

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE FÍSICA



LABORATORIO 3

**Caracterización de diodos y rectificadores de
medio onda y onda completa**

Autores:

ANDREU, Gonzalo
MALPARTIDA, Bryan
PUGLIESE, Facundo

FECHA

Resumen

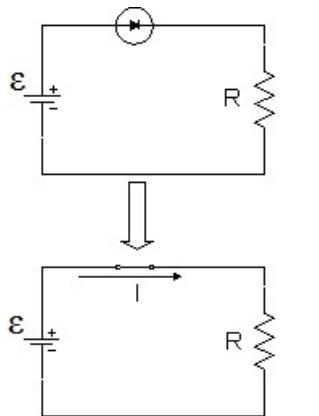
El objetivo del siguiente trabajo fue caracterizar distintos tipo de diodos: Diodos simples, Zenek y Led. Para ello se observaron sus comportamientos en un circuito cerrado que tenia en serie una resistencia y una fuente de alimentación. Y utilizando un osciloscopio se midieron la diferencia de potencial sobre la resistencia y sobre el diodo.

Por otro lado, utilizando diodos simple se construyó en primer lugar un rectificador de media-onda teniendo como fuente un generador de funciones, por lo cual se pudo medir su ripple para distintas frecuencias de una señal triangular; y luego un rectificador de onda completa utilizando una fuente de corriente alterna con una única frecuencia $f = (50,000 \pm 0,003) \text{Hz}$ por lo que de manera análoga se midieron los ripples pero en este caso para distintos valores de resistencia.

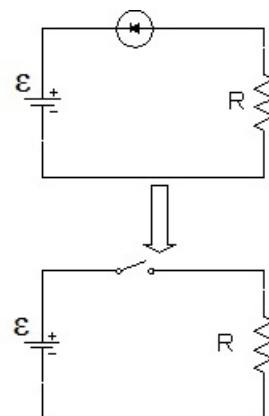
1. Introducción

1.1. El diodo

El diodo ideal es un componente que permite la circulación de corriente entre sus terminales en un determinado sentido, mientras que la bloquea en el sentido contrario. El funcionamiento del diodo ideal es el de un componente que presenta resistencia nula al paso de la corriente en un determinado sentido, y resistencia infinita en el sentido opuesto. Mediante el siguiente ejemplo mostrado en la **figura 1** se pretende mostrar el funcionamiento ideal de un diodo en circuito sencillo.



(a) Diodo ideal en polarización directa.



(b) Diodo ideal en polarización indirecta.

Figura 1: Ejemplo del funcionamiento de un diodo ideal en un circuito simple. La corriente circula en sentido horario para los dos casos.

En el circuito de **figura 1a**, el diodo permite dicha circulación, ya que la corriente entra por el ánodo, y éste se comporta como un interruptor cerrado. Debido a esto, se produce una caída de tensión en la resistencia, y se obtiene una corriente. En el de la **figura 1b**, en cambio, el diodo impide el paso de corriente, comportándose como un interruptor abierto, y la caída de tensión en la resistencia es nula.

Un diodo consta de dos zonas hechas de materiales semiconductores con características opuestas. Una zona tiene un exceso de *huecos*, mientras que la otra dispone de electrones en exceso, pero aun así, en cada zona la carga total es neutra. En el momento mismo de crear dos zonas de diferente concentración de portadores, entra en juego el mecanismo de la difusión. La distribución de cargas formada en la región de la unión provoca un campo eléctrico desde la zona N a la zona P que se opone al movimiento de portadores y que va creciendo conforme pasan más cargas a la zona opuesta hasta que se llega a un equilibrio. En ese momento está ya formado el diodo de unión PN ilustrado en la **figura 2**, y como resultado del proceso se ha obtenido una zona P y una zona N, ambas semiconductoras, y una zona de agotamiento (deplección) que es no conductora. En ella actúa un campo eléctrico, o bien entre los extremos actúa una barrera de potencial.

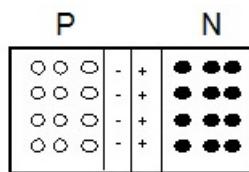


Figura 2: Ilustración de diodo de unión PN

El bloque PN en principio no permite el establecimiento de una corriente eléctrica entre sus terminales puesto que la zona de deplección no es conductora. Sin embargo, si se aplica una tensión positiva en el ánodo mayor que la de la barrera, desaparecerá la zona de deplección y el dispositivo conduce de forma que en una primera aproximación respeta la siguiente ecuación:

$$\Delta V_D = I \cdot R_D \quad (1)$$

Por el contrario, al aplicar una tensión positiva a la zona N y negativa a la zona P, se retiran portadores mayoritarios próximos a la unión. Estos portadores son atraídos hacia los contactos aumentando la anchura de la zona de agotamiento, lo cual hace que la corriente debido a los portadores mayoritarios sea nula. Ahora bien, en ambas zonas hay portadores minoritarios que son atraídos hacia la unión creando una corriente inversa, aunque muy inferior que la obtenida en polarización directa. Al aumentar la tensión inversa, llega un momento en que se produce la ruptura de la zona de deplección, al igual que sucede en un material aislante: el campo eléctrico puede ser tan elevado que arranque electrones que forman los enlaces covalentes, originando un proceso de rotura por avalancha y generando una corriente que respeta la ecuación (1) pero con una resistencia mayor.

2. Desarrollo experimental

Durante esta experiencia se utilizó un generador de funciones de emitir frecuencias con un error relativo del 0,01 % en un rango entre $1\mu\text{Hz}$ y 5MHz cuyo voltaje pico-pico tiene un error relativo del 1 % para el rango de voltaje utilizado ($2\text{V} - 20\text{V}$). Además, se utilizó una capacitancia y una resistencia, ambas variables por décadas cuyo error fue a priori desconocido. Usando un multímetro digital se midieron los valores configurados en cada instrumento junto con su error que, para las resistencias, era de la forma $\pm(1\% + 2d)$ en el rango utilizado (mayor a 100Ω), y para las capacitancias, $\pm(4\% + 3d)$. La resistencia del capacitor resultó despreciable.

Se utilizó un osciloscopio digital, con dos canales de entrada, capaz de medir diferencias de potencial entre las dos terminales que dispone en un rango de 2mV a 5V con un error relativo del 3 %. A la hora de medir voltaje, fue necesario asegurarse que el cable a tierra del osciloscopio estuviera conectado al cable a tierra el generador de funciones.

Tambien se utilizo una fuente flotante sin descarga a tierra que producia una señal sinusoidal de la forma $\epsilon = E_0 \cos(2\pi F t)$, y que tenia una frecuencia fija que fue medida con el osciloscopio y resulto tener un valor $F = (50 \pm 0,003)\text{hz}$

2.1. Caracterización de Instrumentos

Para construir rectificadores de señal, fue necesario caracterizar los diodos a utilizar. Para esto se diseñó un circuito que constaba de una resistencia $R = (600 \pm 6)\Omega$, un generador de funciones y de un diodo conectados en serie, y que fue utilizado para estudiar la respuesta del diodo frente a distintos voltajes. Cabe destacar, que en un primer caso se utilizo un diodo simple, y posteriormente se reemplazó por un Zenek y despues por un LED. Ademas, previo a la construcción del circuito, se utilizó el multímetro para asegurar la continuidad de los cables a utilizar.

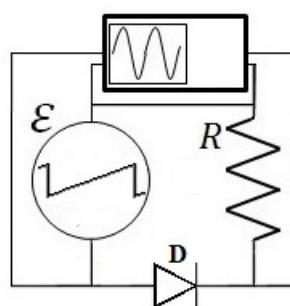


Figura 3: Circuito que consta de una fuente de voltaje que varia en el tiempo de forma lineal, una resistencia R y un diodo D . Conectado a la resistencia y a la fuente se encuentra un osciloscopio

Para realizar las mediciones correspondientes, se conectó el osciloscopio en paralelo con la resistencia para medir la corriente circulante y mediante a una ficha T se conectó a la fuente para medir

el voltaje de entrada, con el fin de utilizar la frecuencia de esa señal como *trigger externo* y, ademas, para medir la caída de potencial en el diodo a partir de la diferencia entre la tensión entregada por el generador y la medida sobre la resistencia. Se configuro el generador de funciones para que generara una onda triangular con una frecuencia $F = (50 \pm 0,005)\text{hz}$ y con una amplitud pico-pico de $(16 \pm 0,2)\text{V}$, que se dispuso de esa forma para que, en el caso del Zenek, se pudiera apreciar el efecto avalancha, y se configuró el osciloscopio para que midiera sobre medio periodo de la oscilación. De esta forma, el osciloscopio obtenía datos correspondientes a 2500 valores distintos de voltaje distribuidos uniformemente en el intervalo $[-8\text{V}; 8\text{V}]$ que, mediante un programa de adquisición de datos, eran importados a una computadora para su posteriormente análisis. Este proceso fue el mismo para los tres diodos utilizados.

2.2. Rectificadores de Corriente

Una vez terminada la caracterización de los diodos, se procedió a construir rectificadores de corriente. Para cada uno de estos, se exploraron los parámetros para ver en que punto se podía obtener una corriente continua.

2.2.1. Rectificador de media onda

En primer lugar, se construyó un rectificador de media onda utilizando un generador de funciones como fuente sinusoidal, un diodo simple, una resistencia $R = (5,00 \pm 0,05)\text{k}\Omega$ y un capacitor $C = (9,81 \pm 0,07)\mu\text{F}$ conectado en paralelo a la resistencia como se ilustra en la **Figura 4**. De manera análoga al método utilizado para caracterizar los diodos, se conectó un canal del osciloscopio en paralelo a la resistencia, para medir la corriente circulante; y el otro en paralelo a la fuente. Y, ademas, se aseguró la continuidad de los cables y que esta no se viera comprometida con movimientos aleatorios utilizando el multímetro.

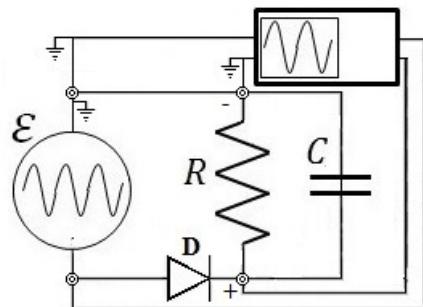


Figura 4: Circuito sobre el cual se midio el ripple de la corriente de salida para distintas frecuencias, consta de un diodo simple D, una resistencia R y una capacitancia C que no fueron modificados durante el experimento.

Para medir el ripple de la corriente de salida, se configuró el osciloscopio para que eliminara la componente continua de la señal y midiera la amplitud pico-pico. Fijada una frecuencia en el generador de funciones, se registraba la amplitud marcada por el osciloscopio y se consideró un error para cada medición lo suficientemente grande como para que contuviera las fluctuaciones de ese valor en pantalla además del error instrumental descrito anteriormente. El proceso se iteró con distintas frecuencias. Ademas, como método alternativo de medición, se importaron los datos del osciloscopio a la computadora con y sin la componente continua de la señal por medio de un programa de adquisición de datos para un posterior análisis estadístico.

2.2.2. Rectificador de onda completa

En este caso se intentó diseñar un rectificador de onda completa, para esto se construyó un circuito que constaba de cuatro diodos simples idénticos, una resistencia variable por décadas y una fuente de voltaje sinusoidal dispuestos como se muestra en la **Figura 5**. Previo a la construcción se observó que los cables no tuvieran discontinuidades. Cabe aclarar que durante esta experiencia no se

utilizó el generador de funciones como fuente ya que, como los canales de salida del mismo tenían descarga a tierra, al igual que los del osciloscopio, sería necesario conectarlos a una misma terminal, pero como se puede ver en la **Figura 5** eso no era posible, por lo cual se utilizó una fuente flotante.

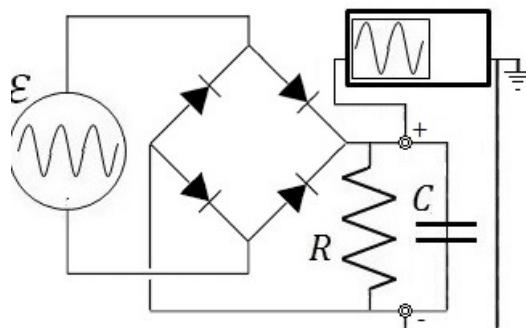


Figura 5: Circuito que consta de una fuente de voltaje que varía en el tiempo de forma lineal, una resistencia R y un diodo D. Conectado a la resistencia y a la fuente se encuentra un osciloscopio

Al no disponer de una fuente de frecuencia variable, debió variarse la resistencia, la cual es proporcional al tiempo de carga del capacitor. Esto permite reducir la carga que un capacitor adquiere en un período de la señal y, por lo tanto, es equivalente a aumentar la frecuencia.

Para medir el ripple de la corriente de salida se realizó el mismo proceso que para el rectificador de media onda, pero no se utilizó el método alternativo. Cabe destacar, que durante las mediciones se pudo observar que los movimientos del aire producidos por un ventilador de la sala e incluso ruidos cercanos provocaban un efecto microfónico que interfería con las mediciones, por lo cual se intentó mantener silencio en ese momento y se evitó medir en los momentos con viento.

3. Resultados

3.1. Caracterización de Instrumentos

A la hora de caracterizar los instrumentos, como se dijo, se relevaron las curvas $V_f(t)$ y $V_R(t)$. Usando las leyes de Kirchoff, se obtuvo la caída de potencial en el diodo $V_D(t) = V_e(t) - V_R(t)$ y la corriente $I(t) = \frac{V_R(t)}{R}$ con $R = (600 \pm 6)\Omega$. Para el diodo simple, la relación entre V_D e I puede verse en la **Figura 6**.

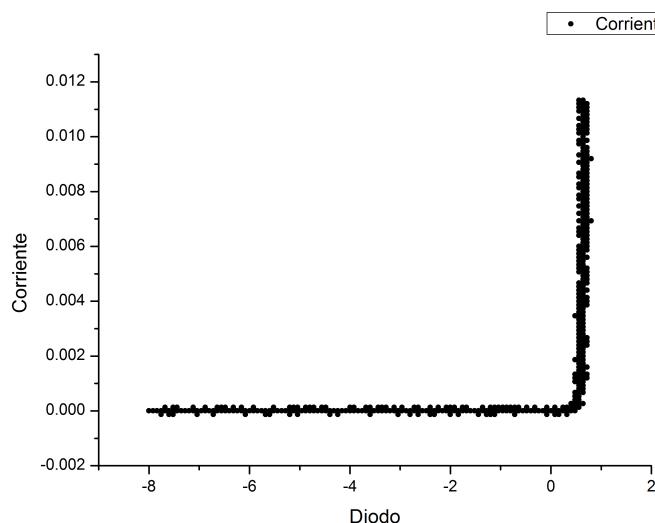


Figura 6: Gráfico inicial con la relación entre V_D e I para un diodo simple obtenida indirectamente donde puede verse la gran dispersión de la curva

Claramente, la curva de la **Figura 6** posee una enorme cantidad de puntos muy cercanos al punto de resultar indistinguibles. Debido a esto, se buscó suavizar la señal con menos puntos con un método simple. Primero, se configuró un parámetro de tolerancia CT como error y se promediaron los valores de todas las corrientes $I(V_D)$ cuyos V_D fueran indistinguibles dentro de este error CT . Estos CT se tomaron de forma tal que la cantidad de puntos fuera menor que el que permitiría el error relativo del 3% que dispone el instrumento aplicado sobre el valor máximo voltaje (en módulo) en cada tira de valores V_D . De esta forma, múltiples puntos con V_D cercanos fueron condensados en un único punto, permitiendo que la curva sea más clara como puede verse en la **Figura 7**. Un ajuste lineal de $R-Square = 0,97052$ asegura la bondad del ajuste con una pendiente $m_s = (0,02557 \pm 0,0018)\Omega^{-1}$ tal que $\frac{1}{m_s} = (39 \pm 3)\Omega = R_s$ resulta la resistencia del diodo simple.

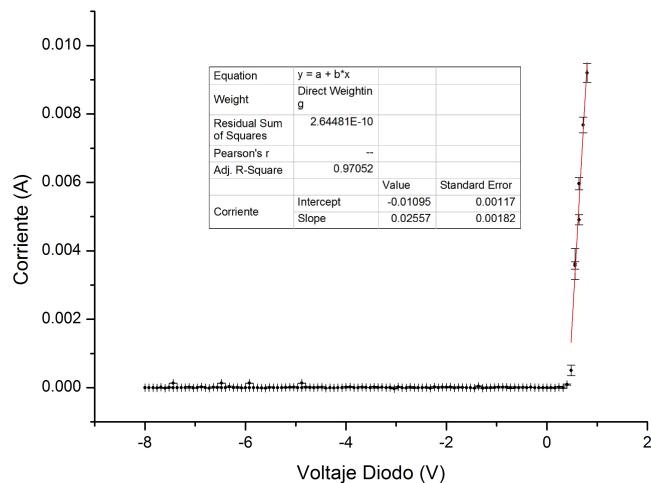


Figura 7: Gráfico con la relación entre V_D e I tras aplicar un análisis más fino para un diodo simple. El ajuste lineal en los últimos puntos asegura la linealidad del diodo para altos voltajes.

El proceso anterior debió aplicarse también a los resultados obtenidos para el diodo Zenk y el diodo LED. En el caso particular del Zenk, la tolerancia se tomó como $CT = 3,2E - 6$ y en base al resultado fue posible apreciar el efecto avalancha como puede verse en la **Figura 8**.

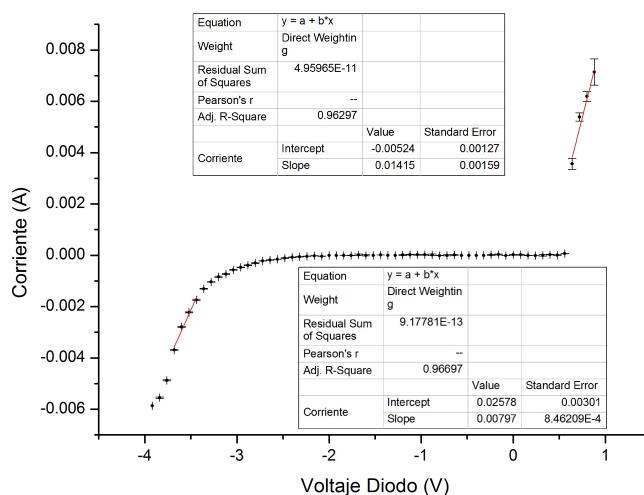


Figura 8: Gráfico con la relación entre V_D e I para un diodo Zenk tras aplicar un análisis más fino. Los ajustes lineales en los últimos puntos y en los primeros puntos aseguran la linealidad del diodo a partir de determinados voltajes.

El ajuste de los primeros puntos referentes al efecto *avalancha* arroja un $R - Square = 0,96697$ que asegura la bondad del ajuste con una pendiente $m_I^{(z)} = (0,0080 \pm 0,0008)\Omega^{-1}$ tal que la resistencia del diodo a resulta $R_I^{(z)} = (125 \pm 13)\Omega$. Para los puntos finales, el ajuste arroja un $R - Square = 0,96297$ con una pendiente $m_D^{(z)} = (0,0142 \pm 0,0016)\Omega^{-1}$ tal que la resistencia para corriente en directa resulta $R_D^{(z)} = (70 \pm 8)\Omega$.

Finalmente, para el caso del diodo LED la tolerancia se tomó como $CT = 6,4E - 7$, arrojando el gráfico de la **Figura 9**. El ajuste lineal de los ultimos puntos arroja un $R_{Square} = 0,93178$ con una pendiente $m_L = (0,023 \pm 0,003)$ que resulta en una resistencia para corriente directa $R_L = (43 \pm 6)$

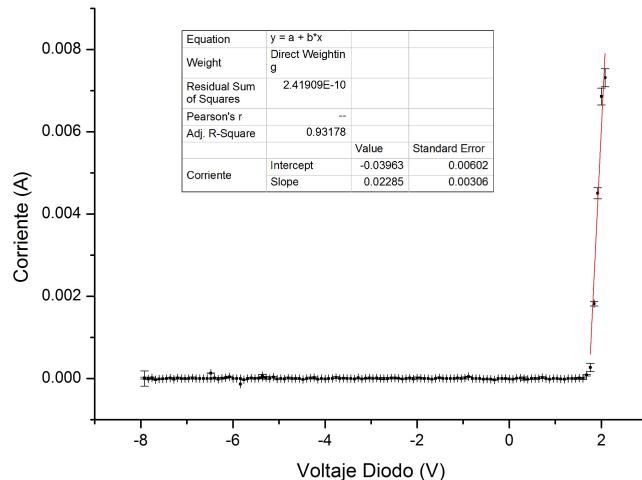
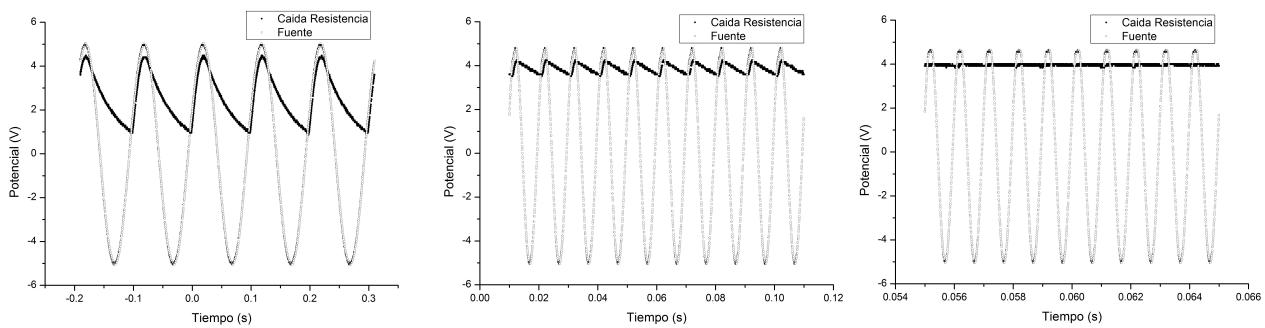


Figura 9: Grafico con la relacion entre V_D e I para un diodo LED tras aplicar un analisis mas fino. El ajuste lineal en los ultimos puntos permite asumir un comportamiento lineal para altos voltajes.

3.2. Rectificadores de Corriente

3.2.1. Rectificador de media onda

Para cada frecuencia utilizada, se importaron ambas curvas como se dijo previamente. Algunos de los graficos obtenidos sin despreciar la componente continua pueden verse en la **Figura 10**, donde pueden verse los dos casos extremos de rectificación y un caso intermedio. Como puede verse, a medida que las frecuencias crecían, el ripple disminuía pero la componente continua se mantenía constante, por lo que las mediciones de los picos en este tipo de graficos acarrearían un enorme error.



(a) Frecuencia de $(10,000 \pm 0,001)Hz$ (b) Frecuencia de $(100,00 \pm 0,01)Hz$ (c) Frecuencia de $(1000,0 \pm 0,1)Hz$

Figura 10: Voltaje de entrada y de salida para tres frecuencias caracteristicas que representan los casos extremos e intermedio de la rectificación de señales.

Por eso, se decidió utilizar los datos cuya componente continua había sido eliminada para hacer un análisis de los picos y así obtener un promedio de máximos y otro de mínimos que, restándose, permitían obtener el ripple para esa frecuencia. Estos valores junto con los proporcionados directamente por el osciloscopio pueden verse en la **Figura 11**, donde claramente puede verse que la mayor parte de los puntos resultan indistinguibles, pues coinciden dentro del error. Esto es realmente así para todos los valores con excepción de los ripples para $F = (50,000 \pm 0,005)Hz$, donde el ripple obtenido a través del osciloscopio es el doble que el obtenido restando los picos.

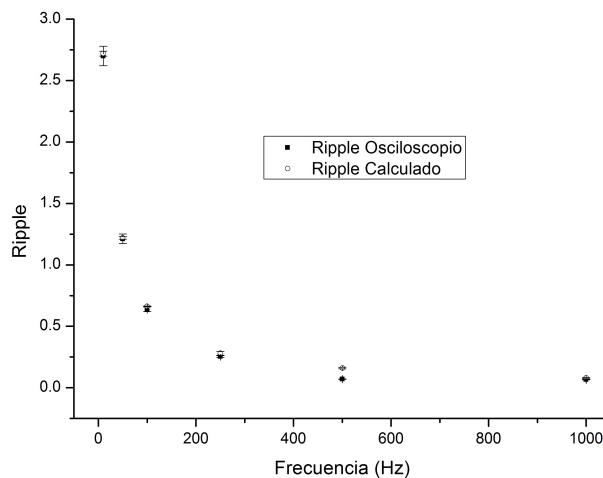
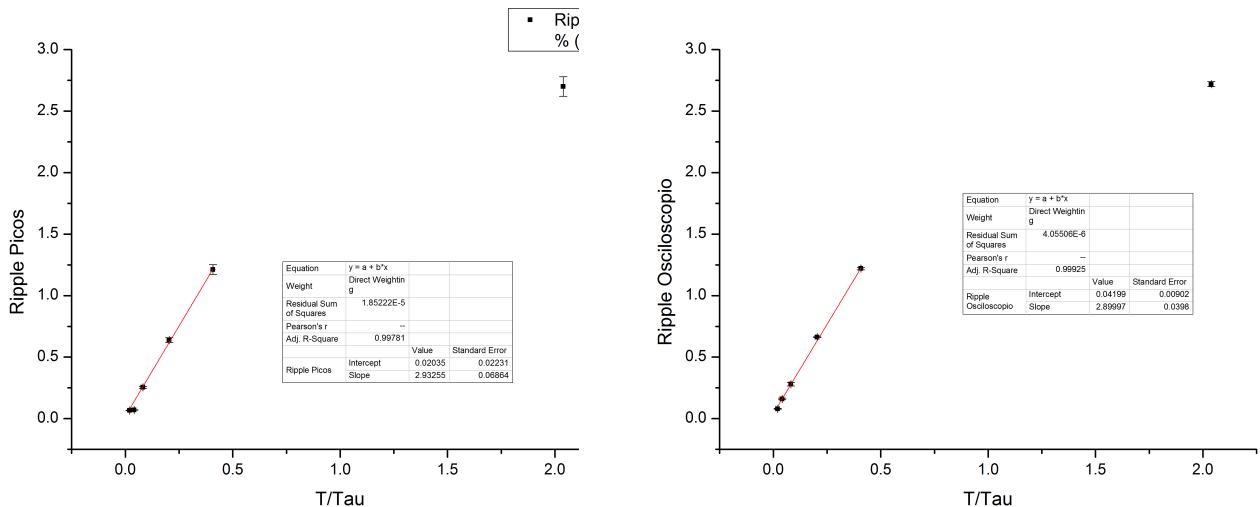


Figura 11: Relación de los ripples medidos directamente del osciloscopio y los calculados restando picos. Puede verse una superposición dentro del error de la mayor parte de los puntos

Sin embargo, como se dijo, lo que importa es la relación entre el período $T = F^{-1}$ de la señal y el período $\tau = RC = (49,1 \pm 0,8)ms$, por lo que si graficamos las relaciones anteriores en función de $\frac{T}{\tau}$ en lugar de F , obtenemos los graficos de la **Figura 12**.



(a) Relación entre $\frac{T}{\tau}$ y las mediciones de ripple obtenidas (b) Relación entre $\frac{T}{\tau}$ y las mediciones de ripple obtenidas a promediando picos.

Figura 12: Ripples en función de $\frac{T}{\tau}$. El ajuste lineal es confiable para los primeros 4 puntos solamente en ambos casos

El ajuste lineal de **Figura 12a** arroja un $R_{Square} = 0,99781$ con una pendiente $m_p = (2,93 \pm 0,07)V$ y ordenada $b_p = (0,02 \pm 0,02)V$ mientras que el de la **Figura 12b** arroja un $R_{Square} = 0,99925$ con una pendiente $m_o = (2,90 \pm 0,04)V$ y ordenada $b_o = (0,042 \pm 0,009)V$. Tanto las pendientes como las ordenadas resultan indistinguibles dentro del error.

3.2.2. Rectificador de onda completa

Para esta sección, el análisis fue mucho más veloz tras haber concluído que los valores arrojados por el osciloscopio resultaban indistinguibles de los arrojados por el análisis, por lo que no era necesario el esfuerzo adicional. Los ripples obtenidos a través del osciloscopio para las distintas resistencias pueden verse en la **Figura 13**.

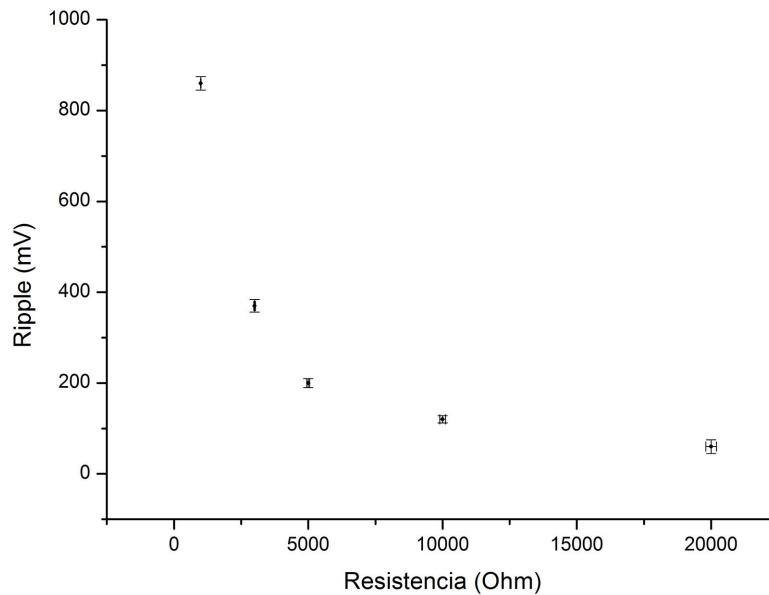


Figura 13: Relación de los ripples medidos directamente del osciloscopio y la resistencia utilizada.

Nuevamente, se graficaron los ripples en función de $\frac{T}{\tau}$ donde $T = (20,000 \pm 0,002)ms$ y nuevamente $\tau = RC$, obteniendo el gráfico de la **Figura 14**. El ajuste lineal arroja un $R - Square = 0,98897$ que asegura la bondad del ajuste junto con una pendiente $m = (0,41 \pm 0,02)V$ y una ordenada $b = (0,04 \pm 0,02)V$.

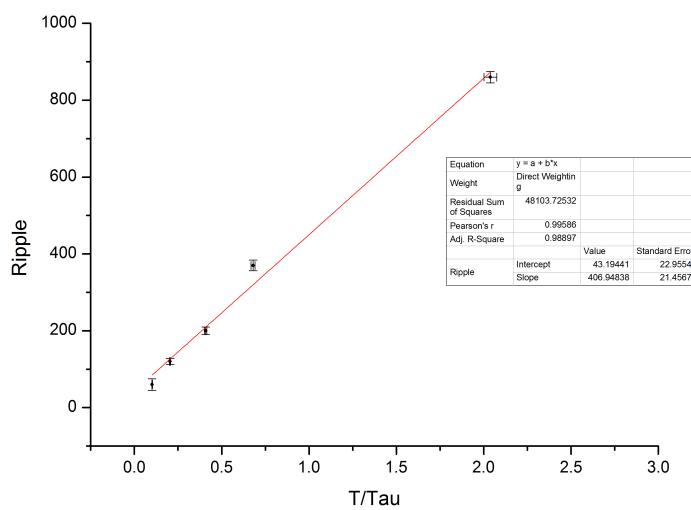


Figura 14: Relación de los ripples medidos y $\frac{T}{\tau}$. El ajuste lineal es preciso para todo el rango de valores manejado

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos durante la caracterización de diodos, aunque sean consistentes con lo esperado, no resultan confiables debido a que los coeficientes $R - Square$ no son tan cercanos a 1. En particular, al no conocer los parámetros realmente los parámetros para caracterizar los diodos no hubo oportunidad de contrastar los resultados. El principal motivo de desconfianza es que los coeficientes $R - Square$ resultan bajos en todos los ajustes aun cuando la cantidad de puntos ajustados es relativamente pequeña (entre 4 y 7 puntos). Esto puede deberse a que el método utilizado a la hora de analizar los datos en un intento por reducir las fluctuaciones de las curvas iniciales (como puede verse en la **figura 6**) no fue suficiente o correcto, quizás debido al criterio utilizado para fijar los CT . En definitiva, aunque el método utilizado fue muy veloz y sencillo a la hora de realizar las mediciones, acarreo una gran cantidad de problemas a la hora de analizar los datos. No obstante, pudieron verse y comprobarse con cierta confiabilidad que los diodos evitan el paso de corriente hasta llegar a un voltaje límite, a partir del cual actua en forma similar a una resistencia. Para el caso particular del Zenek pudo observarse el efecto avalancha para corriente en inversa.

Respecto a los rectificadores, la comprobación de que los valores arrojados por el osciloscopio y los obtenidos mediante análisis de picos son indistinguibles no es un dato menor, aunque sea esperable. Principalmente esto significa que la forma de operar del osciloscopio debe ser igual o mejor que el análisis de picos realizados a pesar de hacerlo en el momento. Concentrando más en el rectificador en si, se pudo comprobar que la magnitud importante a la hora de rectificar la señal es la relación entre el período de la señal y el período de carga del capacitor gracias a las **Figuras 12 y 14**. En particular, se pudo comprobar una cierta linealidad para valores de $\frac{T}{\tau}$ bajos (menores a 1) con los Ripples en un rectificador de media onda gracias a los ajustes realizados sobre **Figura 12a y 12b** arroja un par de $R_{Square} = 0,99781$ y $R_{Square} = 0,99925$ con pendientes indistinguibles $m_p = (2,93 \pm 0,07)V$ y $m_o = (2,90 \pm 0,04)V$, respectivamente. Esto comprueba con bastante confiabilidad la linealidad de la relación. Para el rectificador de onda completa, la linealidad pudo verse en todos los valores de $\frac{T}{\tau}$ medidos gracias al ajuste sobre la **Figura 14** que arrojó un $R - Square = 0,98897$, por lo que a priori podría suponerse que en el rectificador de onda completa la relación es aproximadamente lineal para valores de $\frac{T}{\tau}$ mayores que en el de media onda. Sin embargo, cabe aclarar que se desconoce el significado de estas pendientes o la relación que puedan tener con los parámetros.

5. Referencias

- [1] Frank S. Crawford, *Berkeley physics course 3: Ondas*, 1994, Editorial Reverte S.A.