

Informe 4: Elementos No Lineales

Facundo Otero Zappa, Sergio Stedile y Luis Diaz (Grupo 8)

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires

Licenciatura en Ciencias Físicas | Laboratorio 3, Verano 2023 | Mar./Vié. de 14:00 a 20:00 hs.

facuotero20.88@outlook.com , sergiogstedile@gmail.com , luis_diaz1997@hotmail.com

Resumen

En este trabajo, estudiamos elementos no lineales: una lámpara incandescente y tres tipos de diodos, un diodo común, un diodo rápido y un diodo Zener. Estudiamos sus curvas $I - V$, la velocidad de conmutación de los diodos, sus valores de tensión umbral y corriente de fuga así como tensión de ruptura para el caso del diodo Zener. Luego, estudiamos cuantitativamente un microcontrolador Arduino al realizar las curvas $I - V$ y compararlas con las mediciones efectuadas con el osciloscopio. Por último, estudiamos la carga y descarga de un capacitor con este microcontrolador.

I. INTRODUCCIÓN

En un circuito eléctrico, un elemento no lineal es un componente eléctrico cuya caída de potencial entre sus extremos y la corriente que circula por él, no siguen una relación de proporcionalidad directa [1]. Los hay de varios tipos, y tienen diversas aplicaciones en circuitos eléctricos y en electrónica.

Una lámpara incandescente, es un elemento no lineal debido a que la resistencia de su filamento depende de la temperatura, y ésta depende, entre otras cosas, de la corriente que circule por ella, por lo que no satisface la ley de Ohm [2]. En estas condiciones podemos afirmar entonces como primera aproximación, que la caída de tensión ΔV entre sus extremos será de la forma [1]:

$$\Delta V = R(I)I, \quad (1)$$

donde $R(I)$ representa a la resistencia que dependerá de la corriente I circulante.

Una forma posible de observar esta relación es mediante la linealidad de la curva de la corriente con respecto al voltaje $I - V$ de la lámpara. Para elementos no lineales, una magnitud que resulta de interés estudiar es la *resistencia dinámica* R_D , que representa la inversa de la pendiente de la curva $I - V$ y se define como [1]:

$$R_D = \frac{d\Delta V}{dI}. \quad (2)$$

Otro elemento no lineal utilizado ampliamente son los *diodos*. Un diodo es un componente eléctrico construido mediante un material semiconductor que permite la circulación de corriente en un único sentido empleando un ánodo y un cátodo. Se dice que el diodo se encuentra en polarización directa cuando la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo que lo componen es positiva, y en polarización inversa cuando es negativa.

En esta ocasión, estudiamos para distintos diodos la curva $I - V$ entre sus terminales, que sabemos sigue una forma funcional que es aproximadamente de la forma [1]:

$$I \simeq I_0 \left(e^{\frac{V_{AC}}{V_T}} - 1 \right), \quad (3)$$

donde I_0 es una constante que depende del diodo utilizado y es del orden de los nA o menor, V_{AC} representa la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo, y $V_T \simeq 26$ mV.

Con respecto a los diodos, otro parámetro de estudio interesante es la *velocidad de conmutación*, que representa la velocidad con la que puede pasar del estado de no conducción de corriente al de conducción o viceversa. Esta velocidad no sigue una forma funcional determinada, pero sabiendo que su valor es no nulo, puede observarse experimentalmente el tiempo de respuesta entre estados de conducción. Llamamos τ al 90 % del tiempo de respuesta del diodo desde un pico de tensión hasta el estancamiento de la señal.

II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En esta sección explicaremos las prácticas experimentales realizadas, el instrumental utilizado y las incertezas de nuestras mediciones.

A. Lámpara Incandescente

En primer lugar, en este trabajo estudiamos la linealidad de una lámpara incandescente. Para ello utilizamos un diagrama de conexión como el de la Fig. 1.

Utilizamos una fuente de alimentación E de corriente continua marca Hantek PPS2320A 13BZ0009 [3] para enviar distintos valores de tensión hacia un multímetro Protek digital 506 en modo amperímetro A , que contaba con una resistencia interna R_A . En serie con el amperímetro conectamos una lámpara incandescente L de 14 V que cerraba el circuito y en paralelo con ésta conectamos otro multímetro Protek 506 en modo voltímetro V en los terminales A y B.

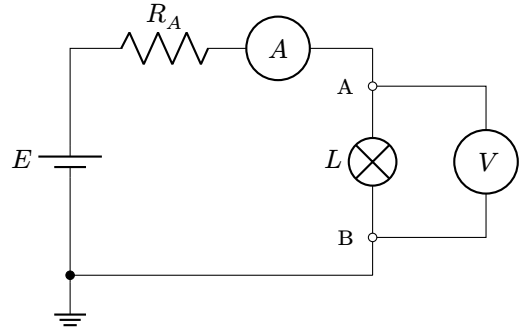


Figura 1: Medición de la curva $I - V$ para una lámpara incandescente. Una fuente E alimenta a un amperímetro A con una resistencia interna R_A y a una lámpara conectados en serie. Un voltímetro se encuentra en paralelo con la lámpara en las terminales A y B.

Mediante este esquema experimental pudimos medir la corriente que circulaba por el circuito con el amperímetro y la caída de tensión sobre la lámpara con el voltímetro, tanto para trazar la curva $I - V$ y realizar un ajuste lineal como para estudiar la resistencia dinámica R_D de la lámpara. En total realizamos 12 mediciones simultáneas de corriente y caída de tensión sobre la lámpara, comenzando desde los $V = (2.00 \pm 0.01) \text{ V}$ hasta los $V = (14.00 \pm 0.07) \text{ V}$ en intervalos de 1 V.

B. Diodos

En segundo lugar, estudiamos las curvas $I - V$ de distintos diodos. Para ello utilizamos un diagrama de conexión como el de la Fig. 2.

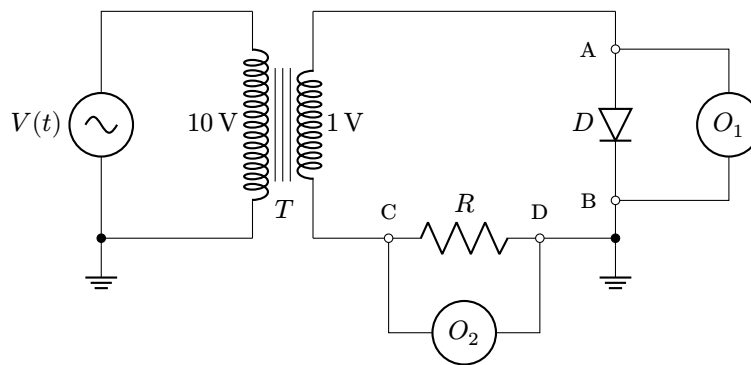


Figura 2: Medición de la curva $I - V$ de un diodo. Un generador de funciones $V(t)$ alimenta con una onda sinusoidal a un transformador T con una diferencia de tensión entre bobinados de 10 a 1 V. El bobinado de menor tensión se encuentra en serie con un diodo D y una resistencia R . En paralelo con el diodo, y en paralelo con la resistencia, se encuentra conectado un osciloscopio mediante los canales uno O_1 y dos O_2 , en las terminales A y B, y C y D, respectivamente, compartiendo las tierras en el ramal BD.

Utilizamos un generador de funciones Tektronix AFG1022 [4] para enviar una onda sinusoidal de $V(t) = (10.0 \pm 0.1) \text{ V}$ de tensión con una frecuencia de $f = (500.0 \pm 0.3) \text{ Hz}$ hacia un transformador T con una relación de 10 a 1 V. En serie con el bobinado secundario conectamos un diodo común D modelo 1N4007 en polarización directa y una resistencia variable en caja R con un rango de $(1.0 \pm 0.1) \Omega$ hasta $(10.00 \pm 0.01) \text{ k}\Omega$ que utilizamos como fija en un valor de $R = (2.00 \pm 0.06) \text{ k}\Omega$. En paralelo con el diodo y en paralelo con la resistencia conectamos dos canales de un osciloscopio marca Tektronix TBS1000B-EDU [5] en las terminales A y B, y C y D, respectivamente, compartiendo las tierras en el ramal BD, como puede observarse en la Fig. 2.

Mediante este esquema de conexión registramos las mediciones obtenidas por ambos canales del osciloscopio y pudimos estudiar las curvas de corriente en función de la tensión. Luego repetimos esta experiencia cambiando el diodo común por un diodo rápido modelo 1N4148 y por un diodo Zener modelo 30B2.

Cabe mencionar que, con el diodo Zener invertimos la posición del transformador de forma que el voltaje enviado por el generador de funciones aumentase en un factor de 10 V, por lo que enviamos en dicha ocasión una onda sinusoidal de $V(t) = (1.0 \pm 0.2) \text{ V}$.

C. Velocidad De Conmutación

En tercer lugar, en este trabajo estudiamos la velocidad de conmutación de distintos diodos (común modelo 1N4007 y rápido modelo 1N4148). Para ello, utilizamos un diagrama de conexión como el de la Fig. 3.

En esta ocasión, utilizamos el mismo generador de funciones, el mismo osciloscopio y la misma resistencia empleados en la experiencia del diodo, con la diferencia de que enviamos una onda cuadrada con una tensión pico a pico de $V(t) = (3.0 \pm 0.2) \text{ V}$ y una frecuencia de $f = (50.0 \pm 0.1) \text{ Hz}$ a la resistencia R conectada en serie con el diodo, cerrando el circuito. En paralelo con el diodo conectamos al osciloscopio en las terminales A y B compartiendo la tierra del circuito en el ramal B.

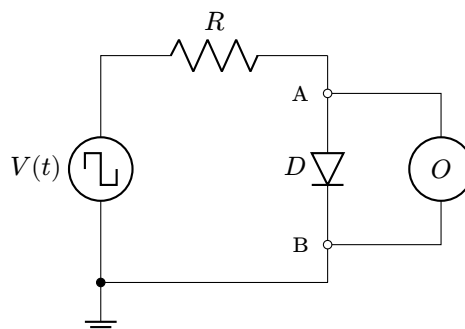


Figura 3: Medición de la velocidad de conmutación de un diodo. Un generador de funciones $V(t)$ alimenta con una onda cuadrada a una resistencia de seguridad R y a un diodo D conectados en serie. En paralelo con éste último, se encuentra un osciloscopio O en las terminales A y B compartiendo la tierra del circuito.

Con los datos obtenidos en esta experiencia pudimos estudiar el tiempo de respuesta tanto de subida como de bajada del diodo común y del diodo rápido.

D. Microcontrolador Arduino Uno

Luego, en este trabajo estudiamos las curvas $I - V$ del diodo común modelo 1N4007 utilizado anteriormente, pero empleando en esta ocasión un microcontrolador Arduino Uno R3. Para ello utilizamos un diagrama de conexión como el de la Fig. 4.

Alimentando al Arduino mediante una computadora a través de un puerto USB, lo utilizamos como fuente de alimentación. Conectamos su puerto de 5 V a la misma resistencia variable en caja R_V empleada en las experiencias anteriores, pero utilizando en esta ocasión sus tres terminales para simular un voltaje variable. Uno de los terminales de la resistencia variable se encontraba directo a la tierra del Arduino GND y otro en serie con un diodo D y una resistencia R antes de llegar a tierra, cuyas conexiones realizamos en un protoboard. Utilizamos una resistencia fija de cerámica con un valor de $R = (22 \pm 1) \Omega$. Mediante los terminales A0 y A1, y A1 y A2, medimos con la interfaz Arduino las caídas de tensión para el diodo y la resistencia fija, respectivamente.

Mediante este esquema de conexión pudimos trazar con un software de computadora Arduino [6] la curva $I - V$ del diodo y estudiamos distinto tiempo de retardo del loop del programa, que representaba el tiempo de espera del programa para ejecutar los comandos asignados nuevamente, entre medición y medición.

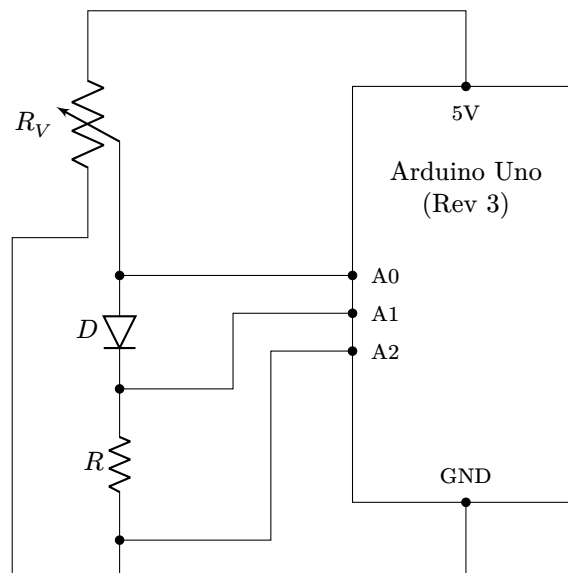


Figura 4: Medición de la curva $I - V$ de un diodo común 1N4007 con un microcontrolador Arduino Uno R3. El puerto de 5 V del arduino se encontraba en serie con una resistencia variable R_V divisora de tensión. Uno de sus puertos se encontraba a tierra GND y el otro en serie con un diodo D y una resistencia fija R antes de llegar a tierra. Mediante los puertos A0 y A1, y A1 y A2 del arduino se registró la caída de tensión sobre el diodo y la resistencia, respectivamente.

E. Carga Y Descarga De Un Capacitor

Por último, en este trabajo medimos la carga y descarga de un capacitor empleando el microcontrolador Arduino de la experiencia anterior. Para ello utilizamos un diagrama de conexión como el de la Fig. 5.

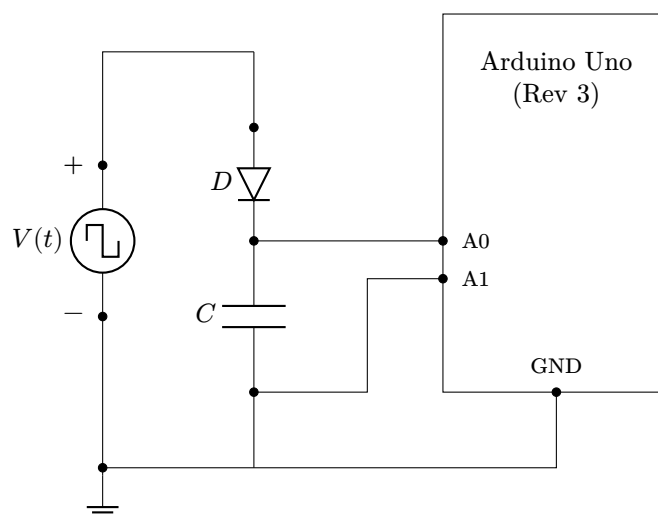


Figura 5: Medición de la carga y descarga de un capacitor. Un generador de funciones $V(t)$ enviaba ondas cuadradas a un diodo D y a un capacitor C conectados en serie cerrando el circuito. El microcontrolador arduino medía la caída de tensión sobre el capacitor mediante las terminales A0 y A1 y se encontraba a tierra GND compartiendo la tierra del circuito.

Mediante el generador de funciones $V(t)$ utilizado anteriormente, enviamos en esta ocasión ondas cuadradas de distintas frecuencias con una tensión de $V(t) = (4.0 \pm 0.3) \text{ V}$ al diodo común D utilizado anteriormente y a un capacitor C conectados en serie en una placa protoboard cerrando el circuito. El microcontrolador Arduino registraba la caída de tensión sobre el capacitor en las terminales A0 y A1, y se encontraba conectado a la tierra del circuito mediante el puerto GND.

Estudiamos la caída de tensión sobre un capacitor en caja con un valor de $C = (1.0 \pm 0.1) \mu\text{F}$ y con la orientación del diodo en polarización directa e inversa, respectivamente. Con este esquema de conexión estudiamos la carga y descarga del capacitor y realizamos un barrido de frecuencias de prueba menores a 1 Hz, finalmente utilizamos una frecuencia de $f = (50.0 \pm 0.1) \text{ mHz}$ y $f = (30.0 \pm 0.1) \text{ mHz}$ para el diodo en polarización directa e inversa, respectivamente.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Lámpara Incandescente

En primer lugar, con respecto a las mediciones de tensión y corriente efectuadas para la lámpara incandescente, graficamos teniendo en cuenta la Ec. (1) la curva $I - V$ como puede observarse en la Fig. 6.

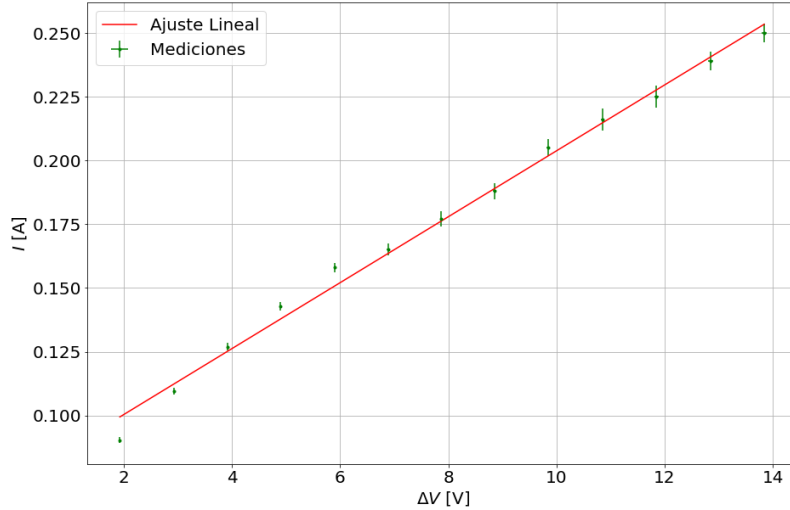


Figura 6: Corriente I [A] con respecto a la diferencia de potencial ΔV [V] sobre la lámpara incandescente para el circuito realizado en la Fig. 1. Ajuste lineal basado en la Ec. (1) efectuado en rojo con respecto a las mediciones obtenidas en verde con una función de la forma $I = aV + b$ utilizando los parámetros $a = \frac{1}{R(I)}$ y b una ordenada al origen. Los parámetros obtenidos fueron $a = (0.0129 \pm 0.0003) \frac{1}{\Omega}$ y $b = (0.075 \pm 0.003) \text{ A}$. El valor del χ^2 reducido obtenido fue de $\chi^2_\nu = 10.4$ por lo que el modelo de la ley de Ohm no ajusta los datos.

Como podemos notar, las mediciones efectuadas en verde no presentan una tendencia lineal de acuerdo al ajuste en rojo. El χ^2 reducido obtenido fue de $\chi^2_\nu = 10.4$ por lo que el modelo de la ley de Ohm no ajusta los datos. Además, podemos notar que los datos no presentaron una forma funcional específica ya que las mediciones se encontraron por encima y por debajo del ajuste de forma prácticamente aleatoria. De esta forma, concluimos que la lámpara incandescente es un elemento no lineal y que la curva $I - V$ no presenta una forma funcional particular.

Luego, graficamos la resistencia dinámica de la lámpara mediante la Ec. (2), como puede observarse en la Fig. 7.

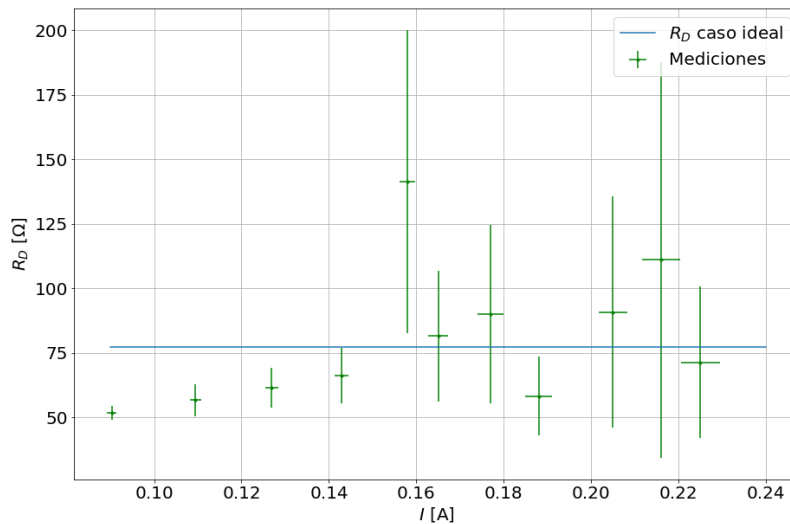


Figura 7: Resistencia dinámica R_D [Ω] con respecto a la corriente I [A] de la lámpara incandescente. Valores obtenidos en verde en función de los datos experimentales mediante la ecuación $R_D = \frac{V_f(I) - V_i(I)}{I_f - I_i}$ basada en la Ec. (2), con respecto a la resistencia dinámica ideal en azul (asumiendo la ley de Ohm) calculada mediante $R_D^{\text{ideal}} = \frac{1}{a} = (77 \pm 2) \Omega$ del ajuste lineal efectuado en la Fig. 6 (ver Ap. B).

Como podemos ver, graficamos tanto la resistencia dinámica ideal R_D^{ideal} en azul, calculada como la inversa de la pendiente a del ajuste lineal efectuado en la Fig. 6 cuyo valor se encontraba en $R_D^{\text{ideal}} = (77 \pm 2) \Omega$, y se graficaron los valores experimentales de la resistencia dinámica real en verde utilizando derivación discreta basada en la Ec. (2).

Podemos notar que los valores experimentales no presentaron una forma funcional específica, con errores muy altos debido a la propagación por la derivación discreta (ver Ap. B) para valores grandes de corriente. Nuevamente confirmamos que los datos experimentales se encontraron alejados con una distribución prácticamente aleatoria con respecto al valor ideal sugerido por la ley de Ohm, por lo que podemos concluir una vez más que la lámpara incandescente es un elemento no lineal.

B. Diodos

En segundo lugar, con respecto a las mediciones de tensión y corriente efectuadas para los diodos común 1N4007 y rápido 1N4148, graficamos teniendo en cuenta la Ec. (3) la curva $I - V$ como puede observarse en la Fig. 8.

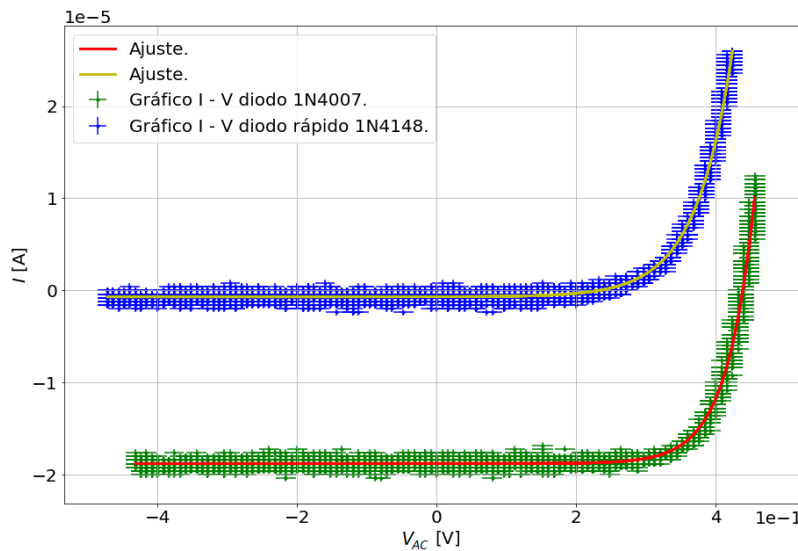


Figura 8: Corriente I [A] con respecto a la diferencia de potencial V_{AC} [V] sobre el diodo para el circuito realizado en la Fig. 2. Ajustes lineales basados en la Ec. (3) efectuados en rojo y amarillo con respecto a las mediciones obtenidas en verde y azul para los diodos común 1N4007 y rápido 1N4148, respectivamente, con una función de la forma $I = a(e^{V_{AC}/b} - 1) + c$ utilizando los parámetros $a = I_0$, $b = V_T$ y c una ordenada al origen. Los valores del χ^2 reducido obtenido fueron de $\chi^2_\nu = 0.066$ y $\chi^2_\nu = 0.036$ para los diodos común y rápido, respectivamente, por lo que el modelo sobreajustó los datos. La incerteza de las mediciones fue reducida un 10 % de su valor real en ambos ejes para una mayor claridad.

En la Fig. 8, podemos notar que las mediciones fueron muy ruidosas incluso habiendo reducido en un 10 % la incerteza de las mediciones tanto para la corriente como para la caída de tensión para ambos diodos. Consecuentemente el modelo sobreajustó los datos. Podemos observar también en ambos casos la presencia de una corriente de fuga [1] cuyos valores fueron de $I_{\text{fuga}} = (-18.78 \pm 0.02) \mu\text{A}$ e $I_{\text{fuga}} = (-0.69 \pm 0.02) \mu\text{A}$ para los diodos común y rápido, respectivamente, es decir, el diodo común es bastante menos eficaz al momento de bloquear la corriente que el diodo rápido en polaridad inversa. Este último aspecto generó que a valores equivalentes de caídas de tensión en ambos diodos, la corriente en el diodo rápido siempre fuera mayor. Además, la tensión umbral [1] del diodo común y del diodo rápido tomaron unos valores de $V_d = (0.43 \pm 0.05) \text{ V}$ y $V_d = (0.25 \pm 0.05) \text{ V}$, respectivamente.

Luego, graficamos teniendo en cuenta la Ec (3) la curva $I - V$ con respecto al diodo Zener, como puede observarse en la Fig. 9. En primer lugar, obtuvimos un valor de corriente de fuga de $I_{\text{fuga}} = (-27 \pm 2) \mu\text{A}$, resultado ligeramente mayor al obtenido anteriormente para el diodo común. En este caso, observamos una tensión umbral de $V_d = (1.0 \pm 0.2) \text{ V}$ cuyo valor es significativamente mayor a los diodos común y rápido, y notamos la presencia de una tensión de ruptura [1] en polaridad inversa, que se encontraba en aproximadamente $V_Z = (-0.80 \pm 0.05) \text{ V}$.

Con respecto a las mediciones obtenidas, optamos por realizar dos ajustes de corriente con respecto a la caída de tensión sobre el diodo basados en la Ec. (3), uno para sus valores positivos en cian correspondientes a la polarización directa y otro para los negativos en naranja correspondientes a la polarización inversa, como puede observarse en la Fig. 9 (a). Los residuos de dicho ajuste se encuentran en la Fig. 9 (b), donde puede apreciarse una clara tendencia en la tensión de ruptura, además de que los errores no compensan la separación que existe entre los

valores del ajuste y los de las mediciones de la rama negativa, dando como resultado un ajuste poco satisfactorio en comparación a la rama positiva. El valor de los χ^2 reducidos obtenidos fueron de $\chi^2_{\nu} = 0.073$ y $\chi^2_{\nu} = 5.010$, para las ramas positiva y negativa, respectivamente, por lo que en el primer caso se ajustó el ruido y en el segundo el modelo basado en la Ec. (3) no ajustó las mediciones obtenidas.

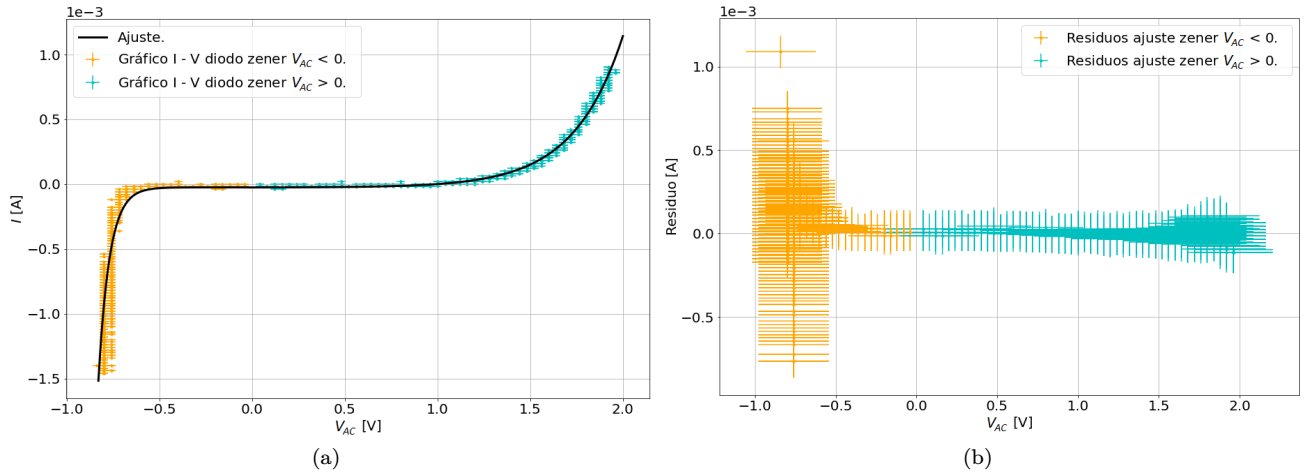


Figura 9: Corriente I [A] con respecto a la diferencia de potencial V_{AC} [V] sobre el diodo Zener para el circuito realizado en la Fig. 2. Ajuste lineal basado en la Ec. (3) efectuados para la rama positiva y negativa con respecto a las mediciones obtenidas en cian y naranja para el diodos en polarización directa e inversa, respectivamente, con una función de la forma $I = a(e^{V_{AC}/b} - 1) + c$ utilizando los parámetros $a = I_0$, $b = V_T$ y c una ordenada al origen. Los valores del χ^2 reducido obtenido fueron de $\chi^2_{\nu} = 0.073$ y $\chi^2_{\nu} = 5.010$ para la rama positiva y negativa, respectivamente, por lo que el modelo sobreajustó los datos en polarización directa y no los ajustó en polarización inversa. La tensión de ruptura se encontró en aproximadamente $V = (-0.80 \pm 0.05)$ V. La incerteza de las mediciones fue reducida un 10 % de su valor real en ambos ejes para una mayor claridad. (b) Residuos de la corriente con respecto a la diferencia de potencial del ajuste realizado en cian y naranja para las polarizaciones directa e inversa, respectivamente.

C. Velocidad De Conmutación

En tercer lugar, con respecto a las mediciones de caída de tensión sobre los diodos común y rápido (los mismos de la experiencia anterior) graficamos la tensión en función del tiempo para estudiar el tiempo de respuesta del material. En la Fig. 10 se muestra el tiempo de subida para los diodos común y rápido, respectivamente.

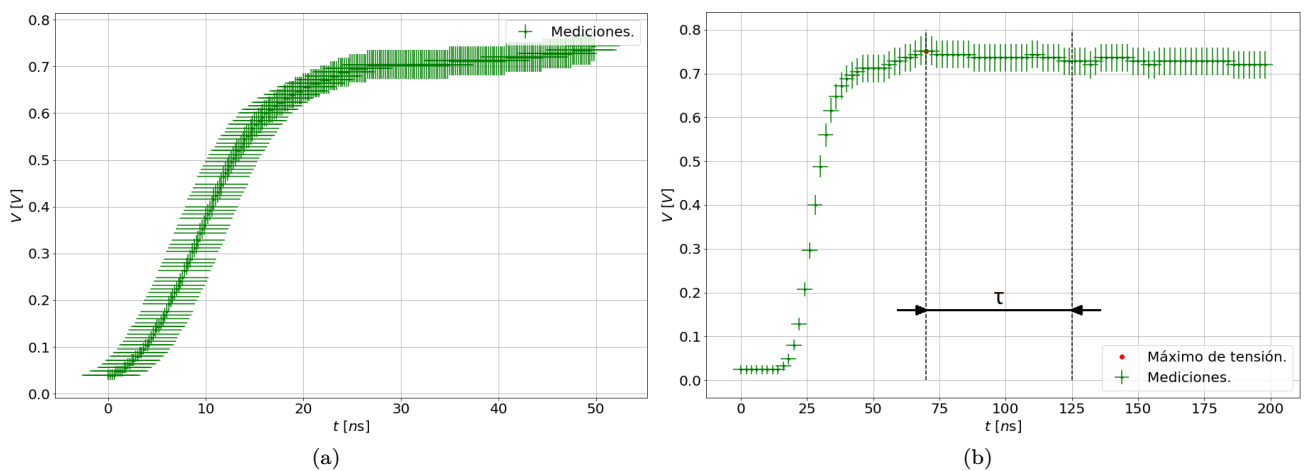


Figura 10: Diferencia de potencial V [V] con respecto al tiempo t [ns] del diodo (a) común y (b) rápido en el flanco ascendente para el circuito realizado en la Fig. 3. El parámetro τ representa el 90 % del tiempo empleado por la señal en alcanzar el estado estacionario desde su pico máximo.

Como podemos notar en la Fig. 10, los diodos no responden instantáneamente, y presentan un tiempo de retardo del orden de los ns. En ambos casos, el error en las mediciones corresponde a la incerteza del instrumento de medición utilizado, el osciloscopio Tektronix (ver Ap. A). Podemos notar que el diodo común no presenta un pico

máximo, sino que tiene una tendencia levemente creciente, por lo que no pudimos obtener un valor de tiempo de decaimiento (que denominamos τ) correspondiente a una tensión estacionaria. En cambio, para el diodo rápido pudimos obtener un valor aproximado de $\tau = (55 \pm 5) \text{ ns}$. Este tiempo representa el 90 % del tiempo de la señal empleado desde el máximo de tensión hasta alcanzar el estado estacionario.

Por otra parte, en la Fig. 11 se muestra el tiempo de bajada para los diodos común y rápido, respectivamente.

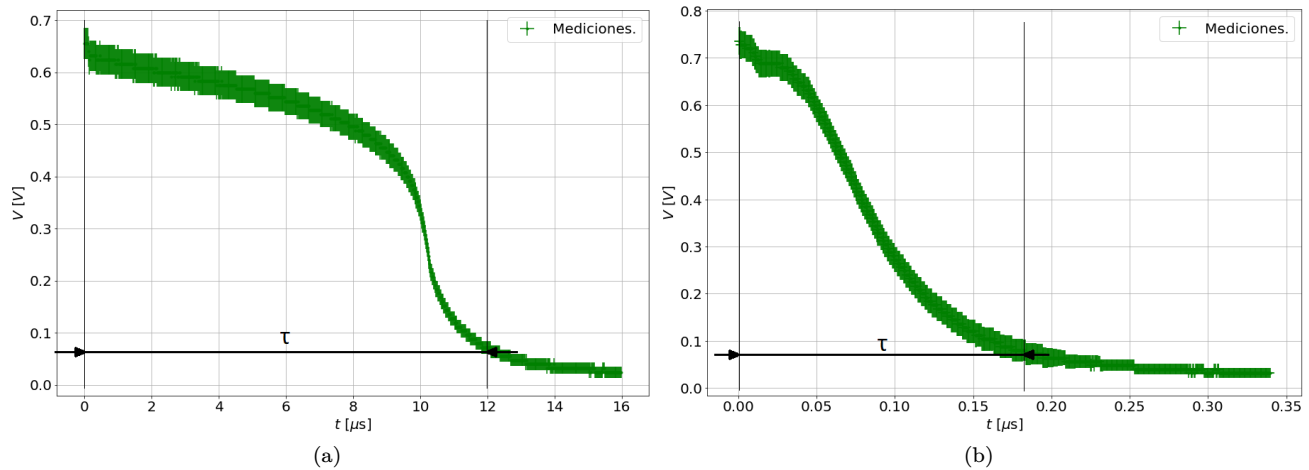


Figura 11: Diferencia de potencial $V [\text{V}]$ con respecto al tiempo $t [\mu\text{s}]$ del diodo (a) común y (b) rápido en el flanco descendente para el circuito realizado en la Fig. 3. El parámetro τ representa el 90 % del tiempo empleado por la señal en alcanzar el estado estacionario desde su máximo de tensión.

En la Fig. 11, podemos notar nuevamente como el decaimiento de la señal no es instantáneo, siendo en esta ocasión del orden de los μs en ambos casos.

Con respecto al tiempo de bajada de la señal, definimos ahora el tiempo τ como el 90 % del tiempo empleado por la señal en llegar al valor mínimo de tensión partiendo desde su máximo. En esta oportunidad pudimos obtener ambos tiempos, cuyos valores fueron de $\tau = (12.10 \pm 0.03) \mu\text{s}$ y $\tau = (0.19 \pm 0.02) \mu\text{s}$ para los diodos común y rápido, respectivamente. Podemos notar que el tiempo τ para el diodo rápido disminuye notablemente con respecto al diodo común.

D. Microcontrolador Arduino Uno

Luego, tras efectuar las mediciones correspondientes de las curvas $I-V$ para el diodo común nuevamente empleando el microcontrolador Arduino, graficamos los datos obtenidos en la Fig. 12.

Como podemos observar, las mediciones efectuadas por el microcontrolador Arduino son menores a las efectuadas por el osciloscopio en la Fig. 8 y presentan menor precisión, pues notamos en su distribución que los valores de corriente registrados por él siempre fueron múltiplos de $2.2 \mu\text{A}$, algo similar a lo ocurrido en el eje de los voltajes, teniendo en este que los valores de las mediciones son múltiplos de 0.01 V . Creemos que la razón de este hecho en el caso de la corriente radica en que el valor de la resistencia utilizada fue de $R = (22.0 \pm 0.2) \Omega$ (ver Fig. 4) y al propio arduino en el caso de las tensiones.

Tras efectuar el ajuste correspondiente mediante la Ec. (3), obtuvimos un valor de χ^2 reducido de $\chi^2_{\nu 1} = 0.95$, por lo que el modelo ajustó bien los datos. Este hecho no sorprende ya que las mediciones fueron imprecisas, con valores de incertezas considerables. Además, en la Fig. 12 observamos claramente que la función no ajustó satisfactoriamente nuestras mediciones para valores de tensión menores a la tensión umbral, aunque sí lo hizo para valores superiores. La tensión umbral hallada en esta ocasión fue de $V_\gamma = (0.4 \pm 0.1) \text{ V}$, valor que no presenta diferencias significativas al del método osciloscopio.

E. Carga Y Descarga De Un Capacitor

Finalmente, con respecto a la medición efectuada para la carga y descarga de un capacitor empleando el microcontrolador arduino, graficamos las diferencias de potencial sobre el capacitor en la Fig. 13.

Como podemos observar, en la Fig. 13 (a), las mediciones efectuadas presentaron mucho ruido y no pudo verse la forma funcional de la caída de tensión claramente. En la Fig. 13 (b) y (c) mostramos una ampliación de las zonas

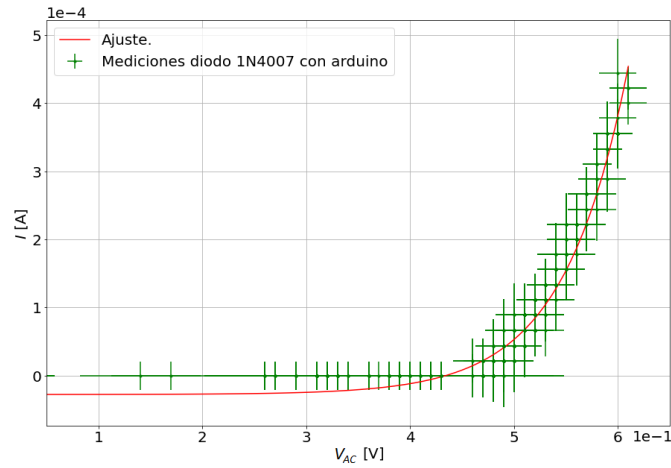


Figura 12: Corriente I [A] con respecto a la diferencia de potencial V_{AC} [V] sobre el diodo común para el circuito realizado en la Fig. 4. Ajuste lineal basado en la Ec. (3) efectuado en rojo con respecto a las mediciones obtenidas en verde con una función de la forma $I = a(e^{V_{AC}/b} - 1) + c$ utilizando los parámetros $a = I_0$, $b = V_T$ y c una ordenada al origen. El valor del χ^2 reducido fue de $\chi^2_v = 0.95$, por lo que el modelo ajustó bien los datos. La precisión de las mediciones no permitió obtener el valor de una corriente de fuga.

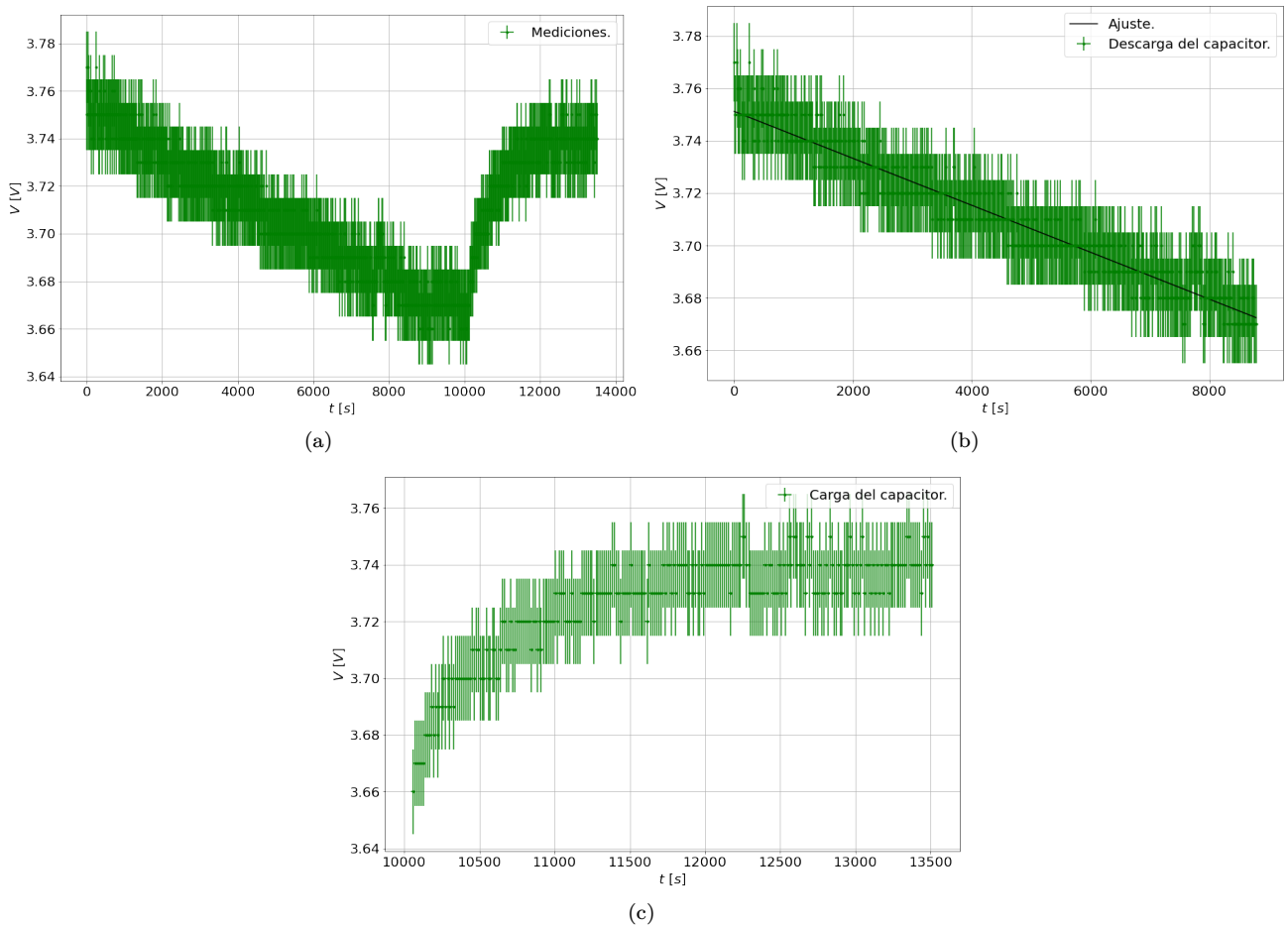


Figura 13: Diferencia de potencial V [V] del capacitor con respecto al tiempo t [s] efectuada con el diodo en polarización inversa. (b) Zona de descarga del capacitor con su respectivo ajuste lineal. El χ^2 reducido obtenido fue de $\chi^2_v = 0.17$ debido a la gran incerteza de las mediciones. (c) Zona de carga del capacitor.

de descarga y carga, respectivamente.

Notamos que el capacitor pareciera cargarse de forma exponencial pero no conseguimos realizar un ajuste debido a la gran cantidad de ruido de las mediciones, mientras que para el ajuste lineal efectuado para la descarga obtuvimos un valor de χ^2 reducido de $\chi^2_\nu = 0.17$, cuyos residuos se muestran en la Fig. 14.

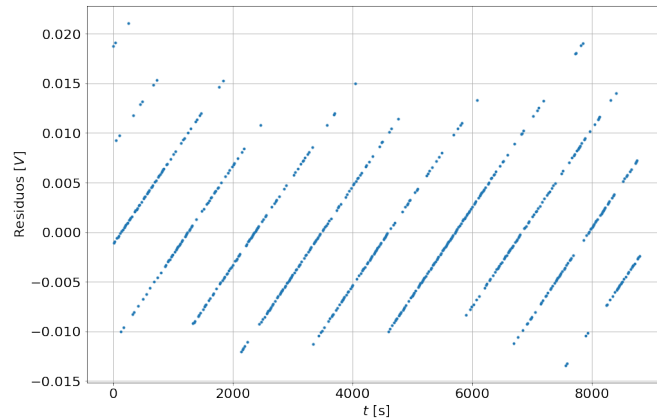


Figura 14: Residuos en V [V] con respecto al tiempo t [s] para el Ajuste lineal realizado en la Fig. 13 (b).

En la Figura 14 podemos observar los residuos del ajuste a las mediciones. Podemos notar que los residuos no fueron aleatorios, observándose una tendencia muy particular en los datos, como rectas que presentaron cierta inclinación. Por esta razón concluimos que la experiencia no fue satisfactoria.

Por último, colocamos el diodo en forma directa y notamos en esta ocasión que el capacitor no llega a cargarse por completo, como puede observarse en la Fig. 15.

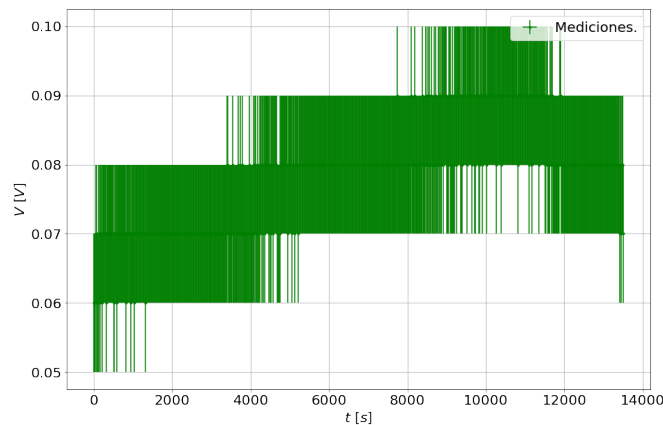


Figura 15: Diferencia de potencial V [V] del capacitor con respecto al tiempo t [s] efectuada con el diodo en polarización directa.

Nuevamente, notamos que la incerteza de las mediciones fue muy grande y que su forma funcional no puede verse claramente. Aún así, el capacitor no llega a cargarse por completo y esto es debido a que el diodo colocado de esta manera deja pasar una tensión máxima de alrededor de 0.5 V. Con las experiencias realizadas concluimos que el microcontrolador Arduino no es bueno para efectuar mediciones muy precisas y cuya incerteza sea pequeña.

IV. CONCLUSIONES

Respecto de la caracterización de las curvas I-V de los diodos, logramos encontrar los valores de la tensión umbral para los diodos 1N4007, 1N4148 rápido y Zener, cuyos valores fueron de $V_\gamma = (0.43 \pm 0.05)$ V, $V_\gamma = (0.25 \pm 0.05)$ V y $V_\gamma = (1.0 \pm 0.2)$ V, respectivamente, en donde notamos que el diodo Zener posee una tensión umbral mayor a los anteriores. Otro aspecto que nos fue posible hallar fue la corriente de fuga de cada diodo, siendo el diodo 1N4148 rápido aquel que presentó un valor menor con $I_{\text{fuga}} = (-0.69 \pm 0.02)$ μA , mientras que el diodo 1N4007 presentó un valor de $I_{\text{fuga}} = (-18.78 \pm 0.02)$ μA y el diodo Zener, $I_{\text{fuga}} = (-27 \pm 2)$ μA , siendo éste último aquel que presentó el valor mayor. Por otro lado en el caso del diodo Zener, hallamos que el valor de la tensión de ruptura en polaridad

inversa se encontraba aproximadamente en los $V = (-0.80 \pm 0.05) V$.

Referente a la caracterización del diodo 1N4007 con un Arduino, logramos obtener la curva $I - V$ del mismo, aunque con mucha menor precisión con respecto al osciloscopio para medir las caídas de tensiones. Inferimos que la elección de la resistencia limitadora influyó en la precisión mínima presente en los resultados. La precisión limitada ocasionó una leve discordancia entre el valor de corriente de fuga hallado por el osciloscopio y el hallado con este método. A pesar de este hecho las características referentes a la curva $I - V$ para tensiones superiores a la tensión umbral $V_\gamma = (0.4 \pm 0.1) V$ no presentaron diferencias significativas entre ambos métodos.

Por otro lado, corroboramos el tiempo de conmutación para el diodo rápido y común en ambos flancos, tanto ascendente como descendente. En el caso ascendente, notamos que el diodo rápido tiene un tiempo τ casi 100 veces menor que el diodo común, como queríamos ver. Con respecto al flanco descendente tuvimos errores a la hora de medir o el aparato no es indicado para variaciones de tensión demasiado pequeñas, por lo que no pudimos comparar los distintos valores de τ .

En último lugar, realizamos la carga y descarga de un capacitor medido con un Arduino. Notamos que al tener el diodo en polarización inversa el capacitor logra cargarse por completo. Si bien, no pudimos ajustar los datos, visualizamos que tenía una forma característica al cargarse. Al cambiar la polarización del diodo, comprobamos que el capacitor no logra cargarse por completo y esto es debido a que el diodo deja pasar hasta un valor de tensión específico.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] http://users.df.uba.ar/moreno/cursos/lab3/apuntes/no_lineales.pdf
- [2] David J. Griffiths. *Introduction To Electrodynamics*. Editorial Pearson. Cuarta Edición. Página: 298.
- [3] Manual de usuario fuente de alimentación Hantek PPS2320A:
http://www.df.uba.ar/users/moreno/manuales/PPS2320A_Manual.zip
- [4] Manual de usuario Generador de Funciones Tektronix AFG 1022:
<https://www.tek.com/en/arbitrary-function-generator/afg1000-manual>
- [5] Manual de usuario Osciloscopio Tektronix TBS1000B-EDU:
http://users.df.uba.ar/moreno/manuales/TBS1052B_User_Manual.pdf
- [6] http://materias.df.uba.ar/l3a2023v/files/2023/03/Arduino_L3.pdf

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Profesor Pablo Cobelli por ayudar a comprender los conceptos de este informe, agradecemos a los Docentes Sebastian Bordakevich, Ayelen Santos, Gabriel Brichetto y Jean Paul Louys Sanso por guiarnos en la interpretación de datos y colaborar con las ambigüedades que se presentaron en los experimentos y mediciones, y agradecemos a Federico por brindarnos las herramientas e instrumental para realizar las experiencias.

Agradecemos a la Facultad de Ciencias Exactas & Naturales de la Universidad de Buenos Aires por hacer posible la realización de este trabajo.

Apéndices

Apéndice A: Incerteza Del Osciloscopio Tektronix TBS1000B-EDU

En las mediciones efectuadas por el osciloscopio, tuvimos en cuenta su incerteza a la hora de medir tiempos, que es de la forma:

$$\Delta t = \pm(1\text{Int S.} + 100\text{ppm} \cdot \text{Med.} + 0.5\text{ ns}) \quad (4)$$

donde Δt representa la incerteza temporal, Int S. representa el intervalo de sampleo del osciloscopio y Med. la medición realizada.

Apéndice B: Resistencia Dinámica

Dada la definición de la resistencia dinámica $R_D = \frac{dV}{dI}$, definimos a $R_{D(V_1, V_2, I_1, I_2)} = \frac{V_2(I) - V_1(I)}{I_2 - I_1}$ una función de cuatro variables que representa la resistencia dinámica calculada en forma discreta. En estas condiciones, su incerteza será de la forma:

$$\Delta R_D = \frac{1}{|I_2 - I_1|} \sqrt{\Delta V_1^2 + \Delta V_2^2 + \frac{(V_2 - V_1)^2 (\Delta I_1^2 + \Delta I_2^2)}{(I_2 - I_1)^2}}, \quad (5)$$

donde V_1 , V_2 , I_1 e I_2 representan los valores medios de las mediciones efectuadas para los voltajes y las corrientes, y ΔV_1 , ΔV_2 , ΔI_1 y ΔI_2 , sus incertezas, respectivamente. Con la Ec. se calculó numéricamente la incerteza de los valores de resistencia dinámica hallados.

Luego, calculamos la resistencia dinámica ideal como $R_D^{\text{ideal}}(a) = \frac{1}{a}$, en cuyo caso su incerteza es de la forma:

$$\Delta R_D^{\text{ideal}} = \frac{|\Delta a|}{a^2}, \quad (6)$$

donde a representa la pendiente del ajuste lineal efectuado en la Fig. 6 y Δa su incerteza.

De esta forma obtuvimos un valor de $R_D^{\text{ideal}} = (77 \pm 2) \Omega$.