

# Proyecto Fin de Grado

## Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

### Análisis del funcionamiento de una soldadora de palanquillas siderúrgica

Autor: Carlos Aguilar Aragón

Tutor: José María Maza Ortega

Dpto. Eléctrica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024





Proyecto Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

# **Análisis del funcionamiento de una soldadora de palanquillas siderúrgica**

Autor:  
Carlos Aguilar Aragón

Tutor:  
José María Maza Ortega  
Catedrático de Universidad

Ingeniería Eléctrica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2024



Proyecto Fin de Grado: Análisis del funcionamiento de una soldadora de palanquillas siderúrgica

Autor: Carlos Aguilar Aragón

Tutor: José María Maza Ortega

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal

*A mi familia*

*A mis maestros*

# Agradecimientos

En primer lugar me gustaría dar las gracias a mi tutor José María, por su aportación a mi formación durante el desarrollo de este proyecto.

Agradecer también a mi familia y amigos por todo el apoyo durante este tiempo, por la confianza que depositaron en mí y la motivación que me han transmitido.





## Resumen

Durante el transcurso de mis prácticas en una empresa siderúrgica, he tenido la oportunidad de sumergirme en el complejo entorno industrial y observar de primera mano los desafíos y las oportunidades asociadas con la introducción de nuevas tecnologías en el proceso productivo. En este contexto, se llevará a cabo un análisis sobre el impacto que tiene una máquina, que suelda palanquillas, en la instalación eléctrica de la fábrica. Para ello, se procederá a detallar minuciosamente el proceso productivo llevado a cabo en la fábrica en cuestión, desglosando tanto sus elementos como los productos resultantes de dicho proceso.

Además, se abordará en profundidad la justificación y la necesidad de incorporar esta máquina específica dentro del proceso productivo de la planta siderúrgica. Se expondrán las razones técnicas, económicas y operativas que respaldan esta decisión estratégica, así como los beneficios anticipados tras su implementación.

Por otro lado, se procederá a explicar en detalle el proceso de simulación llevado a cabo para obtener resultados teóricos sobre el impacto de la máquina en la red, con relación a la calidad de suministro ya que genera armónicos. Se describirán las metodologías y herramientas utilizadas en la simulación, así como los supuestos y parámetros considerados para modelar adecuadamente la interacción entre la máquina y la red.

Una vez obtenidos los resultados teóricos de la simulación, se llevará a cabo una comparación exhaustiva con los datos experimentales recopilados en la planta siderúrgica. Se analizarán las discrepancias entre los resultados teóricos y experimentales, identificando posibles desviaciones y estableciendo conclusiones sobre la precisión y validez de la simulación en relación con la realidad observada en la planta.



# Índice

Agradecimientos.....	vii
Resumen .....	ix
Índice.....	xi
Índice de Figuras .....	xiii
Índice de Tablas.....	xvi
Índice de Planos .....	xviii
Glosario .....	xx
1. Objetivo.....	1
1.1 Procesos productivo .....	1
1.2 Cajas de laminación .....	4
1.3 Productos.....	7
1.4 Spooler .....	11
1.4.1 Justificación de la modificación del proceso productivo.....	11
1.4.2 Componentes del Spooler .....	12
1.4.3 Justificación de la incorporación de la soldadora de palanquillas.....	16
2. Soldadora de Palanquillas .....	17
2.1 Componentes.....	17
3. Análisis teórico de rectificación.....	23
3.1 Rectificadores no controlados monofásicos.....	24
3.2 Rectificador no controlados trifásicos.....	28
3.3 Pruebas convertidor onda completa con transformador.....	39
4. Simulación de la soldadora de palanquillas .....	44
4.1 Componentes.....	44
4.2 Resultados .....	50
4.2.1 Resultados con convertidor de onda completa .....	50
4.2.3 Experimental.....	54
5. Conclusiones .....	58
Planos .....	59
Bibliografía.....	63



# Índice de Figuras

Figura 1- Diagrama de flujo del proceso productivo .....	2
Figura 2- Palanquillas calientes saliendo del proceso de colada continua (Siderúrgica Sevillana, s.f.).....	2
Figura 3- Palanquilla en la dobladora 1 después de pasar por el desbaste y la soldadora (Siderúrgica Sevillana, s.f.) .....	3
Figura 4- Estructura de caja de laminación en reparación .....	5
Figura 5- Cilindros de laminación en el taller de reparación .....	5
Figura 6- Caja horizontal (Siderúrgica Sevillana, s.f.).....	6
Figura 7- Caja vertical (Siderúrgica Sevillana, s.f.) .....	7
Figura 8- Redondo liso (Siderúrgica Sevillana, s.f.) .....	9
Figura 9- Redondo corrugado (Siderúrgica Sevillana, s.f.).....	9
Figura 10- Ángulo (Siderúrgica Sevillana, s.f.) .....	9
Figura 11- Pletina (Siderúrgica Sevillana, s.f.) .....	10
Figura 12- Cuadrado (Siderúrgica Sevillana, s.f.).....	10
Figura 13- Diagrama de flujo del proceso productivo incluyendo el desvío al spooler.....	12
Figura 14- Parte inicial del bobinado (Danieli, s.f.).....	13
Figura 15- Parte final del bobinado (zoom) (Danieli, s.f.).....	14
Figura 16- Parte final del bobinado (Danieli, s.f.) .....	14
Figura 17- Bobina con flejes colocados (Danieli, s.f.).....	15
Figura 18- Bobinas sobre camino de rodillos (Danieli, s.f.) .....	16
Figura 19- Soldadora de palanquillas en funcionamiento (Siderúrgica Sevillana, s.f.) .....	17
Figura 20- Esquema trifilar de la soldadora de palanquillas (Danieli Automation) .....	17
Figura 21- Esquema bobinas de filtrado (Danieli Automation).....	18
Figura 22- Esquema convertidor AC/AC (Danieli Automation) .....	19
Figura 23- Esquema transformador interno de la máquina (Danieli Automation).....	20
Figura 24- Esquema convertidor de media onda a la salida del transformador interno (Danieli Automation) .....	20
Figura 25- Esquema de conexión del transformador 2 a la palanquilla (Danieli Automation).....	21
Figura 26- Esquema de conexión del transformador 1 a la palanquilla (Danieli Automation).....	21
Figura 27- Caja interna de la soldadora con los transformadores .....	22
Figura 28- Pistones de las mordazas y Spark Killer.....	22
Figura 29- Esquema diodo de potencia (Dep Ingeniería Electrónica Universidad de Sevilla, 2022).....	24
Figura 30- Esquema rectificador monofásico de media onda con transformador.....	24
Figura 31- Estados del circuito en función de los estados del diodo de potencia .....	25
Figura 32- Representación gráfica del paso de estado de corte a conducción del diodo .....	26
Figura 33- Contenido armónico de la intensidad de un rectificador monofásico de media onda .	27
Figura 34- Esquema de un rectificador de onda completa no controlado .....	27
Figura 35- Formas de onda en las diferentes configuraciones de los diodos, en función de la tensión de la fuente.....	28
Figura 36- Esquema convertidor de media onda trifásico.....	29
Figura 37- Transiciones de conducción y corte de los diodos .....	30
Figura 38- Formas de onda de tensión AC y DC de un convertidor de media onda.....	31
Figura 39- Formas de onda de intensidad AC y DC de un convertidor de media onda.....	31
Figura 40- Contenido armónico de la intensidad de un rectificador trifásico de media onda.....	32
Figura 41- Esquema de un rectificador de onda completa trifásico .....	32

Figura 42- Formas de onda de tensión en AC y DC superpuestas, indicando los 6 pulsos de tensión rectificadas dentro de un ciclo.....	33
Figura 43- Formas de onda de intensidad AC y DC de un convertidor de onda completa.....	34
Figura 44- Contenido armónico de la intensidad de un rectificador trifásico de onda completa..	34
Figura 45- Formas de onda de la corriente en AC y DC de un convertidor de onda completa al introducir inductancia en la carga .....	35
Figura 46- Contenido armónico de la intensidad de un rectificador trifásico de onda completa con carga inductiva.....	36
Figura 47- Configuración atípica de un convertidor de onda completa trifásico.....	36
Figura 48- Configuración atípica de un convertidor de onda completa trifásico conectado a un transformador de dos secundarios .....	37
Figura 49- Conexión interna del transformador Yy0 para ambos secundarios en las tres fases ...	37
Figura 50- Conexión interna del transformador (la conexión del devanado 2 es Yy6 y la del devanado 1 es Yy0).....	38
Figura 51- Configuración atípica de un convertidor de onda completa trifásico cambiando la polaridad de los diodos y la configuración de los devanados del transformador.....	39
Figura 52- Esquema del convertidor con la configuración de la Figura 51 añadiendo una inductancia a la carga .....	40
Figura 53- Forma de onda de intensidad aguas arriba del transformador (Prueba 1) .....	41
Figura 54- Contenido armónico de la intensidad aguas arriba del transformador (Prueba 1).....	41
Figura 55- Forma de onda de intensidad aguas arriba del transformador (Prueba 2) .....	42
Figura 56- Contenido armónico de la intensidad aguas arriba del transformador (Prueba 2).....	42
Figura 57- Forma de onda de intensidad aguas arriba del transformador (Prueba 3) .....	43
Figura 58- Contenido armónico de la intensidad aguas arriba del transformador (Prueba 3).....	43
Figura 59- Esquema resumen de la relación entre configuración del transformador y disposición de los diodos.....	44
Figura 60- Esquema general trifilar de la simulación .....	45
Figura 61- Esquema de conexión del transformador de servicio .....	46
Figura 62- Bobinas de filtrado .....	46
Figura 63- Esquema de conexión del transformador interno .....	47
Figura 64- Esquema de conexión interna de los transformadores de la soldadora de palanquillas .....	48
Figura 65- Esquema de conexión del convertidor de media onda .....	48
Figura 66- Intensidad que circula por la palanquilla.....	51
Figura 67- Intensidad aguas arriba de la soldadora.....	51
Figura 68- Contenido armónico de la intensidad aguas arriba de la soldadora de palanquillas....	52
Figura 69- Intensidad aguas arriba del transformador de servicio .....	53
Figura 70- Contenido armónico de la intensidad aguas arriba del transformador de servicio.....	54
Figura 71- Imagen 1 de la colocación de los toroidales en las pletinas .....	55
Figura 72- Imagen 2 de la colocación de los toroidales en las pletinas .....	55
Figura 73- Conexión de las bornas para la medición .....	56
Figura 74- THD, en porcentaje, proporcionado por el analizador de redes .....	57



# Índice de Tablas

Tabla 1- Características del transformador de servicio (Danieli Automation) .....	18
Tabla 2- Características de las bobinas de filtrado (Danieli Automation) .....	18
Tabla 3- Características de los transformadores internos de la máquina (Danieli Automation)...	19
Tabla 4- Datos generales de la simulación .....	39
Tabla 5- Pruebas a realizar y su correspondiente valor de resistencia .....	39
Tabla 6- Pruebas a realizar y su correspondiente valor de inductancia.....	40
Tabla 7- Características del transformador de servicio .....	45
Tabla 8- Características de las bobinas de filtrado.....	46
Tabla 9- Características de los transformadores internos de la máquina .....	47
Tabla 10- Características de los diodos.....	48
Tabla 11- Datos para calcular resistencia óhmica de la palanquilla.....	49
Tabla 12- Características del cable que une los transformadores de la máquina con la palanquilla .....	50
Tabla 13- Comparativa de valores de R y L.....	52
Tabla 14- Comparativa de THD.....	53





# Índice de Planos

Plano 1- Plano de panel de transformadores de la soldadora, vista de la planta (Danieli Automation) .....	59
Plano 2- Plano de panel de transformadores de la soldadora vista del perfil (Danieli Automation) .....	60
Plano 3- Plano trifilar del esquema de la soldadora (Danieli Automation).....	61
Plano 4- Plano simplificado de la conexión con la palanquilla (Danieli Automation) .....	62



# Glosario

mm	Milímetros
$mm^2$	Milímetros cuadrados
m	Metros
$V_i$	Volumen inicial
$V_f$	Volumen final
l	Longitud
kV	Kilovoltios
V	Voltio
Vdc	Voltios en corriente continua
kVA	Kilovoltio-amperio
mH	Milihenrio
A	Amperio
kA	Kiloamperio
Hz	Hercios
$R_{tf}$	Resistencia con temperatura final
$R_{to}$	Resistencia con temperatura inicial
$\alpha$	Coefficiente térmico
$t_f$	Temperatura final
$t_o$	Temperatura inicial
R	Resistencia
$\rho$	Resistividad
S	Sección

# 1. Objetivo

La máquina que se expone es una soldadora de palanquillas, para explicar su funcionamiento hay que poner en contexto el proceso en el cual se utiliza y así poder explicar cuál es su función.

## 1.1 Procesos productivo

La laminación es un proceso de deformación plástica que se utiliza para dar forma a materiales como el metal y transformarlos en productos comerciales. Los perfiles más utilizados son palanquillas de sección cuadrada que provienen de lingoteras o de máquinas de colada continua. A las palanquillas se les denomina semiproductos y no pueden utilizarse directamente, hay que someterlas a un proceso que mejore sus características mecánicas y deformarlas hasta obtener el perfil deseado.

Dichos procesos son:

- Conformación: Procesos como la laminación o la forja, donde su diferencia está en que en la laminación la deformación se produce en una sola dirección del espacio. Además es en la que nos vamos a centrar en este trabajo.
- Acabado: Los diferentes acabados posibles son la deformación en frío o en caliente, este trabajo se centrará en la laminación en caliente.
- Modificación de las propiedades: El tratamiento más habitual es el tratamiento térmico, este tipo de tratamiento proporciona una mejora de las características mecánicas del metal, ya que se somete al material caliente a un cambio brusco de temperatura y lo endurece.

En el proceso de laminación en una planta siderúrgica, se sigue un flujo de trabajo, expuesto en la Figura 1, que transforma las palanquillas de acero en perfiles laminados listos para su uso en diversas aplicaciones industriales y comerciales. El proceso comienza con la entrada en el tren de unas palanquillas de aproximadamente 6 metros de largo y con una sección de alrededor de  $400\text{ cm}^2$ . Estas palanquillas son producidas mediante un proceso de colada continua, donde se vierte metal fundido en moldes de sección cuadrada y luego se cortan a la medida adecuada con sopletes especializados. Posteriormente, estas palanquillas recién formadas, como se muestra en la Figura 2, se colocan sobre mesas de enfriamiento, donde esperan su turno para ser introducidas en el horno.

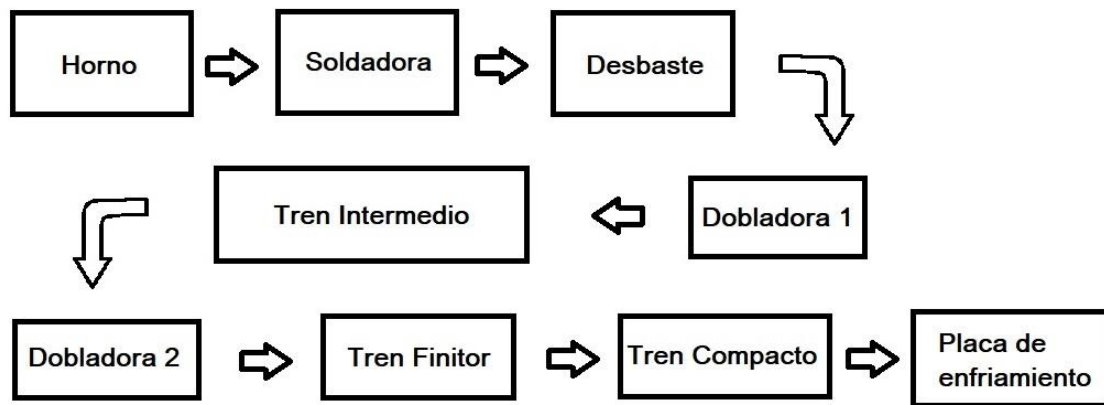


Figura 1- Diagrama de flujo del proceso productivo



Figura 2- Palanquillas calientes saliendo del proceso de colada continua (Siderúrgica Sevillana, s.f.)

Dicho horno, de la marca "ELTI", tiene la función de empujar lateralmente las palanquillas y calentarlas uniformemente hasta alcanzar la temperatura adecuada para la laminación. Este horno consta de unos mecheros internos alimentados con gas que aumentan progresivamente la temperatura hasta unos 1250 °C aproximadamente.

Una vez calentadas a la temperatura adecuada para facilitar su deformación, las palanquillas se llevan a la soldadora, donde se unen una detrás de otra para formar una cadena continua de material. Luego, las palanquillas soldadas pasan por el desbaste, donde se eliminan las imperfecciones de la soldadura y se preparan para el proceso de laminación.

A continuación, la palanquilla se dirige a la dobladora número 1, Figura 3, que cambia su sentido de movimiento para optimizar el espacio en la planta. La palanquilla avanza entonces al tren intermedio, donde se le va dando forma mediante cajas de laminación, comenzando a definir el perfil deseado.

Después de esta etapa, la palanquilla se somete a la dobladora número 2, que repite el proceso de cambio de sentido para optimizar el espacio de trabajo. Seguidamente, la palanquilla pasa por el tren finitor, donde se continúa dando forma al perfil mediante la aplicación de presión y deformación controladas. Finalmente, el perfil pasa por el tren compacto, donde se completa el proceso de laminación y se asegura que tenga las dimensiones y propiedades requeridas antes de pasar a la siguiente etapa.

Es importante tener en cuenta que, en este último tren, no se utilizan siempre todas las cajas de laminación. La cantidad de cajas empleadas varía según el diámetro que se esté produciendo. Por ejemplo, para el diámetro más pequeño de 8 mm, se utilizan las 22 cajas de laminación disponibles. Sin embargo, para diámetros mayores, como el de 12 mm, se utilizan menos cajas, y así sucesivamente hasta alcanzar el diámetro máximo. Este ajuste en el número de cajas utilizadas permite adaptar el proceso de laminación a las especificaciones requeridas para cada tipo de perfil.



Figura 3- Palanquilla en la dobladora 1 después de pasar por el desbaste y la soldadora (Siderúrgica Sevillana, s.f.)

Una vez finalizado el proceso de laminación, el perfil laminado se enfría en la placa de enfriamiento hasta alcanzar la temperatura ambiente, listo para su posterior manipulación y uso. Este proceso de laminación garantiza la calidad y las propiedades del producto final, que se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones industriales y comerciales.

## 1.2 Cajas de laminación

La caja de laminación o gabia, una parte esencial del proceso, se compone de una estructura robusta a modo de chasis, con cilindros dispuestos tanto en posición vertical como horizontal, encargados de llevar a cabo el proceso de laminación de manera precisa y eficiente. La distancia entre estas superficies cilíndricas enfrentadas siempre es menor que el espesor del lingote o palanquilla que ingresa. De esta manera, al pasar por esta sección reducida, el material experimenta una compresión y estiramiento proporcionales, ajustándose a las especificaciones requeridas.

Los componentes principales son:

- Estructura: Para que los cilindros giren estos tienen que estar apoyados y sujetos en una estructura principal que proporcione rigidez y el soporte necesario para el proceso que van a desempeñar los cilindros. Está diseñada para soportar grandes fuerzas y tensiones generadas en la laminación, en la Figura 4 se expone una estructura en reparación.
- Cilindros: Los cilindros son piezas grandes de sección circular con una serie de hendiduras por donde pasa la palanquilla, que se va adaptando a la forma que se quiere conseguir finalmente, ver Figura 5. Por otro lado, también hay que recalcar que la superficie de los cilindros debe de ser muy dura para reducir el desgaste y a la vez tenaz, ya que van a ser sometidos a cargas muy fuertes durante el trabajo. Entre los distintos perfiles que se pueden hacer están los perfiles redondos, que se pueden hacer de diámetros diferentes, que varían entre el 8 mm y el 60 mm, además de poder hacer distintos tipos de acabados, como el liso o el corrugado, del que hablaremos más posteriormente. También se pueden hacer perfiles cuadrados o ángulos, cada uno con su correspondiente forma del cilindro.
- Sistema de refrigeración: La refrigeración de las máquinas es importante para evitar que se sobrecalienten durante el proceso, debido a la propia fricción como al paso del material caliente. Se utilizan dos tipos de refrigeración, el agua de directos y el agua de indirectos.
- Sistema de accionamiento: El movimiento de los cilindros lo proporcionan unos motores eléctricos que transmiten a través de una reductora la potencia necesaria para que giren a la velocidad deseada.





Figura 4- Estructura de caja de laminación en reparación



Figura 5- Cilindros de laminación en el taller de reparación

En el proceso productivo de laminación en una planta siderúrgica, es necesario emplear una serie de cajas equipadas con rodillos de diferentes tamaños y grosores para dar forma al material en bruto de manera precisa y eficiente. Estas cajas se disponen una detrás de otra en lo que se conoce como un tren de laminación.

El término "tren de laminación" se refiere al conjunto completo de equipos y componentes necesarios para llevar a cabo el proceso de laminación en una planta siderúrgica. Este conjunto incluye las cajas de laminación, que son los componentes principales responsables de dar forma al material en bruto, así como elementos complementarios como motores, caminos de rodillos y cizallas, que desempeñan funciones específicas en el proceso.

Las cajas de laminación son dispositivos cruciales en el tren de laminación. Estas cajas están diseñadas con precisión para aplicar la presión adecuada y dar forma al material en bruto, reduciendo su espesor y dándole la forma deseada. Pueden ser horizontales, Figura 6, y verticales, Figura 7, según las necesidades específicas del proceso y están dispuestas en secuencia, una detrás de otra, a lo largo del tren de laminación.



Figura 6- Caja horizontal (Siderúrgica Sevillana, s.f.)



Figura 7- Caja vertical (Siderúrgica Sevillana, s.f.)

Además de las cajas de laminación, el tren de laminación incluye una variedad de elementos complementarios que son igualmente importantes para el funcionamiento eficiente del proceso. Los motores proporcionan la potencia necesaria para hacer funcionar el tren de laminación, mientras que los caminos de rodillos guían el material a través del proceso de laminación de manera controlada y precisa. Las cizallas se utilizan para cortar el material laminado en longitudes específicas según los requisitos del cliente o del producto final.

### 1.3 Productos

En el proceso de laminación, se encuentran diversos tipos de productos, siendo de particular interés para este trabajo los denominados productos largos. Estos se caracterizan por tener dimensiones transversales relativamente pequeñas en comparación con su longitud, presentando una sección maciza y pudiendo adquirir diferentes formas como pletinas, cuadrados, rectangulares o circulares. Mayormente, este tipo de productos se someten al proceso de laminación en caliente.

Los cilindros empleados en la laminación de productos largos están diseñados con acanaladuras adecuadas, las cuales, en sucesivas pasadas, permiten alcanzar el perfil final deseado. En el caso de los perfiles circulares, se distinguen dos tipos de acabado: liso, Figura 8, y corrugado, Figura 9. Por otro lado también se producen ángulos, Figura 10, pletinas, Figura 11, y perfiles cuadrados, Figura 12.

El acero corrugado, un componente clave en la construcción, se integra con el hormigón para formar las estructuras de hormigón armado. Su denominación se debe a su diseño, que incluye estrías o relieves longitudinales que garantizan el agarre y la adherencia necesaria en las aplicaciones estructurales en las que se utiliza.

Los beneficios de este acero son:

- Alta resistencia: El acero corrugado tiene una alta resistencia a la tracción, lo que hace que sea muy adecuado para soportar cargas y tensiones muy grandes.
- Adherencia: Gracias a las estrías y relieves que presenta evita que haya deslizamiento entre el material y el acero, lo que provoca una mayor seguridad estructural.
- Ductilidad: Esta propiedad del acero corrugado implica que puede deformarse plásticamente antes de romperse, lo que le permite tener una mayor capacidad para absorber energía en situaciones de carga extremas
- Versatilidad: El corrugado se usa en una amplia variedad de aplicaciones de la construcción, como refuerzo de vigas, columnas y cimientos.

Estas características hacen que este tipo de acero sea muy atractivo en la industria de la construcción. Esto ha provocado que las empresas siderúrgicas estudien que es lo que sus clientes demandan a la hora de hacer pedidos de este acero.





Figura 8- Redondo liso (Siderúrgica Sevillana, s.f.)



Figura 9- Redondo corrugado (Siderúrgica Sevillana, s.f.)

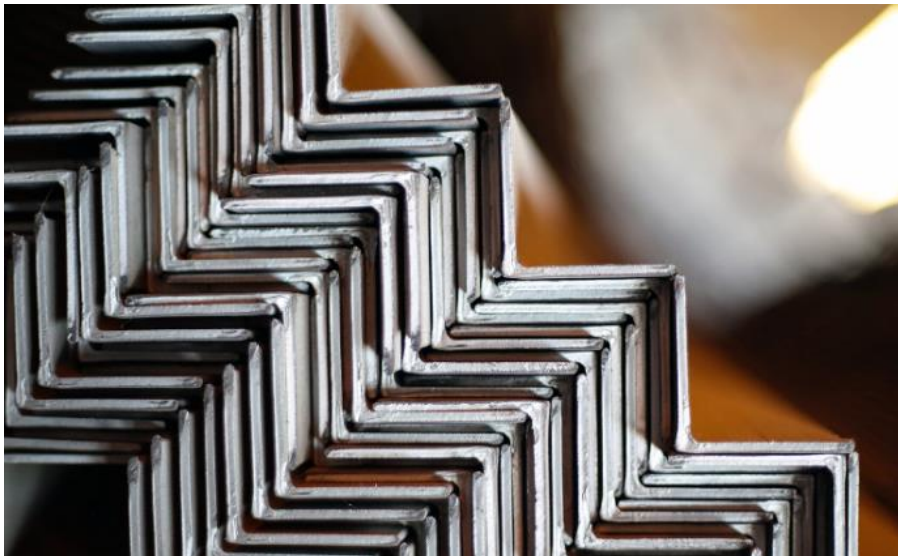


Figura 10- Ángulo (Siderúrgica Sevillana, s.f.)



Figura 11- Pletina (Siderúrgica Sevillana, s.f.)



Figura 12- Cuadrado (Siderúrgica Sevillana, s.f.)

## 1.4 Spooler

Debido a la alta demanda de productos como el acero corrugado, las empresas siderúrgicas han decidido aumentar la oferta de sus productos. Anteriormente, se centraban en ofrecer productos largos de diferentes longitudes y perfiles, que se obtenían de palanquillas de 6 metros de longitud. Esta práctica requería realizar cálculos precisos de la longitud final del producto para garantizar su viabilidad comercial y evitar el desperdicio de acero en el proceso. Sin embargo, aun así, existían pedidos en los que el desperdicio, es decir, el excedente de material que no alcanzaba la longitud deseada era significativo.

### 1.4.1 Justificación de la modificación del proceso productivo

En el dinámico mundo de la industria del acero, la eficiencia en la producción y la adaptación a las demandas del mercado son aspectos cruciales para mantener la competitividad. En este contexto, consideremos el escenario donde se espera recibir un pedido de paquetes de redondo corrugado de 12 mm de diámetro y 12 m de largo. Sin embargo, la transformación de la palanquilla inicial en barras laminadas presenta desafíos logísticos y de aprovechamiento de materia prima. En respuesta a estas preocupaciones, se ha ideado una solución innovadora: la implementación de una nueva instalación conocida como Spooler (bobinadora en inglés)

Se plantea un pedido de paquetes de redondo corrugado de 12 mm de diámetro y 12 m de largo. Sin embargo, al considerar el proceso de transformación de la palanquilla inicial en barras laminadas, surgen desafíos logísticos y de optimización de materia prima.

El volumen inicial de material tiene que ser igual al volumen final, como se puede ver en la ecuación (1). Las palanquillas son de 6 metros y tienen una sección cuadrada de  $0,115 \text{ m}^2$  y a su vez el volumen final se puede expresar como el área de un círculo de 12 mm de diámetros y una longitud ( $l$ ), todo esto referido en la ecuación (2). De ahí que al reducir la sección de la palanquilla inicial a un diámetro de 12 mm, si se despeja en (3) su longitud ( $l$ ), esta es de 701 m, como indica la ecuación (4). Lo que implicaría la producción de 58 barras de 12 metros. No obstante, cada palanquilla laminada dejaría un excedente de 5 m, conocido como despunte.

$$V_i = V_f \quad (1)$$

$$6 \cdot 0,115^2 = \pi \cdot 0,006^2 \cdot l \quad (2)$$

$$\frac{6 \cdot 0,115^2}{\pi \cdot 0,006^2} = l \quad (3)$$

$$l = 701 \text{ m} \quad (4)$$

Es importante tener en cuenta que, aunque el cliente solicite barras de 12 m, es probable que necesite realizar cortes para adaptarlas a la construcción de estructuras de hormigón armado, lo que resultaría en un desperdicio adicional de material.

Ante este panorama, se ha optado por implementar una nueva instalación denominada Spooler (bobinadora en inglés), que tiene la capacidad de bobinar metros y metros de acero corrugado. Esta solución resulta más económica y práctica para el cliente, ya que le permite cortar el material según sus necesidades sin desperdiciar en exceso y sin tener que realizar pedidos especiales de longitudes concretas.

Para facilitar este proceso, se ha instalado un desviador al final del tren de laminación, que redirige la trayectoria del material hacia la nueva instalación de bobinado.

### 1.4.2 Componentes del Spooler

Al final del tren de laminación se instala un desviador, como se observa en la Figura 13, que, dependiendo del pedido, dirige el material hacia el Spooler o hacia la placa de enfriamiento. Este material entra en el proceso aún caliente y requiere un tratamiento térmico específico. Es crucial adaptar la temperatura de templado según la ubicación dentro de la bobina, dado que el centro y la parte externa tienen necesidades térmicas diferentes. La gestión de este proceso recae en los responsables de controlar la producción, quienes ajustan los parámetros del Tempcore, un proceso de tratamiento térmico que consiste en enfriar de manera controlada el acero en bobinas, proporcionando una estructura interna homogénea y garantizando propiedades mecánicas consistentes en toda la bobina.

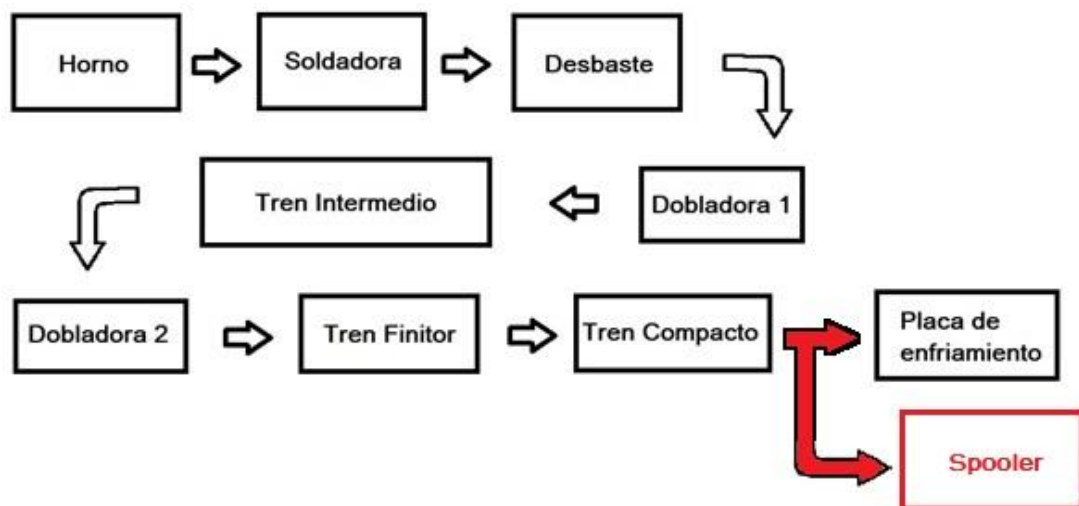


Figura 13- Diagrama de flujo del proceso productivo incluyendo el desvío al spooler

Una vez que atraviesan el Tempcore las barras pasan por una cizalla que corta el material en caso de haya un atranque, aunque también corta la cola en caso de que sea necesario. De ahí se guían hasta donde empieza el bobinado.

El proceso de bobinado es fundamental en la producción de bobinas de acero corrugado y consiste en enrollar el material laminado en bobinas para su posterior almacenamiento y transporte. La bobinadora, es la máquina encargada de realizar este proceso.



Dicho bobinado generalmente implica movimientos tanto verticales como horizontales. El material laminado se alimenta continuamente a la bobinadora desde el tren de laminación. Inicialmente, el material ingresa horizontalmente a la bobinadora, donde es enrollado alrededor de un núcleo central para formar la bobina, Figura 14. Este movimiento horizontal asegura que el material se enrolle de manera uniforme y compacta alrededor del núcleo, garantizando la estabilidad y la integridad de la bobina.

A medida que la bobina va creciendo en tamaño, la bobinadora también realiza movimientos verticales para mantener la altura adecuada de la bobina en formación, Figura 15 y Figura 16. Estos movimientos verticales permiten que la bobina crezca de manera uniforme y evitan que se forme una bobina desequilibrada o inestable. Además, estos movimientos verticales ayudan a mantener la tensión adecuada en el material durante el proceso de bobinado, lo que contribuye a la calidad final de la bobina.



Figura 14- Parte inicial del bobinado (Danieli, s.f.)



Figura 15- Parte final del bobinado (zoom) (Danieli, s.f.)



Figura 16- Parte final del bobinado (Danieli, s.f.)

Después de completar el proceso de bobinado, una grúa especializada se encarga de levantar la bobina de acero corrugado recién formada. Con precisión y cuidado, la grúa posiciona la bobina en un área designada, donde otra máquina especializada se encarga

de asegurarla con flejes, Figura 17, para garantizar su estabilidad durante el transporte y almacenamiento.

Una vez asegurada adecuadamente, la bobina es depositada en un camino de rodillos, Figura 18, listo para su traslado a la nave de almacenamiento. Este camino de rodillos facilita el desplazamiento suave y eficiente de la bobina hacia su destino final, donde será almacenada hasta su posterior distribución y uso.

Este proceso de manejo y aseguramiento de la bobina garantiza que llegue a la nave de almacenamiento en óptimas condiciones, lista para su utilización en una variedad de aplicaciones industriales y comerciales.



Figura 17- Bobina con flejes colocados (Danieli, s.f.)





Figura 18- Bobinas sobre camino de rodillos (Danieli, s.f.)

### **1.4.3 Justificación de la incorporación de la soldadora de palanquillas**

Debido al problema del despunte y la necesidad de crear bobinas, surge la necesidad de incorporar una solución efectiva en el sistema de producción: la soldadora de palanquillas. Esta máquina, Figura 19, representa una solución integral al soldar palanquillas de manera continua, lo que proporciona una transición fluida en el proceso de laminado. Su incorporación al sistema no solo aborda los problemas mencionados anteriormente, sino que también optimiza el despunte y facilita la creación de bobinas sin contratiempos.

El principio de funcionamiento de esta máquina es el siguiente: una vez que una palanquilla entra en el camino de rodillos de la soldadora y llega su extremo, otra palanquilla ingresa al camino de rodillos, lo que permite unir la cabeza de una con la cola de la otra. En ese preciso instante, las mordazas de la máquina sujetan ambas palanquillas y se aplica una corriente intensa a través de ellas, mientras se ejerce presión para asegurar su unión de manera efectiva.



Figura 19- Soldadora de palanquillas en funcionamiento (Siderúrgica Sevillana, s.f.)

## 2. Soldadora de Palanquillas

### 2.1 Componentes

El esquema trifilar de la máquina está representado en la Figura 20.

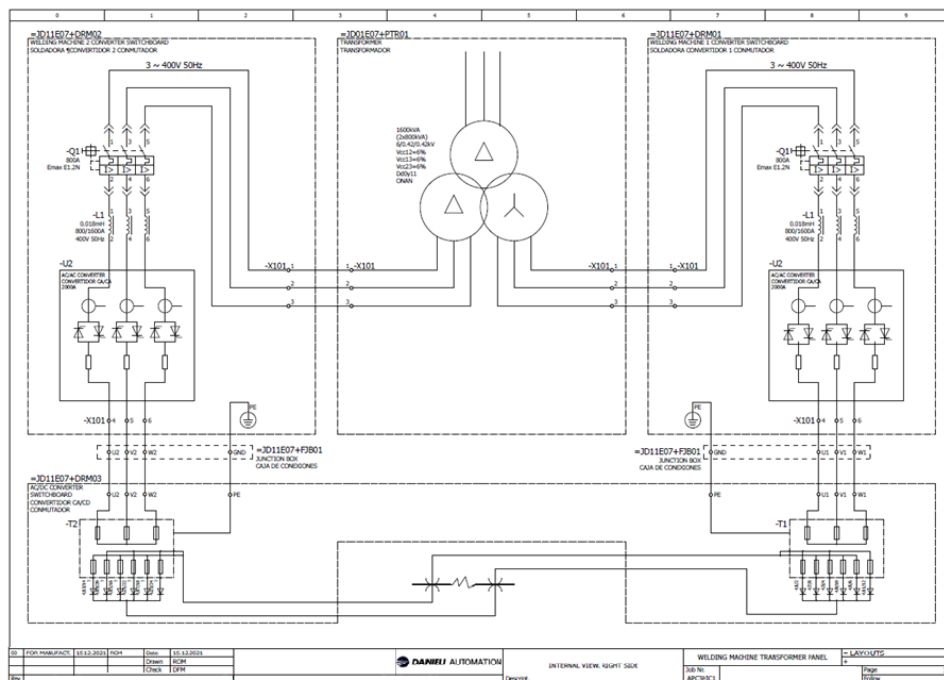


Figura 20- Esquema trifilar de la soldadora de palanquillas (Danieli Automation)

Agua arriba se encuentra un transformador de servicio que está conectado directamente con la acometida de la subestación a 15 kV, cuyas características técnicas son las de la Tabla 1

Tabla 1- Características del transformador de servicio (Danieli Automation)

Número de secundarios	2
Potencia	1600 kVA (800 kVA cada devanado)
Tensión de cortocircuito (%)	6%
Relación de transformación	6/0.42/0.42 kV
Tipo de conexión	Dd0y11

Si seguimos analizando agua abajo de este transformador nos encontramos con otro elemento importante, unas bobinas que sirven como filtro, Figura 21. Dichas bobinas son de unos 0.018 mH, para un rango de intensidades de entre 800 y 1600 A y una tensión de 400 V, todo esto a 50 Hz de frecuencia, Tabla 2.

Tabla 2- Características de las bobinas de filtrado (Danieli Automation)

Rango de intensidades	800 – 1600 A
Tensión	400 V
Inductancia	0.018 mH
Frecuencia	50 Hz

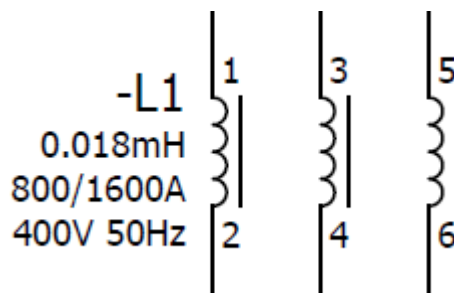


Figura 21- Esquema bobinas de filtrado (Danieli Automation)

El siguiente componente es crucial para el correcto funcionamiento de la máquina. Para mantener una intensidad constante de cortocircuito, es necesario ajustar la tensión en respuesta al aumento de la resistencia. Esto significa que la tensión aumenta a medida que la resistencia se incrementa, garantizando así una intensidad constante.

Este control se logra a través de un convertidor AC/AC controlado por tiristores, Figura 22. Estos dispositivos permiten regular el ángulo de disparo para aumentar o disminuir la tensión según sea necesario, asegurando así que la intensidad del cortocircuito se mantenga constante en todo momento.

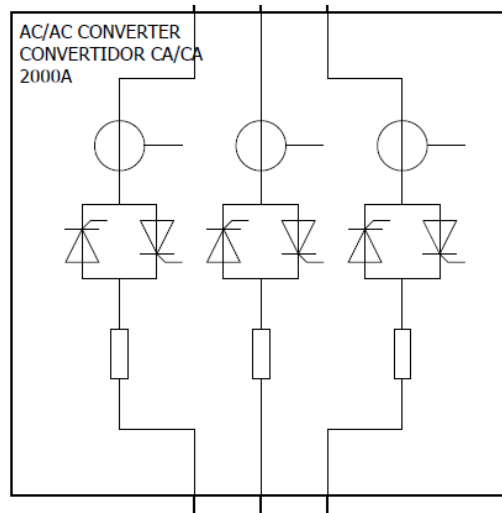


Figura 22- Esquema convertidor AC/AC (Danieli Automation)

Los componentes de dicho convertidor son principalmente los tiristores puestos en antiparalelo, para poder convertir de alterna a alterna, unos transformadores de medida, para poder controlar los valores de intensidad y unas resistencias.

Por último, en la Tabla 3 se encuentran los transformadores del interior de la máquina , Figura 23, que se conectan en cortocircuito para poder hacer la soldadura.

Tabla 3- Características de los transformadores internos de la máquina (Danieli Automation)

Número de secundarios	2
Conexión del primario	Estrella con neutro aislado
Conexiones de los secundarios	Estrella con neutro accesible
Configuración de los devanados	Yy0 , Yy6
Potencia	337 kVA
Relación de transformación	1,7/0,12/0,12 kV

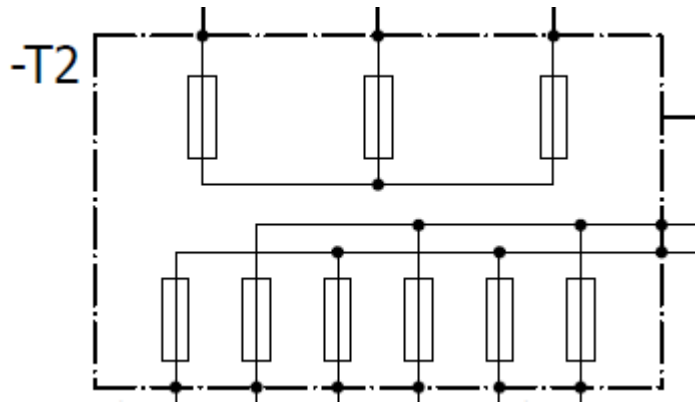


Figura 23- Esquema transformador interno de la máquina (Danieli Automation)

A la salida de los transformadores se encuentran los rectificadores AC/DC, Figura 24, una serie de diodos conectado a cada fase de los secundarios que transforman la corriente alterna en continua.

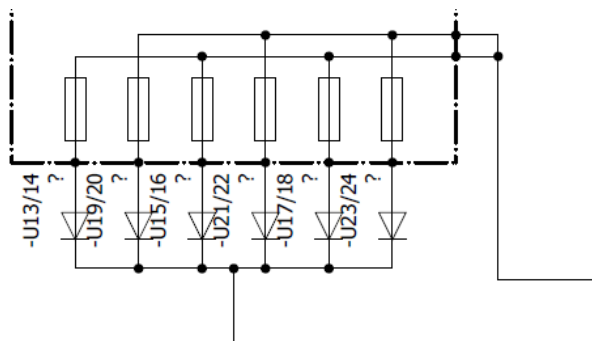


Figura 24- Esquema convertidor de media onda a la salida del transformador interno (Danieli Automation)

Los transformadores se conectan a la palanquilla mediante unas mordazas equipadas con terminales, conexión representada en las Figuras 25 y 26. Estas mordazas entran en contacto con la palanquilla, lo que permite la generación del cortocircuito una vez establecida la conexión.



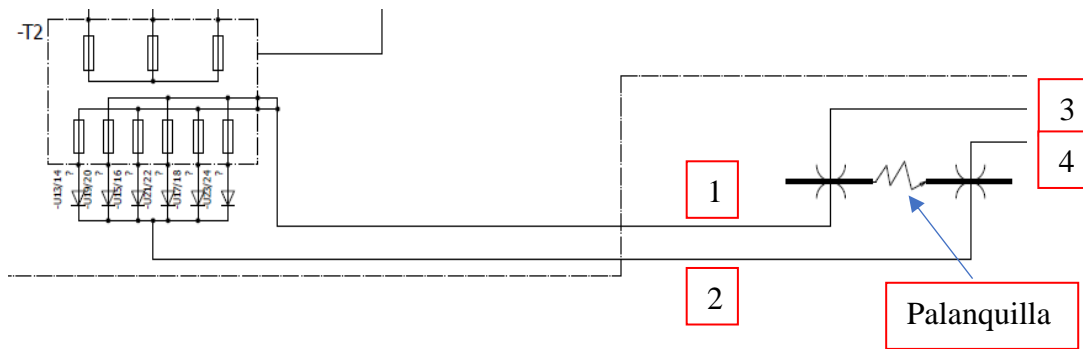


Figura 25- Esquema de conexión del transformador 2 a la palanquilla (Danieli Automation)

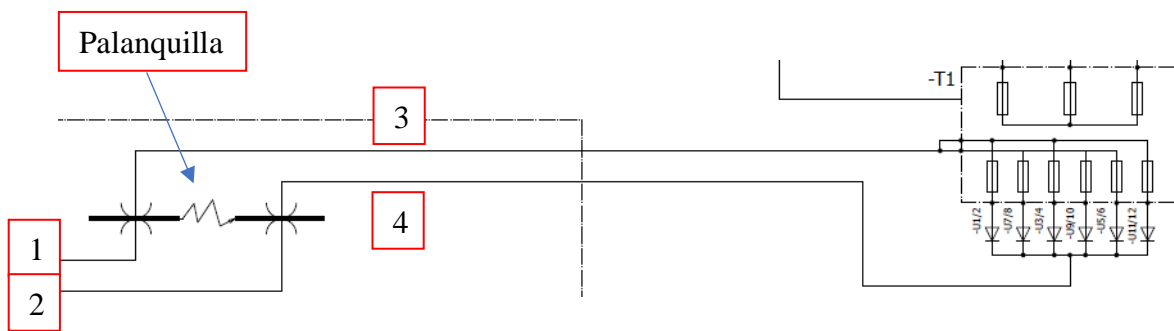


Figura 26- Esquema de conexión del transformador 1 a la palanquilla (Danieli Automation)

Los neutros accesibles de los devanados secundarios de los transformadores se conectan a un extremo de la palanquilla. Por otro lado, la salida de los diodos de ambos transformadores se conecta al otro extremo, provocando el cortocircuito.

Dichos transformadores se encuentran dentro de la estructura metálica que envuelve los componentes más importantes de la máquina, Figura 27.

Los valores de tensión e intensidad que se alcanzan en la palanquilla según el fabricante son aproximadamente 25 kA y 6 Vdc.

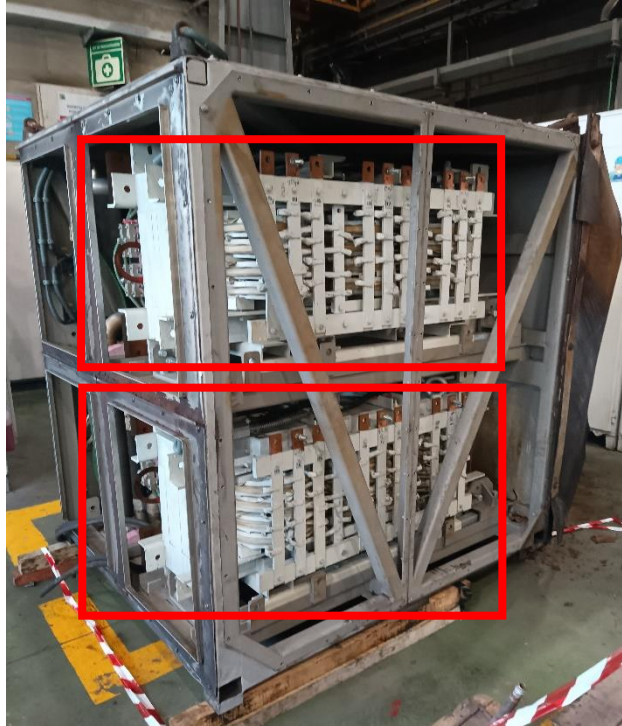


Figura 27- Caja interna de la soldadora con los transformadores

El Spark Killer, “mata chispas”, como su propio nombre indica evita que las chispas creadas por el cortocircuito salten y puedan dañar la máquina u otras colindantes, Figura 28. Su funcionamiento es relativamente simple, sube y baja dependiendo de si se está soldando, estaría abajo, o si no lo está, estaría arriba. La posición es controlada por un encoder lineal.



Figura 28- Pistones de las mordazas y Spark Killer

### 3. Análisis teórico de rectificación

Los rectificadores de potencia eléctrica son dispositivos fundamentales en la conversión de corriente alterna (AC) a corriente continua (DC) y viceversa. Su importancia radica en su capacidad para adaptar y controlar el flujo de energía eléctrica, permitiendo su uso eficiente en una amplia gama de aplicaciones industriales, comerciales y domésticas.

La corriente alterna, caracterizada por su cambio de dirección a intervalos regulares, es la forma predominante de suministro eléctrico en la mayoría de los sistemas de distribución de energía. Sin embargo, muchos dispositivos electrónicos y maquinarias requieren corriente continua para su funcionamiento adecuado. Aquí es donde entran en juego los rectificadores de potencia.

Al convertir la corriente alterna en corriente continua, los rectificadores permiten la alimentación de dispositivos electrónicos sensibles, como ordenadores, teléfonos móviles y sistemas de control industrial, que requieren una fuente de energía constante y sin fluctuaciones. Además, en aplicaciones industriales, los rectificadores son esenciales para el funcionamiento de equipos de alta potencia, como motores de corriente continua, electroimanes y sistemas de tracción eléctrica.

Los rectificadores de potencia dependen en gran medida de un componente clave: los diodos de potencia. Estos dispositivos semiconductores son la base fundamental de los rectificadores.

Los diodos de potencia están diseñados para manejar corrientes y voltajes significativamente más altos. Cuando se aplican en un circuito rectificador, los diodos de potencia permiten que solo los ciclos positivos o negativos de la corriente alterna pasen a través del circuito, generando así una corriente continua en la salida.

Estos diodos están contruidos con materiales semiconductores de alta pureza, como el silicio o el carburo de silicio, que les confieren una capacidad excepcional para soportar altos niveles de voltaje y corriente sin sufrir daños. Además, su diseño robusto y su capacidad para operar en condiciones de alta temperatura los hacen ideales para aplicaciones de potencia industrial y de alta potencia.

En el contexto de los rectificadores de potencia, los diodos desempeñan un papel crucial en la eficiencia y la confiabilidad del proceso de conversión de corriente.

Un diodo de potencia, al igual que cualquier otro diodo, está compuesto por dos regiones semiconductoras: el ánodo y el cátodo. El ánodo es la región del diodo que tiene una carga positiva cuando el diodo está en operación, mientras que el cátodo es la región con carga negativa. Estas regiones están separadas por una zona de unión PN, que es una interfaz entre dos materiales semiconductoras dopados de forma diferente (p y n), creando una barrera de potencial.

Cuando se aplica una tensión positiva ánodo-cátodo, ver Figura 29, se dice que el diodo está polarizado directamente. En este estado, la barrera de potencial en la zona de unión PN se reduce, permitiendo que los portadores de carga (electrones en la región n y huecos en la región p) se muevan a través del diodo con facilidad. Esto resulta en una corriente eléctrica significativa que fluye a través del diodo.

Por otro lado, cuando se aplica una tensión negativa ánodo-cátodo, el diodo está polarizado inversamente. En este estado, la barrera de potencial en la zona de unión PN se amplía, lo que dificulta enormemente el movimiento de portadores de carga a través del diodo. Como resultado, prácticamente no hay corriente que fluya a través del diodo en esta configuración.

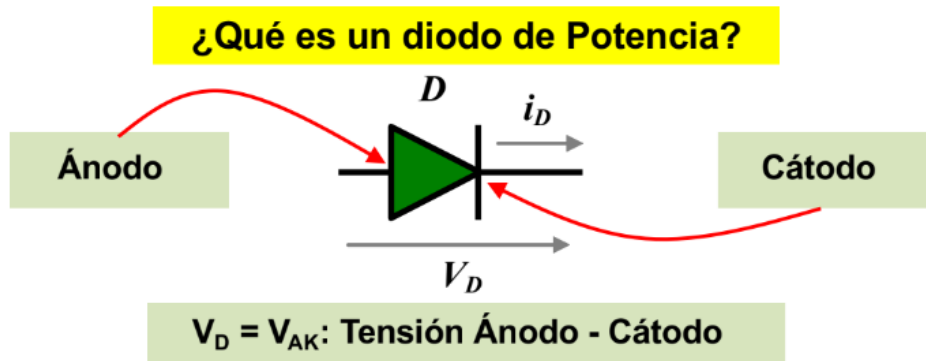


Figura 29- Esquema diodo de potencia (Dep Ingeniería Eléctronica Universidad de Sevilla, 2022)

A efectos prácticos un diodo actúa como un interruptor, que está abierto o cerrado en función de la tensión que reciba entre ánodo y cátodo.

### 3.1 Rectificadores no controlados monofásicos.

Si se aplica este dispositivo a un sistema eléctrico básico, con una fuente de tensión alterna, un transformador y una carga modelada por una resistencia, se puede obtener el comportamiento de la tensión y la corriente que finalmente llega a la carga.

El esquema eléctrico de la Figura 30, representa un convertidor de media onda no controlado.

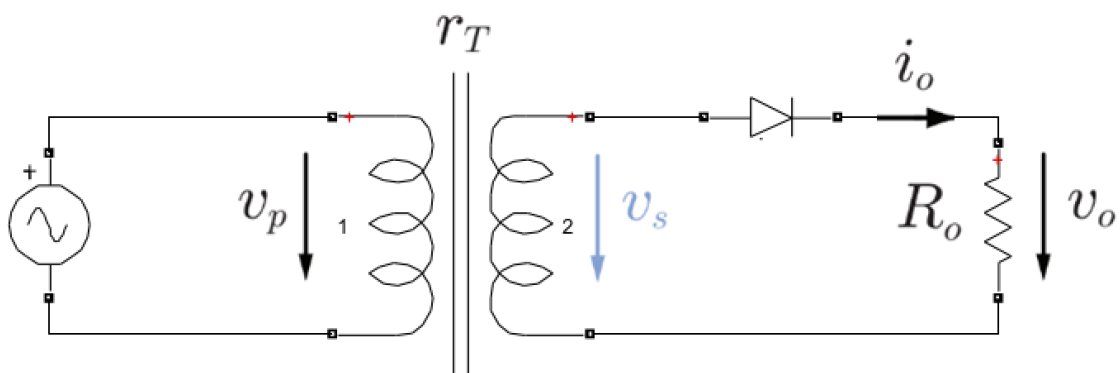
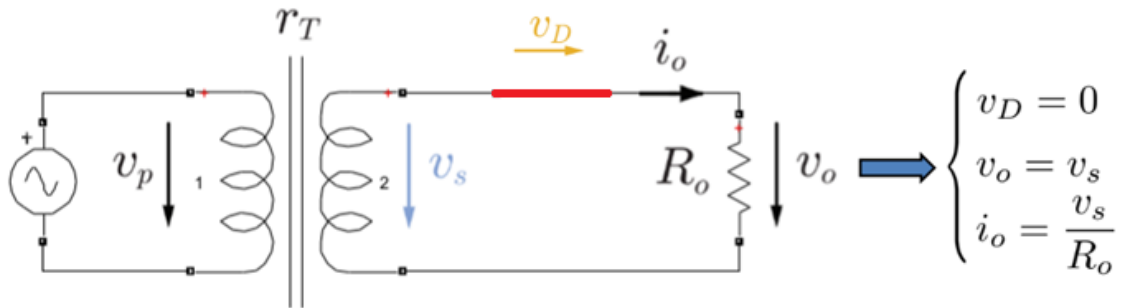


Figura 30- Esquema rectificador monofásico de media onda con transformador

Como se ha mencionado anteriormente el diodo actúa de manera similar a un interruptor por lo que habría dos estados posibles para este circuito, conducción y corte, Figura 31.

- **Estado: Conducción (Encendido, On)**



- **Estado: Corte (Apagado, Off)**

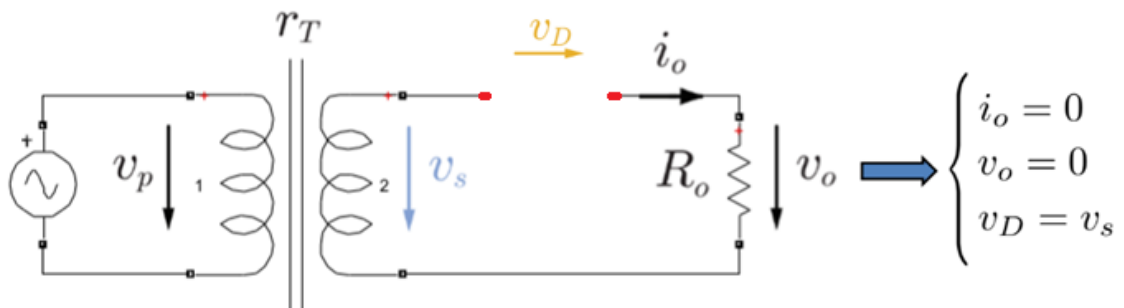


Figura 31- Estados del circuito en función de los estados del diodo de potencia

Cuando el diodo hace la transición del estado de corte al de conducción, tanto la corriente como el voltaje de la carga dejan de ser nulos. En el estado de corte, durante el semiperíodo negativo, el diodo no permite que haya tensión en la carga y, por lo tanto, no circula corriente. Sin embargo, al pasar al estado de conducción, la carga se ve sometida a la tensión  $V_s$ , Figura 32, y comienza a circular una corriente.

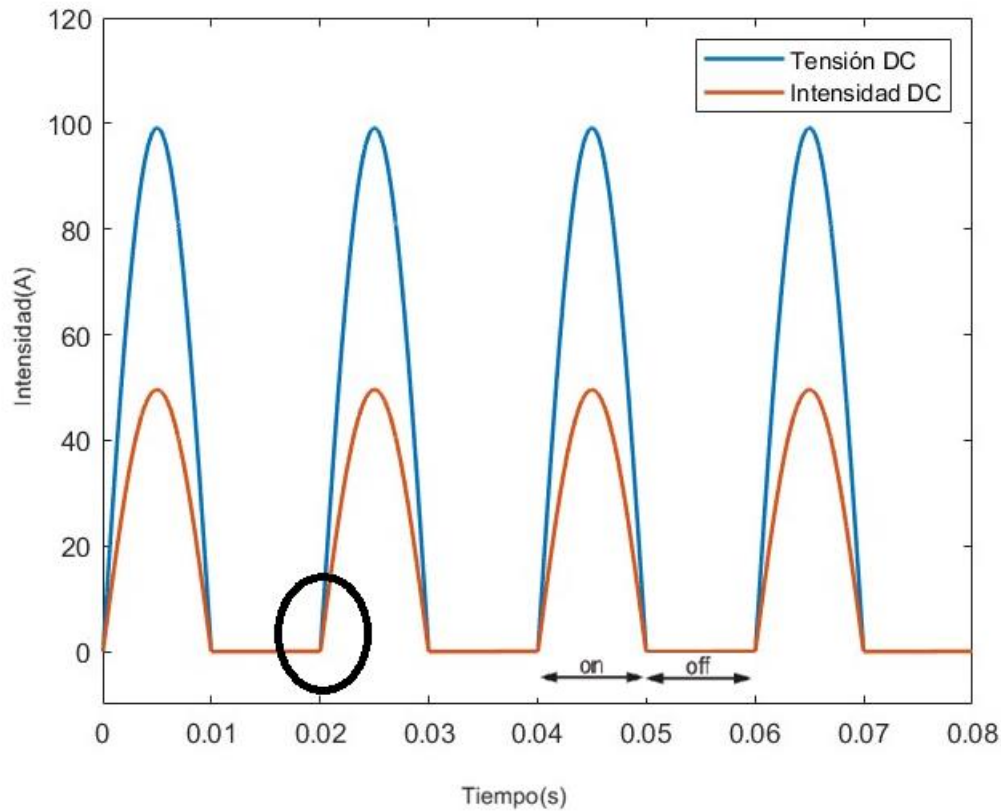


Figura 32- Representación gráfica del paso de estado de corte a conducción del diodo

Para cuando termine el semiperiodo positivo el diodo pasará de nuevo a estado de corte y no habrá ni tensión ni corriente en la carga. La forma de onda característica de este circuito se indica en la Figura 32.

Con este tipo de convertidor los armónicos de corriente son muy elevados, como puede verse en la Figura 33, debido a la falta de simetría entre los semiperiodos y la poca similitud que tiene respecto a una forma de onda perfectamente senoidal. El contenido armónico es alto, siendo los más importantes el segundo, que está relacionado con la falta de simetría entre semiperiodos mencionada anteriormente, el quinto y el séptimo también muy relevantes.

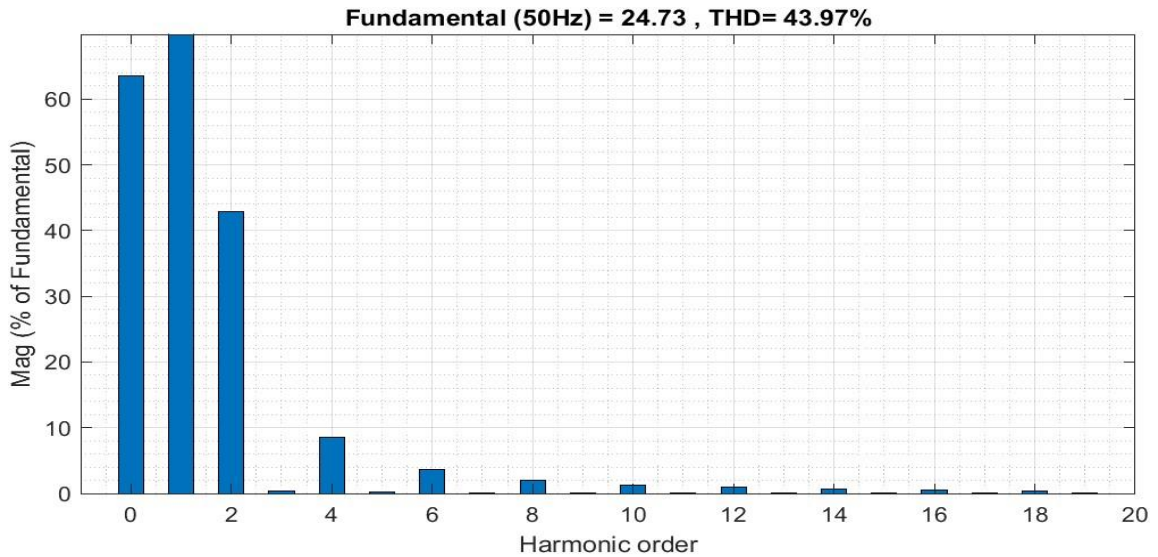


Figura 33- Contenido armónico de la intensidad de un rectificador monofásico de media onda

Existen diversas configuraciones con diodos para llevar a cabo la rectificación de corriente. Una alternativa común, que ofrece ciertos beneficios respecto a la mencionada anteriormente, es la rectificación de onda completa, Figura 34.

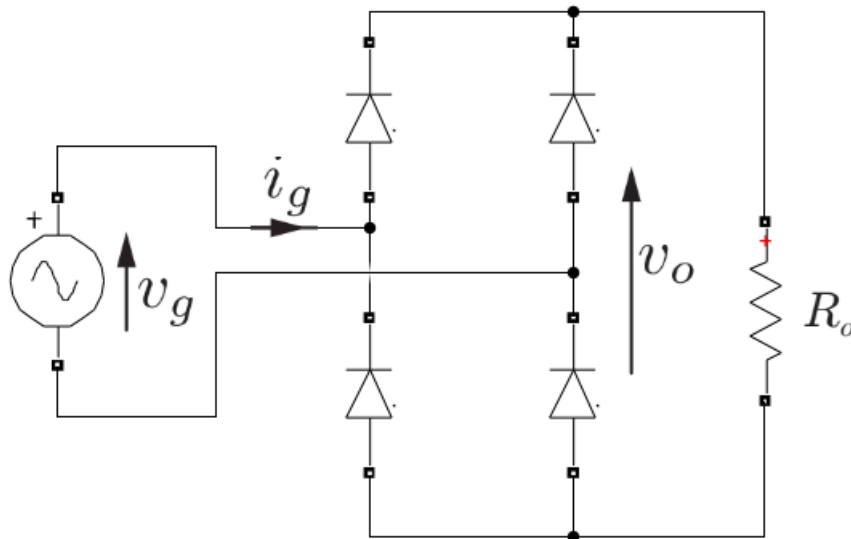


Figura 34- Esquema de un rectificador de onda completa no controlado

En este caso los diodos funcionan exactamente igual, con un estado de corte cuando la tensión que reciben es negativa y con un estado de conducción cuando dicha tensión es positiva. Sin embargo, al tener esta configuración aparecen ciertas ventajas.

La primera que se observa es que ahora no hay periodos de tensión e intensidad nula, Figura 35, independientemente de que diodos estén en conducción o en corte.

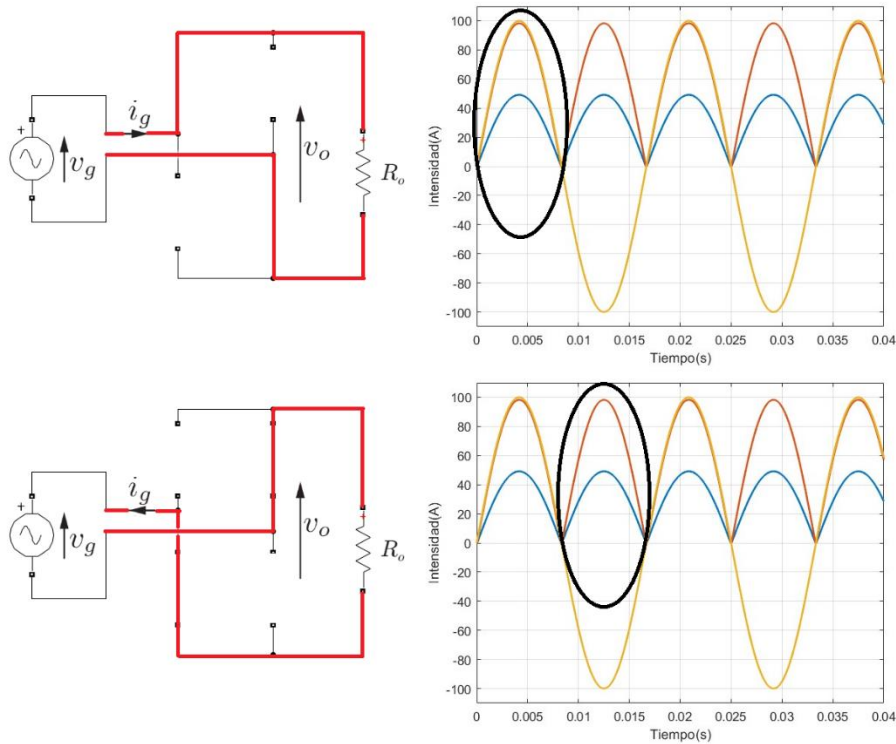


Figura 35- Formas de onda en las diferentes configuraciones de los diodos, en función de la tensión de la fuente

Una de las ventajas adicionales es que, en un rectificador de media onda, tanto la intensidad de corriente alterna como la continua son las mismas, lo que provoca una alta cantidad de armónicos en la red eléctrica al conectar uno de estos dispositivos. Sin embargo, con un rectificador de onda completa y una carga resistiva, ni la intensidad ni la tensión alterna se verían afectadas por el proceso de rectificación. Aun así la intensidad en alterna contendría armónicos debido a la impedancia serie que tienen las fuentes reales de tensión.

### 3.2 Rectificador no controlados trifásicos

El rectificador trifásico de media onda se distingue significativamente del monofásico en varios aspectos clave. Aunque ambos tipos de rectificadores comparten el objetivo de convertir la corriente alterna en corriente continua, el rectificador trifásico aprovecha las tres fases de alimentación, ver Figura 36, presentes en los sistemas trifásicos para lograr una mayor eficiencia y una corriente continua con menor rizado.



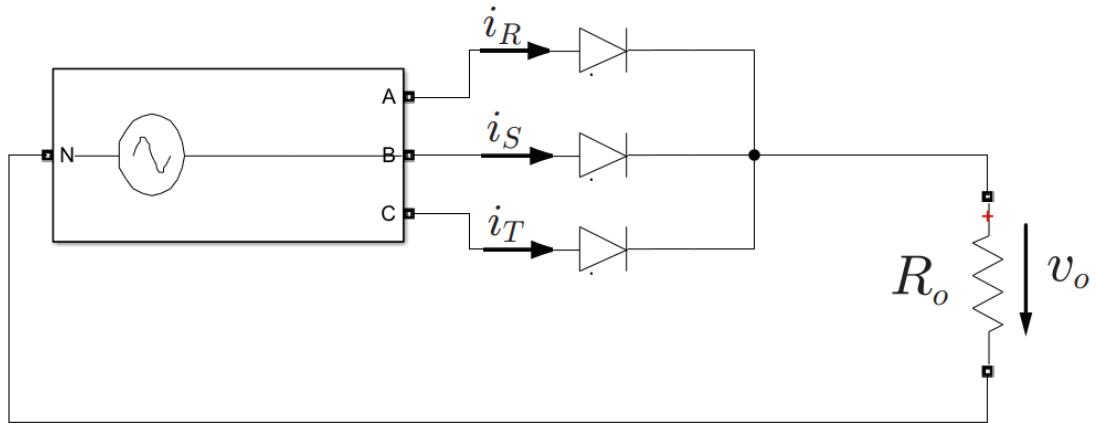


Figura 36- Esquema convertidor de media onda trifásico

El proceso de rectificación en este dispositivo se fundamenta en la conducción del diodo que posea la mayor tensión en cada instante. Inicia conduciendo el diodo correspondiente a la fase A hasta que su tensión cae y coincide con la de la fase B, momento en el cual se activa el segundo diodo, entrando en conducción y dejando el primer diodo en corte. Este mismo patrón se repite durante la transición al tercer diodo y así sucesivamente, ver Figura 37.

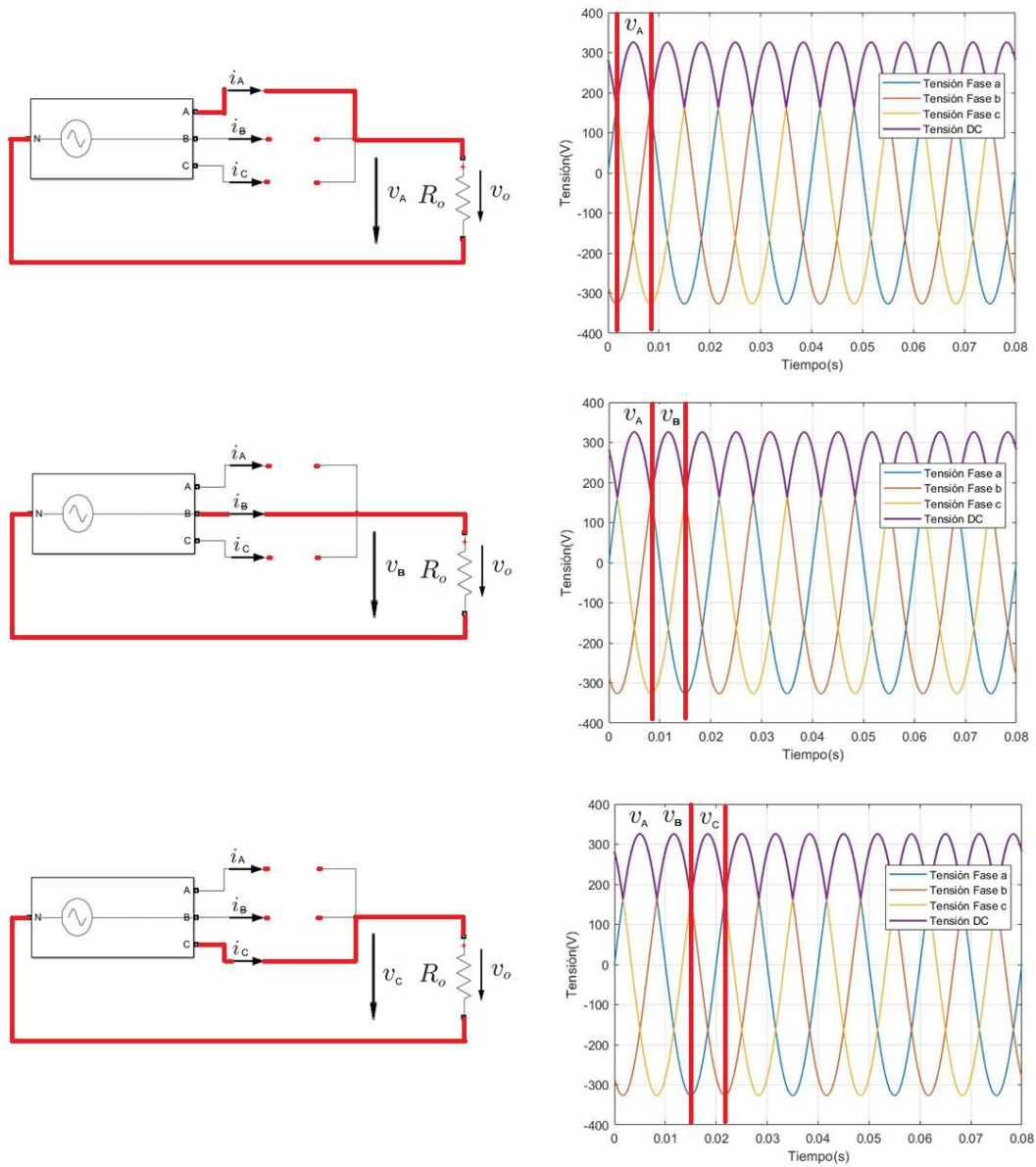


Figura 37- Transiciones de conducción y corte de los diodos

Al analizar la forma de onda resultante, se percibe que la tensión presente en la resistencia  $R_o$ , es decir, la tensión rectificadora, es positiva en promedio y tiene un valor no nulo en todo el ciclo, ver Figura 38.

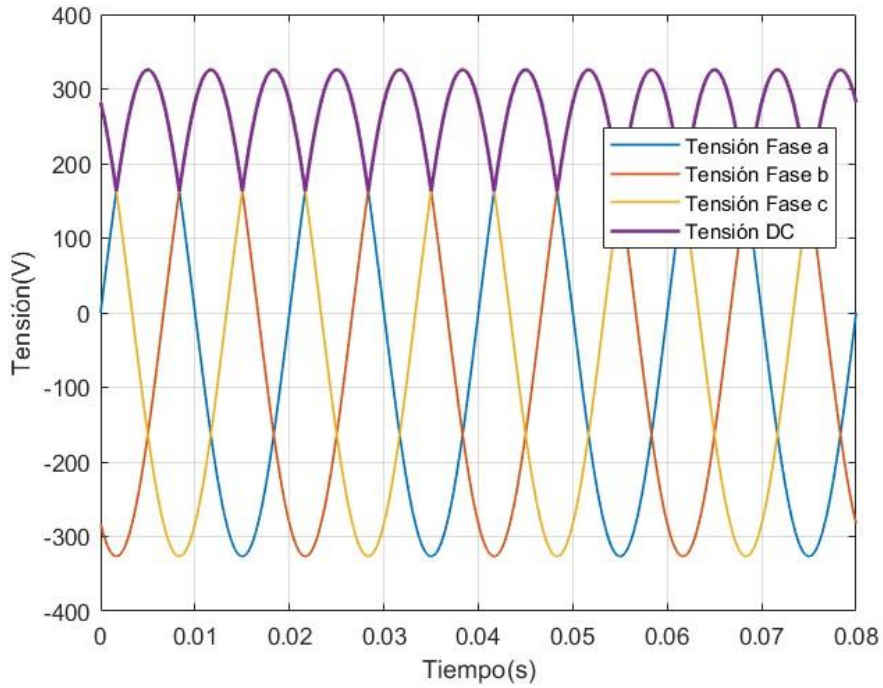


Figura 38- Formas de onda de tensión AC y DC de un convertidor de media onda

Por otro lado en la Figura 39 se observa que la intensidad rectificada tiene también unas características similares a la tensión. Sin embargo la intensidad en alterna presenta una distorsión importante, lo que provoca un contenido armónico elevado, como puede verse en la Figura 40.

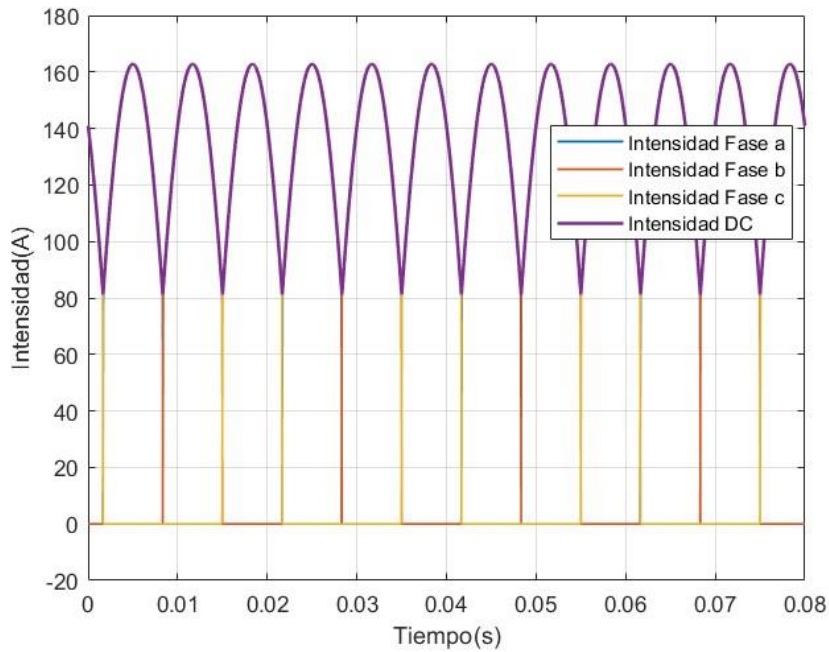


Figura 39- Formas de onda de intensidad AC y DC de un convertidor de media onda

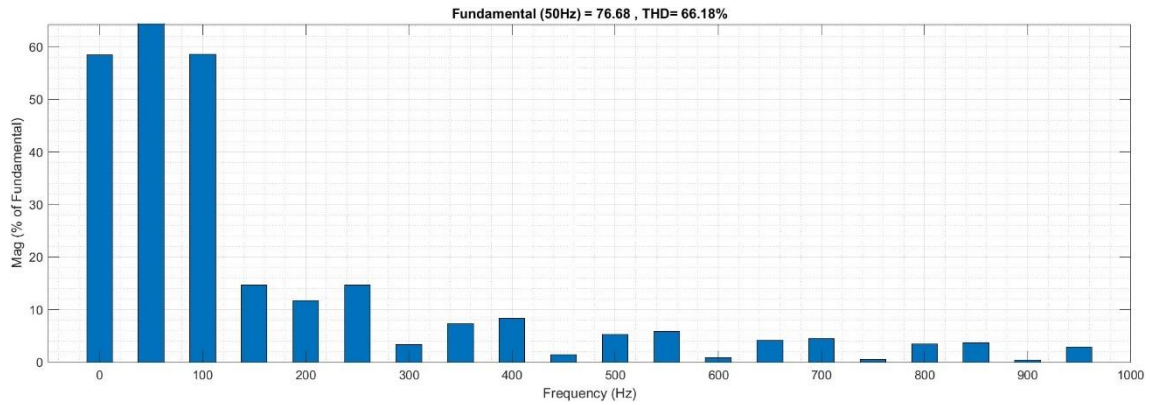


Figura 40- Contenido armónico de la intensidad de un rectificador trifásico de media onda

Al comparar el rectificador de onda completa monofásico con el trifásico, se encuentran diferencias significativas en su diseño. En el caso del rectificador trifásico, se emplean tres fuentes de tensión, lo que implica la presencia de tres tensiones desfasadas en  $120^\circ$ . Además, en lugar de dos columnas de diodos como en el monofásico, el rectificador trifásico cuenta con tres columnas, cada una con dos pares de diodos, Figura 41.

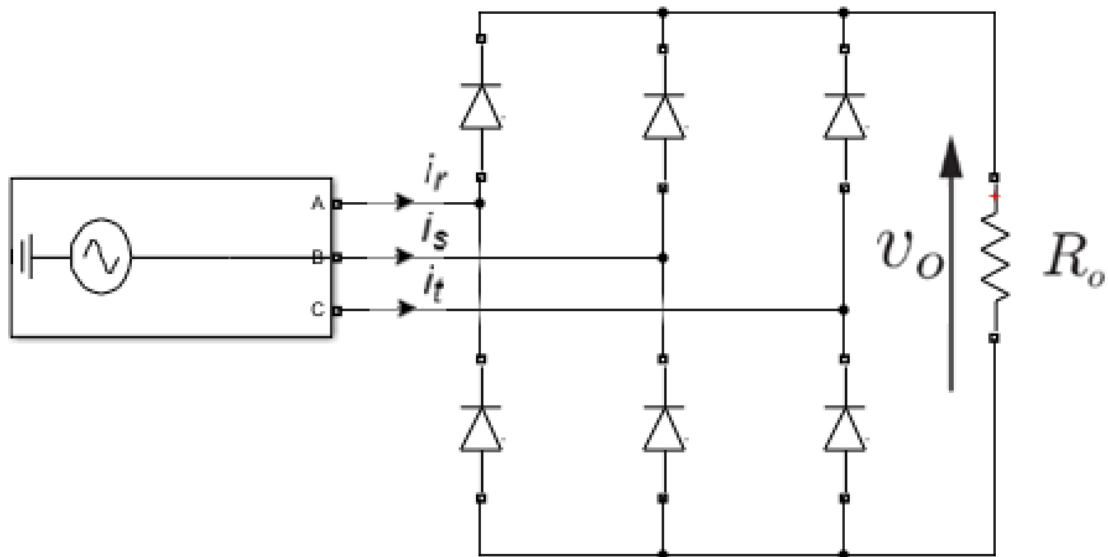


Figura 41- Esquema de un rectificador de onda completa trifásico

Este tipo de rectificadores se les denomina rectificadores de 6 pulsos. Este término se refiere a la forma en que se realizan las conexiones y la disposición de los diodos en el circuito. En este tipo de rectificador, se utilizan seis diodos dispuestos en tres pares, uno para cada fase de la alimentación trifásica.

Cada par de diodos permite la rectificación de la corriente en una de las fases de la alimentación trifásica. Al alternarse las fases, se generan seis pulsos de corriente en total

durante un ciclo completo de la alimentación trifásica, de ahí el nombre de "rectificador de 6 pulsos" la tensión también presenta esa configuración, Figura 42.

Se utiliza para distinguir este tipo de rectificador de otras configuraciones, como el rectificador de onda completa trifásico de 12 pulsos, que emplea una disposición diferente de los diodos para lograr una menor distorsión armónica y una corriente continua más suave. La denominación "de 6 pulsos" proporciona una indicación de la configuración específica del rectificador y su capacidad para rectificar la corriente en un sistema trifásico.

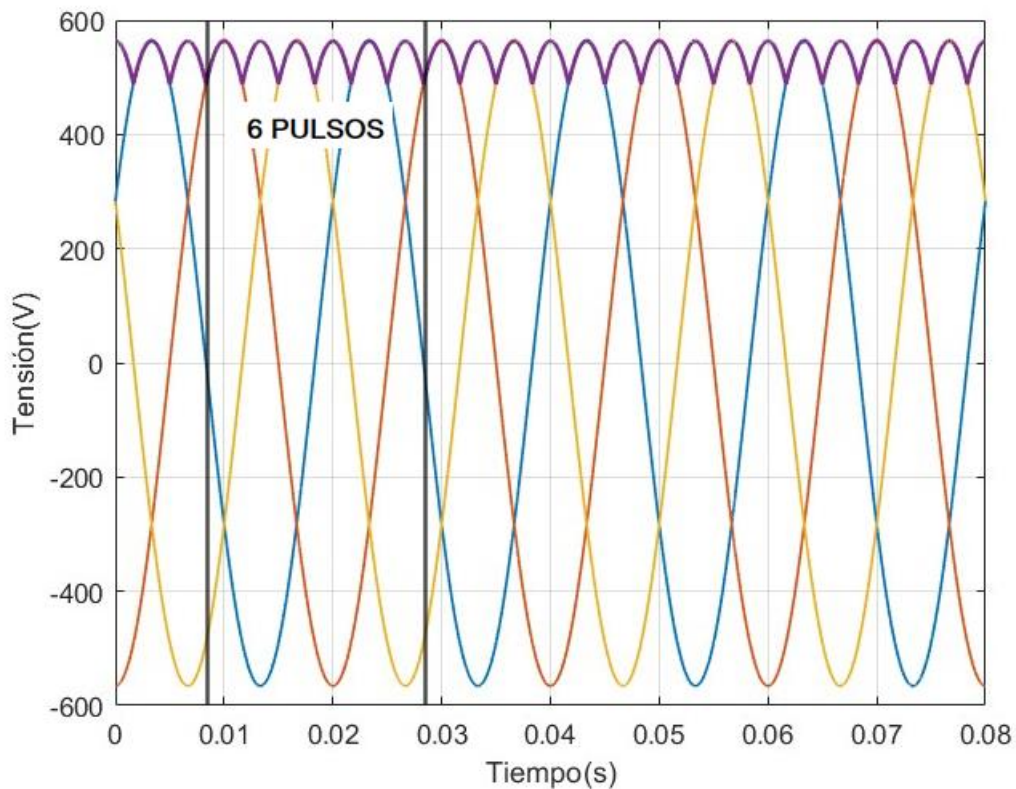


Figura 42- Formas de onda de tensión en AC y DC superpuestas, indicando los 6 pulsos de tensión rectificadas dentro de un ciclo

Comparado con el monofásico, el rectificador de onda completa trifásico logra un menor rizado y un valor de corriente continua más alto. Sin embargo, la corriente alterna se ve afectada por la rectificación en este caso, también generando seis pulsos en su intensidad, lo que significa que sigue la misma forma que la tensión. Esto conlleva a que la corriente alterna no sea perfectamente senoidal, Figura 43, y a la aparición de armónicos.

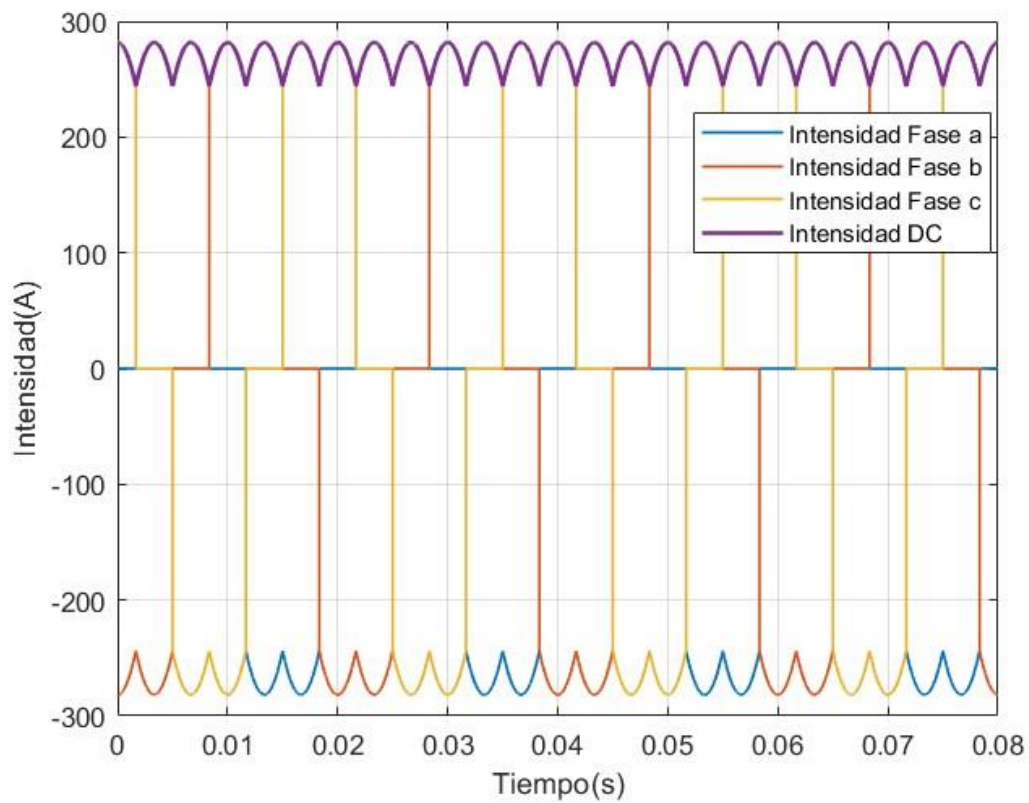


Figura 43- Formas de onda de intensidad AC y DC de un convertidor de onda completa

El contenido armónico de la corriente corresponde a los armónicos  $6k \pm 1$ , siendo los más relevantes el quinto y el séptimo, Figura 44.

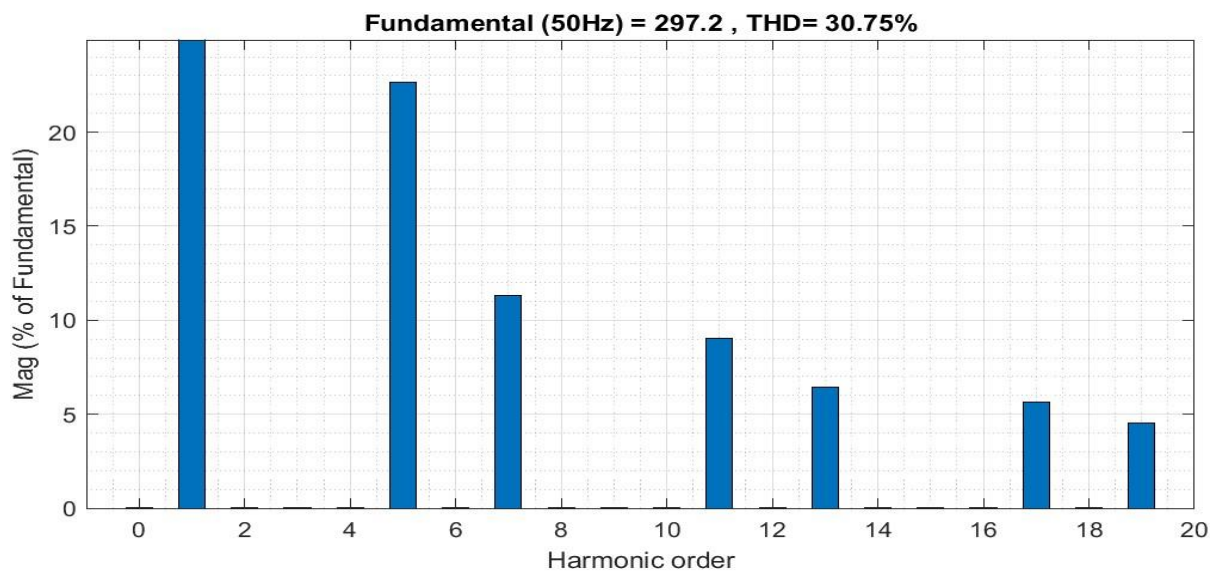


Figura 44- Contenido armónico de la intensidad de un rectificador trifásico de onda completa



Si se quisiera reducir el rizado de la corriente de continua se podría añadir una inductancia que disminuyera el rizado de dicha corriente, Figura 45. Sin embargo, el contenido de la corriente armónica aumentaría conforme aumenta la inductancia, como puede observarse en la Figura 46 ,debido a que su forma seria más cuadrada.

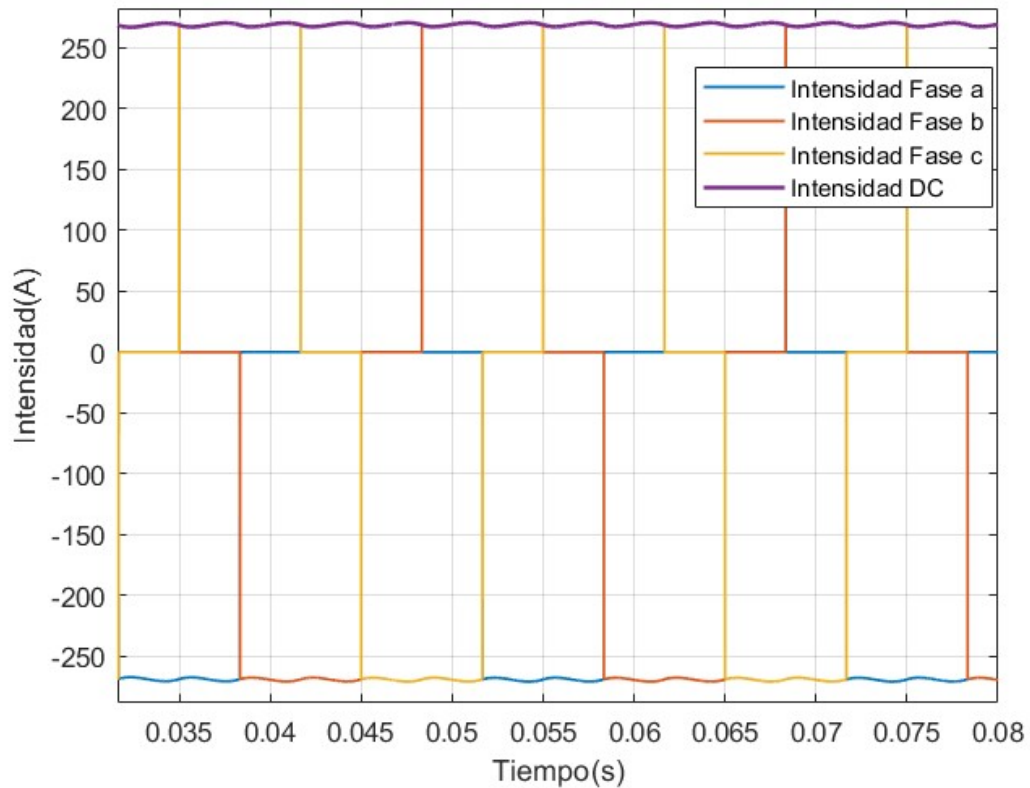


Figura 45- Formas de onda de la corriente en AC y DC de un convertidor de onda completa al introducir inductancia en la carga

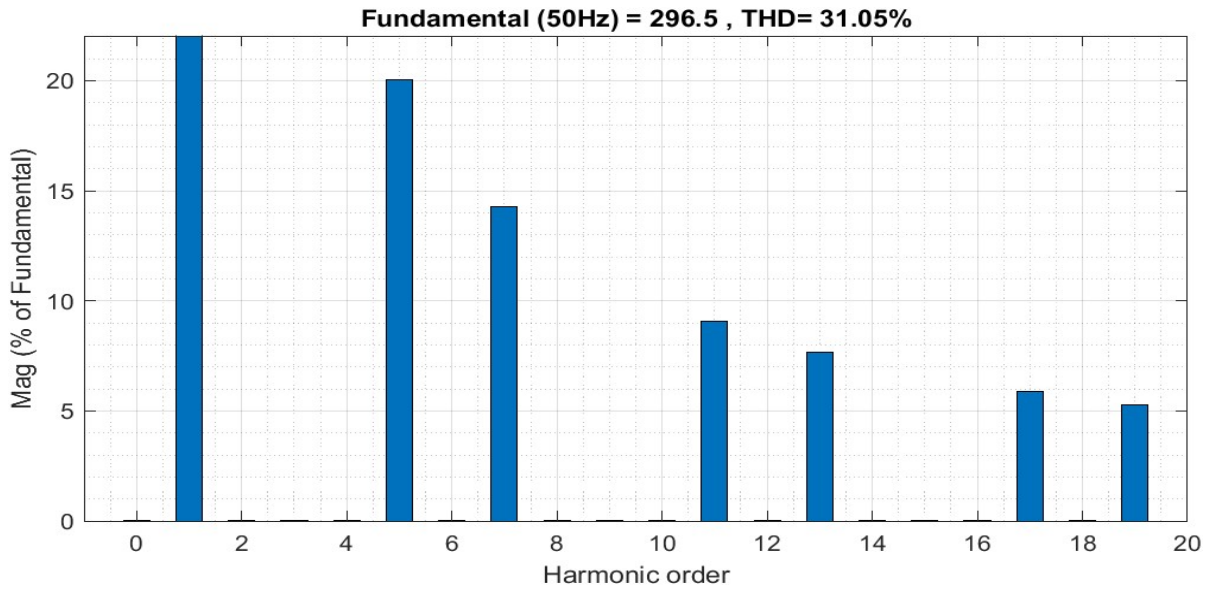


Figura 46- Contenido armónico de la intensidad de un rectificador trifásico de onda completa con carga inductiva

La configuración de la Figura 47 parece diferente a la convencional del convertidor de onda completa, no obstante si se observa detenidamente es exactamente igual, lo único que cambia es la posición de los diodos.

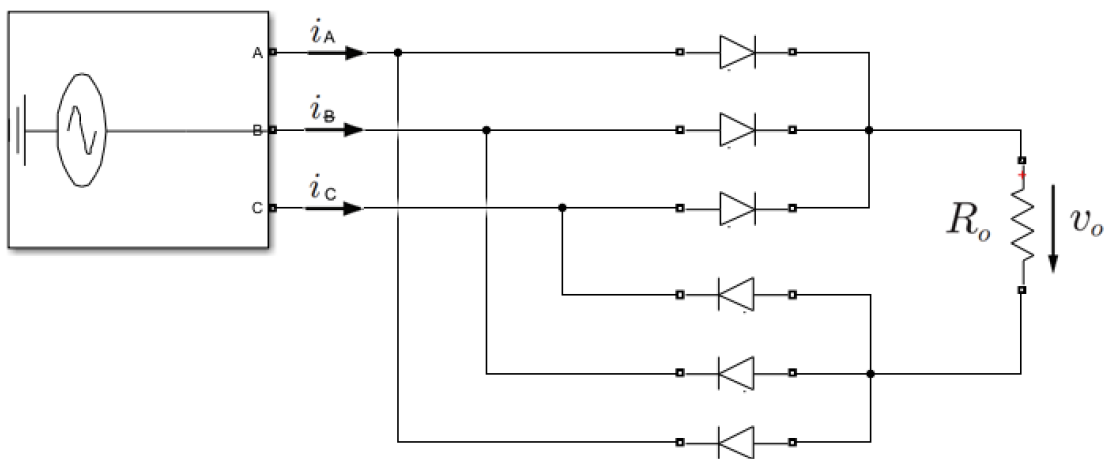


Figura 47- Configuración atípica de un convertidor de onda completa trifásico

Si al esquema de la Figura 47 se le añade un transformador con dos secundarios, quedaría como en la Figura 48.



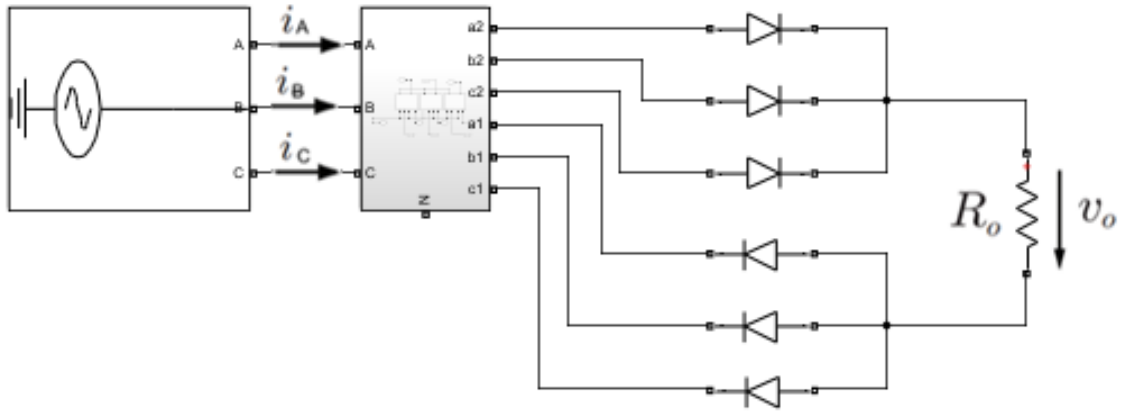


Figura 48- Configuración atípica de un convertidor de onda completa trifásico conectado a un transformador de dos secundarios

El transformador de la Figura 48 está compuesto por tres transformadores monofásicos con un primario y dos secundarios cada uno, cada transformador monofásico tiene una configuración Yy0 para los dos secundarios, como puede observarse en la Figura 49.

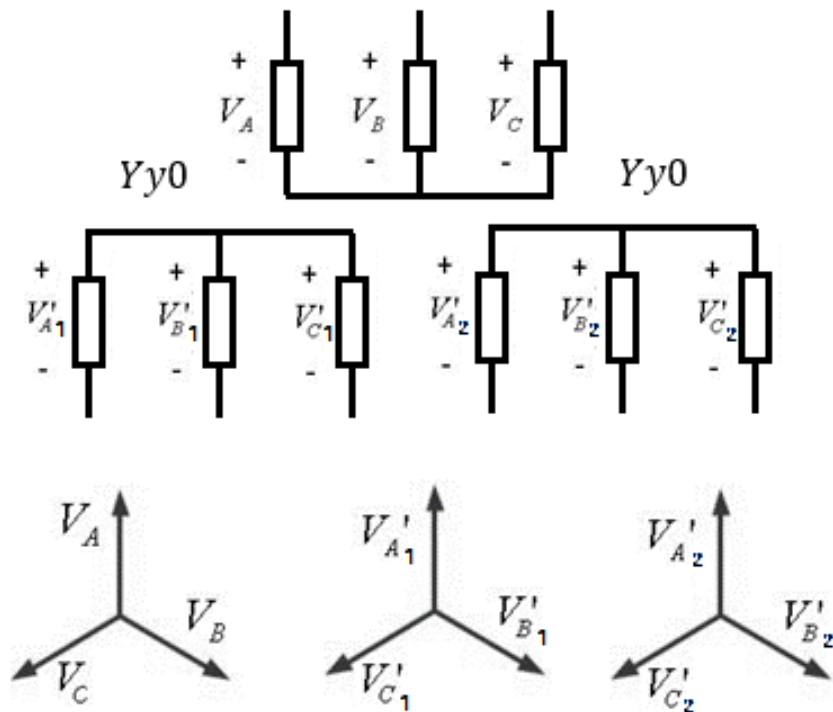


Figura 49- Conexión interna del transformador Yy0 para ambos secundarios en las tres fases

Sin embargo a la vista de la configuración anterior, Figura 48, se observa como los diodos, de uno de los secundarios, están en antiparalelo con los del otro secundario, es decir sus

tensiones ánodo-cátodo están en invertidas. Y como se ha mencionado anteriormente los devanados de los transformadores monofásicos están en fase.

A raíz de esta situación se plantea lo siguiente, invertir la polaridad de los diodos de uno de los devanados y a su vez invertir las fases de los devanados de ese secundario, pasando uno de ellos de Yy0 a Yy6. Una vez realizado el cambio la configuración interna del transformador quedaría como se puede ver en la Figura 50 y el esquema global en la Figura 51.

Una diferencia respecto a la configuración de la Figura 46, es que en este caso hay que conectar los diodos al mismo nodo y la resistencia al neutro del transformador.

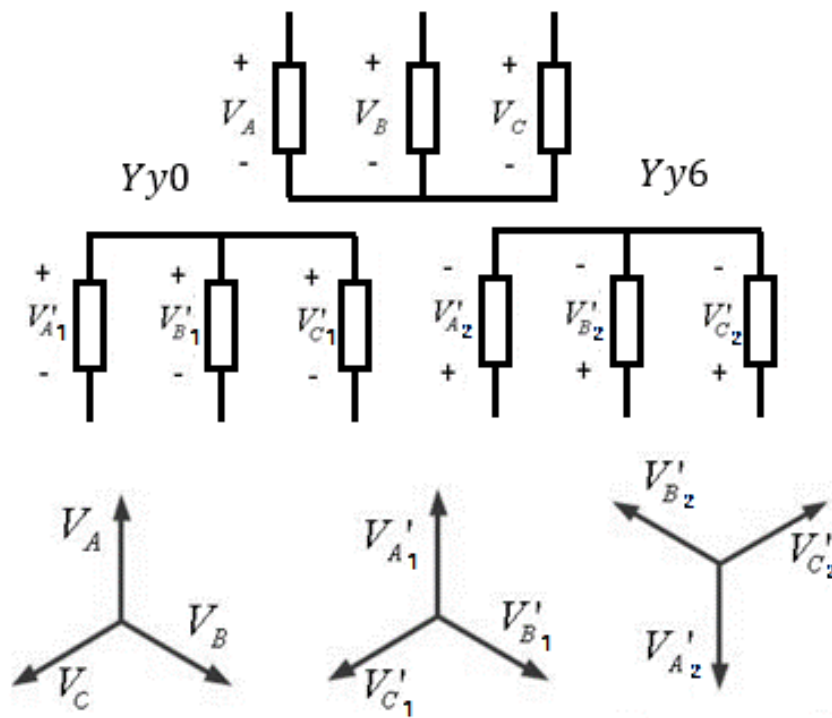


Figura 50- Conexión interna del transformador (la conexión del devanado 2 es Yy6 y la del devanado 1 es Yy0)

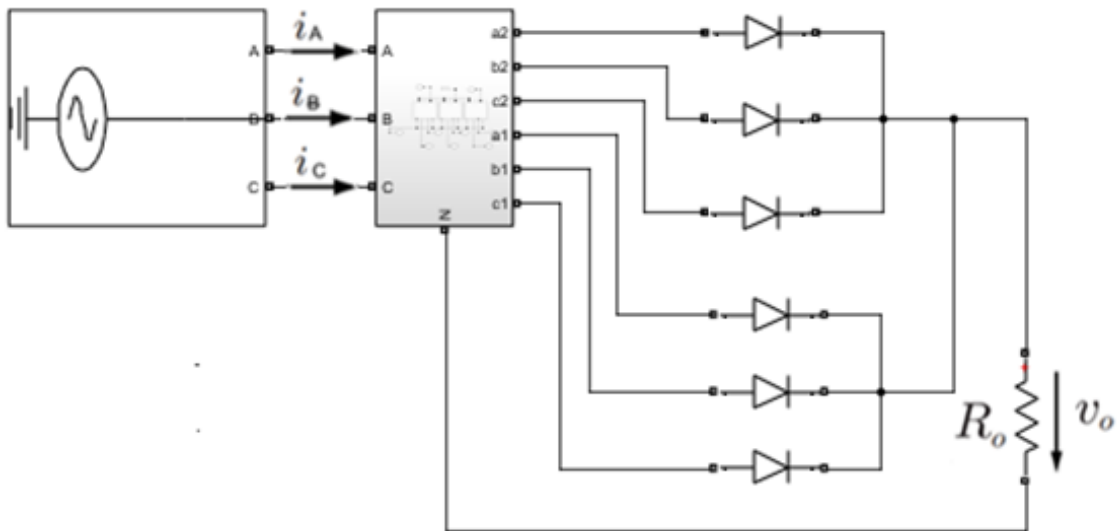


Figura 51- Configuración atípica de un convertidor de onda completa trifásico cambiando la polaridad de los diodos y la configuración de los devanados del transformador

### 3.3 Pruebas convertidor onda completa con transformador

Para ver cómo funciona la configuración de la Figura 51 se realizan una serie de simulaciones con los datos de la Tabla 4.

Tabla 4- Datos generales de la simulación

Tensión en la fuente	400 V
Frecuencia del sistema (f)	50 Hz
Potencia de un transformador monofásico	112.33 kVA
Configuración de los devanados secundarios	Yy0 / Yy6
Relación de tensión de los transformadores	400/20 V
Tensión de cortocircuito(%)	2.4%

Se procederá a ajustar el valor de la resistencia para observar cómo cambia la intensidad corriente arriba del transformador.

A continuación, se detallan en la Tabla 5 las pruebas a realizar y los valores correspondientes de la resistencia en cada una.

Tabla 5- Pruebas a realizar y su correspondiente valor de resistencia

Número de prueba	Valor de la Resistencia
Prueba 1	0,01 $\Omega$
Prueba 2	0,001 $\Omega$
Prueba 3	0,0001 $\Omega$

Para realizar una simulación más realista a la carga se le añade una inductancia, ver Figura 52, de un valor 10 veces menos que el de la resistencia, dichos valores pueden verse en la Tabla 6. Para dicho cálculo se utilizan las siguientes fórmulas.

$$X = \frac{R}{10}$$

$$L = \frac{X}{2\pi \cdot f}$$

Tabla 6- Pruebas a realizar y su correspondiente valor de inductancia

Número de prueba	Valor de la Inductancia
Prueba 1	3.18 $\mu\text{H}$
Prueba 2	0.318 $\mu\text{H}$
Prueba 3	0.00318 $\mu\text{H}$

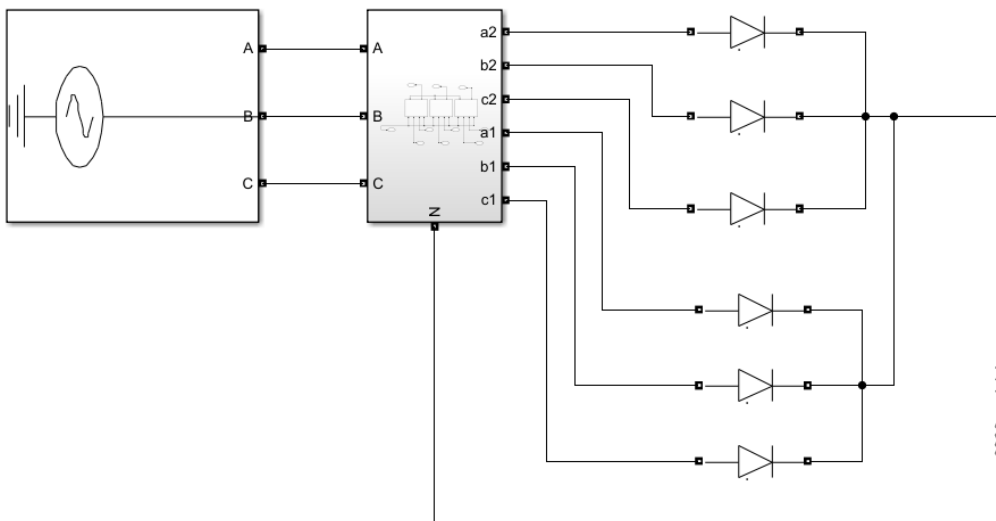


Figura 52- Esquema del convertidor con la configuración de la Figura 51 añadiendo una inductancia a la carga

La primera simulación realizada es con los valores de la Prueba 1 de la Tabla 5 y la Tabla 6. Dichos valores son una  $R = 0.01 \Omega$  y una  $L = 3.18 \mu\text{H}$ . A continuación, en la Figura 53 se expone la forma de onda de una de las fases de la intensidad en alterna aguas arriba del transformador, y en la Figura 54 el contenido armónico de la misma. Cabe resaltar que la forma de onda y su contenido armónico cumplen con las características de un convertidor de onda completa, el cual se expuso en la Figura 43 y la Figura 44.

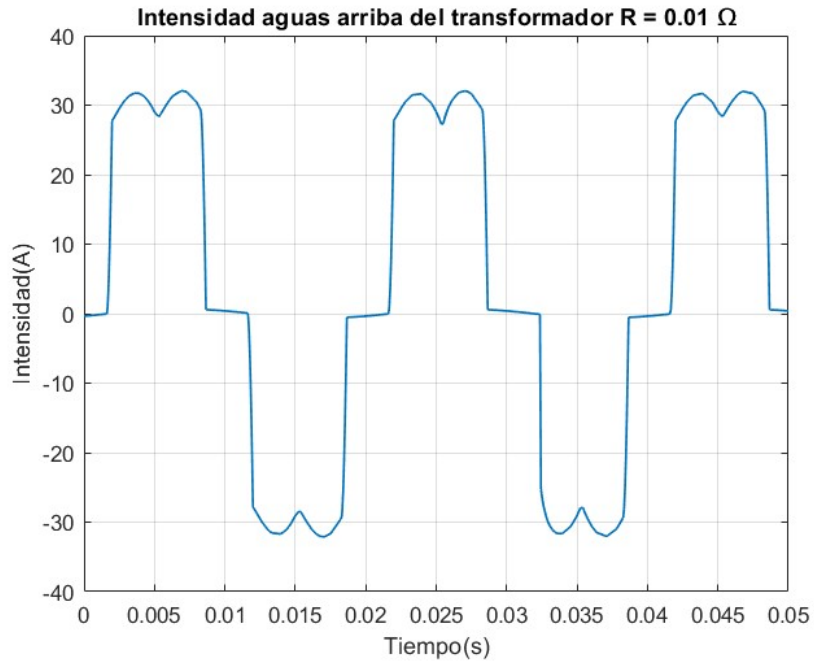


Figura 53- Forma de onda de intensidad aguas arriba del transformador (Prueba 1)

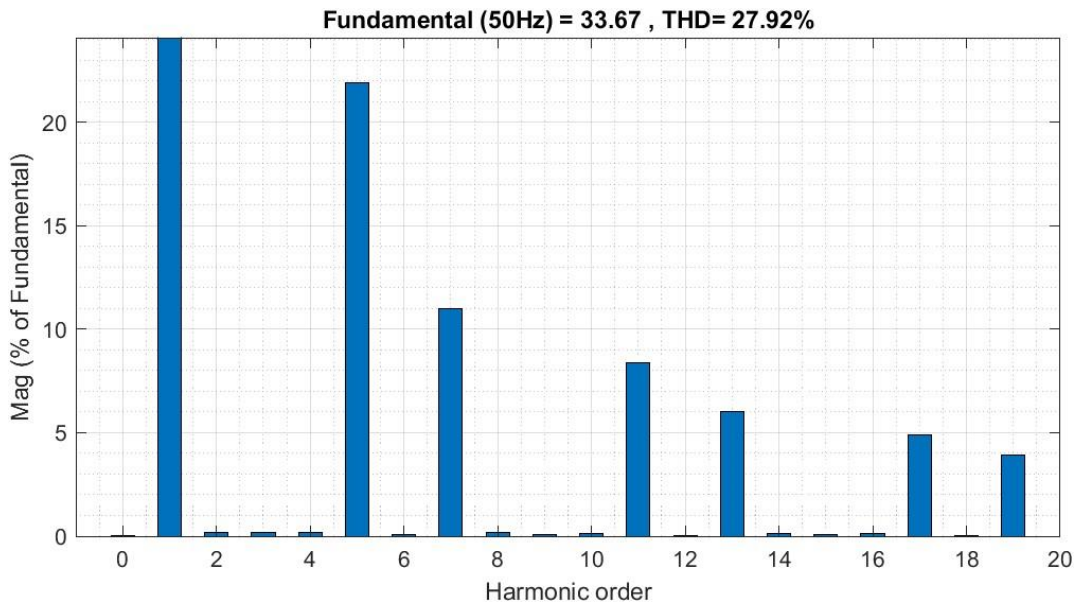


Figura 54- Contenido armónico de la intensidad aguas arriba del transformador (Prueba 1)

En las siguientes pruebas se ha ido reduciendo el valor de la resistencia y de la inductancia ya que en este trabajo se va a trabajar con un convertidor prácticamente cortocircuitado, por tanto es interesante analizar las siguientes pruebas.

Para la prueba 2 se ha tomado como valores de resistencia e inductancia,  $R = 0.001 \Omega$  y una  $L = 0.318 \mu\text{H}$  respectivamente, y la forma de onda de la intensidad es la indicada en

la Figura 55. Se observa un suavizado en los picos y el contenido armónico de esta simulación, ver Figura 56, debido a eso ha disminuido de un 27.92% a un 21.44% . Siempre están presentes los armónicos  $6k \pm 1$  característicos del convertidor de onda completa trifásico.

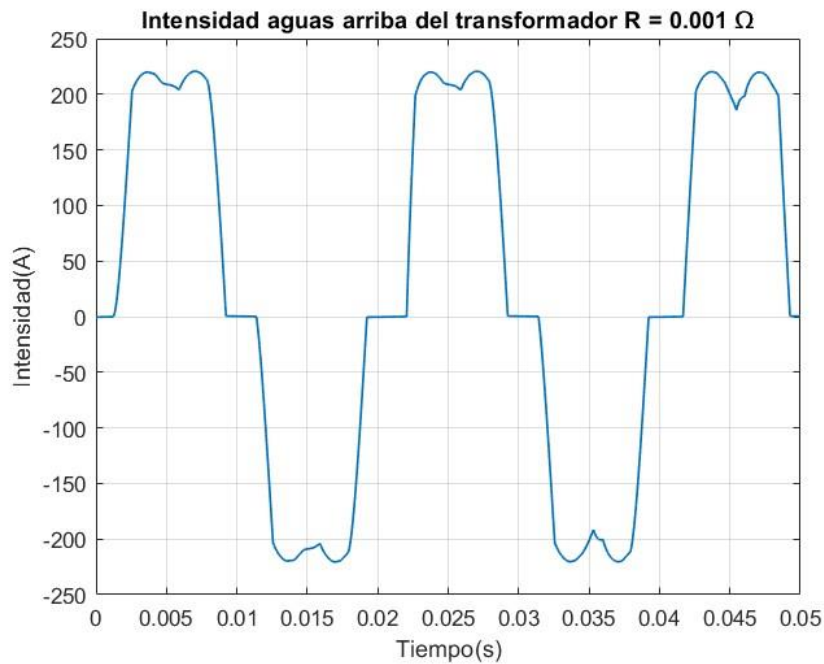


Figura 55- Forma de onda de intensidad aguas arriba del transformador (Prueba 2)

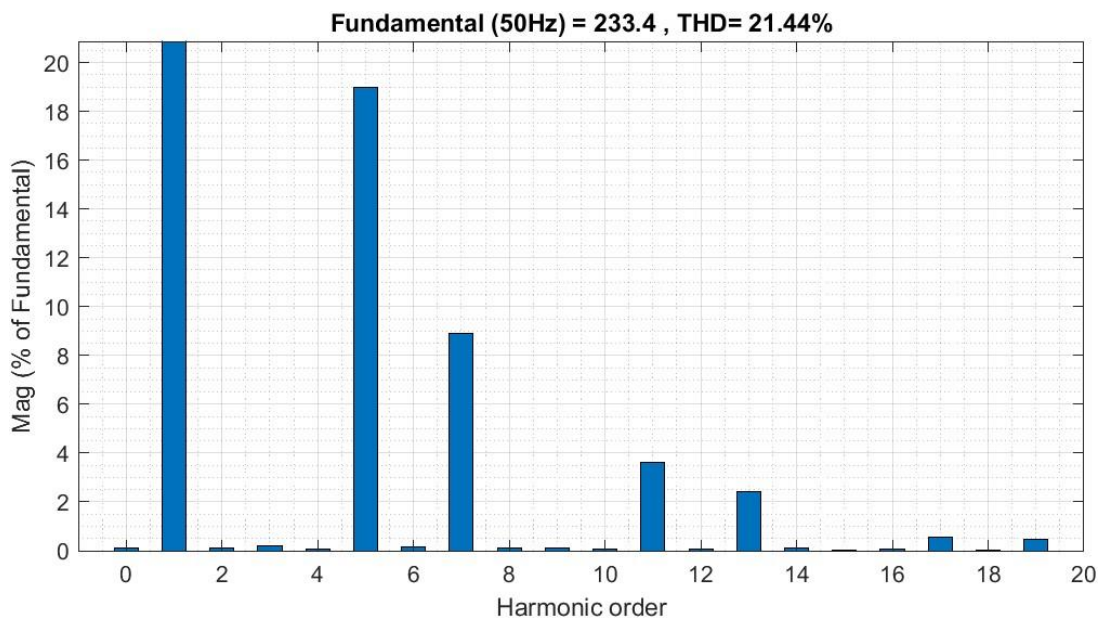


Figura 56-Contenido armónico de la intensidad aguas arriba del transformador (Prueba 2)

En la última prueba, la prueba 3, se ha simulado con un valor de resistencia e inductancia aún menor, pudiendo considerar dichos valores muy cercanos a un cortocircuito. La forma de onda en este caso expuesta en la Figura 57, se acerca más a una forma de onda senoidal,

por lo que el contenido armónico baja considerablemente, de un 21.44% de la prueba anterior, Figura 56, a un 6.5%, Figura 58.

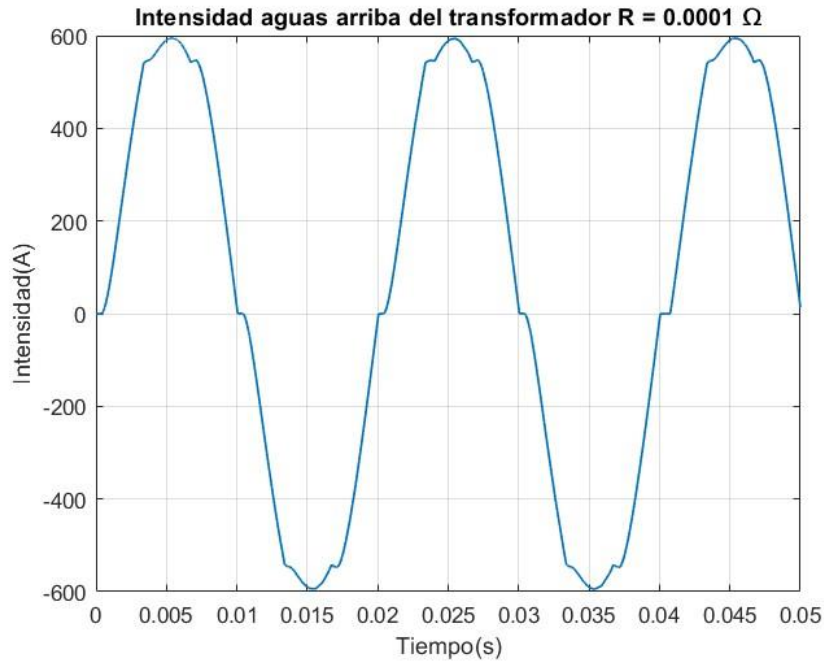


Figura 57- Forma de onda de intensidad aguas arriba del transformador (Prueba 3)

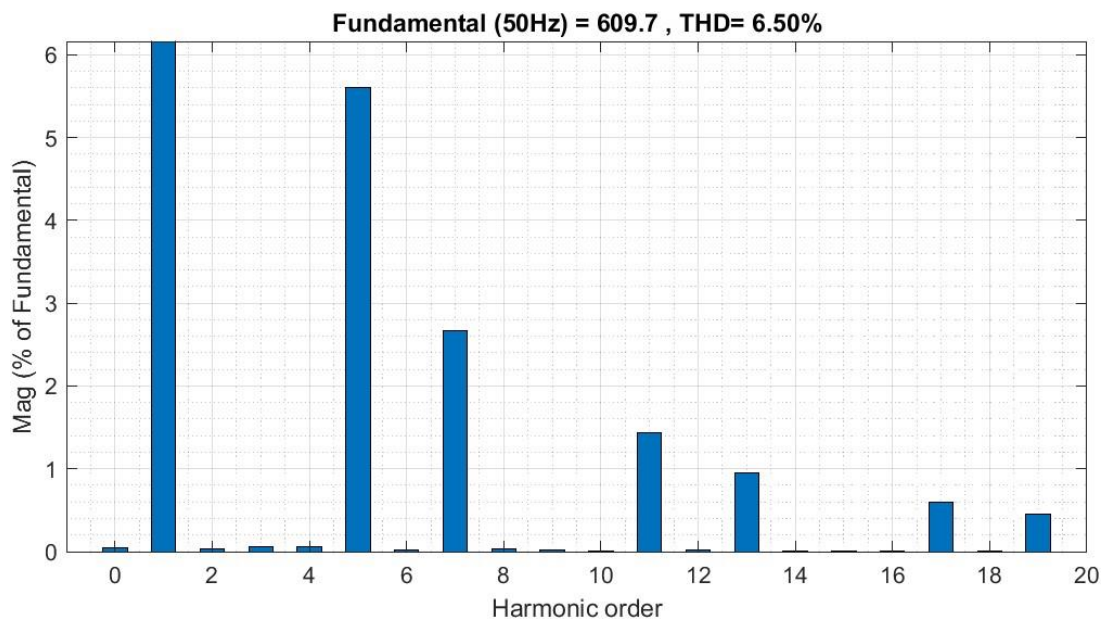


Figura 58- Contenido armónico de la intensidad aguas arriba del transformador (Prueba 3)

La configuración expuesta en este apartado sirve como explicación previa para posteriormente entender los resultados obtenidos en la simulación de la soldadora de palanquillas, y a su vez para entender su configuración interna.

Por último mencionar que la evolución que se ha ido viendo en las configuraciones de los diodos y del transformador pueden resumirse en la Figura 59. En ella se explica que una

configuración de secundarios  $Yy0$  e  $Yy0$  con los diodos en contrafase es igual que una configuración  $Yy0$  e  $Yy6$  con los diodos en fase.

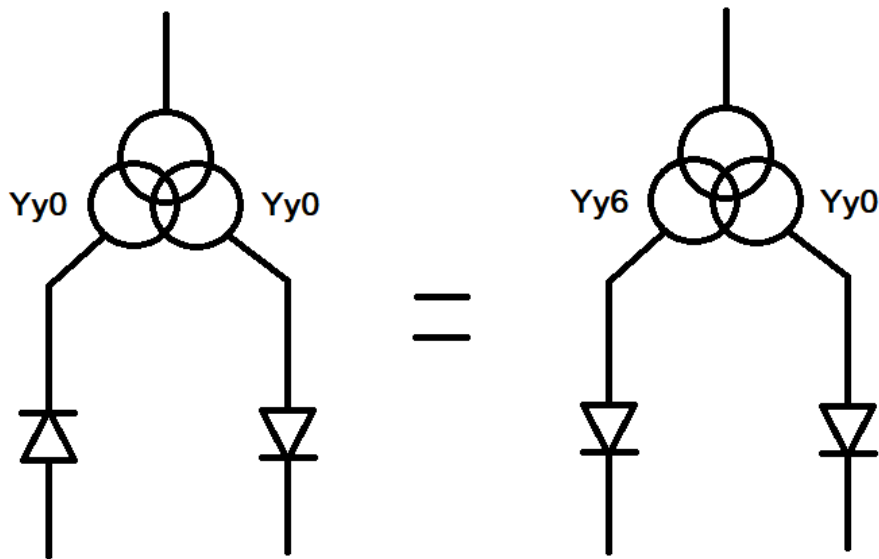


Figura 59- Esquema resumen de la relación entre configuración del transformador y disposición de los diodos

## 4. Simulación de la soldadora de palanquillas

### 4.1 Componentes

La base de este trabajo es ver cómo afecta la soldadora a la red, y para ello se ha realizado una simulación en Matlab, Simulink, donde se van a sacar una serie de datos teóricos los cuales van a ser comparados con unas mediciones experimentales.

Para esta simulación se ha seguido el esquema trifilar descrito en el apartado anterior, haciendo una serie de simplificaciones.

El esquema general es el indicado en la Figura 60.



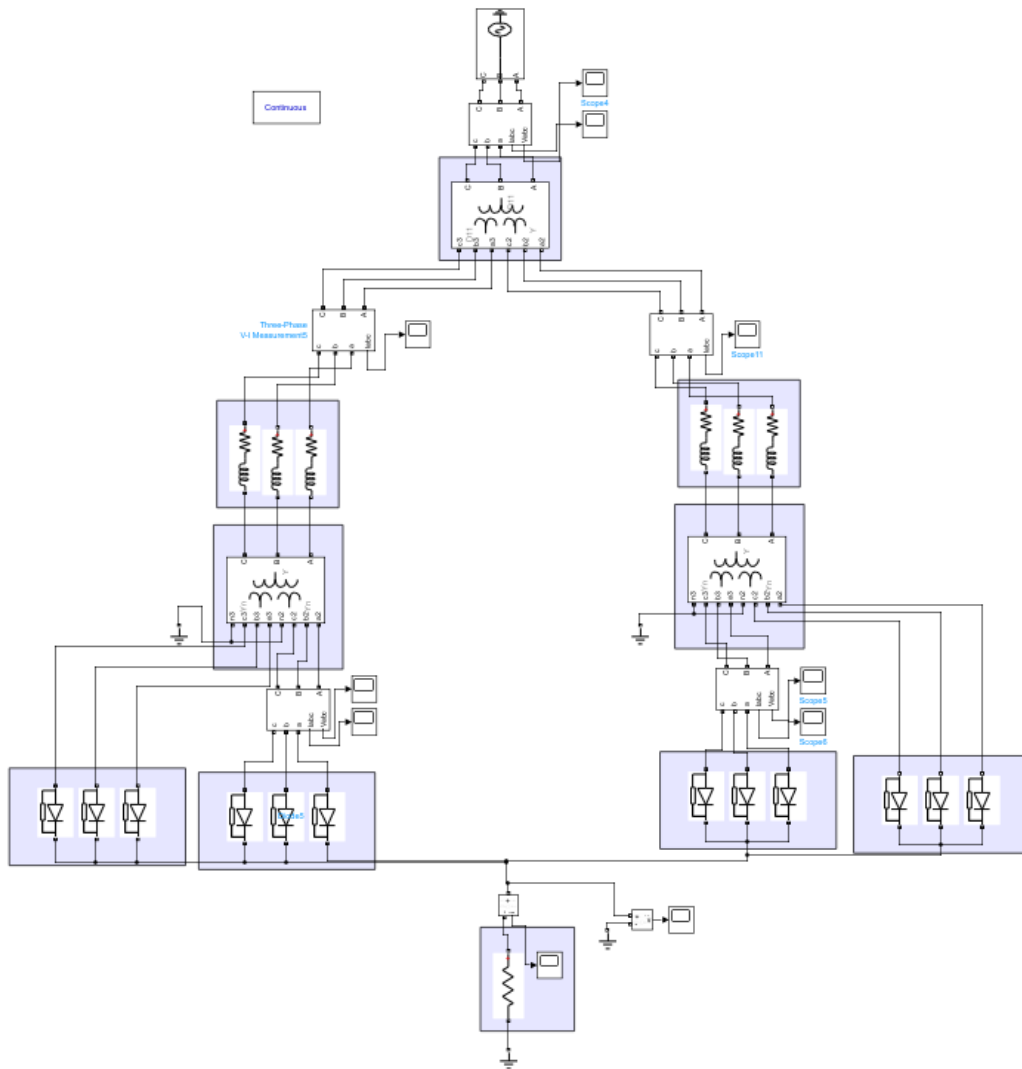


Figura 60- Esquema general trifilar de la simulación

Podemos distinguir los elementos ya descritos como el transformador de servicio, Figura 61 y Tabla 7.

Tabla 7- Características del transformador de servicio

Número de devanados secundarios	2
Potencia	1600 kVA
Resistencia interna	0,001 pu
Inductancia interna	0,02 pu
Relación de transformación	6/0,42/0,42 kV
Conexión	Dd0y11

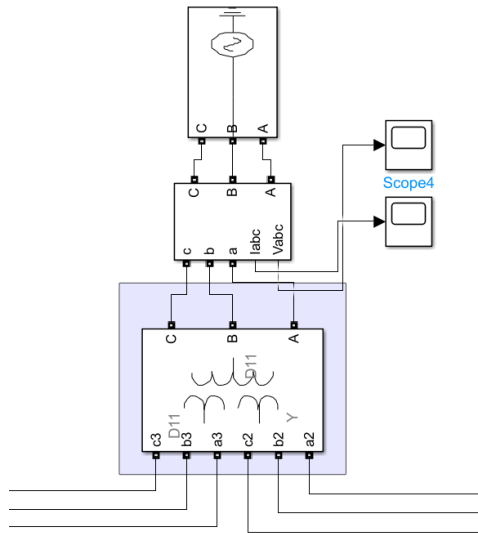


Figura 61- Esquema de conexión del transformador de servicio

Aguas abajo del trafo de servicio nos encontramos con las bobinas que actúan como filtro, Tabla 8 y Figura 62, en la simulación se le han añadido unas resistencias para modelar el comportamiento real de una bobina.

Tabla 8- Características de las bobinas de filtrado

Resistencia	0.07 $\Omega$
Inductancia	0.018 mH

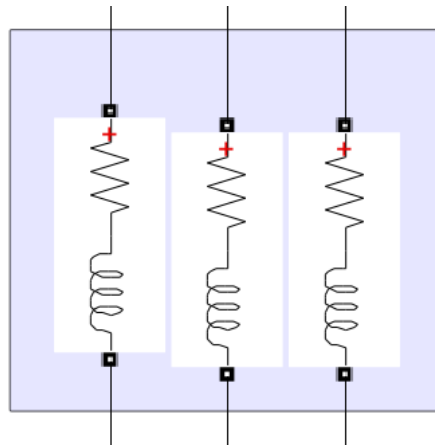


Figura 62- Bobinas de filtrado

Uno de los cambios más significativos de la simulación es que por simplicidad se ha mantenido constante la resistencia de la palanquilla, por lo que no es necesario implementar el convertidor AC/AC.

Al no tener el convertidor lo siguiente que aparece en el esquema son los transformadores de la soldadora, Figura 63, cuyas características están expuestas en la Tabla 9.

Tabla 9- Características de los transformadores internos de la máquina

Número de devanados secundarios	2
Potencia	337 kVA
Resistencia interna	0,001 pu
Inductancia interna	0,02 pu
Relación de transformación	1,7/0,12/0,12 kV
Conexión de los devanados	Yy0 e Yy6

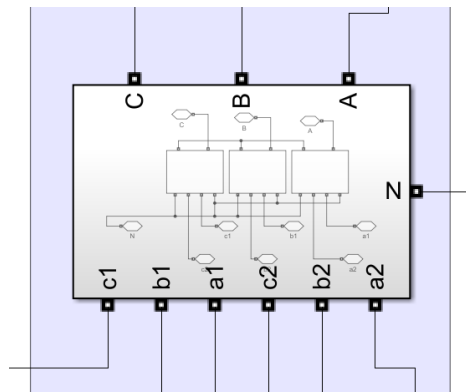


Figura 63- Esquema de conexión del transformador interno

Los secundarios de los transformadores están configurados en contrafase, lo que significa que operan en fases opuestas entre sí. Para lograr esta configuración, se utiliza un devanado Yy0 y otro devanado Yy6.

Dentro del subsistema de la Figura 63, se ha realizado la conexión en contrafase. Los devanados con el número 2 están conectados de manera inversa, es decir, se conecta el terminal positivo al neutro a diferencia de los devanados con el número 3 donde el que se conecta al neutro es el terminal negativo. Esto provoca la configuración en contrafase de los devanados Yy0 para el 3 e Yy6 para el 2, como puede observarse en la Figura 64.

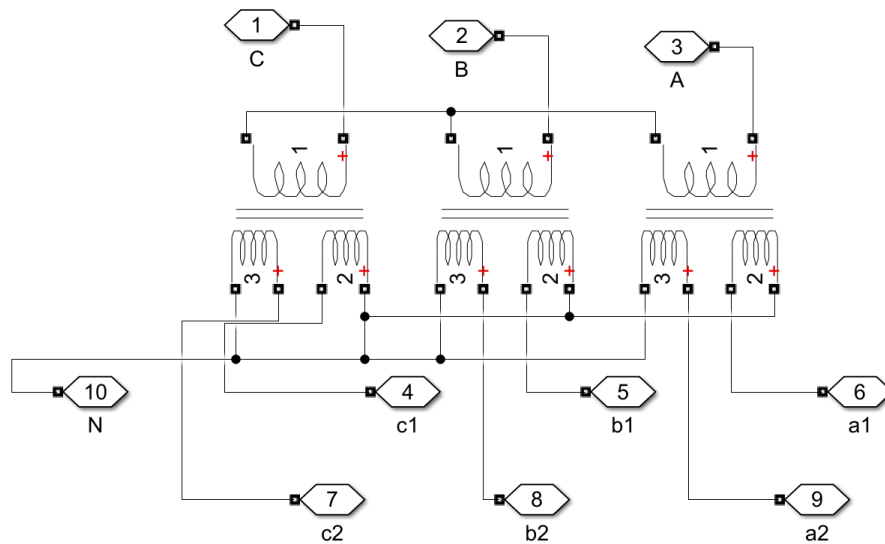


Figura 64- Esquema de conexión interna de los transformadores de la soldadora de palanquillas

A la salida de los transformadores se encuentran los diodos que forman el puente de onda completa que transforma la corriente alterna en corriente continua.

Los diodos implementados en la simulación, Figura 65, cuyas características están expuestas en la Tabla 10, tienen en paralelo la resistencia snubber, lo cual evita problemas en la simulación al tener en serie una bobina y un diodo.

Tabla 10- Características de los diodos

Resistencia Ron	0,001 $\Omega$
Tensión directa Vf	0.8 V
Resistencia amortiguadora (snubber)	500 $\Omega$
Condensador amortiguador	250 nF

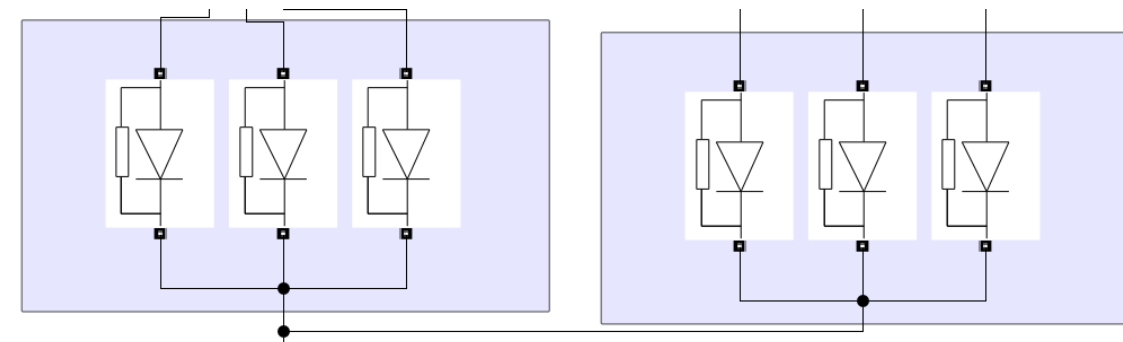


Figura 65- Esquema de conexión del convertidor de media onda

La resistencia óhmica de un material depende entre otras cosas de su temperatura siguiendo una fórmula concreta.

$$R_{t_f} = R_{t_o} \cdot [1 + \alpha \cdot (t_f - t_o)]$$

Por lo que las palanquillas, las cuales entran a una temperatura elevada, tienen una resistencia diferente a la que tendrían si estuvieran frías. Además, esta máquina suelta por cortocircuito, aumentando aún más la temperatura de la palanquilla y también su resistencia óhmica.

Con esta información y los datos de la Tabla 11, se ha modelado la resistencia óhmica de la palanquilla.

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

Tabla 11- Datos para calcular resistencia óhmica de la palanquilla

Resistividad del material ( $\rho$ )	$0.072 \frac{mm^2}{m} \cdot \Omega$
Longitud (L)	6 m
Sección (S)	Cuadrada de 115 mm por lado
Coefficiente de temperatura ( $\alpha$ )	0,005
Temperatura de la palanquilla	1230 °C

$$R_o = \rho \frac{L}{S} = 0.072 \frac{6}{13225} = 3.27 \cdot 10^{-5} \Omega$$

$$R = R_o \cdot (1 + \alpha \cdot T) = 3.27 \cdot 10^{-5} \cdot (1 + 0.005 \cdot 1230) = \mathbf{2.34 \cdot 10^{-4} \Omega}$$

Sin embargo, no solo hay que tener en cuenta la resistencia de la palanquilla, se tiene en cuenta la resistencia de los cables y el metal, desde los transformadores hasta las mordazas que agarran la propia palanquilla.

Teniendo en cuenta que se va a modelar dicha resistencia con un cable con las características expuestas en la Tabla 12.

Tabla 12- Características del cable que une los transformadores de la máquina con la palanquilla

Resistividad del material ( $\rho$ )	$0.01724 \frac{mm^2}{m} \cdot \Omega$
Longitud (L)	4 m
Sección (S)	Circular de 20 mm de radio

$$R_c = \rho \frac{L}{S} = 0.01724 \frac{4}{\pi \cdot 20^2} = 0.5 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Por tanto la resistencia a modelar en la simulación, teniendo en cuenta el cable es de aproximadamente  $R = 3 \cdot 10^{-4} \Omega$ . Además se ha tenido en cuenta una inductancia parásita diez veces menor que la resistencia.

$$X = \frac{R}{10}$$

$$L = \frac{X}{2\pi \cdot f}$$

Por lo que la bobina que simula dicha inductancia tendría un valor de  $L = 0.0955 \mu H$ .

## 4.2 Resultados

### 4.2.1 Resultados con convertidor de onda completa

En esta sección, se presentarán los resultados obtenidos a partir de la simulación. A través de la simulación, se ha explorado el comportamiento de la soldadora de palanquillas. Los resultados proporcionarán una visión detallada del rendimiento y servirán como base para comprender su comportamiento en aplicaciones prácticas.

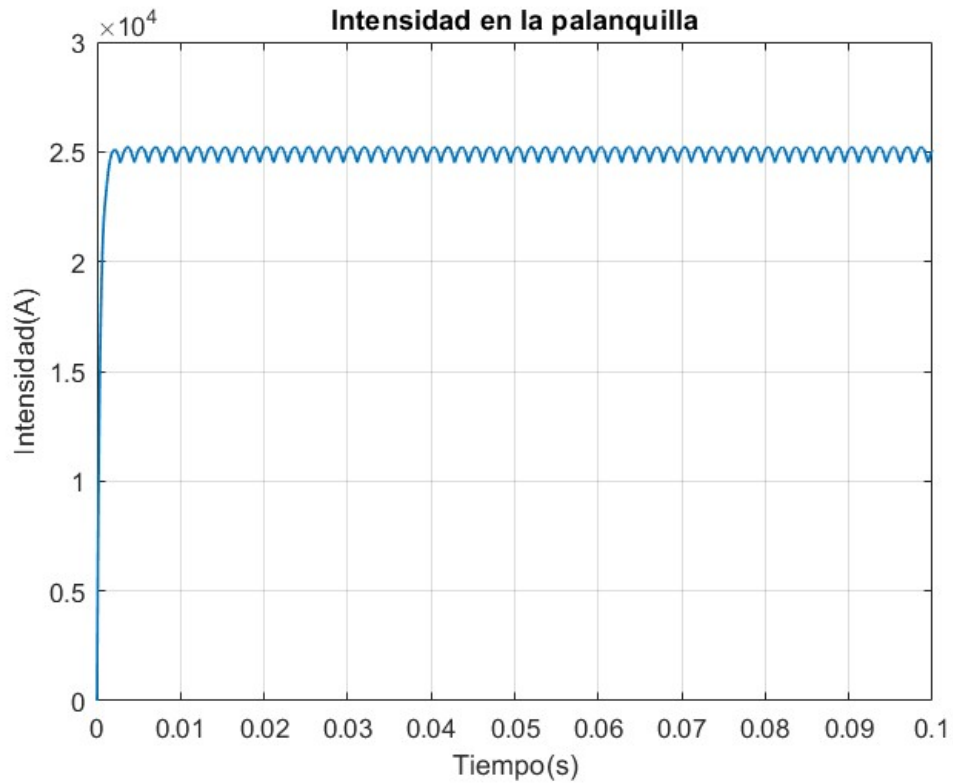


Figura 66- Intensidad que circula por la palanquilla

En la Figura 66 se observa como la intensidad alcanza los 25 kA necesarios para que las palanquillas se suelden.

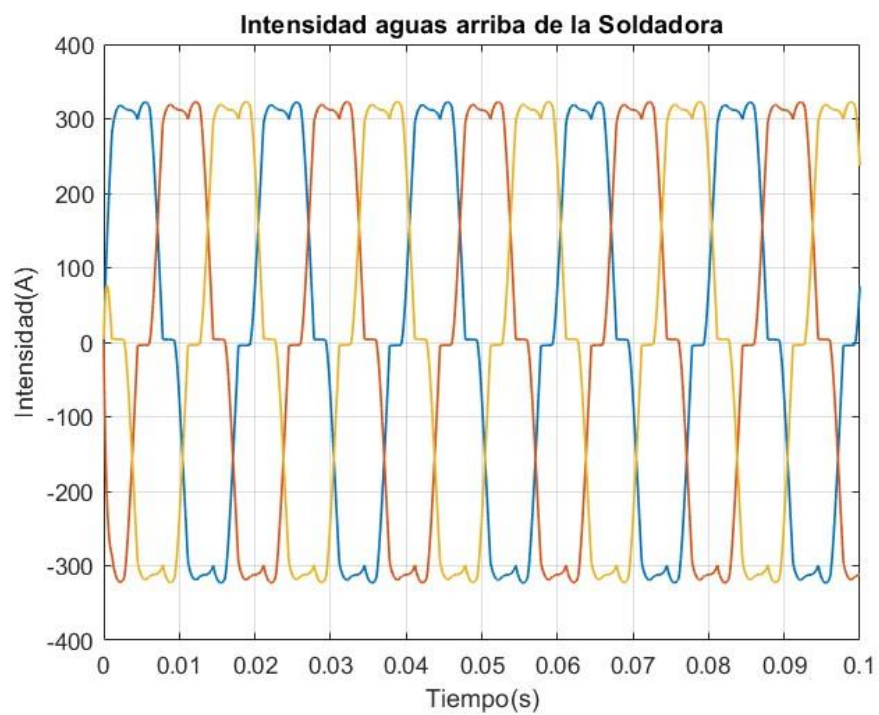


Figura 67- Intensidad aguas arriba de la soldadora

Como se puede ver en la Figura 67, la intensidad aguas arriba de la soldadora no es senoidal. Si se realiza una comparativa con los resultados obtenidos en el apartado '3.3 Pruebas convertidor onda completa con transformador', el valor de la resistencia e inductancia, utilizadas para simular la palanquilla y el cable que va hasta ella, está entre el valor de la Prueba 2 y la Prueba 3, como puede verse en la Tabla 13.

Tabla 13- Comparativa de valores de R y L

	Resistencia ( $\Omega$ )	Inductancia ( $\mu\text{H}$ )
Prueba 2	0,001	0.318
Simulación	0.0003	0.0955
Prueba 3	0.0001	0.0318

Se vio que a medida que la resistencia disminuía, el comportamiento de la forma de onda de la intensidad aguas arriba del transformador iba siendo cada vez más senoidal. Esto provoca una disminución del THD, contenido armónico, a medida que disminuye la resistencia.

El contenido armónico de la intensidad mencionada es el representado en la Figura 68.

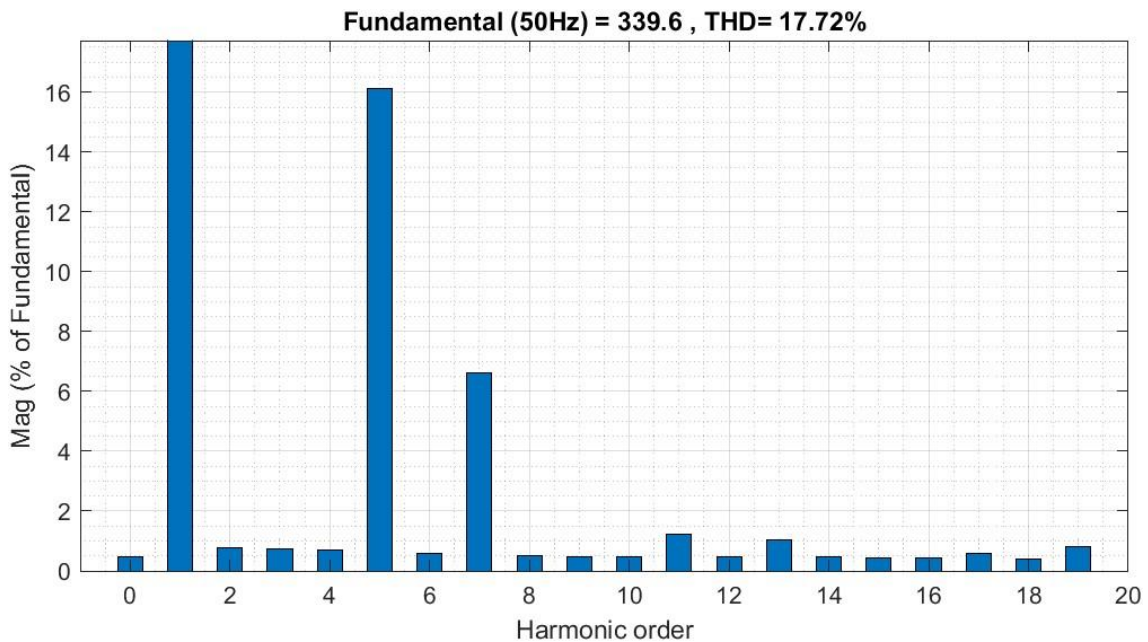


Figura 68- Contenido armónico de la intensidad aguas arriba de la soldadora de palanquillas

En la Tabla 14 se recoge un resumen comparativo de los contenidos armónicos de las pruebas y simulación mencionados en la Tabla 13.



Tabla 14- Comparativa de THD

	THD (%)
Prueba 2	21.44
Simulación	17.72
Prueba 3	6.5

Una de las medidas más relevantes en esta simulación es la realizada aguas arriba del transformador de servicio, ya que el objetivo de este trabajo es ver que impacto tiene este tipo de máquinas en la red a nivel de armónicos.

En la Figura 69 se observa que la intensidad es prácticamente senoidal, siendo su contenido armónico muy bajo, como puede verse en la Figura 70, por ello antes de comentar los resultados experimentales en el siguiente apartado, puede decirse que el impacto a nivel de armónicos es inexistente.

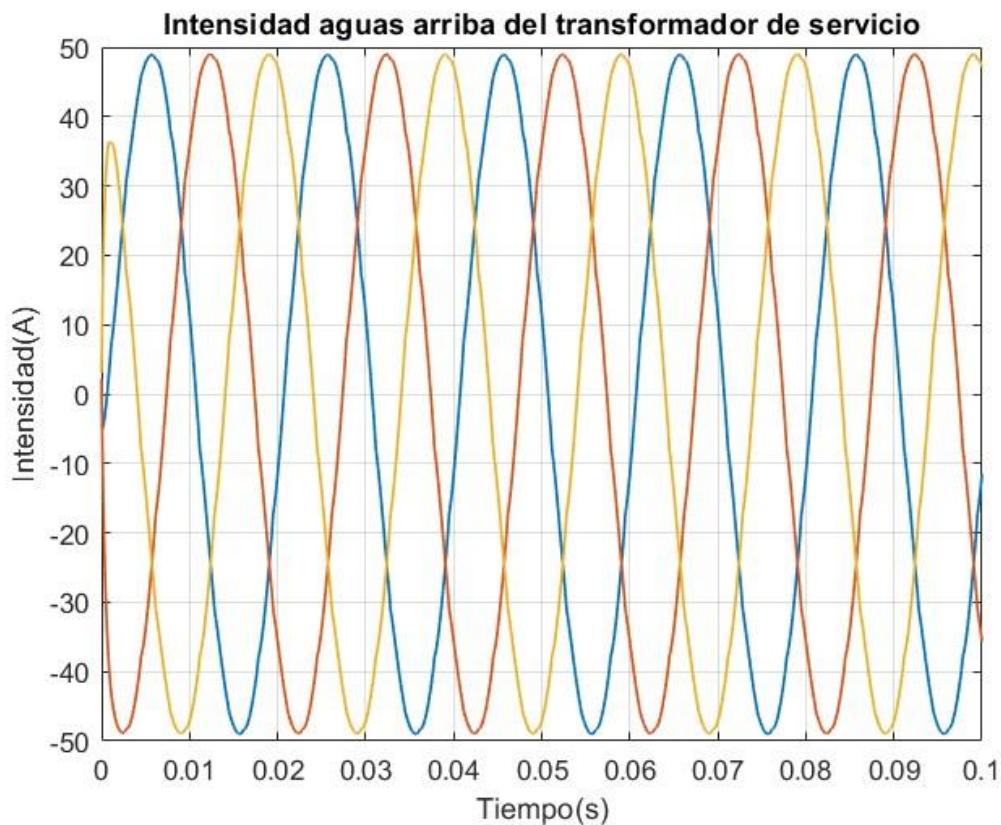


Figura 69- Intensidad aguas arriba del transformador de servicio

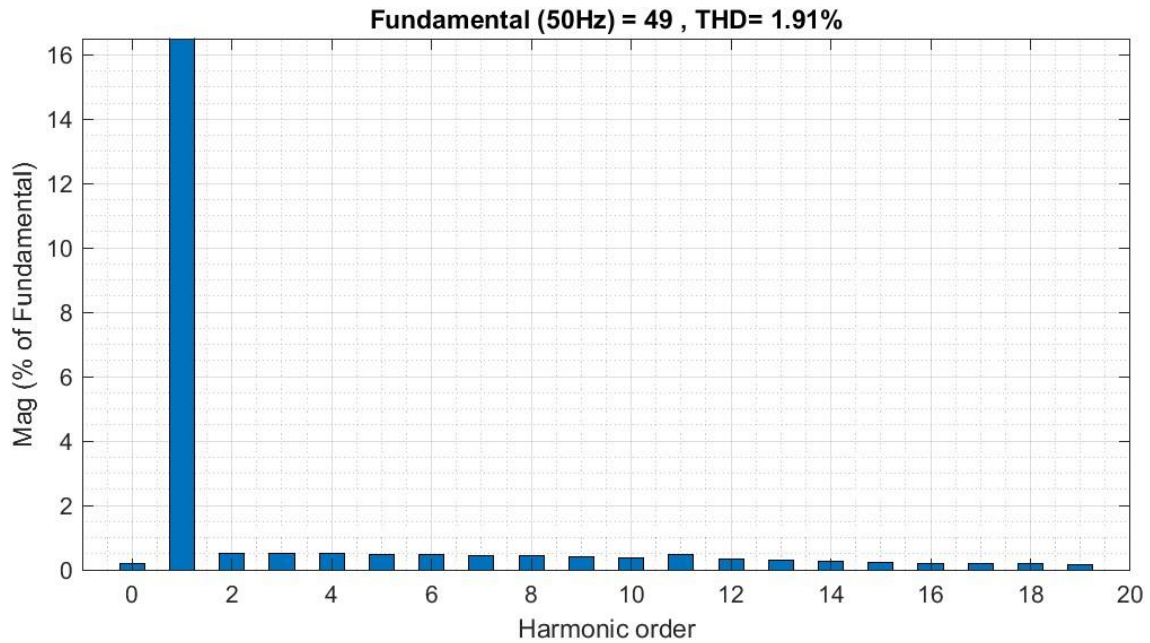


Figura 70- Contenido armónico de la intensidad aguas arriba del transformador de servicio

### 4.2.3 Experimental

Para completar el análisis del impacto de la soldadora de palanquillas en la red eléctrica, se llevó a cabo una medición experimental de los armónicos utilizando un analizador de redes.

El analizador de redes se colocó aguas abajo del transformador de servicio en el cuadro eléctrico que precede a la soldadora. Por motivos de seguridad, no fue posible realizar la medición en el lado de alta tensión, es decir, aguas arriba del transformador.

Inicialmente, se procedió a desconectar la alimentación eléctrica del cuadro para garantizar un entorno de trabajo seguro.

Posteriormente, se instalaron toroidales en cada fase para capturar los valores de intensidad y tensión necesarios para realizar los cálculos.

Los toroidales se colocan envolviendo las pletinas por donde pasa la intensidad, Figura 71 y 72.



Figura 71- Imagen 1 de la colocación de los toroidales en las pletinas

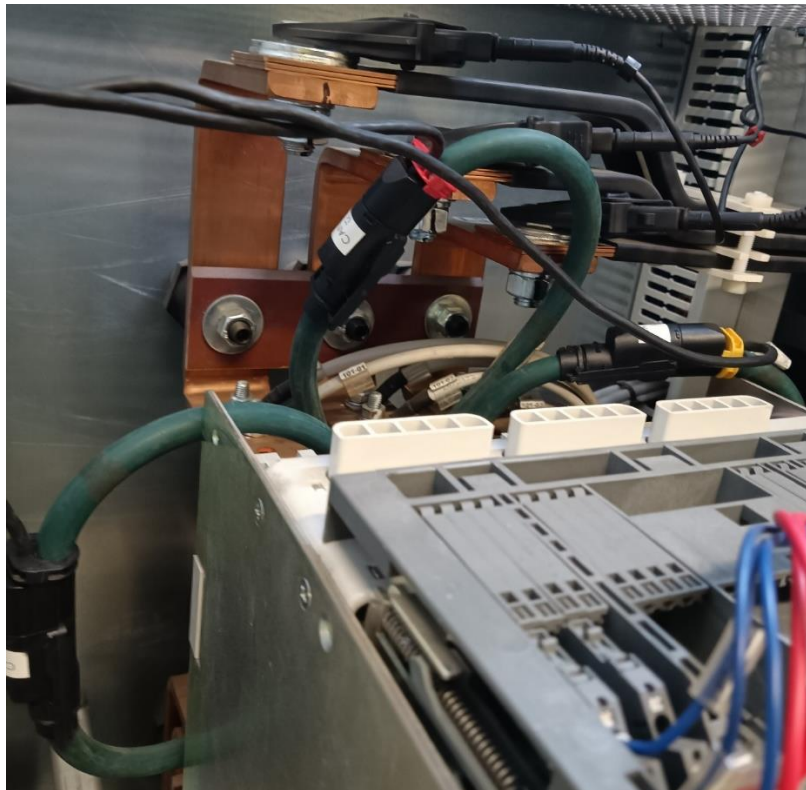


Figura 72- Imagen 2 de la colocación de los toroidales en las pletinas



Figura 73- Conexión de las bornas para la medición

Una vez conectados los toroidales se conectan al analizador de redes. En la Figura 73 se observa que hay 6 terminales, los de la derecha captan la intensidad de cada fase y los de la izquierda captan la tensión.

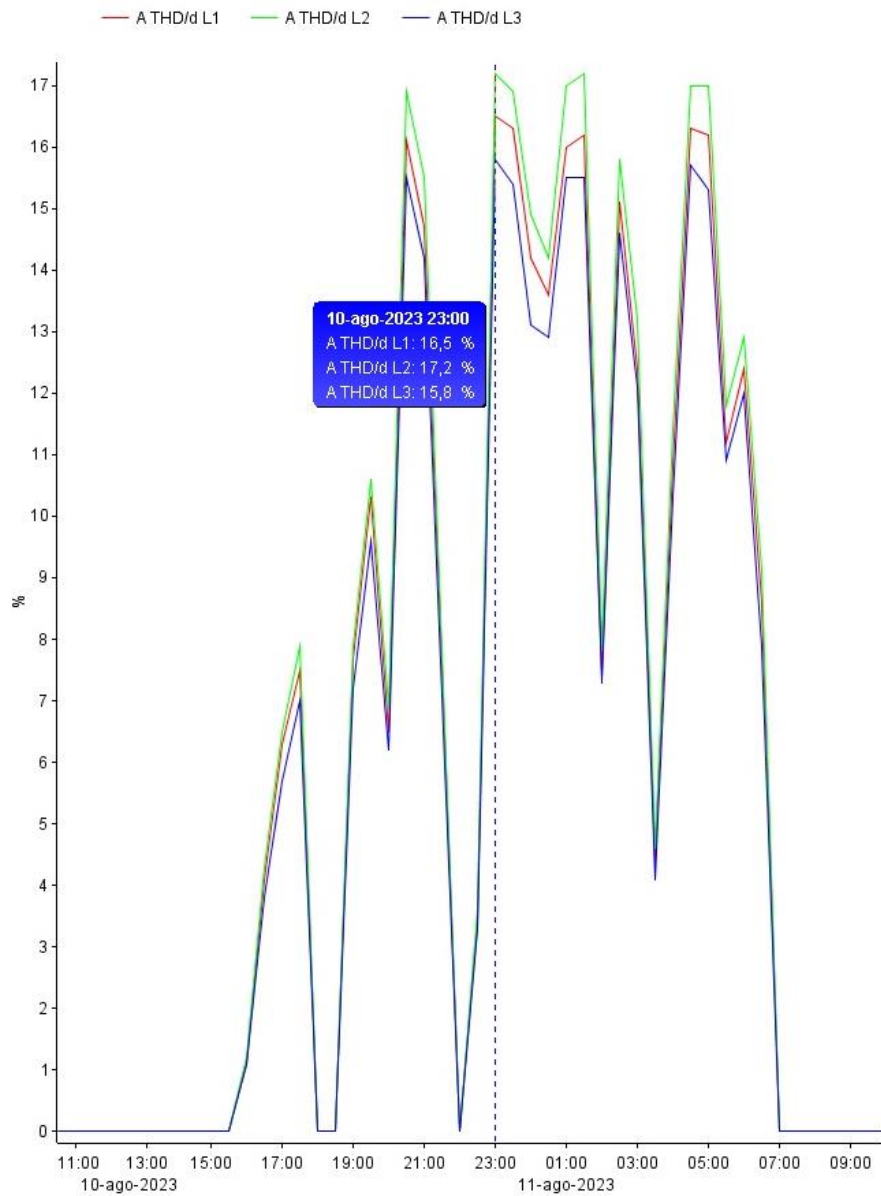


Figura 74- THD, en porcentaje, proporcionado por el analizador de redes

El THD registrado experimentalmente con la soldadora en funcionamiento es del 17%, Figura 74.

Este resultado experimental concuerda con el de la simulación, puede verse en la Figura 68, por lo que se puede afirmar que las configuraciones y valores utilizados son correctos.

## 5. Conclusiones

El desarrollo y la simulación de la soldadora de palanquillas dentro del proceso de laminación ha demostrado ser un avance significativo en la producción de bobinas de acero corrugado. La introducción de esta máquina responde a la necesidad del mercado de minimizar el desperdicio de material y evitar los despuntes, optimizando así la eficiencia del proceso de laminación.

Uno de los aspectos más relevantes de este trabajo ha sido la simulación de la soldadora, basada en un convertidor de onda completa trifásico. Los resultados obtenidos de esta simulación concuerdan con la teoría expuesta en capítulos anteriores, donde se analizó los comportamientos de los distintos dispositivos de rectificación basado en diodos, incluyendo el rectificador de media onda y el de onda completa, ambos en su configuración monofásica y trifásica.

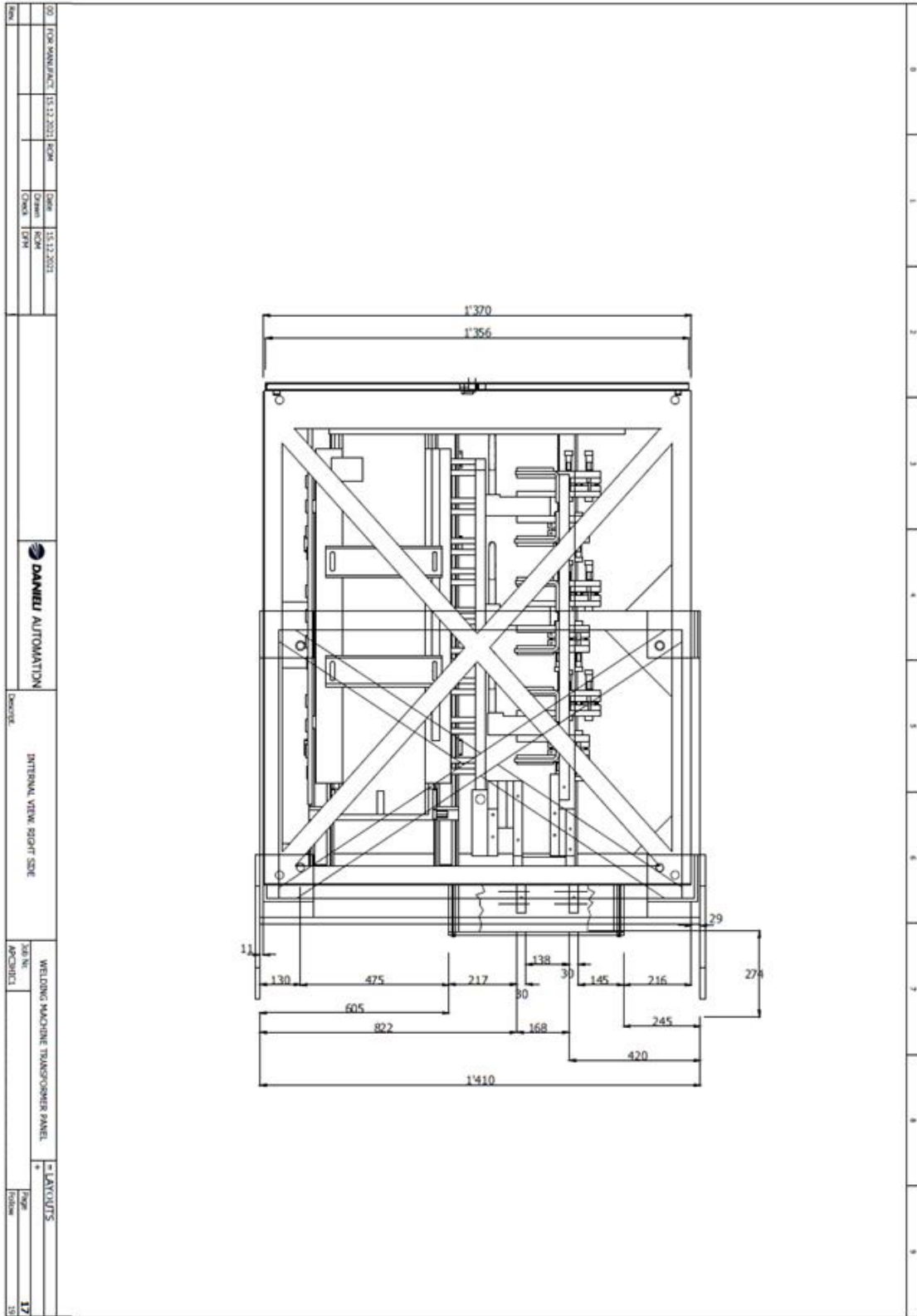
Las mediciones experimentales, llevadas a cabo con un analizador de redes, han sido muy importantes a la hora de validar la simulación. Estas mediciones se realizaron midiendo la intensidad y los armónicos aguas arriba de la soldadora. Los resultados experimentales coincidieron con los simulados, lo que indica que la simulación, a pesar de las simplificaciones aplicadas, es correcta. Una de las simplificaciones más significativas fue la eliminación de un convertidor AC/AC utilizado para controlar la tensión sobre la palanquilla. Este dispositivo es crucial para mantener una intensidad constante de 25 mil amperios, ajustando la tensión en respuesta a los cambios de resistencia debido a variaciones de temperatura de la palanquilla. Sin embargo, en la simulación se asumió una resistencia constante para simplificar el modelo.

A pesar de esta simplificación, los resultados obtenidos fueron satisfactorios. Como se mencionó anteriormente, la simulación de los armónicos aguas arriba del transformador de servicio mostró coherencia con las mediciones reales realizadas aguas abajo, lo que refuerza la fiabilidad del modelo simulado. En base a esto, se puede afirmar que la soldadora de palanquillas no introduce impactos negativos a nivel de armónicos en la instalación eléctrica de la fábrica.

Por lo tanto, se concluye que los resultados obtenidos en la simulación son fiables y válidos para el objetivo de este estudio, proporcionando una base sólida para futuras implementaciones y mejoras en el proceso de laminación de acero corrugado.



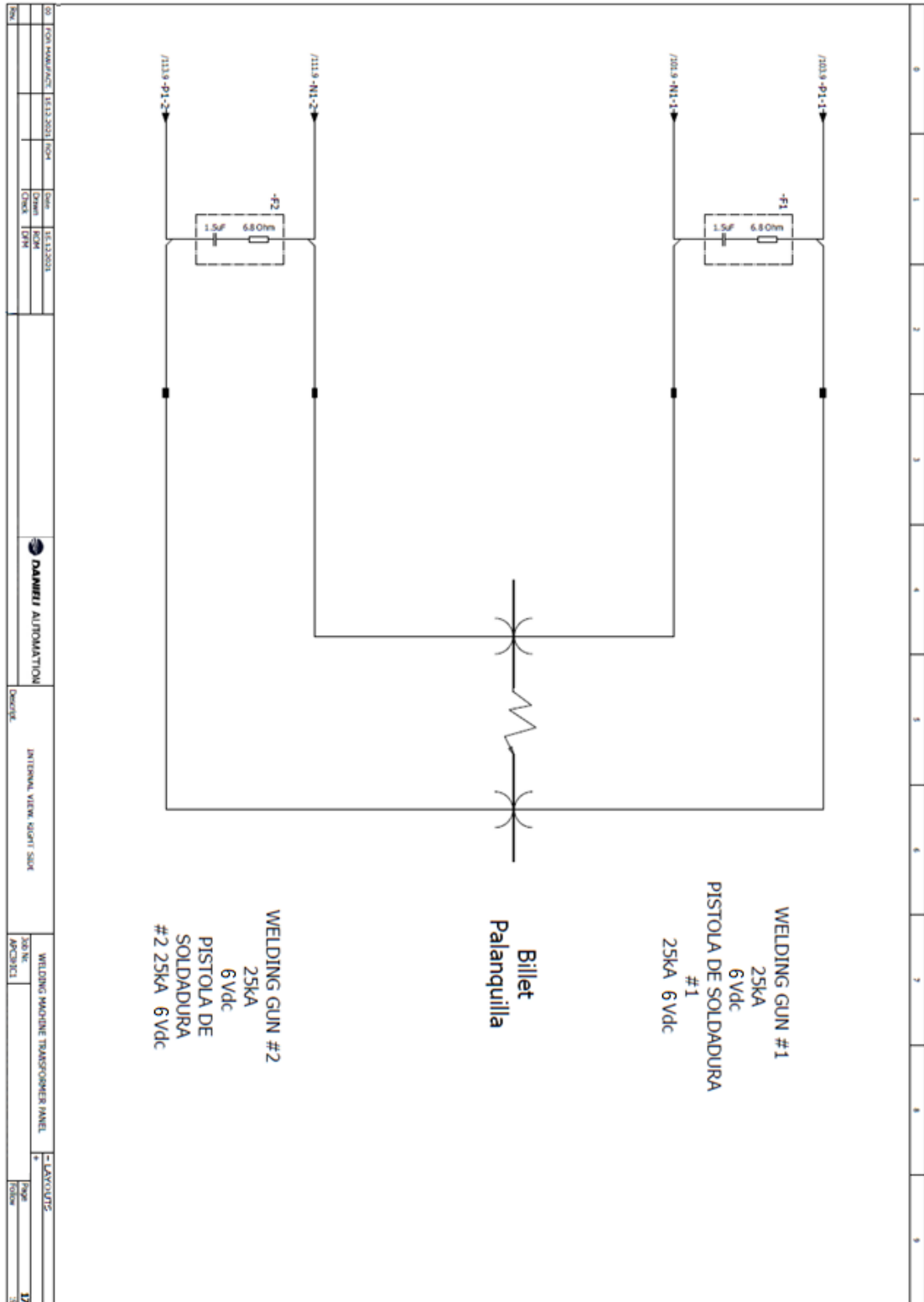




Plano 2- Plano de panel de transformadores de la soldadora vista del perfil (Danieli Automation)







Plano 4- Plano simplificado de la conexión con la palanquilla (Danieli Automation)

## Bibliografía

- [1] Danieli Automation. (s.f.). *Drives & Starters Switchboard Electrical Diagram=JD11E07+MCS01.*
- [2] Danieli Automation. (s.f.). *Drives Switchboard Electrical Diagram=JD11E07+DRM01-EWR CONVERTER.*
- [3] Danieli Automation. (s.f.). *Drives Switchboard Electrical Diagram=JD11E07+DRM02 - EWR CONVERTER.*
- [4] Danieli Automation. (s.f.). *Drives Switchboard Electrical Diagram=JD11E07+DRM03-EWR ON BOARD TRANSFORMER.*
- [5] Danieli Automation. (s.f.). *EWR version2 - Endless Welding Rolling Manual.*
- [6] Danieli. (s.f.). *Danieli.* Obtenido de <https://www.danieli.com/en/>
- [7] Dep Ingeniería Electrónica Universidad de Sevilla. (2022). "Tema 2. Diodos y rectificadores no controlados". *Electrónica de Potencia, Asignatura de 3º de Ingeniería Industrial Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla.*
- [8] *Encoder Lineal.* (s.f.). Obtenido de Industrias GSL: <https://industriasgsl.com/blogs/automatizacion/encoder-lineal>
- [9] Enríquez Berciano, J. L., Tremps Guerra, E., de Elío de Bengy, S., & Fernández Segovia, D. (2010). *Monografías sobre Tecnología del Acero. Parte IV.* Madrid.
- [10] Maza Ortega, J. M. (s.f.). *Conversión AC/DC. Dispositivos AC/DC, Asignatura del Master de Sistemas de Energía Eléctrica, Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. Dep Ingeniería Eléctrica Universidad de Sevilla.*
- [11] Siderúrgica Sevillana. (s.f.). *Siderurgica Sevillana.* Obtenido de <https://www.siderurgicasevillana.com/es/>
- [12] Tolocka, E. (1 de Junio de 2013). *Resistencia de un conductor.* Obtenido de Profe Tolocka: <https://www.profetolocka.com.ar/2013/06/01/resistencia-de-un-conductor/>