

# Rectificación monofásica de media onda y onda completa con carga RC paralelo

Barbosa E. Liliana M., Ocampo R. Angee L.

**Resumen** - Durante el desarrollo del presente preinforme, se procede a elaborar un análisis, mediante el uso de herramientas de simulación y material bibliográfico, de la rectificación monofásica de un rectificador de media onda y de onda completa, donde se hace uso de diodos semiconductores 1N4004 o 1N4007. Ello para comprender y estudiar a fondo el proceso de conversión de una señal AC a una DC.

## I. INTRODUCCIÓN

En el campo de la electrónica y la electricidad, la rectificación monofásica de media onda y onda completa con carga RC desempeña un papel fundamental en la conversión de corriente alterna a corriente continua. Este documento tiene como objetivo profundizar en el estudio y análisis de estos dos métodos de rectificación, explorando sus principios de funcionamiento, características, ventajas y limitaciones. Además, se investigará la influencia de la carga RC en la eficiencia y el rendimiento de los circuitos rectificadores. A lo largo de este informe, se presentarán datos experimentales y análisis teóricos que permitirán comprender en profundidad estos procesos.

### Marco teórico:

- **Rectificación monofásica:** proceso de convertir una corriente alterna (AC) en una corriente continua (DC) utilizando un circuito rectificador en un solo ciclo de la onda de AC. En otras palabras, la rectificación monofásica implica la conversión de la mitad de una onda sinusoidal de AC en una señal de DC. El circuito rectificador monofásico más común es el de media onda, que utiliza un diodo semiconductor para permitir el flujo de corriente en una sola dirección durante la mitad de un ciclo de la onda de AC, bloqueando la otra mitad. Como resultado, se obtiene una señal de DC pulsante con picos positivos. Este tipo de rectificación se utiliza en aplicaciones más simples o donde se requiere una cantidad menor de potencia en forma de DC. Otra variante es la rectificación monofásica de onda completa, que

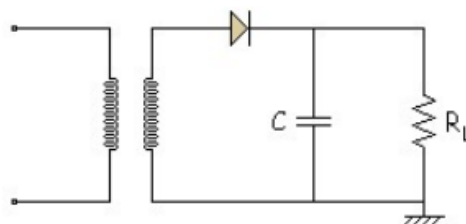
utiliza un puente rectificador de diodos para aprovechar tanto la parte positiva como la negativa de la onda de AC, generando una señal de DC más constante y suave. Esto se utiliza en aplicaciones donde se necesita una salida de DC más estable y en dispositivos que requieren una mayor potencia de suministro.

- **Voltaje de rizado:** se refiere a las pequeñas variaciones o fluctuaciones en el nivel de voltaje en una señal de corriente continua (DC). Estas variaciones son causadas por el proceso de rectificación de una señal de corriente AC en una señal DC.

## II. ANÁLISIS, DISEÑO Y SIMULACIÓN

### A. Filtro RC para señal rectificada de media onda

A continuación se procede a diseñar el circuito presente en la figura 1, el cual corresponde a un rectificador de media onda cuyo transformador tiene voltaje de salida secundario de 6  $V_{RMS}$  (ó voltaje pico de  $6\sqrt{2}V=8.46V$ ) a 60Hz



**Fig. 1.** Circuito rectificador de media onda con filtro RC.

Así, para cumplir con las condiciones iniciales se procede con el cálculo teórico donde el subíndice “P” corresponde al primario del transformador, mientras que “I” al secundario.

$$\left(\frac{V_p}{V_i}\right)^2 = \frac{L_p}{L_i}$$

$$\left(\frac{120}{6}\right)^2 = \frac{L_p}{5.1mH}$$

$$L_p = \left(\frac{120}{6}\right)^2 * 5.1mH = 2040mH$$

La información presentada respecto a las inductancias son relevantes en el caso de la simulación del circuito de la figura 1 en Pspice.

A continuación, se procede con el modelado del filtro RC, por lo que de acuerdo a la bibliografía consultada, se debe tener en cuenta la siguiente fórmula que modela el comportamiento del voltaje de rizado en términos de los componentes del circuito:

$$V_r = \frac{V_i}{fRC}$$

Siendo  $V_r$  el voltaje de rizado pico a pico,  $V_i$  el voltaje de la carga  $R_L$ ,  $f$  la frecuencia de la fuente, debido a que es un rectificador de media onda, y los valores de  $R$ , que corresponde a  $R_L$ , y  $C$ , el valor de la capacitancia que ha sido conectada en paralelo a la carga. Es importante resaltar que, esta aproximación es posible solo gracias a que se considera que el periodo de carga y descarga del capacitor es muy alto comparado con el periodo de la fuente (o sea,  $T \ll R_L C$  ó

<sup>1</sup>El presente documento corresponde al preinforme de la cuarta práctica de laboratorio de la materia “Electrónica Analógica I” presentado en la Universidad de Antioquia de Medellín en el periodo académico 2023-02.

$166.667\mu \ll C$ ), permitiendo que el elemento no se descargue completamente en la resistencia.

Ahora, considerando las condiciones de diseño del respectivo circuito, se tiene que  $V_r \leq 0.1 V_I$ , siendo  $V_I$  el voltaje máximo en el secundario ( $6\sqrt{2} = 8.46$ ); posteriormente, se fija un valor comercial de resistencia de carga, siendo esta de  $R_L = 100\Omega$  para así obtener la capacitancia requerida que cumpla las condiciones adecuadas, como se puede observar a continuación:

$$C = \frac{V_I}{V_r f R_L} = \frac{8.46}{V_r (60\text{Hz})(100\Omega)} = \frac{0.00141}{V_r}$$

Asimismo, como el valor máximo que  $V_r$  puede tomar es  $0.846V$ , entonces:  $C \geq 1666.667\mu F$ . Asimismo, se toman las siguientes capacitancias comerciales y se evalúan:

| Capacitancia       | $V_r$ generada | ¿Supera $0.846V$ ? |
|--------------------|----------------|--------------------|
| 4700 $\mu F$ (35V) | 0.3V           | No                 |
| 2200 $\mu F$ (16V) | 0.64V          | No                 |
| 1000 $\mu F$ (16V) | 1.41V          | Sí                 |

**Tabla 1.** Análisis teórico de las capacitancias a trabajar en circuito 1.

Si se quiere obtener el valor de capacitancia mínimo para que  $V_r = 0$  (siendo este un caso muy ideal, ya que siempre se busca tener el  $V_r$  más pequeño posible), se realiza el cálculo que se desarrollará a continuación:

$$C = \frac{V_I}{V_r f R_L} = \frac{V_I}{(0)f R_L} \rightarrow C = \infty$$

Vale resaltar que el análisis anterior se hace con base en una resistencia de carga fija, sin embargo, el mismo análisis se puede aplicar a la fórmula al dejar una capacitancia fija e ir modificando la resistencia para alcanzar los mismos efectos de voltaje de rizado. Así, de lo anterior se concluye que al dejar una capacitancia fija y alterar la resistencia para tender a un voltaje de rizado cero, se requiere una resistencia que tienda a infinito. Por lo cual, se puede deducir que a mayor valor de resistencia de carga menor será el voltaje de rizado pico a pico, esta afirmación es respaldada por el tiempo de carga y descarga del capacitor, que es obtenido por medio del  $\tau = R_L C$

por lo que a mayor valor de resistencia, mayor será el  $\tau$ , y como consecuencia, será mucho mayor el periodo del capacitor comparado con el periodo de la fuente.

Considerando que los elementos del circuito no son ideales y requieren un voltaje mínimo para su funcionamiento, se determina el valor máximo o valor pico y el valor promedio de la señal de la siguiente forma:

$$V_{OMAX} = V_I - V_D \rightarrow V_{OMAX} = 8.46 - 0.7$$

$$V_{OMAX} = 7.76V$$

En el procedimiento anterior, se contempló que el voltaje de funcionamiento del diodo era igual a  $V_D = 0.7V$

(información entregada por el datasheet del elemento). Ahora, se procede a cuantificar el valor promedio de la señal, voltaje DC o Average:

$$V_{ODC} = V_I - \frac{1}{2} V_r \rightarrow \text{Ideal}$$

$$V_{ODC} = V_{OMAX} - \frac{1}{2} V_r \rightarrow \text{Con consumo del diodo}$$

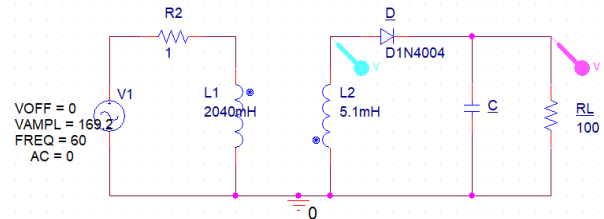
| Capacitancia       | $V_{ODC}$ ideal | $V_{ODC}$ con consumo del diodo |
|--------------------|-----------------|---------------------------------|
| 4700 $\mu F$ (35V) | 8.31V           | 7.61V                           |
| 2200 $\mu F$ (16V) | 8.14V           | 7.44V                           |
| 1000 $\mu F$ (16V) | 7.755V          | 7.06V                           |

**Tabla 2.** Análisis teórico de los voltajes DC a la salida del circuito 1.

Es importante destacar que, sobre la base del voltaje DC calculado, el voltaje nominal del capacitor debe ser superior a este con el fin de que el montaje eléctrico en la board sea seguro y apropiado. Si lo anterior no sucede, puede ocurrir que el diodo-eléctrico del condensador se rompa, resultando una fuga de corriente e incluso la destrucción de este. Por otro lado, vale mencionar que ya cómo se puede observar en las tablas anteriores, el voltaje nominal de los capacitores a utilizar es mayor o igual a 16V.

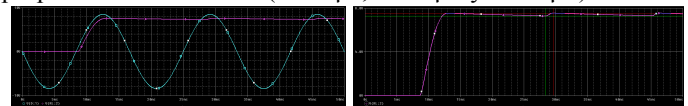
Ahora, se procede a la simulación del circuito planteado a través del programa Pspice con el fin de comprobar los cálculos realizados.

El circuito a simular es el siguiente:



**Fig. 2.** Circuito a simular en Pspice en base a la figura 1.

En el cual, se procede a evaluar cada una de las capacitancias propuestas teóricamente (4700 $\mu F$ , 2200 $\mu F$  y 1000 $\mu F$ ).



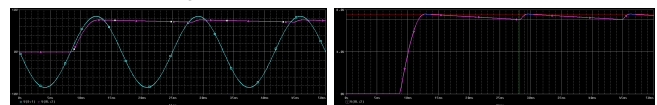
**Fig. 3.** Señales de entrada y de salida con capacitancia de 4700 $\mu F$ .

| Trace Color | Trace Name | Y1      | Y2      | Y1 - Y2  | Trace Color | Trace Name   | Y1       | Y2         | Y1 - Y2  |
|-------------|------------|---------|---------|----------|-------------|--------------|----------|------------|----------|
|             | X Values   | 29.668m | 28.368m | 1.3000m  |             | X Values     | 499.918m | 0.000      | 499.918m |
| CURSOR 1.2  | V(RL,2)    | 7.5356  | 7.2844  | 251.254m | CURSOR 2    | V(RL,2)      | 7.4780   | -151.3E-24 | 7.4780   |
|             |            |         |         |          | CURSOR 1    | AVG(V(RL,2)) | 7.2648   | -9.3714p   | 7.2648   |

**Fig. 4.** Voltajes de rizado y DC en la salida RL de las señales en la figura 3. De las figuras 4 y 5, se tiene que el voltaje de rizado en la salida es 0.2512V, y su voltaje DC es 7.2648V.

$$\%Error_{V_r} = \frac{|0.2512V - 0.3V|}{|0.3V|} * 100\% = 16.267\%$$

$$\%Error_{V_{DC}} = \frac{|7.2648V - 7.61V|}{|7.61V|} * 100\% = 4.536\%$$



**Fig. 5.** Señales de entrada y de salida con capacitancia de 2200 $\mu F$ .

| Trace Color | Trace Name | Y1      | Y2      | Y1 - Y2  | Trace Color | Trace Name   | Y1       | Y2         | Y1 - Y2  |
|-------------|------------|---------|---------|----------|-------------|--------------|----------|------------|----------|
|             | X Values   | 29.507m | 28.125m | 1.3819m  |             | X Values     | 499.918m | 0.000      | 499.918m |
| CURSOR 1.2  | V(RL,2)    | 7.5846  | 7.0809  | 503.724m | CURSOR 2    | V(RL,2)      | 7.4598   | -151.3E-24 | 7.4598   |
|             |            |         |         |          | CURSOR 1    | AVG(V(RL,2)) | 7.1881   | -20.021p   | 7.1881   |

**Fig. 6.** Voltajes de rizado y DC en la salida RL de las señales en la figura 5.

De manera similar, cuando la capacitancia que se tiene es de 2200uF, los resultados tras una simulación son precisamente 0.503V como voltaje de rizado, y 7.1881V en voltaje DC.

$$\%Error_{V_r} = \frac{|0.503V - 0.64V|}{|0.64V|} * 100\% = 21.406\%$$

$$\%Error_{V_{DC}} = \frac{|7.1881V - 7.44V|}{|7.44V|} * 100\% = 3.386\%$$

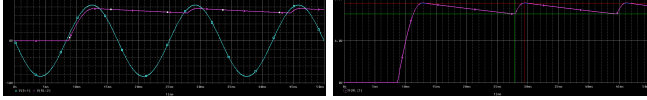


Fig. 7. Señales de entrada y de salida con capacitancia de 1000uF.

| Trace Color | Trace Name | Y1      | Y2      | Y1 - Y2 | Trace Color | Trace Name   | Y1       | Y2         | Y1 - Y2  |
|-------------|------------|---------|---------|---------|-------------|--------------|----------|------------|----------|
|             | X Values   | 29.455m | 27.790m | 1.6651m |             | X Values     | 499.937m | 0.000      | 499.937m |
| CURSOR 1,2  | V(RL,2)    | 7.6241  | 6.5731  | 1.0510  | CURSOR 2    | V(RL,2)      | 7.3451   | -151.3E-24 | 7.3451   |
|             |            |         |         |         | CURSOR 1    | AVG(V(RL,2)) | 6.9643   | -44.045p   | 6.9643   |

Fig. 8. Voltajes de rizado y DC en la salida RL de las señales en la figura 5. Asimismo, cuando  $C=1000\mu F$ , se puede apreciar un  $V_r = 1.05V$  y  $V_{DC} = 6.9643V$ .

$$\%Error_{V_r} = \frac{|1.05V - 1.41V|}{|1.41V|} * 100\% = 25.532\%$$

$$\%Error_{V_{DC}} = \frac{|6.9643V - 7.06V|}{|7.06V|} * 100\% = 1.356\%$$

#### B. Filtro RC para señal rectificada de onda completa

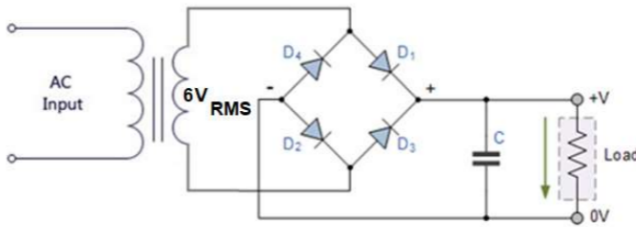


Fig. 9. Circuito rectificador de onda completa con filtro RC.

Del mismo modo que en el rectificador de media de onda, el voltaje de rizado estará dado por la siguiente fórmula:

$$V_r = \frac{V_i}{fRC}$$

Sin embargo, es importante tener en cuenta que la frecuencia de la señal será dos veces la frecuencia de la fuente ( $f = 2 * f_{v1}$ ), con lo anterior es posible determinar la capacitancia requerida para que el voltaje de rizado ( $V_r$ ) no supere el 10% del voltaje del secundario de la forma que se muestra a continuación:

$$C = \frac{V_i}{2 * f_{v1} * R * V_r} \rightarrow C = \frac{1}{2 * 60 * 100 * 0.1}$$

$$C = 833.33\mu F$$

Por otro lado, al calcular el  $V_r$  con la capacitancia del anterior circuito, es decir,  $C = 1666.66\mu F$ , se obtiene el siguiente resultado:

$$V_r = 0.423V$$

Con el fin de facilitar el montaje de laboratorio, se procede también a realizar los cálculos con valores de capacitancias comerciales, como se muestra en la siguiente tabla:

| Capacitancia | $V_r$ generada | ¿Supera 0.846V? |
|--------------|----------------|-----------------|
|--------------|----------------|-----------------|

|              |       |    |
|--------------|-------|----|
| 4700μF (35V) | 0.15V | No |
| 2200μF (16V) | 0.32V | No |
| 1000μF (16V) | 0.71V | No |

Tabla 3. Análisis teórico de las capacitancias a trabajar en circuito 1.

Puede verse, de acuerdo a la fórmula utilizada, cómo la capacitancia se reduce a la mitad debido a que se duplica la frecuencia de la señal periódica producida por el rectificador de onda completa, por eso al realizar las respectivas comparaciones con la **Tabla 1** es posible observar cómo el voltaje de rizado se reduce a la mitad.

Por otro lado, se procede al cálculo del valor pico en la salida junto a la señal DC de esta. Vale resaltar que en este proceso se tiene en cuenta el voltaje de consumo de los diodos presentes, por lo cual:

$$V_{OMAX} = V_i - 2V_D \rightarrow V_{OMAX} = 8.46 - 1.4$$

$$V_{OMAX} = 7.06V$$

En el procedimiento anterior, se contempló que el voltaje de funcionamiento del diodo era igual a  $V_D = 0.7V$

(información entregada por el datasheet del elemento), pero este valor se ingresa multiplicado por dos a la fórmula, precisamente por la cantidad de estos que se encuentran en el camino al momento de rectificar cada onda.

Ahora, para cuantificar el valor promedio de la señal (voltaje DC o Average), se procede a utilizar exactamente la misma fórmula que en el circuito anterior, así:

| Capacitancia | $V_{ODC}$ ideal | $V_{ODC}$ con consumo del diodo |
|--------------|-----------------|---------------------------------|
| 4700μF (35V) | 8.385V          | 6.985V                          |
| 2200μF (16V) | 8.3V            | 6.9V                            |
| 1000μF (16V) | 8.105V          | 6.705V                          |

Tabla 4. Análisis teórico de los voltajes DC a la salida del circuito 2.

Es importante destacar que, sobre la base del voltaje DC calculado, el voltaje nominal del capacitor debe ser superior a éste para garantizar seguridad en el montaje eléctrico. Asimismo, al comparar las tablas 2 y 4, se puede resaltar que este segundo circuito, los voltajes DC obtenidos son más bajitos que en el primer circuito. Por lo anterior, el voltaje nominal de los capacitores usados en el montaje 1 se pueden usar tranquilamente en este segundo montaje.

Ahora, se procede a la simulación del circuito planteado a través del programa Pspice con el fin de comprobar los cálculos realizados.

El circuito a simular es el siguiente:

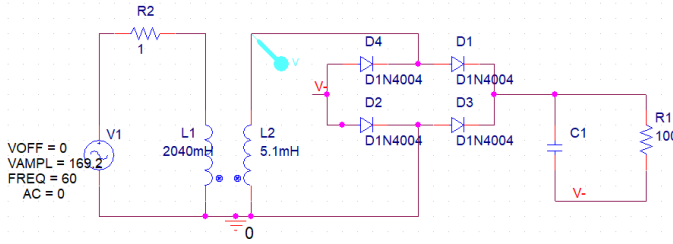


Fig. 10. Circuito a simular en Pspice con base en la figura 9.

Del montaje en la simulación de la figura 10, se puede resaltar que se hace uso de exactamente los mismos valores para el transformador utilizado en el primer circuito. Así pues, partiendo del montaje en la figura 10, se procede a evaluar cada una de las capacitancias propuestas teóricamente (4700μF, 2200μF y 1000μF).

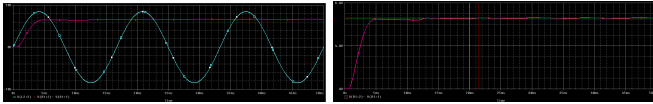


Fig. 11. Señales de entrada y de salida con capacitancia de 4700uF.

| Trace Color | Trace Name       | Y1      | Y2      | Y1 - Y2  |
|-------------|------------------|---------|---------|----------|
|             | X Values         | 21.441m | 20.041m | 1.4000m  |
| CURSOR 1,2  | V(R1:2)- V(R1:1) | 6.6186  | 6.5056  | 112.989m |

Fig. 12. Voltajes de rizado y DC en la salida RL de las señales en la figura 11. De las figuras 11 y 12, se tiene que el voltaje de rizado en la salida es 0.113V, y su voltaje DC es 6.562V.

$$\%Error_{V_r} = \frac{|0.113V - 0.15V|}{|0.15V|} * 100\% = 24.667\%$$

$$\%Error_{V_{DC}} = \frac{|6.562V - 6.985V|}{|6.985V|} * 100\% = 6.056\%$$

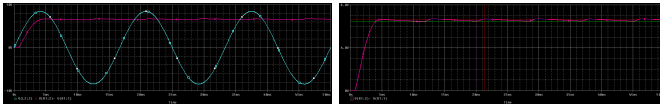


Fig. 13. Señales de entrada y de salida con capacitancia de 2200uF.

| Trace Color | Trace Name       | Y1      | Y2      | Y1 - Y2  |
|-------------|------------------|---------|---------|----------|
|             | X Values         | 21.393m | 19.993m | 1.4000m  |
| CURSOR 1,2  | V(R1:2)- V(R1:1) | 6.6743  | 6.4849  | 189.412m |

Fig. 14. Voltajes de rizado y DC en la salida RL de las señales en la figura 13. De forma similar, cuando la capacitancia que se tiene es de 2200uF, los resultados tras una simulación son precisamente 0.189V como voltaje de rizado, y 6.556V en voltaje DC.

$$\%Error_{V_r} = \frac{|0.189V - 0.32V|}{|0.32V|} * 100\% = 40.938\%$$

$$\%Error_{V_{DC}} = \frac{|6.556V - 6.9V|}{|6.9V|} * 100\% = 4.986\%$$

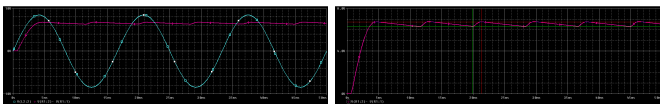


Fig. 15. Señales de entrada y de salida con capacitancia de 1000uF.

| Trace Color | Trace Name       | Y1      | Y2      | Y1 - Y2  |
|-------------|------------------|---------|---------|----------|
|             | X Values         | 21.317m | 19.817m | 1.5000m  |
| CURSOR 1,2  | V(R1:2)- V(R1:1) | 6.7341  | 6.3213  | 412.806m |

Fig. 16. Voltajes de rizado y DC en la salida RL de las señales en la figura 15. Asimismo, cuando C=1000uF, se puede apreciar un  $V_r = 0.413V$  y  $V_{DC} = 6.5083V$ .

$$\%Error_{V_r} = \frac{|0.413V - 0.71V|}{|0.71V|} * 100\% = 41.831\%$$

$$\%Error_{V_{DC}} = \frac{|6.5083V - 6.705V|}{|6.705V|} * 100\% = 2.934\%$$

## IX. CONCLUSIONES

- Tras todos los cálculos teóricos y las simulaciones de los circuitos, se puede concluir que entre mayor potencia y voltaje DC a la salida, se tendrá mayor voltaje de rizado. Asimismo, también se pudo observar que al conectar el filtro pasa-bajas al rectificador de onda completa, este reduce el voltaje de rizado a la salida en comparación del rectificador de media onda.
- Se pudo observar en ambos circuitos cómo al conectar un circuito RC en configuración pasa-bajas, se puede llevar la señal rectificada a una aproximación de onda DC (aproximación porque el voltaje de rizado asociado, aún le sigue dando periodicidad y frecuencia a esa señal).
- Se pudo evidenciar que la resistencia de carga, la capacitancia del circuito y la frecuencia de la fuente, guardan una relación de proporcionalidad inversa con el voltaje de rizado, puesto que si alguna de estas aumenta, el voltaje de rizado disminuirá. Asimismo, fue posible apreciar que el punto máximo del voltaje de rizado dependía del voltaje requerido para el funcionamiento del diodo.

## REFERENCES

- G. O. Young, "Synthetic structure of industrial plastics (Book style with paper title and editor)," in *Plastics*, 2nd ed. vol. 3, J. Peters, Ed. New York: McGraw-Hill, 1964, pp. 15–64.
- W.-K. Chen, *Linear Networks and Systems* (Book style). Belmont, CA: Wadsworth, 1993, pp. 123–135.
- H. Poor, *An Introduction to Signal Detection and Estimation*. New York: Springer-Verlag, 1985, ch. 4.