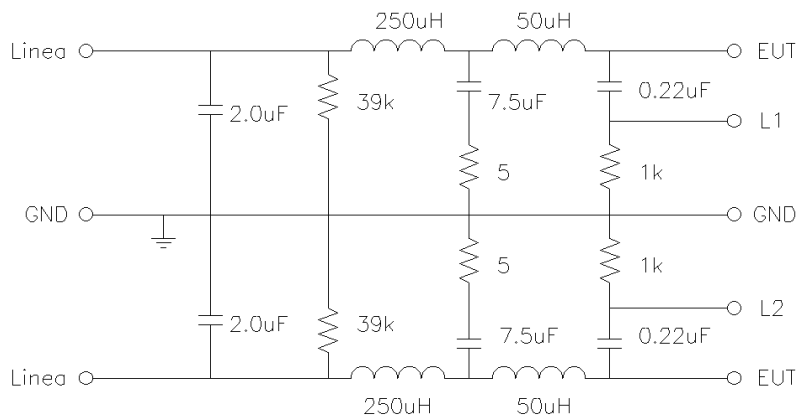


Fig. 1.23 Esquema de la red artificial utilizada

### 1.5.1.- El limitador de transitorios

El limitador de transitorios es un accesorio de la red artificial que debe ser utilizado cuando se emplea un analizador de espectros como receptor EMI. La función de este dispositivo es limitar la energía de los transitorios que alcanzan el analizador de espectros para evitar que destruyan el mezclador de entrada. Concretamente, el limitador utilizado en este trabajo ofrece una atenuación de 10dB en la banda pasante (10kHz-30MHz) y un perfil de atenuación de segundo orden. Como modelo para caracterizar el comportamiento de este dispositivo se toma un filtro pasa-altas de segundo orden con una frecuencia de corte de 10kHz. Por lo tanto, la función de transferencia,  $T(j\omega)$ , del limitador de transitorios es:

$$T(j\omega) = T(s) = \frac{8 * 10^{-11} s^2}{0,253 * 10^{-9} s^2 + 31,83 * 10^{-6} s + 1} \quad (1.38)$$

### 1.5.2.- Discriminación de los modos de propagación

Tal como se ha visto en los Apartados anteriores, las redes artificiales del tipo V tienen el inconveniente de no permitir una medida separada de los dos modos de propagación. Si se quiere discriminar la contribución de cada uno de los dos modos, común y diferencial, al nivel total de perturbación basta con sumar y restar las dos señales en el dominio temporal (L1-GND y L2-GND) que se obtienen de la red artificial. Sumando se obtiene una señal proporcional al modo común, mientras que si se restan se obtiene una señal proporcional al modo diferencial. Esta idea tan sencilla resulta algo difícil de llevar a la práctica. Debe tenerse en cuenta que estas operaciones aritméticas de suma y resta se deben llevar a cabo dentro de todo el margen de frecuencias. Por lo tanto, el sistema de medida debe tener una respuesta idealmente plana dentro de la banda de 10kHz hasta los 30MHz.

Las opciones que se presentan son las siguientes:

- circuito sumador con amplificadores operacionales de gran ancho de banda
- transformadores de alta frecuencia (power splitters, red Paul-Hardin)
- pinza amperimétrica de alta frecuencia.

La gran diferencia entre los dos primeros métodos y el tercero es que los dos primeros requieren el uso de una red artificial, mientras que el tercero no necesita de red artificial alguna. Esto permite una mayor versatilidad en la medida. Con la pinza amperimétrica de alta frecuencia se pueden medir las corrientes perturbadoras en cualquier punto del circuito, mientras que con los otros métodos únicamente se podrá medir la perturbación en el punto donde se halle conectada la red artificial. Un ejemplo de esto es la medida de las perturbaciones que se propagan entre ondulator y motor en un accionamiento eléctrico.

Utilizando una pinza amperimétrica de alta frecuencia es muy sencillo llevar a cabo esta medida, mientras que con los otros métodos resulta imposible. Esta es la razón principal por la que se ha optado por la pinza amperimétrica de alta frecuencia como método de discriminación de los modos de propagación de las perturbaciones.

A continuación se enumeran las características de cada uno de los métodos anteriormente mencionados.

*Circuito sumador con amplificadores operacionales de gran ancho de banda*

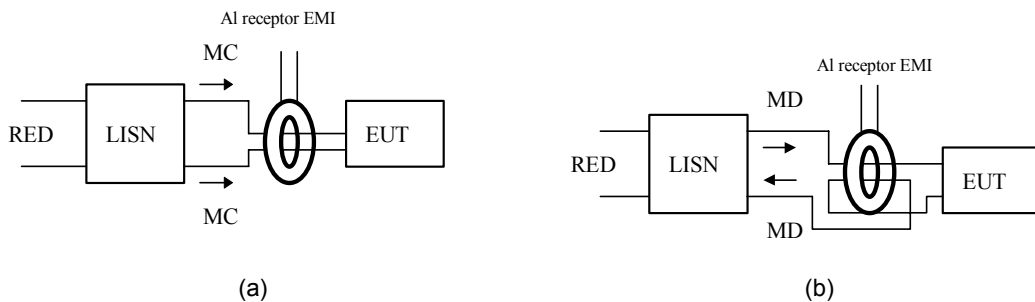
Hoy en día existen amplificadores operacionales con un gran ancho de banda que los hacen candidatos a ser utilizados para esta aplicación [48] [49] [50] [51] [52]. Sin embargo su utilización presenta algunos inconvenientes importantes. El primero de ellos es el margen dinámico de estos circuitos. Mientras que las señales que se obtienen de la red artificial pueden tener un margen dinámico de 60V, el margen de entrada de estos operacionales es de unos 5V. Por otra parte, estos dispositivos son propensos a tener autooscilaciones, debidas a la gran ganancia que todavía tienen a frecuencias elevadas. Los resultados de los estudios que se han llevado a cabo para intentar una aplicación práctica de este tipo aconsejan desechar esta opción [36].

*Transformadores de alta frecuencia*

Este método consiste básicamente en llevar a cabo la suma y resta de las señales provistas por la red artificial y apuntadas en las expresiones (1.37) con transformadores con una respuesta plana dentro del margen de frecuencias en el que se extiende la medida. Existen diferentes variantes a la hora de aplicar este principio. Desde la clásica red de Paul-Hardin [54], hasta las propuestas mas recientes [67], en las que se utilizan circuitos comerciales [53]

*Pinza amperimétrica de alta frecuencia*

El procedimiento que se ha utilizado en este trabajo para obtener una medida separada del modo común y diferencial es una pinza amperimétrica de alta frecuencia modelo ESH2-Z1 de la casa Rhode-Schwarz. Un esquema de la disposición experimental para medir con esta pinza aparecen en la Figura 1.24.



**Fig. 1.24** Medida de los modos común (a) y diferencial (b) con una pinza amperimétrica

En el caso de la Figura 1.24(a), los dos conductores activos atraviesan en el mismo sentido la pinza amperimétrica. Los flujos que generan las componentes de corriente en modo común en el núcleo magnético se suman, mientras que los flujos generados por las componentes de modo diferencial se cancelan. Por lo tanto, la lectura será proporcional a la perturbación en modo común.

En el caso de la Figura 1.24(b), los dos conductores activos atraviesan en sentidos contrarios la pinza amperimétrica. Los flujos que generan las componentes de corriente en modo diferencial en el núcleo magnético se suman, mientras que los flujos generados por las componentes de modo común se cancelan. Por lo tanto, la lectura será proporcional a la perturbación en modo diferencial.

La respuesta en frecuencia de la pinza utilizada se muestra en la Figura 1.25. Como se puede observar el factor de corrección por encima de los 100kHz es inferior a 1dB. Sin embargo, para frecuencias inferiores el factor de corrección es mayor.

La pinza amperimétrica se intercala entre la red artificial y el equipo bajo ensayo. A los dos terminales de medida de la red artificial se conectan dos terminaciones de línea de 50Ω. De esta forma la red artificial sigue ofreciendo una impedancia conocida a la fuente de perturbación, además de servir como elemento separador entre la red y el equipo bajo ensayo. Evidentemente, con la pinza amperimétrica solo captaremos perturbaciones en forma de corriente. Esto no representa ningún inconveniente en la medida de perturbaciones generadas por convertidores conmutados, puesto que este es el principal tipo de perturbación generado por estos dispositivos.

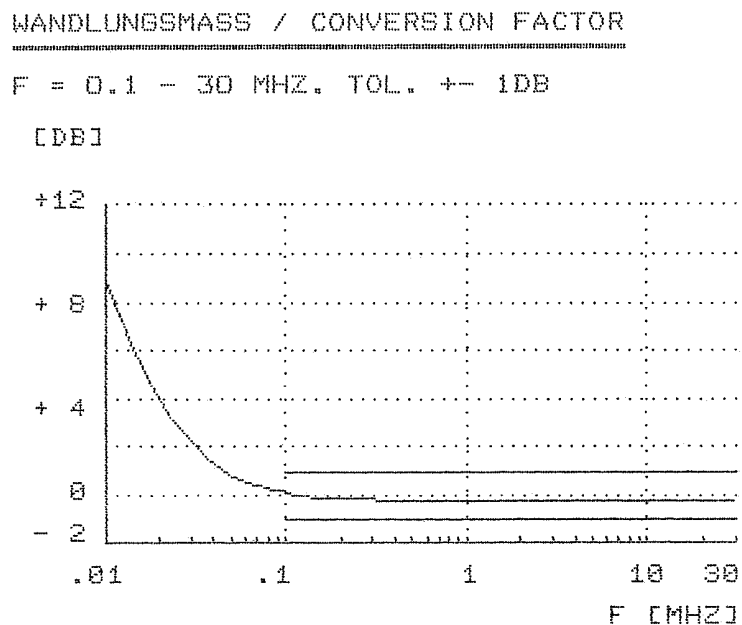


Fig. 1.25 Respuesta en frecuencia de la pinza amperimétrica utilizada

Por otra parte, las lecturas obtenidas con la pinza amperimétrica se pueden relacionar con los niveles de tensión especificados en la norma. Puesto que la tensión límite que fija la norma es producida por una corriente perturbadora que circula por un impedancia R la expresión que relaciona ambas lecturas es:

$$I(dB\mu A) = U(dB\mu V) - 20\log(R) \tag{1.39}$$

Si  $R=50\Omega$  se tiene:

$$I(dB\mu A) = U(dB\mu V) - 34 \tag{1.40}$$

Como ejemplo de la utilización de este método de separación consideraremos las perturbaciones generadas por una fuente conmutada. En las Figuras 1.26 y 1.27 se muestran respectivamente las lecturas de corriente en modo común y diferencial correspondientes a una fuente conmutada de 105kHz de frecuencia de conmutación. En el espectro correspondiente a la corriente en modo común se observa únicamente un pico alrededor de los 105kHz, mientras que en modo diferencial aparecen dos picos considerables a frecuencias inferiores. Además el pico correspondiente a la frecuencia de conmutación es mayor para el modo diferencial que para el modo común.

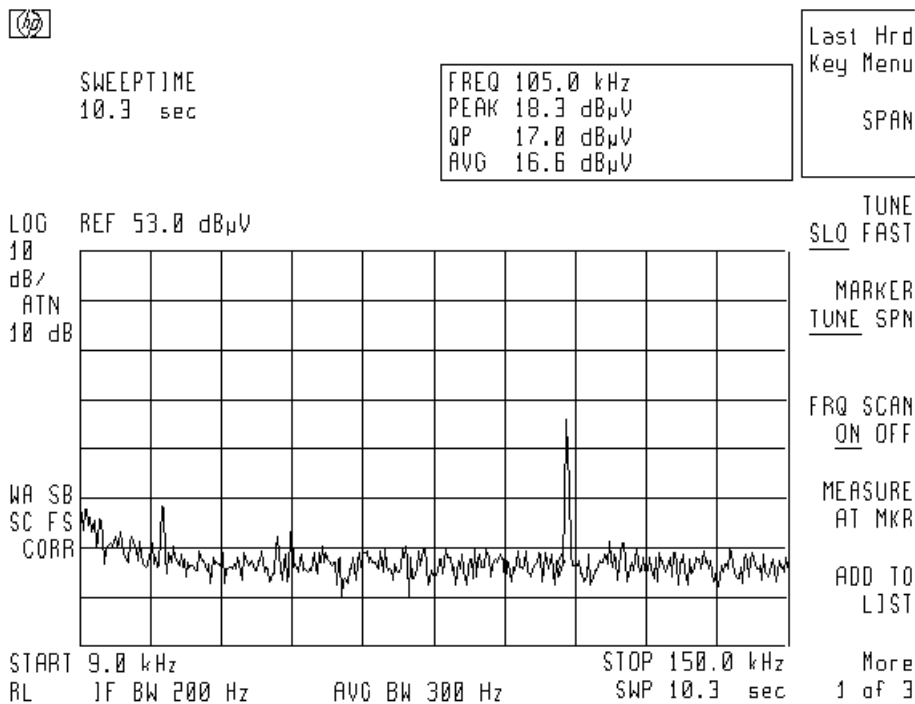
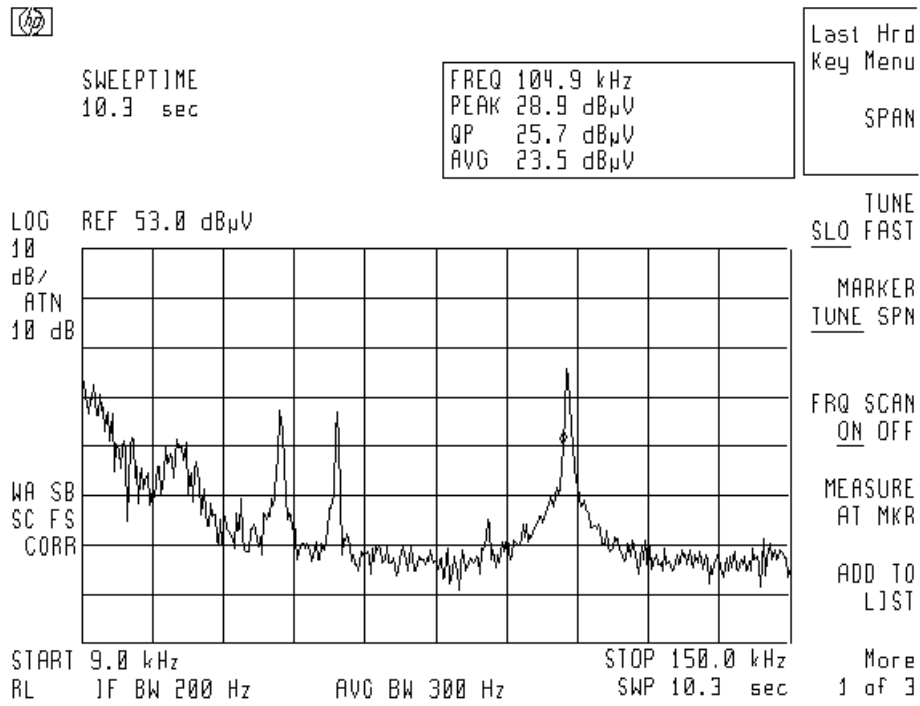


Fig. 1.26 Lecturas obtenidas con pinza amperimétrica en modo común





**Fig. 1.27** Lecturas obtenidas con pinza amperimétrica en modo diferencial

