

Medición de corriente.

A.- Métodos aplicables a corriente AC o DC.

La estructura de los medidores directos de corriente es similar aunque cambie el detalle del sensor y su circuito de lectura.

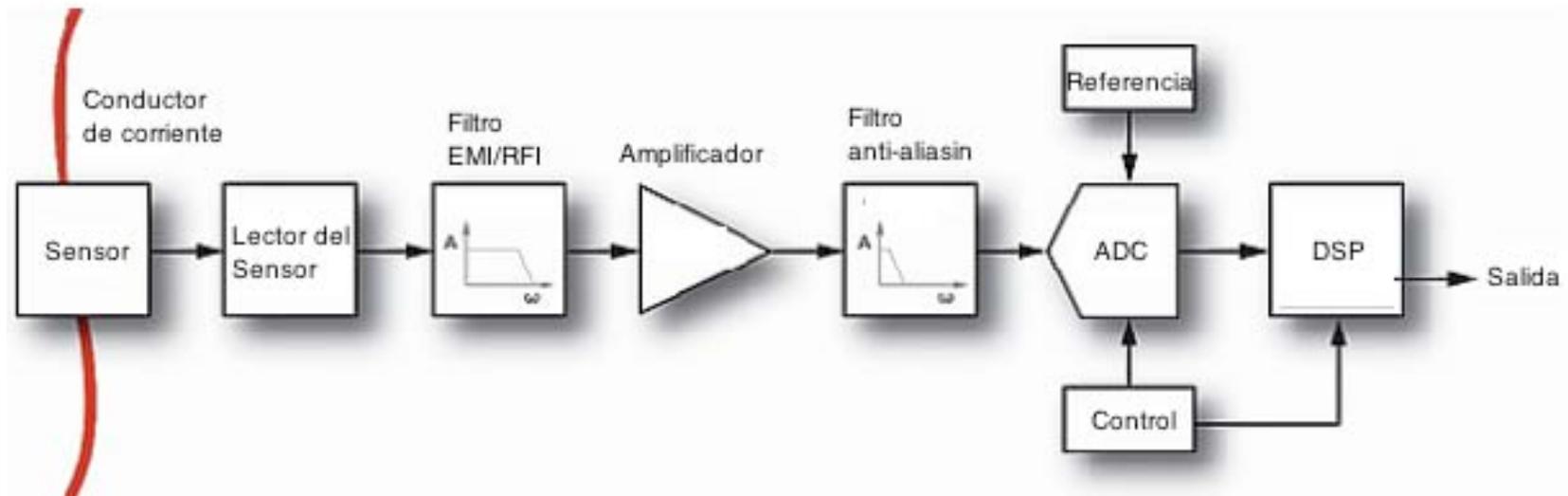


Diagrama de bloques genérico de un sub-sistema de medición directa de corriente.

Sistemas de medición directa de corriente.

I.- Con resistencia de prueba (shunt resistor): Se coloca en serie con el circuito de alimentación de armadura una resistencia de prueba de precisión y se mide la caída de tensión.

Dado que la corriente de armadura puede ser muy elevada, para mantener unas pérdidas de inserción bajas el valor de esta resistencia de prueba debe ser muy bajo (miliOhms o menor), lo mismo que su coeficiente de variación con la temperatura, y, por supuesto, la resistencia debe ser capaz de soportar la máxima corriente de armadura. Esto requiere resistencias altamente especializadas, como las presentadas en el siguiente cuadro, cortesía de la compañía Burns.

Characteristic	Model CSS4J-4026 Series	
Resistance Range / Power Rating @70 °C ¹ / Power Rating @130 °C ¹	CSS4J-4026R-L200x	0.2 mΩ / 5 W
	CSS4J-4026R-L300x	0.3 mΩ / 5 W
	CSS4J-4026R-L500x	0.5 mΩ / 5 W
	CSS4J-4026R-1L00x	1.0 mΩ / 4 W
	CSS4J-4026K-2L00x	2.0 mΩ / 4 W
	CSS4J-4026K-3L00x	3.0 mΩ / 3 W
	CSS4J-4026K-5L00x	5.0 mΩ / 3 W
Operating Temperature Range	-55 to +170 °C	
TCR - Resistive Alloy ²	±50 PPM/°C (20~60 °C)	
Temperature Coefficient	CSS4J-4026R-L200x	±150 PPM/°C
	CSS4J-4026R-L300x	±100 PPM/°C
	CSS4J-4026R-L500x	±100 PPM/°C
	CSS4J-4026R-1L00x	±75 PPM/°C
	CSS4J-4026K-2L00x	±75 PPM/°C
	CSS4J-4026K-3L00x	±75 PPM/°C
	CSS4J-4026K-5L00x	±75 PPM/°C
Inductance	< 3 nH	
Resistance Tolerance	±1 %, ±5 %	

¹ Terminal temperature

² For full TCR range, refer to TCR curve

Efecto de las pérdidas en las resistencias de medición de corriente sobre la precisión de las medidas.

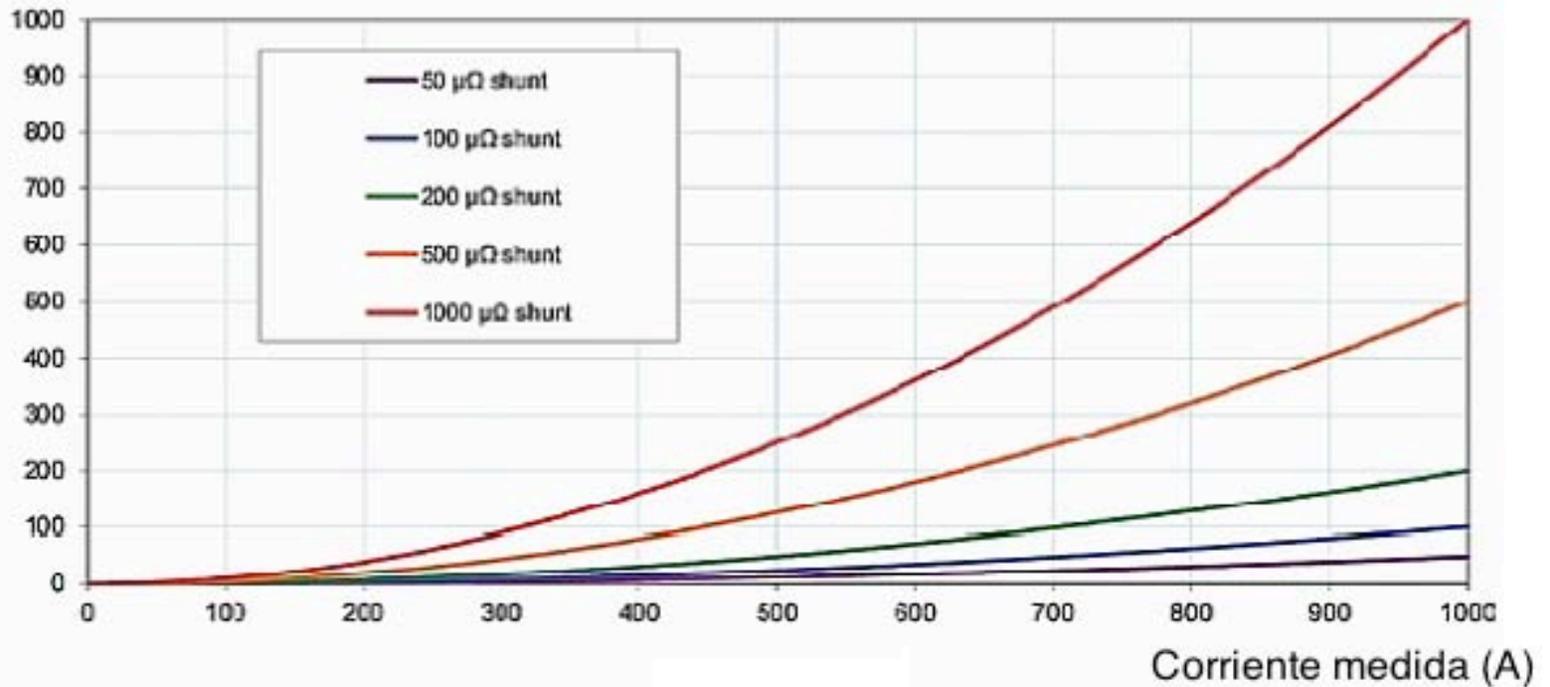
La medición de la corriente en base a la caída de tensión que dicha corriente produce en una resistencia de prueba tiene un problema asociado en forma indisoluble: La corriente circulante entrega potencia a la resistencia de acuerdo con:

$$P = I^2 R$$

La energía entregada se convierte en energía térmica y esta aumenta la temperatura de la resistencia, lo que cambia su valor y, por lo tanto introduce un error sistemático en la medición.

El calentamiento no puede ser evitado porque es intrínseco al método de medición, debe ser evaluado para compensar y, dentro de lo posible, minimizado, para lo cual los fabricantes de resistencias de precisión para medir corriente ofrecen la información necesaria por medio de tablas y gráficas.

Potencia disipada (W)

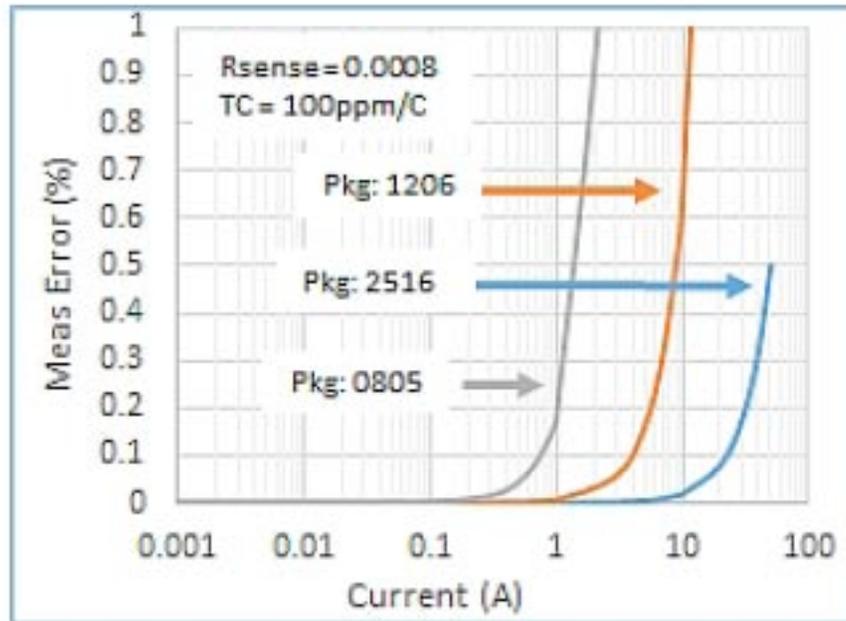


Gráfica de la potencia disipada en función del valor de la corriente a medir para cinco modelos de resistencia de medición. (cortesía de Vishay).

La tabla muestra los valores de que deben tener las resistencias de medición y la potencia disipada asumiendo que la caída de tensión máxima sea de 80 mV en función de la corriente pico que se desea medir (cortesía Vishay).

	R_{shunt}/P_{rating}
$I_{measMax}$	$V_{shunt_{max}} = 80mV$
100uA	800Ω/8μW
1mA	80Ω/80uW
10mA	8Ω/800μW
100mA	800mΩ/8mW
500mA	160mΩ/40mW
1A	80mΩ/80mW
5A	16mΩ/400mW
10A	8mΩ/800mW
50A	1.6mΩ/4W
100A	0.8mΩ/8mW
500A	0.16mΩ/40W

Corriente máxima a medir vs. resistencia de prueba y disipación de potencia @ 80mV de caída a corriente máxima (cortesía Vishay).



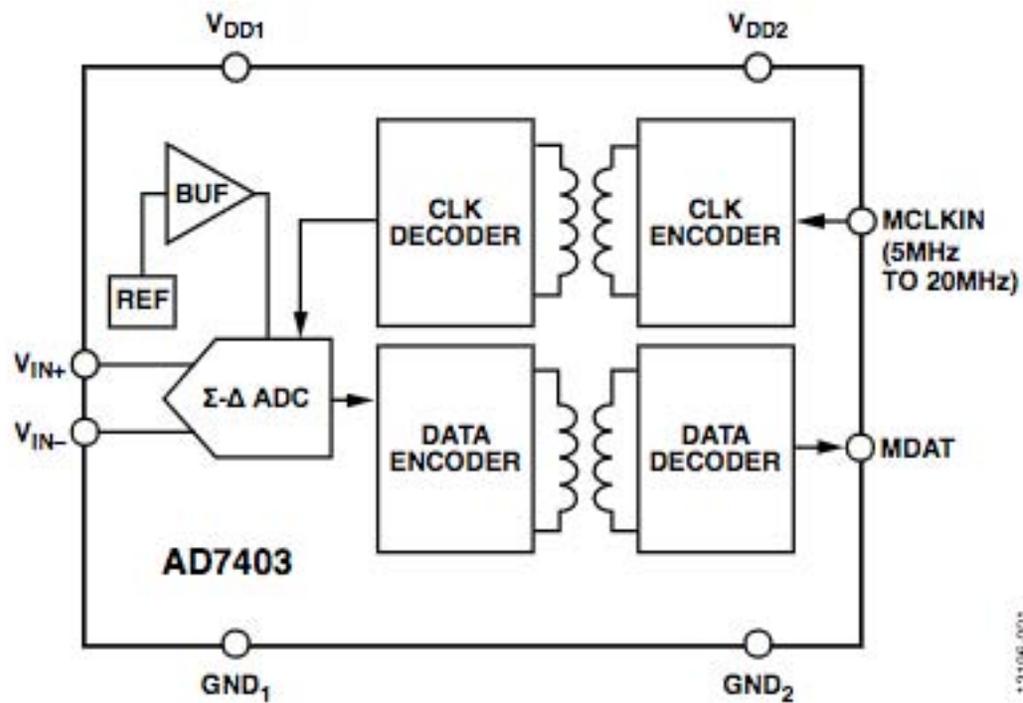
La muestra el error por autocalentamiento en función de la magnitud de la corriente pico a medir para tres categorías de resistencias de medida (cortesía Vishay).

Resistor Size	Thermal Resistance, Θ_{ja} ($\Delta C/W$)
0406	30
2512	25
1206	32
0805	38
0603	63
0402	90

Para limitar pérdidas, el valor de las resistencias de medición debe ser muy bajo, lo que ocasiona que la señal de voltaje a medir es de muy baja amplitud; por su parte los circuitos electrónicos de potencia son en general muy ruidosos, por lo que la medición debe ser hecha en modo diferencial.

Adicionalmente, dada la diferencia en los niveles de voltaje empleados, el circuito de control debe estar aislado galvánicamente del circuito de potencia de armadura; además dado que seguramente el controlador será implementado con tecnología digital, la señal medida deberá ser digitalizada.

Una manera directa de cumplir con todos estos requerimientos es emplear un conversor análogo/digital con aislamiento eléctrico y entrada diferencial, como por ejemplo el AD7403 de Analog Devices.



12196-001

Diagrama de bloques funcional del AD7403

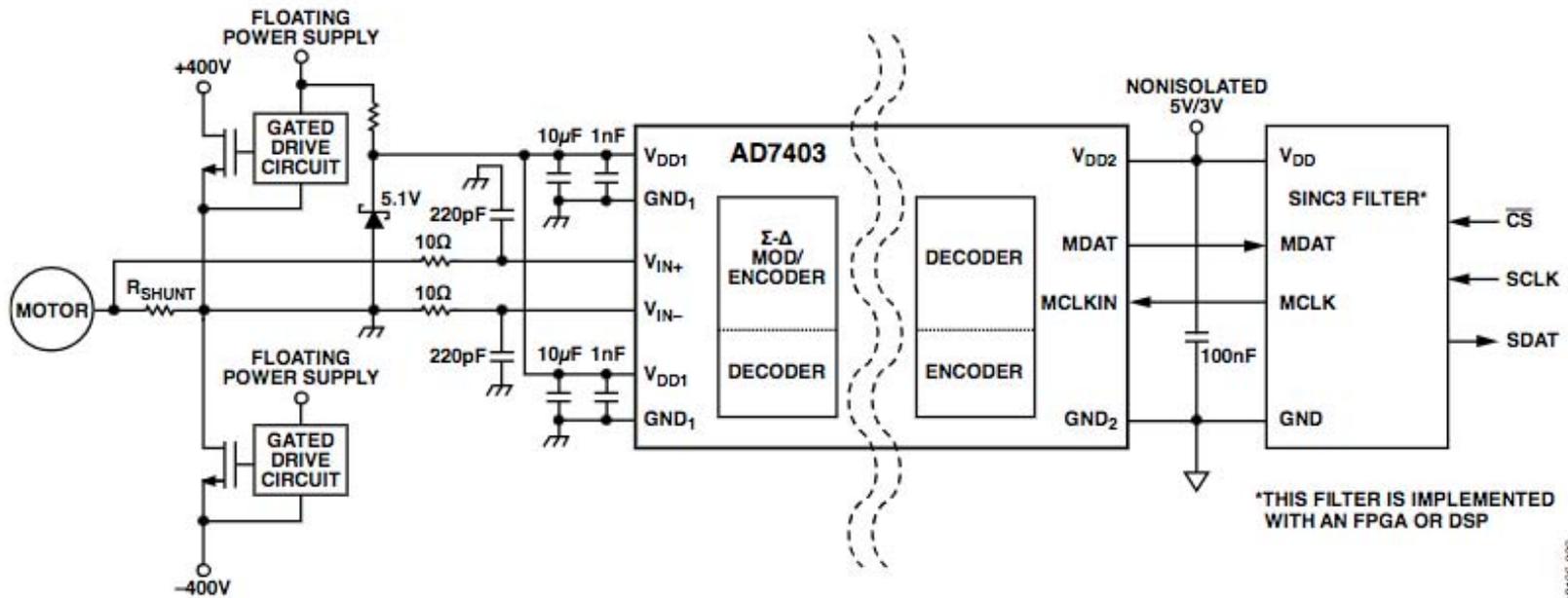


Figure 27 Typical Application Circuit

Circuito de medición de corriente de armadura en base al AD7403, cortesía de Analog Devices.

Las principales causas de error en un sistema de medición de corriente con resistencia serie son:

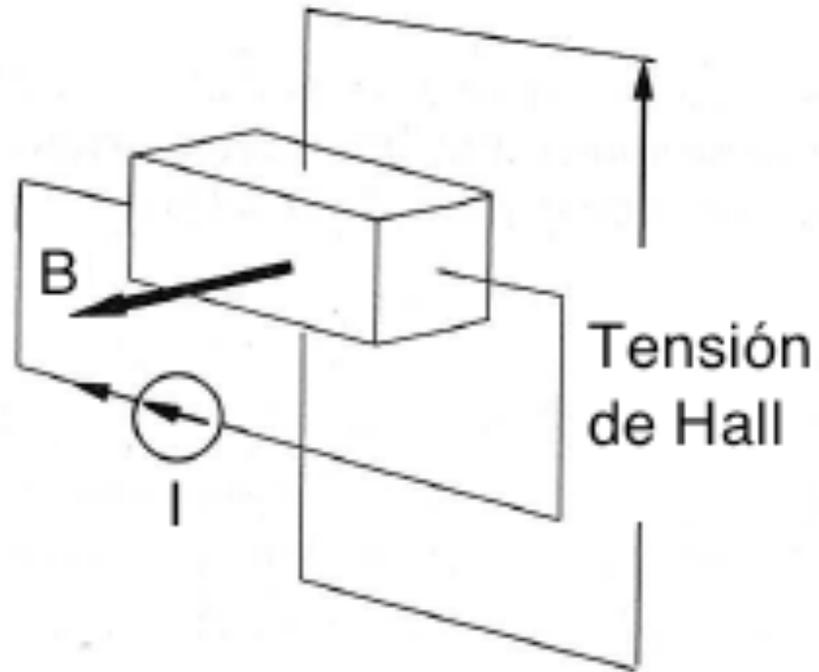
Error inicial de referencia.

Error de deriva en operación de la referencia.

Error inicial de sensibilidad/ganancia.

Error de deriva en operación de sensibilidad/ganancia.

II.-Con dispositivos de efecto Hall.



Esquema básico de un dispositivo de efecto Hall.

La corriente se mide indirectamente en base al campo magnético que produce al circular por los conductores, el cual es detectado por un dispositivo de efecto Hall que debe ser polarizado mediante una fuente de corriente regulada con gran precisión.

El dispositivo Hall es un cubo de material semiconductor. La corriente de polarización y el campo a medir deben ser ortogonales entre si; la tensión de Hall aparece entre las otras dos caras del cubo, en una posición ortogonal a los otros dos componentes.

La salida es una tensión proporcional al valor del campo magnético y a la corriente de polarización aplicada al sensor. El dispositivo Hall proporciona el aislamiento galvánico requerido.

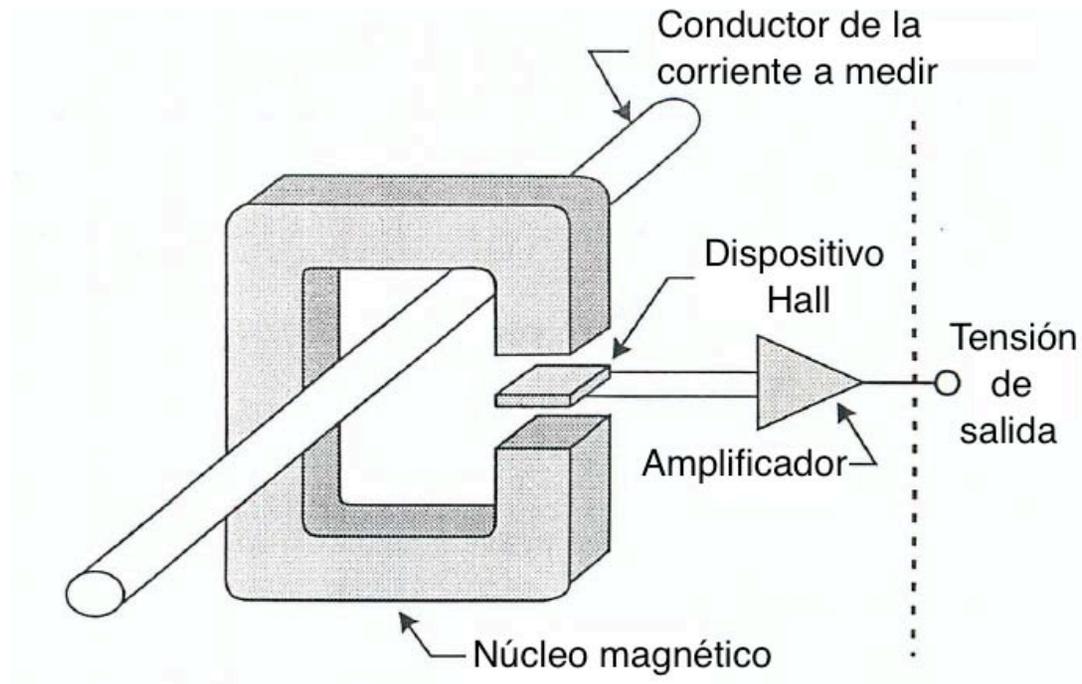
Usualmente el dispositivo está integrado en el sensor con un circuito que proporciona la corriente de polarización y amplifica y normaliza la tensión de salida, produciendo generalmente una señal de voltaje en el rango estándar 0 a 5 V.

El uso de un sensor Hall acoplado a una pinza sensora permite establecer el sistema de medición sin necesidad de interrumpir el circuito de alimentación.

Hay dos formas de realizar la medición:

a.- En lazo abierto (o Hall lineal).

Se mide directamente el campo generado por la corriente que circula en uno de los conductores de conexión entre el motor y la fuente de alimentación.



Las principales fuentes de error son:

Error inicial de referencia.

Error de deriva en operación de la referencia.

Error de offset magnético debido a efectos de histéresis en el núcleo.

Errores residuales debido a sobrecargas momentáneas y al efecto memoria en el núcleo.

Errores de interferencia por las corrientes en otros conductores cercanos.

Errores iniciales de sensibilidad/ganancia.

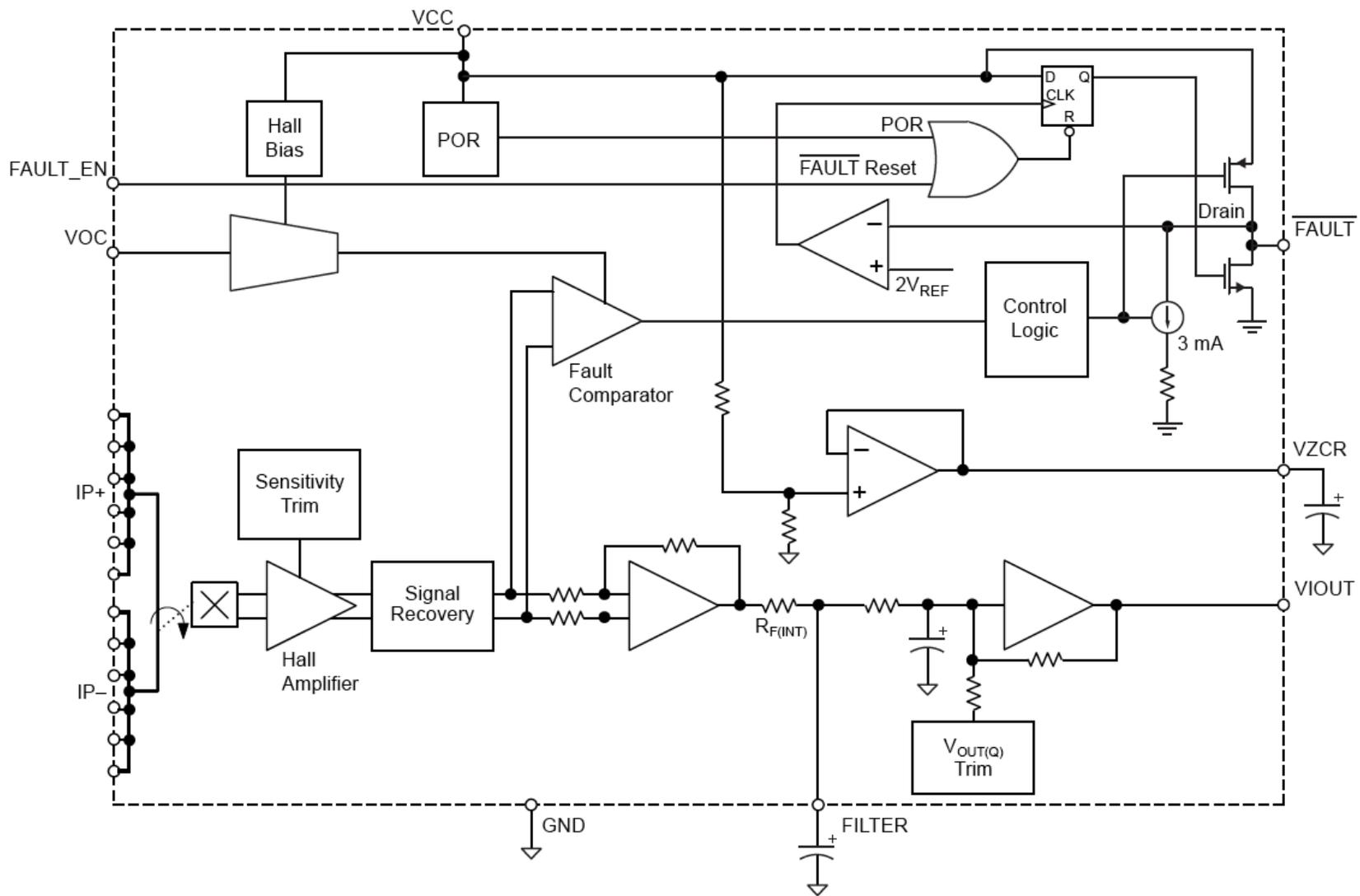
Errores de deriva en operación de sensibilidad/ganancia.

Error de linealidad.

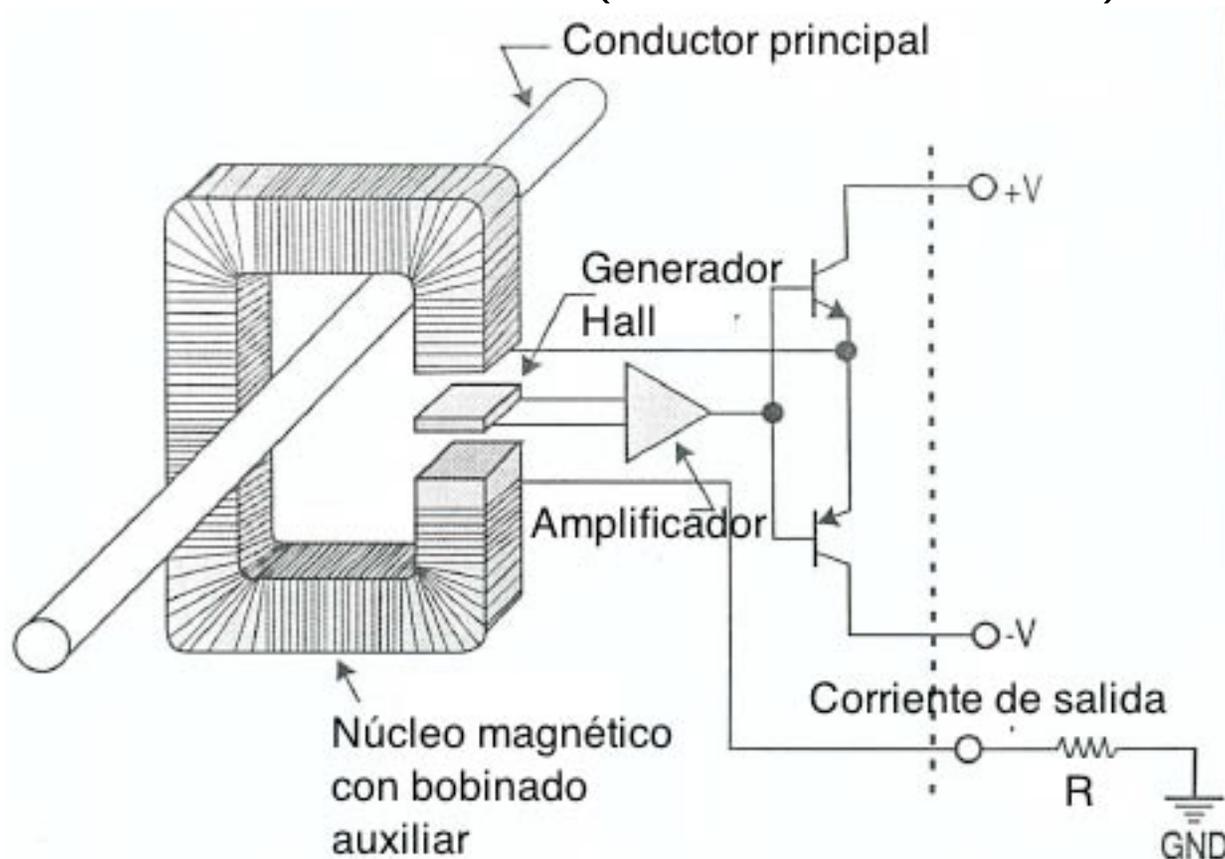
Se encuentran en el mercado sensores integrados en los que el conductor está colocado directamente sobre el elemento hall, eliminando la necesidad de un núcleo magnético.

Un ejemplo es el I.C. Sensor de Corriente ACS709 de Allegro Inc., capaz de medir hasta 70A, y que incluye un circuito de protección de sobre-corriente cuyo nivel de disparo es programable por el usuario, el cual desvía la corriente del lazo de medición a un camino de salida de muy baja impedancia si la corriente a medir supera el valor prefijado.

El diagrama de bloques del ACS709 es el siguiente:



b.- En lazo cerrado (o Hall realimentado).



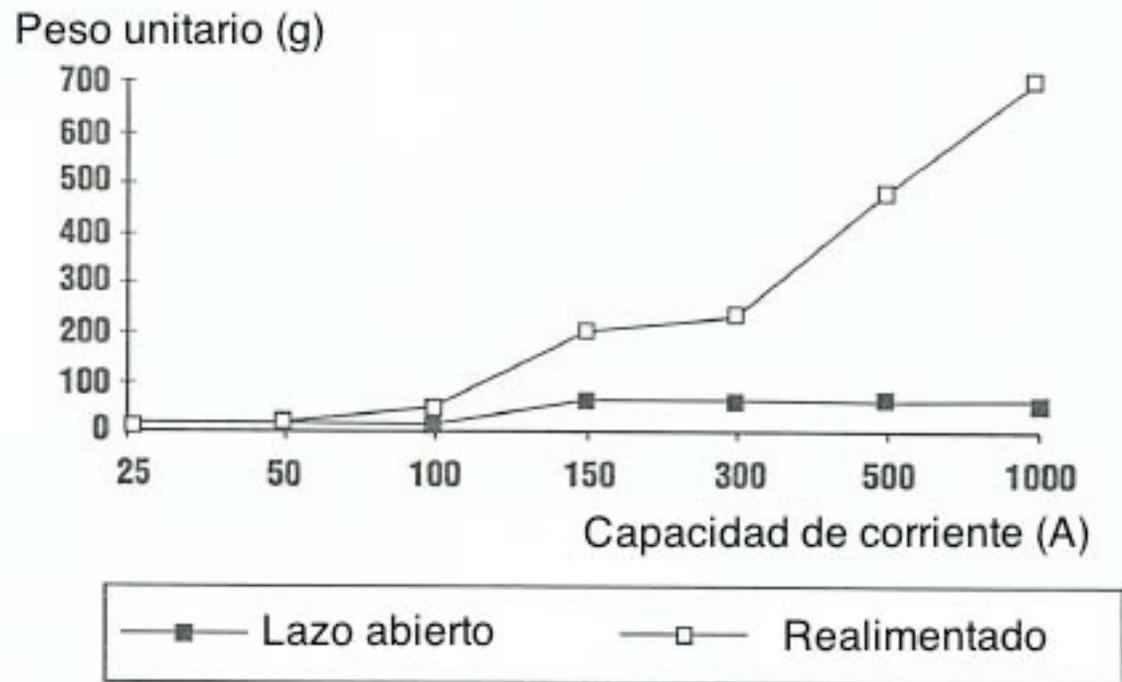
Esquema de medición de corriente con un sensor Hall en lazo cerrado.

La salida del dispositivo Hall controla una fuente que inyecta corriente en un bobinado auxiliar para crear un campo que anule exactamente el campo producido por la corriente a medir; el sistema se estabiliza cuando el campo neto es cero, lo que reduce al mínimo todos los errores presentes en el esquema de medición en lazo abierto, ya que el sensor Hall solo tiene que actuar como sensor de cero o, más precisamente, del signo del campo, no del valor exacto de la magnitud del campo inducido.

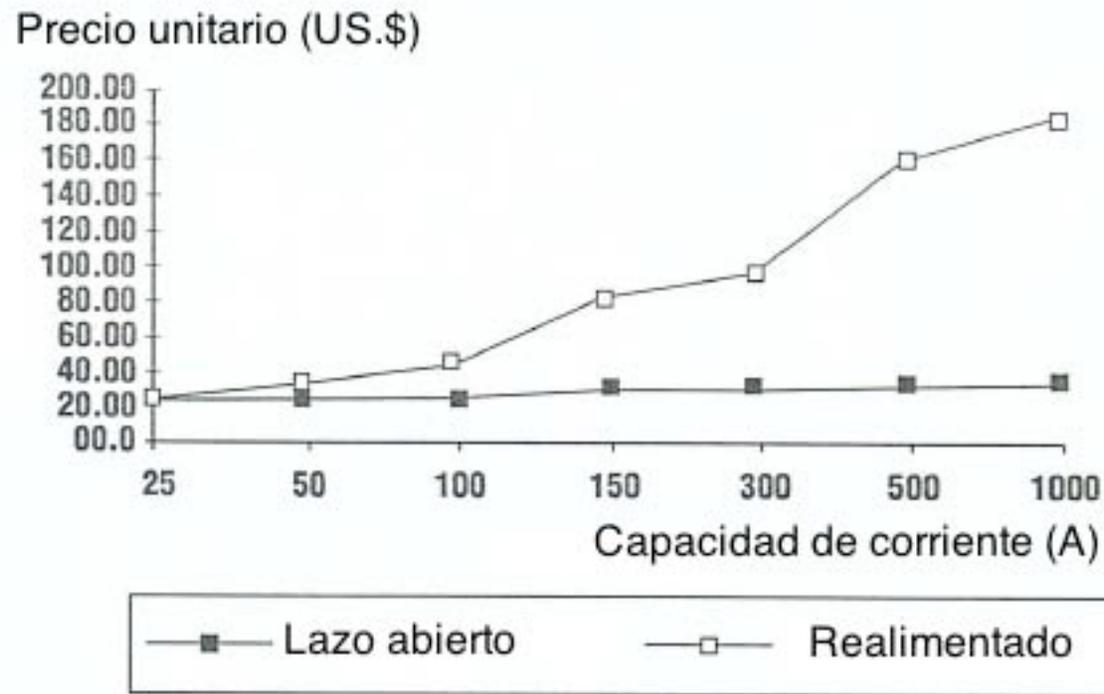
La corriente de compensación es mucho más pequeña que la corriente de medida, ya que su efecto queda multiplicado por el número de vueltas del bobinado auxiliar; la relación de vueltas suele ser del orden de mil a una.

Dado que el sistema busca compensar el campo existente, su operación en ausencia de corriente a medir puede llevar que el núcleo sature y quede permanentemente magnetizado.

En general, los sensores Hall de lazo abierto ofrecen el menor costo y el menor peso para mediciones de alta corriente ($>100\text{A}$), su consumo de potencia es constante y bajo, independiente de la magnitud de la corriente medida y son capaces de soportar sobrecorrientes en el lazo de medida del orden de 10 o más veces la corriente máxima nominal esperada.



Comparación de las relaciones peso/capacidad de medición de corriente de sensores Hall de lazo abierto y realimentados.



Comparación de las relaciones precio/capacidad de medición de corriente de sensores Hall de lazo abierto y realimentados.

Los sensores Hall realimentados ofrecen mayor precisión y son menos sensibles a los cambios de temperatura, tienen un rango de frecuencia mayor ($>150\text{kHz}$) y no sufren de histéresis o offset magnéticos.

El uso de un sensor Hall acoplado a una pinza sensora permite establecer el sistema de medición sin necesidad de interrumpir el circuito de alimentación.

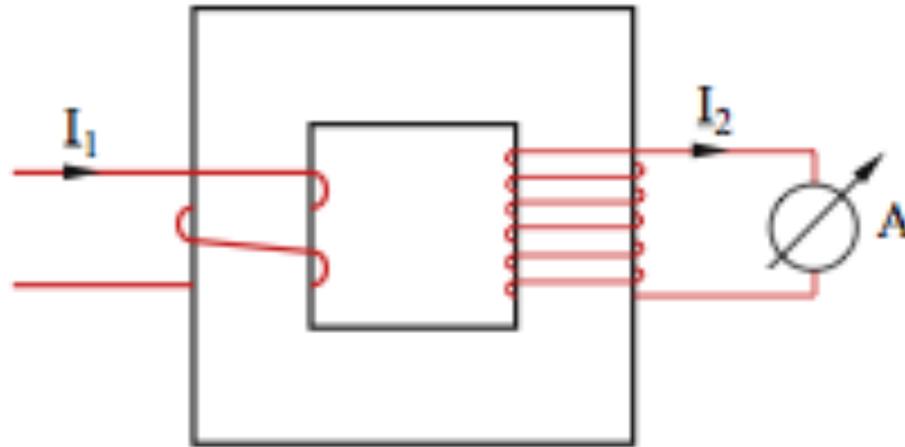
La siguiente tabla compara los tres métodos de medición directa considerados.

Parámetro	Efecto Hall en lazo abierto	Efecto Hall en lazo cerrado	Resistencia de medición
Costo	Bajo a medio	El mas alto	Muy bajo a medio
Tamaño	Medio	Medio a grande	Pequeño a medio
Rango de temperatura	Estrecho a medio	Muy estrecho a estrecho	Amplio
Precisión	Baja	Alta a muy alta (con resistencia de carga de precisión, 0,01%)	Alta a muy alta (con resistencia de medición de precisión)

Deriva en la medida	Alta	Muy baja	Muy baja
Linealidad	Baja	Muy alta	Muy alta
Rango dinámico	Bajo	Alto	Alto
Consumo de energía (sistema completo)	Medio	El mas alto, variable con la corriente medida	El mas bajo
Seguro sin carga	Si	No	Si
Aislamiento galvánico	Si	Si	No

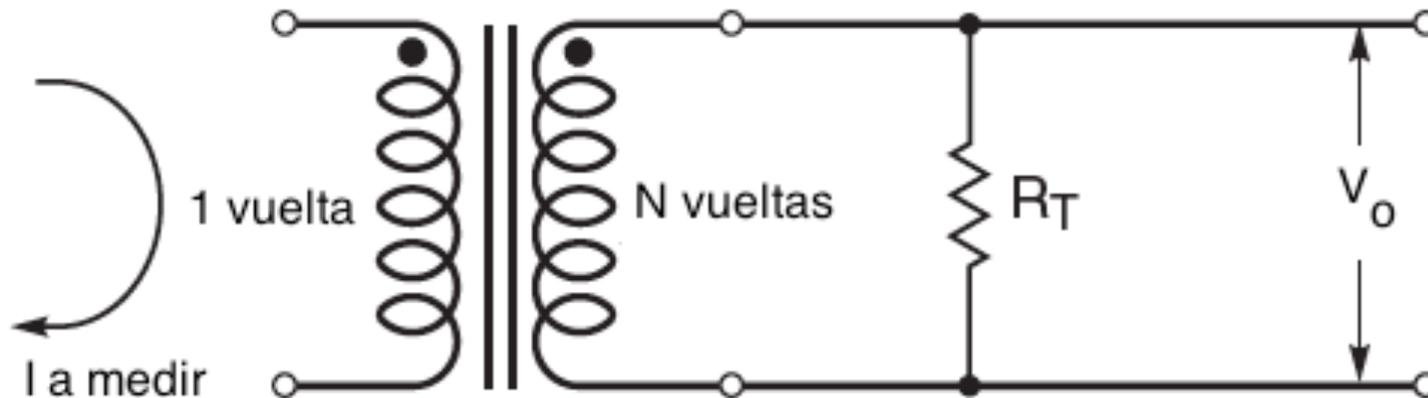
B.- Métodos aplicables a corriente AC.

1.- Transformador de corriente (CT: Current Transformer).

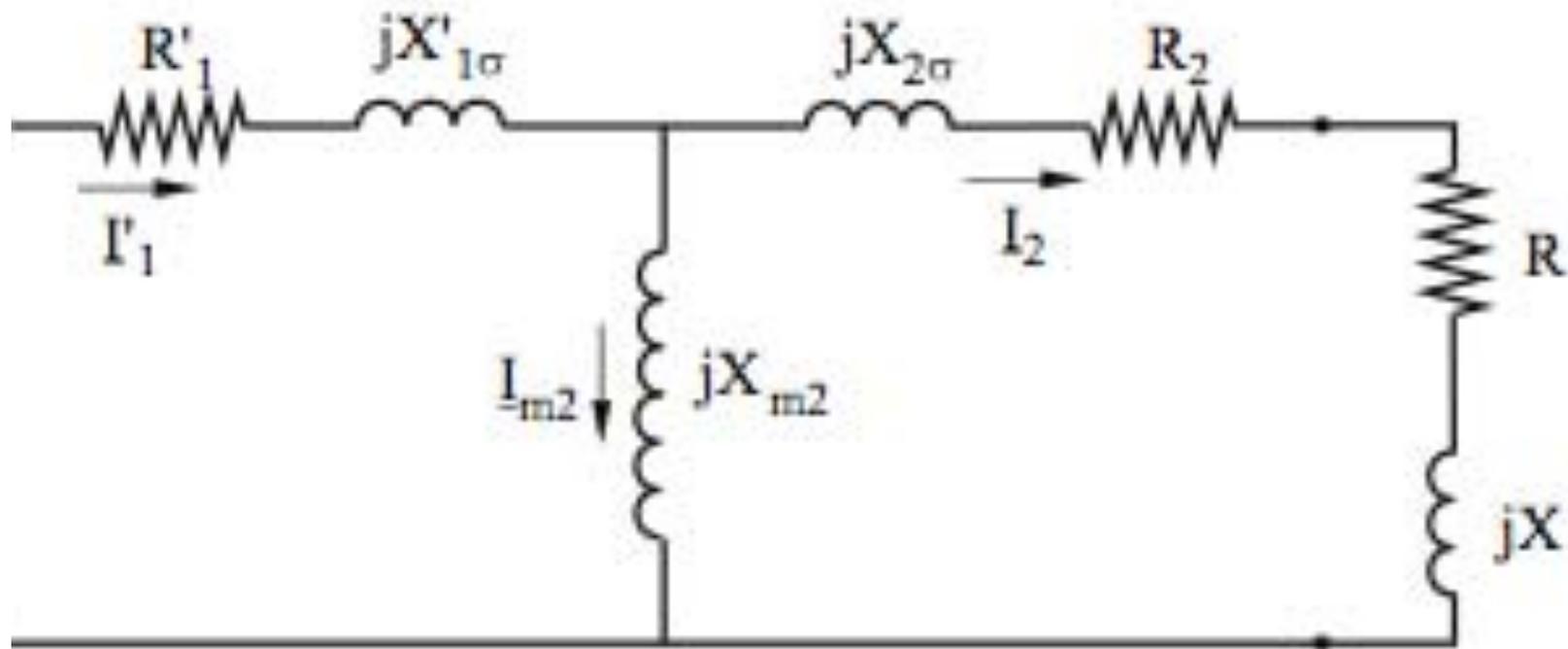


Los transformadores de corriente son transformadores de alta precisión en los cuales la relación entre la corriente del primario y la de el secundario es conocida con precisión y no cambia con la carga, que idealmente debería ser un corto circuito.

En la práctica la necesidad de conocer el valor de la corriente que circula en el secundario obliga a reemplazar el cortocircuito con un sensor de impedancia distinta de cero; inicialmente un galvanómetro de baja impedancia, y en la actualidad una resistencia de medición (de valor indicado por el fabricante del transformador de corriente) para realizar la medición de la corriente en base a la caída de tensión.



Circuito práctico de aplicación del transformador de corriente (CT)



Circuito equivalente del transformador de corriente cargado con una resistencia de medición.

Donde los parámetros R1 y X1 son respectivamente la resistencia y la reactancia de dispersión del primario, Xm es la reactancia de magnetización y R2, X2 son respectivamente la resistencia y la reactancia de dispersión del secundario del transformador de corriente; R y X son la resistencia y la reactancia del circuito de prueba, idealmente X debe ser cero y lo mas pequeña posible.

Part number ¹	Turns (N) pri:sec	Inductance ² ±30% (mH)	DCR max (Ohms)		Sensed current ³ I _{in} (A)	Terminating resistance R _T ⁴ (Ohms)
			Primary	Secondary		
CST2010-020L_	1:20	0.34	0.00036	0.180	40	2.0
CST2010-030L_	1:30	0.76	0.00036	0.265	40	3.0
CST2010-040L_	1:40	1.36	0.00036	0.560	40	4.0
CST2010-050L_	1:50	2.12	0.00036	0.705	40	5.0
CST2010-060L_	1:60	3.06	0.00036	0.850	40	6.0
CST2010-070L_	1:70	4.16	0.00036	1.00	40	7.0
CST2010-080L_	1:80	5.44	0.00036	1.15	40	8.0
CST2010-100L_	1:100	8.50	0.00036	1.45	40	10.0
CST2010-125L_	1:125	13.3	0.00036	1.85	40	12.5
CST2010-150L_	1:150	19.2	0.00036	2.25	40	15.0
CST2010-200L_	1:200	34.0	0.00036	4.06	40	20.0

Parámetros circuitales de la familia de CT CTS2010 de la compañía CoilCraft.

Si el sistema de manejo de la señal medida es de alta impedancia de entrada y de tipo puramente resistivo, en primera aproximación la tensión de salida del transformador es:

$$V_o = N I R_T$$

La conexión de un transformador de corriente en serie con el circuito cuya corriente se desea medir introduce una pérdida de inserción que queda determinada por el siguiente circuito equivalente:

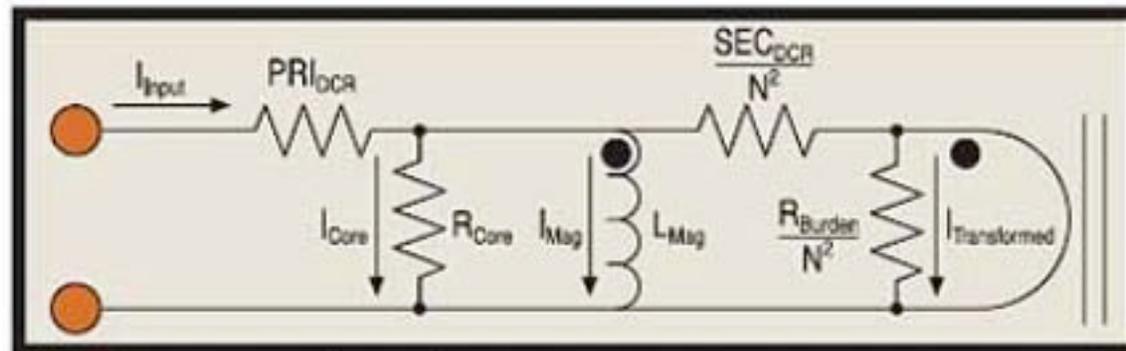


Fig. 3. Current transformer loss components.

El efecto de las pérdidas de inserción es triple:

- 1.- La potencia disipada en las resistencias del primario y secundario del transformador, así como las pérdidas de magnetización deben de ser disipadas sin que la temperatura del transformador sobrepase su valor máximo de operación.
- 2.- La caída de tensión en la impedancia del transformador, incluyendo la resistencia de medida reflejada del secundario al primario, modifica el circuito principal y afecta el valor de la corriente que circula en el mismo, creando un error sistemático en la medida.
- 3.- La potencia disipada en la resistencia de medida la caliente, lo que hace que su valor cambie y altera la medición de corriente.

Este es otro error sistemático que debe ser minimizado, bien empleando resistencias de muy bajo coeficiente de temperatura, bien aplicando técnicas de corrección de errores basadas en la medición de la temperatura de la resistencia o de estimación de su verdadero valor en caliente.

Los transformadores de corriente se clasifican en base a la “clase”, esto es, al % de error esperado en tres clases: 0.1, 0.5 y 1, que corresponden a errores del 0,1%, 0,5% y 1% respectivamente.

Además se debe indicar la corriente máxima nominal, la capacidad de sobre-corriente en caso de cortocircuito en la carga y la potencia nominal.

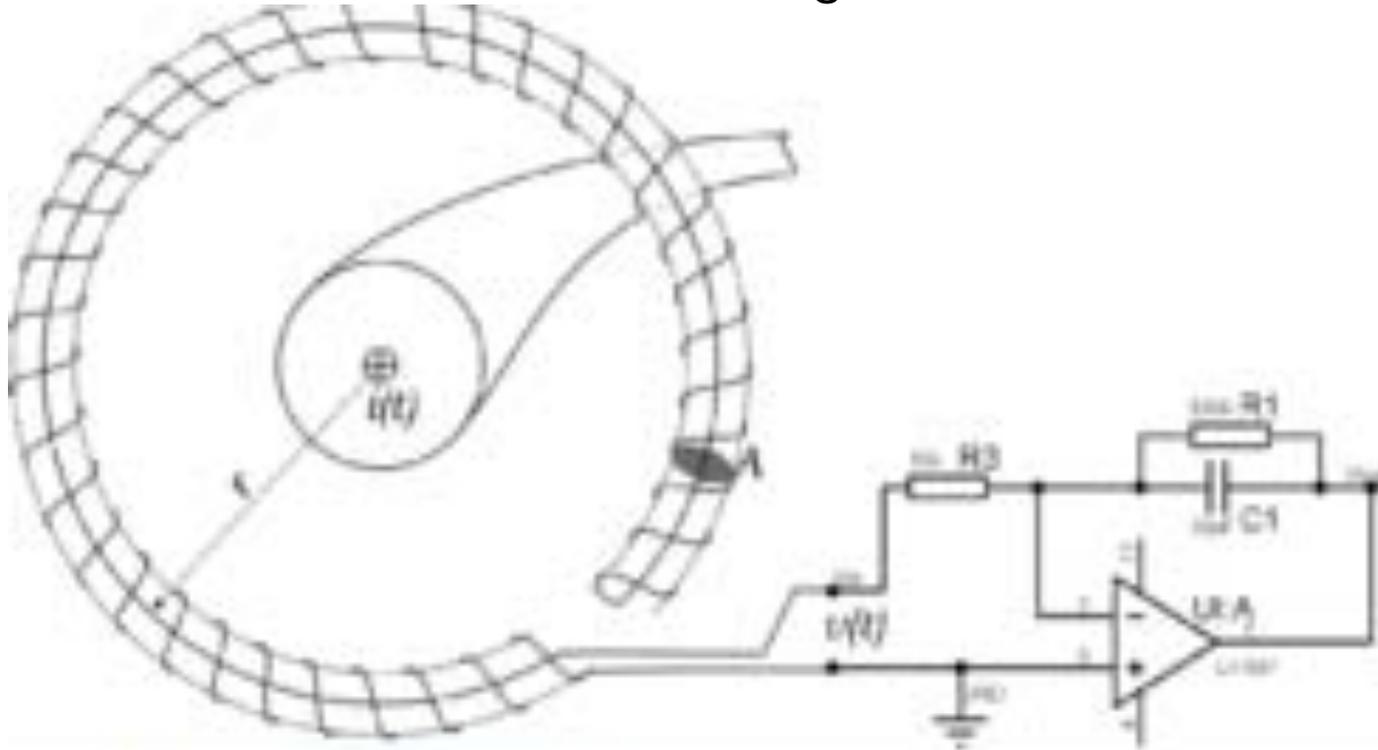
En general los transformadores de corriente están diseñados para que su banda pasante corresponda con la requerida para medir sistemas de corriente alterna operando a las frecuencias nominales de línea.

Para realizar la medición el primario debe estar conectado en serie con la carga cuya corriente se debe medir; una vez energizado el circuito primario el secundario no debe abrirse bajo ninguna circunstancia, ya que el hacerlo produciría una sobre tensión muy elevada.

Comparando los transformadores de corriente con los sensores Hall, y dejando aparte la limitación obvia de que los transformadores de corriente solo pueden medir corrientes AC, se tiene que los transformadores de corriente son la solución mas barata para medir corrientes AC bajas ($<100\text{A}$) y no requieren fuentes externas de alimentación, pero tienen la desventaja de que su uso introduce una pérdida en inserción, su salida es función de la frecuencia, el tamaño y el peso crecen rápidamente en función de la magnitud de la corriente a medir y son afectados por los campos magnéticos de interferencia.

de alta corriente AC, pero requieren de fuentes externas de alimentación, pueden producir salida cuando la corriente medida es cero (error de offset), y son sensibles a la temperatura, la sobrecorriente en el canal de medida y las variaciones en la fuente de alimentación externa del sensor.

2.- Bobina de Rogowski.



El elemento sensor es una bobina de núcleo de aire colocada en el interior de un tubo flexible que se puede doblar sobre el conductor que lleva la corriente a medir formando un toroide .

El campo magnético AC de la corriente a medir excita una tensión, $E(t)$, en la bobina de medición, cuyo valor es:

$$E(t) = \mu_0 NA \frac{dI(t)}{dt}$$

Donde N es el número de vueltas de la bobina sensora, A es el área de la sección transversal de la bobina y μ_0 la permeabilidad del aire.

El producto $\mu_0 NA$ es la sensibilidad de la bobina de Rogowski.

Dado que la colocación de la bobina no interfiere con la operación del circuito a medir, el sistema de medición se puede colocar o retirar sin necesidad de des-energizar el circuito principal a medir.

El ancho de banda de la bobina depende de la impedancia de terminación conectada a la bobina.

Asumiendo una bobina de sección transversal circular, la función de transferencia es:

$$\frac{V_t}{e} = \frac{Z_t}{Z_t \psi \coth \psi + r + j\omega L}$$

donde:

e es el voltaje inducido = Hdl/dt

V_t es el voltaje de salida, Z_t es la impedancia de carga.

$$\psi = \sqrt{(r + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

r y L son la resistencia y la inductancia de la bobina, y G y C son la conductancia y la capacitancia del extremo abierto de la bobina.

La inductancia y capacitancia de la bobina son:

$$L = \mu_o N^2 l A$$

$$C = \frac{4\pi\epsilon_o\epsilon_r l}{\ln\left(\frac{A}{a}\right)}$$

donde:

l es la longitud del alambre de la bobina

N es el número de vueltas en la bobina

a es el área del conductor coaxial de retorno

A es el área de la sección transversal de la bobina

ϵ_r es la permeabilidad relativa del material del tubo envolvente

En general r y G son relativamente pequeños y puede ignorarse, por lo que:

$$\psi \approx j\omega\sqrt{LC} = j\theta$$

y

$$\psi \coth \psi \approx \theta \cot \theta$$

donde θ es el ángulo de retraso de la bobina a la frecuencia ω fundamental de la señal que se desea medir

Las ventajas que ofrece este método frente al uso de transformador de corriente son:

Alta linealidad

Amplio ancho de banda.

Medición no intrusiva.

Facilidad de instalación.

Aislamiento eléctrico de alto valor.

Bajo tiempo de respuesta.

Ausencia de problemas de saturación, histéresis y sobrecorriente.

Bajo coeficiente térmico.

La bobina de Rogowski permite establecer el sistema de medición sin necesidad de interrumpir el circuito de alimentación.