

TESIS DE INGENIERIA



Alumno: MEDINA Oscar Alberto 61.990

Tutor : Ing. Ricardo GARCIA (I.N.T.I.)  
Co-tutor: Ing. Fernando NICCHI

2º Cuatrimestre de 2002

## **Agradecimientos:**

- A mi familia, que me ha apoyado en todo para poder desarrollar una carrera universitaria.
- Al Ing Ricardo García, que con su experiencia y conocimiento ha sabido guiarme en el desarrollo del presente trabajo.
- Al Dr Hector Laiz que en nombre del I.N.T.I. ha brindado sus instalaciones para poder concretar el presente.
- Al compañero Javier Quintana, que también ha realizado su importante aporte en la redacción final del trabajo.
- Al Ing Ricardo Iuzzolino, quien me ha asesorado en temas teóricos muy específicos.
- Al Dr. Mario Peccorelli, quien me ha ayudado en temas operativos puntuales.
- Al Ing Fernando Nicchi, que también me guió en la estructura final del presente.
- A Felipe Vasquez, quien ha colaborado en diversos temas prácticos de distintos ensayos.
- A Marcelo Cazabat, quien también colaboró en diversas mediciones.
- A Paola Alvarez Trentini, quien ha hecho su pequeño aporte en el presente.
- Al personal docente del Departamento de Electrotecnia de la Facultad de Ingeniería U.B.A.
- A todo el personal del Cefismetro Unidad Técnica Electricidad (I.N.T.I.).
- Al I.N.T.I., Instituto Nacional de Tecnología Industrial.

# BOBINAS DE ROGOWSKI.

## ESTRUCTURA DE TESIS.

i) Introducción.

### **1) Bobinas de Rogowski.**

- a) Teoría. La bobina como inductancia mutua.
- b) Su aplicación a las mediciones de corrientes. Integradores.
- c) Integradores pasivos: Integración L/r y RC. Análisis teórico.
- d) La bobina Rogowski como transductor de corriente – tensión. Errores de módulo y ángulo.
- e) Importancia de la resistencia amortiguadora  $R_d$  en bornes de bobina.
- f) Integradores activos y combinados. Análisis teórico.
- g) Exactitud y linealidad.
- h) Parámetros que caracterizan al transductor Rogowski.

### **2) Diseño, construcción y caracterización de una bobina Rogowski para corrientes de baja frecuencia. Aplicaciones.**

- a) Diseño y construcción de los diversos tipos de bobinas. Construcción de una bobina Rogowski con integrador pasivo para bajas frecuencias.
- b) Influencia de los campos externos.
- c) Influencia de la temperatura en mediciones con bobinas Rogowski.
- d) Respuesta en frecuencia con distintos tipos de integradores de bajas frecuencias.
- e) Calibración, linealidad y determinación experimental del error de ángulo. Circuitos.
- f) Caracterización de las bobinas utilizando otras Rogowski con integradores pasivos.
- g) Aplicaciones de la bobina BF.

### **3) Diseño, construcción y caracterización de una bobina Rogowski para corrientes de alta frecuencia. Medición de corrientes impulsivas.**

- a) Diseño y construcción de una bobina con integrador del tipo pasivo para altas frecuencias.
  - b) Diseño y construcción de una bobina con integrador pasivo para muy altas frecuencias.
  - c) Diseño y construcción de una fuente de corriente impulsiva de corta duración.
  - d) Respuesta en frecuencia con distintos tipos de integradores de altas frecuencias.
  - e) Respuesta al impulso de corriente de larga duración.
  - f) Respuesta al escalón de corriente.
  - g) Fuente de corriente ultrarrápida. Blindajes.
  - h) Aplicaciones de las bobinas HF1 y HF2.
-

#### **4) Conclusiones.**

- a) Ventajas fundamentales de los transductores Rogowski.
- b) Aplicaciones de las bobinas de Rogowski desarrolladas.
- c) Propuestas de caracterización desarrolladas en el trabajo.
- d) Consideraciones finales.

#### **5) Bibliografía.**

## INTRODUCCION

Una bobina de Rogowski es una bobina uniformemente arrollada en un núcleo de material no magnético de sección transversal constante, el cual se halla en forma de lazo cerrado. Se lo utiliza fundamentalmente para la medición de corrientes. La forma más simple es la de un toroide circular el cual puede ser totalmente cerrado y rígido, o puede ser abierto, flexible y poder cerrarse sobre sí mismo para así poder ser montado alrededor del conductor por el cual circula la corriente a medir.

Desde varios puntos de vista, la bobina de Rogowski es un transductor de corriente ideal para circuitos de potencia, a pesar que el mismo no tiene en cuenta la componente de corriente continua, si es que este está presente en el circuito. La bobina de Rogowski da una medición de corriente totalmente aislada y "no invasiva", **no se satura con altas corrientes, con lo cual tendremos una respuesta totalmente lineal**, no disipa energía como otros transductores (p.e. los shunt), tiene un excelente ancho de banda generalmente solo limitada por el procesamiento electrónico asociado de la señal y aún así es totalmente comparable con un shunt de alta frecuencia (p.e. 10 MHz), no carga al circuito y es aparentemente simple y fácil de construir.

Para medir corriente en circuitos electrónicos de potencia la bobina de Rogowski tiene la ventaja adicional de ser "no invasiva". La bobina puede ser flexible y de pequeña sección transversal tal que pueda ser enhebrada alrededor de un switch semiconductor sin alterar la geometría del circuito y sin afectar el funcionamiento del mismo. Este es un problema serio a niveles de corrientes de unos cientos de amperes o mas con otros transductores alternativos, los cuales son relativamente mas robustos. Además, la ausencia de la componente de corriente continua en la medición no es de gran consecuencia desde que la mayoría de las formas de onda de corriente relevantes, tales como interruptores de semiconductores, son discontinuos y el nivel del cero es fácilmente identificable. Cuando se lo usa con un osciloscopio, esto es equivalente a utilizar el acoplamiento en alterna del mismo. Todavía, con excepción de algunas limitadas aplicaciones, las bobinas de Rogowski no han sido ampliamente utilizadas, comparadas con los transformadores de corriente, shunts de corriente alterna, y transductores de efecto Hall. Las bobinas de Rogowski son todavía poco conocidas. A niveles de corriente por encima de los miles de amperes, no existe verdaderamente un transductor de corriente conveniente disponible para trabajos generales de desarrollos con circuitos electrónicos de potencia.

El principio de la bobina de Rogowski se lo conoce desde 1912<sup>[1]</sup>. Si una bobina uniforme es arrollada en un núcleo de material no magnético de sección transversal constante y en forma de lazo cerrado, luego la tensión inducida en la bobina ( $e$ ) es directamente proporcional a la razón de cambio de la corriente  $I$  que pasa a través del lazo ( $e = M \cdot dI/dt$ ). El lazo no necesita ser circular como se demostrará posteriormente. Para reproducir la forma de onda de corriente como una señal de medición, todo lo que se requiere es una integración lo mas exacta posible de la tensión que se induce en la bobina ( $e$ ).

Antiguamente, las bobinas Rogowski se utilizaban para mediciones de altas corrientes. La ausencia de un integrador electrónico aceptable fue la razón principal por la cual la bobina de Rogowski no estuvo disponible previamente como un transductor de corriente de propósitos generales. El diseño de un integrador para un ancho de banda amplio es más difícil de lo que parece a primera vista y se ha tenido una mayor atención para el diseño y análisis de una bobina para el uso con pulsos de corrientes de corta duración.

Los transductores de corriente de Rogowski **proveen una tensión de salida que es proporcional a la corriente medida**. La tensión sigue exactamente a la corriente como cambia, por lo cual, se puede reproducir la forma de onda de la misma en un osciloscopio o en cualquier tipo de memoria o visualizador de datos. También se puede conectar la salida del transductor a un voltímetro digital (DVM) para dar una lectura en valor eficaz de la corriente medida. Actualmente miden corrientes de valores normales ( $> 5$  A).

En este trabajo se hará una evaluación de mediciones y calibraciones de altas corrientes relacionadas con las bobinas de Rogowski. Mediciones exactas y trazables de corrientes eléctricas superiores a unos cientos de amperes presentan desafíos especiales. Esta tarea es muy difícil para corrientes que van desde unos cientos hasta unos miles de amperes. La aptitud de mantener mediciones exactas representa mayores dificultades cuanto mas grande sea la magnitud de la corriente y mas corto sea la duración de los transitorios de la misma. Cuando se trate de transitorios o de corriente alterna, el ancho de banda del transductor debe ser considerado, como también la razón de cambio de la corriente ( $dI/dt$ ).

**El objetivo de este trabajo es el diseño y construcción de bobinas Rogowski para ser usadas como referencia o patrones para la caracterización de otras bobinas Rogowski usadas en la industria.** Para ello, primero se analizará a la bobina Rogowski como transductor de corriente – tensión, teniendo en cuenta los errores de módulo y ángulo. También se estudiará la misma con distintos tipos de integradores (activos y pasivos) desde el punto de vista teórico. Se evaluará la influencia de los campos externos y de la temperatura en las mediciones con estas bobinas. Se analizará la respuesta de las bobinas con distintos

tipos de integradores a las ondas senoidales. Se estudiará la respuesta de las mismas al escalón de corriente y al impulso de corriente de larga duración y su vinculación con la respuesta en frecuencia. Se evaluará la sensibilidad de las bobinas Rogowski.

La propuesta de caracterización consistirá en diseñar, construir y caracterizar tres bobinas Rogowski patrón como referencia, una para baja y dos para alta frecuencia. Para ello, se deberán diseñar y construir dichas bobinas patrones con integradores pasivos. Además se deberán diseñar y construir otros dispositivos necesarios para los distintos ensayos como ser una fuente de corriente impulsiva de corta duración. Se tendrán muy en cuenta para la caracterización, la norma IEC 60044-8<sup>[20]</sup> (Instrument Transformer – Electronic Current Transformer). Esto es sumamente importante ya que es de reciente edición (Julio/2002) en donde se habla principalmente sobre los sensores de corriente no tradicionales, y en especial de los transductores del tipo corriente - tensión.

También se introducirán nuevos términos relacionados. El primero de ellos es el de “sensibilidad posicional” el cual describe los cambios en la salida de los transductores causados por la posición física u orientación del conductor de alta corriente referida al transductor. Por ejemplo en las bobinas de Rogowski, puede haber variaciones importantes en la indicación de la corriente medida variando la posición del conductor de alta corriente dentro de la ventana de la misma.

El otro término relacionado, es el “efecto de proximidad”, el cual está presente en shunts, en bobinas de Rogowski y en la mayoría de los sensores de corriente. Este efecto puede observarse cuando una fase adyacente o el retorno del conductor pasa cerca del transductor. La proximidad de materiales ferromagnéticos a la bobina puede afectar también la salida del transductor.

Como dijimos anteriormente, es muy importante poder caracterizar correctamente a las bobinas Rogowski y poder determinar así sus parámetros, además de tener en cuenta otras variables como la sensibilidad posicional, efecto de proximidad, temperatura, resolución, amplitud lineal, etc. La importancia radica en que, últimamente, estos transductores están ganando espacio entre los sensores de corriente<sup>[18]</sup>, especialmente para altas corrientes como las presentes en soldaduras, en cortocircuitos de generadores sincrónicos de potencia, en mediciones de corrientes en circuitos electrónicos de potencia e incluso como sensores de corriente en instrumentos para medir calidad de servicio.

CAPITULO I

# **Bobinas de Rogowski.**

# 1 - BOBINA DE ROGOWSKI.

## A) TEORIA. PRINCIPIO DE OPERACIÓN.

El principio de la bobina de Rogowski se conoce desde 1912<sup>[1]</sup>. Consta de una bobina toroidal, arrollada en forma compacta y uniforme de N vueltas/m sobre un material no magnético, usualmente plástico, de sección transversal constante S, como se ve en la Figura 1. Originalmente era de cuero y se utilizaba para la medición de potencial magnético. En las bobinas Rogowski, un extremo del arrollamiento, el extremo 'libre', se retorna al otro extremo a lo largo del eje central del toroide y ambos extremos están permanentemente conectados a un cable coaxial. El extremo libre está normalmente insertado en un enchufe adyacente a la conexión del cable pero puede ser desenchufado para permitir que la bobina enlace al conductor que lleva la corriente a medir.

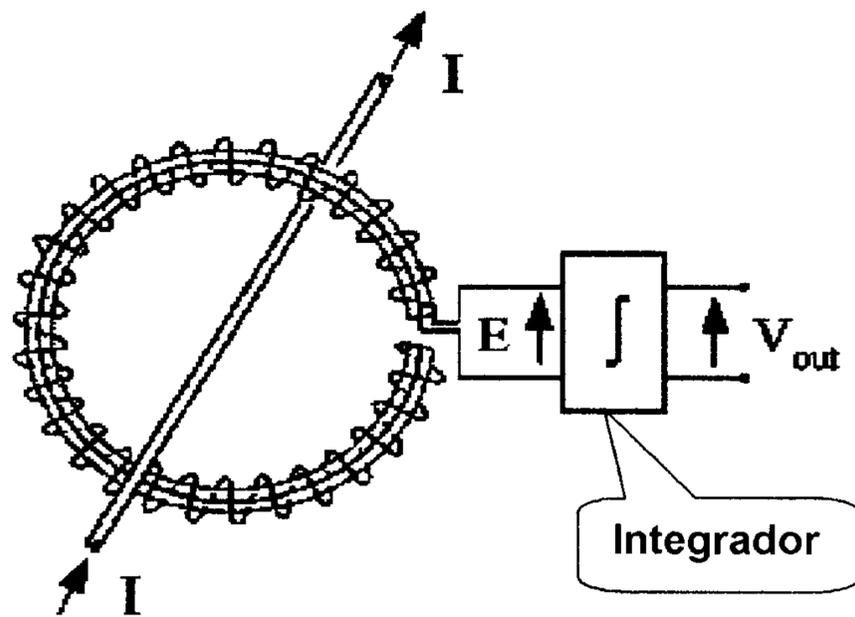


Figura 1: Transductor de Rogowski Básico.

### A.1) La bobina como inductancia mutua.

Para deducir las ecuaciones básicas primero se estudiará el caso de una bobina Rogowski rígida, perfectamente circular y de sección rectangular constante (a x b) como el de la figura 2. Luego se analizará el caso más general de una bobina que no necesariamente debe ser ni rígida ni circular. Partiendo de la ley de Ampere, el valor del campo magnético H a lo largo de una trayectoria circular de radio r, producida por una corriente I que circula por un conductor rectilíneo infinito pasante por su eje es<sup>[21]</sup>:

$$\int_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \Rightarrow H(r) \cdot 2\pi r = I \Rightarrow H(r) = \frac{I}{2\pi r}. \quad (1)$$

El flujo magnético a través de una espira j se la calcula como:

$$\Phi_j = \iint_S \vec{B}_j \cdot d\vec{S} = \mu_0 \iint_S \vec{H}_j \cdot d\vec{S} = \mu_0 \int_0^b \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} H_j(r) \cdot dr dz$$

La tensión inducida en la bobina esta dada por la ecuación:

$$e = \sum_{j=1}^n \frac{d}{dt} \Phi_j = \frac{d}{dt} \sum_j \Phi_j = \frac{d}{dt} \sum_{j=1}^n \mu_0 \iint_S H_j \cdot d\vec{S}$$

Haciendo  $d\vec{S} = dr \cdot dz$  y aplicando los límites de integración (0 – b) para  $z$  y ( $r_{\min} - r_{\max}$ ) para  $r$ :

$$e = \mu_0 \frac{d}{dt} \int_0^b \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \sum_{j=1}^n H_j(r) \cdot dr \cdot dz.$$

Reemplazando  $H_j(r)$  por la expresión (1) queda:

$$e = \sum_{j=1}^n \mu_0 \frac{d}{dt} \int_0^b \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{I}{2\pi r} dr \cdot dz.$$

Resolviendo la integral de superficie queda:

$$e = \sum_{j=1}^n \mu_0 \frac{d}{dt} \frac{I}{2\pi} \int_0^b \left[ \ln r \right]_{r_{\min}}^{r_{\max}} dz = \sum_{j=1}^n \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{dI}{dt} \int_0^b \ln \left( \frac{r_{\max}}{r_{\min}} \right) dz$$

$$e = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{j=1}^n \frac{dI}{dt} b \ln \left( \frac{D_{\max}}{D_{\min}} \right) = M \frac{dI}{dt}$$

Finalmente la expresión de la inductancia mutua  $M$  entre el conductor y la bobina es (para una bobina circular de sección rectangular):

$$M = \frac{\mu_0}{2\pi} N_t b \ln \left( \frac{D_{\max}}{D_{\min}} \right) \quad (2)$$

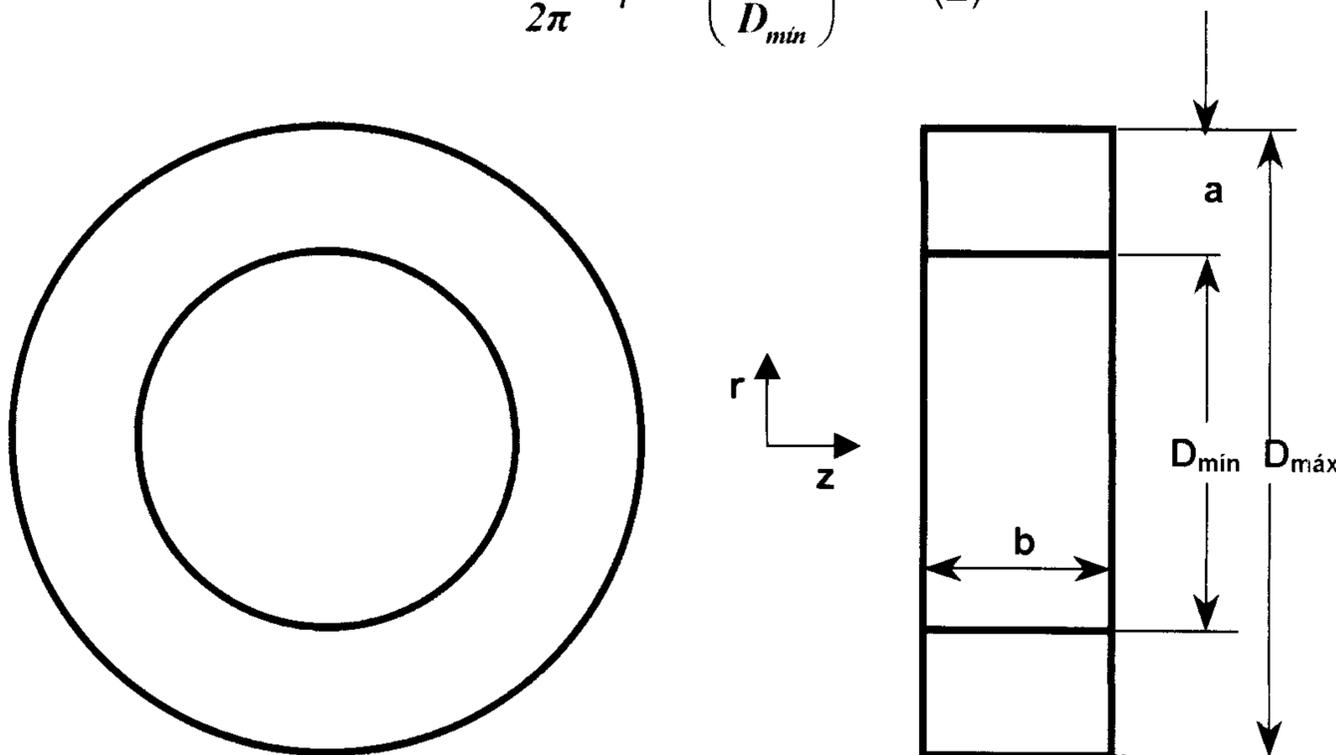


Figura 2: Bobina de Rogowski rígida.

Para deducir las ecuaciones básicas para un caso general se parte de la Ley de Ampere:

$$\int_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \quad (3)$$

El flujo magnético a través de una espira  $j$  se la calcula como:

$$\Phi_j = \iint_S \vec{B}_j \cdot d\vec{S} = \mu_0 \iint_S \vec{H}_j \cdot d\vec{S}.$$

La tensión inducida en la bobina esta dada por la ecuación:

$$e = \sum_{j=1}^n \frac{d}{dt} \Phi_j = \frac{d}{dt} \sum_j \Phi_j = \frac{d}{dt} \sum_{j=1}^n \mu_0 \iint_S \vec{H}_j \cdot d\vec{S}$$

Operando analíticamente queda:

$$e = \mu_0 \frac{d}{dt} \iint_S \sum_{j=1}^n \vec{H}_j \cdot \vec{n} \cdot dS = \mu_0 \frac{d}{dt} \iint_S \frac{n}{l} \sum_{j=1}^n \vec{H}_j \cdot \delta l \cdot \vec{n} \cdot dS$$

donde:  $l = n \cdot \delta l$  y  $\delta l \cdot n = dl$   $n = N^\circ$  total de espiras.

Haciendo  $\sum_{j=1}^n \vec{H}_j \cdot \delta l \cdot \vec{n} = \int_C \vec{H}_j \cdot d\vec{l} = I$  quedará:

$$e = \mu_0 \cdot \frac{n}{l} \cdot \frac{d}{dt} \iint_S \left( \int_C \vec{H}_j \cdot d\vec{l} \right) \cdot dS = \mu_0 \cdot \frac{n}{l} \cdot \frac{d}{dt} I \iint_S dS = \mu_0 \cdot \frac{n}{l} \cdot S \cdot \frac{dI}{dt}$$

Vale aclarar que se está considerando que las espiras están infinitamente próximas unas de otras, que la sección de la bobina es uniforme a lo largo de ella, que el lazo de la bobina no necesariamente debe ser circular y que la tensión de salida  $e$  no depende de la posición de la corriente  $I$  dentro del lazo de la bobina. Por lo tanto, queda demostrado que la tensión inducida  $e$  en la bobina es proporcional a la tasa de cambio ( $dI/dt$ ) de la corriente concatenada  $I$  de acuerdo a la relación:

$$e = \mu_0 N S dI/dt = M dI/dt \quad (4)$$

donde  $N = n / l$ , es la densidad de espiras de la bobina (vueltas/m).

$S$  es el área de las espiras ( $m^2$ ).

$M = 4 \pi 10^{-7} N S$  es la inductancia mutua entre el conductor y la bobina (Hy).

La inductancia mutua  $M$  está normalmente en el rango de 5 nH a 25  $\mu$ H dependiendo del diseño.

Si la corriente varía senoidalmente con el tiempo a la frecuencia  $f$  (Hz):

$$E_{rms} \text{ (valor eficaz)} = 2 \pi f M I_{rms} \text{ (valor eficaz)}. \quad (5)$$

## B) SU APLICACIÓN A LA MEDICION DE CORRIENTES. INTEGRADOR.

Para poder utilizar las bobinas de Rogowski en la medición de corrientes, es necesario obtener una tensión de salida  $V_{out}$  proporcional a la corriente  $I$  a medir por lo cual es necesario integrar la tensión de la bobina  $e$ , por lo que se utiliza un integrador electrónico cuyo ancho de banda se extienda desde por lo menos 1 Hz. El transductor no puede medir la componente de continua. Sin embargo la componente de continua no puede saturar al transductor. Esto permite que se puedan medir pequeñas corrientes alternas superpuestas sobre una gran corriente continua.

El lazo de la bobina no necesariamente debe ser circular, y en teoría la tensión medida no depende de la posición de la corriente  $I$  dentro del lazo de la bobina. Es más, cualquier corriente fuera del lazo de la bobina no debería producir ninguna tensión en la bobina. Esto se examina con más detalle en las secciones posteriores.

En cuanto al integrador necesario, existen cuatro posibilidades a saber:

- ◆ Integradores pasivos, que puede ser un circuito RC o uno L/r.
- ◆ Integradores electrónicos activos, cuyo componente principal es un **amplificador operacional**.
- ◆ Integradores combinados de circuitos pasivos con circuitos activos conectados en cascada.
- ◆ Integradores numéricos.

Los integradores pasivos fueron utilizados históricamente, antes de la disponibilidad de integradores con operacionales adecuados. La aplicación de las bobinas Rogowski se restringía por ese entonces a mediciones de pulsos de corriente de corta duración (menores a  $1 \mu\text{s}$ ) de valores muy grandes (cientos de kA) como las obtenidas en un haz de electrones o transitorios de plasmas. En estos casos la señal de la bobina es suficientemente grande para ser integrados por circuitos pasivos RC<sup>[6]</sup> pero también se obtienen buenos resultados conectando a la salida de la bobina una resistencia de muy bajo valor obteniendo por medio de esto una bobina que se “integra a si misma”. Ambos circuitos equivalentes se pueden observar en la figura 3.

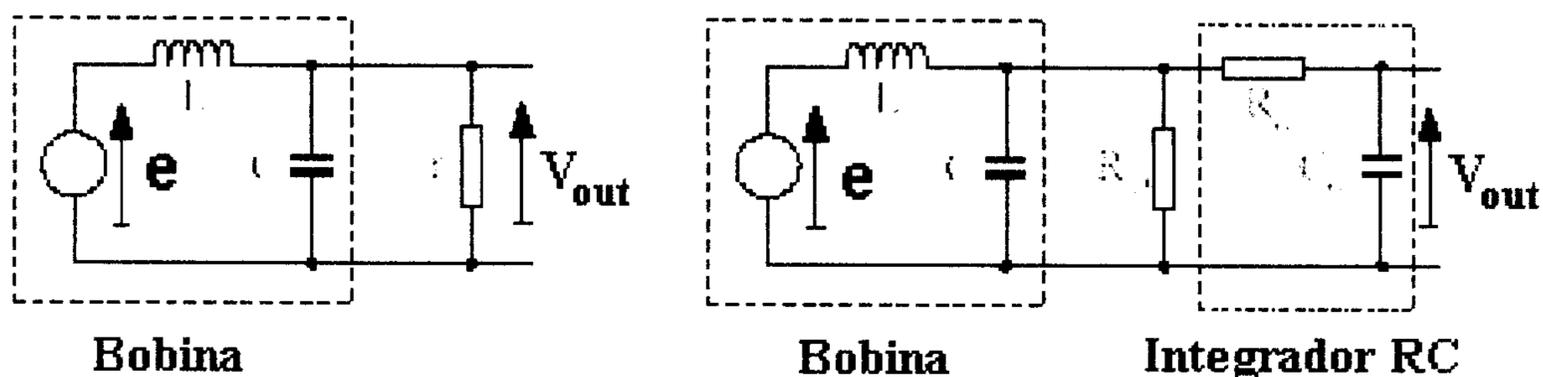


Figura 3: Circuitos de Integración pasiva: (a) L/r y (b) RC.

Los integradores RC serán analizados especialmente en este trabajo. Este método de integración se utiliza para la medición de altas corrientes de 50 hz por excelencia. No obstante, también se lo puede utilizar para integración en altas frecuencias para corrientes no muy grandes ( $> 10 \text{ A}$ ).

Para simplificar el análisis en bajas frecuencias, se considerará que los efectos de la inductancia propia ( $L$ ) y la capacidad distribuida de la bobina ( $C$ ) son despreciables ya que los valores de los mismos suelen ser muy pequeños (luego se analizará los efectos de ambos parámetros en altas frecuencias). Por lo tanto, del principio de Rogowski y planteando las ecuaciones de malla en la formulación de Laplace se tiene:

$$e \cong e' = (\mu_0 \cdot N \cdot A) \frac{dI}{dt} = MpI$$

$$i_c = C_0 p V_{out} \Rightarrow u_{R_0} = (C_0 p V_{out}) \cdot R_0$$

$$e' = (C_0 p V_{out}) \cdot R_0 + V_{out} = MpI \tag{6}$$

$$e' = V_{out} (1 + R_0 C_0 p) = MpI$$

$$\Rightarrow \frac{V_{out}}{I} = \frac{Mp}{1 + R_0 C_0 p}$$

La última expresión de la ecuación (6) es la función transferencia para un integrador pasivo en bajas frecuencias. Ahora bien, considerando que al operador  $p$  se lo puede reemplazar por  $j\omega$  para señales periódicas senoidales de corriente alterna se tendrá:

$$\frac{V_{out}}{I} = \frac{M \cdot j\omega}{1 + R_0 C_0 \cdot j\omega} \tag{7}$$

Para valores de  $\omega$  tales que  $\omega R_0 C_0 \gg 1$  se tendrá:

$$V_{out} = \frac{j\omega M}{j\omega R_0 C_0} I = \frac{M}{R_0 C_0} I \tag{8}$$

$$V_{out} = R_{SH} \cdot I$$

en donde la sensibilidad  $R_{SH}$  es  $M/R_0 C_0$ . De la ecuación (7) se pueden calcular tanto el módulo como el ángulo de la función transferencia  $T$ , desde donde se podrán determinar los errores de módulo y ángulo (que serán tratados con detenimiento en el punto D).

Los integradores activos son de los más utilizados en la actualidad, cuyo componente principal es el Amplificador Operacional Integrador, donde la configuración más simple se ve en la figura 4, con una resistencia de entrada  $R_0$  y un capacitor de realimentación  $C_1$ .

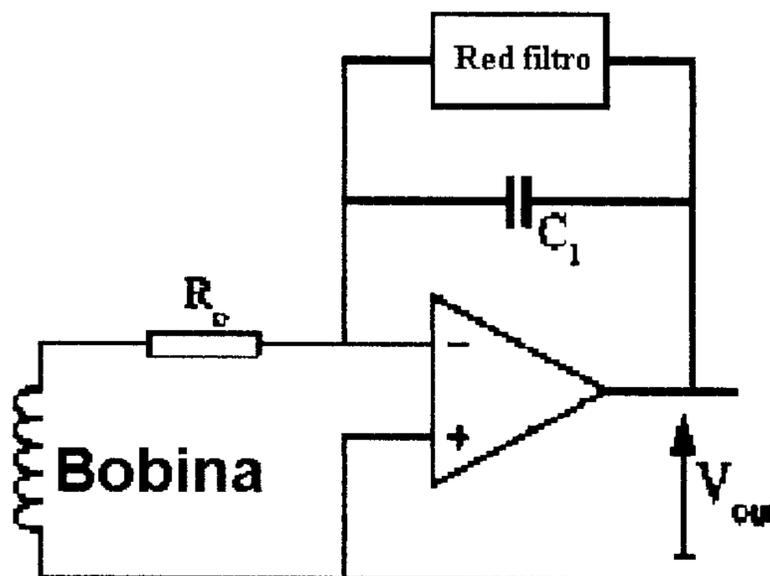


Figura 4: Bobina de Rogowski e integrador activo.