

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BUENOS AIRES

Trabajo Práctico N° 3

Laboratorio de Electrónica - 2019

Grupo 1:

Galdeman, Agustín Ignacio
Gaytan, Joaquín Oscar
Kammann, Lucas Agustín
Maselli, Carlos Javier

Profesores:

Cossutta, Pablo Martín
Weill, María Alejandra
Salvati, Matías Damián

22 de octubre de 2019

Índice

Introducción	3
1. Comparación entre métodos de medición de puentes	4
Consideraciones generales	4
Osciloscopio	4
Multímetro de precisión	5
Amplificador de instrumentación	5
2. Puente de Wien - Medición de frecuencias	6
Diseno y elección de componentes	6
Sensibilidades	6
Mediciones	8
Conclusiones	8
3. Puente de medición de capacitores	9
Análisis teórico	9
Condiciones de diseño	9
Ecuaciones del puente	9
Sensibilidades del puente	10
Dimensionamiento del puente	10
Resultados	13
Componentes patrón	13
Mediciones del puente	13
Mediciones del analizador de impedancias	13
Manual de usuario	13
Precisión del puente	14
Conclusión	15

Introducción

1. Comparación entre métodos de medición de puentes

Consideraciones generales

Los puentes de medición son configuraciones circuitales que permiten realizar mediciones a partir de la comparación de elementos cuando la combinación de estos llevan a la condición de equilibrio al puente. Se define tal condición de equilibrio cuando la tensión medida $V_d = 0V$ como se ilustra en la Fig. 1.

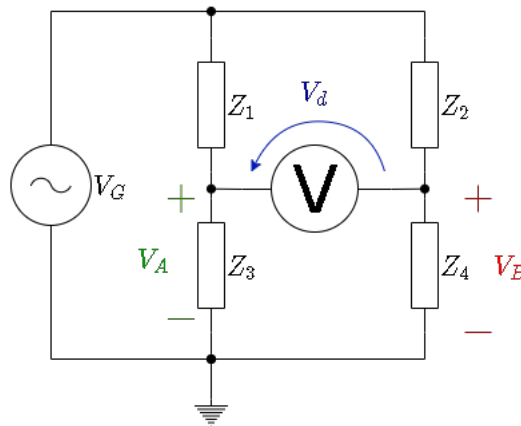


Figura 1: Circuito de un puente de medición genérico

La aplicación práctica de estos circuitos implica realizar un ajuste midiendo la salida diferencial del puente y observando en qué situación se alcanza la condición de equilibrio, es por ello que es de gran interés determinar los diferentes métodos a emplear para poder medir de la mejor forma posible, cuándo se alcanza el valor mínimo de V_d asumiendo impedimentos que eviten alcanzar el valor nulo.

Los principales factores a tener en cuenta en el análisis de los métodos de medición del puente son, en primer lugar, la capacidad de medir la salida diferencial del puente, teniendo en cuenta que toda señal eléctrica puede contar con la presencia de ruido, sea externo o interno del circuito, con lo cual el orden de magnitud de la variable de interés se vuelve apreciable en términos del piso de ruido en diferentes escenarios.

Osciloscopio

El proceso de medición en un osciloscopio consiste en utilizar dos canales para medir las tensiones referidas en la Fig. 1 como V_A y V_B , empleando luego la funcionalidad Math para obtener el resultado de la resta de ambas, con lo cual efectivamente se podría medir la salida de interés del puente, pudiendo observar así su evolución en el tiempo, su amplitud y fase. La dificultad de este procesos es la capacidad de determinar cuándo la señal que se mide, en conjunto con el ruido, corresponde al equilibrio del puente.

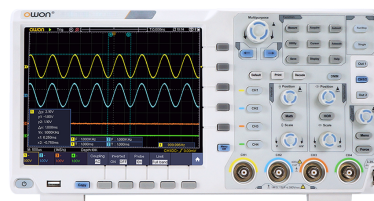


Figura 2: Osciloscopio Digital

Multímetro de precisión

El multímetro de precisión permite realizar una medición de una salida diferencial directamente, permitiendo realizar mediciones con mayor precisión respecto del osciloscopio puesto que no deben realizarse procesos adicionales sobre la medición. Por otro lado, no se puede ver la señal en el tiempo ni medir su fase, aunque en beneficio tiene menos error asociado al ruido.



Figura 3: Multímetro de precisión

Amplificador de instrumentación

Un amplificador de instrumentación es un amplificador diferencial, esto es que amplifica una entrada diferencial, cuyas características están mejoradas en torno a la aplicación el mismo en circuitos de señales pequeñas que pueden ser apreciables al ruido como salidas de transductores u otros tipos de sensores. Dentro de tales características, se define la Relación de Rechazo de Modo Común (CMRR) como la relación entre lo que amplifica la entrada diferencial y atenúa la entrada en modo común asociada al ruido. Es por dicha característica que este tipo de circuitos puede ser muy apropiada para la calibración de un puente, con lo cual la medición resultante va a tener mucha mayor precisión y puede emplearse un osciloscopio para visualizar tal resultado.

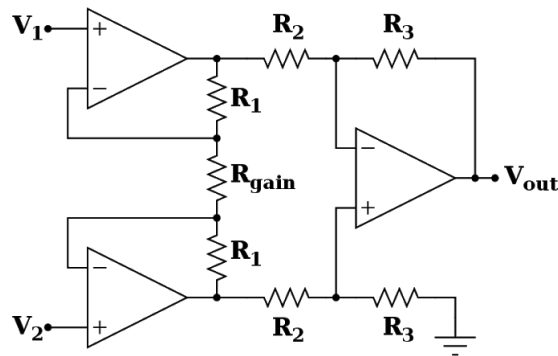


Figura 4: Esquema de un posible circuito de amplificador de instrumentación

2. Puente de Wien - Medición de frecuencias

El puente de Wien es un tipo de puente que consiste en dos capacitores y cuatro resistores. El mismo puede utilizarse para el cálculo de frecuencias lográndose la siguiente condición de balance:

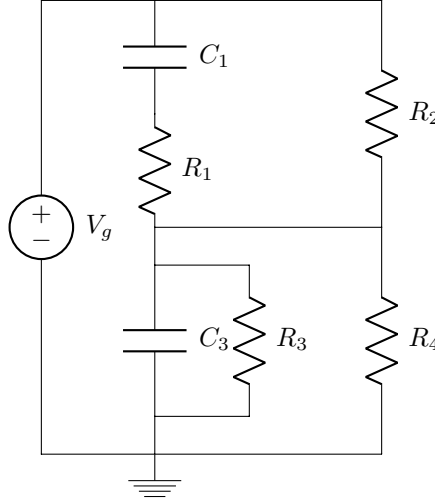


Figura 5: Puente de Wien

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_3 C_1 C_3}} \quad (1)$$

Para el caso en el que $R_1 = R_3$ y $C_1 = C_3$ la igualdad se simplifica:

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2)$$

con R y C el valor de los componentes.

En general se busca ajustar los valores de R_1 y R_3 para que coincidan y así se cumpla la condición de puente.

Asimismo se debe considerar $R_2 = 2 \cdot R_4$ para que se cumpla dicha condición.

Diseno y elección de componentes

Los componentes fueron seleccionados realizando cálculos para que el puente pueda estabilizarse en el rango de frecuencias solicitado ($100Hz$ a $2KHz$). De esta forma se tiene la siguiente distribución, tomando en cuenta las suposiciones realizadas con anterioridad.

$C_1 = C_3$	$R_2 = 2 \cdot R_4$	$R_1 = R_3(preset)$
$33nF$	$10K\Omega$	$50K\Omega$

Cabe destacar que se consideró un cierto margen en el rango de frecuencias, teniendo en cuenta las tolerancias de los componentes.

Sensibilidades

Se calculó la sensibilidad del puente respecto a los componentes que se eligió variar (R_1 y R_3).

La sensibilidad respecto de R_1 se puede calcular como:

$$\Delta V_d = \frac{Z_3 \cdot (Z_2 + Z_4) - Z_4(Z_1 + \Delta Z_1 + Z_3)}{(Z_1 + Z_3) \cdot (Z_2 + Z_4)} \cdot v_g \quad (3)$$

Veamos que

$$\frac{|\Delta Z_1|}{|Z_1|} = \frac{\Delta R_1}{|Z_1|} = \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1}}{\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega \cdot C_1 \cdot R_1)^2}}} \quad (4)$$

Suponiendo $\frac{1}{\omega \cdot C_1 \cdot R_1} \gg 1$ obtenemos:

$$\frac{|\Delta Z_1|}{|Z_1|} = \frac{|\Delta R_1|}{R_1} \cdot \omega \cdot C_1 \cdot R_1 \quad (5)$$

Sabiendo esto, y asumiendo condición de puente y v_g unitario obtenemos

$$\Delta V_d = \frac{-A}{(A+1)^2} \cdot \omega \cdot R_1 \cdot C_1 \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (6)$$

Donde $A = \frac{R_2}{R_4}$ es el factor cabeza de puente, y esta relación fue fijada con anterioridad.

Asumiendo los valores de la tabla de selección de componentes, se grafica la sensibilidad para el rango de frecuencia.

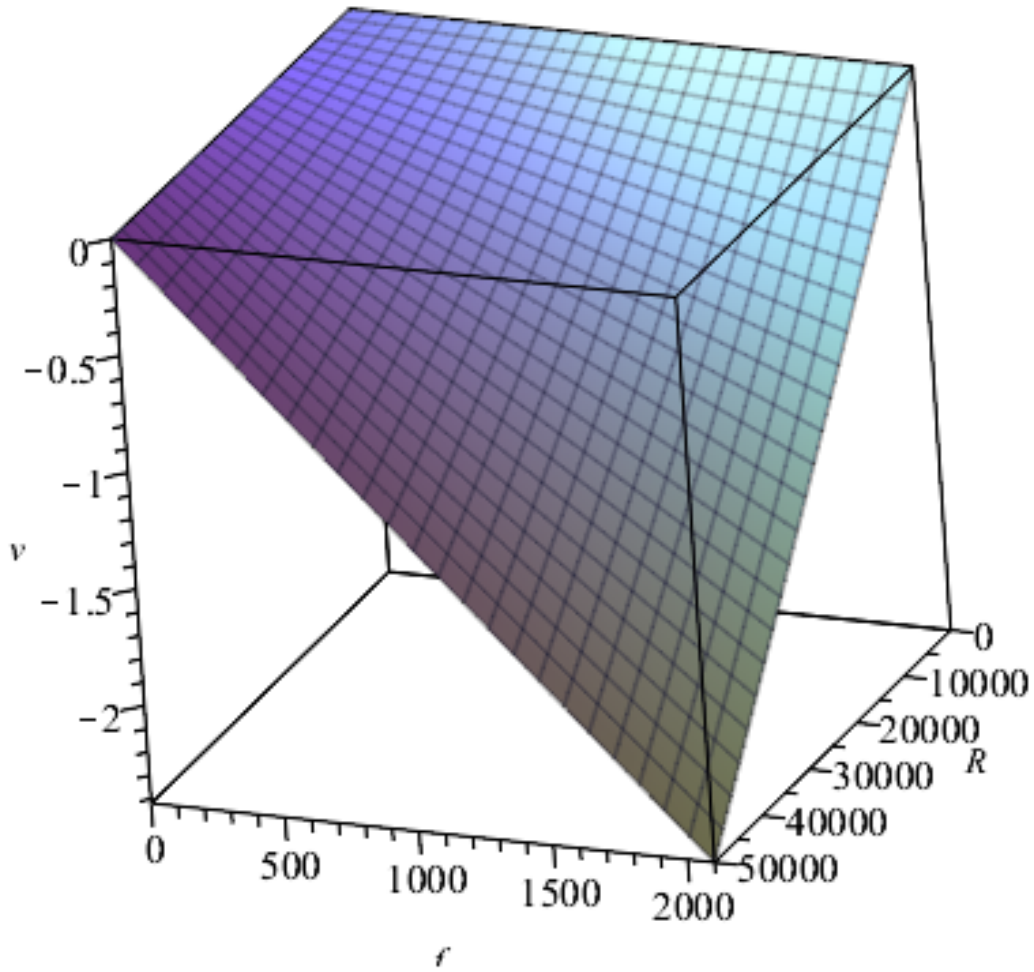


Figura 6: Sensibilidad del circuito respecto a R_1

Se realiza un procedimiento análogo para obtener la sensibilidad del puente respecto a R_3 .

Veamos que:

$$Z_3 + \Delta Z_3 = \frac{R_3 + \Delta R_3}{1 + S \cdot C_3 \cdot (R_3 + \Delta R_3)} \quad (7)$$

Suponemos $R_3 \gg \Delta R_3$ y despreciamos los efectos de ΔR_3 sobre el denominador debido a que está multiplicado por un número relativamente pequeño para el rango de frecuencias. Luego se tiene

$$Z_3 + \Delta Z_3 = \frac{R_3}{1 + S \cdot C_3 \cdot R_3} + \frac{\Delta R_3}{1 + S \cdot C_3 \cdot R_3} = Z_3 + \frac{\Delta R_3}{1 + S \cdot C_3 \cdot R_3}. \quad (8)$$

Por lo que $\Delta Z_3 = \frac{\Delta R_3}{1 + S \cdot C_3 \cdot R_3}$
Operando, se llega a la siguiente equivalencia:

$$\frac{|\Delta Z_3|}{|Z_3|} = \frac{\Delta R_3}{R_3} \quad (9)$$

Finalmente, considerando V_g unitario,

$$\Delta V_d = \frac{A}{(A+1)^2} \cdot \frac{\Delta R_3}{R_3} \quad (10)$$

Por lo que será constante independientemente de la frecuencia ($V_d = \frac{2}{9}$).

Mediciones

Para la medición del puente se utilizó el multímetro de banco. Con el mismo es posible medir niveles e tensión que serían indistinguibles del ruido en un osciloscopio. Se estimuló al circuito con una señal de $5V_{pp}$ y se ajustaron los dos potenciómetros hasta obtener la menor tensión posible:

Frecuencia del generador	Preset R.1(Ohm)	Preset R.2(Ohm)	Frecuencia calculada	Error(%)
100	9390	9175	519,6	3,92
500	46100	45915	104,83	4,83
750	6283	6219	771,55	2,87
1000	4695	4689	1027,89	2,79
1250	3833	3762	1270	1,61
1500	3144	3125	1538,65	2,58
1750	2704	2665	1795,6	2,66
2000	2331	2318	2074,8	3,74

Conclusiones

Como conclusión se puede destacar que se notaron diferencias entre el modelo teórico del puente y las mediciones realizadas en la práctica. Principalmente se observa que es muy difícil equilibrar el puente en su totalidad, debido a las variaciones en los presets de ajuste y las tolerancias asociadas a los componentes del circuito.

3. Puente de medición de capacitores

El objetivo de esta sección es realizar el análisis y diseño de un circuito puente denominado C Serie, con el fin de poder medir diferentes tipos de capacitores de prueba, tanto su parámetro de capacidad como factor de pérdidas del mismo.

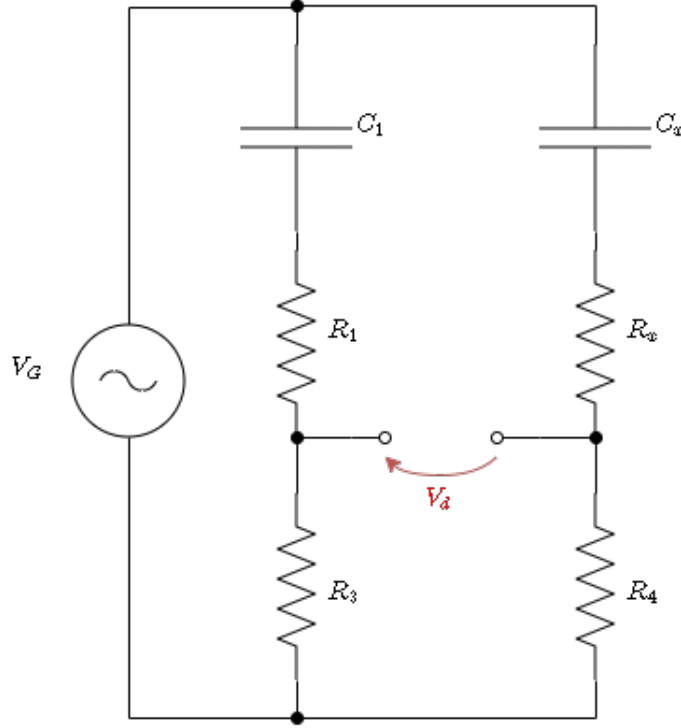


Figura 7: Puente C Serie

Análisis teórico

Se propone establecer un valor fijo para el capacitor patrón C_1 y la resistencia R_4 , así se utilizan R_3 y R_1 como variables de ajuste para llevar al puente a la condición de equilibrio, para lo cual se definirá en cada caso un valor mínimo y máximo según los rangos de operación del puente de medición. Vale mencionar que para implementar el rango de variación de las variables de ajuste, se hará uso de una resistencia en serie junto con presets o trimmers de diferentes valores para garantizar tanto un ajuste grueso como fino del puente.

Condiciones de diseño

Se desea diseñar un puente de medición C Serie que opere a una frecuencia de $f = 20kHz$. Debe ser capaz de medir capacitores que se encuentren dentro del rango $10nF < C < 100nF$ y $0,02 < D < 0,12$.

Ecuaciones del puente

$$\begin{aligned}
 \frac{V_d}{V_g} &= \frac{Z_3 \cdot Z_x - Z_4 \cdot Z_1}{Z_1 \cdot Z_x + Z_1 \cdot Z_4 + Z_3 \cdot Z_x + Z_3 \cdot Z_4} \\
 Z_1 &= \frac{1}{s \cdot C_1} + R_1 \\
 Z_x &= \frac{1}{s \cdot C_x} + R_x \\
 Z_3 &= R_3 \\
 Z_4 &= R_4
 \end{aligned} \tag{11}$$

Sensibilidades del puente

El proceso de medición de un puente requiere alcanzar la condición de equilibrio a través del ajuste de sus diversas variables, para lo cual es de interés conocer con qué sensibilidad varía la condición respecto de los cambios en tales variables. Para este análisis se emplea la definición de sensibilidad absoluta, asumiendo cambios o variaciones no muy grande se hace un cálculo en diferencias de las variables.

Sensibilidad respecto de la variable Z_3

$$V_d + \Delta V_d = \frac{(Z_3 + \Delta Z_3) \cdot Z_x - Z_4 \cdot Z_1}{Z_1 \cdot Z_x + Z_1 \cdot Z_4 + (Z_3 + \Delta Z_3) \cdot Z_x + (Z_3 + \Delta Z_3) \cdot Z_4} \cdot V_g \quad (12)$$

$$Z_3 \gg \Delta Z_3 \Rightarrow \Delta V_d = \frac{\frac{\Delta Z_3}{Z_3}}{\left(\frac{Z_1}{Z_3} + 1\right) \left(\frac{Z_4}{Z_x} + 1\right)} \cdot V_g \quad (13)$$

Se define, asumiendo que se cumple la condición de puente balanceado, $A = \frac{Z_1}{Z_3} = \frac{Z_x}{Z_4}$.

$$\Delta V_d = \frac{A}{(A+1)^2} \cdot \frac{\Delta Z_3}{Z_3} \cdot V_g = \frac{A}{(A+1)^2} \cdot \frac{\Delta R_3}{R_3} \cdot V_g \quad (14)$$

Sensibilidad respecto de la variable Z_1

$$\Delta V_d = -\frac{\frac{\Delta Z_1}{Z_1}}{\left(\frac{Z_3}{Z_1} + 1\right) \left(\frac{Z_x}{Z_4} + 1\right)} \cdot V_g \quad (15)$$

$$\left| \frac{\Delta Z_1}{Z_1} \right| = \frac{\Delta R_1}{|Z_1|} = \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1}}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C_1 \cdot R_1}\right)^2}} \quad (16)$$

$$\frac{1}{\omega \cdot C_1 \cdot R_1} \gg 1 \Rightarrow \left| \frac{\Delta Z_1}{Z_1} \right| = \frac{\Delta R_1}{R_1} \cdot \omega \cdot C_1 \cdot R_1 \quad (17)$$

$$\Delta V_d = -\frac{\frac{\Delta R_1}{R_1} \cdot \omega \cdot C_1 \cdot R_1}{\left(\frac{Z_3}{Z_1} + 1\right) \left(\frac{Z_x}{Z_4} + 1\right)} \cdot V_g \quad (18)$$

$$\Delta V_d = \frac{A}{(A+1)^2} \cdot \frac{\Delta Z_1}{Z_1} \cdot \omega \cdot C_1 \cdot R_1 \cdot V_g \quad (19)$$

Dimensionamiento del puente

Se obtienen de la condición de puente balanceado, las ecuaciones que se muestran en 20. A partir de estas, y de las condiciones sobre los máximos valores medibles de capacidad y factor de pérdidas que se observan en la Tabla 1, se obtienen valores límite para los presets a utilizar al realizar la medición.

$$\begin{aligned} C_x &= \frac{C_1 \cdot R_3}{R_4} \\ R_x &= \frac{R_1 \cdot R_4}{R_3} \\ D_x &= \omega \cdot C_1 \cdot R_1 \end{aligned} \quad (20)$$

Parámetros	Mínimo	Máximo
C_x	10nF	100nF
D_x	0.02	0.12
f	20KHz	

Tabla 1: Condiciones de diseño del puente

Se fijan valores para C_1 y R_4 de $1nF$ y 100Ω respectivamente. A partir de estos valores se obtiene un rango posible para R_3 y R_1 que permiten lograr el equilibrio en cualquier caso donde se cumplan las condiciones impuestas. Se muestran en la Tabla 2, los resultados de dicho análisis.

Resistencias	Mínimo	Máximo
R_1	$159,15\Omega$	$954,9\Omega$
R_3	$1k\Omega$	$10k\Omega$

Tabla 2: Rango de valores

Finalmente, se propone utilizar una resistencia R_1 compuesta por el conjunto serie de una resistencia de $R = 150\Omega$ en serie con dos presets, uno de $1k\Omega$ y uno de 100Ω de forma tal que la precisión del cambio pueda ajustarse con mayor o menor paso. De igual forma en R_3 con una resistencia de $1k\Omega$ y dos presets de $10k\Omega$ y $1k\Omega$.

Sensibilidad respecto de R_1

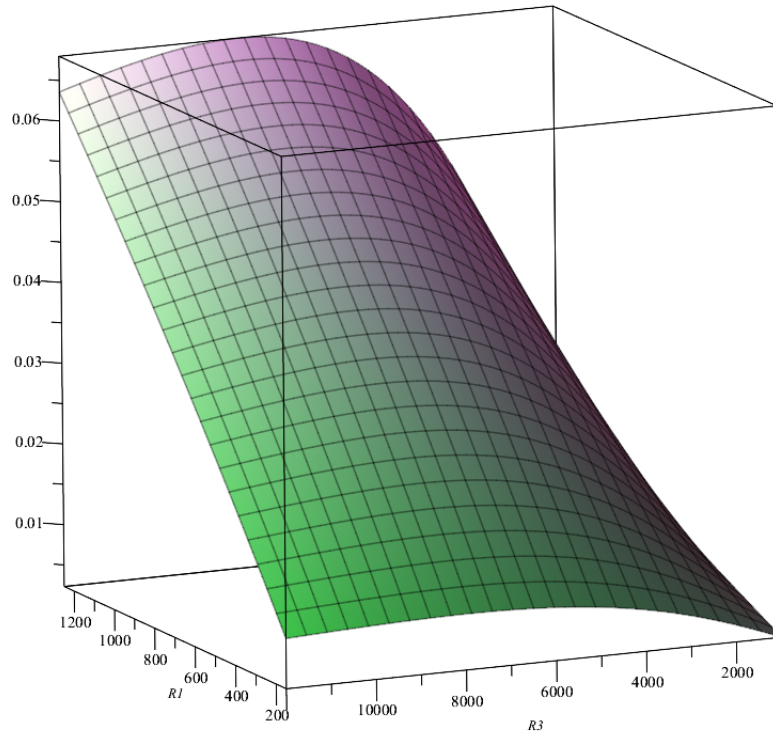


Figura 8: Sensibilidad respecto de R_1

Sensibilidad respecto de R_3

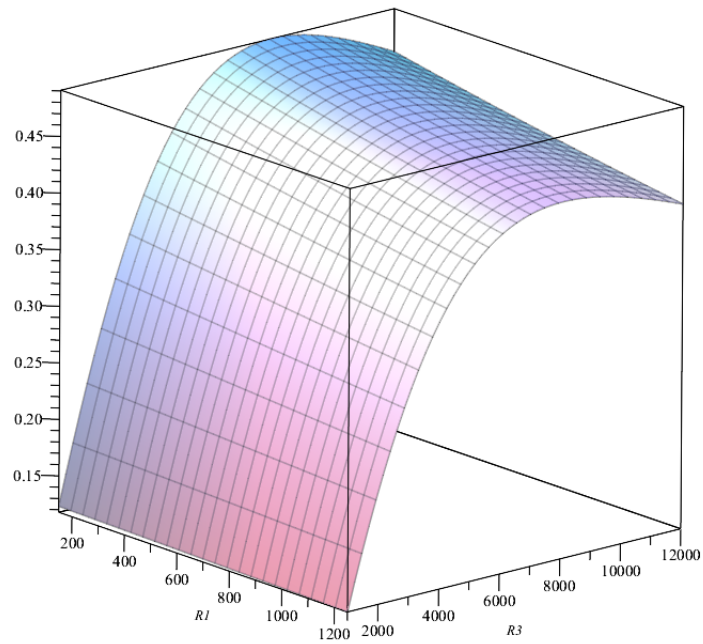


Figura 9: Sensibilidad respecto de R_3

Salida diferencial del puente

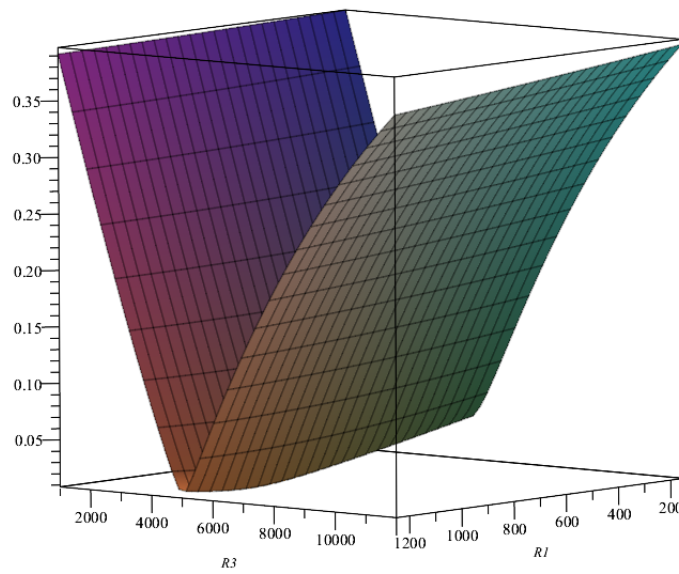


Figura 10: Salida del puente variando R_1 y R_3

Resultados

Componentes patrón

Se emplea un analizador de impedancias para medir los componentes patrón utilizados en la implementación física del circuito puente. En ambos casos se realiza la medición con una frecuencia de $f = 2kHz$, $f = 20kHz$ y $f = 200kHz$

$f[Hz]$	$R[\Omega]$	$C[F]$	D
$2kHz$	$98,68\Omega$	$955pF$	0,088
$20kHz$	$98,68\Omega$	$938pF$	0,098
$200kHz$	$98,68\Omega$	$926pF$	0,0145

Tabla 3: Componentes patrón del puente

Mediciones del puente

Se utilizan diferentes capacitores arbitrarios como elementos de prueba del proceso de medición empleando el puente diseñado. Se realizan las mediciones para las frecuencias de $f = 2kHz$, $f = 20kHz$ y $f = 200kHz$.

Valor Nominal	$f = 2kHz$			$f = 20kHz$			$f = 200kHz$		
	C	D	ϕ	C	D	ϕ	C	D	ϕ
$10nF$	$12,5nF$	0.016	$-89,05^\circ$	$9,79nF$	0.16	$-80,76^\circ$	$9,29nF$	1.64	$-31,37^\circ$
$47nF$	$43,9nF$	0.016	$-89,03^\circ$	$48,1nF$	0.087	$-85,01^\circ$	$45,5nF$	0.173	$-80,16^\circ$
$100nF$	$105nF$	0.006	$-89,62^\circ$	$105nF$	0.025	$-88,51^\circ$	$107nF$	0.256	$-75,64^\circ$
$220nF$	$107nF$	0.003	$-89,77^\circ$	$105nF$	0.033	$-88,1^\circ$	$104nF$	0.173	$-80,16^\circ$

Tabla 4: Mediciones del puente

Mediciones del analizador de impedancias

Se utiliza el analizador de impedancia para medir los mismos componentes arbitrarios que fueron medidos con el puente para realizar una apreciación de las diferencias. Se realizan las mediciones para las frecuencias de $f = 2kHz$, $f = 20kHz$ y $f = 200kHz$.

Valor Nominal	$f = 2kHz$			$f = 20kHz$			$f = 200kHz$		
	C	D	ϕ	C	D	ϕ	C	D	ϕ
$10nF$	$9,57nF$	0.856	$-49,3^\circ$	$9,57nF$	0.097	$-84,4^\circ$	$9,28nF$	0.024	$-88,58^\circ$
$47nF$	$47,3nF$	0.174	$-80,12^\circ$	$46,8nF$	0.027	$-88,45^\circ$	$46,1nF$	0.023	$-88,63^\circ$
$100nF$	$107nF$	0.507	$-63,05^\circ$	$106nF$	0.061	$-86,42^\circ$	$104nF$	0.025	$-88,59^\circ$
$220nF$	$200nF$	0.035	$-87,92^\circ$	$180nF$	0.032	$-88,13^\circ$	$162nF$	0.029	$-88,34^\circ$

Tabla 5: Mediciones del puente

Manual de usuario

En la Fig. 11 se muestra un esquema general del circuito puente diseñado en el cual se puede apreciar que las variables de ajuste son R_1 y R_3 , utilizando tanto un preset de ajuste fino como grueso para ambos casos. Se dispone de una entrada y una salida al mismo, el objetivo del proceso de medición es aplicar una señal de entrada dada y medir la salida diferencial, variando el ajuste hasta alcanzar el equilibrio en el cual $V_d = 0$. Finalmente se usan el conjunto de ecuaciones 20 para obtener los resultados.

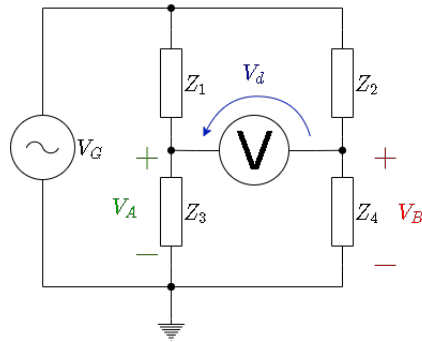


Figura 11: Esquema general del circuito diseñado

En la Fig. 12 se ilustra un esquema general de la conexión del puente. Se debe utilizar un generador de funciones o señales configurando el mismo con una senoidal de un valor de amplitud $V_G = 1V_{PP}$ con la frecuencia a la cual se desea analizar el capacitor. Finalmente, se emplea un osciloscopio para medir ambas salidas del dispositivo y utilizando la funcionalidad Math calcular la diferencia entre ellas, variando el ajuste hasta alcanzar el equilibrio del puente.

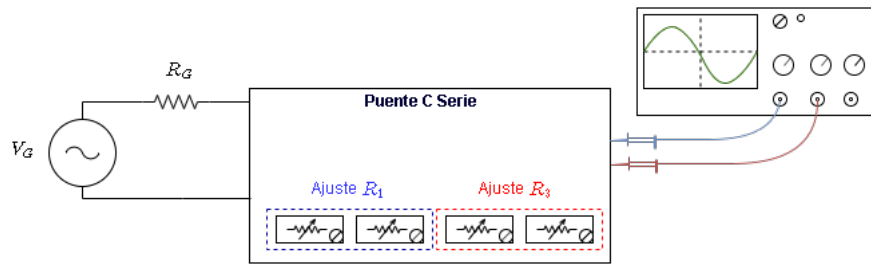


Figura 12: Esquema de conexión

Magnitud	Mín.	Óptimo	Máx.
f	$2kHz$	$20kHz$	$2kHz$
V_G	—	$1V_{PP}$	—
R_1	150Ω	—	1250Ω
R_3	$1k\Omega$	—	$12k\Omega$
C_x	$10nF$	—	$100nF$
D_x	$0,02$	—	$0,12$

Tabla 6: Especificaciones

Precisión del puente

Se calcula, tomando las mediciones realizadas con el analizador de impedancias como valor real, el error relativo porcentual cometido en las mediciones. Esto permite tener una idea de la precisión del puente y en error cometido al medir.

Se calcula el error relativo como $E_{\%Rel} = \frac{Valor_{medido} - Valor_{real}}{Valor_{real}} \cdot 100$. Al hacer este calculo para todas las mediciones realizadas se obtiene la Tabla 7

	Frecuencia (Hz)	E_{C_x}	E_{D_x}
10nF	2000	30.45 %	98.07 %
	20000	2,31 %	66,66 %
	200000	0,11 %	6511,20 %
47nF	2000	7,05 %	90,31 %
	20000	2,77 %	221,87 %
	200000	1,21 %	625,45 %
100nF	2000	1,51 %	98,70 %
	20000	0,92 %	58,04 %
	200000	2,86 %	924,01 %
220nF	2000	46,66 %	89,24 %
	20000	41,54 %	2,55 %
	200000	35,99 %	497,87 %

Tabla 7: Error relativo de C y D medidos

Conclusión

Se puede observar que en cuanto a las mediciones de capacidad a 20KHz y cumpliendo con las condiciones de diseño originales, se ajustan muy bien a lo medido con el analizador de impedancias. Se observa un error máximo de aproximadamente 3 %, que se encuentra en un rango correcto de error.

Para 2KHz y 200KHz se observa un error mayor, sin embargo las mediciones siguen dentro de un rango bajo de error en la mayoría de los casos. Se observa que el error máximo cometido en estas condiciones es del 30.45 %, pero en promedio el error es del 7.2 %.

Para valores de capacidad por fuera de los rangos de diseño se observa un error mucho mayor, que se corresponde con lo esperado.

Por último, se puede observar que las mediciones del factor de pérdidas incurre en un error muy grande. Se asume que esto se debe a un error en el diseño del puente sumado a un error de apreciación cometido al utilizar el osciloscopio para realizar las mediciones.