

# Informe compilatorio

Mejía Juan, Rojas Joseph, Sanchez Isabella  
{u1803066, 1803202, 1803257}@unimilitar.edu.co  
Profesor: Niño Francisco

**Resumen**— Este laboratorio nos permite analizar diferentes tipos de circuitos monofásicos, realizando el diseño y análisis de sistemas trifásicos. Por medio del software Proteus, se realiza la correspondiente simulación en la que se analiza los comportamientos de corriente y voltaje correspondientes.

**Palabras clave**— Diodo, corriente, voltaje, sistemas trifásicos, circuitos monofásicos, motor, rectificador.

## I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas trifásicos son sistemas de producción y consumo de energía eléctrica formado por tres corrientes alternas monofásicas de igual frecuencia con un desfase de  $120^\circ$  entre ellas. Un convertidor es un rectificador de corriente que se caracteriza por transformar la corriente alterna en continua. De esta manera permiten la conversión directa desde un circuito alimentado con voltaje alterno, poder alimentar a la carga con corriente continua.

Los sistemas trifásicos son sistemas de producción y consumo de energía eléctrica formado por tres corrientes alternas monofásicas de igual frecuencia con un desfase de  $120^\circ$  entre ellas.

Un convertidor es un rectificador de corriente que se caracteriza por transformar la corriente alterna en continua. De esta manera permiten la conversión directa desde un circuito alimentado con voltaje alterno, poder alimentar a la carga con corriente continua.

Un convertidor es un rectificador de corriente que se caracteriza por transformar la corriente alterna en continua. De esta manera permiten la conversión directa desde un circuito alimentado con voltaje alterno, poder alimentar a la carga con corriente continua.

En el caso de ser un rectificador controlado se sustituye los diodos por los SCR, donde la salida se controla ajustando el ángulo de disparo de cada SCR, obteniendo una tensión de salida ajustable en un rango limitado. El ángulo de disparo  $\alpha$ , es el intervalo angular entre la polarización directa del SCR y

la aplicación de la señal de puerta. Si  $\alpha=0$ , los rectificadores se comportan como no controlados [1].

Un SCR (*Silicon Control Rectifier*), es un dispositivo de conmutación rápida el cual en su interior se encuentran transistores en configuración NPN y PNP el comportamiento de un SCR para poder ser activado tiene dos ítems.

1. Aplicar corriente en la puerta del SCR (Ver Figura 1).
2. La polarización del SCR debe ser directa [1].

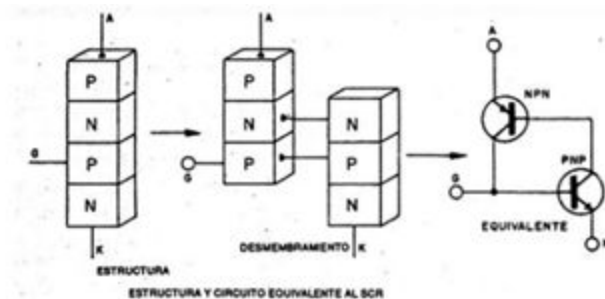


Figura 1. Estructura de un SCR

El SCR no entrará en conducción en cuanto a la señal del generador sea positiva, dicha conducción se hace a partir de una corriente que entra por la puerta, esta permite al SCR usar como control. El comportamiento frente a el ángulo de disparo se muestra en la Figura 2.

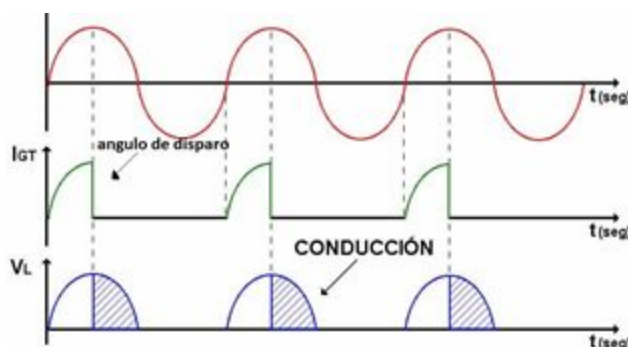


Figura 2. SCR en corriente alterna [2].

La red Snubber pretenden amortiguar los posibles picos de tensión o de corriente. Los tiristores son sensibles a este tipo de comportamiento, ya que puede ocasionar una conducción indeseada la destrucción de estos.

Existen varios tipos de redes Snubbers siendo disipativas o no, para la protección de sobretensiones directas o inversas, con polarización o sin ella, etc, como se muestra en la Figura 3 diferentes tipos de redes Snubber.

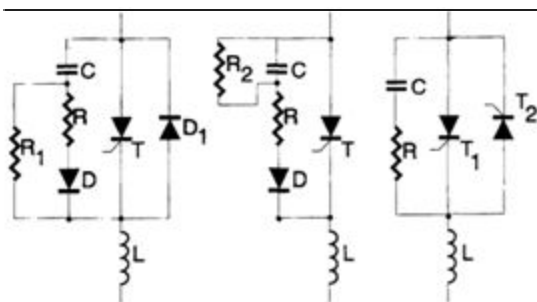


Figura 3. Redes Snubber [2]

Un convertidor es un rectificador de corriente que se caracteriza por transformar la corriente alterna en continua. De esta manera permiten la conversión directa desde un circuito alimentado con voltaje alterno, poder alimentar a la carga con corriente continua.

En el caso de ser un rectificador controlado se sustituye los diodos por los SCR, donde la salida se controla ajustando el ángulo de disparo de cada SCR, obteniendo una tensión de salida ajustable en un rango limitado. En la Figura 1, se observa los SCR 1 y 2 los cuales se polarizan en directa cuando se alimenta positivamente, pero no se conduce hasta que se apliquen las señales de puerta; los SCR 3 y 4 se polarizan en directa cuando la alimentación sea negativa, se alternan.

El ángulo de disparo  $\alpha$ , es el intervalo angular entre la polarización directa del SCR y la aplicación de la señal de puerta. Si  $\alpha=0$ , los rectificadores se comportan como no controlados [1].

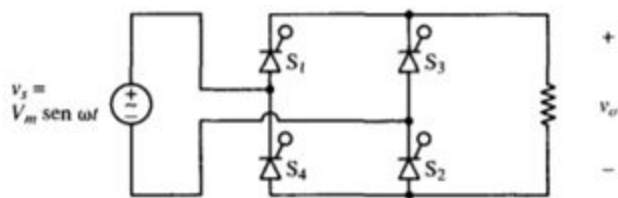


Figura 1. Rectificador en puente de onda completa controlado.

Una implementación de este rectificador consta del tiristor Q1 (Ver Figura 2), el cual tiene el voltaje más alto en el intervalo de  $\pi/6$  a  $5\pi/6$ . Este conduce hasta que el tiristor Q2 se encuentre en el intervalo de  $5\pi/6$  a  $3\pi/2$ . En ese lapso, la corriente de carga comienza a fluir a través de Q2. De manera similar el tiristor Q3 comienza a conducir una vez el tiristor Q2 finalice su intervalo.

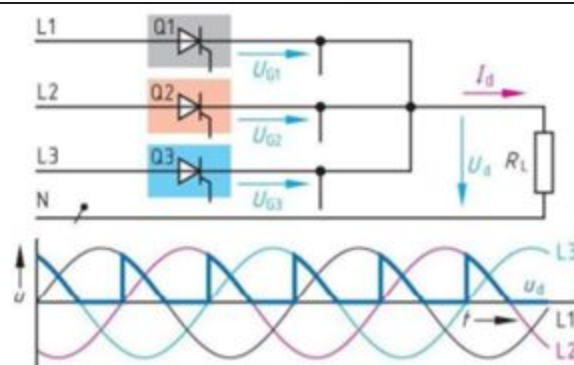


Figura 2. Salida rectificador trifásico controlado

### Tiristores

Son interruptores electrónicos utilizados en circuitos electrónicos de potencia donde es necesario controlar la activación del interruptor. Los tiristores constituyen una familia de dispositivos de tres terminales, entre los que se encuentran: el rectificador controlado de silicio (SCR), el triac, el tiristor de bloqueo por puerta (GTO) y el tiristor MCT o tiristor controlado por MOS (metal-óxido semiconductor). Los tres terminales son el ánodo, el cátodo y la puerta. A veces, se utilizan los términos tiristor y SCR como sinónimos.

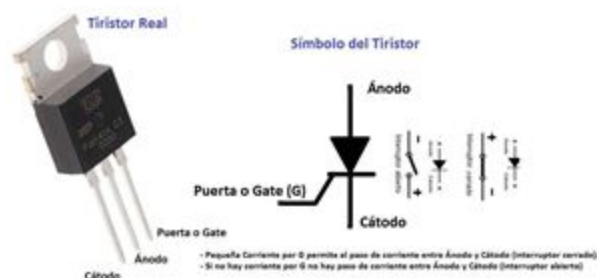


Figura 3. Esquema del tiristor

## II. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

Para esta práctica se solicita realizar el diseño de un circuito convertidor AC-DC monofásico. Utilizando la red eléctrica de 220 V y una carga emulando un motor de 5 HP.

El primer paso para llevar a cabo este objetivo es determinar el modelo que se asemeje más a un motor DC y de qué tipo, en este orden de ideas se toma el modelo de motor de corriente directa paralelo, el cuál es conformado por componentes inductores y resistivos en su campo y en la armadura, como se observa en la figura 1

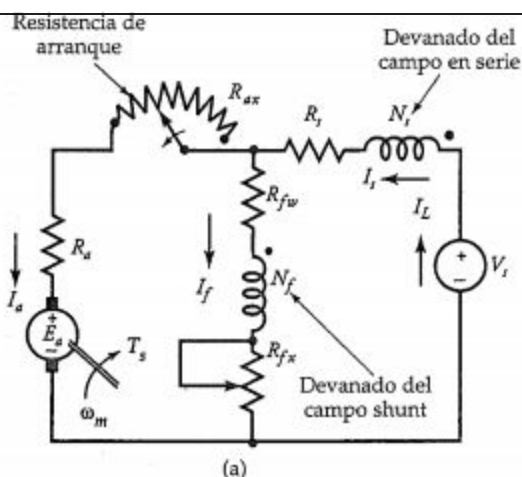


Figura 1. Modelo motor DC paralelo

Con base a este modelo se realiza un circuito con un rectificador de media onda, pues aquí se lleva a cabo la rectificación de la señal en niveles AC a niveles DC, se cuenta con un diodo de libre circulación (D2) cuya función es permitir el flujo constante de corriente, sin permitir que los elementos activos se carguen

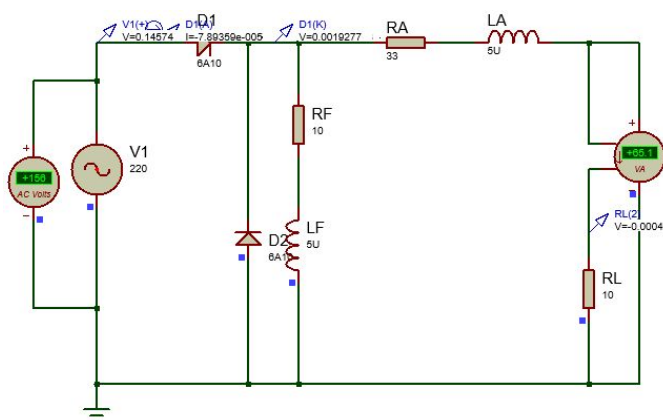


Figura 2. Circuito equivalente

### III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

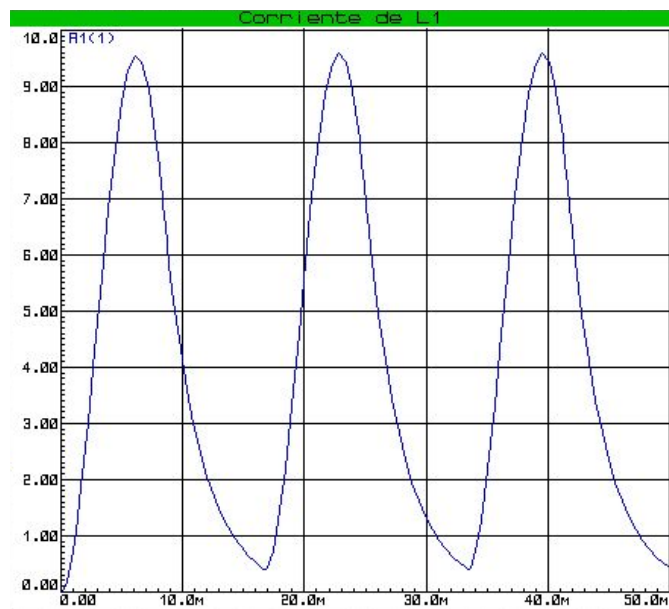


Figura 3. Circuito equivalente

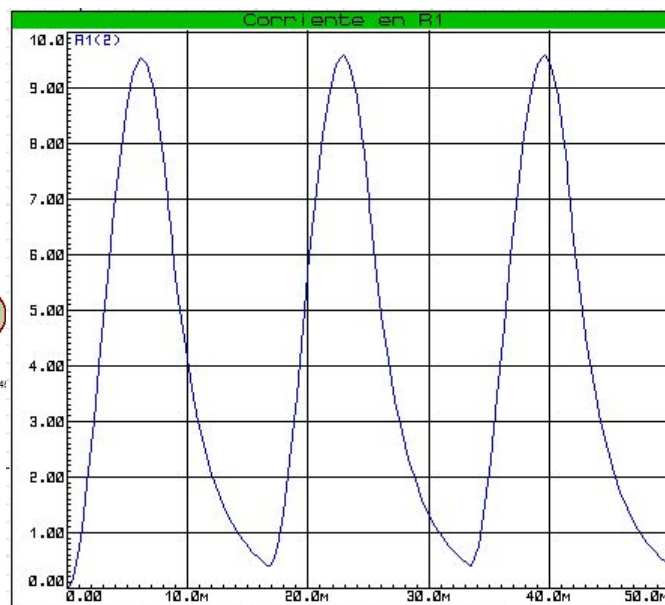


Figura 4. Circuito equivalente

Como se puede ver en las gráficas la curva de corriente de la inductancia (Figura 4) es igual a la de la carga resistiva (Figura 3) debido a que el diodo D2 es uno de libre circulación, este diodo permite que siempre exista un flujo de corriente y no permite que la bobina se cargue con la corriente manteniendo el flujo por esa malla.

También se puede ver que no llegan a los 13.5 A de corriente debido a que está trabajando con el voltaje RMS.

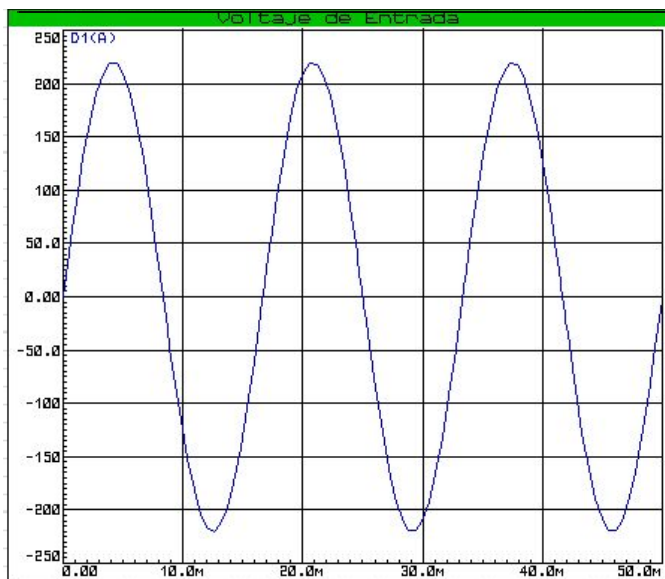


Figura 5. Circuito equivalente

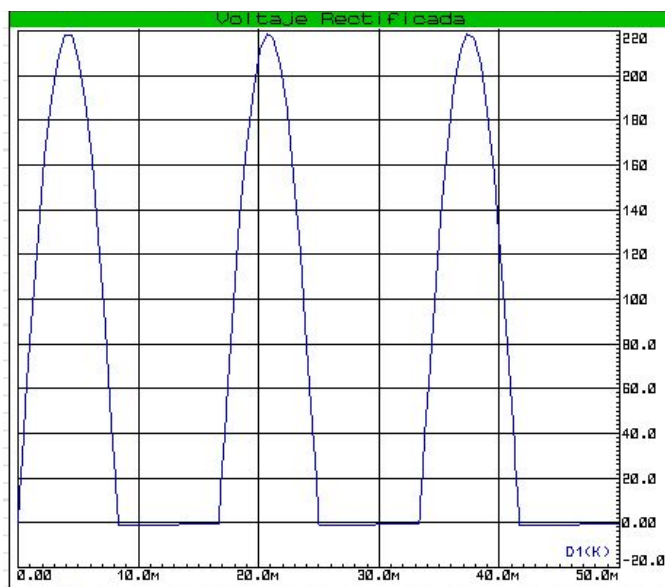


Figura 6. Circuito equivalente

Los resultados son esperados en la gráfica de voltaje (figura 5 y 6) debido a que está llegando a los 220V pico.

### CALIDAD DE LA ENERGÍA

Por medio del análisis de Fourier que permite hacer el software Proteus (Anexo 1) se realiza la medición de armónicos que afectan a la fuente, relacionando directamente la corriente pues esta es la que exige a la fuente con base a la carga y el valor de corriente que necesite para ser suplida. La tabla 1 se genera teniendo en cuenta los picos de la gráfica y en las frecuencias establecidas

Frecuencia (Hz)	Corriente (A)
60	13.5

120	5.74
240	1.15
360	492m
480	273m
600	173m
720	120m
840	87.9m

Tabla1. Valores de los armónicos de la señal

Gracias a los resultados obtenidos se puede realizar una estimación de la calidad de la energía, utilizando la ecuación 1 se realiza el cálculo de la distorsión armónica total (THD)

$$THD = \frac{1}{I_{RMS}} \sqrt{\sum_{h=2}^n I_{hRMS}^2}$$

Ecuación 1. Ecuación para calcular la distorsión armónica total (THD)

$$THD = \frac{1}{13.5} \sqrt{34.63874841}$$

$$THD = 0.43$$

La distorsión armónica total de la fuente es de 43% siendo mucho mayor al 5% establecido en Colombia por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) y la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), según esto la norma CRG-024 de 2005 para medir la distorsión armónica debe seguir Estándar IEC-61000-4-15 y el estándar IEEE 519[1992], en donde se establece que el valor máximo de la THD puede ser 5% por lo cual la fuente no tiene la calidad de la energía requerida, significando así fallas en la red eléctrica a corto y largo plazo, aumentos en los costos por consumos de energía eléctrica pues los picos que tienen pueden llegar a dañar distintos dispositivos por la sobrecarga que puede llegar a producir

### CIRCUITO IMPRESO

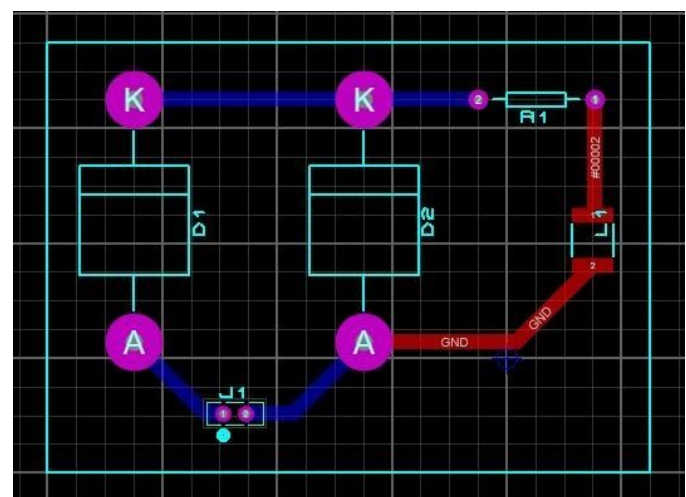


Figura 7. PCB



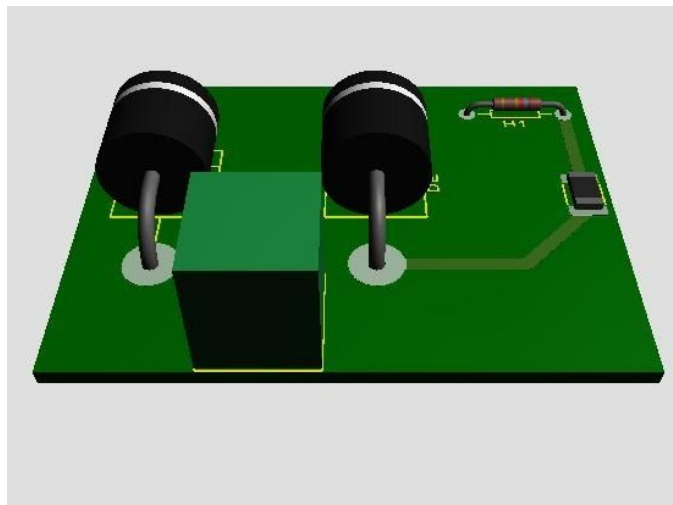


Figura 8. PCB modelo 3D

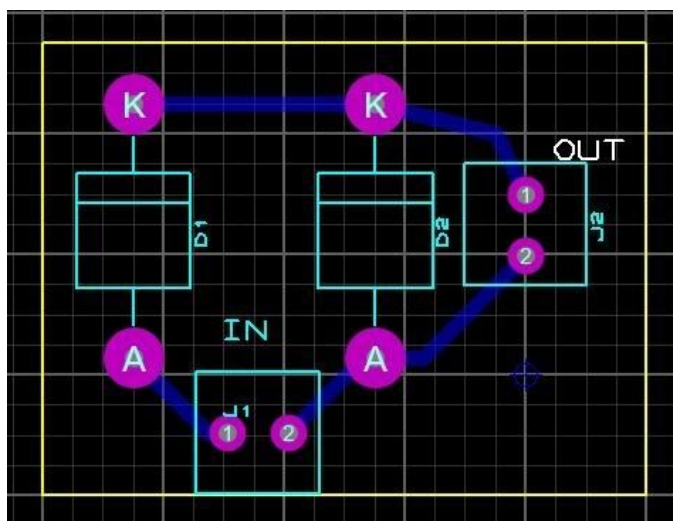


Figura 9. PCB para motor

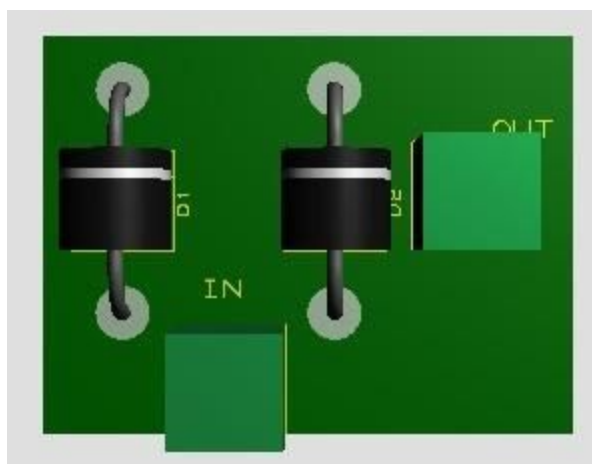


Figura 10. PCB para motor 3D

Para esta práctica se solicita realizar el diseño de un circuito convertidor AC-DC trifásico. Utilizando la red eléctrica de 220 V y una carga emulando un motor de 15 HP.

Con base a este modelo se realiza un circuito con un rectificador de media onda, pues aquí se lleva a cabo la rectificación de la señal en niveles AC a niveles DC, se cuenta con un diodo de libre circulación (D2) cuya función es permitir el flujo constante de corriente, sin permitir que los elementos activos se carguen

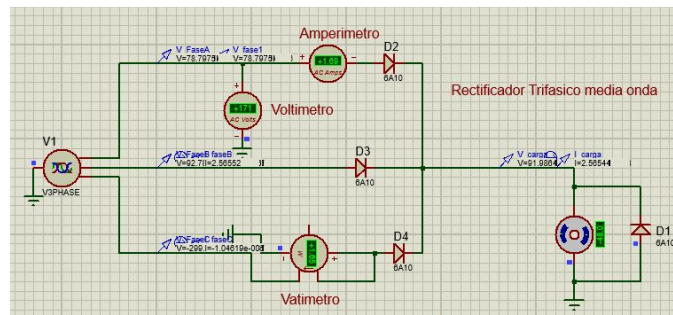


Figura 1. Circuito equivalente

#### IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

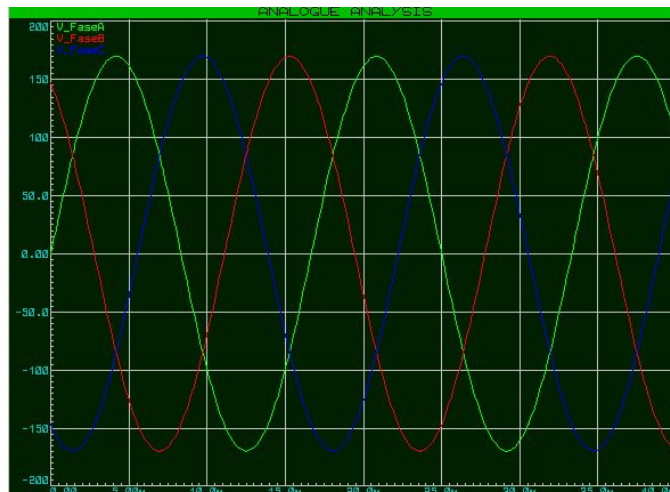


Figura 2. Circuito equivalente

Aquí se puede apreciar voltaje en cada una de las fases también se puede ver que las diferentes fases alcanzan el valor máximo en diferentes tiempos y que solo una de las fases está en ese valor máximo en ese momento esto me dice que en ese momento esa fase es la que está trabajando.

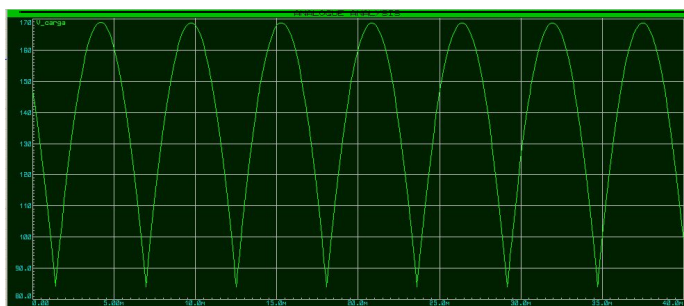


Figura 3. Circuito equivalente

En la figura 3 se puede apreciar el voltaje de la carga gracias al rectificador de media onda, al compararla con la gráfica de voltaje en las fases el voltaje de la carga esta tomando los valores máximos en cada una de las fases, además como hay una carga resistiva e inductiva mucho de ese voltaje se aprovecha para la carga resistiva del motor.

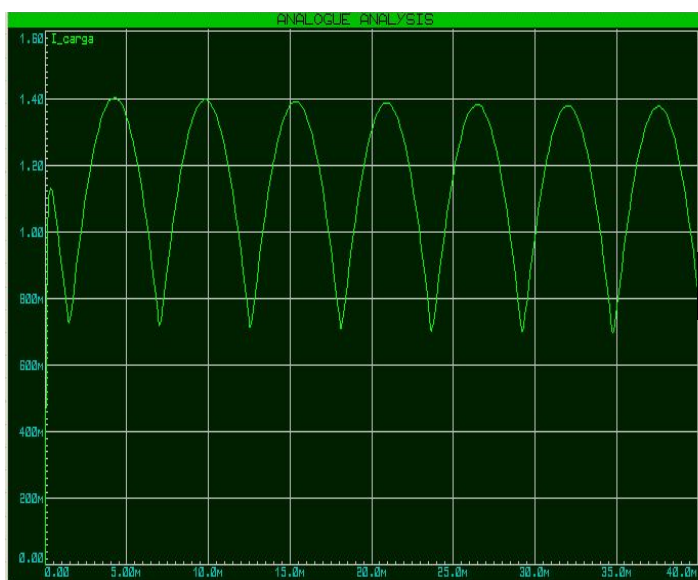


Figura 5. Circuito equivalente

En el caso de la corriente tiene el mismo comportamiento que en el monofásico, solo que aquí hay mas elementos pasivos lo que hace que halla variaciones

### CALIDAD DE LA ENERGÍA

Por medio del análisis de Fourier que permite hacer el software Proteus (Anexo 1) se realiza la medición de armónicos que afectan a la fuente, relacionando directamente la corriente pues esta es la que exige a la fuente con base a la carga y el valor de corriente que necesite para ser suplida. La tabla 1 se genera teniendo en cuenta los picos de la gráfica y en las frecuencias establecidas

Frecuencia (Hz)	Corriente (A)
60	4.50
120	2.6
240	800m
300	500m

420	100m
480	40m
600	36m
780	10m

Tabla1. Valores de los armónicos de la señal

Gracias a los resultados obtenidos se puede realizar una estimación de la calidad de la energía, utilizando la ecuación 1 se realiza el cálculo de la distorsión armónica total (THD)

$$THD = \frac{1}{I_{1RMS}} \sqrt{\sum_{h=2}^n I_{hRMS}^2}$$

Ecuación 1. Ecuación para calcular la distorsión armónica total (THD)

$$THD = 38.61\%$$

Se realizó el análisis de Fourier en la carga (Anexo 2 y Anexo 3), de esta manera se puede ver la distorsión armónica en el motor, el cual también tiene variaciones muy similares a las de la fuente, sin embargo, se diferencia en los valores obtenidos, los cuales son consignados en la tabla 2. Teniendo una mayor distorsión en el potencial eléctrico debido a la conmutación que este tiene, sin embargo; los amónicos en la carga son mucho menores a los de la red, debido a que cuenta con un circuito de rectificación para aprovechar los ciclos positivos

THD (CORRIENTE)	10%
THD (VOLTAJE)	25%

Tabla II. Análisis de Fourier en la carga

### CIRCUITO IMPRESO

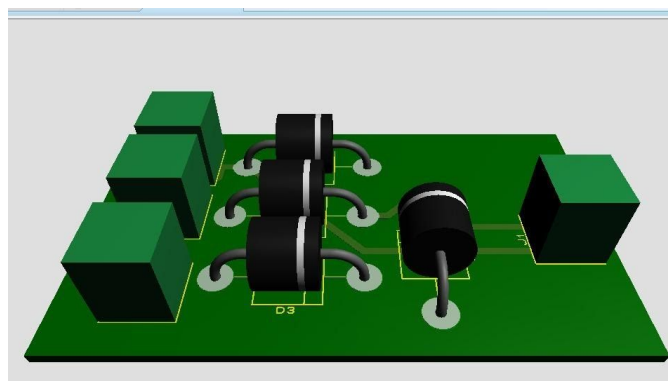


Figura 10. PCB para motor 3D

### Laboratorio 3

Para esta práctica se solicita realizar el diseño de un circuito convertidor AC-DC monofásico. Utilizando la red eléctrica de 220 V a 60 Hz y una carga emulando un motor de 5 HP. El primer paso para llevar a cabo este objetivo es determinar el modelo que se asemeje más a un motor DC y de qué tipo, en este orden de ideas se toma el modelo de motor de corriente directa paralelo, el cuál es conformado por componentes

inductores y resistivos en su campo y en la armadura, como se muestra en la Figura 4.

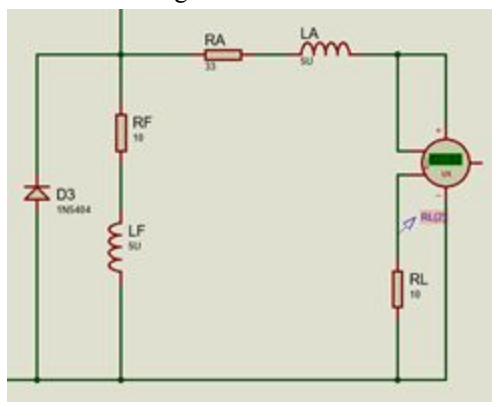


Figura 4. Simulación circuito RL equivalente a motor DC

Para la selección de componentes se utilizó un optoacoplador de referencia PC817, este nos permite controlar el circuito de potencia de corriente alterna con el circuito de corriente continua, puesto que en muchas ocasiones es necesario realizar este tipo de control, donde el microcontrolador trabaja con corriente directa a un voltaje bajo, se implementa para protección del microcontrolador de la red 220V. El relé opto acoplador de referencia MOC3021 [3], permite una conexión aislada entre dos circuitos que trabajan a diferentes voltajes como lo es el microprocesador Arduino y la entrada de 220 V, de esta forma se controla el voltaje de la red para que el microprocesador genere el pulso adecuadamente.

Una vez programado el microcontrolador, el pulso de salida de este, entra a un triac de corriente alterna, donde su función es cerrar el paso entre la terminal del ánodo y a terminal del cátodo para dejar pasar corriente de salida cuando se le aplica un cantidad pequeña en la terminal de Puerta, siendo esta terminal la que me permite la activación de corriente. El opto acoplador permite controlar la corriente AC, este se colocó en la salida Puerta del tiristor, lo cual garantiza que la onda este rectificadada en media onda para la carga DC del motor de 5Hp, como se muestra en la Figura 5.

La red Snubber, es utilizada para proteger los tiristores, implementando uno de estos para el control de rectificado con un determinado ángulo de disparo. Para escoger la red Snubber adecuada se debe tener en cuenta los picos de corriente. Para esta implementación, se utilizó una red Snubber RC, como se muestra en la Figura 6, donde se tiene una resistencia y un capacitor en paralelo al tiristor como circuito de protección.

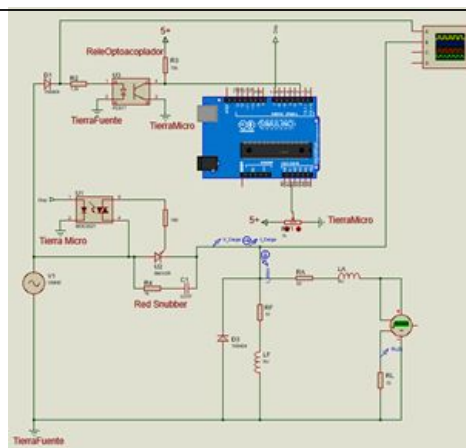


Figura 5. Circuito convertidor AC- DC monofásico controlado

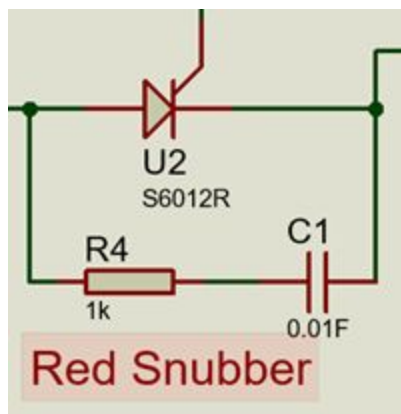
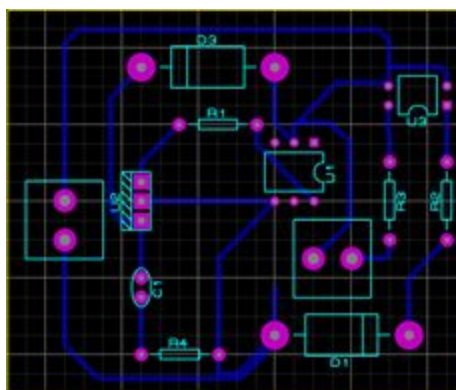


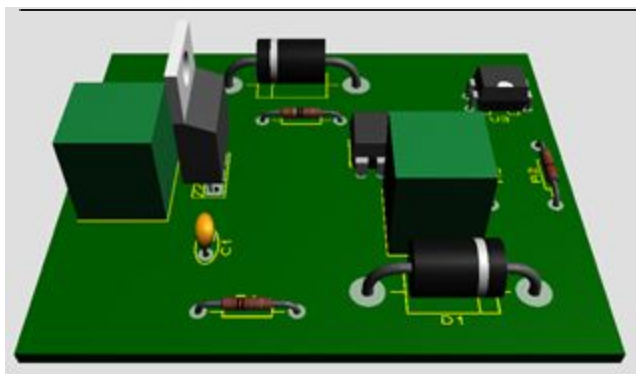
Figura 6. Red Snubber RC

#### Diseño circuito impreso

Una vez simulador el convertidor, se diseñó el circuito impreso con el fin de una implementación futura teniendo en cuenta los caminos con los que esta hizo debido a la corriente que puede adquirir, como se muestra en la Figura 7 y el modelo 3D de esta en la Figura 8.







**Figura 8. Diseño circuito impreso 3D**

#### Factor de potencia

El factor de potencia permite medir la eficiencia del consumo eléctrico al momento de convertirlo en potencia útil, dada por la siguiente ecuación:

$$FP = P/S = P/(V_{rms} I_{rms})$$

Por medio de un voltímetro y un amperímetro del simulador Proteus se realizan las respectivas medidas teniendo de ello el  $V_{rms}$  y la  $I_{rms}$ , siendo esta la potencia aparente 'S', mientras que con un vatímetro se tiene la potencia útil 'P'. A partir de estos datos, se realizó la Tabla 1 conforme a la variación de ángulo de disparo del sistema.

Factor de potencia			
Angulo de disparo del sistema	Potencia aparente [KVA]	Potencia útil [KW]	Factor de potencia
10°	0.8416	0.720	0.8554
30°	1.3361	1.06	0.7933
50°	1.581	1.36	0.8602
70°	1.9685	1.72	0.873
90°	2.1235	1.82	0.8570

**Tabla 1. Factor de potencia en base a los cambios de ángulos de disparo del sistema.**

#### Análisis de resultados

En la Figura 9, se evidencia la onda senoidal de la fuente de 220 V junto a la onda rectificada de azul de media onda, en este caso se tiene un ángulo de disparo del 100% con los parámetros dados por la práctica. La variación del ángulo de disparo permite controlar la velocidad del motor DC, en este caso (Ver Figura 10), se tiene un ángulo de 50% donde se visualiza la onda azul en un 50% frente a la onda amarilla, cumpliendo con el control dado por el ángulo de disparo.

En la Figura 11, se tiene un ángulo de disparo del 20%, lo que corrobora el buen funcionamiento respecto al rectificador de media onda controlado por el tiristor. El voltaje se mantiene en 220 V, como se muestra en la Figura 12, donde se tiene el voltaje y la corriente en la carga, siendo esta ultima no mayor que 30 A.

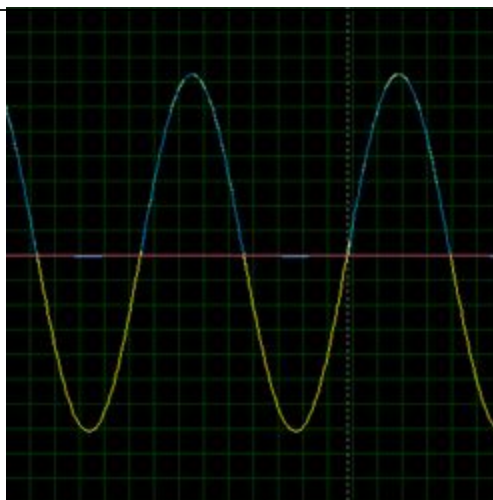


Figura 9. Onda rectificada con ángulo de disparo del 100%.

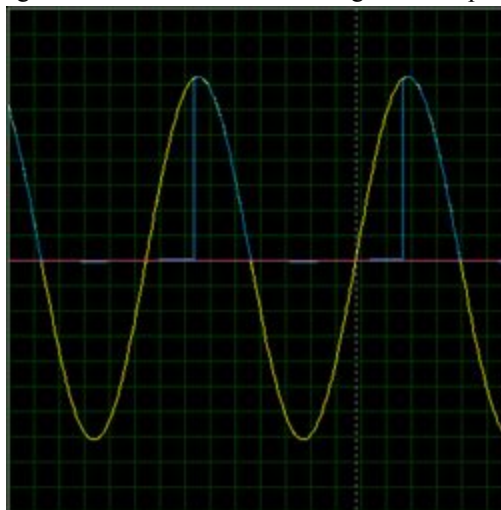


Figura 10. Onda rectificada con ángulo de disparo del 50%.

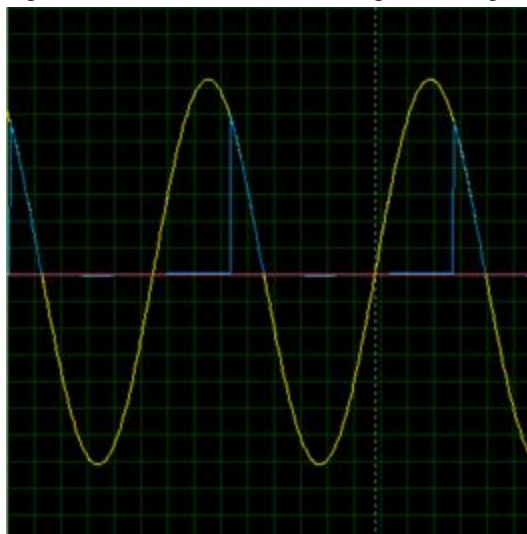


Figura 11. Onda rectificada con ángulo de disparo del 20%.



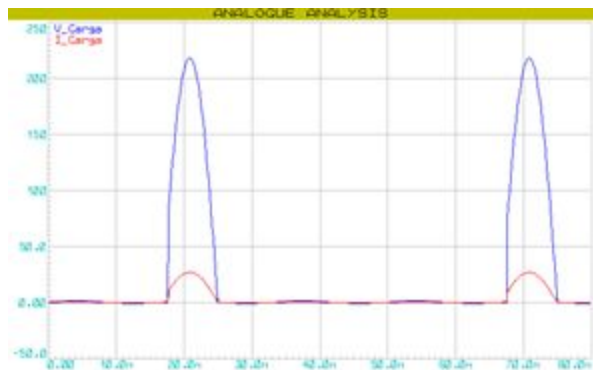


Figura 12. Voltaje y corriente en la carga

### Análisis calidad de la energía

Por medio del analizador del espectro Fourier del simulador Proteus, se realiza el análisis de distorsión armónica que se tiene en la fuente para un ángulo de disparo del 50% como se muestra en la Figura 13, para el voltaje en la carga (Ver Figura 14) y la corriente en el motor (Ver Figura 15).

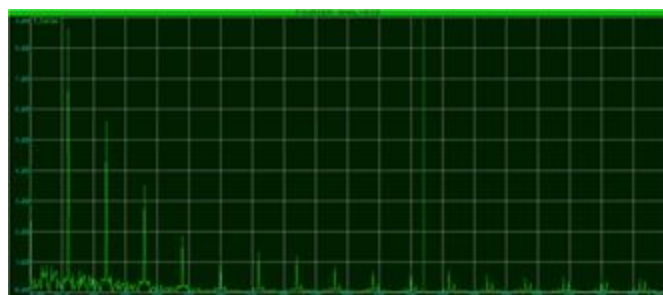


Figura 13. Análisis de Fourier en la fuente



Figura 14. Análisis de Fourier del voltaje en la carga

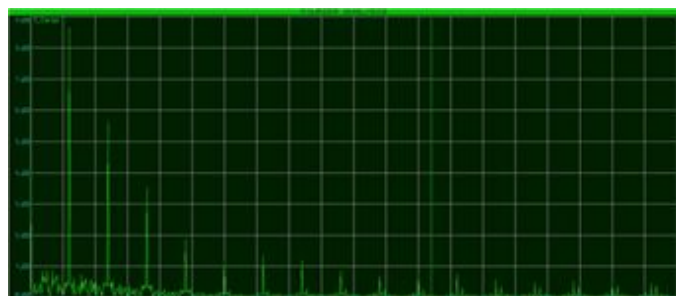


Figura 15. Análisis de Fourier de la corriente en la carga

Por medio de un Excel, se realiza los cálculos correspondientes cambiando los ángulos de disparo del sistema donde nos da unos porcentajes organizados en la Tabla 2.

Distorsión armónica total	
Angulo de disparo del sistema	THD
30°	89%
50°	80.58%
70°	59%
90°	43%
100°	39%

Tabla 2. Cálculos de distorsión armónica total

La norma CRG-024 de 2005 [4] para medir la distorsión armónica debe seguir Estándar IEC-61000-4-15 y el estándar IEEE 519, donde de acuerdo a la Figura 16, se tiene un limite de THDV del 5%, por lo que con los datos de la Tabla 2, se tiene un porcentaje elevado conforme al aceptable por la norma.



Figura 16. Norma CREG 024 – 2005.

### Implementación industrial

En la simulación inicial, se tiene para el cambio de un ángulo de disparo un potenciómetro, sin embargo, se piensa un aplicación donde se ingrese el valor de salida deseado y automáticamente se ajuste el ángulo de disparo para obtener dicho voltaje. En este caso, se usó la comunicación serial desde Proteus hacia el software MatLab por medio de una interfaz del modelo físico de un COM (Ver Figura 17), la verificación de la comunicación entre Proteus y el software donde se hará la aplicación se muestra en la Figura 18.

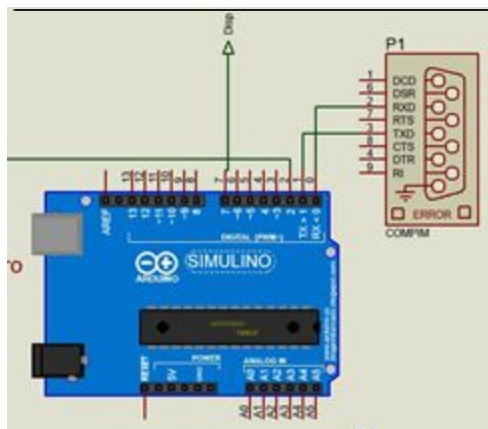


Figura 17. Cambio de potenciómetro a simulador COM

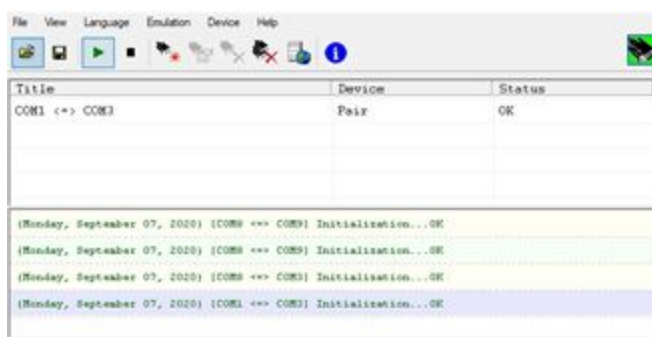


Figura 18. Comunicación entre Proteus y MatLab

El software donde se desarrolló la aplicación es MatLab (Ver Figura 19), allí se realizan los cambios de ángulo conforme al valor deseado de voltaje en la salida, lo que indica un cambio de velocidad frente al motor simulado DC.



Figura 19. Aplicación de MatLab

#### Laboratorio 4

Para esta práctica se solicita realizar el diseño de un circuito convertidor AC-DC trifásico. Utilizando la red eléctrica de 220 V a 60 Hz y una carga emulando un motor de 15 HP.

El primer paso para llevar a cabo este objetivo es determinar el modelo que se asemeje más a un motor DC y de qué tipo, en este orden de ideas se toma el modelo de motor de corriente directa paralelo, el cuál es conformado por componentes

inductores y resistivos en su campo y en la armadura, como se muestra en la Figura 4.

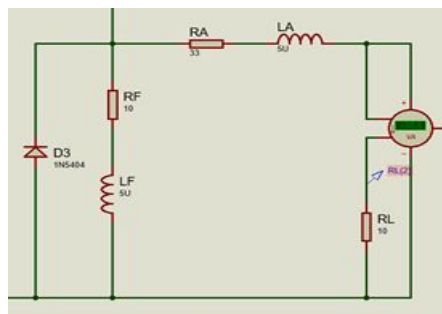


Figura 4. Simulación circuito RL equivalente a motor DC

En este caso, se implementaron los mismos componentes que en el rectificador monofásico controlado, sin embargo, en cuestión a la cantidad se incremento debido a que se tiene un control por cada fase, lo que implica en la simulación el tener tres microcontroladores Arduino, así mismo con los demás componentes.

Se recuerda la selección de componentes, utilizando un optoacoplador de referencia PC817, este nos permite controlar el circuito de potencia de corriente alterna con el circuito de corriente continua, puesto que en muchas ocasiones es necesario realizar este tipo de control, donde el microcontrolador trabaja con corriente directa a un voltaje bajo, se implementa para protección del microcontrolador de la red 220V. En este caso, se debe garantizar la protección de los tres microcontroladores implementados.

El relé opto acoplador de referencia MOC3021 [3], permite una conexión aislada entre dos circuitos que trabajan a diferentes voltajes como lo es el microprocesador Arduino y la entrada de 220 V, de esta forma se controla el voltaje de la red para que el microprocesador genere el pulso adecuadamente; de este componente se tienen tres elementos puesto que son independientes en cada fase.

Una vez programado cada uno de los microcontroladores, el pulso de salida de cada uno de estos, entra a un triac de corriente alterna, donde su función es cerrar el paso entre la terminal del ánodo y a terminal del cátodo para dejar pasar corriente de salida cuando se le aplica un cantidad pequeña en la terminal de Puerta, siendo esta terminal la que me permite la activación de corriente.

El opto acoplador permite controlar la corriente AC, este se coloco en la salida Puerta del tiristor, lo cual garantiza que la onda este rectificadas en media onda para la carga DC del motor de 15Hp, como se muestra en la Figura 5.

La red Snubber, es utilizada para proteger los tiristores, en este caso, se tienen tres redes Snubber, implementando uno de estos para el control de rectificado con un determinado ángulo de disparo. Para escoger la red Snubber adecuada se debe

tener en cuenta los picos de corriente. Para esta implementación, se utilizó una red Snubber RC, como se muestra en la Figura 6, donde se tiene una resistencia y un capacitor en paralelo al tiristor como circuito de protección.

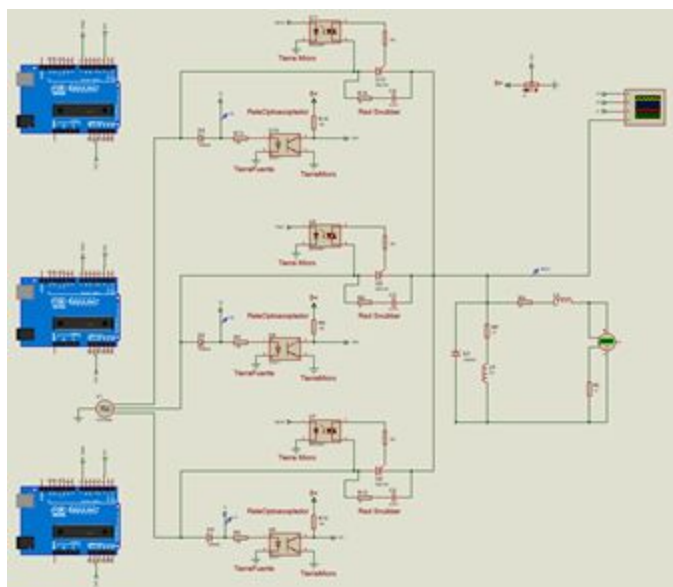


Figura 5. Circuito convertidor AC- DC trifásico controlado

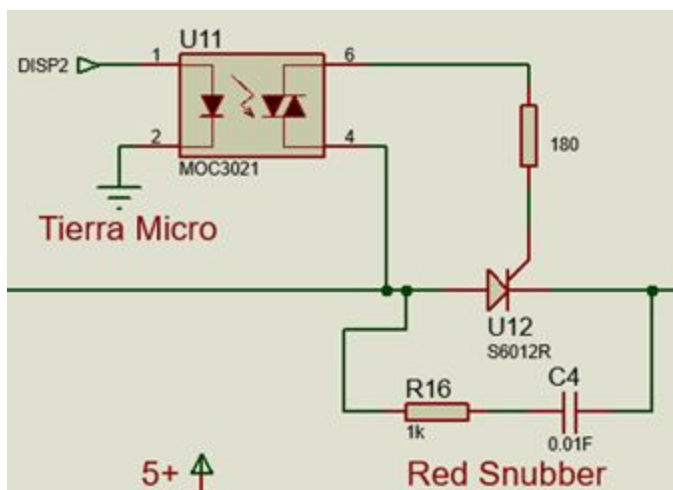


Figura 6. Red Snubber RC

### Diseño circuito impreso

Una vez simulador el convertidor, se diseña el circuito impreso con el fin de una implementación futura teniendo en cuenta los caminos con los que esta hizo debido a la corriente que puede adquirir, como se muestra en la Figura 7 y el modelo 3D de esta en la Figura 8.

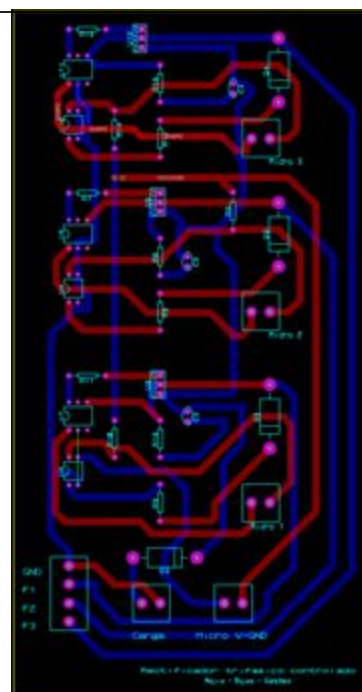


Figura 7. Diseño circuito impreso

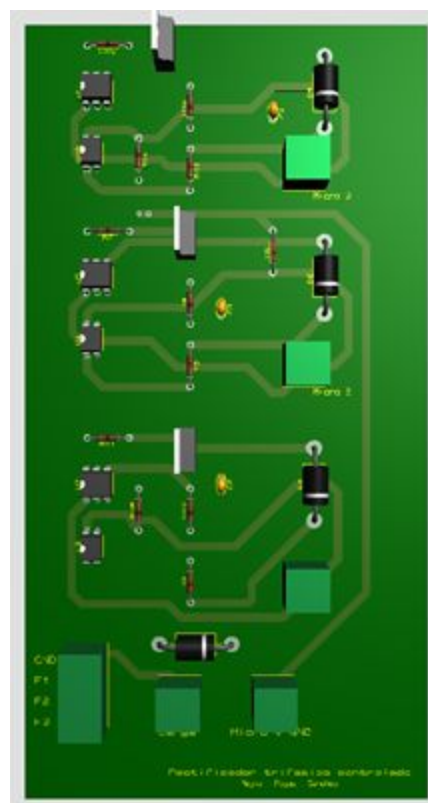


Figura 8. Diseño circuito impreso 3D



## Factor de potencia

El factor de potencia permite medir la eficiencia del consumo eléctrico al momento de convertirlo en potencia útil, dada por la siguiente ecuación:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{rms} I_{rms}}$$

Por medio de un voltímetro y un amperímetro del simulador Proteus se realizan las respectivas medidas teniendo de ello el y la , siendo esta la potencia aparente 'S', mientras que con un vatímetro se tiene la potencia útil 'P'. A partir de estos datos, se realizaron tablas conforme a la variación del porcentaje de carga en un 20%, 40%, 60% y 80%, en la Tabla 1 se tiene un ángulo de disparo del 30%, en la Tabla 2 se tiene un ángulo de disparo del 50% y en la Tabla 3, se tiene un ángulo de disparo del 70%.

Factor de potencia Angulo 30%			
Porcentaje de carga	Potencia aparente [VA]	Potencia útil [W]	Factor de potencia
20%	190.8	150.7	0.79
40%	355.2	277.1	0.78
60%	476.4	357.3	0.75
80%	628.8	477.8	0.76

Tabla 1. Factor de potencia en base a los cambios de porcentaje de carga con ángulo de disparo del sistema del 30%.

Factor de potencia Angulo 50%			
Porcentaje de carga	Potencia aparente [VA]	Potencia útil [W]	Factor de potencia
20%	183.6	141.38	0.77
40%	244.8	181.1	0.74
60%	324.0	246.2	0.76
80%	415.2	303.1	0.73

Tabla 2. Factor de potencia en base a los cambios de porcentaje de carga con ángulo de disparo del sistema del 50%.

Factor de potencia Angulo 70%			
Porcentaje de carga	Potencia aparente [VA]	Potencia útil [W]	Factor de potencia
20%	84.0	63.0	0.75
40%	114.1	83.2	0.73
60%	157.2	110.1	0.70
80%	188.4	139.4	0.74

Tabla 3. Factor de potencia en base a los cambios de porcentaje de carga con ángulo de disparo del sistema del 70%.

En la Figura 9, se evidencia las tres ondas senoidal de la fuente de 220 V junto a la onda rectifica de azul de media onda, en este caso se tiene un ángulo de disparo del 30% con los parámetros dados por la práctica. La variación del ángulo de disparo permite controlar la velocidad del motor DC, en

este caso (Ver Figura 10), se tiene un ángulo de 50% donde se visualiza la onda azul en un 50% frente a las demás ondas, cumpliendo con el control dado por el ángulo de disparo.

En la Figura 11, se tiene un ángulo de disparo del 80%, lo que corrobora el buen funcionamiento respecto al rectificador de media onda controlado por el tiristor.

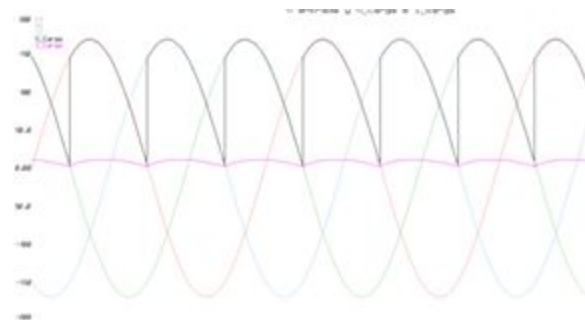


Figura 9. Onda rectificada con ángulo de disparo del 30%.

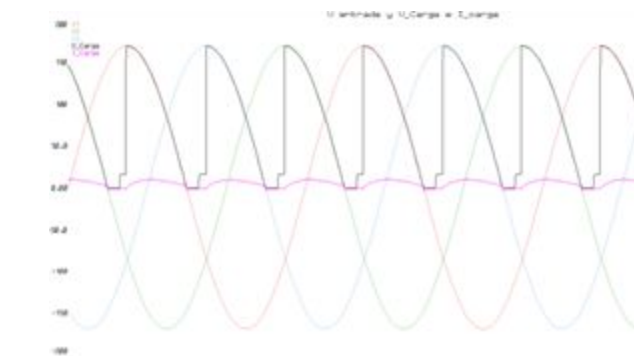


Figura 10. Onda rectificada con ángulo de disparo del 50%.

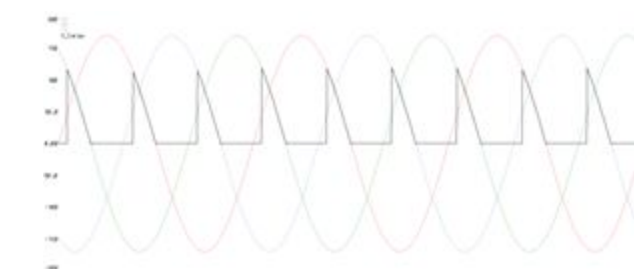


Figura 11. Onda rectificada con ángulo de disparo del 80%

De igual forma que en el rectificador monofásico controlado de media onda, el diodo que se pone en antiparalelo al motor, cumple con la función de que la corriente quede en un ciclo continuo, dado el caso en el que se des energice el sistema y no quede cargado el motor.

Se observa, que al utilizar la configuración de 3 pulsos este circuito se rectifica solamente el semiciclo positivo de las



señales de voltaje de cada fase, por lo tanto, su eficiencia no es buena (menor al 50%) debido a que se desperdicia el semiciclo negativo.

Los SCR conducen incluso después de haber sido polarizados en sentido inverso, ya que la corriente de carga no puede modificar su magnitud en forma brusca. Entre mayor sea el ángulo de disparo, se tendrá un valor menor del voltaje obtenido en la carga, esto debido a que la conducción forzada de los diodos provoca que parte de la señal de voltaje aparezca en el lado negativo y el valor de voltaje medio será inferior.

El factor de potencia es similar respecto al rectificador monofásico controlado implementado en la práctica anterior, con la diferencia del ángulo de disparo, mientras mayor sea el ángulo de disparo de los SCR, se tendrán bajas potencias, sin embargo, los factores de potencia en este caso son similares. Se contempla en el campo ideal puesto que es una simulación, sin embargo, se prevé que, al recortar la señal de voltaje aplicada en la carga, se tendrá una mayor distorsión lo que implica que si el ángulo de disparo es menor, así mismo será su factor de potencia.[6]

### Análisis calidad de la energía

Por medio del analizador del espectro Fourier del simulador Proteus, se realiza el análisis de distorsión armónica que se tiene en la fuente, puesto se encuentra en la frecuencia de la misma red (60Hz) para un ángulo de disparo del 50% como se muestra en la Figura 13, para el voltaje en la carga (Ver Figura 14) y la corriente en el motor (Ver Figura 15).

Angulo de disparo del 10%



Figura 12. Análisis de Fourier en las fases con ángulo de disparo del 10%

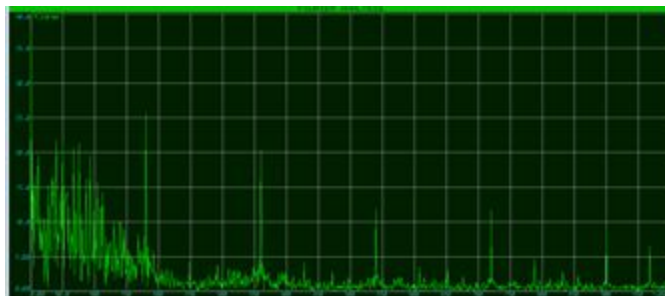


Figura 13. Análisis de Fourier del voltaje en la carga con ángulo de disparo del 10%

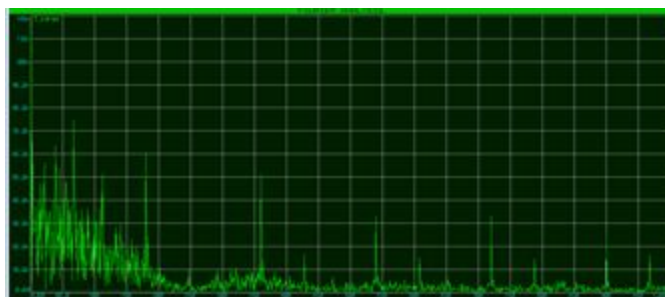


Figura 14. Análisis de Fourier de la corriente en la carga con ángulo de disparo del 10%

### Angulo de disparo del 30%

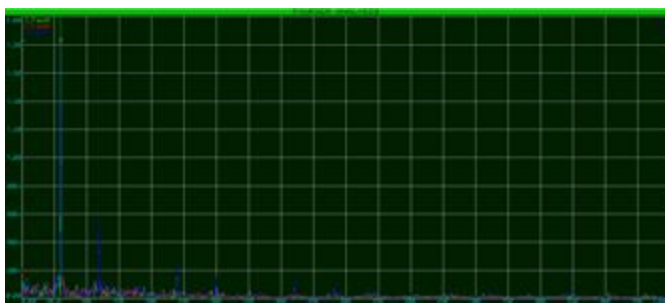


Figura 15. Análisis de Fourier en las fases con ángulo de disparo del 30%



Figura 16. Análisis de Fourier del voltaje en la carga con ángulo de disparo del 30%

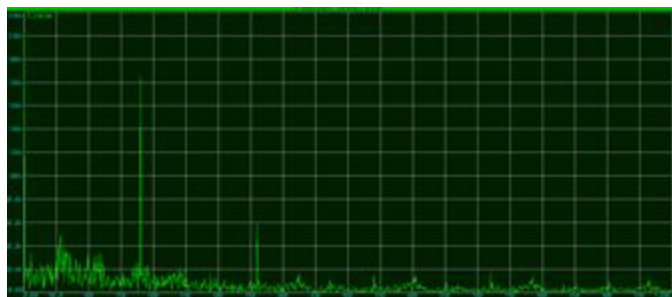


Figura 17. Análisis de Fourier de la corriente en la carga con ángulo de disparo del 30%

**Angulo de disparo del 50%**



Figura 18. Análisis de Fourier en las fases con ángulo de disparo del 50%

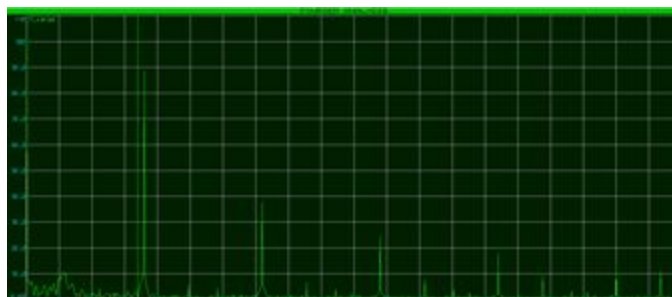


Figura 19. Análisis de Fourier del voltaje en la carga con ángulo de disparo del 50%



Figura 20. Análisis de Fourier de la corriente en la carga con ángulo de disparo del 50%

**Angulo de disparo del 70%**



Figura 21. Análisis de Fourier en las fases con ángulo de disparo del 70%



Figura 22. Análisis de Fourier del voltaje en la carga con ángulo de disparo del 70%



Figura 23. Análisis de Fourier de la corriente en la carga con ángulo de disparo del 70%

**Angulo de disparo del 90%**



Figura 24. Análisis de Fourier en las fases con ángulo de disparo del 90%

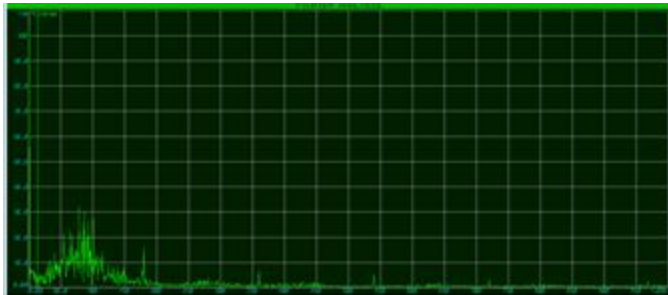


Figura 25. Análisis de Fourier del voltaje en la carga con ángulo de disparo del 90%



Figura 26. Análisis de Fourier de la corriente en la carga con ángulo de disparo del 90%

**Angulo de disparo del 100%**



Figura 27. Análisis de Fourier en las fases con ángulo de disparo del 100%



Figura 28. Análisis de Fourier del voltaje en la carga con ángulo de disparo del 100%



Figura 29. Análisis de Fourier de la corriente en la carga con ángulo de disparo del 100%

Por medio de un Excel, se realiza los cálculos correspondientes cambiando los ángulos de disparo del sistema donde nos da unos porcentajes organizados en la Tabla 2.

Distorsión armónica total	
Angulo de disparo del sistema	THD
10°	20.3%
30°	34.5%
50°	20.3%
70°	32.6%
90°	28%
100°	18%

Tabla 4. Cálculos de distorsión armónica total

La norma CRG-024 de 2005 [4] para medir la distorsión armónica debe seguir Estándar IEC-61000-4-15 y el estándar IEEE 519, donde de acuerdo a la Figura 16, se tiene un límite de THDV del 5%, por lo que con los datos de la Tabla 4, se tiene un porcentaje elevado conforme al aceptable por la norma, sin embargo, es mas pequeño en comparación a los datos del rectificador monofásico controlado.

### Adecuación para un disipador trifásico

Al hablar de disipadores de calor en redes trifásicas, normalmente se piensa en TRIAC o tiristores, los cuales son dispositivos que mediante un mecanismo evitan que los componentes eléctricos se sobrecalienten, pues este factor puede llegar a ser dañino para los mismos. La aparición de este dispositivo y por el cual es más atractivo que el transistor es porque este último no transfiere calor con el medio con tanta facilidad, llegando así a disminuir su vida útil o presentando fallas en el circuito. Para llevar a cabo la práctica

realizamos la correspondiente determinación de la potencia del motor de la siguiente forma.

$$n = \frac{P_{mec}}{P_{elec}}$$

$$P_{mec} = 15 \text{ HP} = 11.2 \text{ kW}$$

$$P_{elec} = 11.2 \text{ kW} * 0.85 = 9.5 \text{ kW}$$

En este orden de ideas, se selecciona una referencia comercial que logre satisfacer las necesidades de este montaje. El elemento es de la marca Libratherm y su referencia POW-12S-3, la cual soporta hasta 15 kW y 25 A de corriente de fase. Su RJC (Resistencia térmica unión-capsula) corresponde a 3.6°C/kW, de esta manera se obtiene la caída de temperatura en este elemento resistivo:

$$T = R_{JC} P$$

$$T = 3.6 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{kW}} 9.5 \text{ kW} = 34.2 ^{\circ}\text{C}$$

De igual modo su RCD (Resistencia térmica capsula-disipador) es de 0.15 °C/kW, así se calcula la pérdida de temperatura en esta segunda resistencia:

$$T = R_{CD} P$$

$$T = 0.15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{kW}} 9.5 \text{ kW} = 1.425 ^{\circ}\text{C}$$

Teniendo en cuenta que el disipador se encuentra a temperatura ambiente (25°C), el calor a disipar equivale a:

$$T = 100 - \sum T$$

$$T = 100 - (34.2 + 25 + 1.425)$$

$$T_t = 39.4 ^{\circ}\text{C}$$

Siguiendo el anterior punto, para obtener la resistencia térmica del disipador (RDA), se realiza lo que se presenta a continuación:

$$R_{DA} = \frac{T_t}{P}$$

$$R_{DA} = \frac{39.4^{\circ}\text{C}}{9.5 \text{ kW}} = 4.14 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{kW}}$$

## Implementación industrial

En la simulación inicial, se tiene para el cambio de un ángulo de disparo un potenciómetro, sin embargo, se piensa un

aplicación donde se ingrese el valor de salida deseado y automáticamente se ajuste el ángulo de disparo para obtener dicho voltaje. En este caso, se usó la comunicación serial desde Proteus hacia el software MatLab por medio de una interfaz del modelo físico de un COM (Ver Figura 31), la verificación de la comunicación entre Proteus y el software donde se hará la aplicación se muestra en la Figura 32.

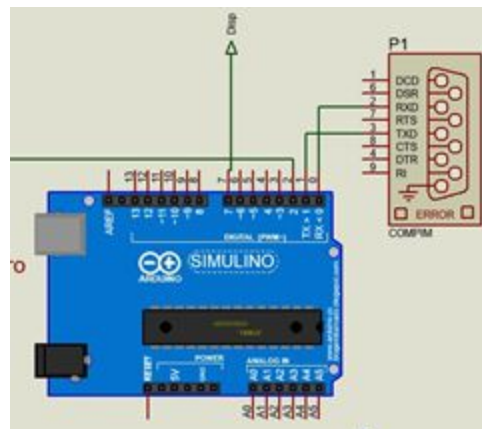


Figura 31. Cambio de potenciómetro a simulador COM

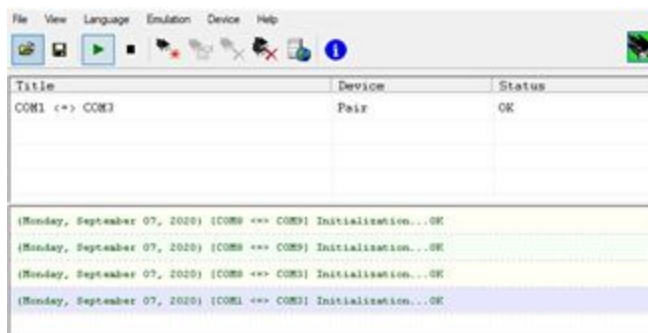


Figura 32. Comunicación entre Proteus y MatLab

El software donde se desarrolló la aplicación es MatLab (Ver Figura 33), allí se realizan los cambios de ángulo conforme al valor deseado de voltaje en la salida, lo que indica un cambio de velocidad frente al motor simulado DC.





Figura 33. Aplicación de MatLab

## V. CONCLUSIONES

El diodo D1, recorta la onda según establezca el circuito de control. Este circuito de control está preparado para proteger de posibles sobretensiones. Opcionalmente se puede colocar un condensador para mejorar la estabilidad de la alimentación del motor.

Los resultados dados en la simulación de los diferentes comportamiento de corriente y voltajes son los esperados.

Revisando los datos del porcentaje de distorsión total armónica respecto al rectificador monofásico, el porcentaje es más bajo esto se debe al número de fases, esta medición es útil para saber cómo las cargas no lineales afectan, pero no es un cálculo

efectivo para la industria ya que esta se mide por medio de normas y regulaciones como Estándar IEC-61000-4-15 y el estándar IEEE 519[1992] las cuales para dar un resultado acertado de la calidad de energía requieren equipos adecuados y tiempos de medidos en horas y una certificación para realizarla, sin embargo un dato que nos sirve para saber la calidad de energía es observando los armónicos en la fuente que nos indican que estamos ante una carga no lineal que está generando los armónicos que aparecen en la fuente, estos datos se deben tener en cuenta junto a las normas para hacer un dictamen acertado en la industria y ante las normas establecidas de calidad de energía por el gobierno colombiano.

Al ver la calidad de la energía que mostro el circuito podemos concluir que es baja con respecto a la estándar y la manera para mejorarlo es mediante filtros análogos o un banco de condensadores.

Basados en la teoría por las formas de onda simuladas, se tiene que el rectificador de media onda controlado cumple con las características esperadas, sin embargo, en cuanto a la calidad de energía no cumple con la norma CRG-024 de 2005 para

medir la distorsión armónica siguiendo el Estándar IEC-61000-4-15 y el estándar IEEE 519. Esto nos indica que se pueden traer daños en los componentes del sistema y así mismo tener problemas implementando una aplicación industrial.

El cambio de ángulo de disparo nos indica frente a la distorsión armónica total que a mayor ángulo se tiene un menor porcentaje de armónicos.

Al tener una carga no lineal en el sistema como la representación del motor DC con carga RL, hace que en este se presenten armónicos como se observa en la Figura 13, siendo una calidad de energía baja. Así mismo, se tiene un rango de factor de potencia entre 0.79 y 0.86, donde el rango ideal es 1, este rango nos indica que se requiere de mayor consumo de energía para producir un trabajo útil.

Basados en la teoría por las formas de onda simuladas, se tiene que el rectificador de media onda trifásico controlado cumple con las características esperadas, sin embargo, en cuanto a la calidad de energía no cumple con la norma CRG-024 de 2005 para medir la distorsión armónica siguiendo el Estándar IEC-61000-4-15 y el estándar IEEE 519. Esto nos indica que se pueden traer daños en los componentes del sistema y así mismo tener problemas implementando una aplicación industrial.

El cambio de ángulo de disparo en este caso, tuvo variaciones en un rango del 18% siendo el menor dato dado con un ángulo de disparo del 100% y 35.4% siendo el mayor porcentaje con un ángulo de disparo del 30%. En este caso, se tiene una mejor calidad de energía en comparación a los resultados de la practica anterior de rectificador monofásico controlado.

El THD de corriente en la entrada del convertidor es el mismo obtenido en el caso de rectificador no controlado de prácticas anteriores, puesto que la señal de corriente sólo se desplaza en el ángulo  $\alpha$ , pero la señal tiene la misma forma y no modifica su contenido armónico. Sin embargo, al tener una carga no lineal en el sistema como la representación del motor DC con carga RL se cambió de 5Hp a 15 Hp, hace que en este se presenten armónicos por los efectos de la carga.

Así mismo, se tiene un rango de factor de potencia de 0.7 aproximadamente, donde el rango ideal es 1, este rango nos indica que se requiere de mayor consumo de energía para producir un trabajo útil.



---

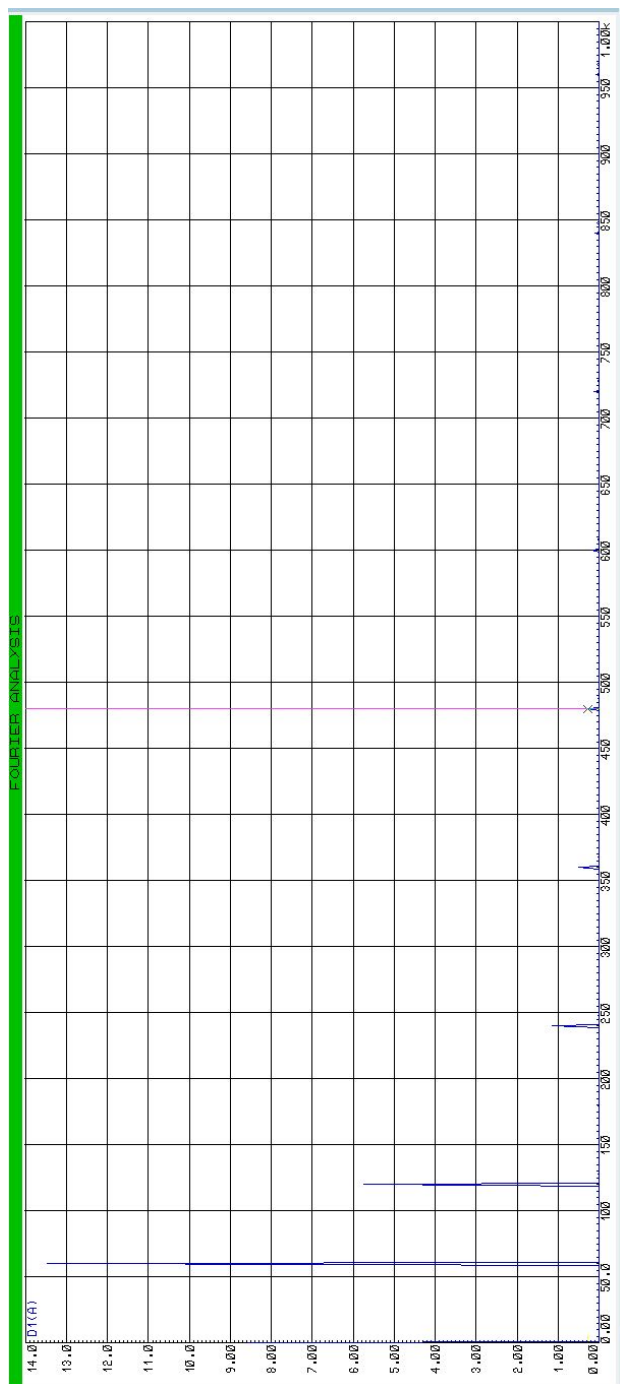
VI. REFERENCIAS

- [1] Assets.new.siemens.com, 2019. [Online]. Available: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:782b04d0-82f4-488a-936b-514cd8bb5d5f/version:1580149154/artei mpresioncatalogosimotics.pdf>. [Accessed: 03- Aug- 2020].
- [2] Guru, Bhag S; Enriquez Brito, Javier; Hiziroglu, Hüseyin R., Máquinas eléctricas y transformadores, México : Oxford University Press, 2003, ISBN: 970-613-673-8
- [3] D.W. Hart. *Electronica de potencia*. Madrid, España: Pearson Education, 2001.
- [4] P. Carrión. *Diseño de redes Snubbers mediante técnicas de optimización, para la protección de tiristores contra sobretensiones*. Castilla, España. Revista Internacional de métodos numéricos para Calculo y diseño de ingeniería Vol 10.2 (111-123), 1994.
- [5] Electrónico Caldas. *Optoacopladores MOC3021*. Manizales, Colombia [Online]. Tomado de: <https://www.electronicoscaldas.com/es/optoacopladores/209-optoacoplador-moc3021.html>
- [6] Rojas, H., Rivas, E. y Jaramillo, A. (2014). Aspectos técnicos y normativos para el monitoreo y medición de armónicos. En: Ingeniería, Vol. 19, No. 2, pp. 129–14



## VII. ANEXOS

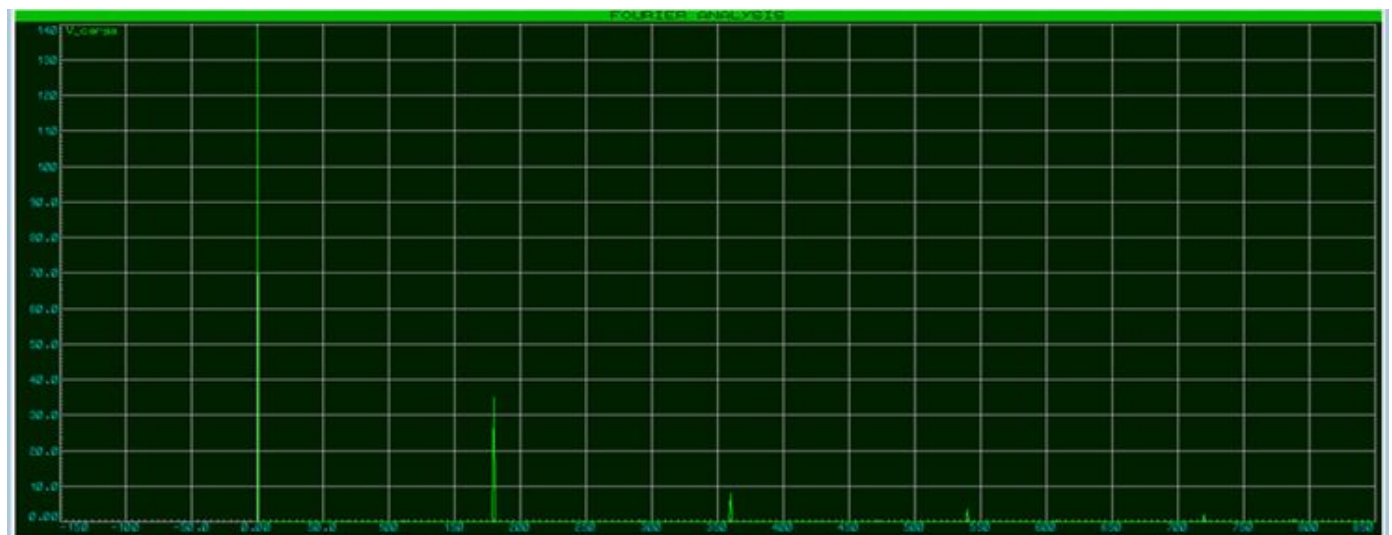
### Anexo 1. Análisis de Fourier armónicos Proteus



## LABORATORIO 2



Anexo 1. Análisis de Fourier en lá fuente







Anexo 2. Análisis de Fourier en lá carga

## LABORATORIO 4

