

MEDIDAS ELÉCTRICAS

Guía de estudios

Capítulo 14

Ing. Jorge L. Dampé
Ing. Juan C. Dampé
Cátedra de Medidas Eléctricas

Capítulo 14

Errores debidos a señales espurias en sistemas de medida Técnicas de guarda

14.1. El concepto de sistema de medida.

En capítulos anteriores nos hemos ocupado fundamentalmente de aparatos y técnicas básicos en el campo de las mediciones. Frecuentemente su empleo no es aislado, sino que se los suele encontrar como parte constitutiva de sistemas más complejos, que en su forma general constituyen lo que se conoce como sistema de medición, esquemáticamente representado en forma reducida en la figura 14.1.



Figura 14.1: Esquema elemental de un sistema de medida

En ella se distinguen tres bloques,

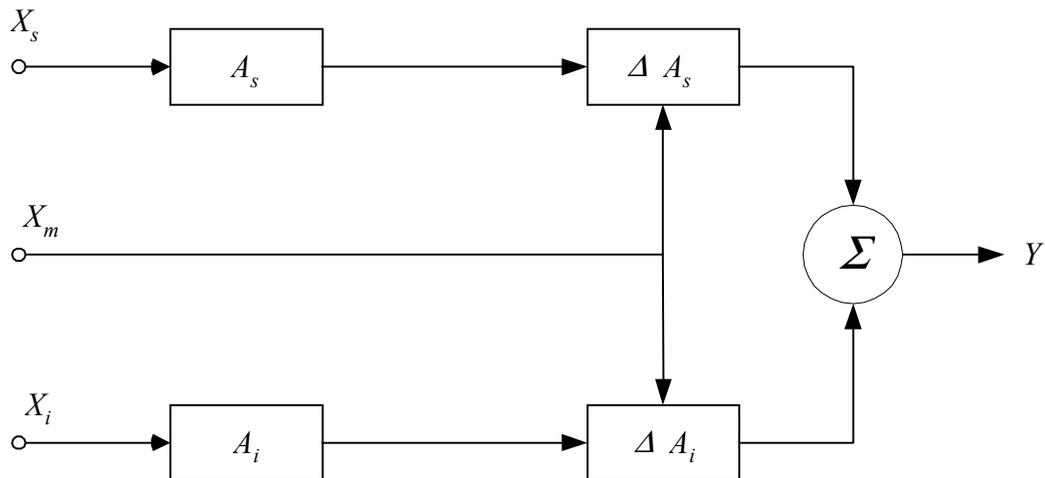
- * Bloque captador y acondicionador de la señal a medir X_s ;
- * Línea de transmisión;
- * Dispositivo de procesamiento.

El primero de ellos es el responsable de tomar la señal que se desea analizar, la que es enviada a través de la línea de transmisión al dispositivo final, el de procesamiento. La división presentada no es excluyente, a menudo se confunde uno de ellos con cualquiera de los otros, como sucede cuando para transmitir una cierta señal analógica, se recurre a su digitalización previa a ingresarla al canal de transmisión, por ejemplo.

El segundo bloque, la línea de transmisión, representa el nexo entre la señal adquirida, debidamente acondicionada, y el dispositivo capaz de recibirla, procesarla, y presentar la indicación en cualquiera de las formas posibles vistas hasta el momento, elemento este último correspondiente al tercer bloque. Como ejemplo, cabe mencionar que el conjunto punta atenuadora, cable coaxial y osciloscopio, o el sistema transformador de medida, cableado de conexión y elementos indicadores son sólo algunos dispositivos que responden al esquema de un sistema de medida tal como se lo definió en los párrafos anteriores.

En esta parte nos ocuparemos de reconocer las distintas causas que pueden afectar a la medición mediante el ingreso de señales no deseadas en distintas partes del proceso de realización de la misma. En un sistema real, el esquema de la figura anterior, donde la señal de entrada X_s es la única magnitud interviniente en la definición del resultado, generalmente pierde validez, por la presencia de las señales mencionadas anteriormente.

Para facilitar la comprensión de este fenómeno, nos referimos a la figura 14.2, que corresponde a un esquema más amplio de un sistema de medida, también simplificado, con la intervención de las señales perturbadoras espurias.



X_m : Magnitud de influencia;

X_i : Magnitud de interferencia;

A_s : Función de transferencia de X_s ;

A_i : Función de transferencia de X_i ;

ΔA_s y ΔA_i contemplan la contribución de X_m sobre la señal de salida modificando el lazo correspondiente a X_s y X_i respectivamente.

Figura 14.2: Esquema general de un sistema de medida, donde se visualiza la contribución de las distintas señales a la función de salida

Se aprecian tres tipos de señales que intervienen en la definición de la cantidad medida. Ellas son: la magnitud de interés, X_s , para la que el sistema ha sido específicamente concebido, y las magnitudes no deseadas, X_i y X_m , quedando todas relacionadas con la señal de salida por medio de las funciones de transferencia A_s , A_i , y ΔA_s y ΔA_i .

Las magnitudes X_i y X_m corresponden a señales que intervienen en todo proceso de medición, alterando de diversas formas el resultado del mismo. A las X_i se las denomina magnitudes de interferencia propiamente dichas, y pertenecen al tipo cuyos efectos se superponen al de la magnitud a medir, X_s , pese a que el sistema no está necesariamente diseñado para responder a ellas. Cabe aquí la aclaración de que su origen es *exclusivamente electromagnético o electrostático* cuando se trata de sistemas de medidas eléctricas o electrónicas, o cuando se refiere a etapas de dicha naturaleza en otros tipos de mediciones (como ser el caso de sistemas de medida de presión, temperatura, etc.) Como ejemplo de estas magnitudes podemos citar a la fem inducida por un campo magnético variable de 50 Hz en un circuito de medición de tensión de la misma frecuencia.

Las magnitudes X_m , ya consideradas en capítulos anteriores se las denomina magnitudes modificantes [1], o de influencia. Pertenecen a este tipo las capaces de hacer variar las características de transferencia de todo el sistema, tanto para la señal de interés X_s , reflejadas a través de la alteración de A_s , como para las señales de interferencia X_i , mediante cambios en A_i . Como ejemplo de estas últimas vale citar la temperatura, con su efecto de alterar la ganancia de alguna etapa de amplificación de un circuito de medida, etc. Resulta claro que a lo que debe tender cualquier sistema es a que la salida sea una función *perfectamente definida* de la función de entrada, y salvo raras excepciones, constante.

En base a lo hasta ahora considerado, y observando la figura 14.2, es fácil comprender que los caminos para lograr tal objetivo son los siguientes:

- * Disminuir la señal indeseada que ingresa al sistema, esto es, disminuir X_i ,
- * Disminuir la ganancia del bloque A_i
- * Disminuir las ganancias de los bloques ΔA_s y ΔA_i
- * Aumentar el valor relativo de X_s respecto de X_m , de manera tal que pase más desapercibido el efecto de la señal indeseada frente al de la de medida. Esto último suele indicarse como “aumentar la relación señal – ruido del sistema de medida”.

Es de notar que el último recurso, si bien viable en muchos casos desde el punto de vista teórico, no lo es así desde el punto de vista práctico.

14.2. Principales fuentes de señales perturbadoras. Clasificación por su origen

Las fuentes generadoras de señales perturbadoras reconocen dos fuentes de origen: las de *origen intrínseco* al sistema, como son por citar sólo alguna de ellas, las de ruido térmico, agitación electrónica en juntas con distinto grado de impureza, etc., todas ellas propias de los circuitos que constituyen el sistema, y las de *origen externo*. Estas últimas son las de mayor interés para el curso, por lo que a ellas nos referiremos en especial. Son las que revisten mayor importancia en la mayoría de los casos, a excepción de cuando se trata de mediciones que manejan magnitudes extremadamente pequeñas, o en casos de mediciones de muy alta exactitud.

En particular, entre las fuentes de perturbación de origen externo al sistema, requieren fundamental atención, tanto por su magnitud como por la frecuencia de aparición, las provenientes de acciones de campos magnéticos y eléctricos.

Para un mejor entendimiento de los conceptos totalmente generales vertidos en el esquema anteriormente visto, centraremos nuestra atención en un caso concreto, recurriendo para ello al circuito de la figura 14.3, que muestra un sistema de medición relativamente extenso, aunque sencillo. En él representamos a la incógnita (anteriormente denominada en forma general X_s) mediante un generador de tensión U_s con una impedancia de salida Z_s , y al dispositivo que efectuará la medida por medio de su impedancia de entrada R_i y C_i . El vínculo entre ambos elementos lo constituyen los conductores de unión dibujados.

En las cercanías del dispositivo de medida se encuentra un conductor que transporta una corriente i_d , de cualquier tipo, y a una cierta diferencia de potencial respecto del lazo de medición, siendo claro que aunque no exista vinculación conductiva entre ambos, la vinculación electromagnética entre éstos hará que aparezcan sumadas a la señal útil otras dos. Por un lado, la proveniente del acople inductivo, cuyo efecto será tanto más importante cuanto mayor sea el área del lazo de medición y la variación de la corriente i_d , entre otras cosas, y por otro lado, otra señal debida al acoplamiento capacitivo entre el conductor por el que circula i_d y el circuito de medida propiamente dicho.

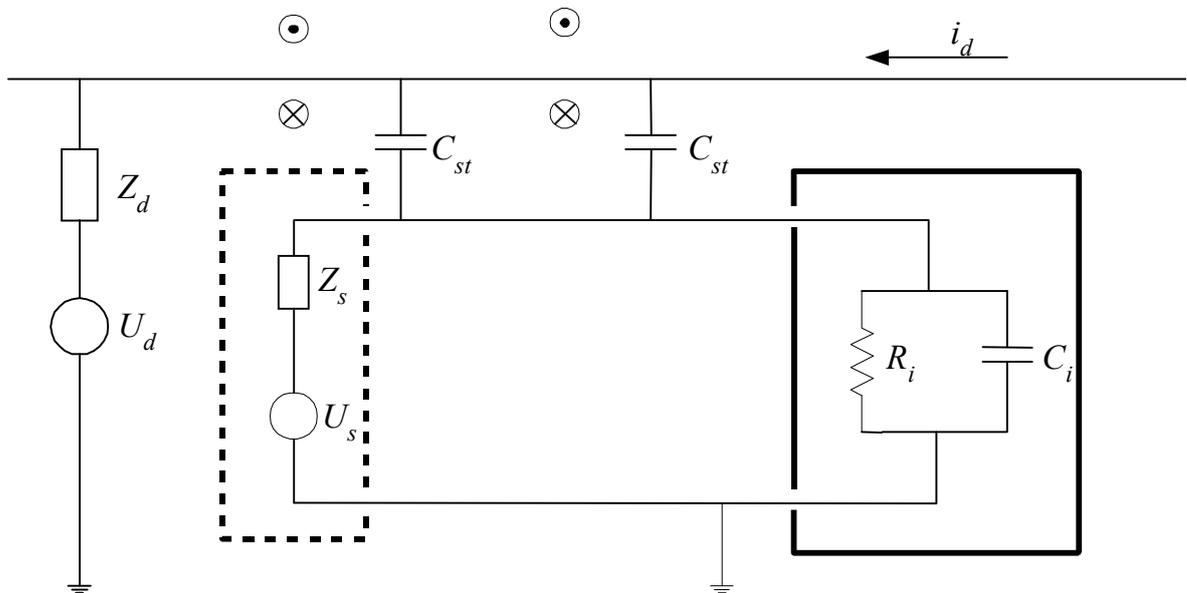


Figura 14.3: Esquema de un sistema de medida real sencillo.

Si se tiene presente que para ambas señales el monto de la interferencia es proporcional a la derivada de la tensión o de la corriente, se concluye que el problema se agrava con el aumento de la frecuencia.

Resulta oportuno, para dar validez práctica al esquema de representación visto en primer término, cuando se trató en forma general, definir de qué manera intervienen las magnitudes vistas en el caso concreto analizado en la conformación de cada uno de los bloques mencionados entonces. Ello se observa en la figura 14.4, en la que, la función de transferencia A_d está representada por la contribución del efecto de todo el circuito propio del instrumento de medición, incluyendo el cable desde la señal a medir hasta éste.

Conviene insistir en que más de una magnitud indeseada interviene en este caso. Ahora se trata de dos, y de distintos tipo y origen, por lo que en el esquema general visto se consideran dos funciones de transferencia, cuyo efecto se superpone.

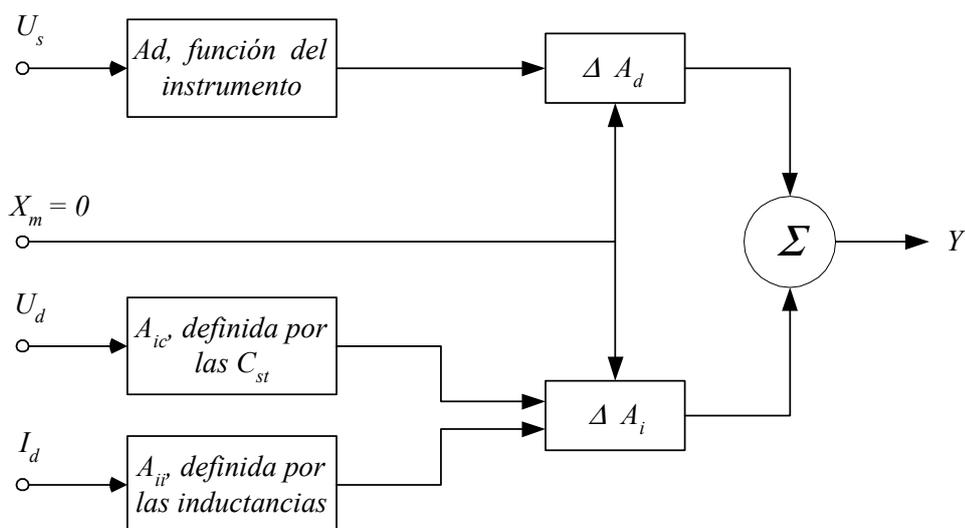


Figura 14.4: Representación del circuito de la fig. 14.3, según el esquema de bloques simplificado

Ellas son, por un lado y tal como se mencionara anteriormente, la que evalúa el efecto de la inductancia mutua entre el circuito de medida y el conductor, y por otro lado el que contempla las capacidades entre ambos, estando representados en la figura por las funciones A_{ii} y A_{ic} respectivamente, siendo elemental qué excitación se aplica a cada una de ellas.

La simple observación de las figuras y esquemas anteriores sugiere algunas medidas para reducir los efectos de los acoplamientos, que pueden resumirse en:

* Reducir en la medida de lo posible el área del sistema de medida, para disminuir el acoplamiento inductivo, esto es, achicar el valor de A_{ii} (Fig. 14.4);

* Emplear conductores blindados o coaxiales para el transporte de la señal, minimizando el monto de la función A_{ic} . (y evitar que por las mallas de los conductores blindados circulen corrientes, que degenerarán en señales de modo diferencial, como se verá más adelante)

Lo mencionado podemos decir que constituye el par de ideas iniciales para evitar la introducción de señales espurias en cualquier sistema de medida. El problema por lo general resulta mucho más complejo que lo visto, inclusive a menudo resulta difícil reconocer con claridad las fuentes que originan las perturbaciones.

Tratamiento particular merece una fuente a menudo causante de problemas de grandes disturbios en las mediciones: nos referimos a los provenientes de corrientes de circulación en sistemas con puntos de referencia a tierra.

Ellas son las responsables de la transformación de señales de modo común en señales de modo diferencial, a las que responde el sistema de medida.

Sabido es que por razones de seguridad, suele ser imprescindible referir el potencial de los puntos accesibles por el operador a un valor seguro, que normalmente corresponde al de la tierra *en un punto próximo* a donde se encuentran el aparato de medida y el operador. Pues bien, tal condición incorrectamente implementada, puede perjudicar notoriamente la exactitud alcanzable, hasta llegar al caso extremo de que carezca totalmente de validez el resultado obtenido. Este hecho y la frecuencia de presentación del problema hacen que merezca un tratamiento especial, por lo que nos referimos al esquema de la figura 14.5.

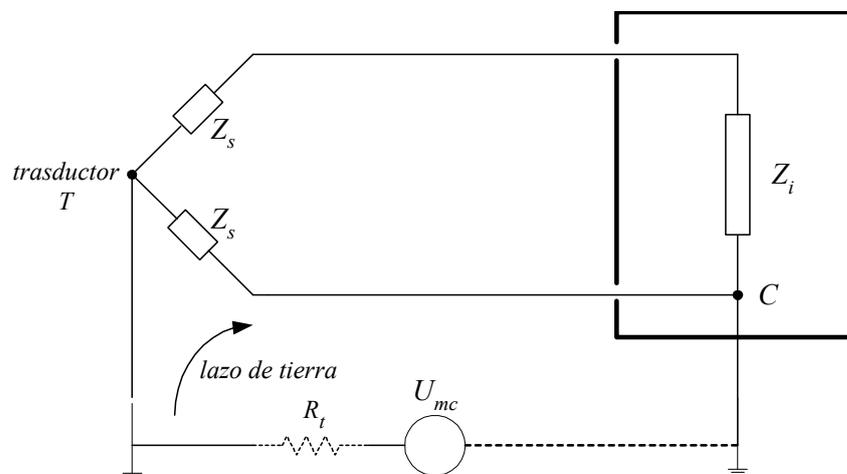


Figura 14.5: Circuito donde señales de modo común se transforman en de modo diferencial.

En la figura anterior, T representa un transductor de medida genérico, quedando caracterizado para nuestro análisis sólo a través de su impedancia de salida Z_s , mientras que el instrumento de medida lo es por medio de su correspondiente Z_i .

Observamos que la existencia de un punto en común puesto a tierra por parte del transductor de medida T , en conjunción con la puesta a tierra del punto C del instrumento, forma un lazo cerrado con dos ramas en paralelo, por las que podrán circular corrientes en caso de existir alguna diferencia de potencial entre los puntos de las diferentes tomas a tierra, potencial éste representado por medio del generador U_{mc} .

Resulta fácil analizar cómo la señal de modo común se transforma en de modo diferencial. La razón radica en que al ser Z_i del orden de los $M\Omega$, y Z_s mucho menor, aparecerá una tensión de modo diferencial, que vale:

$$U_{md} = \frac{U_{mc}}{R_t + Z_s} * Z_s \quad (14.1)$$

que se superpondrá con la señal proveniente del transductor, U_i . En la ecuación anterior se han despreciado los términos de segunda importancia, provenientes de tener en consideración la impedancia de la rama superior.

Conviene a esta altura del análisis aclarar que tanto la naturaleza como la magnitud de la fuente perturbadora representada por el generador U_{mc} son diversas. Muchas veces cambiante de instante a instante, con componentes tanto de alterna como de continua, y fuertemente dependiente de la distancia entre los puntos donde se efectúan los contactos a tierra, por lo que su comportamiento a veces obliga a considerarlas como fuentes aleatorias de tensión, lo que dificulta el conocimiento de su contribución en la medida final e inhibe de toda posibilidad de tratamiento analítico, con el fin de determinar o desafectar su cuantía en el valor final de la medida.

Como conclusión de lo hasta ahora visto, resulta que para minimizar el efecto de las tensiones o corrientes provenientes de las puestas a tierra, deberá tratarse en lo posible que exista un solo punto como puesta a tierra del sistema. Ésta es una condición de diseño básico de cualquier sistema de medida, muchas veces no posible de cumplir en forma estricta, pero que define una de las principales ideas a tener en cuenta.

A modo de ejemplo se analizarán tres casos de puesta a tierra, unos correctos y otros no, en donde por sencillez de tratamiento todas las impedancias en juego se representan por resistencias, sin que ello les quite generalidad. El anterior generador de señales de modo común, U_{mc} , representante de las señales de tierra, ahora es reemplazado por el generador U_t .

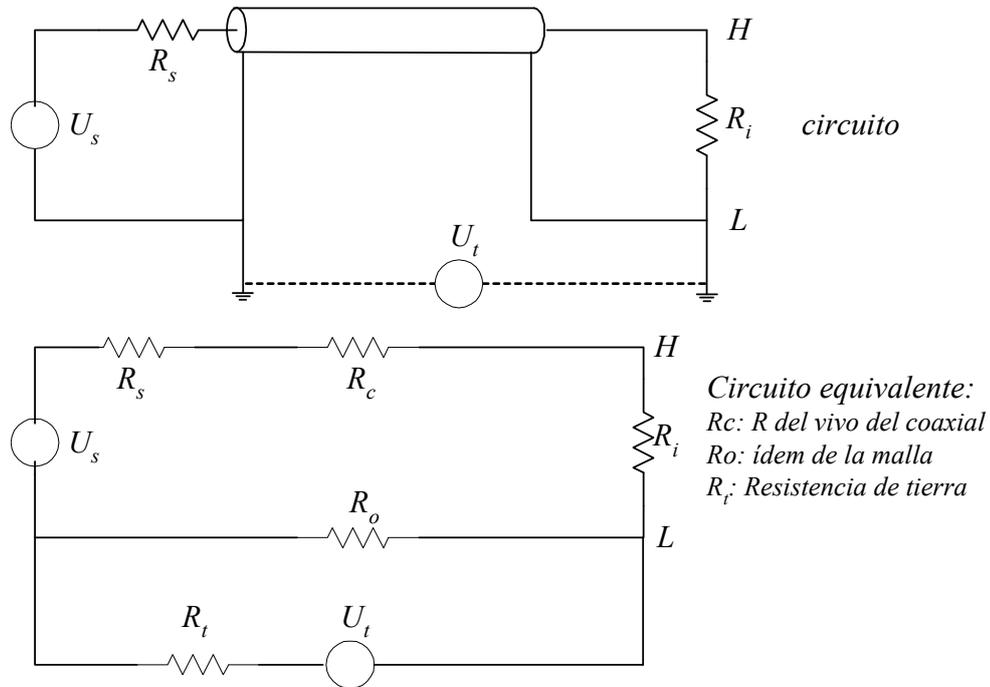


Figura 14.6: Circuito donde las tierras se han conectado sin ninguna precaución.

En este circuito R_i es mucho mayor que las restantes resistencias puestas en juego, por lo que la tensión de modo normal U_m , que aparece en bornes del instrumento, debida a la señal de modo común de tierra, es:

$$U_m = \frac{U_t}{R_t + R_o} * R_o \quad (14.2)$$

Se aprecia que cuanto mayor sea R_o mayor será la gravedad del problema.

Una primera solución sería aumentar la resistencia de la puesta a tierra, por ejemplo en el lado del instrumento, por medio de una R_f , como se aprecia en la figura siguiente:

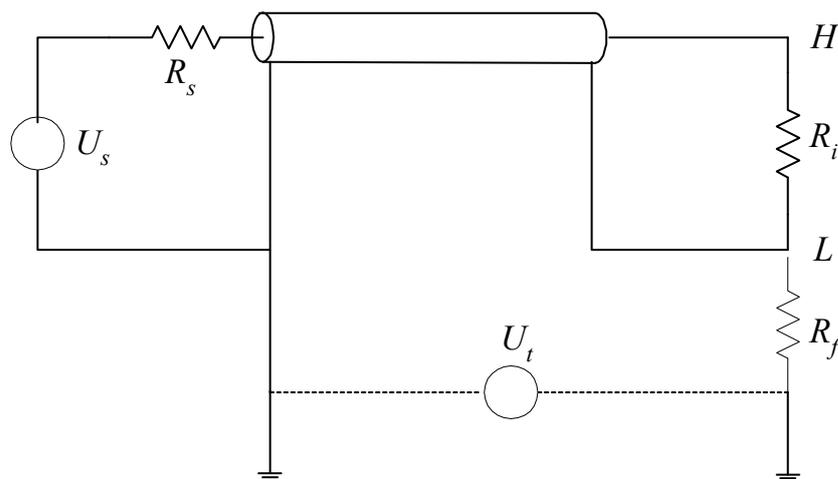


Figura 14.7: Circuito donde se ha incrementado ex profeso la resistencia de un punto de puesta a tierra.

donde ahora la tensión U_m vale:

$$U_m = \frac{U_t}{R_t + R_0 + R_f} * R_0 \quad (14.3)$$

Se observa ahora que la tensión U_m se reduce en función de los valores relativos de las resistencias puestas en juego, pero a expensas de levantar respecto de tierra el potencial del instrumento. Esto último no siempre resulta posible, sobre todo en sistemas de tensiones elevadas, o donde se requiere gran exactitud.

Una mejoría más pronunciada se logra si se divide la resistencia de entrada del instrumento en dos resistencias iguales en serie, con un punto común a tierra, tal como se muestra en la figura 14.8.

Analizando de la forma hasta ahora hecha, resulta:

$$U_m \approx -2 \frac{U_t * R_s}{R_i} \quad (14.4)$$

donde se aprecia la notable reducción de la tensión de modo normal debido a la contribución de R_i . Ésta es una de las razones por las cuales muchos instrumentos de medida tienen por entrada sistemas de amplificación diferenciales.

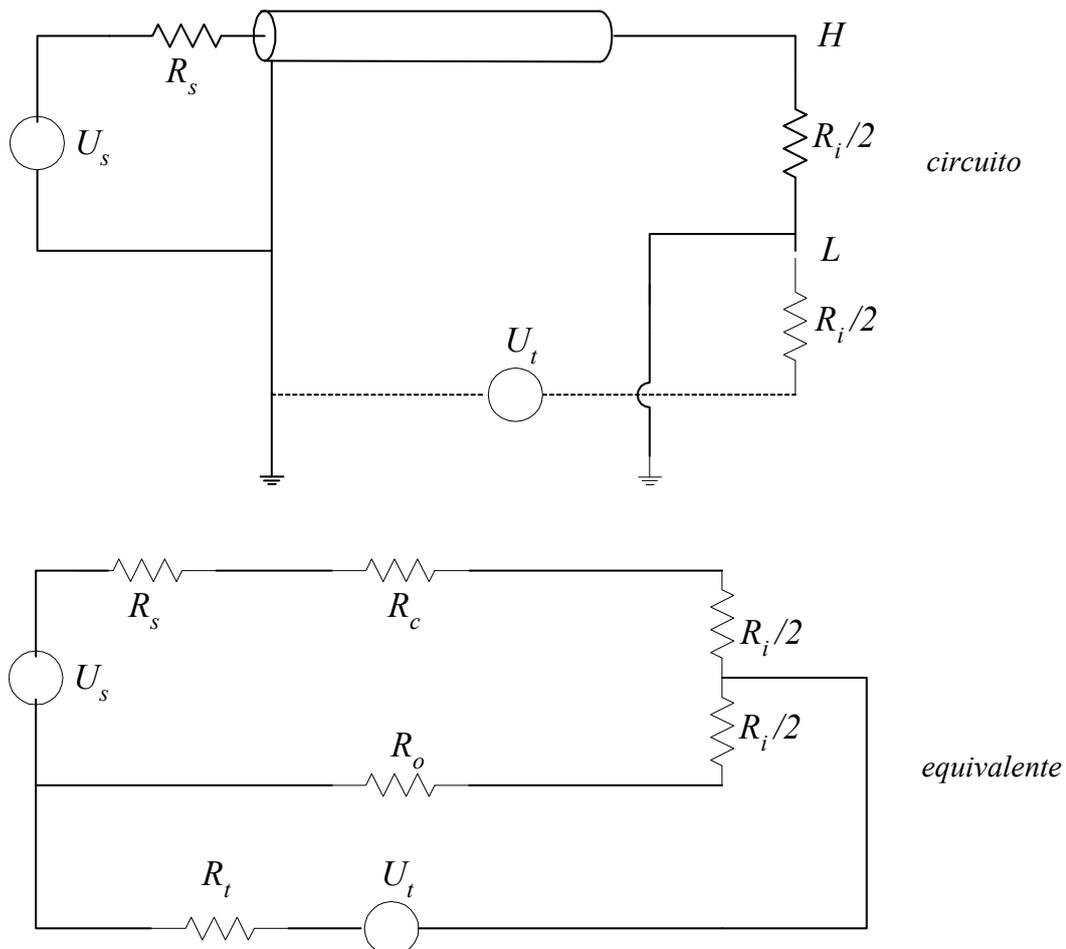


Figura 14.8: Circuito donde se ha subdividido la resistencia de entrada del instrumento

14.3. Disminución del efecto de las señales de interferencia sobre el sistema de medida. Concepto de blindaje y aislamiento de elementos y sistemas.

Hasta ahora nos hemos ocupado del modo de actuar de las señales perturbadoras en general, habiendo hecho hincapié en especial en las de origen electromagnético y electrostático, y en las provenientes de la transformación de señales de modo común en modo diferencial, como suele darse en el caso de sistemas con puestas a tierra, y las diferentes formas de evitarlas mediante el empleo de configuraciones de conexión especiales.

En adelante no referiremos en particular a la manera de disminuir el efecto perturbador de origen electrostático y electromagnético, a partir de técnicas denominadas de blindaje y de aislamiento de la fuente

14.3.1. Concepto de blindaje de elementos y sistemas

El concepto de blindar un elemento a fin de que resulte inmune a señales de origen electrostático o de un campo eléctrico variable es relativamente fácil de entender: bastará con que una envoltura conductora rodee totalmente el elemento a proteger, de manera tal que éste último quede inmerso dentro de una zona equipotencial, definida por la superficie del elemento blindante, [1].

Por lo general será tanto más efectivo el efecto del blindaje si se lo conecta a tierra en un punto próximo a la ubicación del elemento de medida, manteniéndose flotantes las entradas de éste, y en el caso de existir más de un elemento blindado, si todos se conectan a tierra en el mismo punto, o lo más próximo posible entre sí.

El blindaje magnético tiene por finalidad reducir el acoplamiento inductivo entre la fuente perturbadora y el sistema de medida. Es sencillo de comprender en cuanto a su implementación, ref.[1], por lo que no nos extenderemos en ello. Basta con enunciar por ejemplo, que la carcasa metálica que rodea al tubo de un osciloscopio de rayos catódicos es una representación de éste tipo de dispositivo, como lo es también la malla metálica que rodea un cable coaxial.

Vale como comentario, que cuanto mayor sea la permeabilidad magnética del material del blindaje, mejor será su comportamiento como tal.

Es oportuno destacar que la utilización de blindajes generalmente aumenta el acoplamiento capacitivo entre elementos y entre éstos y tierra, pero con la gran ventaja de que su contribución quedará perfectamente definida, estable en el tiempo y fácil de referir su potencial a puntos adecuados del sistema, de manera tal de minimizar su efecto sobre la medición, confiriéndole inmunidad al ruido y repetibilidad frente a condiciones externas variables.

A esta altura conviene detenernos un instante a analizar el caso particular que se da cuando una malla metálica rodea a otro conductor con el fin de blindarlo electromagnéticamente, y por ella circula una corriente, situación que ocurre cuando un cable coaxial vincula dos puntos de un sistema, a distinto potencial, estando éstos unidos a través de la malla, figura 14.9.

Evidentemente aparecerá una señal de modo serie, que se superpondrá a la señal de medida propiamente dicha, como se observa en la figura. Interesa cuantificar de algún modo qué fracción de la corriente de circulación de la malla aparece como señal de modo normal, alterando la medida.

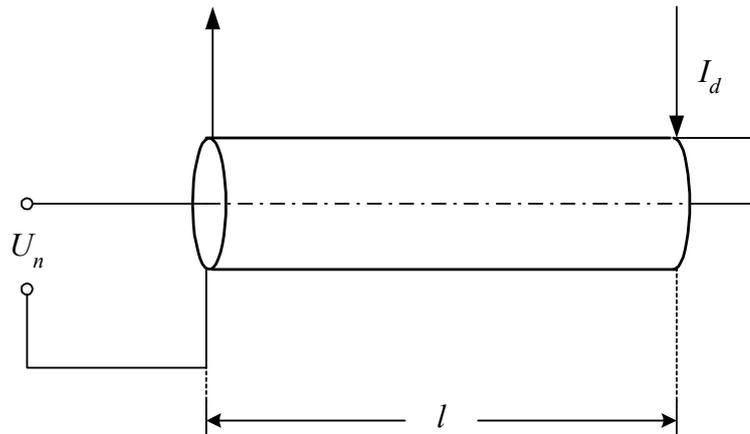


Figura 14.9: Circuito que muestra la inducción de una señal de modo diferencial a partir de una señal de modo común en un cable coaxial

Para ello usualmente se define la impedancia de transferencia del conductor Z_{tw} , expresada por unidad de longitud del conductor, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Z_{tw} = \frac{U_n}{I_d * l} \quad (14.5)$$

fórmula válida sólo cuando la longitud del cable es pequeña respecto de la longitud del cuarto de onda de la señal aplicada.

Es común normalizar la expresión anterior refiriéndola a la resistencia en corriente continua, R_0 , de la vaina exterior del cable. Por medio de la ec. 14.5, conociendo el valor de la corriente I_d y la longitud del conductor, puede calcularse la contribución de la corriente de malla a la tensión aplicada al sistema.

El comportamiento en función de la frecuencia de la impedancia de transferencia normalizada exhibe la característica típica mostrada en la figura 14.10.

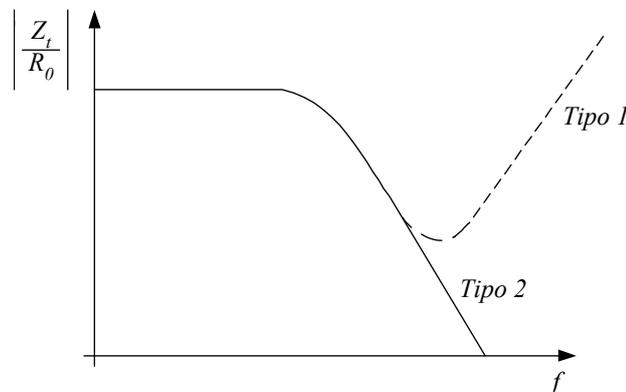


Figura 14.10: transferencia normalizada para un cable coaxial

Es de destacar que un manejo descuidado o incorrecto de elementos de blindaje puede acarrear inconvenientes mayores que los beneficios que ellos proveen. Basta para ello observar el ejemplo de mal uso, mostrado en la figura 14.11:

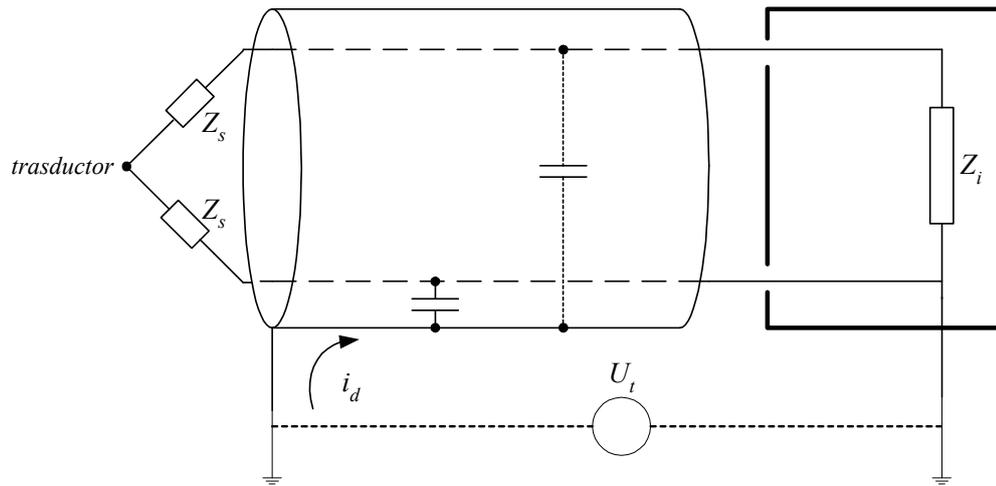


Figura 14.11 Ejemplo de mal uso de un sistema con elementos blindados

Una forma correcta de ejecución del circuito de medida es la representada en la figura siguiente:

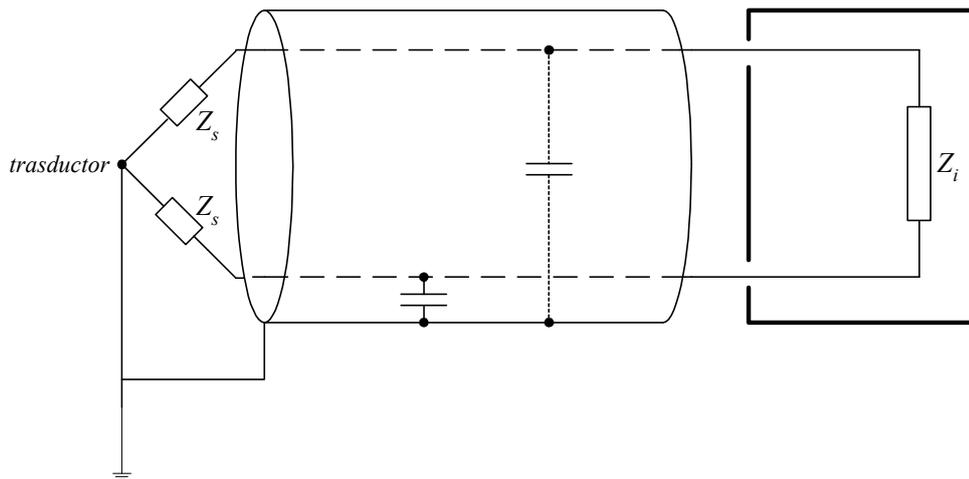


Figura 14.12: Ejemplo de correcto uso de un sistema con elementos blindados

14.3.2. Aislación de la fuente de alimentación

Una causa de error frecuente y que reconoce los lineamientos hasta ahora vistos, pero que por su carácter merece un tratamiento aparte, es la debida a señales que se introducen en el sistema por la doble puesta a tierra dada a través de la fuente de alimentación del instrumento, respondiendo su principio en un todo a lo visto cuando se trataron las perturbaciones provenientes de señales de modo común.

Normalmente uno de los puntos de la red de alimentación está conectado a tierra en el lugar de emplazamiento del transformador de distribución, que reduce el nivel de tensión desde el de media al de baja tensión, empleado para alimentación domiciliaria. No interesa en este momento entrar en detalles del por qué de esta conexión. En el lugar de uso es común que la conexión de tierra de seguridad sea provista por el mismo tomacorriente, que

suele adoptar una disposición de “tres patas”, en la que dos de las mismas son las que quedan conectadas a la alimentación propiamente dicha, en tanto que la tercera va directamente unida a la caja del instrumento y a todos los puntos metálicos a los que tenga acceso el operador, y es la que se conecta al sistema de tierra de seguridad del lugar. Generalmente existirá una distancia apreciable entre los dos puntos de conexión a tierra, dándose por lo tanto las condiciones necesarias para probablemente tener una corriente de circulación de importancia, con todos los inconvenientes que ello acarrea.

Para el análisis del problema nos referimos al esquema de la figura 14.13. En ella se observa que el punto común de la fuente de alimentación, que se corresponde con el neutro de un sistema de baja tensión, y el blindaje del instrumento de medida, se encuentran puestas a tierra en distintos puntos, naciendo a partir de ello una señal de modo común. De un análisis de la misma se desprende que la impedancia del lazo de tierra formado quedará definida fundamentalmente por el valor de la capacidad entre el instrumento y el blindaje.

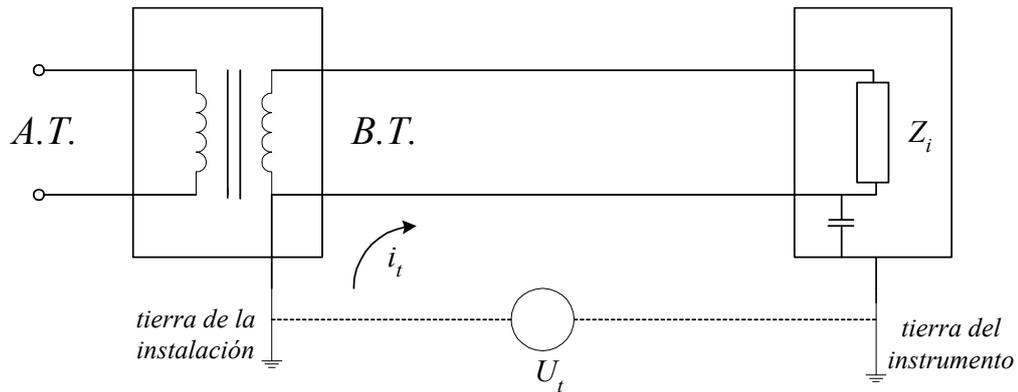


Figura 14.13: Generación de señales de modo común en sistemas con alimentación referida a tierra.

Con el fin de reducir esta causa de errores, se recurre al empleo de transformadores aisladores, que son transformadores de relación 1:1, que proveen una separación conductiva entre los dos puntos a tierra, figura 14.14. Es de destacar, que por los valores relativos de las capacidades entre arrollamientos de los transformadores, y las del instrumento y carcasa de éste, la solución buscada desde el punto de vista de los errores no se logra en todos los casos con una implementación como la vista.

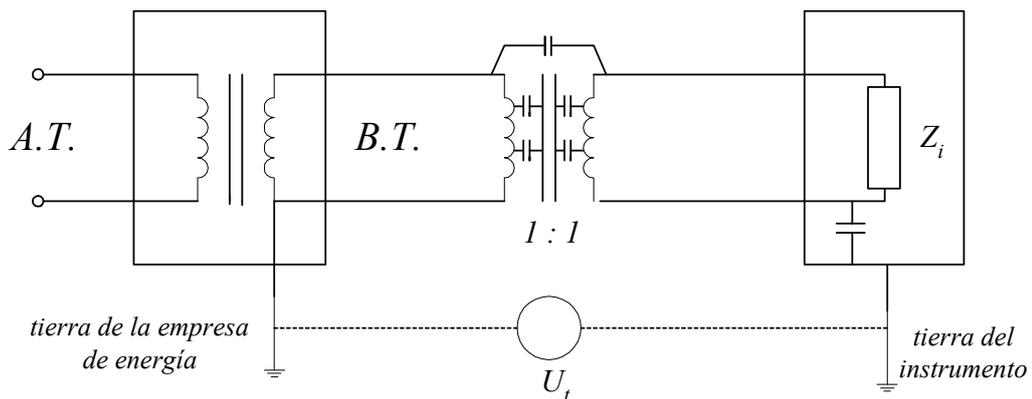


Figura 14.14: Utilización de transformador aislador simple como fuente de aislamiento

Una notable mejoría en el comportamiento se logra mediante la incorporación de blindajes, a menudo denominados pantallas, entre bobinados y eventualmente bobinados y núcleo del transformador, como se aprecia en la figura 14.15, donde si bien las capacidades

puestas en juego se incrementan notoriamente respecto de la variante previa, la forma de conexión origina un lazo de baja impedancia, que reduce el efecto de las capacidades instrumento - blindaje que perjudicaban la medida anteriormente a la interposición de esta solución. Conviene aclarar que la mostrada es sólo una de las posibles formas de conexión de las pantallas del transformador aislador.

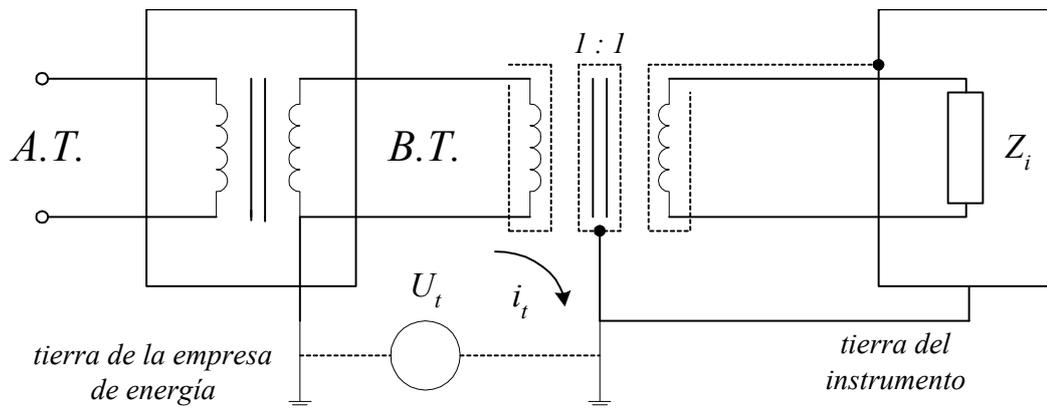


Figura 14.15: Utilización de transformador aislador con pantallas para proveer aislamiento

14.4. Comentario general sobre los puntos precedentes

Es bueno de destacar que los problemas que se han visto no son exclusivos de los sistemas electrónicos, como reconocerá fácilmente el lector, sino que son absolutamente generales. No obstante, su influencia tiende a agravarse en los casos de altas impedancias de entrada del circuito de medida, que sí son típicas de los circuitos electrónicos, y en los casos donde se requieren exactitudes elevadas.

El análisis que hemos efectuado nos ha permitido recorrer las causas más comunes de error, pero éstas son tantas como circuitos y situaciones particulares de medida pueden presentarse. Ante la pregunta ¿existe alguna solución general al problema planteado? la respuesta es que necesariamente la solución será exclusiva de cada caso particular, sin perjuicio ello de que las ideas y soluciones vistas son básicas, de aplicación absolutamente general, y conducentes a la solución de innumerables casos donde se presenten estos problemas.

Los problemas citados generalmente se agravan cuando se tratan en sistemas con formas de onda rápidas, y para poder ser estudiados y atacados en su solución requieren la identificación de las fuentes perturbadoras, tarea ésta que suele ser más complicada y laboriosa que lo visto hasta el momento.

Párrafo aparte merecen los casos en que las señales a medir son tan rápidas que requieran un análisis de los circuitos considerando sus constantes distribuidas, que exceden el marco en que nos movemos en este curso.

14.5 Referencias

- [1] Paratte, P. A, Robert, P: "Systèmes de mesure", Dunod, París, 1986.
- [2] Bouwens, A. J.: "Digital Instrumentation", Mc. Graw Hill, 1984.