



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

**Control de una máquina síncrona como
motor paso a paso y generador**

Autor:

Diez Calvo, David

Tutor:

**Parra Gonzalo, Eduardo Pedro
Departamento de Ingeniería
Eléctrica**

Valladolid, Junio 2019.

Agradecimientos

A mis padres y hermana por su apoyo y ánimos.

Al profesorado y miembros de la Escuela de Ingenieros Industriales de Valladolid por sus enseñanzas.

En especial agradezco a Jorge, Moisés y Carlos (miembros del departamento de Ingeniería Eléctrica de la EII) por su ayuda desinteresada.

Resumen y palabras clave

En este trabajo de fin de grado se procederá al desarrollo del sistema de control para una máquina síncrona el cual la permita actuar como motor paso a paso o como generador síncrono.

Para el desarrollo de dicho sistema se hará uso del circuito integrado IRAMY20UP60B así como de una unidad NI myRIO-1900. Estos desarrollarán las funciones del sistema de control.

Palabras clave: Síncrono, motor, paso a paso, generador, continua.

This end-of-degree project will develop the control system of a synchronous machine which will allow the machine to act either as a step by step motor or as a synchronous generator.

For the development of this system it will be used of the integrated circuit IRAMY20UP60B as well as a NI myRIO-1900 unit. These will perform the functions of the control system.

Keywords: Synchronous, motor, stepper, generator, continuous.

Índice

1. Introducción	1
2. Conocimientos previos	3
2.1. Máquina síncrona	3
2.2. Máquina de corriente continua	4
2.3. Motor paso a paso	8
2.4. Unidad de control: NI myRIO-1900	13
2.5. Circuito integrado IRAMY20UP60B	17
3. Control de una máquina síncrona funcionando como motor paso a paso	23
3.1. Estudio teórico	23
3.2. Realización de un programa de control básico	34
3.3. Corrección del programa de control básico	47
3.4. Desarrollo de un programa de control avanzado	52
3.5. Programa de control definitivo	64
3.6. Resultados experimentales	76
4. Programa de control para el sistema de tracción	103
4.1. Estudio teórico	103
4.2. Creación del programa de control	103
4.3. Resultados experimentales	108
5. Conclusiones	117
6. Líneas de trabajo abiertas	119
7. Bibliografía	121
Anexos	125
Anexo 1. Esquema del circuito integrado IRAMY20UP60B	127
Anexo 2. Circuito ejemplo y conexiones del circuito integrado	129
Anexo 3. Instrumentos de medición utilizados	131
Anexo 4. Motores y generadores empleados	135
Anexo 5. Tablas de corrientes esperadas	139
Anexo 6. Esquema de los circuitos desarrollados	141
Anexo 7. Manual de usuario	151

1. Introducción

A lo largo de la historia el ser humano ha intentado, entre otras cosas, hacer que los diversos procesos que utiliza en las distintas facetas de su vida se lleven a cabo con la mayor eficiencia y, por lo general, lo más rápidamente posible. En los últimos tiempos además de estas características también se ha intentado buscar que estos sean respetuosos con el medio ambiente. Por consiguiente, por ejemplo, en el sector transporte se está apostando cada vez más por un sistema de tracción impulsado por uno o más motores eléctricos.

Este proyecto tiene como objetivo principal el estudio de una máquina síncrona como impulsora de un sistema de tracción la cual actuará como un motor paso a paso cuando funcione como motor y como una máquina síncrona cuando funcione como generador.

Para ello se desarrollará un sistema de control el cual constará de:

- Una unidad de control NI myRIO-1900 configurada mediante el programa labVIEW encargada de mandar las señales de control al circuito integrado.
- Un circuito integrado modelo IRAMY20UP60B el cual se encargará de indicarle a la máquina síncrona como ha de funcionar para que esta actúe como si fuese un motor paso a paso.

2. Conocimientos previos

Se ha decidido explicar de una forma breve los siguientes conceptos con el fin de facilitar la comprensión de la materia que se va a desarrollar a continuación y los elementos que se han de usar para el desarrollo del mismo.

2.1. Máquina síncrona

Basándome en la información extraída de las referencias bibliográficas [1] tema 10, [2] tema 5, [3] punto 2.2 y 2.3 y temas 4 a 8, [4] tema 10, [7] tema 10 y [11] punto 2.1 y tema 5 tenemos que:

Una máquina síncrona tiene como característica principal el hecho de que funciona a su velocidad de rotación (r.p.m.), la cual depende de la frecuencia f de la red de corriente alterna a la que está conectada. La relación de estos dos términos viene dada por la siguiente fórmula:

$$n = \frac{60 f}{p}$$

donde p es el número de pares de polos de la máquina y n es la velocidad de sincronismo.

Además, al igual que con cualquier otro convertidor electromecánico de la energía, las máquinas síncronas están sometidas al principio de reciprocidad electromagnética el cual nos indica que pueden funcionar tanto en régimen generador como en régimen motor.

Este tipo de máquinas, al igual que otras máquinas eléctricas, están constituidas por dos devanados independientes:

- Un **devanado inductor** situado en el rotor el cual se alimenta con corriente continua y da lugar a los polos de la máquina.
- Un **devanado inducido** recorrido por corriente alterna.

Por otra parte, se ha de resaltar que el principal uso de este tipo de máquinas es como generador eléctrico y según la forma del rotor utilizado podemos distinguir dos tipos de máquinas síncronas:

- **Máquina síncrona de rotor de polos salientes.** Empleada en las centrales hidráulicas junto a las turbinas hidráulicas. Se usa en máquinas de baja velocidad con un gran número de polos. En la figura 1 podemos ver un ejemplo de este tipo de máquina.

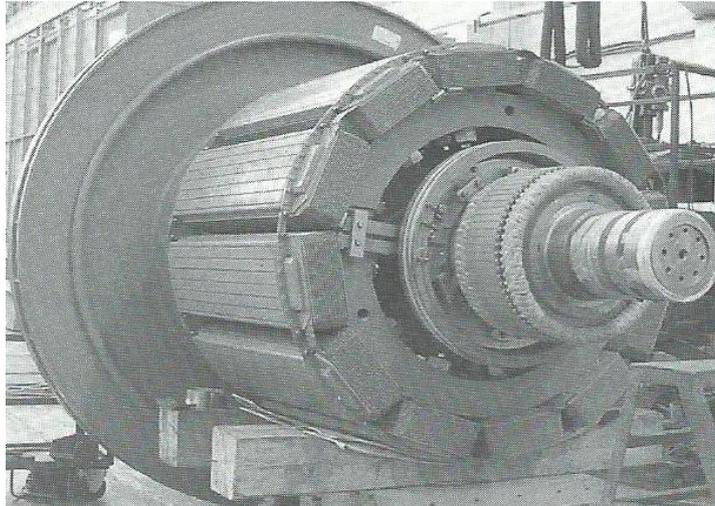


Figura 1: Máquina síncrona de rotor de polos salientes ([1] página 418)

- **Máquina síncrona de rotor cilíndrico.** Empleada en las centrales térmicas (convencionales o nucleares) junto a las turbinas de gas o vapor. Se usa en máquinas de alta velocidad de 2 a 4 polos. En la figura 2 se puede ver un ejemplo de este tipo de máquina.

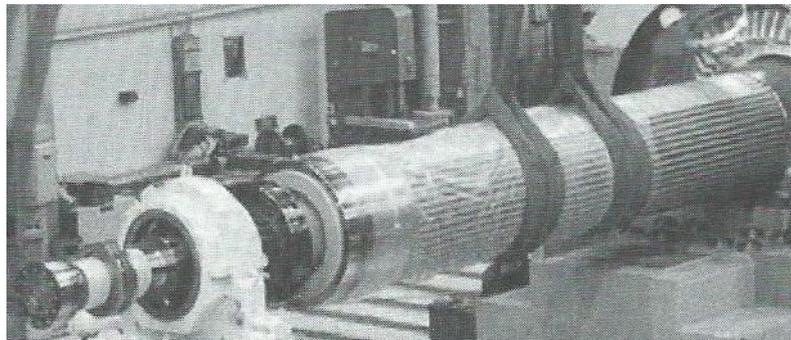


Figura 2: Máquina síncrona de rotor cilíndrico ([1] página 419)

2.2. Máquina de corriente continua

Basándome en la información extraída de las referencias bibliográficas indicadas en los puntos [4] temas 2 a 6, [5], [6] primera mitad del libro, [7] temas 2 a 4 y [11] punto 2.3 tenemos que:

Las máquinas de corriente continua, al igual que las síncronas, pueden funcionar como motor y como generador.

Este tipo de máquinas está constituido por dos devanados principales siendo estos:

- **El devanado inductor.** Situado en el estator. Se alimenta con corriente continua.

- **El devanado inducido.** Situado en el rotor. Cuando funciona como motor se le alimenta con corriente continua, que tras pasar por un colector de delgas llega al inducido en forma de corriente alterna. Por otra parte cuando funciona como generador, la corriente alterna producida en el inducido pasa por el colector de delgas convirtiéndose en corriente continua para su posterior uso allá donde sea necesaria.

A mayores de estos dos devanados tenemos otros dos que ayudan al correcto funcionamiento de este tipo de máquinas, siendo estos:

- **El devanado de compensación.** Tiene la función de anular la reacción del inducido, es decir, anular el campo magnético creado por la corriente que circula por el inducido.
- **El devanado de conmutación.** Este es el devanado de los polos auxiliares y su principal misión es la de mejorar la conmutación en el colector de delgas.

Por otra parte los polos de este tipo de máquinas se pueden dividir en:

- **Polos principales.** Corresponden al devanado inductor, también denominado de excitación.
- **Polos auxiliares.** Corresponden a los devanados de conmutación.

En la figura 3 se puede ver el esquema de un generador de corriente continua donde se pueden apreciar las partes del mismo indicadas (algunas) previamente en este subapartado.

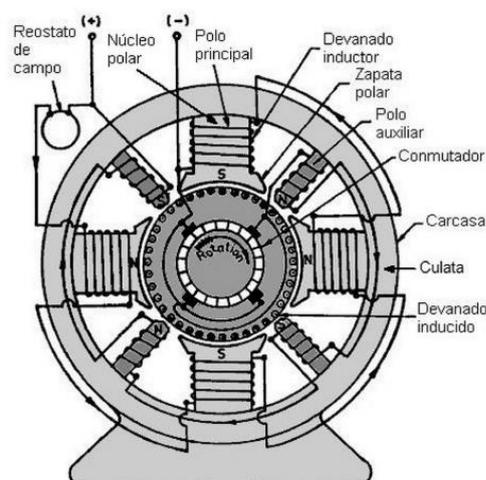


Figura 3: Esquema de un generador de corriente continua ([5] página 9)

Para concluir, se ha de señalar que según sea la forma en que se conecten los circuitos del inductor e inducido tendremos diferentes sistemas de excitación. Los posibles sistemas de excitación son:

- **Excitación independiente.** Los circuitos inductor e inducido se encuentran conectados a redes de corriente continua distintas. Un ejemplo de este sistema se puede ver en la figura 4.

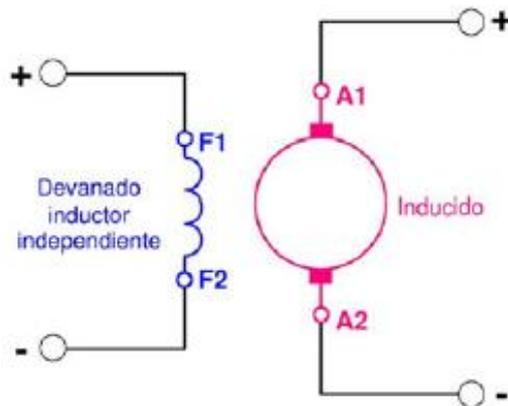


Figura 4: Máquina de corriente continua con sistema de excitación independiente ([5] página 30)

- **Excitación derivación o shunt.** Los circuitos inductor e inducido se conectan en paralelo a una misma red eléctrica. Un ejemplo de este sistema se puede ver en la figura 5.

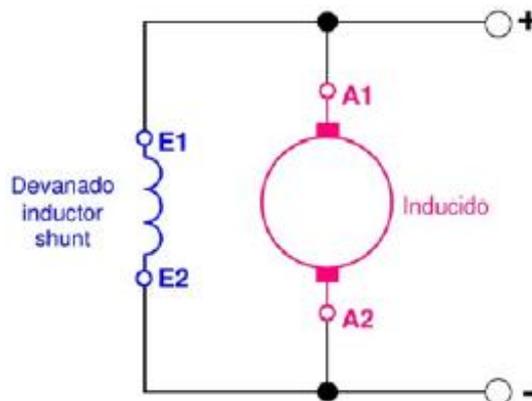


Figura 5: Máquina de corriente continua con sistema de excitación derivación o shunt ([5] página 30)

- **Excitación serie.** Los circuitos del inductor e inducido se conectan en serie entre sí para posteriormente conectar el conjunto que conforman a una red de corriente continua. Un ejemplo de este sistema se puede ver en la figura 6.

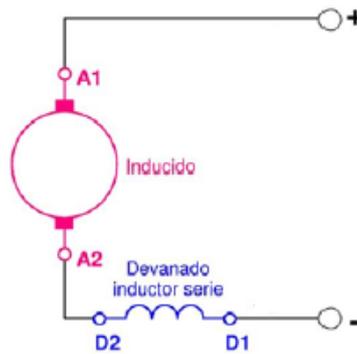


Figura 6: Máquina de corriente continua con sistema de excitación serie ([5] página 30)

- **Excitación compuesta o compound.** Las máquinas compound tienen en cada polo inductor dos bobinas de tal forma que existen dos circuitos inductores. Para obtener este tipo de sistema de excitación se procede a conectar uno de los circuitos inductores en serie y el segundo en paralelo con el circuito inducido, una vez hecho esto se conecta el conjunto a una red de corriente continua.

Este tipo de máquinas se pueden clasificar según la forma de realizar las conexiones de los inductores serie y paralelo pudiendo distinguir entre:

- **Corta derivación.** El inductor shunt se conecta directamente en paralelo con las escobillas del inducido y el conjunto de ambos se conecta en serie con el inductor serie. Un ejemplo de este sistema se puede ver en la figura 7.

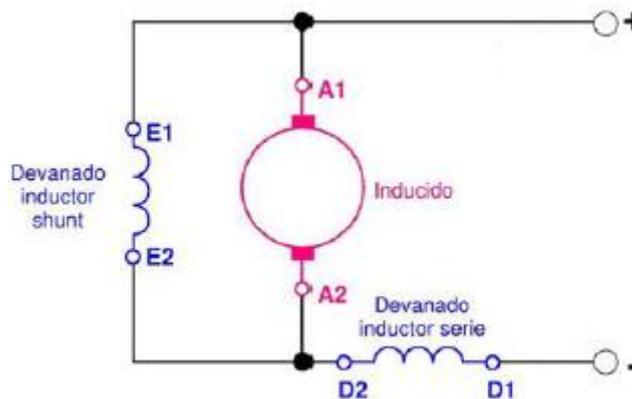


Figura 7: Máquina de corriente continua con sistema de excitación compound de corta derivación ([5] página 30)

- **Larga derivación.** El inductor serie se conecta en serie con el inducido y en paralelo a dicho conjunto se conecta el inductor shunt. Un ejemplo de este sistema se puede ver en la figura 8.

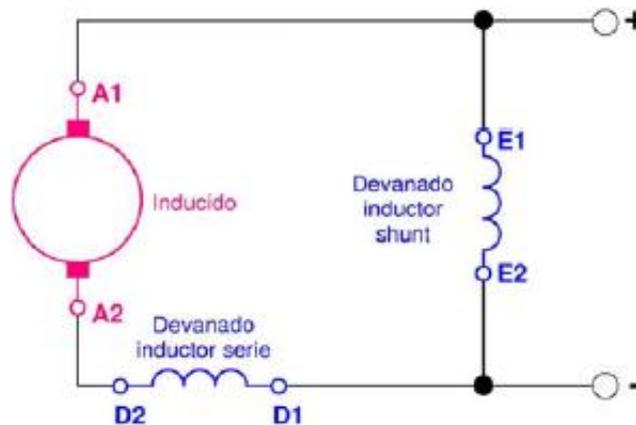


Figura 8: Máquina de corriente continua con sistema de excitación compound de larga derivación ([5] página 30)

Y según el sentido de las fuerzas magneto-motrices de los bobinados inductores:

- **Compound aditiva.** Ambos bobinados inductores generan campos magnéticos del mismo sentido, por consiguiente la excitación total es la suma de ambos.
- **Compound diferencial.** Los bobinados inductores generan campos magnéticos de sentido opuesto, por consiguiente la excitación total es la diferencia de ambos.

2.3. Motor paso a paso

Basándome en la información extraída de las referencias bibliográficas [7] tema 9, [8], [9], [10] y [11] punto 2.5 tenemos que:

Un motor paso a paso es un dispositivo electromecánico que convierte una serie de pulsos eléctricos en desplazamientos angulares, son ideales para la construcción de mecanismos en donde se requiere de movimientos muy precisos.

Su característica principal radica en que podemos moverlo un paso (posición) por cada pulso aplicado. Dicho paso puede generar un desplazamiento angular que varía entre los 90° y 1.8° (incluso pudiendo alcanzar desplazamientos de 0.72° por paso).

2.3.1. Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento de estos motores se basa en un estator constituido por varios bobinados de un material ferromagnético y un rotor que puede girar libremente en el estator. En este tipo de motores los diferentes bobinados del estator son alimentados uno a continuación del otro siguiendo una secuencia y causando un desplazamiento angular.

Además, se ha de señalar que los motores paso a paso poseen la capacidad de quedar enclavados en una posición determinada si una o más de las bobinas del estator está energizada, o bien puede quedar totalmente libre si no circula corriente por ninguna de las bobinas.

2.3.2. Tipos de motores paso a paso

Se pueden distinguir tres tipos de motores paso a paso, siendo estos:

- **Motor paso a paso de imán permanente.** A grandes rasgos, está constituido por un rotor sobre el que van aplicados distintos imanes permanentes, y por un cierto número de bobinas en su estator. Así las bobinas son parte del estator y el rotor es un imán permanente. Cabe resaltar que toda la conmutación (o excitación de las bobinas) debe ser manejada externamente por un controlador.
- **Motor paso a paso de reluctancia variable.** Este tipo de motor paso a paso no usa un campo magnético permanente, por lo cual puede moverse sin limitaciones o sin un par de parada.

Siendo el montaje menos común de los motores paso a paso se suele emplear en aplicaciones que no requieren un alto grado de par de fuerza. Con este tipo de motores podemos obtener desplazamientos angulares más pequeños que en los motores paso a paso de imanes permanentes sin que para ello debamos aumentar el número de bobinas a emplear.

A grandes rasgos está constituido por un estator con, generalmente, tres bobinas conectadas con un terminal común a todas ellas. Normalmente el conductor común está conectado al borne positivo y las bobinas se alimentan según una secuencia consecutiva. Un ejemplo de este tipo de motores se puede ver en la figura 9.

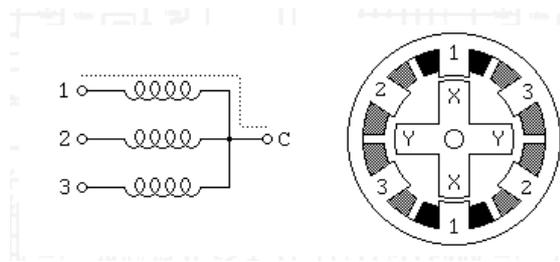


Figura 9: Motor paso a paso de reluctancia variable ([8])

- **Motor paso a paso híbrido.** Su funcionamiento se basa en la combinación de los otros dos tipos de motores paso a paso.

2.3.2.1. Tipos de motores paso a paso de imanes permanentes

Dentro de los motores paso a paso de imanes permanentes se pueden distinguir dos tipos:

- **Bipolares.** Por lo general tienen 4 cables de salida. Requieren del cambio de dirección del flujo de corriente a través de las bobinas en la secuencia apropiada para realizar el movimiento. Debido a que es necesario un puente H por cada bobina del motor, para poder obtener dicha secuencia en un motor paso a paso de 4 cables (2 bobinas) se necesitan dos puentes H dando lugar a que sea necesaria una tarjeta de controlador más compleja y cara que en el caso de los unipolares. Un ejemplo de este tipo de motor se puede ver en la figura 10.

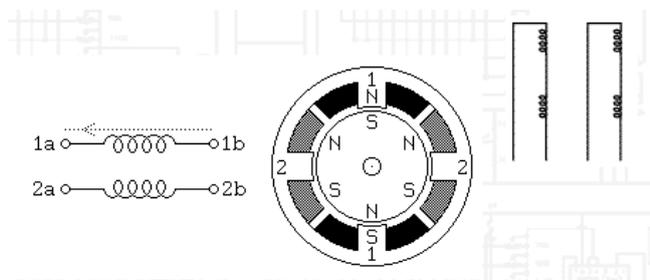


Figura 10: Motor paso a paso de imanes permanentes bipolar ([8])

- **Unipolares.** Debido a que es más fácil de controlar que el bipolar su uso es más común. Estos motores suelen tener 8, 6 o 5 cables de salida, dependiendo de su conexionado interno. De estos suelen contar con 4 de ellos para la recepción de los pulsos que indican la secuencia y duración de los pasos y los resultantes sirven como alimentación del motor. En las figuras 11, 12 y 13 podemos ver ejemplos de este tipo de motores.

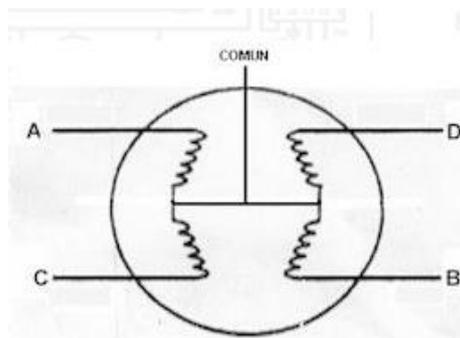


Figura 11: Motor paso a paso unipolar con 5 cables de salida ([8])

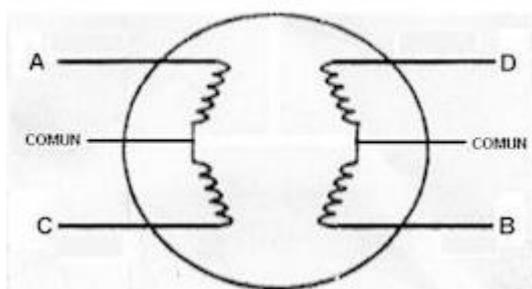


Figura 12: Motor paso a paso unipolar con 6 cables de salida ([8])

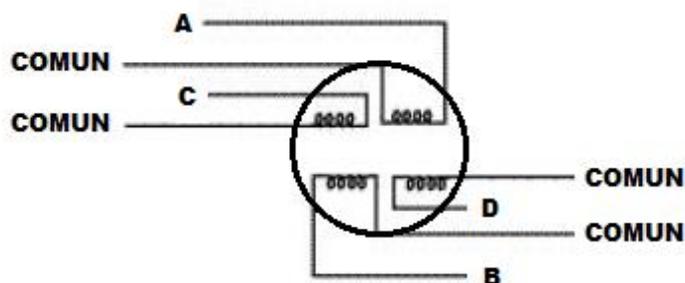


Figura 13: Motor paso a paso unipolar con 8 cables de salida

2.3.3. Secuencias para manejar motores paso a paso unipolares

Existen tres posibles secuencias para el control de este tipo de motores:

- **Secuencia de paso completo doble (normal).** Es la secuencia más utilizada, y generalmente la recomendada por el fabricante. Consiste en tener activa dos bobinas consecutivas entre sí al mismo tiempo de modo que el eje del motor se oriente hacia el punto medio de ambas bobinas. Con esta secuencia el motor avanza un paso cada vez y, debido a que siempre hay al menos dos bobinas activas, se obtiene un alto par de paso y de retención.
- **Secuencia de paso completo básica (wave drive).** Brindando un funcionamiento más suave en algunos motores esta secuencia consiste

en activar cada una de las bobinas de forma independiente, lo que provoca que el eje del motor se oriente hacia a bobina activa. La contrapartida es que al estar solo una bobina activa el par de paso y de retención es menor.

- **Secuencia de medio paso.** Siendo esta una combinación de las dos secuencias anteriores pasa por todas las posiciones de esas dos secuencias. Esto nos da como resultado que usando el mismo número de bobinas que con las otras dos secuencias obtendremos un paso más pequeño, siendo su valor la mitad que en el de los otros dos casos.

2.3.4. Hechos a tener en cuenta a la hora de trabajar con un motor paso a paso

A la hora de trabajar con un motor paso a paso es importante tener en cuenta los hechos que se van a explicar a continuación en este subapartado con el fin de que no se produzcan resultados indeseados al manejar el motor paso a paso.

Uno de los hechos más importantes a la hora de trabajar con estos motores es que son dispositivos mecánicos, y como tal deben vencer ciertas inercias, el tiempo de duración y la frecuencia de los pulsos aplicados son datos muy importantes y que hay que tener siempre en cuenta. En este sentido, el motor ha de alcanzar el paso antes de que la próxima secuencia de pulsos comience. Si la frecuencia de pulsos es muy elevada se pueden originar los siguientes problemas en el motor:

- Puede que no realice ningún movimiento, es decir, se quede quieto.
- Puede empezar a vibrar, pero sin llegar a girar.
- Puede girar erráticamente.
- Puede llegar a girar en sentido opuesto al deseado.

Cabe destacar que si se quiere obtener un arranque suave y preciso es recomendable partir de una frecuencia de pulso baja y gradualmente ir aumentándola hasta la velocidad deseada sin superar la máxima tolerada. También se ha de recordar que para el cambio de sentido de giro se debe bajar previamente la velocidad antes de realizar dicho cambio pues si no se pueden producir problemas como pueden ser:

- Ruptura del eje del motor.
- Deterioro o destrucción de parte o todo el motor utilizado.
- Posibles daños al entorno del motor.
- O posibles daños físicos a personas situadas en las inmediaciones del mismo.

Por otra parte las posibles desventajas que se pueden presentar en este tipo de motores son:

- Necesidad de un encoder para situar al motor en su posición inicial antes de arrancar el motor, ya que nunca se puede saber hacia dónde se encuentra orientado el eje al inicio del movimiento.
- Si queremos mover al motor un número de grados determinado es necesario que el motor pase por todas las posiciones intermedias que hay entre el punto cero (punto de reposo) hasta la posición deseada.

Para concluir se ha de señalar que este tipo de motores es muy interesante para aquellas aplicaciones en las que se necesita tener control del movimiento del motor sin necesidad de tener que utilizar para ello un encoder.

2.4. Unidad de control: NI myRIO-1900

La unidad de control empleada para el desarrollo de este proyecto es un NI myRIO-1900. En este trabajo esta se encarga de mandarle las señales de control a los seis canales del circuito integrado de control IRAMY20UP60B.

La información desarrollada en este subapartado se ha extraído de la guía de usuario y especificaciones de esta unidad de control la cual se puede encontrar en la página web indicada en la referencia bibliográfica [12].

El NI myRIO-1900 es un dispositivo portátil reconfigurable de E/S (RIO) que los estudiantes pueden utilizar para diseñar sistemas de control, robótica y mecatrónica. En la figura 14 se puede ver este dispositivo junto con las entradas y salidas de las que consta.

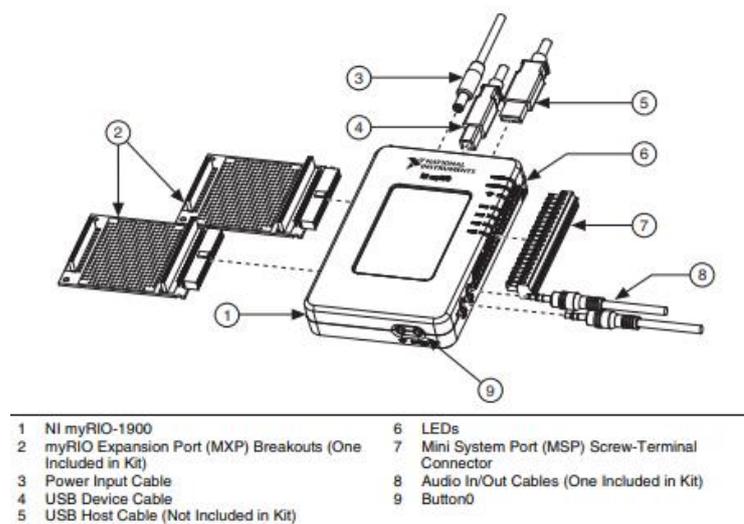


Figura 14: NI myRIO-1900 ([12] página 1)

Es importante recordar que esta unidad de control consta de entradas analógicas (AI), salidas analógicas (AO), entradas y salidas digitales (DIO), audio y salida de potencia. Además se puede conectar a una computadora a través de puerto USB y 802.11 b, g, n. En la figura 15 se puede ver el diagrama de bloques que conforma el hardware de esta unidad.

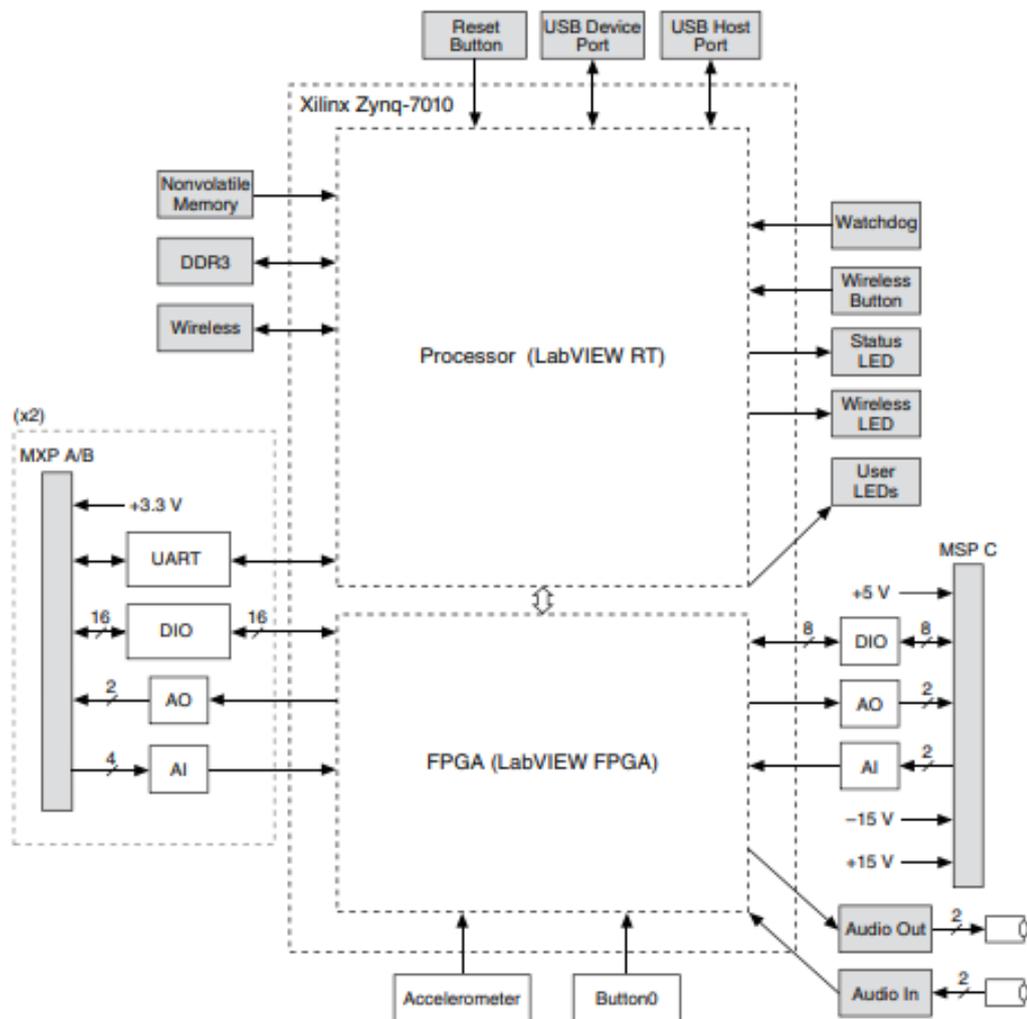


Figura 15: Diagrama de bloques del hardware del NI myRIO-1900 ([12] página 3)

Para este trabajo solo se hará uso de 7 de las entradas/salidas digitales del puerto MSP C y la conexión número 19 de dicho puerto (DGND). En la figura 16 se puede ver con más detalle las conexiones del puerto MSP C y las funciones que pueden desempeñar cada una.

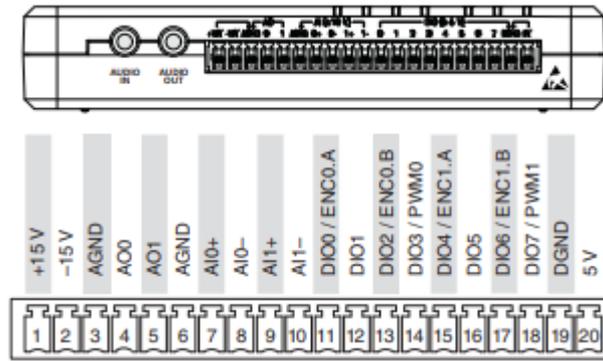


Figura 16: Puerto MSP C del NI myRIO-1900 ([12] página 6)

A mayores, en la tabla 1 se puede ver una descripción de las señales de dicho puerto.

Signal Name	Reference	Direction	Description
+15V/-15V	AGND	Output	+15 V/-15 V power output.
AI0+/AI0-; AI1+/AI1-	AGND	Input	±10 V, differential analog input channels. Refer to the <i>Analog Input Channels</i> section for more information.
AO <0..1>	AGND	Output	±10 V referenced, single-ended analog output channels. Refer to the <i>Analog Output Channels</i> section for more information.
AGND	N/A	N/A	Reference for analog input and output and +15 V/-15 V power output.
+5V	DGND	Output	+5 V power output.
DIO <0..7>	DGND	Input or Output	General-purpose digital lines with 3.3 V output, 3.3 V/5 V-compatible input. Refer to the <i>DIO Lines</i> section for more information.
DGND	N/A	N/A	Reference for digital lines and +5 V power output.
AUDIO IN	N/A	Input	Left and right audio inputs on stereo connector.
AUDIO OUT	N/A	Output	Left and right audio outputs on stereo connector.

Tabla 1: Descripción de las señales del puerto MSP C del NI myRIO-1900 ([12] páginas 6 y 7)

2.4.1. Programa a utilizar en su configuración: LabVIEW

Tal y como se dice en la referencia bibliográfica [13] tenemos que el programa LabVIEW constituye un revolucionario sistema de programación gráfica para aplicaciones que involucren adquisición, control, análisis y presentación de datos. Una de las características principales de este programa es que usa un lenguaje de programación gráfico (lenguaje G) para crear programas basados en diagramas de bloques.

Los programas desarrollados mediante LabVIEW se denominan Instrumentos Virtuales (VIs), porque su apariencia y funcionamiento imitan los de un instrumento real. Sin embargo son análogos a las funciones creadas con los lenguajes de programación convencionales. Los VIs tienen una parte interactiva con el usuario y otra parte de código fuente, y aceptan parámetros procedentes de otros VIs.

Todos los VIs tienen un panel frontal y un diagrama de bloques. Las paletas contienen las opciones que se emplean para crear y modificar los VIs.

- **Panel frontal.** Conformar la interfaz gráfica de la VI con el usuario. Se encarga de recoger las entradas procedentes del usuario y representar las salidas proporcionadas por el programa. Este panel está constituido por una serie de botones, pulsadores, potenciómetros, gráficos, etc.

Los diversos componentes del Panel de Frontal se pueden clasificar, según la función que realicen, en controles o indicadores. Si su función es mostrar los resultados adquiridos, ya sean datos adquiridos o resultados de alguna operación, entonces son indicadores, mientras que si esta es la de introducir parámetros al VI es un controlador.

- **Diagrama de bloques.** Constituye el código fuente del VI. En él se desarrolla el programa que controla y/o procesa las entradas y salidas que previamente se colocaron en el Panel Frontal. Los controles e indicadores que se colocaron previamente en el Panel Frontal, se materializan en el diagrama de bloques mediante los terminales.

El diagrama de bloques incluye funciones y estructuras integradas en las librerías que incorpora LabVIEW. En el lenguaje G las funciones y las estructuras son nodos elementales. Son análogas a los operadores o librerías de funciones de los lenguajes convencionales.

LabVIEW posee una extensa biblioteca de funciones, entre ellas, aritméticas, comparaciones, conversiones, funciones de entrada/salida, de análisis, etc

Las estructuras, similares a las declaraciones causales y a los bucles en lenguajes convencionales, ejecutan el código que contienen de forma condicional o repetitiva (bucle for, while, case,...).

Este diagrama se construye conectando los distintos objetos entre sí, como si de un circuito se tratara. Los cables unen terminales de entrada y salida con los objetos correspondientes, y por ellos fluyen los datos. Los cables son las trayectorias que siguen los datos desde su origen hasta su destino, ya sea una función, una estructura, un terminal, etc. Cada cable tiene un color o un estilo diferente, lo que diferencia unos tipos de datos de otros.

- **Paletas.** Proporcionan las herramientas que se requieren para crear y modificar tanto el panel frontal como el diagrama de bloques. Las paletas existentes en LabVIEW son:
 - Paleta de herramientas (Tools palette)
 - Paleta de controles (Controls palette)
 - Paleta de funciones (functions palette)

Para concluir, se ha de señalar que National Instrument ofrece una serie de cursos online para aprender, o mejorar, el manejo de este programa. El día 22 de marzo de 2019 el acceso a la página desde la cual nos podemos apuntar a los mismos es:

<https://sine.ni.com/tacs/app/fp/p/ap/ov/lang/es/oc/es/pg/1/>

Nota: Estos cursos son de pago.

2.5. Circuito integrado IRAMY20UP60B

El otro componente que conforma el sistema de control de la máquina síncrona a utilizar en este trabajo es un circuito integrado que actúa como el controlador directo de la máquina síncrona. La información desarrollada en este subapartado se ha obtenido del datasheet de dicho circuito integrado, ha este se puede acceder desde la página web indicada en la referencia bibliográfica [14].

Tal y como dice esta referencia, el circuito integrado IRAMY20UP60B de International Rectifier es un IC híbrido de potencia integrado de 20A, 600V con resistencia de derivación interna para aplicaciones de variadores de motor para dispositivos tales como sistemas de aire acondicionado y controladores de compresores, así como para aplicaciones industriales livianas. La tecnología de

IR ofrece un controlador de motor de CA extremadamente compacto y de alto rendimiento en un solo paquete aislado para simplificar el diseño.

Este avanzado HIC es una combinación de la tecnología IGBT de bajo impacto $V_{CE(on)}$ de IR y el controlador de referencia de la industria de alto voltaje y alta velocidad trifásico en un paquete completamente aislado y mejorado térmicamente. Además incorpora un monitor de temperatura y protecciones frente a sobrecorrientes y sobrecalentamiento, junto con los IGBT nominales para cortocircuitos y la función de bloqueo de bajo voltaje integrada, ofrecen un alto nivel de protección y un funcionamiento a prueba de fallas. El uso de un paquete único en línea (SiP3) recientemente desarrollado con disipador de calor para la matriz de potencia junto con una estructura de molde de transferencia completa minimiza el espacio de PCB y resuelve los problemas de aislamiento del disipador térmico.

En la tabla 2 se puede ver el índice de valores máximos que puede soportar este circuito integrado.

Parameter	Description	Value	Units
V_{CES} / V_{RRM}	IGBT/Diode Blocking Voltage	600	V
V^+	Positive Bus Input Voltage	450	
$I_D @ T_C=25^\circ\text{C}$	RMS Phase Current (Note 1)	20	A
$I_D @ T_C=100^\circ\text{C}$	RMS Phase Current (Note 1)	10	
I_D	Pulsed RMS Phase Current (Note 2)	40	
F_{PWM}	PWM Carrier Frequency	20	kHz
P_D	Power dissipation per IGBT @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	68	W
V_{ISO}	Isolation Voltage (1min)	2000	V_{RMS}
T_J (IGBT & Diodes)	Operating Junction temperature Range	-40 to +150	$^\circ\text{C}$
T_J (Driver IC)	Operating Junction temperature Range	-40 to +150	
T	Mounting torque Range (M4 screw)	0.7 to 1.17	Nm

Note 1: Sinusoidal Modulation at $V^+=400\text{V}$, $T_J=150^\circ\text{C}$, $F_{PWM}=20\text{kHz}$, Modulation Depth=0.8, PF=0.6, See Figure 3.
 Note 2: $t_p < 100\text{ms}$; $T_C=25^\circ\text{C}$; $F_{PWM}=20\text{kHz}$. Limited by $I_{BUS-ITRIP}$, see Table "Inverter Section Electrical Characteristics"

Tabla 2: Índice de valores máximos que puede soportar el circuito integrado IRAMY20UP60B ([14] página 1)

Mientras que las condiciones de funcionamiento recomendadas para las funciones del controlador se encuentran en la tabla 3:

Symbol	Definition	Min	Max	Units
$V_{B1,2,3}$	High side floating supply voltage	V_S+12	V_S+20	V
$V_{S1,2,3}$	High side floating supply offset voltage	Note 4	450	
V_{CC}	Low side and logic fixed supply voltage	12	20	V
V_{ITRIP}	I_{TRIP} input voltage	V_{SS}	$V_{SS}+5$	V
V_{IN}	Logic input voltage LIN, HIN	V_{SS}	$V_{SS}+5$	

Note 3: For more details, see IR21363 data sheet

Note 4: Logic operational for V_S from COM/ $I_{TRIP}-5\text{V}$ to COM/ $I_{TRIP}+600\text{V}$. Logic state held for V_S from COM/ $I_{TRIP}-5\text{V}$ to COM/ $I_{TRIP}-V_{BS}$.

Tabla 3: Valores recomendados de funcionamiento ([14] página 4)

El diagrama de E/S temporizadas está en la figura 17. Para un funcionamiento correcto, el dispositivo debe utilizarse dentro de las condiciones recomendadas. Todos los voltajes están referenciados a valores de tensión absolutos con respecto a COM/ITRIP. La compensación de V_S se prueba con todos los suministros sesgados a un diferencial de 15 V (Nota 3 de la tabla 3).

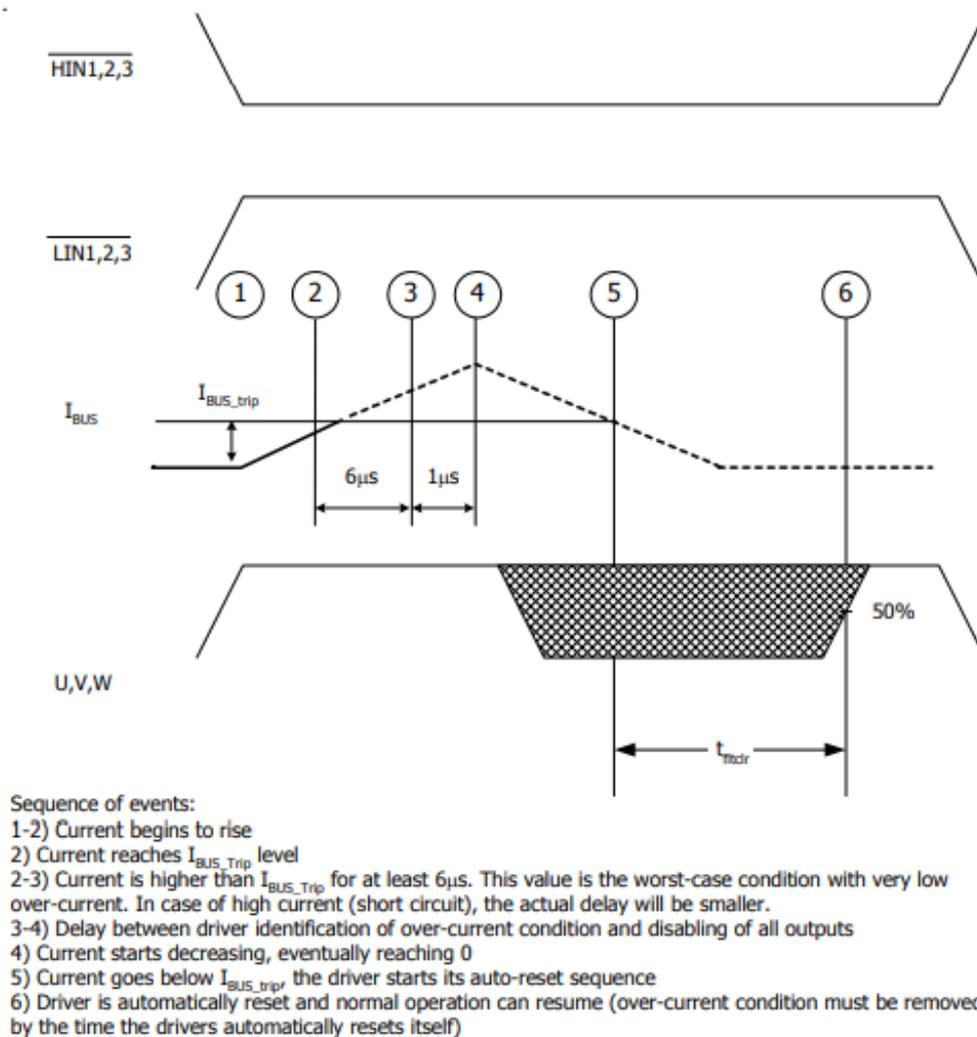


Figura 17: Evolución temporal de las E/S lógicas y secuencia de eventos ([14] página 7)

Por otra parte también es importante conocer los valores de las características eléctricas estáticas y dinámicas para dicho controlador, estos se pueden ver en las tablas 4 y 5 respectivamente.

Se considerará V_{BIAS} (V_{CC} , V_{BS1} , 2, 3)=15V, a menos que se indique lo contrario. Los parámetros V_{IN} e I_{IN} están referidos a COM/ I_{TRIP} y son aplicables a los seis canales.

Symbol	Definition	Min	Typ	Max	Units
V_{IH}	Logic "0" input voltage	3.0	---	---	V
V_{IL}	Logic "1" input voltage	---	---	0.8	V
V_{CCUV+} , V_{BSUV+}	V_{CC} and V_{BS} supply undervoltage positive going threshold	10.6	11.1	11.6	V
V_{CCUV-} , V_{BSUV-}	V_{CC} and V_{BS} supply undervoltage negative going threshold	10.4	10.9	11.4	V
V_{CCUHL} , V_{BSUHL}	V_{CC} and V_{BS} supply undervoltage lock-out hysteresis	---	0.2	---	V
$V_{IN,Clamp}$	Input Clamp Voltage (HIN, LIN, T/ I_{TRIP}) $I_{IN}=10\mu A$	4.9	5.2	5.5	V
I_{QBS}	Quiescent V_{BS} supply current $V_{IN}=0V$	---	---	165	μA
I_{QCC}	Quiescent V_{CC} supply current $V_{IN}=0V$	---	---	3.35	mA
I_{LK}	Offset Supply Leakage Current	---	---	60	μA
I_{IN+}	Input bias current $V_{IN}=5V$	---	200	300	μA
I_{IN-}	Input bias current $V_{IN}=0V$	---	100	220	μA
I_{TRIP+}	I_{TRIP} bias current $V_{ITRIP}=5V$	---	30	100	μA
I_{TRIP-}	I_{TRIP} bias current $V_{ITRIP}=0V$	---	0	1	μA
$V(I_{TRIP})$	I_{TRIP} threshold Voltage	440	490	540	mV
$V(I_{TRIP,HYS})$	I_{TRIP} Input Hysteresis	---	70	---	mV

Tabla 4: Características eléctricas estáticas de funcionamiento del driver ([14] página 5)

Symbol	Parameter	Min	Typ	Max	Units	Conditions
T_{ON}	Input to Output propagation turn-on delay time (see fig.11)	---	590	---	ns	$V_{CC}=V_{BS}= 15V$, $I_C=10A$, $V^+=400V$
T_{OFF}	Input to Output propagation turn-off delay time (see fig. 11)	---	700	---	ns	
T_{FLIN}	Input Filter time (HIN, LIN)	100	200	---	ns	$V_{IN}=0$ & $V_{IN}=5V$
$T_{BLT-Trip}$	I_{TRIP} Blanking Time	100	150	---	ns	$V_{IN}=0$ & $V_{IN}=5V$
D_T	Dead Time ($V_{BS}=V_{DD}=15V$)	220	290	360	ns	$V_{BS}=V_{CC}=15V$
M_T	Matching Propagation Delay Time (On & Off)	---	40	75	ns	$V_{CC}= V_{BS}= 15V$, external dead time> 400ns
T_{ITrip}	I_{Trip} to six switch to turn-off propagation delay (see fig. 2)	---	---	1.75	μs	$V_{CC}=V_{BS}= 15V$, $I_C=10A$, $V^+=400V$
$T_{FLT-CLR}$	Post I_{Trip} to six switch to turn-off clear time (see fig. 2)	---	7.7	---	ms	$T_C = 25^\circ C$
		---	6.7	---		$T_C = 100^\circ C$

Tabla 5: Características eléctricas dinámicas de funcionamiento del driver ([14] página 5)

Además, es importantísimo recordar que este circuito integrado trabaja con lógica negativa, por lo cual las señales que le llegan a su inversor (ver figura 1 del anexo 1) han de crearse siguiendo las instrucciones de la tabla 6.

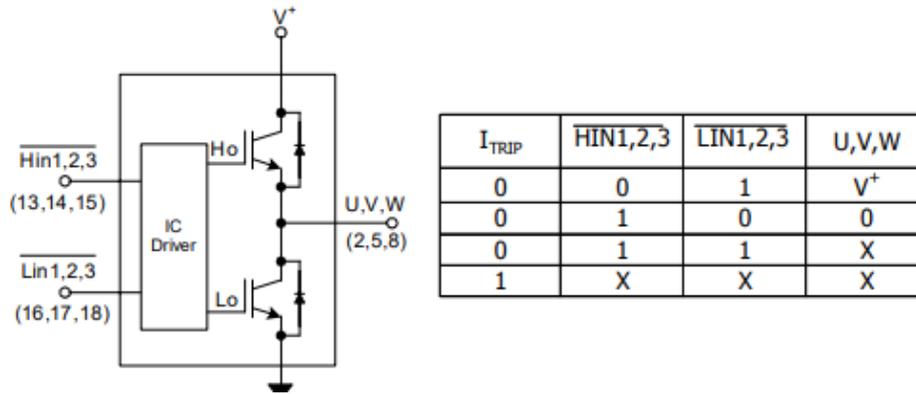


Tabla 6: Tabla de niveles lógicos de las señales de entrada y salida para los seis canales del inversor trifásico del IRAMY20UP60B ([13] página 6)

Para concluir, en la tabla 1 del anexo 2 se puede ver un descripción de los pines de conexión de este circuito integrado y en la figura 1 del anexo 2 un ejemplo del conexionado típico de dichos pines.

3. Control de una máquina síncrona funcionando como motor paso a paso

A continuación se explicará, separado en forma de subapartados, los pasos que se han seguido en el desarrollo de este trabajo.

3.1. Estudio teórico

3.1.1. Trabajo a desarrollar

En este trabajo se va a crear un sistema de tracción que consta de los siguientes componentes:

- 1 Unidad de control NI myRIO-1900.
- 1 Unidad de control en forma del circuito integrado IRAMY20UP60B.
- 1 Máquina síncrona.
- 1 Máquina de corriente continua.

El sistema de control estará constituido por el NI myRIO-1900 y el circuito integrado IRAMY20UP60B. Sus funciones son:

- **NI myRIO-1900.** Crea las señales para los seis canales (HIN1, HIN2, HIN3, LIN1, LIN2, LIN3), controla el sentido de giro y velocidad de giro de la máquina síncrona, así como el paro de dicha máquina. Se encuentra situada entre el ordenador desde donde controlamos el sistema y el circuito integrado IRAMY20UP60B. La interfaz de control del programa interactúa directamente con esta unidad.
- **Circuito integrado IRAMY20UP60B.** Recibe las seis señales de control para sus canales desde el NI myRIO-1900, estas pasan por su unidad de control y se mandan a los seis transistores que conforman el inversor trifásico del mismo. Se ha de señalar que esta unidad está “dividida en dos partes”, por un lado tenemos una unidad de control donde le llegan las seis señales de control desde el NI myRIO-1900 y la alimentaremos a 15 voltios. Por otra, se encuentra el circuito de potencia alimentado con corriente continua suministrada de una fuente que nos permite ajustar el valor de su tensión y corriente, de esta parte se conectarán los pines que la conforman (1 a 12) siguiendo el ejemplo de la figura 1 del anexo 2 exceptuando el condensador que se puede ver en dicha figura entre los pines 10 y 12. Esta unidad se sitúa entre el NI myRIO-1900 y la máquina síncrona.

Es importante resaltar que en este TFG el inversor trifásico de dicha unidad NO convierte la corriente continua en alterna, sino en una serie de pulsos de corriente continua que permitirán pasar a la máquina síncrona (la cual actuará como motor paso a paso) de una posición a otra.

Nota: Las señales que salen de los pines 2, 5 y 8 van directamente a las conexiones U_1 , V_1 y W_1 de la máquina síncrona.

Por otra parte a la máquina de corriente continua irá acoplada la máquina síncrona, su sinergia será la siguiente:

- Cuando la máquina síncrona actúa como motor paso a paso la máquina de corriente continua actuará como si fuese la carga de nuestro sistema de tracción.
- Cuando la máquina síncrona actúa como alternador síncrono nos encontraremos en el caso equivalente al de frenado regenerativo, en este caso la máquina de corriente continua actuará como motor. Aquí, en la realidad, la electricidad producida por el generador síncrono se almacenaría en las baterías de nuestro sistema de tracción para su posterior uso.

3.1.2. Hallar las seis señales de control para el circuito integrado

Para este trabajo, y con el fin de que la máquina síncrona actúe como un motor paso a paso, hace falta generar las señales de control que se pueden ver en la tabla 7.

	1	2	3	4	5	6
U_1	V_1	-	0V	0V	-	V_1
V_1	-	V_1	V_1	-	0V	0V
W_1	0V	0V	-	V_1	V_1	-
Activo	K1+K6	K3+K6	K3+K2	K5+K2	K5+K4	K1+K4

Tabla 7: Señales que ha de generar el programa de control para que mande a los seis canales del circuito integrado

Se ha de señalar que la tabla 7 se ha creado para un motor paso a paso con un solo par de polos en el inducido. Es decir, al recorrer las seis posiciones indicadas en dicha tabla una máquina trifásica con un par de polos daría una vuelta completa (360°), con lo que tendremos que el ángulo desplazado por posición sería de 60° . Por el contrario si dicha máquina tuviese dos pares de polos solo recorrería media vuelta (180°) tras haber pasado por las seis posiciones indicadas en dicha tabla, lo cual significa que se habría conseguido reducir el ángulo geométrico desplazado por posición a la mitad (30°). Por consiguiente se puede deducir que una forma de reducir el desplazamiento angular generado al avanzar de una posición a la siguiente es usar una máquina con más de un par de polos en el inducido.

La razón de que sea la tabla 7 la que se ha de usar para generar las señales de control es debido a que solo se posee un circuito integrado IRAMY20UP60B. Por consiguiente y debido al hardware del mismo, la corriente no puede en

ningún momento circular por solo una de las fases del motor, dando lugar a que no se puede usar la secuencia de medio paso, la cual reduciría el desplazamiento angular producido al cambiar de posición a la mitad (12 fases en vez de 6 para recorrer una vuelta completa (en un motor paso a paso con un par de polos en el inducido)) con respecto a la secuencia de desplazamiento utilizada en este trabajo (secuencia de paso completo doble (normal)).

Debido a que este circuito integrado trabaja con lógica negativa he creado a partir de la tabla 7 la tabla 8, esta muestra las señales que se han de mandar a cada uno de los canales de dicho circuito integrado para generar cada una de las posiciones.

Posición\Transistor	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
1	0	1	1	1	1	0
2	1	1	0	1	1	0
3	1	0	0	1	1	1
4	1	0	1	1	0	1
5	1	1	1	0	0	1
6	0	1	1	0	1	1

Tabla 8: Señales de control que ha de generar el programa de control para que la máquina síncrona funcione como un motor paso a paso

Además en la figura 18 se puede ver la gráfica equivalente, en lógica positiva, que se obtendría de graficar las señales de la tabla 8.

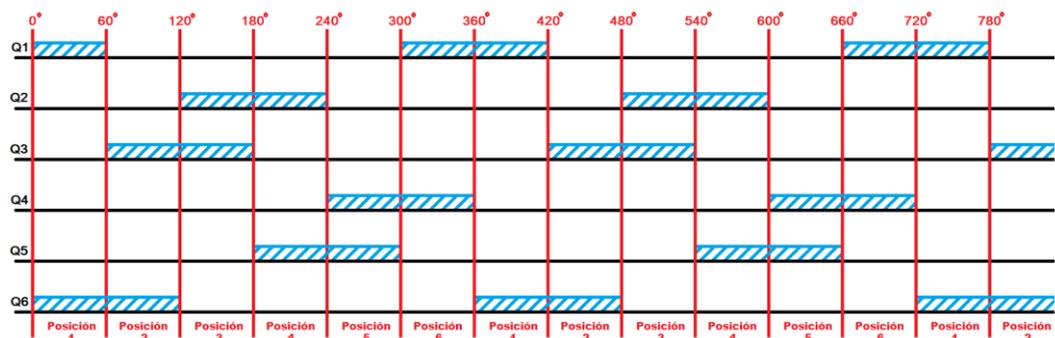


Figura 18: Gráfica en lógica positiva de las señales de control de la tabla 8

Estas señales se crean en la unidad del NI myRIO-1900 y tras mandárselas a los seis canales del circuito IRAMY20UP60B pasan por la unidad de control del mismo para activar, en cada posición, los transistores que son necesarios para

generar dicha posición. En la figura 19 se ha indicado a que transistor del inversor trifásico del circuito integrado llega cada una de estas seis señales.

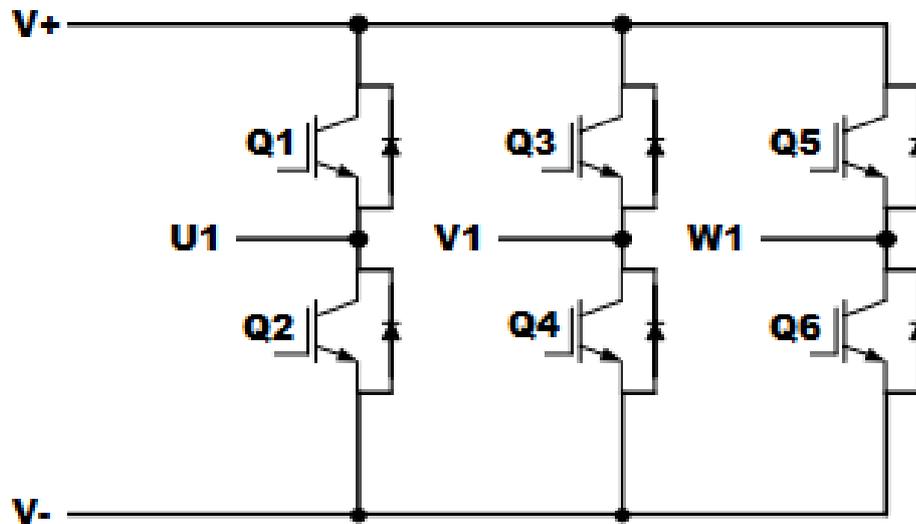


Figura 19: Inversor trifásico del circuito integrado

Por último en la figura 20 se puede ver la posición del inducido en cada una de las seis posiciones (para un motor paso a paso con un par de polos en el inducido) indicadas en la tabla 8, así como el sentido de la corriente al atravesar un polo.

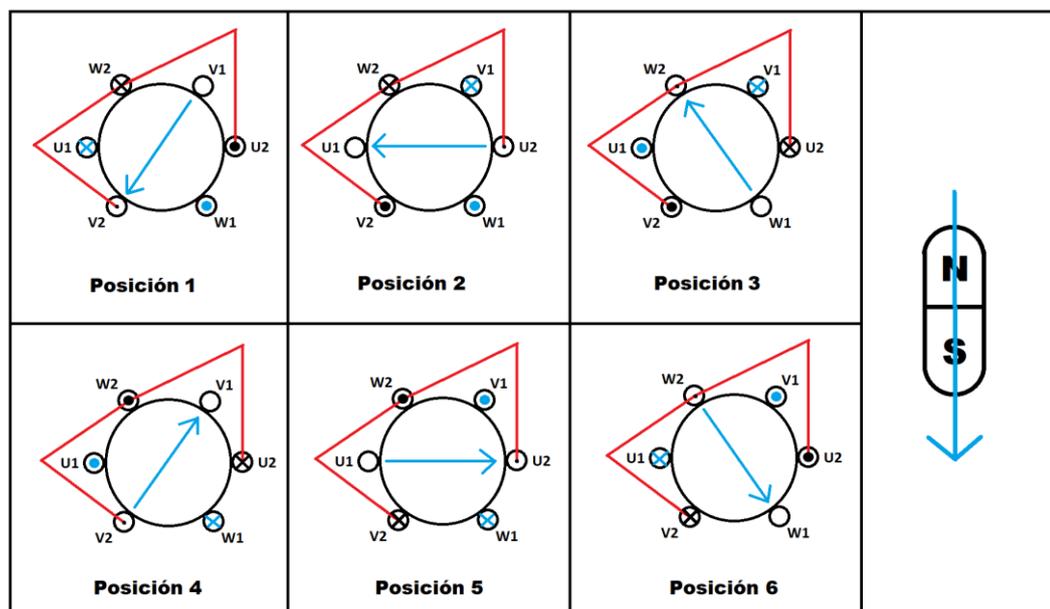


Figura 20: Posiciones del inducido del motor paso a paso (con un par de polos en el inducido)

Por ejemplo, en la posición 1 los transistores Q1 y Q6 estarían activados (ver tabla 8). La corriente entraría por el pin 10 del circuito integrado, pasaría por el transistor Q1 de la figura 19 y entraría en el motor paso a paso por el borne primario U1 (U) del mismo. Posteriormente saldría por su correspondiente borne secundario U2 (X) el cual está conectado en estrella con los bornes secundarios de las otras dos fases y entraría por el borne W2 (Z) para salir por W1 (W). Una vez hecho esto la corriente volvería a entrar en el circuito integrado IRAMY20UP60B para tras pasar por el transistor Q6 de la figura 19 salir por el pin 12 de dicho circuito integrado de vuelta a la fuente de alimentación.

El resto de posiciones seguiría un proceso parecido el cual se puede deducir basándose en lo explicado en el párrafo anterior y siguiendo las señales de la tabla 8 y las respectivas representaciones de cada posición en la figura 20. Se recuerda que este circuito integrado trabaja con lógica negativa, por lo cual los transistores activos en cada fase son aquellos cuya señal vale 0.

3.1.3. Resultados teóricos

Una vez se conocen las señales de control que se han de generar para que la máquina síncrona funcione como un motor paso a paso se procede a calcular las tensiones y corrientes teóricas de fase con el fin de saber que esperar. Para ello se usa el medidor de resistencias, inductancias y capacitancias de la figura 1 del anexo 3 para medir la resistencia e inductancia de las fases de la máquina síncrona así como la resistencia e inductancia de la excitación de dicha máquina, esta se puede ver, junto a su placa de características, en la figura 2 del anexo 4.

Dicho medidor nos da los resultados que se pueden ver en la tabla 9.

	Resistencia (Ω)	Inductancia (mH)
En una fase del estator (P.ej.: W-Z)	26.65	388.04
En la excitación	470	8020

Tabla 9: Tabla de resistencias e inductancias equivalentes de la máquina síncrona de la figura 2 del anexo 4

Lo cual nos deja con el circuito equivalente de la figura 21 para la máquina síncrona de la figura 2 del anexo 4.

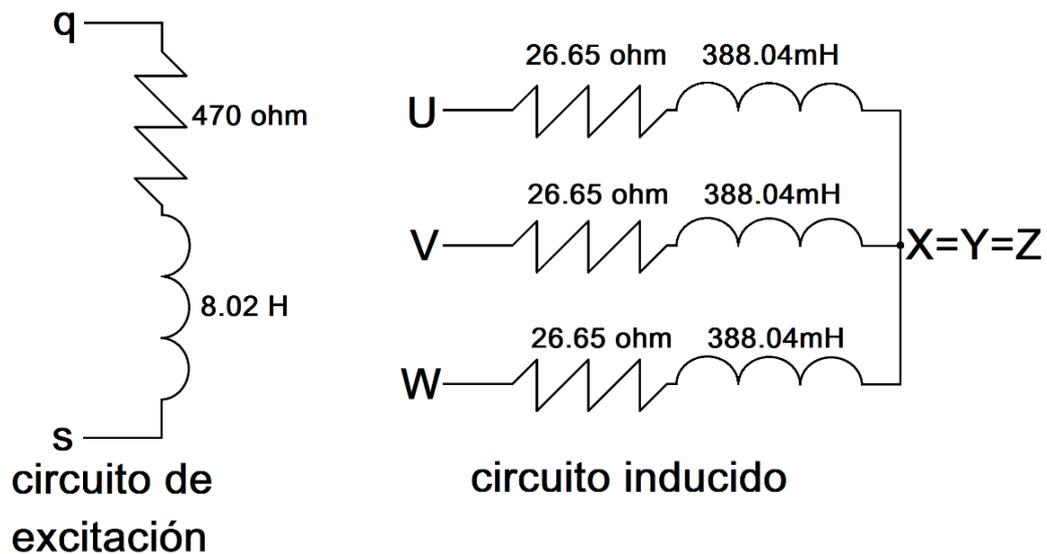


Figura 21: Circuito equivalente a la máquina síncrona de la figura 2 del anexo 4

Tras conocer los valores de las impedancias equivalentes se puede proceder a calcular la corriente de fase para diferentes tensiones de fase y frecuencias de conmutación, así como la corriente de excitación para diferentes tensiones de alimentación.

Usando Excel se procede a calcular dichas corrientes para una frecuencia de conmutación igual a 0 Hz, es decir, cuando el motor paso a paso se encuentra enclavado en una posición. Los resultados obtenidos se pueden ver en las tablas 1 (circuito inducido) y 2 (circuito de excitación) del anexo 5.

Como era de esperar, tras estudiar los resultados dados por estas dos tablas se puede ver que al aumentar la tensión aumenta la corriente. Por consiguiente se ha de tener cuidado con el valor de la misma con el fin de que no se superen los valores máximos de tensión y/o corriente que soporte la máquina a utilizar.

Después de obtener estos resultados se procede a hacer una simulación con PSIM de un circuito parecido al utilizado en la realidad. Para esta primera simulación se sustituye el circuito equivalente de la máquina síncrona por una carga conformada por tres resistencias de 500Ω (cada una) conectadas en estrella. Esto se hace con el fin de ver la respuesta del sistema sin la influencia de las inductancias en la misma. En la figura 22 se puede ver el circuito utilizado para esta simulación.

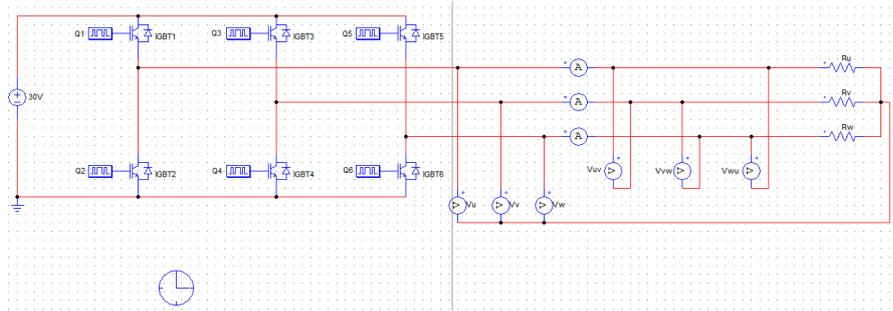


Figura 22: Circuito en PSIM con carga representada por tres resistencias de 500Ω

En la figura 23 se puede ver la tensión de la fase U, la tensión de línea (compuesta) UV y su corriente, para el circuito de la figura 22, cuando tengo una tensión de alimentación de 30V y una frecuencia de conmutación de 1Hz. Por otra parte en la figura 24 tengo los resultados generados al simular el circuito de la figura 22 cuando la frecuencia de conmutación es de 50Hz.

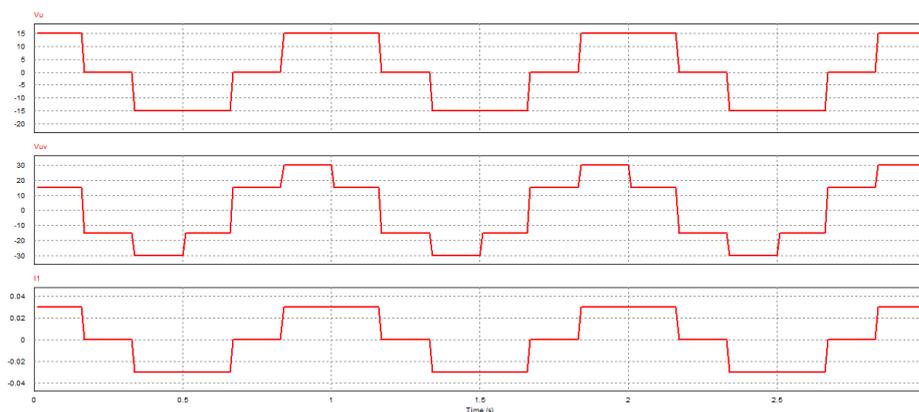


Figura 23: Tensión de fase U, tensión de línea UV y corriente para el circuito de la figura 22

Como se puede ver en la figura 23 tenemos que:

- La tensión de fase U (gráfica superior) permanece dos posiciones a un valor distinto de 0V para posteriormente ponerse a 0V durante una posición, luego pasar al valor distinto de 0V que teníamos antes, pero con signo opuesto, durante dos posiciones y luego vuelve a valer 0V durante una posición. En este caso, cuando tiene un valor de tensión positivo es porque Q1 está activado, mientras que tendrá un valor negativo cuando Q2 esté activado. En los casos en que ninguno de estos dos transistores esté activado el valor de esta tensión valdrá 0V.
- La tensión de línea UV (gráfica del medio) se obtiene al restar la tensión de la fase V a la de la fase U.

- La corriente de la fase U, que debido a estar las cargas en estrella es igual a la de línea, viene determinada por el valor de la tensión de esa fase.

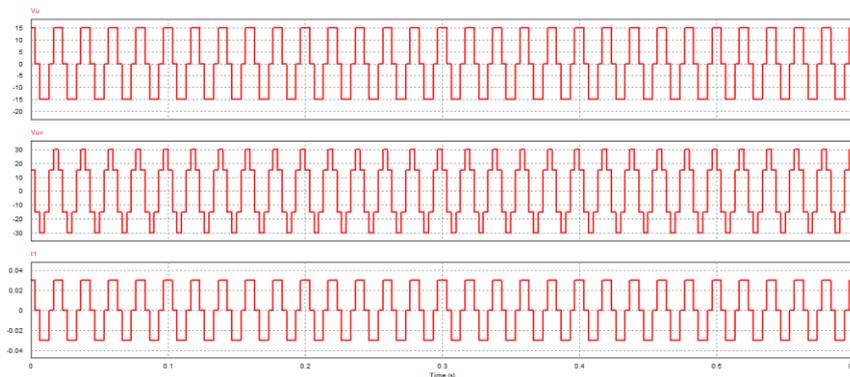


Figura 24: Tensión de fase U, tensión de línea UV y corriente para el circuito de la figura 22 con una tensión de alimentación de 30V y una frecuencia de conmutación de 50Hz

Por otra parte en la figura 24 se puede ver que la forma de las gráficas obtenidas es igual a las de la figura 23, diferenciándose en el hecho de que evoluciona más rápido debido a que la frecuencia de conmutación es mayor en el circuito utilizado para obtener las gráficas de la figura 24.

Una vez hecho esto se procede a crear el circuito equivalente en PSIM que simulará el sistema de control y el inducido de la máquina síncrona, lo cual permitirá estudiar el comportamiento de este sistema a distintas frecuencias de conmutación. El resultado es el sistema de la figura 25 el cual se alimenta con una tensión continua y tras pasar por el inversor trifásico, y debido a las señales de control que rigen el mismo (ver tabla 8), se convierte en una serie de pulsos cuadrados de tensión en los que cada fase está desfasada 120° respecto las otras dos. Para este circuito se usan los valores de la figura 21.

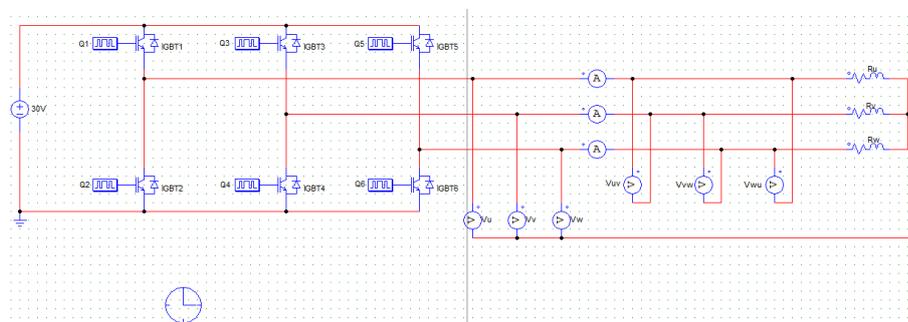


Figura 25: Circuito equivalente al sistema de control y la máquina síncrona de la figura 2 del anexo 4, conectada en estrella

Ahora se procede a simular este circuito con una alimentación de 30V y una frecuencia de conmutación de 1Hz, es decir, pasa en cada posición 1seg y luego pasa a la siguiente. Los resultados obtenidos de simular dicho circuito se pueden ver en la figura 26.

En la figura 26.1, la diferencia en la gráfica de la tensión de fase U (gráfica superior de la figura 26.1) con respecto a su gráfica equivalente en la figura 23 son los picos de tensión producidos por el efecto de las inductancias de la máquina síncrona, por lo demás son iguales.

La figura 26.2 muestra que al igual que con la tensión de fase las tensiones de línea de esta simulación se diferencian únicamente de su equivalente en la figura 23 en los picos de tensión producidos por el efecto de las inductancias de la máquina síncrona.

Se ha de señalar que en las figuras 26.1 y 26.2 la forma de onda que nos ha dado el circuito era la esperada, una onda cuadrada con un desfase entre cada una de las tensiones respecto de las otras dos de 120° . Sin embargo, a diferencia de los resultados obtenidos con el circuito de la figura 22, ahora en vez de ser una onda cuadrada esta tiene ligeros picos debido al efecto que produce la inductancia de cada fase en las tensiones y corrientes del motor paso a paso.

Por último en la figura 26.3 se ve que las corrientes también están desfasadas 120° entre ellas. Además en ella también se puede ver la influencia de la inductancia en la respuesta obtenida.

Una vez dicho esto, en las figuras 26.4, 26.5 y 26.6 está representada la respuesta en frecuencia (armónicos) de las tres gráficas comentadas anteriormente. La primera de ellas corresponde a las gráficas de tensión de fase, la segunda a las de tensión de línea y la tercera a las de corriente.

Como se puede observar en dichas gráficas los armónicos más elevados se producen a bajas frecuencias, entre 0 y 5 Hz. Por consiguiente es en esta franja donde más cuidado hay que tener, pues es aquí donde hay más peligro de sobrepasar los valores máximos de tensión y/o corriente que pueda soportar la máquina que estemos utilizando en ese momento y por consiguiente sobrecargarla dando lugar a que esta se deteriore o incluso se estropee dejando por lo tanto de funcionar.

Nota: Se ha de señalar que los resultados mostrados en las gráficas de esta figura no son exactamente los esperados en la realidad pues aquí los distintos componentes que conforman el circuito son ideales y por consiguiente no producen pérdidas al pasar la corriente por ellos.

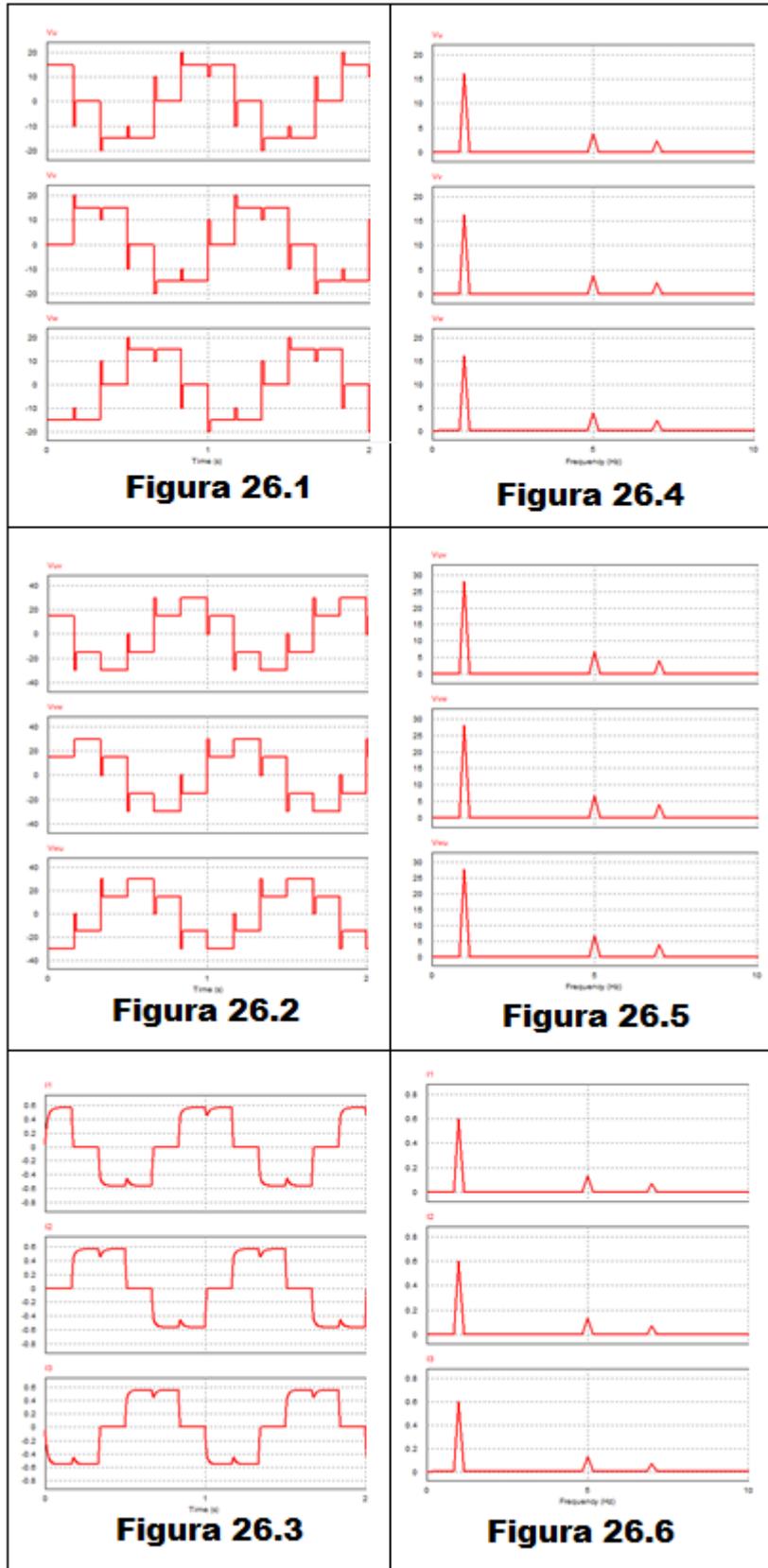


Figura 26: Resultados obtenidos de simular en PSIM el circuito de la figura 25 con una tensión de alimentación de 30V y una frecuencia de conmutación de 1Hz

Tal y como se ve en estas tres figuras (26.4, 26.5 y 26.6), a una misma tensión de alimentación el peligro de sobrecargar nuestra máquina aumenta según disminuye la frecuencia de conmutación. Para corroborar esto se puede ver en la figura 27 las corrientes del mismo circuito pero simulado ahora con una tensión de alimentación de 30V y una frecuencia de conmutación de 50Hz.

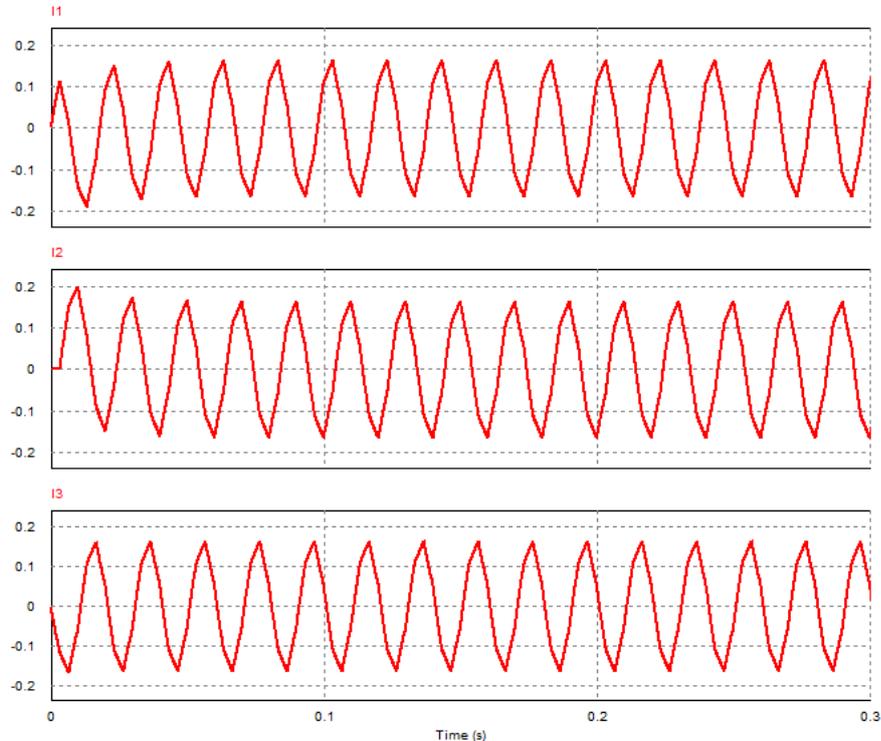


Figura 27: Corrientes de fase del circuito de la figura 25 simulado en PSIM con una tensión de alimentación de 30V y una frecuencia de conmutación de 50Hz

Tras ver las gráficas obtenidas en las figuras 27, se confirma que lo indicado anteriormente se cumple pues ahora la corriente es mucho menor. Además también se puede ver como la influencia de las inductancias se incrementa según aumenta el valor de la frecuencia de conmutación ya que ahora el valor de la corriente es menor que cuando la frecuencia de conmutación era de 1Hz.

Por otra parte, en las figuras 28.1 y 28.2 se encuentran representadas las tensiones de fase y de línea para esta situación. En ellas se puede ver cómo debido al efecto de las inductancias estas varían de la forma esperada, ya que ahora las tensiones de fase no pasan por cero como en los casos anteriores. Esto se debe a que debido a la elevada frecuencia de conmutación las inductancias dan lugar a que estemos funcionando en el estado transitorio, lo cual significa que a las inductancias no les da tiempo a cargarse/descargarse antes de que tengan que pasar a realizar el proceso opuesto(descargarse/cargarse).

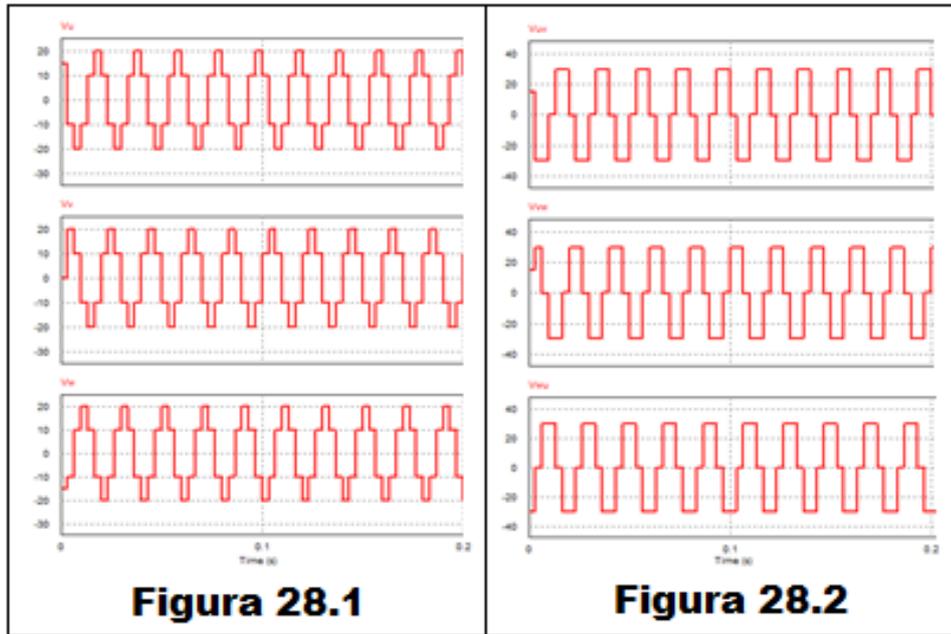


Figura 28: Tensiones de fase y de línea obtenidas de simular en PSIM el circuito de la figura 25 con una tensión de alimentación de 30V y una frecuencia de conmutación de 50Hz

3.2. Realización de un programa de control básico

3.2.1. Creación del programa de control básico

Tras haber realizado un estudio teórico de las señales que hemos de generar y las tensiones y corrientes producidas como resultado de estas, es hora de proceder al desarrollo del software y hardware necesarios para comprobar que los resultados experimentales se ajustan a los teóricos.

Para ello el primer paso es crear el programa de control, usando el programa NI LabVIEW 2015, encargado de dirigir a la unidad de control NI myRIO-1900. Esta a su vez manda las señales de control al circuito integrado IRAMY20UP60B con el fin de que este active, en cada una de las fases, los transistores correspondientes para que la máquina síncrona actúe como un motor paso a paso.

Una vez abierto el programa de LabVIEW, conectamos al ordenador la unidad myRIO y desde la ventana abierta del NI LabVIEW 2015 pinchamos en *Create Project*. Después, en el recuadro de la derecha pinchamos en *myRIO* y luego en el recuadro de la derecha pinchamos en *myRIO Project*, posteriormente se nos desplegará una ventana en la que seleccionamos como método de reconocimiento de la unidad NI myRIO-1900 la opción del USB (*Plugged into USB*). Una vez nos haya reconocido la unidad damos a finalizar y se nos abre otra ventana. En dicha ventana desplegamos donde pone, en este caso, NI-myRIO-1900-030536ac (172.22.11.2) y luego abrimos el archivo que cuelga de esta llamado *Main.vi*. Para concluir borramos todo lo que hay dentro del bucle principal y ya estamos listos para empezar a programar.

Nota: La IP de la unidad NI myRIO-1900 varía dependiendo de cómo la conectemos. La utilizada tiene la IP 172.22.11.2 si se conecta vía USB y la IP 10.135.0.13 si se conecta vía wifi.

En este primer programa simplemente se pretende generar las señales deseadas y comprobar que nos da los valores deseados. Por consiguiente tenemos que nuestro programa consta de una estructura de secuencia lineal dividida de izquierda a derecha en:

- Una zona de inicialización
- Una zona de adquisición y procesado de datos
- Una zona de finalización

En él, un bus de información atraviesa las tres zonas tal y como se puede ver en la figura 29. En dicha figura se ve como tras salir de la zona de inicialización este se adjunta a una señal de *Stop* en la zona de adquisición y tratamiento de datos (dentro del bucle principal), la cual nos permite detener la simulación del programa en el momento que queramos, para concluir en la zona de finalización.

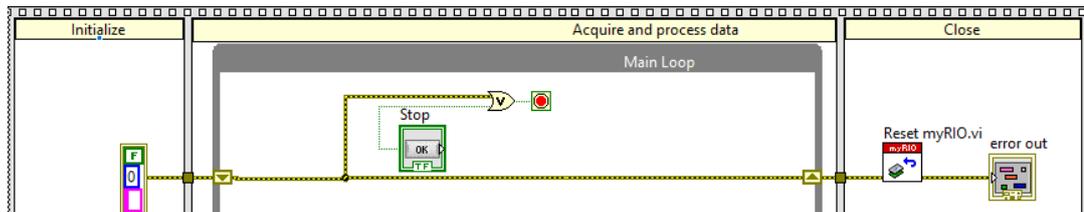


Figura 29: Bus de información que conecta las tres partes de la secuencia lineal del programa de control

Por otra parte, en la zona de adquisición y tratamiento de datos, situada dentro del bucle principal, también tenemos nuestro programa de control propiamente dicho. Este consta de:

- Una serie de bloques que indican la dirección en que ha de girar el motor.
- Una estructura formula mode que incrementa o decrementa, en una unidad a la vez, entre un valor de 1 y 6 indicándonos la fase en la que estamos y dándonos el valor de las seis señales que han de llegar a los seis canales del circuito integrado IRAMY20UP60B.
- Una serie de bloques con las señales generadas por la estructura formula mode.
- Un bloque de salidas digitales que manda las señales generadas en la estructura formula mode al circuito integrado IRAMY20UP60B.

- Una serie de bloques culminados por un bloque de espera en milisegundos el cual nos discretiza el sistema permitiendo que este evolucione de una fase a la siguiente.

El sistema de bloques que rige el sentido de giro del motor se puede ver en la figura 30. En dicho sistema podemos distinguir tres ramas distintas, siendo estas:

- La rama superior que genera la variable de entrada H de la estructura formula mode e indica que el motor está girando en sentido horario.

El funcionamiento de esta rama es el siguiente, para que la entrada H valga 1 el interruptor “Horario” o la variable local de “L_Horario” ha de valer 1 lógico, el interruptor “Antihorario” ha de valer 0 lógico, la luz que indica que el motor paso a paso está girando en sentido antihorario “L_Antihorario” ha de valer 0 lógico y el interruptor “Paro” ha de valer 0 lógico. Esto da lugar a que se encienda la lámpara que nos indica que el motor paso a paso está girando en sentido horario “L_Horario” con lo que las variables locales de esta ahora valen 1 y H ahora vale 1. Para concluir, al valer 1 lógico la variable “L_Horario” se cumple la condición de activación de su estructura condicional la cual hace que la variable “Horario” vuelva a valer un 0 lógico por lo cual dicho interruptor se desactiva de nuevo.

- La rama del medio genera la variable de entrada AH de la estructura formula mode e indica que el motor está girando en sentido antihorario.

El funcionamiento de esta rama es el siguiente, para que la entrada AH valga 1 el interruptor “Antihorario” o la variable local de “L_Antihorario” ha de valer 1 lógico, el interruptor “Horario” ha de valer 0 lógico, la luz que indica que el motor paso a paso está girando en sentido horario “L_Horario” ha de valer 0 lógico y el interruptor “Paro” ha de valer 0 lógico. Esto da lugar a que se encienda la lámpara que nos indica que el motor paso a paso está girando en sentido antihorario “L_Antihorario” con lo que las variables locales de esta ahora valen 1 y AH ahora vale 1. Para concluir, al valer 1 lógico la variable “L_Antihorario” se cumple la condición de activación de su estructura condicional la cual hace que la variable “Antihorario” vuelva a valer un 0 lógico por lo cual dicho interruptor se desactiva de nuevo.

- La rama inferior se activa cuando el interruptor “Paro” vale 1 lógico con lo que se activa la luz “L_Paro”, que nos indica que dicho interruptor está accionado, y hace que, cuando “Paro” vale 1 lógico, la variable de entrada P de la estructura formula mode valga 1. Cuando P vale 1 estamos indicando que queremos detener el motor paso a paso.

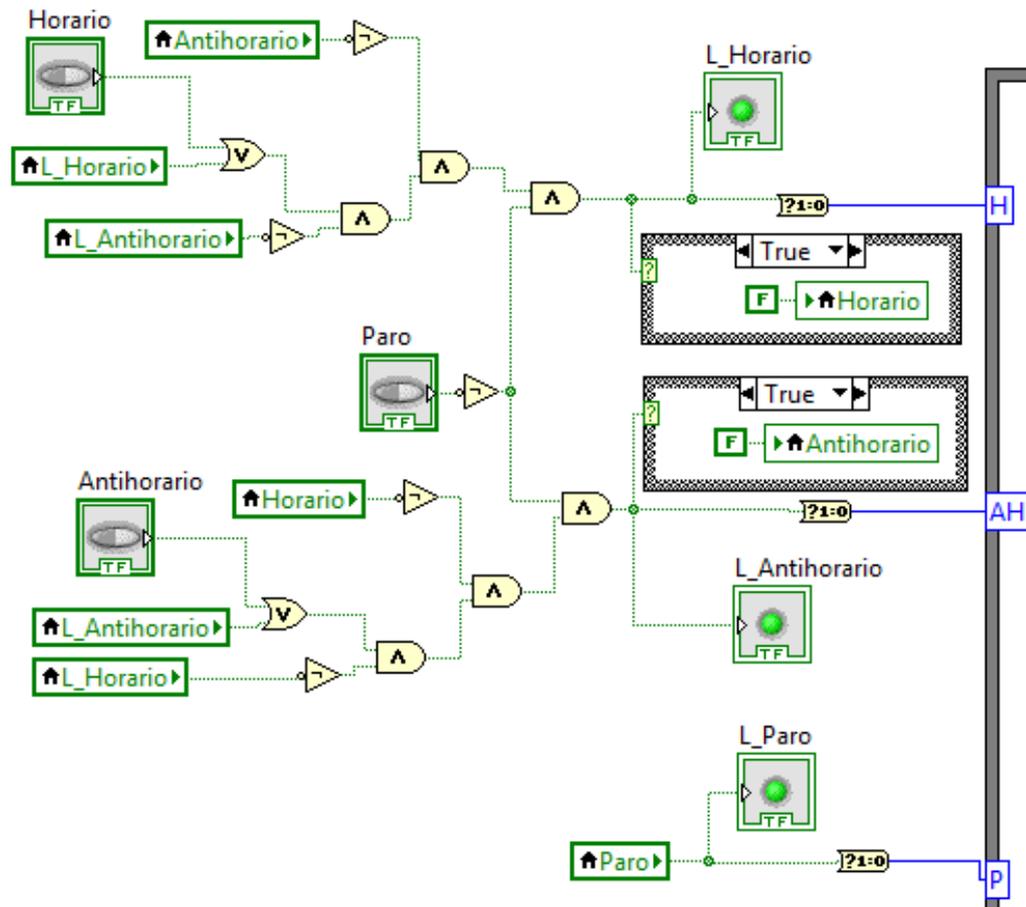


Figura 30: Sistema de bloques que permite la selección del sentido de giro y el paro del motor paso a paso

La siguiente parte de este programa de control es la estructura formula mode la cual, junto a su contenido, se puede ver en la figura 31.

Esta es una de las partes más importantes del programa debido a que desde ella se lleva a cabo el control, propiamente dicho, del motor. Esto se debe a que es en esta estructura donde se generan las señales de control que marcan la posición en que ha de estar el motor paso a paso en cada momento.

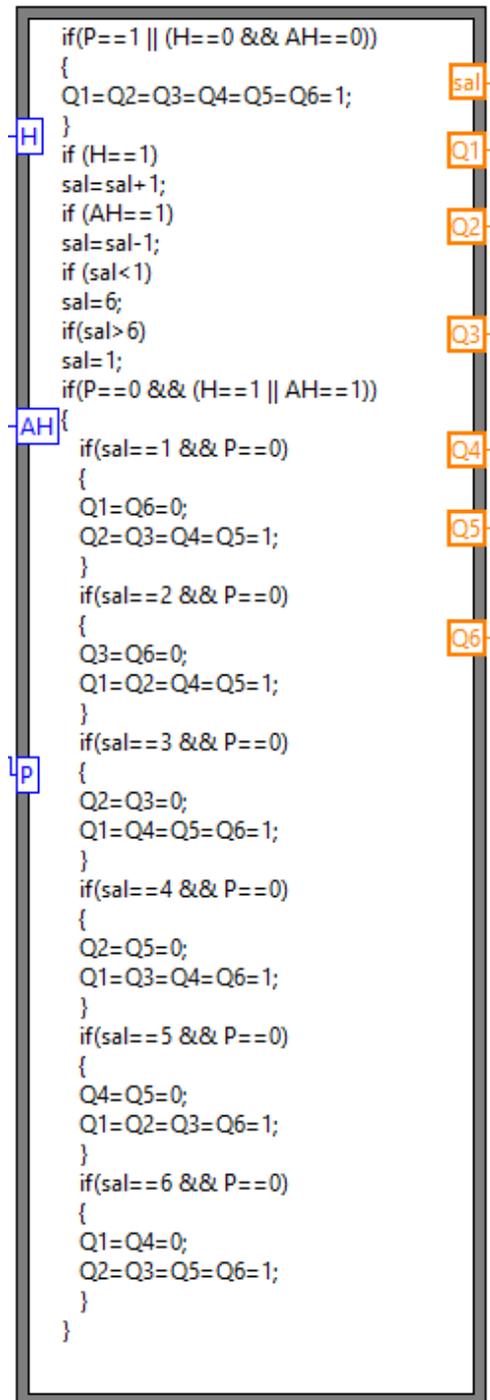


Figura 31: Estructura formula mode que genera las señales de control a enviar al circuito integrado

Además, en la tabla 10 se puede ver las diferentes entradas y salidas de la estructura formula mode de la figura 31 así como la función que cumple cada una.

Nombre de la variable	Tipo de variable	Función que desempeña
H	Entrada	Cuando vale 1 quiere decir que el motor paso a paso a de girar en sentido horario.
AH	Entrada	Cuando vale 1 quiere decir que el motor paso a paso a de girar en sentido antihorario.
P	Entrada	Cuando vale 1 quiere decir que el motor paso a paso a de frenar, al hacerse 1 se sobrepone a las señales de sentido de giro del motor y las desactiva.
sal	Salida	Nos da el valor de la posición en que se encuentra el motor paso a paso (ver figura 20).
Q1	Salida	Nos da el valor de la señal del canal HIN1.
Q2	Salida	Nos da el valor de la señal del canal LIN1.
Q3	Salida	Nos da el valor de la señal del canal HIN2.
Q4	Salida	Nos da el valor de la señal del canal LIN2.
Q5	Salida	Nos da el valor de la señal del canal HIN3.
Q6	Salida	Nos da el valor de la señal del canal LIN3.

Tabla 10: Tabla de variables de entrada y salida a la estructura formula mode

Una vez dicho esto, pasamos a hablar del código contenido en dicha estructura el cual se explicará a continuación línea por línea:

- De la primera a la cuarta línea de código tenemos una estructura de control condicional if la cual se activa cuando la variable P vale 1 o cuando las variables H y AH valen 0. Como resultado tenemos que mientras se cumpla alguna de estas condiciones todos los transistores del circuito IRAMY20UP60B actúan como interruptores abiertos ya que las señales que llegan a los seis canales de este circuito integrado son 1 ($Q1=Q2=Q3=Q4=Q5=Q6=1$).
- De la quinta a la sexta línea tenemos una estructura de control condicional if la cual nos incrementa en 1 la variable de salida sal cada vez que la variable H pasa de valer 0 a valer 1.
- De la séptima a la octava línea tenemos una estructura de control condicional if la cual nos decrementa en 1 la variable de salida sal cada vez que la variable AH pasa de valer 0 a valer 1.
- De la novena a la décima línea tenemos una estructura de control condicional if la cual se activa cuando la variable sal vale menos de 1 y pone el valor de esta a 6.

- De la decimoprimera a la decimosegunda línea tenemos una estructura de control condicional if la cual se activa cuando la variable sal vale más de 6 y pone el valor de esta a 1.
- De la decimotercera línea en adelante tenemos una estructura de control condicional if la cual se activa cuando la variable P vale 0 y la variable H o la variable AH valen 1. Como resultado tenemos que mientras se cumplan las condiciones para la activación de esta estructura de control condicional, y dependiendo del valor de la variable sal, las variables Q1 a Q6 tendrán un valor determinado con el fin de que el motor se coloque en la posición correspondiente. Por ejemplo, si sal=1 y se cumplen las condiciones para la activación de la estructura de control condicional tendremos que Q1 y Q6 valdrán 0 mientras que Q2, Q3, Q4 y Q5 valdrán 1 lo cual colocará al motor en la posición llamada posición 1 de la figura 20.

Los bloques a la salida de la estructura formula mode se corresponden a los representados en la figura 32 y se dividen en dos partes principalmente siendo estas las siguientes:

- Por un lado están los bloques que dependen de la variable de salida sal de la estructura formula mode. De esta tenemos un indicador numérico que nos muestra, en la ventana Panel Frontal de LabVIEW, por medio de un número (del 1 al 6), la posición en la que nos encontramos y luego una serie de luces numeradas de F1 a F6 donde tras pasar la señal sal por un comparador se enciende una de ellas indicándonos por medio de esta la posición en la que nos encontramos. Por ejemplo, si sal=1 estamos en la posición 1 por lo que el indicador numérico marcaría un 1 y la lámpara F1 estaría encendida, si sal=2 estaríamos en la posición 2, el indicador numérico marcaría un 2 y la lámpara F2 estaría encendida, y así sucesivamente con el resto de posiciones.
- Por otro lado están los bloques que reciben su señal de las variables de salida Q1 a Q6. En ellos tras pasar la señal por un bloque comparador que compara la señal con un valor de 1 enciende la lámpara correspondiente si se cumple la condición, es decir que la señal X sea igual a 1. Por ejemplo, si la señal Q1=1 entonces tras pasar esta por su respectivo comparador enciende la lámpara Q1.

Nota: Se recuerda que el circuito integrado IRAMY20UP60B trabaja con lógica negativa. Por lo cual son los transistores que tengan su lámpara apagada (su señal Qx valga 0) por los que circulará la corriente, el resto actuarán como interruptores abiertos.

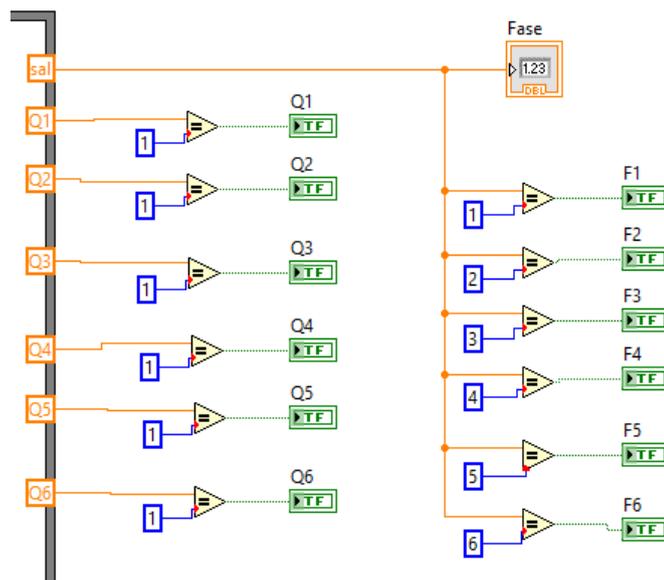


Figura 32: Sistema de bloques que trabajan con las señales de salida de la estructura formula mode

Ahora hay que llevar dichas señales a los seis canales para señales del circuito integrado IRAMY20UP60B, para ello se crea un bloque de salida para señales digitales el cual sacará las señales necesarias por el puerto C de la unidad de control NI myRIO-1900 que estamos utilizando y a través de cables llegarán a los pines correspondientes del circuito integrado (pines 13 a 18). Este bloque se puede ver en la figura 33 y su contenido en la figura 34.

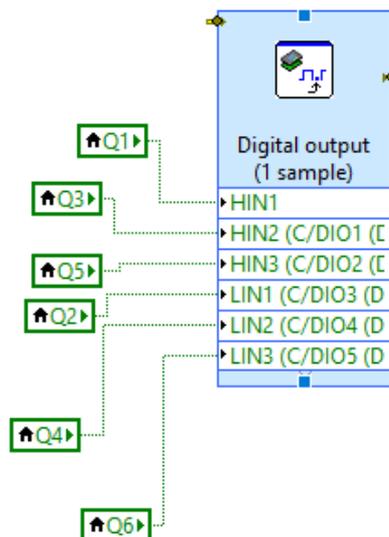


Figura 33: Bloque de salidas digitales que manda las señales de control al circuito integrado

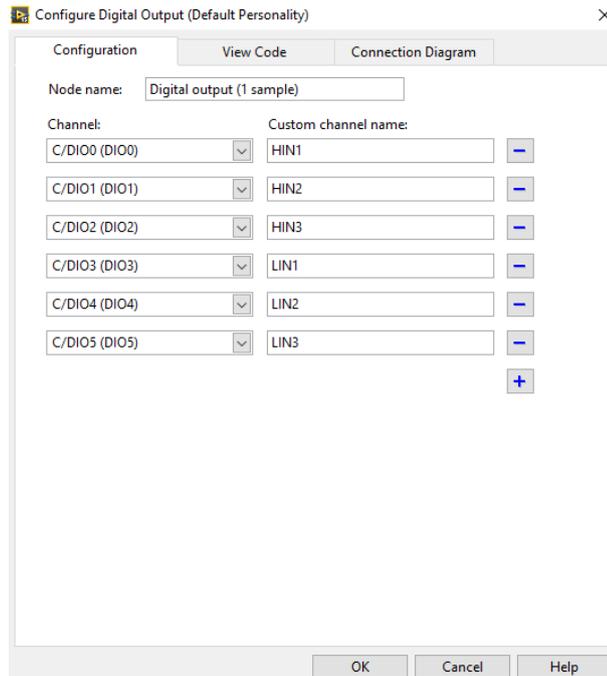


Figura 34: Contenido del bloque de salidas digitales de la figura 33

Como se puede ver en la figura 34 se ha de seleccionar el pin de salida por donde queremos que se envíe la señal al exterior y se le ha de dar un nombre, en este caso se le ha dado a cada uno el nombre del canal de señal del circuito integrado al que ha de llegar cada una de las señales.

En la tabla 11 se puede ver que señal sale de que terminal y, a través de un cable, a donde ha de llegar.

Señal a enviar	Puerto de señales del NI myRIO-1900 desde donde se manda	Pin del puerto C del NI myRIO-1900 desde el que se manda la señal	Canal del circuito integrado IRAMY20UP60B al que ha de llegar la señal	Pin por el que le llega la señal al circuito integrado IRAMY20UP60B
Q1	C	11 (DIO0)	HIN1	13
Q2	C	12 (DIO1)	HIN2	14
Q3	C	13 (DIO2)	HIN3	15
Q4	C	14 (DIO3)	LIN1	16
Q5	C	15 (DIO4)	LIN2	17
Q6	C	16 (DIO5)	LIN3	18

Tabla 11: Tabla de señales que se han de mandar desde la unidad de control NI myRIO-1900, por que puerto salen de esta unidad y ha donde han de llegar

Para concluir se crea la parte del programa que permite que el motor evolucione de una fase a la siguiente, esto es necesario debido a la forma en que se ha creado la selección del sentido de giro del motor. Si está, por ejemplo, seleccionado el sentido horario la variable H estaría siempre a 1, hasta que pulsemos el interruptor “Paro”, por consiguiente el sistema solo evolucionaría de fase una vez.

Para corregir esto se ha discretizado el sistema consiguiendo que la variable H lea como un 1 nuevo cada vez que lee datos. Para ello se ha usado un bloque de espera en milisegundos (ver figura 35), el cual, desde un bloque de control numérico donde se introduce la frecuencia en hercios y tras dividir uno entre este valor y multiplicar el resultado por mil llega al bloque de espera en milisegundos. Con esto conseguimos que el sistema evolucione en una fase cada vez que lee datos (si la variable H o la variable AH de la figura 30 y 31 valen 1) y controlar la velocidad en que evoluciona por medio de la variación del periodo entre la toma de datos consecutivos. Por ejemplo, si la frecuencia es 1 leerá datos cada 1 segundo con lo que evolucionará de fase cada segundo, mientras que si la frecuencia es 50 entonces leerá datos cada 1/50 de segundo y por consiguiente evolucionará de fase cada 1/50 de segundo permitiéndonos de esta forma controlar la velocidad de giro del motor.

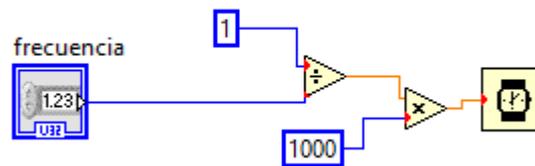


Figura 35: Sistema de datos que discretiza el programa de control

3.2.2. Montaje del circuito físico

Una vez generado el programa de control correspondiente se procede al montaje del circuito físico correspondiente para la comprobación del correcto funcionamiento del mismo. En la figura 1 del anexo 6 se puede ver el esquema del circuito a montar el cual constará de:

- Un ordenador que tenga instalado el programa NI LabVIEW 2015, o una edición posterior del mismo.
- Una unidad NI myRIO-1900.
- Una unidad IRAMY20UP60B.
- Dos fuentes de alimentación.
- Un osciloscopio.
- Cables para conectar las distintas partes.

Como podemos ver en la figura 1 del anexo 6 tenemos que la unidad NI myRIO-1900 a utilizar (ver figura 36) va conectada a red para alimentarse, además también se conecta al PC a través de un puerto USB para poder cargar en esta el programa creado en LabVIEW y recibir órdenes del usuario respecto al funcionamiento del circuito.



Figura 36: Unidad de control NI myRIO-1900 utilizada para el desarrollo de este TFG

También tenemos un circuito integrado IRAMY20UP60B (ver figura 37). Este se encuentra detrás de la placa metálica protectora con una imagen del mismo en ella con el fin de protegerle evitando la manipulación directa del mismo lo más posible. Para ello este tiene una serie de cables soldados, uno por cada pin del circuito integrado, que salen de los pines de este circuito y se conectan a dos regleta de bornes siguiendo el orden de los pines de dicho circuito de derecha a izquierda (ver la tabla 1 del anexo 2). Se ha de señalar que los cables que unen la parte del circuito de potencia (pin 1 a 12) del circuito integrado con su respectiva regleta de bornes (la de la derecha en la figura 37) son de color rojo, mientras que los que unen la parte del circuito de mando (pin 13 a 22) del circuito integrado con su respectiva regleta (la de la izquierda de la figura 37) son de color negro. Por consiguiente tenemos que el cable (rojo) que sale del pin 1 se conecta al terminal situado más a la derecha de la regleta de bornes de la derecha de la figura 37, el pin 2 al borne de dicha regleta situado inmediatamente a la izquierda del borne donde se ha conectado el cable que viene del pin 1 y así sucesivamente.

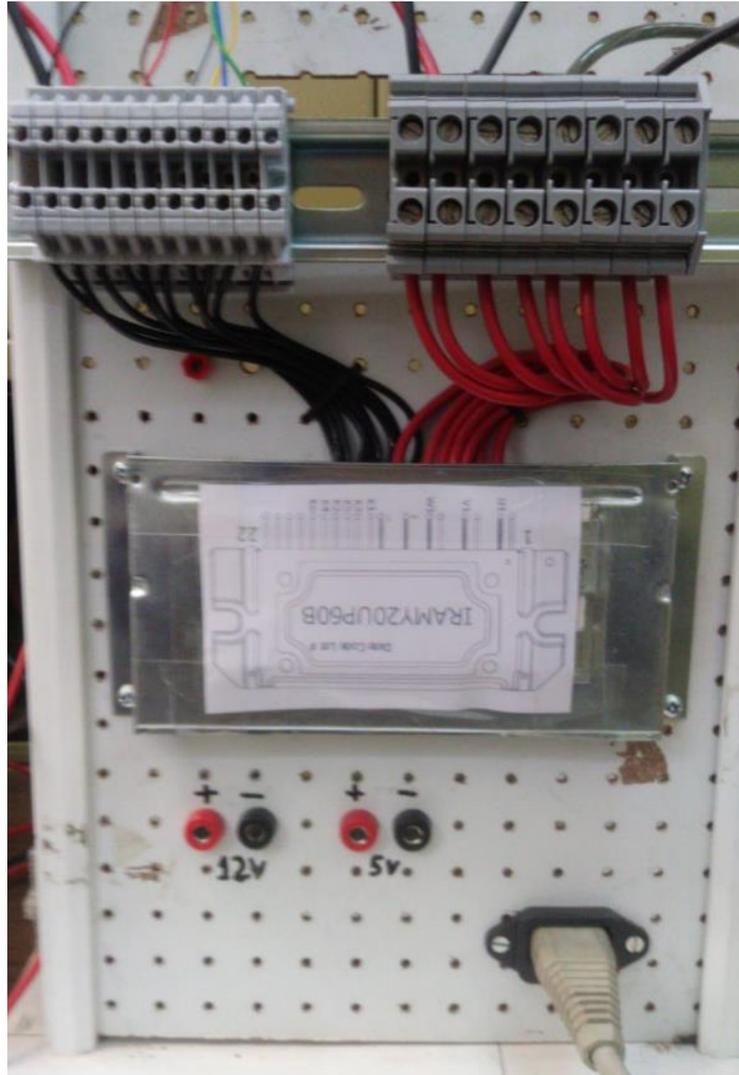


Figura 37: Circuito integrado IRAMY20UP60B junto a sus dos regletas de bornes

Por otra parte también se ha de recordar que las dos partes de este circuito integrado se alimentan una a parte de la otra. En él tenemos que:

- La parte del circuito de mando se alimenta por lo que en la figura 1 del anexo 6 se denomina *Fuente 2* (ver figura 38), esta se alimenta con 15 voltios de corriente continua y su terminal negativo ha de ir conectado también con el terminal de tierra (GND) del puerto C de la unidad de control NI myRIO-1900 a utilizar.
- La parte del circuito de potencia se alimenta con lo que en la figura 1 del anexo 6 llamamos *Fuente 1* (ver figura 39), esta se alimenta con una tensión continua cuyo valor podemos variar según queramos que le llegue más o menos tensión al motor. Es esta la tensión que, tras pasar por el inversor trifásico del circuito integrado ha de llegar, en forma de pulsos, a los terminales del motor.



Figura 38: Fuente 2, autotransformador que alimenta la parte del circuito de mando del circuito integrado



Figura 39: Fuente 1, autotransformador que alimenta la parte del circuito de potencia del circuito integrado

Para concluir el osciloscopio a utilizar se puede ver en la figura 2 del anexo 3 y se coloca entre los terminales 2 y 5 (empezando a contar por la derecha) de la regleta de bornes de la derecha de la figura 37 que equivaldría a los pines 2 y 5 del circuito integrado IRAMY20UP60B.

3.2.3. Prueba del circuito

Tras probar el programa de control básico utilizando el circuito indicado en el esquema de la figura 1 del anexo 6 se ve que el osciloscopio, situado entre los pines 2 y 5 del circuito integrado, marca siempre 0V, por consiguiente hay un error ya que el circuito no funciona según lo esperado.

3.2.4. Búsqueda del error

Debido a que el error puede estar en el hardware (circuito montado en el apartado 3.2.2) y/o en el software (programa de control básico) se procede a estudiar el circuito parte por parte para tratar de encontrar el error.

Como ya se dijo en el apartado 3.2.3 el osciloscopio no pasa de 0V al medir entre los pines 2 y 5 del circuito integrado, por consiguiente se procede a medir entre el borne de tierra (GND) del puerto C de la unidad myRIO y uno de los bornes que transmita una de las señales de control. En este caso también marca siempre 0V, por lo cual el problema no se encuentra en el circuito integrado. Además según las tablas de las referencias bibliográficas [12] y [14] las tensiones producidas por el myRIO superan los umbrales necesarios para que produzca un 1 lógico reconocible por el circuito integrado IRAMY20UP60B, por consiguiente este tampoco puede ser el problema.

Se procede a probar con otro programa la unidad de control NI myRIO-1900 y se observa que esta también funciona bien. Por consiguiente el hardware del circuito implementado está bien y el problema se encuentra en el software.

Tras revisar el programa de control básico se encuentra el problema en el bloque de salidas digitales (ver figura 33) en la señal HIN1 pues a pesar de haberle asignado un borne de salida este no parece reconocerle. Si nos fijamos en la figura 33 mientras que en el resto de señales pone el nombre que le hemos dado y luego el canal por el que sale en la señal HIN1 solo pone el nombre.

3.3. Corrección del programa de control básico

En este subapartado se procederá a corregir el programa de control básico, guardándolo una vez corregido bajo el nombre de programa de control básico corregido, y probando el mismo tras haber solucionado el error en dicho programa.

3.3.1. Programa de control básico corregido

Partiendo del programa de control básico, creado en el apartado 3.2.1, procedemos a subsanar el error encontrado en el apartado 3.2.4. Para ello eliminamos el bloque que envía las señales digitales al exterior (ver figura 33) y lo volvemos a escribir igual que en la figura 34. En la figura 40 se puede ver el nuevo bloque de salida para las señales digitales, en este caso parece estar subsanado el error.

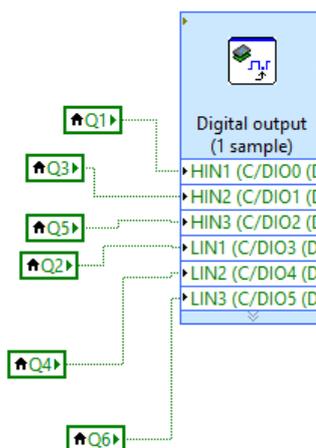


Figura 40: Bloque de salidas digitales que manda las señales de control al circuito integrado

Nota: El resto de componentes que conforman el programa de control básico corregido son los mismos que los del programa de control básico (ver subapartado 3.2.1).

3.3.2. Prueba 1 del circuito

Usando el circuito esquematizado en la figura 1 anexo 6, y el programa de control corregido, se procede a arrancar el sistema, seleccionar una frecuencia de giro y sentido de giro del motor, por ejemplo horario (variable H igual a 1), alimentar la parte del circuito de mando del circuito integrado IRAMY20UP60B a 15 voltios y la parte de potencia a una tensión de valor variable, partiendo esta de un valor pequeño y la vamos incrementando poco a poco.

Como resultado obtenemos que el osciloscopio, colocado tal y como se indica en la figura 1 del anexo 6, nos produce, en este caso, una tensión de línea donde cada vez que pasa de valer 0 voltios a otro valor distinto, ya sea positivo o negativo, se produce un pico de tensión el cual viene dado porque en la fase de conmutación, periodo en el que se desactivan los transistores de una fase para activarse los de la siguiente, las corrientes que los atraviesan aumentan. Por consiguiente obtenemos una gráfica parecida a la de la figura 41.

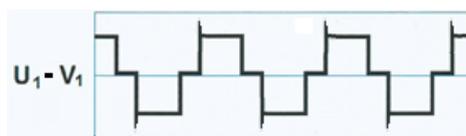


Figura 41: Tensión de línea obtenida al medir con el osciloscopio entre los pines 2 y 5 del circuito integrado

Nota: el valor de la tensión en la figura 41, en los tramos que no vale 0V, depende del valor de la tensión suministrada por la Fuente 1.

Se ha de señalar que al probar este circuito se observan dos cosas:

- Al medir entre los bornes de la regleta de bornes de la derecha de la figura 1 del anexo 6 correspondientes a los pines 2 y 5 del circuito integrado se observa una caída de tensión de entre 1 y 2 voltios respecto a la tensión de alimentación suministrada por la Fuente 1.
- Por más que aumentamos la tensión dada por la Fuente 1 el osciloscopio no marca más de 10 voltios.

3.3.3. Mejora del circuito físico

Con el fin de mejorar la respuesta del sistema se procede a añadir al circuito esquematizado en la figura 1 del anexo 6 tres condensadores electrolíticos de 4,7 μ F y 100V. Uno entre los bornes a los que se conectan los pines 1 y 2 del circuito integrado, otro entre los bornes a los que se conectan los pines 3 y 4 y otro entre los bornes a los que se conectan los pines 5 y 6. El esquema del circuito resultante se puede ver en la figura 2 del anexo 6.

3.3.4. Prueba 2 del circuito

Como resultado de esta prueba obtenemos que el circuito cuyo esquema se puede ver en la figura 2 del anexo 6 al probarse usando el programa de control básico corregido nos produce:

- Una respuesta con la forma deseada, más los picos de tensión en la conmutación (ver figura 41).
- Una caída de tensión de unos dos voltios respecto a la alimentación producto de pérdidas creadas al transmitirse esta por el circuito integrado IRAMY20UP60B.
- Se ha solucionado el problema del apartado 3.3.2 por el cual la tensión entre los bornes a los que van conectados los pines 2 y 5 no pasaba de los 10 voltios dando igual cuanta tensión suministrase la Fuente 1.

3.3.5. Añadiendo un motor al circuito físico

Una vez comprobado que nuestro sistema genera una onda de la forma deseada, sucesión de pulsos en forma de una onda cuadrada (ver figura 41) se procede a realizar una prueba de funcionamiento sobre un pequeño alternador (haciéndole funcionar como motor paso a paso) el cual trabaja a una tensión nominal de 5 voltios.

Con el fin de que se manipule lo menos posible el circuito construido hasta ahora, se procede a sacar un cable del borne al que se conecta el pin 2 (tensión de la fase U del motor paso a paso) del circuito integrado, otro del borne al que se conecta el pin 5 (tensión de la fase V del motor paso a paso) y otro del borne al que se conecta el pin 8 (tensión de la fase W del motor paso a paso). Dichos cables se conectan a tres contactos NC de un contactor el cual se puede ver en la figura 42.



Figura 42: Contactor con su contacto principal y contactos auxiliares

Tras pasar por los tres contactos NC del contactor de la figura 42, se procede a conectar mediante cables dicho alternador, recordando que va a funcionar como si fuese un motor paso a paso. Este estará conectado en configuración de estrella. Una imagen del mismo se puede ver en la figura 1 del anexo 4 y la forma en que ha de ir conectado en la figura 43.

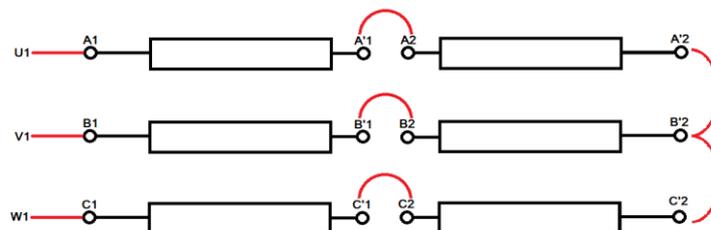


Figura 43: Esquema de las conexiones para el alternador de la figura 1 del anexo 4

El esquema del circuito resultante de añadir estos componentes al circuito esquematizado en la figura 2 del anexo 6 se puede ver en la figura 3 de dicho anexo.

Una vez que se haya probado dicho circuito se procederá a la prueba del programa de control básico corregido utilizando la máquina síncrona, funcionando esta como motor paso a paso, de la figura 2 del anexo 4 usando para ello el circuito físico esquematizado en la figura 4 del anexo 6.

3.3.6. Prueba 3 del circuito

Tras probar el circuito cuyo esquema se puede ver en la figura 3 del anexo 6 usando el programa de control básico corregido y comprobar que funciona correctamente se procede a probar el circuito de la figura 4 del anexo 6 (usando el mismo programa de control que el utilizado en el circuito de la figura 3 del anexo 6), la fuente de alimentación para el circuito de excitación de esta máquina se puede ver en la figura 44. Como resultado obtenemos que este funciona correctamente exceptuando 3 cosas:

- Si se trata de arrancar el motor a una frecuencia de conmutación elevada este vibra pero no se mueve, corroborándose de esta forma lo dicho en el apartado 2.3.5.
- Si el motor gira a una frecuencia de 20 Hz y de repente decimos que gire a 80 Hz el programa de control pasa de golpe a suministrar las señales de control a una frecuencia de 80 Hz lo cual induce problemas en el funcionamiento del motor debido al cambio brusco e inmediato en la velocidad de giro del motor (El motor se desincroniza).
- Si estoy girando a 80 Hz en sentido horario y de repente le pido al motor que gire en sentido antihorario, este pasa a girar instantáneamente a 80 Hz en sentido antihorario dando lugar a problemas en el motor haciendo que este se resienta y deteriore e incluso pudiendo llegar a provocar la ruptura del mismo. Esto es debido a que el motor gira en un sentido con una cierta inercia, la cual se incrementa según aumenta la frecuencia y tensión a la que se encuentra funcionando, y al tratar de hacer que gire de forma instantánea en sentido opuesto puede dar lugar a que el motor se rompa pues este es forzado a girar en el sentido que nosotros le mandamos mientras que su inercia trata de que gire en sentido opuesto lo cual puede dar lugar a que el eje del motor se rompa si no es capaz de soportar estas fuerzas.



Figura 44: Fuente de alimentación para el circuito de excitación de la máquina síncrona

3.4. Desarrollo de un programa de control avanzado

3.4.1. Creación del programa de control avanzado

Este programa se ha implementado a partir del programa de control básico corregido y tiene como objetivo la mejora del mismo para deshacerse de los problemas encontrados en él (los dos últimos puntos del apartado 3.3.6).

El programa de control avanzado es idéntico al programa de control básico corregido excepto por los cambios/adicciones al mismo explicados a continuación siguiendo el formato del subapartado 3.2.1.

En el sistema de bloques que genera las señales de entrada para la estructura formula mode que genera las señales de control a enviar al circuito integrado IRAMY20UP60B se han añadido una serie de variables de entrada a dicha estructura. Además se han añadido una serie de condiciones para la activación (que valgan 1) de las variables de entrada H y AH. En la figura 45 se encuentra representado este sistema de bloques.

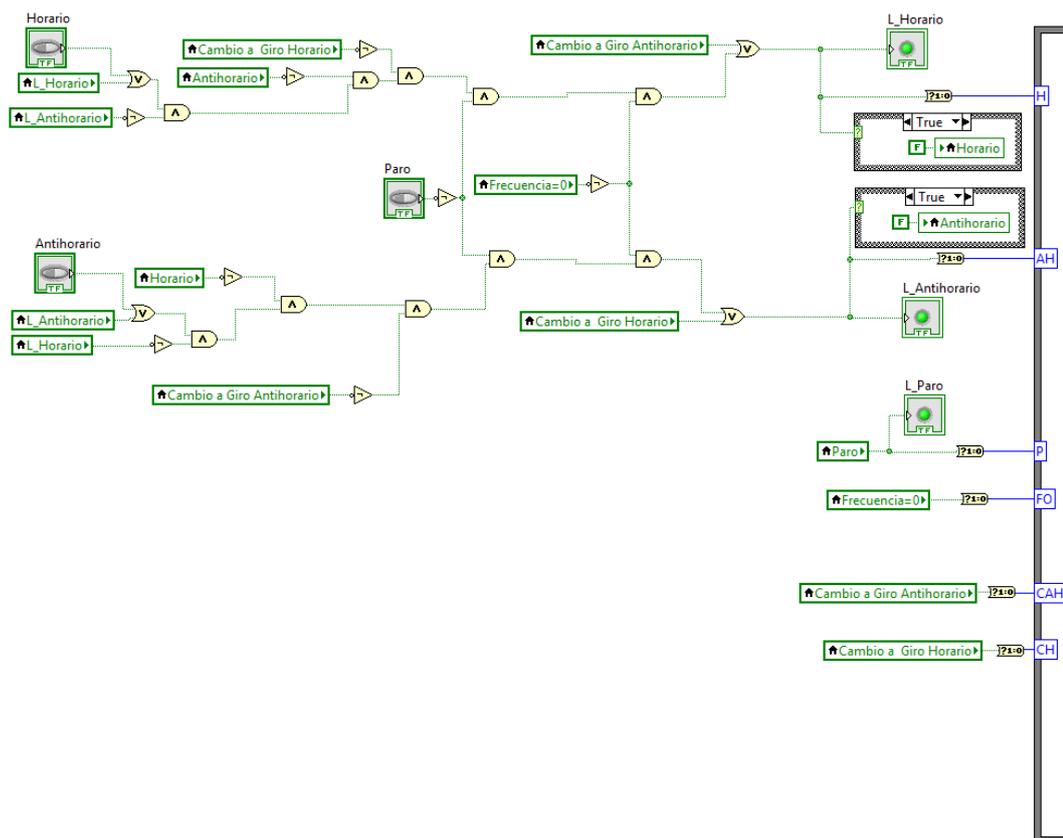


Figura 45: Sistema de bloques que permite seleccionar el sentido de giro del motor paso a paso o detenerlo

Como se puede ver en la figura 45 ahora tenemos que para que la variable H valga 1, y la lámpara que indica que el motor está girando en sentido horario

“L_Horario” valga un 1 lógico (esté encendida), se ha de cumplir, al menos, una de las siguientes condiciones:

- Que el interruptor “Horario” esté cerrado (valga un 1 lógico), la luz que indica giro antihorario “L_Antihorario” valga un 0 lógico, el interruptor “Antihorario” esté abierto (valga un 0 lógico), la lámpara que indica cambio de sentido de giro del motor a horario “Cambio a Giro Horario” valga un 0 lógico, el interruptor de paro (freno) “Paro” valga un 0 lógico y que la lámpara “Frecuencia=0” valga un 0 lógico.
- Que la lámpara que indica que el motor está girando en sentido horario “L_Horario” valga un 1 lógico, la luz que indica giro antihorario “L_Antihorario” valga un 0 lógico, el interruptor “Antihorario” esté abierto (valga un 0 lógico), la lámpara que indica cambio de sentido de giro del motor a horario “Cambio a Giro Horario” valga un 0 lógico, el interruptor de paro (freno) “Paro” valga un 0 lógico y que la lámpara “Frecuencia=0” valga un 0 lógico.
- Que la lámpara que indica el cambio de sentido de giro a antihorario “Cambio a Giro Antihorario” valga un 1 lógico.

Por otra parte para que la variable AH valga 1, y la lámpara que indica que el motor está girando en sentido antihorario “L_Antihorario” valga un 1 lógico, se ha de cumplir, al menos, una de las siguientes condiciones:

- Que el interruptor “Antihorario” esté cerrado (valga un 1 lógico), la luz que indica giro horario “L_Horario” valga un 0 lógico, el interruptor “Horario” esté abierto (valga un 0 lógico), la lámpara que indica cambio de sentido de giro del motor a antihorario “Cambio a Giro Antihorario” valga un 0 lógico, el interruptor de paro (freno) “Paro” valga un 0 lógico y que la lámpara “Frecuencia=0” valga un 0 lógico.
- Que la lámpara que indica que el motor está girando en sentido antihorario “L_Antihorario” valga un 1 lógico, la luz que indica giro horario “L_Horario” valga un 0 lógico, el interruptor “Horario” esté abierto (valga un 0 lógico), la lámpara que indica cambio de sentido de giro del motor a antihorario “Cambio a Giro Antihorario” valga un 0 lógico, el interruptor de paro (freno) “Paro” valga un 0 lógico y que la lámpara “Frecuencia=0” valga un 0 lógico.
- Que la lámpara que indica el cambio de sentido de giro a horario “Cambio a Giro Horario” valga un 1 lógico.

Para que la variable P valga 1, y la luz que indica que estamos frenando “L_Paro” valga un 1 lógico, se ha de cumplir que el interruptor de freno “Paro” valga un 1 lógico.

La variable CAH valdrá 1 si la luz que indica el cambio en el sentido de giro del motor a antihorario “Cambio a Giro Antihorario” a de valer un 1 lógico. Mientras que la variable CH valdrá 1 si la luz que indica el cambio en el sentido de giro del motor a horario “Cambio a Giro Horario” a de valer un 1 lógico.

Por consiguiente, y debido al cambio en el sistema de bloques que genera las señales de entrada a la estructura del formula mode que produce las señales de control a enviar al circuito integrado IRAMY20UP60B, se ha alterado la estructura formula mode que produce las señales de control (ver figura 46). Los cambios en esta estructura respecto a su equivalente del programa de control básico corregido (ver figura 31) son:

- Para que se active el código comprendido entre la primera y cuarta línea del código de esta estructura ahora se ha de cumplir que la variable P valga 1 o que las variables H, AH, FO, CAH y CH valgan 0, por lo demás permanece igual que su código equivalente en la figura 31.
- Para que se active el código comprendido entre la quinta y sexta línea ahora se ha de cumplir que la variable H valga 1 y las variables CAH y CH valgan 0, por lo demás permanece igual que su código equivalente en la figura 31.
- Para que se active el código comprendido entre la séptima y octava línea ahora se ha de cumplir que la variable AH valga 1 y las variables CAH y CH valgan 0, por lo demás permanece igual que su código equivalente en la figura 31.
- El código comprendido entre la novena y décima línea de la figura 46 se ha añadido nuevo con respecto al de la figura 31. Este es una estructura de control condicional if que se activa cuando la variable de entrada CAH vale 1, y lo que hace es incrementar en una unidad el valor de la variable de salida sal.
- El código comprendido entre la decimoprimera y decimosegunda línea de la figura 46 se ha añadido nuevo con respecto al de la figura 31. Este es una estructura de control condicional if que se activa cuando la variable de entrada CH vale 1, y lo que hace es decrementar en una unidad el valor de la variable de salida sal.
- El código comprendido entre la decimotercera y decimosexta línea de la figura 46 corresponde con el comprendido entre la novena y la decimosegunda línea de código en la estructura de la figura 31 permaneciendo sin cambios respecto a esta.
- Por último, el código comprendido desde la diecisieteava línea en delante de la estructura de la figura 46 se corresponde al código comprendido desde la decimotercera línea en adelante del código en la figura 31. La única diferencia entre ambos se encuentra en las condiciones de activación de la estructura de control condicional if para la cual ahora es necesario que la variable P valgo 0 y que la variable H, AH, FO, CAH o CH valga 1.

```

if(P==1 || (H==0 && AH==0 && FO==0 && CAH==0 && CH==0))
{
  Q1=Q2=Q3=Q4=Q5=Q6=1;
}
if (H==1 && CAH==0 && CH==0)
sal=sal+1;
if (AH==1 && CAH==0 && CH==0)
sal=sal-1;
if(CAH==1)
sal=sal+1;
if(CH==1)
sal=sal-1;
if (sal<1)
sal=6;
if(sal>6)
sal=1;
if(P==0 && (H==1 || AH==1 || FO==1 || CAH==1 || CH==1))
{
  if(sal==1 && P==0)
  {
    Q1=Q6=0;
    Q2=Q3=Q4=Q5=1;
  }
  if(sal==2 && P==0)
  {
    Q3=Q6=0;
    Q1=Q2=Q4=Q5=1;
  }
  if(sal==3 && P==0)
  {
    Q2=Q3=0;
    Q1=Q4=Q5=Q6=1;
  }
  if(sal==4 && P==0)
  {
    Q2=Q5=0;
    Q1=Q3=Q4=Q6=1;
  }
  if(sal==5 && P==0)
  {
    Q4=Q5=0;
    Q1=Q2=Q3=Q6=1;
  }
  if(sal==6 && P==0)
  {
    Q1=Q4=0;
    Q2=Q3=Q5=Q6=1;
  }
}
}

```

Figura 46: Estructura formula mode que genera las señales de control a enviar al circuito integrado

A mayores, en la tabla 12 se puede ver una explicación de las nuevas variables de entrada añadidas con respecto a la estructura de la figura 31.

Nombre de la variable	Tipo de variable	Función que desempeña
FO	Entrada	Vale 1 cuando está encendida la luz “Frecuencia=0”, enclava el motor en la fase en la que se encuentre en ese momento.
CAH	Entrada	Vale 1 cuando está encendida la luz “Cambio a Giro Antihorario”. Cuando vale 1 incrementa en una unidad el valor de la variable sal con respecto a su valor anterior.
CH	Entrada	Vale 1 cuando está encendida la luz “Cambio a Giro Horario”. Cuando vale 1 decrementa en una unidad el valor de la variable sal con respecto a su valor anterior.

Tabla 12: Tabla de las variables añadidas, respecto de las variables de la estructura formula mode de la figura 31, a la estructura formula mode de la figura 46

El sistema de bloques a la salida de este formula mode y el bloque de salidas digitales que lleva las señales de control al circuito integrado permanecen sin cambios respecto de sus equivalentes en el programa de control básico corregido (ver figuras 32 y 40).

Para concluir tenemos que el sistema de bloques que discretiza en el tiempo el programa de control permitiendo que este funcione correctamente ha sufrido una serie de cambios. Ahora, y con el fin de solucionar los problemas indicados al principio de este apartado, se ha procedido a añadir una estructura formula mode entre el bloque desde el que se introduce la frecuencia de conmutación (“Frecuencia deseada”) y el bloque de división numérica de la figura 35, a mayores se le añaden a dicha estructura una serie de variables de entrada y salida, bucles de realimentación,... obteniendo como resultado que dicho sistema de bloques tenga la apariencia que se puede ver en la figura 47.

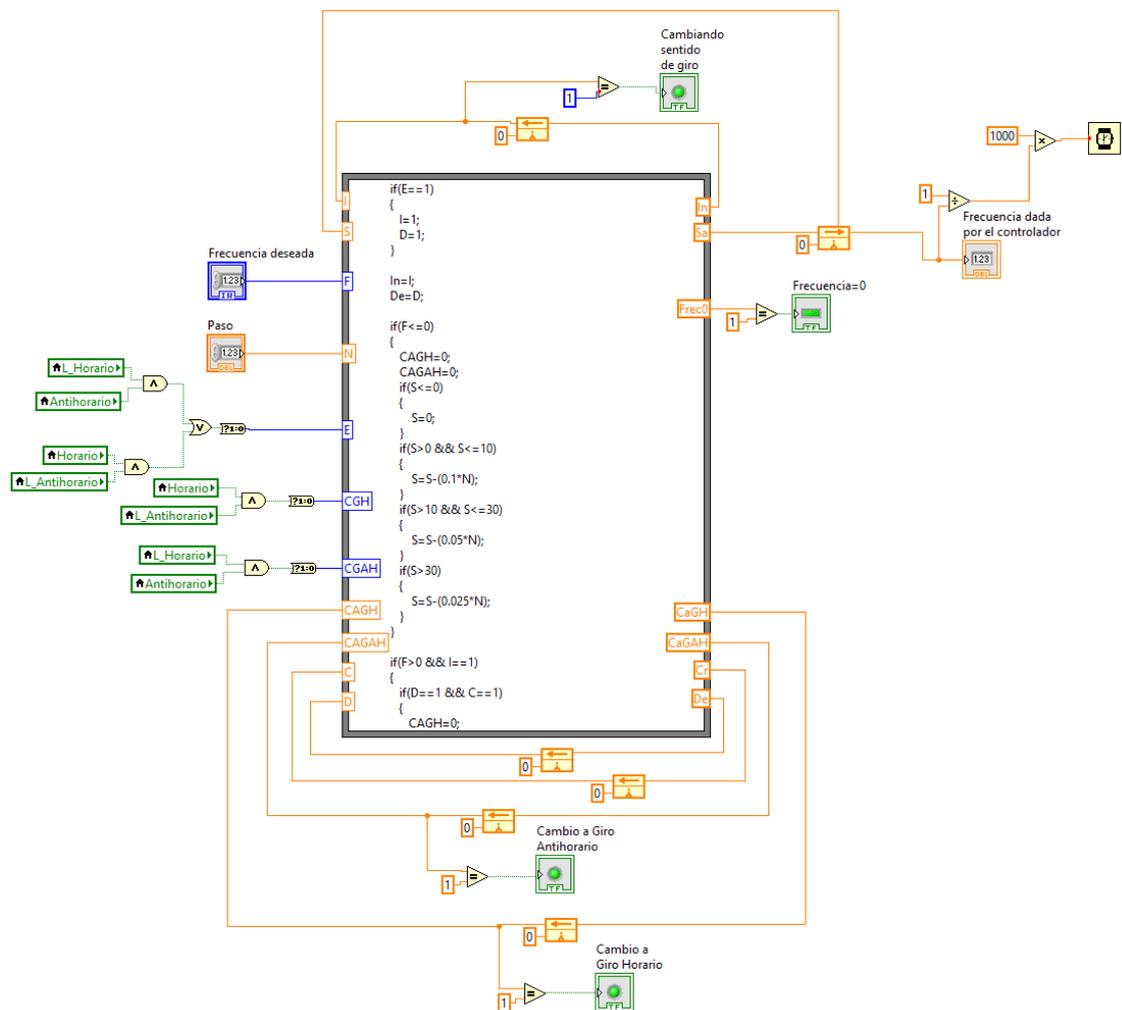


Figura 47: Sistema de bloques que discretiza el programa de control

Como se puede ver en la figura 47 en esta estructura formula mode existen 6 lazos de realimentación, todos inicializados a un valor de 0, los cuales cumplen las siguientes funciones:

- **Lazo de realimentación In-l.** Este lazo se activa adquiriendo el valor de 1 cuando el motor está girando en una dirección y le decimos al programa de control que queremos que gire en sentido contrario. Cuando vale 1 se enciende la lámpara “Cambiando sentido de giro”.
- **Lazo de realimentación Sa-S.** Este lazo permite hacer que la frecuencia de conmutación se incremente o decremente poco a poco hasta alcanzar el valor deseado, en vez de hacerlo de golpe tal y como pasaba en los programas de control anteriores.
- **Lazo de realimentación CaGH-CAGH.** Este lazo, y sus variables, tienen el valor de 1 cuando el motor se encuentra girando en sentido antihorario y decimos que queremos que el motor cambie el sentido de giro. Solo

vale 1 mientras la velocidad del motor se decrementa hasta llegar a cero (mientras gira en sentido antihorario), una vez que empieza a girar en sentido horario vuelve a valer 0. Mientras vale 1 se enciende la luz “*Cambio a Giro Horario*”.

- **Lazo de realimentación CaGAH-CAGAH.** Este lazo, y sus variables, tienen el valor de 1 cuando el motor se encuentra girando en sentido horario y decimos que queremos que el motor cambie el sentido de giro. Solo vale 1 mientras la velocidad del motor se decrementa hasta llegar a cero (mientras gira en sentido horario), una vez que empieza a girar en sentido antihorario vuelve a valer 0. Mientras vale 1 se enciende la luz “*Cambio a Giro Antihorario*”.
- **Lazo de realimentación Cr-C.** Este lazo, y sus variables, tienen el valor de 1 cuando la variable I vale 1 y hemos empezado a girar en el nuevo sentido deseado. Se mantiene a valor 1 desde que se empieza a girar en el nuevo sentido deseado hasta que el motor alcanza la frecuencia de conmutación deseada, luego vuelve a valer 0.
- **Lazo de realimentación De-D.** Este lazo, y sus variables, tienen el valor de 1 durante todo el proceso de cambio de sentido de giro del motor. Desde que la frecuencia de conmutación empieza a decrecer preparándose para invertir el sentido de giro hasta que alcanza la frecuencia de conmutación deseada en el sentido deseado.

Por otra parte también tenemos las siguientes entradas y salidas:

- **La variable de entrada F.** Por ella se introduce a dicha estructura el valor de la frecuencia de conmutación deseada, esta se indica por medio de un bloque de control numérico llamado “*Frecuencia deseada*”.
- **La variable de entrada N.** A través de un bloque de control numérico llamado “*Paso*” se introduce por cuanto queremos multiplicar el incremento (o decremento) de la frecuencia de conmutación cada vez que el programa lee datos, hasta alcanzar el valor deseado de esta.
- **La variable de entrada E.** Vale 1 cuando “*L_Horario*” y “*Antihorario*” valen un 1 lógico o cuando “*L_Antihorario*” y “*Horario*” valen un 1 lógico. Indica que queremos invertir el sentido de giro del motor e inicia el proceso para que esto sea posible.
- **La variable de entrada CGH.** Vale 1 cuando “*Horario*” y “*L_Antihorario*” valen 1 lógico. Permite conocer que la inversión del giro es de antihorario a horario.
- **La variable de entrada CGAH.** Vale 1 cuando “*Antihorario*” y “*L_Horario*” valen 1 lógico. Permite conocer que la inversión del giro es de horario a antihorario.
- **La variable de salida Sa.** Además de su función en el lazo de realimentación, también nos permite conocer el valor de la frecuencia de conmutación del programa de control avanzado en cada momento

por medio de un bloque indicador numérico (“*Frecuencia dada por el controlador*”) y, tras pasar por los bloques correspondientes llegar en forma de milisegundos al bloque de espera en milisegundos.

- **La variable de salida FrecO.** Mientras vale 1 se enciende la luz “*Frecuencia=0*”.

Para concluir la explicación de las variables de la estructura de la figura 47 en la tabla 13 se puede ver, de forma resumida, una explicación de la función que desempeñan todas ellas.

Nombre de la variable	Tipo de variable	Función que desempeña
I	Entrada	Forma parte del lazo de realimentación In_I, cuando vale 1 indica que se ha activado el proceso de cambio del sentido de giro del motor paso a paso.
S	Entrada	Forma parte del lazo de realimentación Sa_S, le da a la estructura formula mode el valor, en cada momento de la frecuencia de conmutación a la que funciona el programa de control.
F	Entrada	Por ella se introduce a la estructura formula mode el valor de la frecuencia de conmutación a la que queremos que funcione el programa de control.
N	Entrada	Por ella se introduce por cuanto queremos que se multiplique el incremento de la frecuencia de conmutación por ciclo de lectura del programa de control.
E	Entrada	Cuando vale 1 inicia el protocolo de inversión de giro contenido en el código de esta estructura.
CGH	Entrada	Cuando vale 1 indica que la inversión de giro es de antihorario a horario.
CGAH	Entrada	Cuando vale 1 indica que la inversión de giro es de horario a antihorario.
CAGH	Entrada	Vale 1 mientras CGH vale 1, cuando vale 1 enciende la luz “ <i>Cambio a Giro Horario</i> ”.
CAGAH	Entrada	Vale 1 mientras CGAH vale 1, cuando vale 1 enciende la luz “ <i>Cambio a Giro Antihorario</i> ”.

Nombre de la variable	Tipo de variable	Función que desempeña
C	Entrada	Se activa (vale 1) durante el proceso de inversión de giro una vez que empieza a girar en el nuevo sentido, su valor permanece a 1 hasta que alcanza el valor de la frecuencia deseada.
D	Entrada	Se activa una vez empieza el proceso de inversión de giro y permanece a 1 hasta que este termina.
In	Salida	Envía su valor a la variable I a través del lazo de realimentación In-I.
Sa	Salida	Envía su valor a la variable S a través del lazo de realimentación Sa-S. También nos da el valor de la frecuencia dada por el programa de control.
Frec0	Salida	Vale 1 cuando la frecuencia deseada y la dada por el controlador valen 0. Cuando vale 1 se enciende la luz "Frecuencia=0" lo cual da lugar al enclavamiento del motor en la posición que tuviese en ese momento.
CaGH	Salida	Envía su valor a la variable CAGH a través del lazo de realimentación CAGH-CaGH.
CaGAH	Salida	Envía su valor a la variable CAGAH a través del lazo de realimentación CAGAH-CaGAH.
Cr	Salida	Envía su valor a la variable C a través del lazo de realimentación Cr-C.
De	Salida	Envía su valor a la variable D a través del lazo de realimentación De-D.

Tabla 13: Tabla con las variables de la estructura formula mode que controla la velocidad de giro del motor paso a paso

Por último, se procede a explicar, dividido en segmentos, el código contenido en la estructura formula mode de la figura 47.

```

if(E==1)
{
    I=1;
    D=1;
}

In=I;
De=D;

```

La primera parte de este código se puede ver en la figura 48, esta se encarga de activar las variables necesarias para iniciar el protocolo de inversión del sentido de giro.

Figura 48: Primera parte del código de la estructura de la figura 47

La segunda parte del código se activa cuando la frecuencia de conmutación deseada es 0 Hz o tiene un valor negativo. Lo que hace es llevar el valor de la frecuencia dada por el controlador a 0 Hz, en ella el decremento de velocidad (por ciclo de lectura de datos del programa de control) es de 0.025 si la frecuencia dada por el control es mayor de 30, de 0.05 si el valor de esta se encuentra entre 30 y 10 y de 0.1 si es menor o igual a 10. Esta se puede ver en la figura 49.

Nota: El decremento indicado se multiplica por el número introducido a través del bloque de control numérico llamado “Paso”.

```

if(F<=0)
{
  CAGH=0;
  CAGAH=0;
  if(S<=0)
  {
    S=0;
  }
  if(S>0 && S<=10)
  {
    S=S-(0.1*N);
  }
  if(S>10 && S<=30)
  {
    S=S-(0.05*N);
  }
  if(S>30)
  {
    S=S-(0.025*N);
  }
}

```

Figura 49: Segunda parte del código de la estructura de la figura 47

La tercera parte se activa cuando se ha activado el protocolo de inversión del sentido de giro del motor. Para ello, siguiendo el proceso de incremento/decremento en la frecuencia de conmutación de la figura 49, lo primero que hace es decrementar poco a poco la velocidad a la que gira (manteniendo el sentido de giro previo a la activación de este protocolo) hasta llegar a una frecuencia de conmutación dada por el controlador de 0 Hz para luego empezar a girar en sentido contrario (sentido deseado de giro) incrementando el valor de la frecuencia de conmutación de forma progresiva hasta alcanzar el valor de la frecuencia deseada. Una vez alcanzado dicho valor el protocolo de inversión de giro se desactiva. La primera parte de este proceso corresponde al código de la columna derecha de la figura 50 y la segunda a la columna de la izquierda del código observado en dicha figura. Tras concluir la estructura de control condicional que conforma este proceso se procede a actualizar el valor de las variables In y D.

Nota: El código se lee de forma secuencial en el programa de control, en el código de la figura 50, la columna de la izquierda va primero y a esta le sigue la de la derecha.

```

if(F>0 && l==1)
{
  if(D==1 && C==1)
  {
    CAGH=0;
    CAGAH=0;
    if(S>=F)
    {
      S=F;
      l=0;
      D=0;
      C=0;
    }
    if(S>30 && S<F)
    {
      S=S+(0.025*N);
    }
    if(S>10 && S<=30 && S<F)
    {
      S=S+(0.05*N);
    }
    if(S<=10 && S<F)
    {
      S=S+(0.1*N);
    }
  }
}

if(D==1 && C==0)
{
  if(CGH==1)
  {
    CAGH=1;
  }
  if(CGAH==1)
  {
    CAGAH=1;
  }
  if(S<=0)
  {
    S=0;
    C=1;
  }
  if(S>0 && S<=10)
  {
    S=S-(0.1*N);
  }
  if(S>10 && S<=30)
  {
    S=S-(0.05*N);
  }
  if(S>30)
  {
    S=S-(0.025*N);
  }
}
In=l;
De=D;

```

Figura 50: Tercera parte del código de la estructura de la figura 47

La cuarta parte del código se activa cuando no se encuentra activo el protocolo de inversión de giro y el valor de la frecuencia deseada es mayor de 0 Hz. Dentro de ella hay tres situaciones:

- La frecuencia deseada es mayor que la frecuencia dada por el controlador. En este caso se procede a incrementar poco a poco el valor de la frecuencia de conmutación dada por el controlador siguiendo el proceso del código contenido en las figuras 49 y 50.
- La frecuencia deseada es menor que la frecuencia dada por el controlador. En este caso se procede a decrementar poco a poco el valor de la frecuencia de conmutación dada por el controlador siguiendo el proceso del código contenido en las figuras 49 y 50.
- La frecuencia deseada es igual a la frecuencia dada por el controlador. En este caso el programa de control mantiene la frecuencia de conmutación.

El primer caso corresponde al código de la columna de la izquierda de la figura 51, el segundo a la del medio y el tercero a la de la izquierda.

Nota: Al igual que en la figura 50 el código se lee de forma secuencial, leyéndose primero la columna de la izquierda, luego la del medio y concluye leyendo la de la derecha.

```

if(F>0 && l==0)
{
  if(F>S)
  {
    if(S>30 && S<F)
    {
      S=S+(0.025*N);
    }
    if(S>10 && S<=30 && S<F)
    {
      S=S+(0.05*N);
    }
    if(S<=10 && S<F)
    {
      S=S+(0.1*N);
    }
    if(F<=S)
    {
      S=F;
    }
  }
}

if(F<S)
{
  if(S>0 && S<=10 && S>F)
  {
    S=S-(0.1*N);
  }
  if(S>10 && S<=30 && S>F)
  {
    S=S-(0.05*N);
  }
  if(S>30 && S>F)
  {
    S=S-(0.025*N);
  }
  if(F>=S)
  {
    S=F;
  }
}

if(F==S)
{
  S=F;
}
if(S<=0)
{
  S=0;
}
}

```

Figura 51: Cuarta parte del código de la estructura de la figura 47

Para concluir tenemos la quinta y última parte del código la cual se puede ver en la figura 52. En ella tenemos el código que controla el valor de la variable de salida Frec0 así como el que manda el valor de la frecuencia de conmutación, la variable CaGH, CaGAH y C para el siguiente ciclo de lectura.

```

if(S==0 && F==0)
{
  Frec0=1;
}
if(S!=0)
{
  Frec0=0;
}

CaGH=CAGH;
CaGAH=CAGAH;
Cr=C;
Sa=S;

```

Figura 52: Quinta y última parte del código de la estructura de la figura 47

3.4.2. Prueba del circuito

Tras probar el programa de control avanzado, usando para ello el circuito físico esquematizado en la figura 4 del anexo 6, se observa que se han conseguido cumplir los objetivos propuestos al principio del subapartado 3.4.2 (corregir los errores indicados en los dos últimos puntos del subapartado 3.3.6).

Por otra parte, se observa que al pulsar el botón de paro la máquina se detiene, sin embargo, el valor de la frecuencia dada por el controlador no disminuye, se mantiene constante. Esto será corregido en el programa de control definitivo. También se encuentra un problema en las lámparas que indican el sentido de giro del motor pues cuando está activo el protocolo de inversión de giro, en la parte del mismo en que decrece poco a poco la velocidad de giro antes de invertir el sentido del mismo, las dos lámparas están apagadas.

Para concluir, también se encuentra un problema en el hecho de que cuando el interruptor “Paro” y/o la luz “Frecuencia=0” valen 1 lógico se desactivan las variables de entrada H y AH dando lugar a que vuelvan a valer 0 y, por consiguiente, se deseccione el sentido de giro del motor.

3.5. Programa de control definitivo

3.5.1. Creación del programa de control definitivo

El programa de control definitivo se ha construido a partir del programa de control avanzado. Con respecto a este se han añadido/modificado los siguientes elementos con el fin de generar el programa de control definitivo:

- Se ha cambiado el nombre del interruptor “Paro” por “Freno”, el de la luz “L_Paro” por “L_Freno” y el del bloque de control numérico “Paso” por “Multiplicar Incremento”.
- En el sistema de bloques que genera las señales de entrada a la estructura formula mode que produce las señales de control se han introducido las siguientes modificaciones y adiciones con respecto a su equivalente en el programa anterior (ver figura 45):
 - Se ha modificado ligeramente el sistema de bloques que genera las variables de entrada H y AH. El objetivo de esto es solucionar el problema con las lámparas que señalan el sentido de giro del motor paso a paso indicado en el subapartado 3.4.2.
 - Se han eliminado de las ramas que generan las variables de entrada H y AH el interruptor “Freno” y la luz “Frecuencia=0” con el fin de que cuando estos se activen no eliminen la selección de giro.
 - Se ha añadido a las ramas que generan las señales H y AH el interruptor “Punto muerto” con el fin de que cuando este se

accione se desactive la selección de giro y el protocolo de inversión de giro y sus variables correspondientes (de estar estas activas).

- Se ha creado tres estructuras de control condicional. Una en la rama que genera la variable de entrada P que se activa al accionar el interruptor “Freno” o “Punto muerto” y da lugar a que se desactive el interruptor “Mantener velocidad”, otra en la rama que da su valor a la variable de entrada FO y desactiva el interruptor “Enclavar” cuando la luz “Frecuencia=0” vale 0 lógico y otra que desactiva los interruptores “Horario” y “Antihorario” cuando el interruptor “Freno” o “Punto muerto” o la luz “Frecuencia=0” valen un 1 lógico.

En la tabla 14 se puede ver una explicación de la función que desarrolla cada uno de los nuevos interruptores añadidos en esta versión del programa de control. Además, el sistema de bloques producido al incorporar las modificaciones y adiciones indicadas anteriormente corresponde con el representado en la figura 53.

Nombre del interruptor	Función que desempeña
Enclavar	Solo se puede activar cuando la luz “Frecuencia=0” vale 1 y mantiene al motor enclavado en la posición que se encuentre en ese momento. En cuanto dicha luz vuelve a valer un 0 lógico esta se desactiva automáticamente.
Mantener velocidad	Al accionarse hace que la velocidad de giro se mantenga en el valor que tenga en ese momento, aunque esta no sea la indicada previamente mediante el control numérico “Frecuencia de conmutación deseada”. Se desactiva automáticamente al accionarse el interruptor “Punto muerto” o “Freno”.
Punto muerto	Al accionarse desactiva automáticamente todas las variables e interruptores que tengan que ver con la selección del sentido de giro y el protocolo de inversión de giro.

Tabla 14: Interruptores nuevos añadidos al programa de control definitivo con respecto a su versión anterior

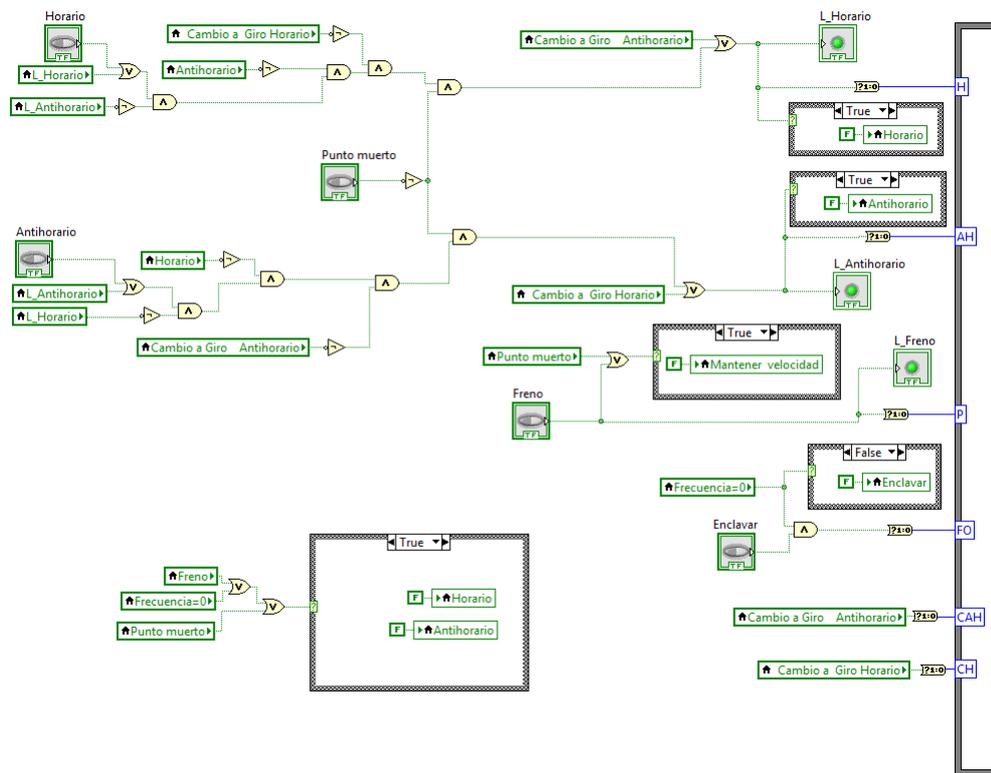


Figura 53: Sistema de bloques que permite la selección del sentido de giro, enclavamiento o freno del motor paso a paso

- La estructura formula mode ha sufrido algunos cambios en el código que contiene con respecto a la versión anterior de la misma (ver figura 46). Su nueva apariencia se puede ver en la figura 54 y los cambios que ha sufrido han sido:
 - En la primera de las estructuras de control condicional contenida en este código, líneas 1 a 4, se ha producido una adición a la primera de sus dos condiciones de activación. Ahora para que esta se cumpla se ha de cumplir que la variable de entrada P valga 1 y la variable FO valga 0.
 - En las cuatro estructuras condicionales escritas de la línea 5 a 6, 7 a 8, 9 a 10 y 11 a 12 de este código se le ha añadido que además de las condiciones que se habían de cumplir para que se activasen anteriormente, ahora también se ha de cumplir que las variables de entrada P y FO valgan 0.
 - En la última estructura condicional de este código, línea 17 en adelante, se ha cambiado la condición de activación de su versión previa por las que se pueden ver en la línea 17 del código contenido en la figura 54. A mayores se ha eliminado de las estructuras condicionales contenidas dentro de esta la condición de que la variable P a de valer 0.

```

if((P==1 && FO==0) || (H==0 && AH==0 && FO==0 && CAH==0 && CH==0))
{
  Q1=Q2=Q3=Q4=Q5=Q6=1;
}
if (H==1 && CAH==0 && CH==0 && P==0 && FO==0)
sal=sal+1;
if (AH==1 && CAH==0 && CH==0 && P==0 && FO==0)
sal=sal-1;
if(CAH==1 && P==0 && FO==0)
sal=sal+1;
if(CH==1 && P==0 && FO==0)
sal=sal-1;
if (sal<1)
sal=6;
if(sal>6)
sal=1;
if(FO==1 || (P==0 && (H==1 || AH==1 || CAH==1 || CH==1)))
{
  if(sal==1)
  {
    Q1=Q6=0;
    Q2=Q3=Q4=Q5=1;
  }
  if(sal==2)
  {
    Q3=Q6=0;
    Q1=Q2=Q4=Q5=1;
  }
  if(sal==3)
  {
    Q2=Q3=0;
    Q1=Q4=Q5=Q6=1;
  }
  if(sal==4)
  {
    Q2=Q5=0;
    Q1=Q3=Q4=Q6=1;
  }
  if(sal==5)
  {
    Q4=Q5=0;
    Q1=Q2=Q3=Q6=1;
  }
  if(sal==6)
  {
    Q1=Q4=0;
    Q2=Q3=Q5=Q6=1;
  }
}
}

```

Figura 54: Estructura formula mode que genera las señales de control a enviar al circuito integrado

- El sistema de bloques a la salida de la estructura formula mode que produce las señales de control y el bloque de salidas digitales que manda las señales al circuito integrado no cambian (ver figuras 32 y 40).
- Con respecto a su equivalente en el programa de control avanzado (ver figura 47) se han producido una serie de cambios y adiciones al sistema

de bloques que discretiza el programa de control siendo estos los siguientes:

- En el lazo de realimentación Sa-S, tras pasar por el bloque de realimentación, se saca el valor de este y se divide entre el resultado de multiplicar 6 por el número de pares de polos en el inducido de la máquina que estamos utilizando. Este valor es introducido mediante el bloque de control numérico "*Pares de polos en el inducido*", el resultado es la frecuencia a la que gira el motor que estamos utilizando, este valor se muestra por medio del bloque indicador numérico "*Frecuencia*".
- Se han añadido varias opciones a la forma en que se produce la señal de entrada F a esta estructura. Al igual que en la versión anterior del programa de control, una de ellas es tomar directamente el valor del bloque "*Frecuencia de conmutación deseada*". Esta es la opción que se usará si no está accionado el interruptor "*Mantener velocidad*" o "*Freno*".

Otra es cuando está accionado el interruptor "*Mantener velocidad*", en este caso la variable de entrada F tendrá el valor dado por el bloque indicador numérico "*Frecuencia de conmutación dada por el controlador*" en el momento de su activación sin importar si este coincide, o no, con el dado por el bloque "*Frecuencia de conmutación deseada*".

La última opción surge cuando el interruptor "*Freno*" está accionado y hace que la variable F valga 0.

- Al igual que con la variable F, la variable de entrada N ahora también tiene tres posibles valores. Uno, al igual que en el programa anterior, es obtenerlo del bloque de control numérico "*Multiplicar incremento*", esta opción solo está disponible cuando no está activo el interruptor "*Mantener velocidad*" o "*Freno*". Otra es cuando está activo el interruptor "*Mantener velocidad*", en este caso N valdrá 0. La última opción surge cuando "*Freno*" está activo y hace que N valga 10000.
- Se ha añadido una nueva variable de entrada (PM) la cual vale 1 cuando el interruptor "*Punto muerto*" vale un 1 lógico.

El sistema de bloques resultante se puede ver en la figura 55.

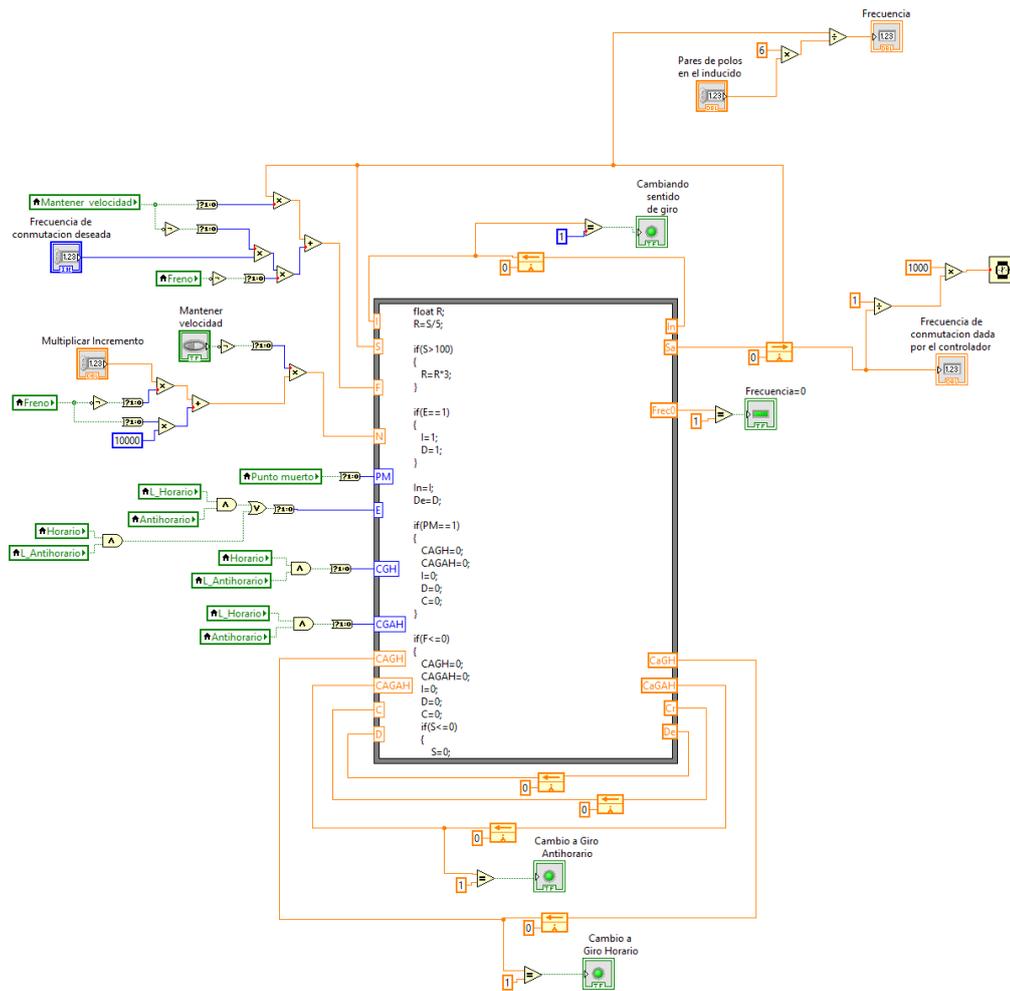


Figura 55: Sistema de bloques que discretiza la adquisición y generación de valores por parte del programa de control

También se han producido cambios en el código contenido en la estructura de la figura 55 con respecto a su versión anterior (ver figuras 48 a 52), el código resultante se encuentra impreso en la figura 56. Los cambios introducidos han sido los siguientes:

- Se ha añadido una variable interna tipo float llamada R nada más empezar el código. Su función será reducir el incremento en la frecuencia de conmutación dada por el controlador por ciclo de lectura según su valor se hace cada vez más grande. La forma de conseguir esto se encuentra entre las líneas 2 y 7 del código de la figura 56, como se puede ver en estas cuando la frecuencia de conmutación dada por el controlador supera los 100 Hz el valor obtenido de R se multiplica por 3 para hacer todavía mucho más pequeño el incremento en la frecuencia por ciclo de lectura.

El objetivo de esto es evitar que crezca demasiado rápido y de lugar a que la máquina síncrona pierda su sincronismo.

- De la línea 18 a 25 del código de la figura 56 se ha añadido una estructura de control condicional if la cual se activa cuando PM vale 1 y da lugar a la desactivación del protocolo de inversión de giro y todas las variables relacionadas con el mismo.
- Las partes del código que generan el incremento o decremento cuando la variable S vale más de 30 ahora se ve dividida por el valor de R ((0.022*N)/R).

```

float R;
R=S/5;

if(S>100)
{
  R=R*3;
}

if(E==1)
{
  l=1;
  D=1;
}

ln=l;
De=D;

if(PM==1)
{
  CAGH=0;
  CAGAH=0;
  l=0;
  D=0;
  C=0;
}

if(F<=0)
{
  CAGH=0;
  CAGAH=0;
  l=0;
  D=0;
  C=0;
  if(S<=0)
  {
    S=0;
  }
  if(S>0 &&& S<=10)
  {
    S=S-(0.1*N);
  }
  if(S>10 &&& S<=30)
  {
    S=S-(0.05*N);
  }
  if(S>30)
  {
    S=S-((0.025*N)/R);
  }
}

if(F>0 &&& l==1)
{
  if(D==1 &&& C==1)
  {
    CAGH=0;
    CAGAH=0;
    if(S>=F)
    {
      S=F;
      l=0;
      D=0;
      C=0;
    }
    if(S>30 &&& S<F)
    {
      S=S+((0.025*N)/R);
    }
    if(S>10 &&& S<=30 &&& S<F)
    {
      S=S+(0.05*N);
    }
    if(S<=10 &&& S<F)
    {
      S=S+(0.1*N);
    }
  }
  if(D==1 &&& C==0)
  {
    if(CGH==1)
    {
      CAGH=1;
    }
    if(CGAH==1)
    {
      CAGAH=1;
    }
    if(S<=0)
    {
      S=0;
      C=1;
    }
    if(S>0 &&& S<=10)
    {
      S=S-(0.1*N);
    }
    if(S>10 &&& S<=30)
    {
      S=S-(0.05*N);
    }
    if(S>30)
    {
      S=S-((0.025*N)/R);
    }
  }
}

ln=l;
De=D;

if(F>0 &&& l==0)
{
  if(F>S)
  {
    if(S>30 &&& S<F)
    {
      S=S+((0.025*N)/R);
    }
    if(S>10 &&& S<=30 &&& S<F)
    {
      S=S+(0.05*N);
    }
    if(S<=10 &&& S<F)
    {
      S=S+(0.1*N);
    }
  }
  if(F<=S)
  {
    S=F;
  }
  if(F<S)
  {
    if(S>0 &&& S<=10 &&& S>F)
    {
      S=S-(0.1*N);
    }
    if(S>10 &&& S<=30 &&& S>F)
    {
      S=S-(0.05*N);
    }
    if(S>30 &&& S>F)
    {
      S=S-((0.025*N)/R);
    }
  }
  if(F==S)
  {
    S=F;
  }
  if(S<=0)
  {
    S=0;
  }
}

if(S==0 &&& F==0)
{
  Frec0=1;
}
if(Sl=0)
{
  Frec0=0;
}

CaGH=CAGH;
CaGAH=CAGAH;
Cr=C;
Sa=S;

```

Figura 56: Código que controla la velocidad de conmutación

Nota: El código de la figura 56 está escrito en esa figura en cuatro columnas las cuales en el programa de control se leen de forma secuencial empezando por la de la izquierda, luego la situada a su inmediata derecha y así sucesivamente siendo la última la de la derecha.

- Se ha incluido una representación gráfica (mediante un indicador circular) y numérica (mediante un bloque indicador numérico) de la velocidad de giro del motor en r.p.m., para obtener este valor se toma el valor del bloque “Frecuencia” y se multiplica por 60. El sistema de bloques que desarrolla esta función se encuentra representado en la figura 57, en él el indicador gráfico está constituido por el bloque “Velocidad angular (r.p.m.)” y el numérico por el “r.p.m.”.

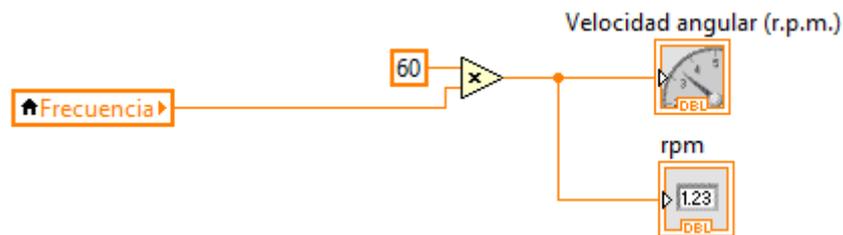


Figura 57: Sistema de bloques que conforma el indicador de velocidad

- Para concluir se ha creado un sistema de bloques que grafica en lógica positiva las seis señales de control a enviar al circuito integrado (ver figura 58). Para ello se han seguido los siguientes pasos:
 1. Se crean variables locales de las seis señales de control (Q1 a Q6), estas están en lógica negativa.
 2. Se comparan las señales de control con una constante 0 lógico por medio de una puerta NOR con el fin de pasarlas a lógica positiva.
 3. Se pasa la señal obtenida de booleana a un valor de 0 o 1 y dependiendo de esta se le suma un número entero con el fin de que no se superpongan. Por consiguiente se tendrá (en lógica positiva) los valores indicados en la tabla 15.

Nombre de la señal	Valor numérico en gráfica	
	Cuando vale 1 lógico	Cuando vale 0 lógico
Q1	11	10
Q2	9	8
Q3	7	6
Q4	5	4
Q5	3	2
Q6	1	0

Tabla 15: Valores en lógica positiva representados en la gráfica

4. Se introduce en una de las dos entradas de un bloque de construcción de array el valor obtenido y en la otra los anteriores. Los anteriores se consiguen reintroducir en el array usando un registro desplazamiento el cual manda la salida de este a una de sus entradas (debido a la forma en que está conectado).
5. La salida del array se pasa por un bloque selector cuya condición de selección es que el ciclo de lectura en que nos encontremos, valor dado por el recuadro con una i dentro en la figura 57, sea menor que el indicado a través del bloque “ N Muestras”. Si la condición no se cumple el array pasa sin cambios, mientras que si se cumple se elimina de este su valor más antiguo. Con esto se consigue que el array no crezca en tamaño de forma indefinida, lo cual sería malo pues acabaría colapsando ya que se llenaría la memoria y dejaría de funcionar.
6. Tras pasar por ese bloque selector la señal se divide en dos ramales, uno va al registro desplazamiento para volver a una de las entradas del array y el otro a un segundo bloque selector.
7. El segundo bloque selector, tiene como variable de selección el interruptor “Congelar”, el cual sirve para congelar en el tiempo la gráfica. Cuando la condición no se cumple, “Congelar” vale un 0 lógico, el valor que pasa es el mandado por el primer bloque de selección. Por otra parte, cuando se cumple, el valor que se manda es la salida del bloque selector en el momento de cumplirse la condición, para lo cual se usa un bucle de realimentación.
8. Tras obtener el valor del array a la salida del segundo bloque selector se manda a la tercera entrada (entrada inferior) de un

cluster de tres entradas, la superior corresponde al valor de x_0 y la del medio a Δx . Con el fin de que se vea mucho mejor se ha introducido como valor de Δx una constante de valor 1.

Nota: Como consecuencia, aunque la gráfica da de forma correcta el valor sucesivo de las señales de control la representación en el tiempo no se correlaciona con la que se está produciendo en la realidad. Sin embargo, como el objetivo es representar la sucesión de señales producidas este problema no tiene importancia.

9. Por último, se unen las seis señales de salida de los seis cluster usando un bloque de construcción de array y la salida de este se manda al bloque que representa la gráfica habiéndose seleccionado esta como una gráfica en forma de onda (Waveform Graph), esta se ha llamado “SEÑALES DE CONTROL (LÓGICA POSITIVA)”.

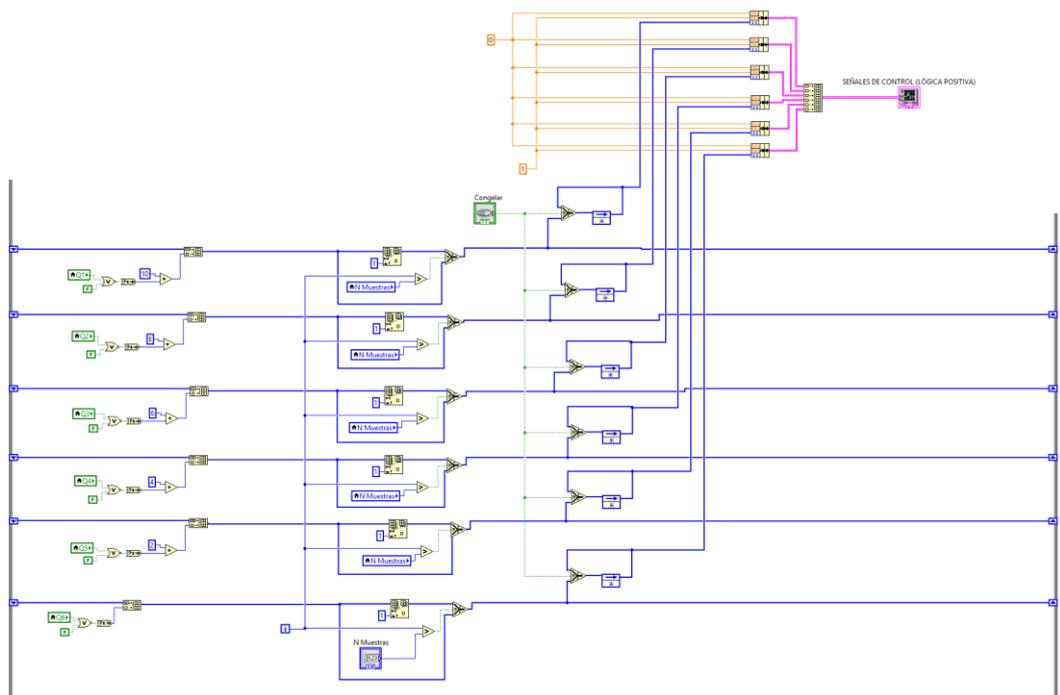


Figura 58: Sistema de bloques que genera la gráfica de señales de control en lógica positiva

3.5.2. Creación del circuito

Con el fin de mejorar la respuesta del circuito se han sustituido los tres condensadores utilizados hasta ahora ($4,7\mu\text{F}$ y 100V) por otros de $1\mu\text{F}$ y 400V . Con esto se consigue que ahora la tensión de alimentación pueda alcanzar

valores mucho más grandes que en los casos anteriores y al ser estos de menor capacidad se carguen y descarguen antes. Siguiendo con este pensamiento se cambia la Fuente 1, encargada de alimentar la parte del circuito de potencia del circuito integrado y por consiguiente el sistema de tracción, por otra que puede suministrar mucha más tensión, en este caso se usa una que puede suministrar hasta 315V y 3A de tensión continua (ver figura 59).

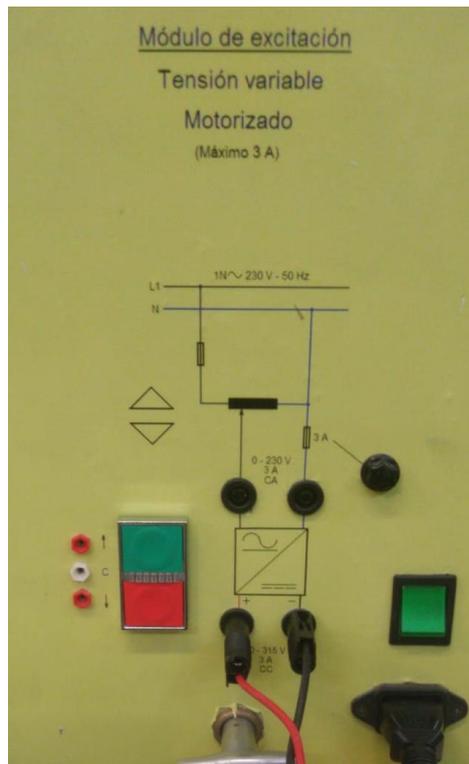


Figura 59: Fuente 1. Autotransformador, produce hasta 315V y 3A de corriente continua

Excepto por estos cambios el circuito a utilizar es el mismo que en el caso anterior. Es decir, el representado en el esquema de la figura 4 del anexo 6.

3.5.3. Prueba del circuito

Tras probar el circuito se observa que este no presenta errores en su software (programa de control), sin embargo no se consigue superar las 600 r.p.m. Una vez revisado el circuito se encuentra el problema en la máquina síncrona debido a su deteriorado estado. Tras sustituir esta por la representada en la figura 4 del anexo 4 se vuelve a probar el circuito consiguiendo ahora llegar a las 1000 r.p.m. momento en el cual se detiene la simulación aunque se podría haber continuado aumentando la velocidad de giro pues ahora no presentaba problemas para alcanzar dicha velocidad.

3.5.4. Desarrollo de la interfaz de usuario

Como el sistema ya no presenta problemas se procede al desarrollo de la interfaz de usuario la cual está constituida por la ventana Panel Frontal del programa de control definitivo (ver figura 60). La explicación de cada uno de los elementos que la componen se encuentra en el anexo 7 Manual de usuario.

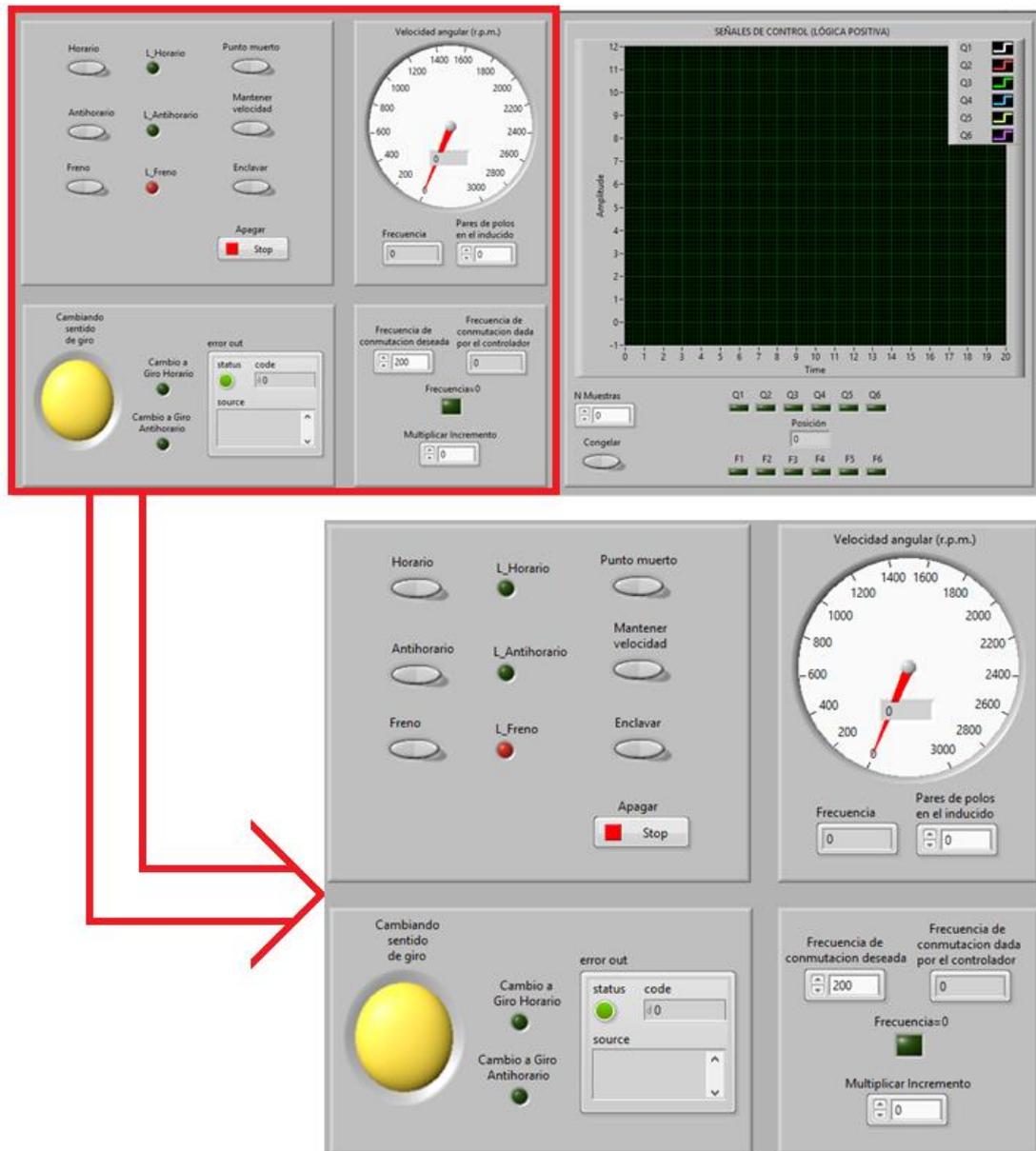


Figura 60: Interfaz de usuario del programa de control definitivo

Tal y como se puede ver en esta figura, la interfaz al completo estaría constituida por la imagen superior de la figura 66, mientras que la imagen inferior sería una ampliación de la misma la cual estaría constituida por los

bloques conforman la parte de la interfaz dedicada al control del sistema propiamente dicho. El bloque restante simplemente muestra el valor de las señales de control en lógica positiva y negativa y la posición en que se encontraría el motor si este tuviese solo un par de polos en el inducido.

Nota: La correspondencia con su respectiva señal de control de las seis señales indicadas en la gráfica se puede ver en la tabla 11.

3.6. Resultados experimentales

Con el programa de control funcionando correctamente es hora de obtener los datos experimentales, para ello es necesario añadir una serie de voltímetros y amperímetros a lo largo del circuito con el fin de que nos muestren los valores que se desean estudiar.

En este apartado se procederá a comprobar que los resultados teóricos obtenidos anteriormente se ajustan a la realidad.

3.6.1. Construcción del circuito

Para construir los circuitos físicos que nos darán los valores experimentales que estamos buscando lo primero que se hace es sustituir los contactos NC usados hasta ahora (ver figura 42) por un interruptor trifásico con protección mediante fusibles (ver figura 61) el cual permitirá cortar la corriente de forma rápida y segura en caso de que surja algún problema. El esquema del circuito resultante se puede ver en la figura 5 del anexo 6 y constituirá la base desde la cual se construirán los circuitos para obtener los valores experimentales.

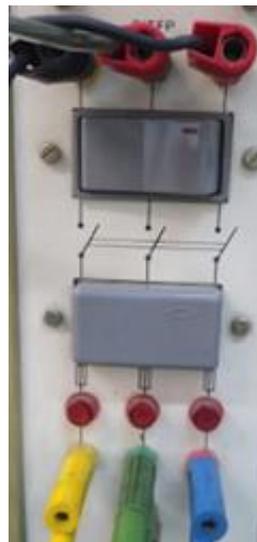


Figura 61: Interruptor trifásico con protección mediante fusibles

Una vez hecho esto se procede a colocar a la salida del interruptor una terna de resistencias de 500Ω conectadas en estrella y el panel de obtención de medidas que nos permitirá visualizar posteriormente los datos obtenidos desde el programa Leer Datos Laboratorio desarrollado por el profesor Moisés Luis San Martín Ojeda de la EII de la UVA, este programa se puede descargar en la siguiente página (enlace consultado el día 25 de mayo de 2019):

<https://www.aulamoisan.com/software-moisan/lectura-datos-laboratorio>

Esto permitirá el estudio de la respuesta del sistema de control sin la influencia de las inductancias.

El panel de adquisición de datos se puede ver en la figura 3 del anexo 3 y los transductores empleados para medir los valores de tensión y corriente deseados se encuentran en la figura 4 del mismo anexo. Estos últimos actúan como voltímetros y amperímetros que mandan a través de cable coaxial cada una de los valores obtenidos a los distintos puertos del panel de adquisición de datos situados en la esquina superior derecha de dicho panel. La numeración de los mismos es la indicada en la figura 62.

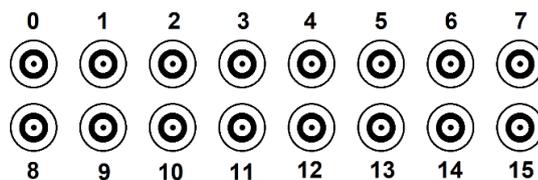


Figura 62: Puertos de medidas del panel de adquisición de datos

Los puertos utilizados junto a la información que transporta cada uno se pueden ver en la tabla 16 mientras que el esquema del circuito resultante se encuentra representado en la figura 6 del anexo 6.

Número del puerto	Valor que transporta
0	Tensión de la fase U (V1)
1	Corriente de la fase U (A1)
2	Tensión de la fase V (V2)
4	Tensión compuesta UV (V12)

Tabla 16: Puertos del panel de adquisición de medidas utilizados

Nota: El esquema del circuito resultante se puede ver en la figura 6 del anexo 6.

Tras obtener los datos deseados usando este circuito se procederá al estudio del sistema motor siendo este conformado por una máquina síncrona actuando como motor paso a paso, una máquina de corriente continua actuando como generador de corriente continua y un tacómetro. Para este caso se usan dos sistemas motor:

- **Sistema motor 1.** Constituido por una máquina síncrona actuando como motor paso a paso (figura 2 anexo 4), una máquina de corriente continua actuando como generador (figura 3 anexo 4) y un tacómetro (figura 5 anexo 3). El sistema resultante se puede ver en la figura 6 del anexo 4.
- **Sistema motor 2.** Constituido por una máquina síncrona actuando como motor paso a paso (figura 4 anexo 4), una máquina de corriente continua actuando como generador (figura 5 anexo 4) y un tacómetro (figura 6 anexo 3). El sistema resultante se puede ver en la figura 7 del anexo 4.

En este caso se ha de añadir un circuito para producir la tensión de excitación de la máquina de corriente continua. Para ello se toma la tensión alterna de la red y se hace pasar por un regulador de tensión trifásico (ver figura 63) el cual nos permitirá ajustar su valor. Posteriormente, tras pasar por un interruptor trifásico como el de la figura 61 se hará circular a la corriente por un rectificador (figura 64) para convertirla a continua y de ahí al circuito de excitación de la máquina continua. Por otra parte la carga a la que estará conectada dicha máquina estará conformada por las lámparas de la figura 65.

Nota: La configuración elegida para la máquina de corriente continua ha sido shunt.

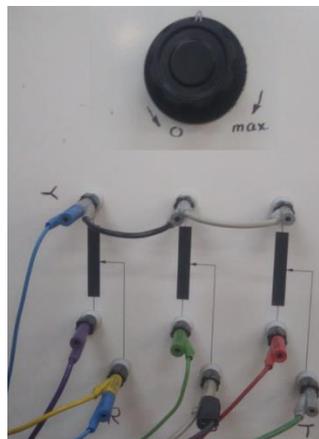


Figura 63: Regulador de tensión trifásico

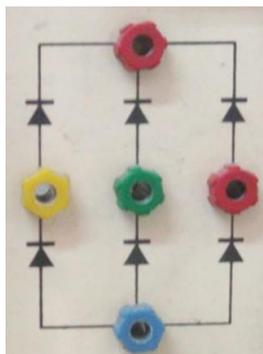


Figura 64: Rectificador



Figura 65: Lámparas

Con el fin de evitar superar los valores de tensión máximos que puede aguantar esta máquina a mayores de las medidas enviadas al panel de adquisición de datos se le coloca un amperímetro y un voltímetro (ver figura 7 anexo 3) para saber en todo momento los valores de tensión y corriente que circulan por ella en cada momento.

El circuito resultante se encuentra representado en la figura 7 del anexo 6, mientras que el sistema motor junto a las medidas a tomar se corresponden con la imagen de la figura 8 del mismo anexo.

Por otra parte en la tabla 17 se pueden ver los puertos del panel de adquisición de datos utilizados para este circuito así como el valor que transporta cada uno.

Número del puerto	Valor que transporta
0	Tensión de la fase U de la MS* (V1)
1	Corriente de la fase U de la MS* (A1)
2	Tensión de la fase V de la MS* (V2)
3	Corriente en el motor de la MCC** (A2)

Número del puerto	Valor que transporta
4	Tensión compuesta UV de la MS* (V12)
5	Corriente de excitación de la MS* (A3)
6	Tensión por la MCC** (V3)
7	Corriente de excitación de la MCC* (A4)
8	Tacómetro***
10	Tensión de alimentación de la MS* (V5)
12	Tensión de alimentación de la MCC** (V6)

Tabla 17: Puertos del panel de adquisición de datos utilizados

Nota *: MS = Máquina síncrona.

Nota **: MCC = Máquina de corriente continua.

Nota *:** Este valor aunque se puede sacar con el panel de medidas se extrae directamente mediante un indicador visual (ver figura 8 anexo 3).

Para concluir, usando el circuito creado para obtener las medidas de los sistemas motores, se procede a cortocircuitar el circuito de excitación de la máquina síncrona dando lugar a que la configuración de esta adquiera una constitución parecida a la de una máquina asíncrona de jaula de ardilla. Posteriormente se hace funcionar el sistema motor con la “máquina asíncrona” trabajando como motor paso a paso y se estudian los valores obtenidos.

3.6.2. Programas de grabado y lectura de datos

Una vez se tiene el circuito a utilizar para la adquisición de datos así como los transductores y panel de adquisición de datos para la obtención de los mismos hay que mirar la forma de leerlos y como almacenarlos.

Con el fin de leerlos el panel de adquisición de datos los recoge y tras pasar por sus correspondientes puertos los manda por medio de un cable Ethernet a un ordenador desde el cual usando el programa hecho en LabVIEW al cual se ha llamado Paso a Paso CRI02 (ver figura 66) se graban y guardan en la nube.

Nota: Este programa es una adaptación del programa general de interpretación de datos Medidas UI que ha sido creado, al igual que el posterior programa usado para leer los datos grabados, por el profesor Moisés Luis San Martín Ojeda.

En este caso antes de proceder a grabar los datos que nos manda el panel de adquisición de datos se han de seguir los siguientes pasos:

1. Seleccionar la carpeta en la que guardar los datos en la nube, en este caso se escoge GestionDeEnsayosElectricos. En la figura 66 se ve esta ya seleccionada.
2. Se escoge el nombre bajo el que se va a guardar el fichero. En dicha figura este ha sido “Generador síncrono 100V excitación”.
3. En el recuadro “Descripción” se introduce, de ser requerida, una pequeña explicación de los datos que se van a grabar.
4. Se acciona el pulsador “Grabar” y el programa graba desde ese momento los datos que mande el panel de adquisición de datos durante los siguientes 0.8 segundos.

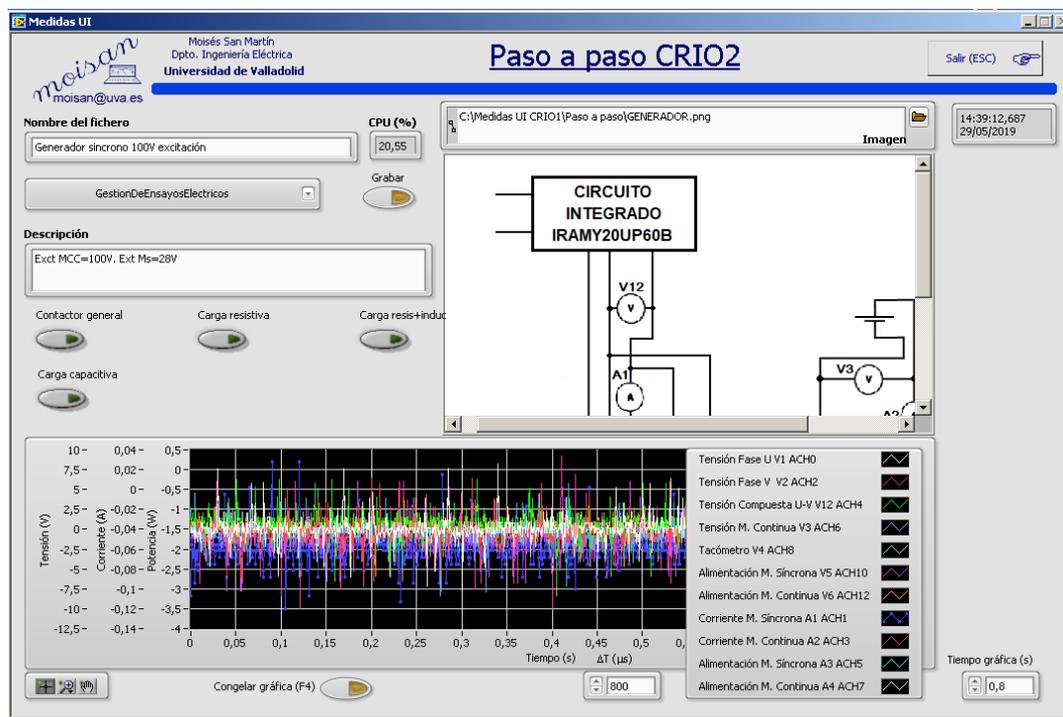


Figura 66: Programa de grabado de datos Paso a Paso CRI02

La imagen con la que se graba el mismo se puede cambiar al gusto de cada uno, en este caso, ya que se ha grabado haciendo funcionar la máquina síncrona como generador, corresponde con la figura 9 del anexo 6. Cuando esta funciona como motor paso a paso y queremos grabar datos la imagen seleccionada para ser mostrada será la de la figura 8 del anexo 6.

Nota: Tras haber terminado de trabajar con este programa se ha de presionar el botón de la esquina superior derecha de la figura 66 (“Salir (ESC)”) con el fin de salir del programa.

Una vez que se tienen los datos grabados en un fichero y subidos a la nube es hora de trabajar con ellos, para poder hacer esto se usa el programa Leer Datos Laboratorio previamente indicado en el subapartado 3.6.1. La interfaz de usuario de este programa se encuentra representada en la figura 67.

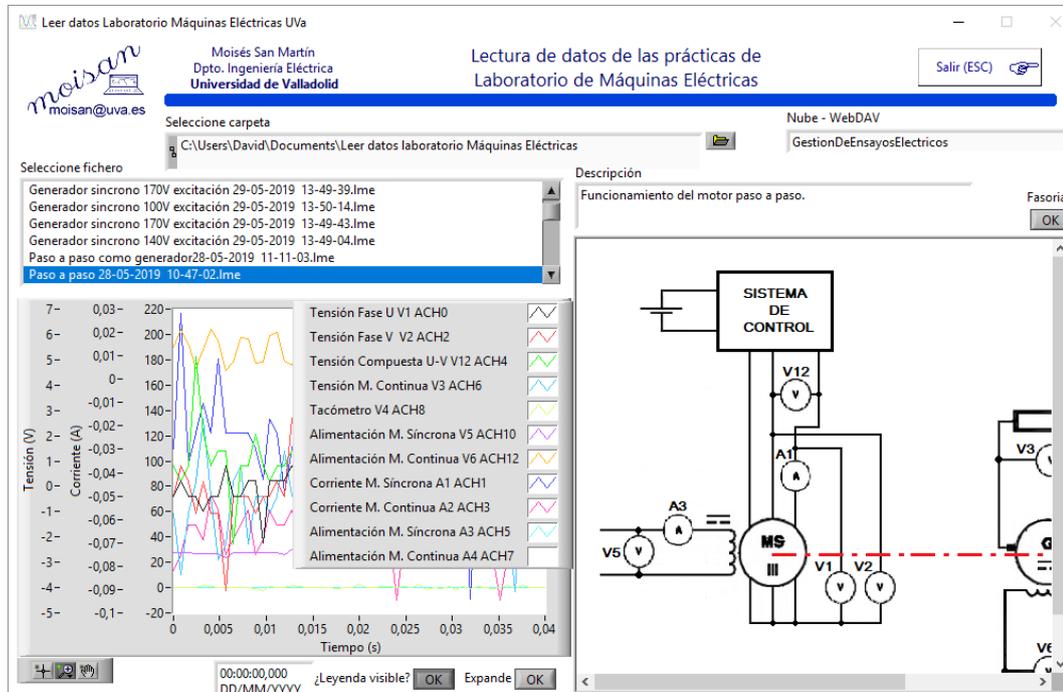


Figura 67: Programa de lectura de datos

Para obtener las gráficas representadas en esta figura hay que seguir los siguientes pasos:

1. Abrir el programa de Lectura de Datos Laboratorio e introducir la carpeta de la nube en la que se han guardado los datos grabados, en este caso tal y como se ve en los recuadros “Seleccione carpeta” y “Nube - WebDAV” esta ha sido GestiondeEnsayosElectricos.
2. Seleccionar el fichero a leer entre los posibles en la ventana “Seleccione fichero”.
3. Trabaje con las gráficas que le muestra. Este programa, entre otras cosas, permite hacer desaparecer la leyenda, expandir la gráfica, jugar con el grosor y forma de las ondas representadas en la misma, hacer invisibles una, varias, o todas las gráficas representadas, ...
4. Tras haber acabado para salir del programa se ha de accionar el pulsador “Salir (ESC)”.

Nota: En este caso los valores grabados corresponden a una situación en la que la máquina síncrona actúa como motor paso a paso, por consiguiente la imagen contenida en la figura 67 corresponde a la figura 8 del anexo 6.

3.6.3. Análisis de los resultados obtenidos

Una vez realizadas las diversas pruebas sobre los circuitos a estudiar se procede al análisis de los valores obtenidos teniendo en cuenta para ello lo indicado en la referencia bibliográfica [10] con respecto a la forma que describe la corriente según la velocidad de giro del motor (ver figura 68).

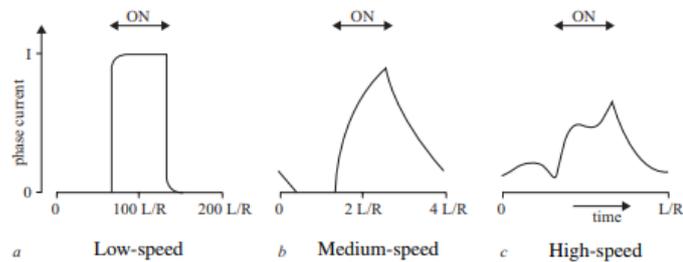


Figura 68: Forma de onda típica de la corriente a distintas velocidades de giro ([10] página 60)

Considerando este dato lo primero que se hace es comprobar en la gráfica “SEÑALES DE CONTROL (LÓGICA POSITIVA)” de la interfaz de usuario que las señales de control producidas por la unidad myRIO son las deseadas.

Como se puede ver en la figura 69 el programa de control produce dichas señales de forma correcta sin importar la situación. Sin embargo, debido a la forma en que se ha creado la gráfica su ancho es independiente de la frecuencia a la que esté funcionando el programa, esta lo que hace es cambiar la velocidad a la que evolucionan las diversas señales (mirar desde tiempo 1 en adelante).

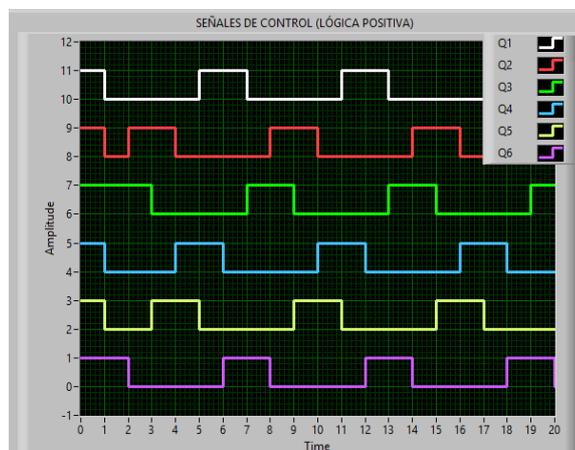


Figura 69: Señales de control en lógica positiva

Nota: En el caso representado en la figura 69 la señal representada entre el tiempo 1 y 2 corresponde a una posición 2 de la figura 18, el siguiente intervalo a una posición 3 y así sucesivamente.

3.6.3.1. Resultados obtenidos con el circuito de resistencias de 500Ω

El primer caso a estudiar usando este circuito es con una frecuencia de conmutación de 10 Hz, los resultados obtenidos se encuentran representados en la figura 70.

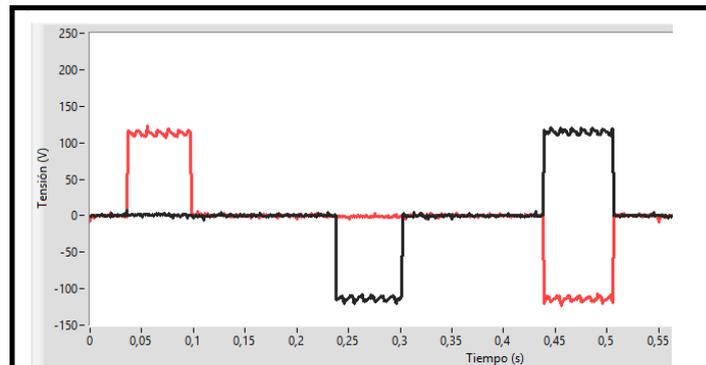


Figura 70.1.: Tensión en las fases U y V

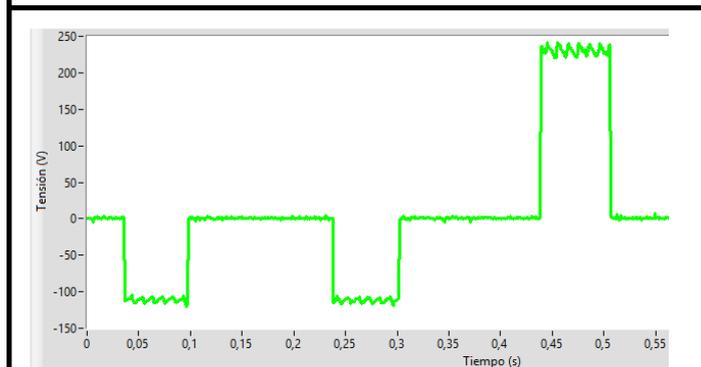


Figura 70.2.: Tensión compuesta UV

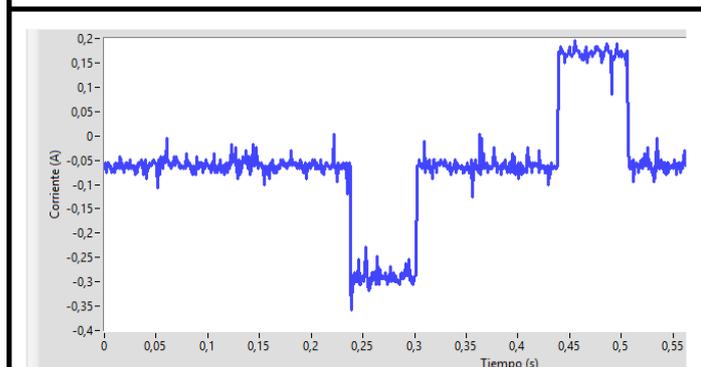


Figura 70.3.: Corriente en la fase U

Figura 70: Resultados obtenidos de simular a una frecuencia de conmutación de 10Hz

Como se puede ver los resultados obtenidos son completamente erróneos, aunque la forma de la onda de corriente (figura 70.3) es la correcta para esta velocidad de giro (ver figura 68) las gráficas de las tensiones son absolutamente erróneas. Esto es especialmente visible en la figura 70.1 donde se encuentran representadas las tensiones de las fases U y V las cuales se encuentran superpuestas con signo opuesto en vez de desfasadas 120° como deberían de estar.

La gráfica de la tensión compuesta entre las fases U y V, representada en la figura 70.2, también es errónea pues su valor no es la resta de la fase U menos la V.

Por consiguiente se llega a la conclusión de que el sistema de control no funciona correctamente. Tras estudiar la posible fuente del problema se encuentra la misma en el circuito integrado IRAMY20UP60B, el mal funcionamiento de este a tan bajas frecuencias se debe a la elevada franja en la que puede trabajar (hasta 20000 Hz) dando lugar a su mal comportamiento a estas ínfimas frecuencias de conmutación.

El segundo caso corresponde al de simular dicho circuito con una frecuencia de conmutación de 70Hz y una tensión de alimentación de unos 220V. Las gráficas obtenidas de dicha simulación se pueden ver en la figura 71 donde tenemos que la respuesta del sistema se ha corregido funcionando ahora de forma correcta.

Como se puede ver por las tres gráficas contenidas dentro de la figura 71 esta ahora tiene una forma equivalente a su estado homólogo teórico representado en la figura 24. Además si nos fijamos en la figura 68 y la gráfica de la figura 71.3 se ve por la forma que describe la onda que representa la corriente que el circuito se encuentra funcionando a bajas velocidades.

Por otra parte en la figura 71.1 se ve como las tensiones de las dos fases representadas ahora sí que se encuentran desfasadas 120° , su forma es la esperada pues es igual a la obtenida en su homólogo teórico y su valor es el de la tensión de alimentación entre raíz de tres.

La gráfica de la tensión compuesta (figura 71.2) también coincide en forma y valor con lo esperado a través de los ensayos teóricos representados previamente en la figura 24.

Como se ha podido comprobar las gráficas obtenidas son idénticas a sus homólogas del subapartado 3.1.3 exceptuando por pequeñas variaciones producidas a lo largo de las mismas por la propia naturaleza de los componentes por los que pasa la corriente y tensión a lo largo del circuito.

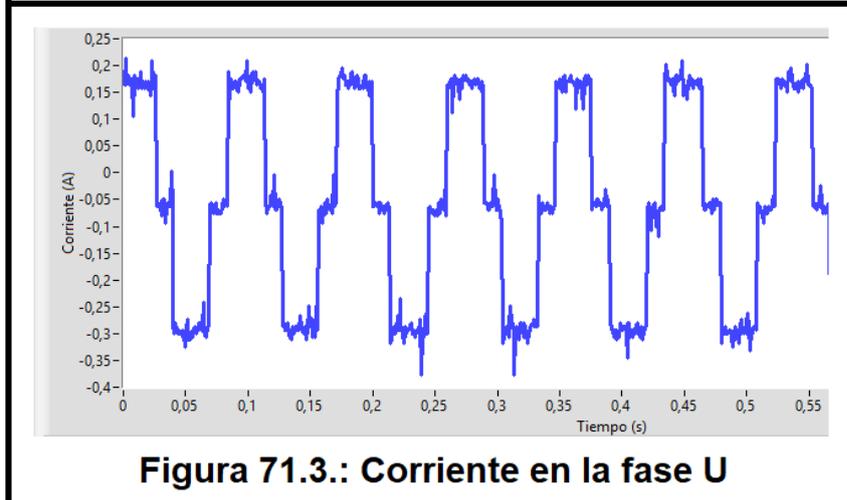
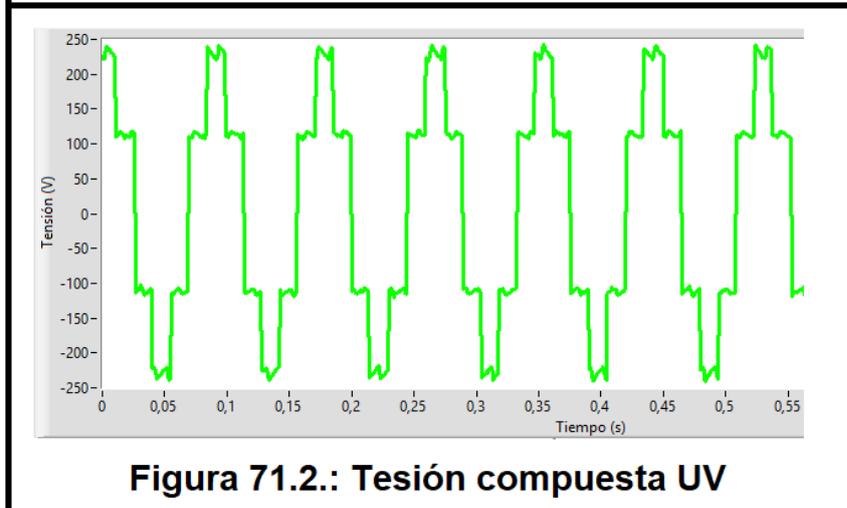
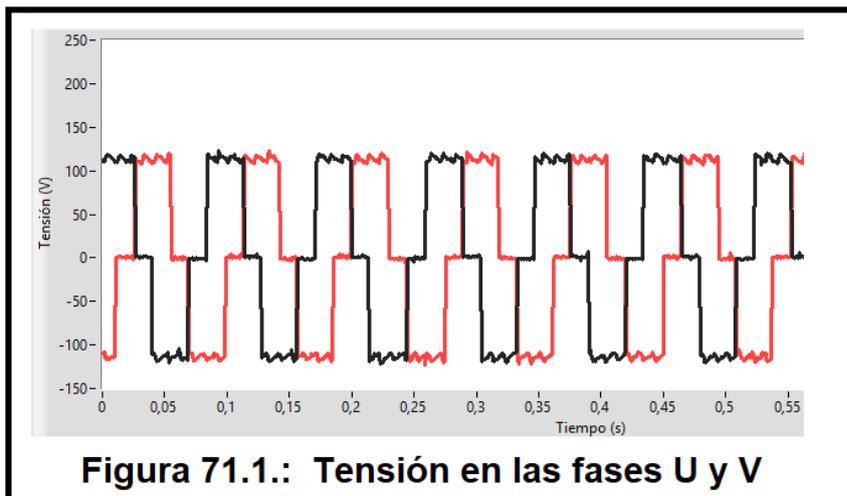


Figura 71: Resultados obtenidos de simular a una frecuencia de conmutación de 70Hz

La tercera prueba se lleva a cabo con una tensión de alimentación de unos 220V y una frecuencia de conmutación de 120Hz. Los resultados obtenidos se encuentran representados en las gráficas de la figura 72.

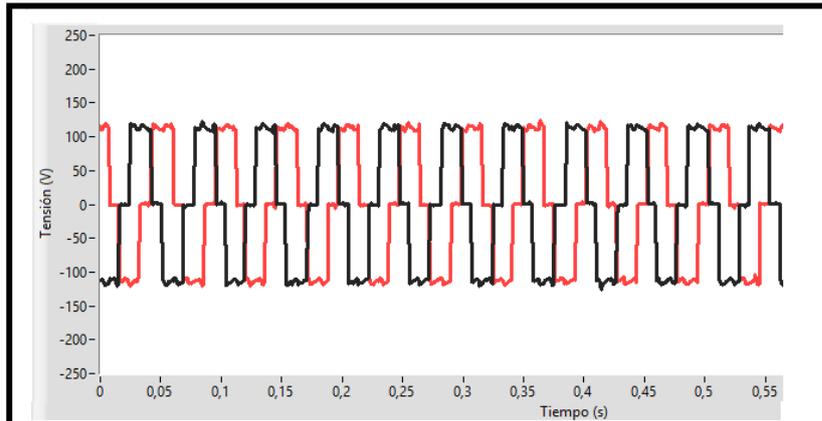


Figura 72.1.: Tensión en las fases U y V

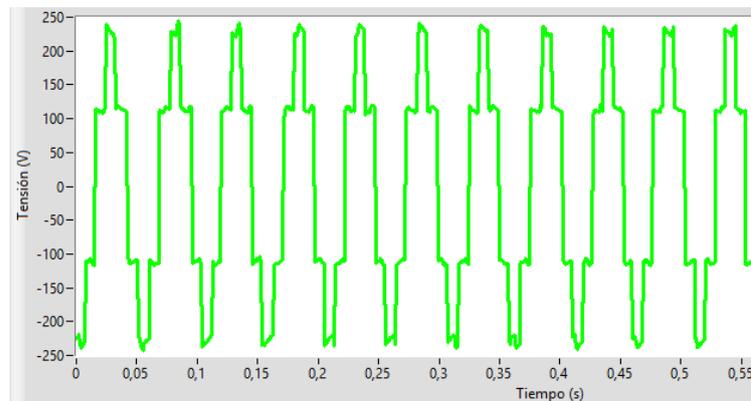


Figura 72.2.: Tensión compuesta UV

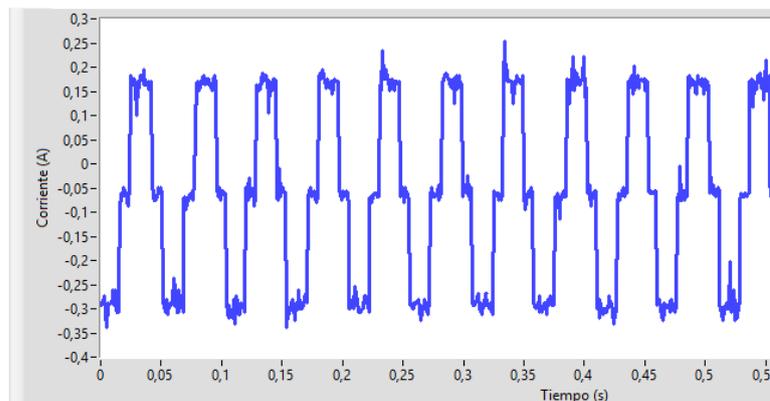


Figura 72.3.: Corriente en la fase U

Figura 72: Resultados obtenidos de simular a una frecuencia de conmutación de 120Hz

Como se puede ver los resultados obtenidos de esta prueba son los mismos que en el caso anterior exceptuando por el hecho de que las gráficas de este evolucionan más rápido pues la frecuencia de conmutación es mayor que en el caso anterior.

La última prueba usando este circuito se lleva a cabo manteniendo el valor de la tensión de alimentación de los dos casos anteriores y una frecuencia de conmutación de 200Hz. Los resultados obtenidos se pueden ver en la figura 73.

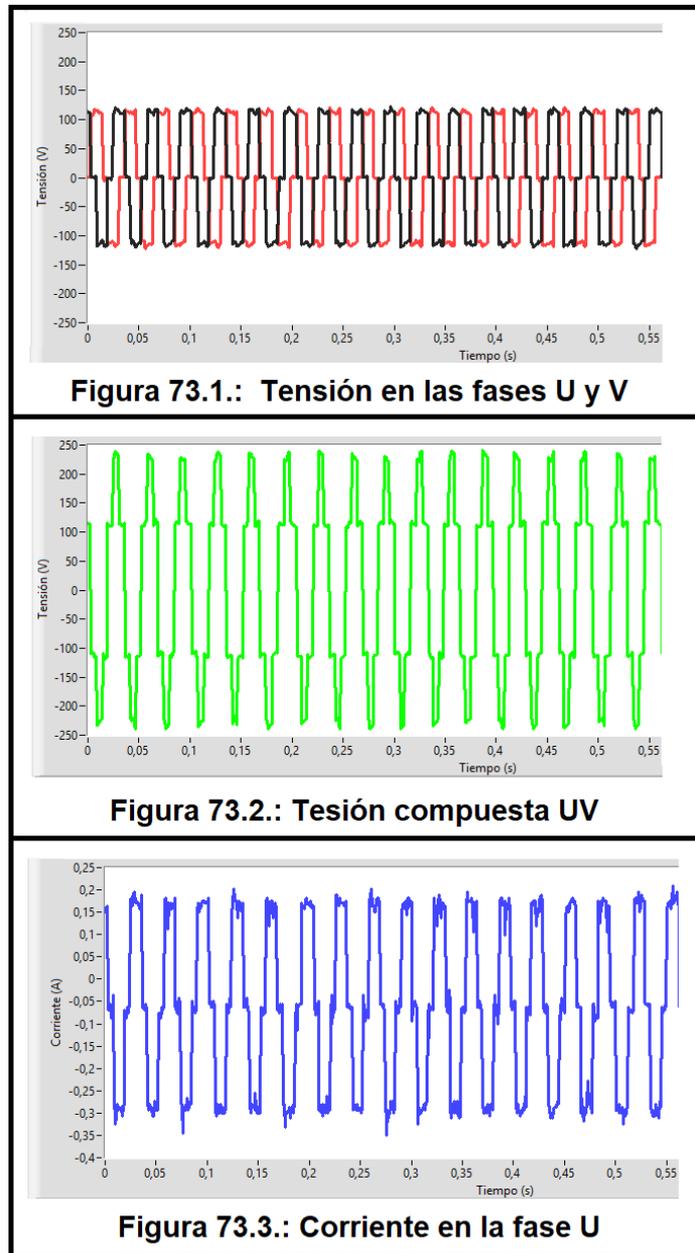


Figura 73: Resultados obtenidos de simular a una frecuencia de conmutación de 200Hz

Los resultados obtenidos muestran que las gráficas mantienen la forma que tenían en los dos casos anteriores diferenciándose únicamente de estas en el

hecho de que evolucionan más rápido pues su frecuencia de conmutación es mayor que en los casos anteriores.

3.6.3.2. Resultados obtenidos con el circuito del sistema motor 1

Fijándonos en los valores obtenidos en el subapartado 3.6.3.1, en los valores teóricos obtenidos en el subapartado 3.1.3 y en la forma de la onda de corriente para diversas velocidades de giro de la figura 68 se procede a estudiar el circuito de la figura 7 del anexo 6 usando el sistema motor 1.

La primera prueba se lleva a cabo usando una tensión de alimentación de 220V y una tensión de excitación de la máquina síncrona de 28V, una tensión de excitación de la máquina de corriente continua de 140V y una frecuencia de conmutación de 20 Hz lo que equivale a 100 rpm ya que la máquina síncrona utilizada tiene dos pares de polos en el inducido. Los resultados obtenidos se pueden ver en las figuras 74 y 75.

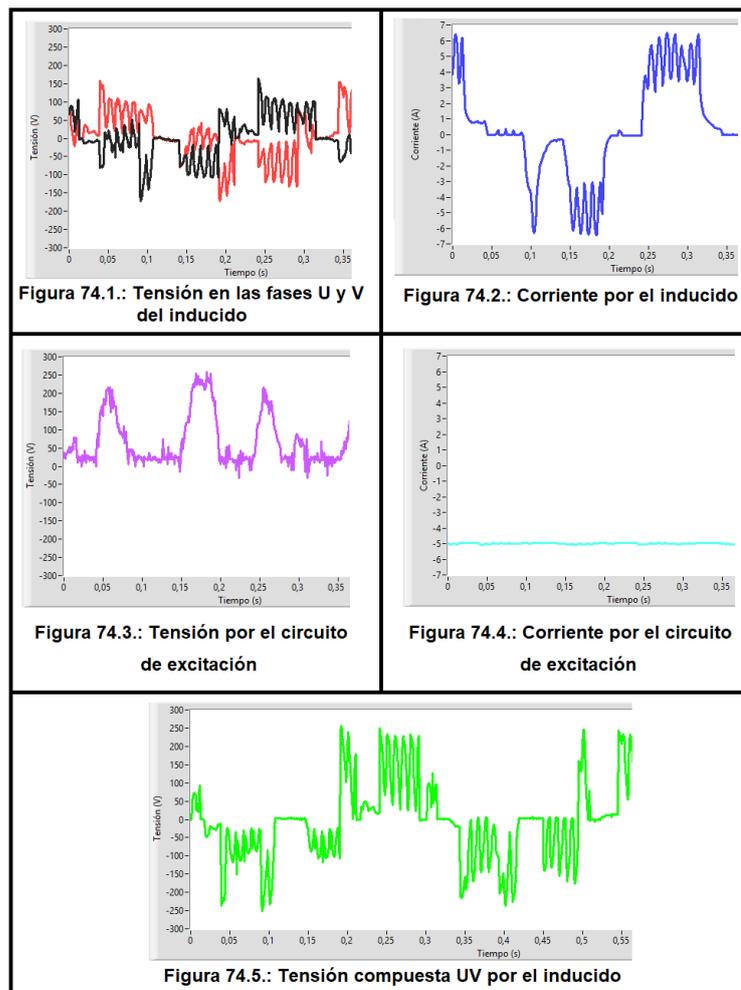


Figura 74: Resultados de la máquina síncrona actuando como motor paso a paso girando a 100 rpm

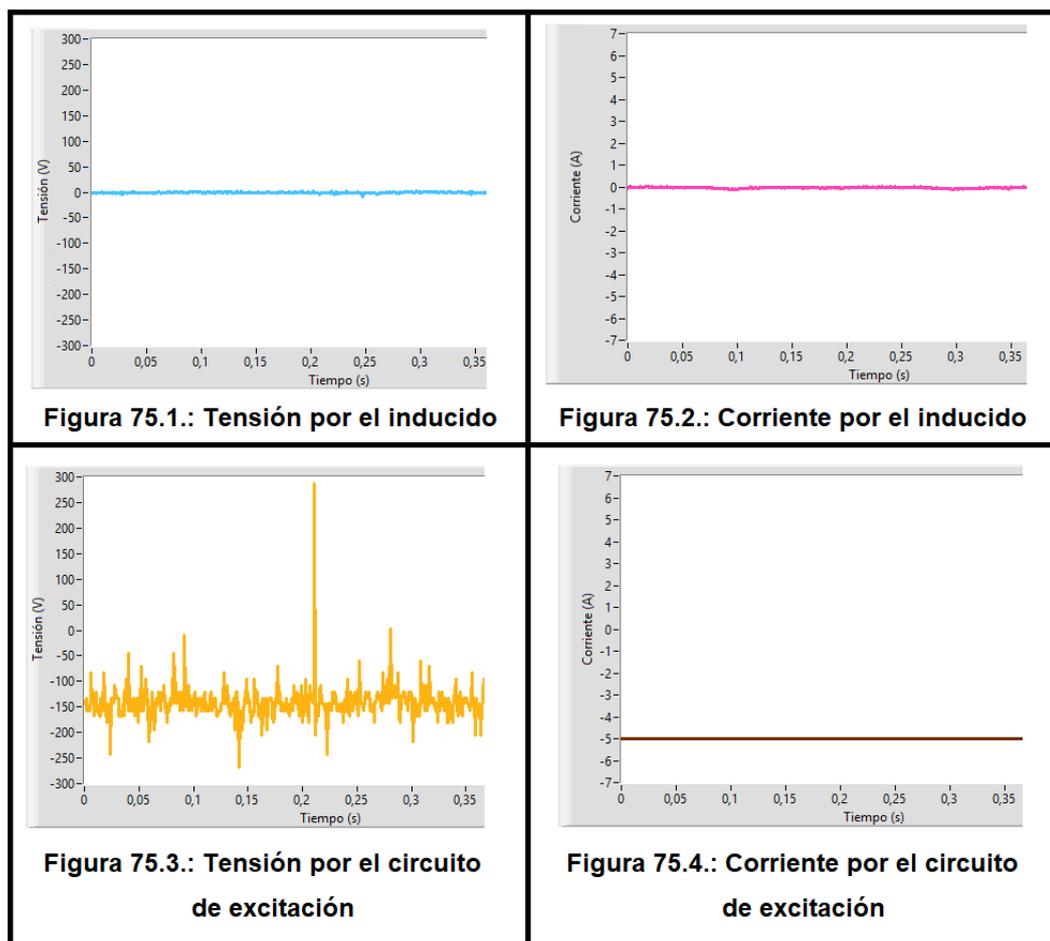


Figura 75: Resultados de la máquina de corriente continua actuando como generador de corriente continua girando a 100 rpm

Como se ve, al igual que con el circuito de resistencias (subapartado 3.6.3.1), por las gráficas contenidas en la figura 74 el sistema funciona mal a frecuencias de conmutación tan bajas. Esto se aprecia claramente no solo por la superposición en el espacio, aunque con signo opuesto, de las tensiones de fase representadas en la figura 74.1 sino también por la gran diferencia en la forma de estas en comparación con sus homólogas teóricas de la figura 26. Además, en la figura 74.4 se observa un posible problema en la tensión del circuito de excitación cuando el sistema motor funciona a tan bajas velocidades en forma de los picos de tensión que se pueden ver en la misma.

Por otra parte si nos fijamos en la onda que describe la corriente en la figura 74.2 aunque errónea tiene una forma similar a la indicada en la figura 68 para bajas velocidades de giro lo cual nos indica que si incrementamos ligeramente la velocidad de giro el sistema empezará a funcionar correctamente.

Cabe resaltar que la velocidad de giro es tan baja que la tensión y corriente generadas por la máquina de corriente continua, representadas en las figuras 75.1 y 75.2, valen prácticamente 0.

La siguiente prueba se lleva a cabo manteniendo los valores de la anterior pero incrementando la frecuencia de conmutación a 70Hz lo cual dará lugar a que el motor gire a una velocidad de 350 rpm. Los resultados obtenidos se pueden ver en las figuras 76 y 77.

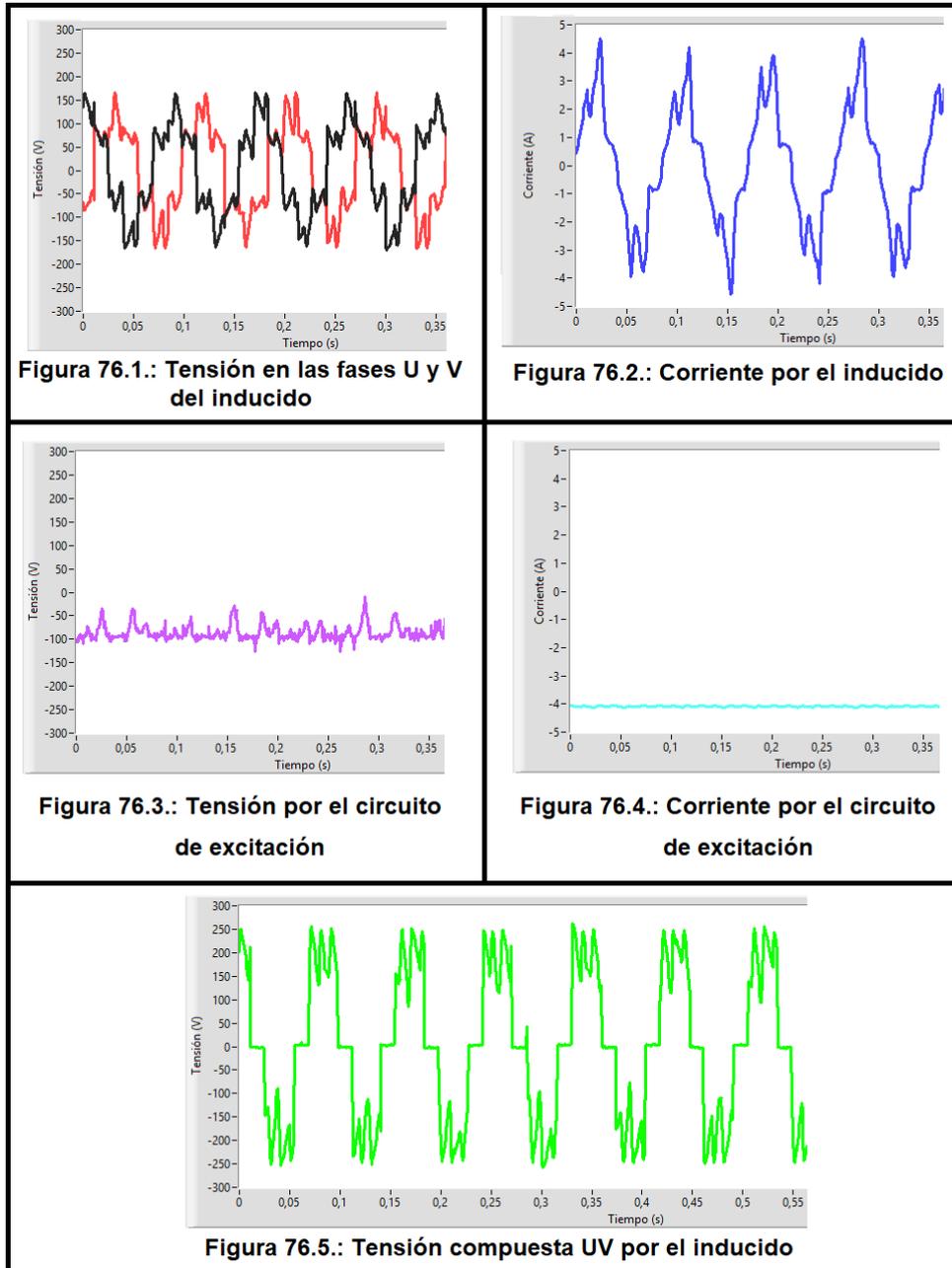


Figura 76: Resultados de la máquina síncrona actuando como motor paso a paso girando a 350 rpm

Tras estudiar las gráficas contenidas en esta figurase determina que ahora el sistema de tracción funciona correctamente.

Las tensiones de fase de la figura 76.1 se encuentran desfasadas 120° , su forma se asemeja a la obtenida teóricamente (ver figura 28.1) y tiene un valor que ronda los 120V. Al igual que con la tensión de fase la tensión compuesta de la figura 76.5 también tiene una forma semejante a su equivalente teórico de la figura 28.2.

Por otra parte es interesante resaltar la forma de onda de la corriente (figura 76.2) pues ahora según la figura 68 el motor estaría funcionando a una velocidad baja-media a diferencia del caso homólogo del circuito de resistencias del apartado 3.6.3.1 viéndose de esta forma la tremenda influencia que tienen las inductancias de la máquina síncrona en la respuesta del sistema.

A mayores se tiene que los picos de tensión, con respecto a su valor medio, en el circuito de excitación de la máquina síncrona (ver figura 76.3) han reducido su valor con respecto a la prueba anterior aunque el valor general de la misma ha aumentado, también se puede ver como la corriente por el dicho circuito (figura 76.4) ha visto reducido su valor con respecto a la anterior prueba.

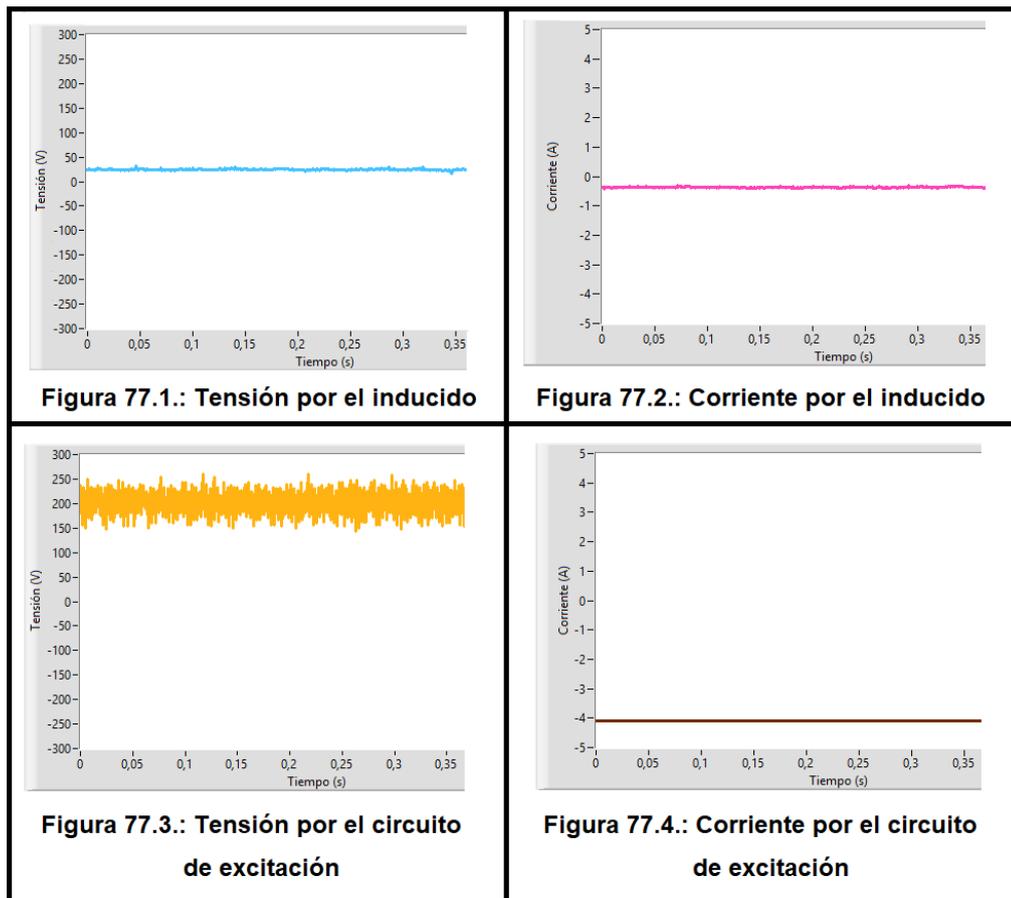


Figura 77: Resultados de la máquina de corriente continua actuando como generador de corriente continua girando a 350 rpm

Para concluir esta prueba en la figura 77.3 se ve que la tensión del circuito de excitación del motor de corriente continua ahora ronda los 190V con una corriente (ver gráfica 77.4) de valor constante de 4A. También se puede ver en la gráfica 77.1 que ahora estamos produciendo una tensión continua que ronda los 25V y una corriente (figura 77.2) de unos 0.5A.

La tercera y última prueba llevada a cabo usando este circuito debido al deteriorado estado del sistema motor 1 se realiza a una frecuencia de conmutación de 100Hz o lo que es lo mismo 500rpm, el resto de valores no se cambian respecto a la anterior prueba. Los resultados obtenidos de la misma se encuentran en las figuras 78 y 79.

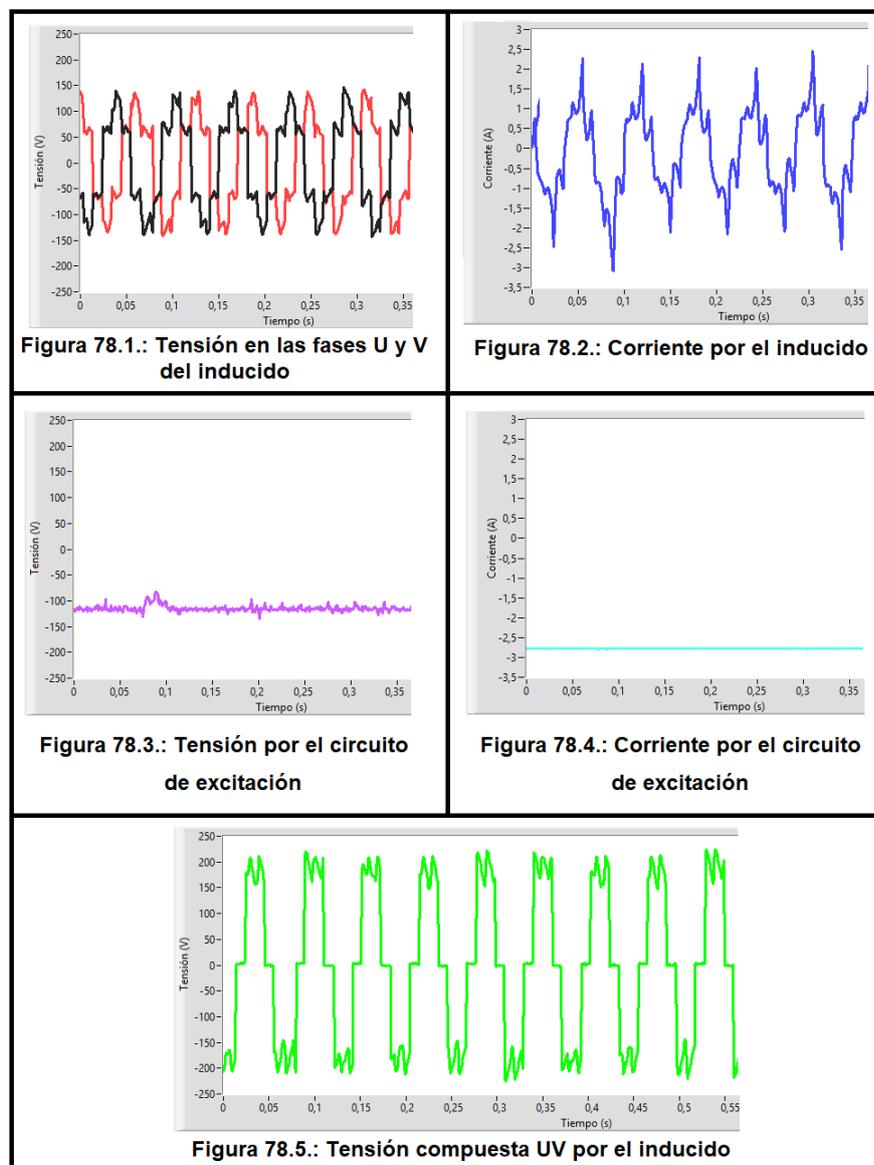


Figura 78: Resultados de la máquina síncrona actuando como motor paso a paso girando a 500 rpm

En las gráficas de esta figura se ha de resaltar que con respecto a los valores obtenidos de la prueba anterior el valor de la tensión media por el circuito de excitación (figura 78.3) a aumentando mientras que el valor de los picos de tensión en la misma respecto a su valor medio han decrecido todavía más.

También se tiene que valor de las corrientes (figuras 78.2 y 78.4) ha disminuido respecto al caso anterior a la vez que la forma de la onda de la corriente por el inducido de la figura 78.2 se aproxima más a la de velocidades medias de giro indicada en la figura 68.

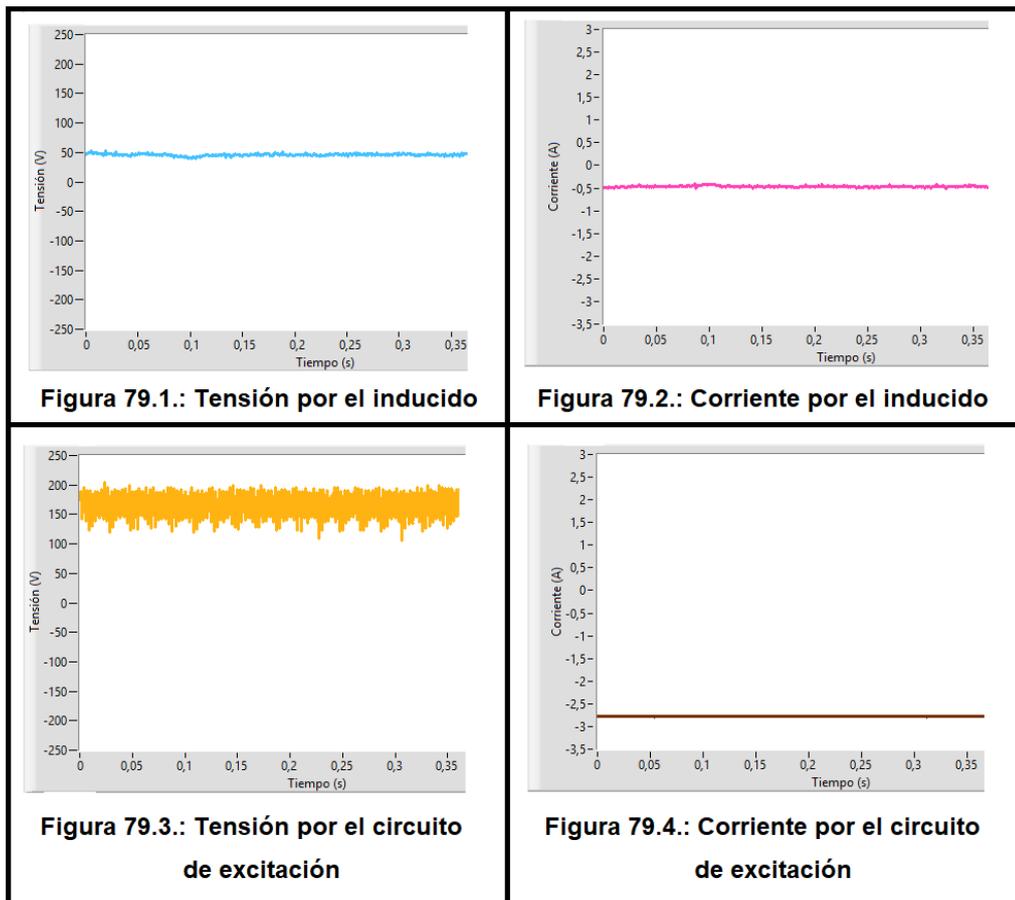


Figura 79: Resultados de la máquina de corriente continua actuando como generador de corriente continua girando a 500 rpm

En la figura 79 se encuentran representados los valores de las tensiones y corrientes obtenidos en el motor de corriente continua obtenidos en esta prueba. La única diferencia a resaltar es que ahora la tensión producida ha aumentado a 50V (figura 79.1) mientras que los valores de tensión y corriente por el circuito de excitación de dicho motor (figuras 79.3 y 79.4) han visto sus valores reducidos a 160V y 3A respectivamente.

3.6.3.3. Resultados obtenidos con el circuito del sistema motor 2

Tras probar el sistema motor 2 usando para ello el circuito de la figura 7 del anexo 6 se ha comprobado que las gráficas que este genera son homólogas a las producidas por el sistema motor 1 en el anterior subapartado. Por consiguiente se va a estudiar este a las velocidades de giro de 750 y 1000rpm que el anterior sistema motor era incapaz de alcanzar.

Usando los valores de tensión de las anteriores pruebas con el sistema motor 1 se procede a incrementar la frecuencia de conmutación a 150Hz lo cual nos da una velocidad de giro de 750rpm ya que la máquina síncrona del sistema motor 2, al igual que el 1, tiene dos pares de polos en el inducido.

Las gráficas generadas tras haber realizado esta prueba se pueden ver en las figuras 80 y 81.

Como puntos a resaltar con respecto a los valores obtenidos en la anterior prueba se encuentra el hecho de que:

- La tensión por el circuito de excitación de la máquina síncrona ha reducido su valor a unos 50V, esta se encuentra representada en la gráfica de la figura 80.3.
- La forma de la onda de la corriente que circula por el inducido, representada en la gráfica de la figura 80.2, nos indica que nos estamos acercando a velocidades de giro media-altas según las formas de onda de las corrientes de la figura 68.

El resto de valores son más o menos parecidos en valor y forma de la onda a los del caso anterior diferenciándose en que las ondas de las gráficas de este último caso evolucionan más rápido ya que la frecuencia a la que trabajan es mayor.

Por otra parte en la figura 81 se encuentran representadas las gráficas correspondientes al motor de corriente continua. En ellas podemos ver que con respecto a la última prueba realizada en el subapartado 3.6.3.2:

- La tensión generada, figura 80.1, se ha incrementado a unos 70V.
- La corriente generada, figura 80.2, se mantiene más o menos constante.
- Las tensiones y corrientes por el circuito de excitación, gráficas de las figuras 80.3 y 80.4, han cambiado ligeramente sus valores. La primera ha crecido un poco y la segunda ha disminuido ligeramente su valor.

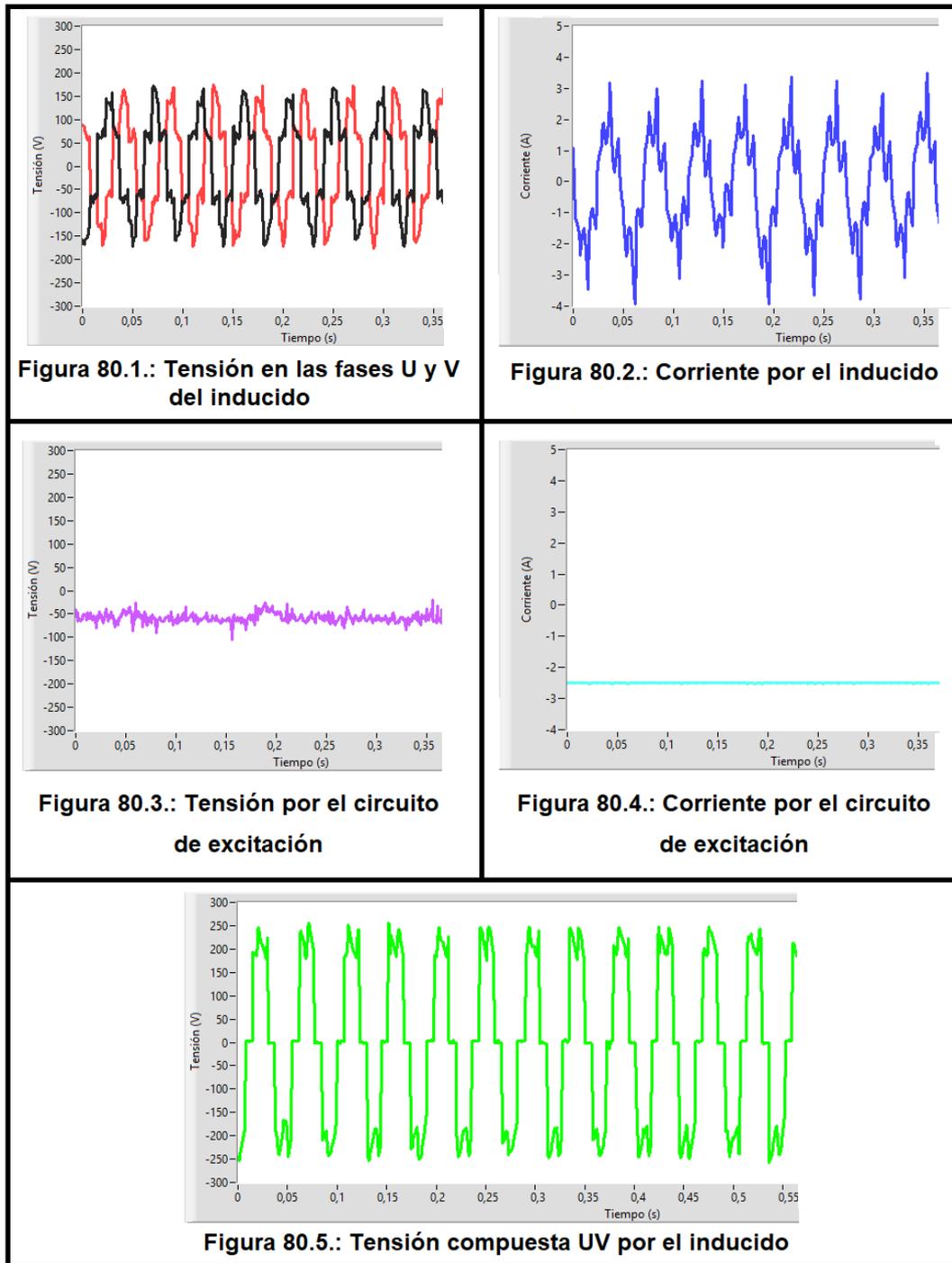


Figura 80: Resultados de la máquina síncrona actuando como motor paso a paso girando a 750 rpm

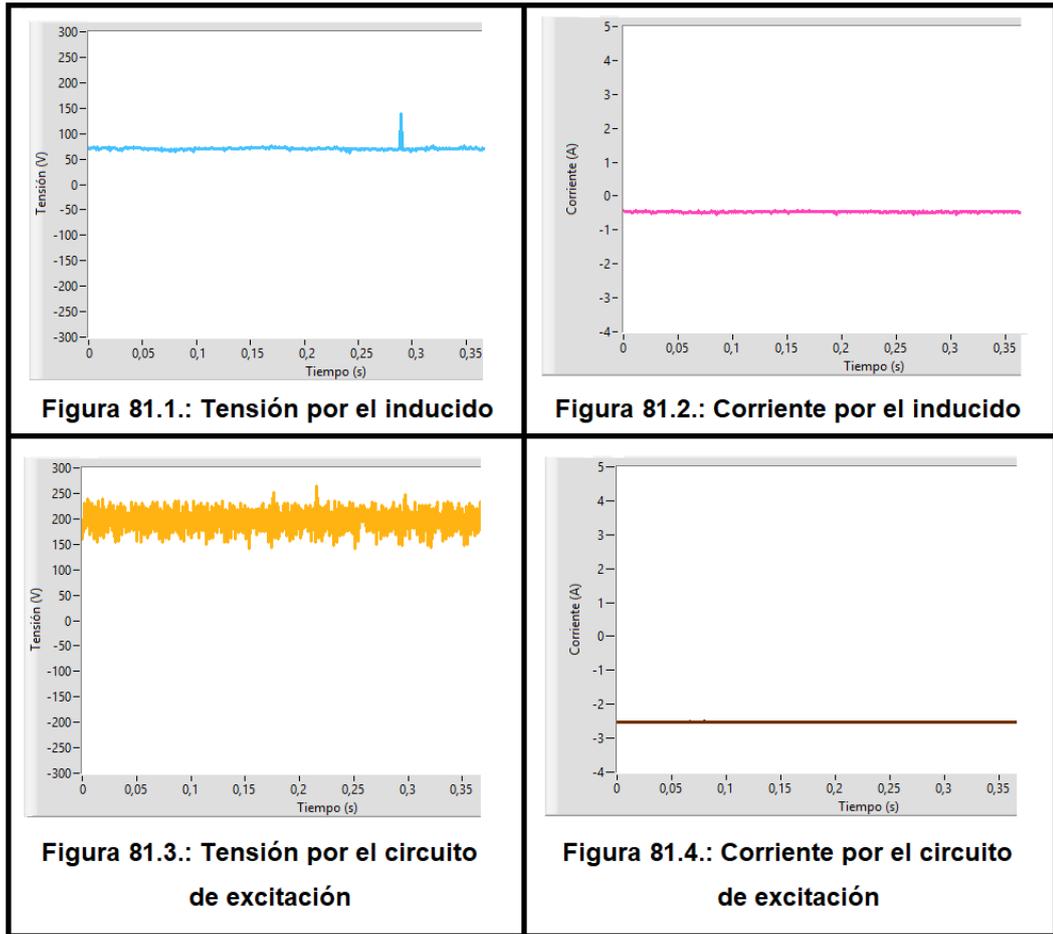


Figura 81: Resultados de la máquina de corriente continua actuando como generador de corriente continua girando a 750 rpm

Una vez hecho esto se procede a probar el sistema motor 2 haciéndolo trabajar a una frecuencia de conmutación de 200Hz lo cual se traduce en una velocidad angular de 1000rpm. Los resultados obtenidos se encuentran representados en las figuras 82 y 83.

Donde se tiene que en la figura 82, la cual representa los valores obtenidos de la máquina síncrona actuando como motor paso a paso, la corriente por su inducido se acerca cada vez más en la forma de su onda a la indicada como velocidades altas de giro en la figura 68 mientras que el resto de valores permanecen más o menos iguales con respecto a los obtenidos en la prueba anterior.

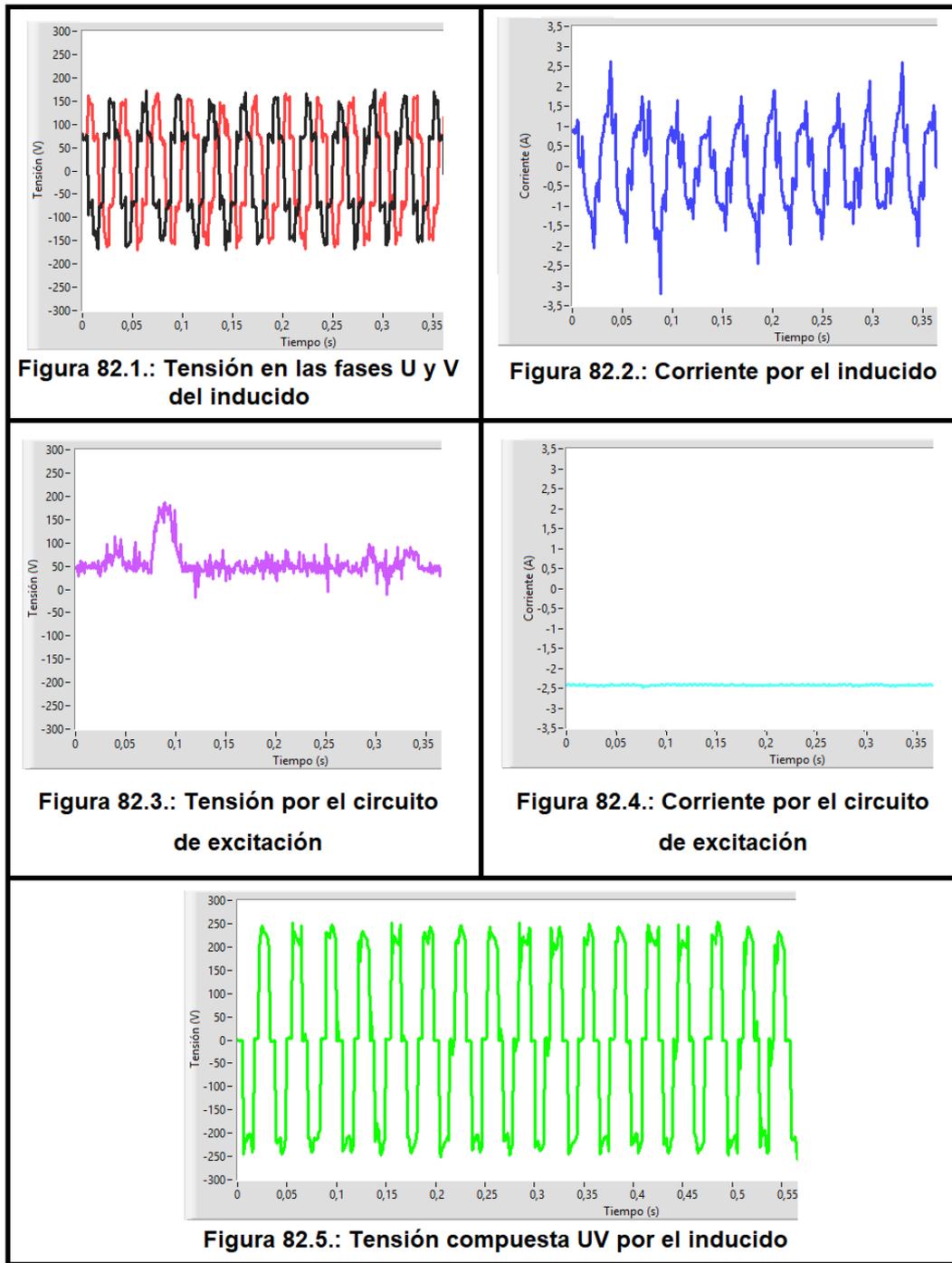


Figura 82: Resultados de la máquina síncrona actuando como motor paso a paso girando a 1000 rpm

Para concluir este subapartado se procede al estudio de los valores dados por la máquina de corriente continua para este caso.

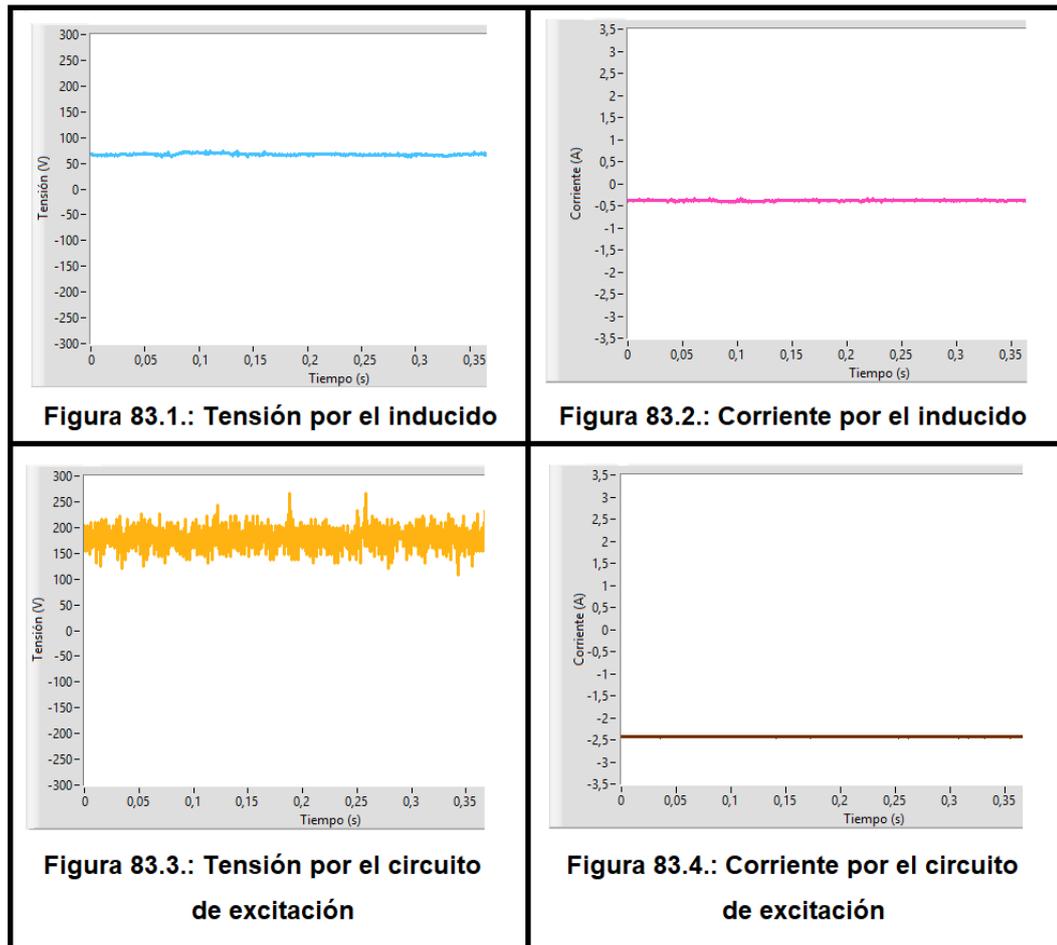


Figura 83: Resultados de la máquina de corriente continua actuando como generador de corriente continua girando a 1000 rpm

Como se puede ver en la figura 83 al comparar las gráficas contenidas en la misma se observa que sus valores no presentan una variación apreciable en sus valores con respecto a los obtenidos cuando el motor giraba a 750 rpm.

3.6.3.4. Resultados obtenidos con el circuito de excitación de la máquina síncrona cortocircuitado

El último caso a estudiar de valores experimentales es el producido al hacer girar el sistema motor con el circuito de excitación de la máquina síncrona cortocircuitado y una frecuencia de conmutación de 70 Hz lo cual usando el sistema motor 1 o 2 se traduce en una velocidad angular de 350rpm. Para esta prueba se usa el circuito esquematizado en la figura 7 del anexo 6. Como las gráficas generadas para este caso usando el sistema motor 1 o 2 son muy parecidas únicamente se representan las obtenidas usando el sistema 2 las cuales se pueden ver en las figuras 84 y 85.

Nota: El resto de tensiones utilizadas no varían respecto a las usadas en los subpartados 3.6.3.2 y 3.6.3.3.

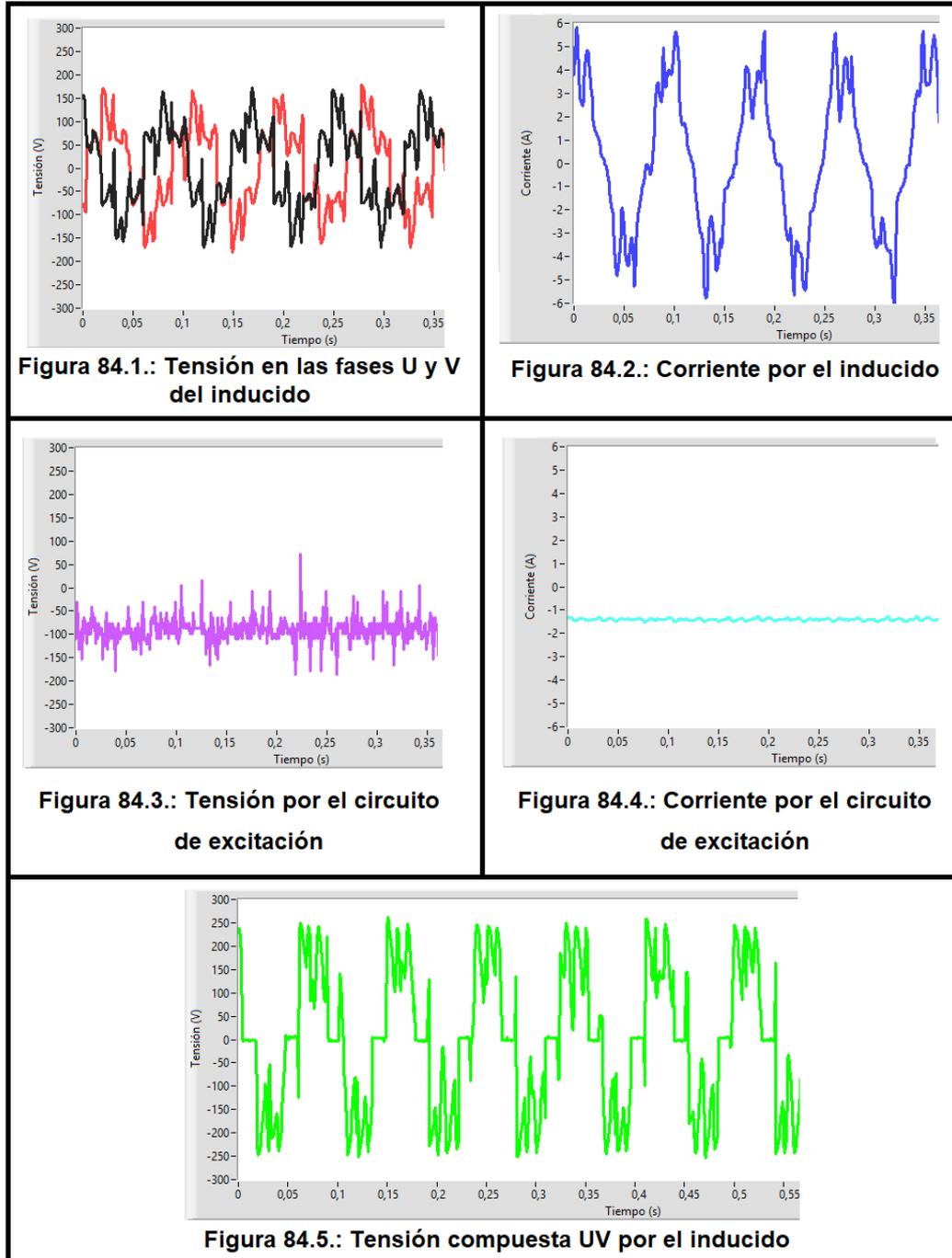


Figura 84: Resultados de la máquina síncrona actuando como motor paso a paso girando a 350 rpm con su circuito de excitación cortocircuitado

Comparando los resultados obtenidos con sus homólogos de la figura 76 se observa que:

- Las tensiones de fase y compuesta (figuras 84.1 y 84.5) tienen valores parecidos aunque en este último caso se observan más variaciones a lo largo de la onda representada en sus respectivas gráficas.
- La corriente por el inducido (figura 84.2) es mayor en este caso alcanzando un valor de 6A de pico con respecto a su homólogo en la figura 76.2 que tenía 4A.
- La corriente del circuito de excitación representada en la figura 84.4 es menor teniendo ahora un valor que ronda los 1.2A con respecto a los 4A de su homólogo.
- La tensión por el circuito de excitación (figura 84.3) no presenta cambios aparentes.

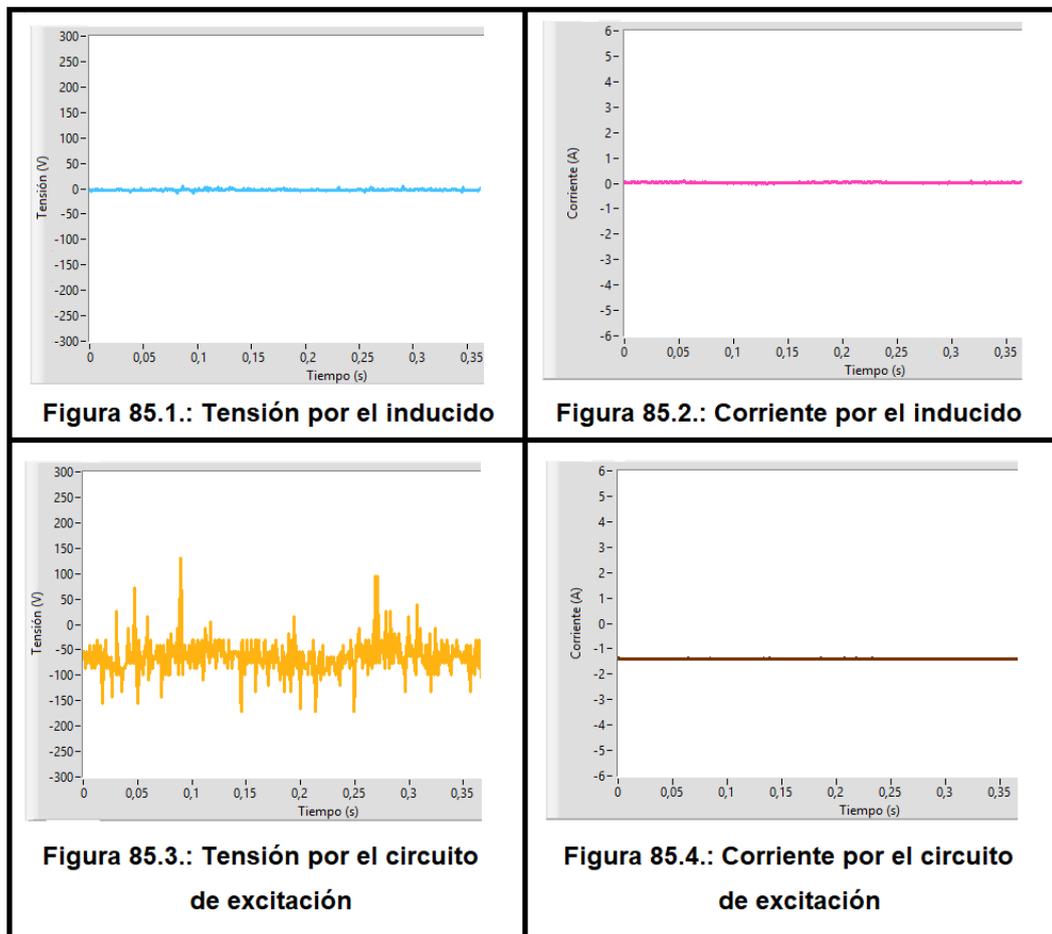


Figura 85: Resultados de la máquina de corriente continua actuando como generador de corriente continua girando a 350 rpm con su circuito de excitación cortocircuitado

Como se puede ver en la figura 85.3 para este caso la tensión de excitación se ha reducido con respecto a su prueba homóloga en el subapartado 3.6.3.2 dando lugar a que esta ahora tenga un valor de unos 50V. Esto a su vez ha dado lugar a que el resto de valores de tensión y corriente de la máquina síncrona se reduzcan. Ahora la corriente por el circuito de excitación vale 0.5A y la tensión y corriente por el inducido valen casi 0. Por otra parte visualmente se ha visto que el par generado en este caso es mucho mayor.

4. Programa de control para el sistema de tracción

4.1. Estudio teórico

La máquina síncrona del sistema de tracción puede actuar como motor paso a paso, cuyo estudio teórico se ha realizado en el subapartado 3.1, o como generador síncrono.

A través de lo aprendido sobre este tipo de máquinas, se llega a la conclusión de que la tensión generada por esta, será una onda trifásica senoidal como la de la figura 86, cuya amplitud y periodo dependerán de la tensión que circule por el inducido y por el circuito de excitación de la máquina de corriente continua, que en este caso actuará como generador, así como el valor de la tensión de excitación del generador síncrono.

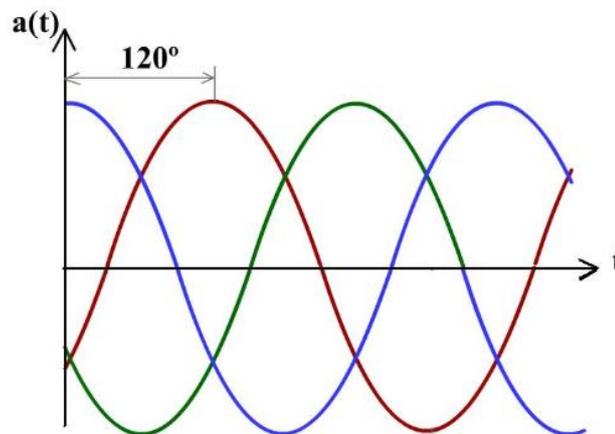


Figura 86: Onda sinusoidal trifásica ([15])

En ella se tendrá que para una misma tensión en el inducido del generador de corriente continua cuanto menor sea la tensión en el circuito de excitación de dicho generador más rápido y más tensión generará la máquina síncrona pues la fuerza contra-electromotriz a superar será menor.

4.2. Creación del programa de control

4.2.1. Desarrollo del programa de control

El programa de control generado para el manejo del sistema de tracción se llama programa de control definitivo (motor y generador) y se ha creado a partir del programa de control definitivo.

Con El fin de crear este programa de control se han añadido los siguientes elementos a su versión anterior:

- Un sistema de bloques que permite la posibilidad de que la máquina síncrona actúe como generador síncrono y no solo como motor paso a paso.

Dicho sistema se puede ver en la figura 87 y está constituido por el interruptor “Genera” el cual al estar activado posibilita el paso a funcionar como generador síncrono de la máquina síncrona y una variable local del interruptor “Freno”. Cuando ambos interruptores se encuentran accionados se enciende la luz “L_Generando” y se manda un valor de tensión alto al exterior por medio del puerto de salida digital 7 (DIO7) del puerto C de la unidad myRIO, esto da lugar a que la máquina síncrona pase a actuar como alternador síncrono y que el esquema del sistema motor sea ahora el de la figura 9 del anexo 6.

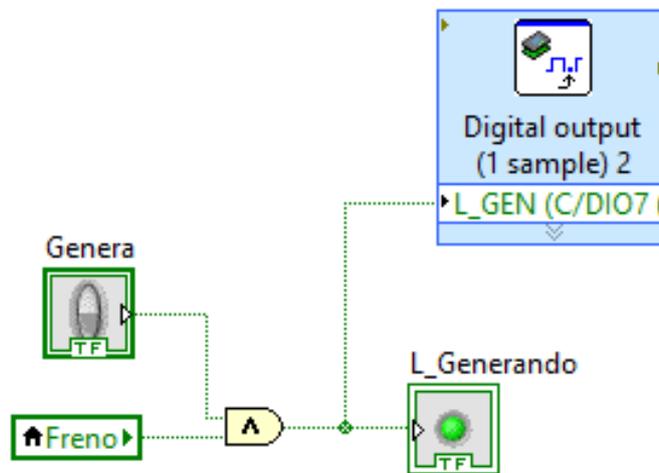


Figura 87: Sistema de bloques para que la máquina síncrona trabaje como alternador

- Se han producido una serie de adiciones al sistema de bloques que da el valor de las variables de entrada a la estructura formula mode que genera el valor de las señales de control. Con el fin de asegurarse de que no se encuentre ningún transistor activo del inversor trifásico del circuito integrado cuando la máquina síncrona actúa como alternador se ha colocado como condición para que las variables H, AH, CAH y CH valgan 1 el hecho de que la luz “L_Generando” esté apagada, valga 0 un lógico.

El diagrama del sistema de bloques resultante se encuentra representado en la figura 88.

Nota: Dicha condición se ha introducido a través de puertas AND.

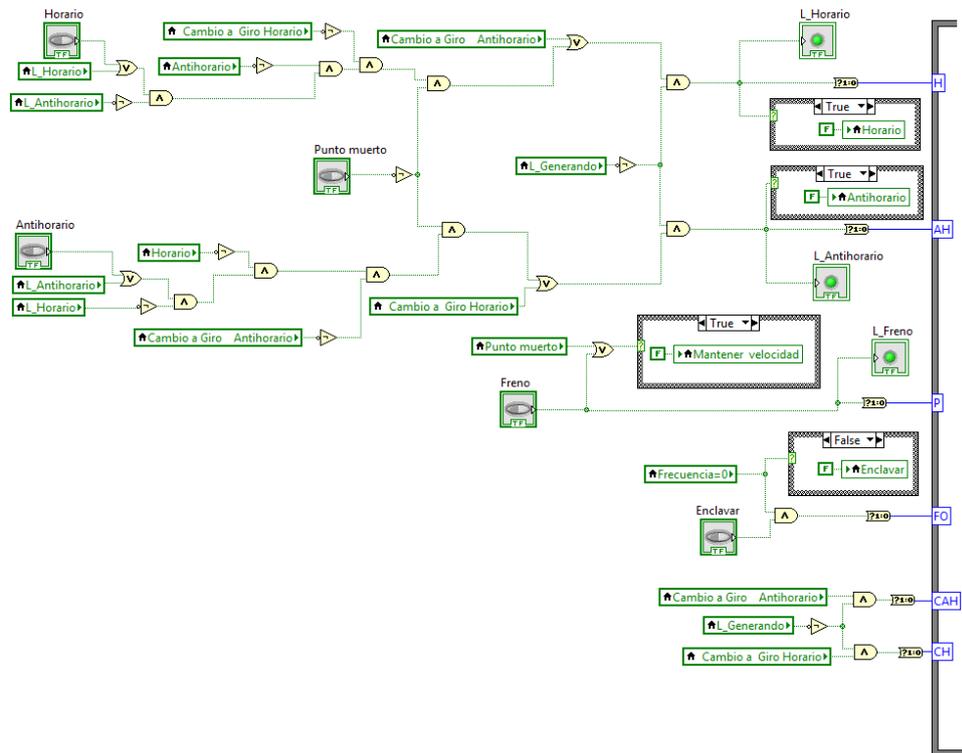


Figura 88: Sistema de bloques que permite la selección del sentido de giro, enclavamiento o freno del motor paso a paso

- La última adición con respecto al anterior programa de control se encuentra en la inclusión de una serie de botones de ayuda para la interfaz de usuario. Estos darán una explicación breve de las funciones que desempeña cada uno de los componentes de dicha interfaz así como como activar y desactivar una serie de funciones que ofrece el programa de control creado.

El esquema del diagrama de bloques que conforma la opción de ayuda se encuentra dibujado en la figura 89 y está constituido por:

- Tres pulsadores de ayuda donde el llamado “*Controles*” explica que función desarrolla cada uno de los interruptores y bloques numéricos de la interfaz de usuario, otro llamado “*Indicadores*” que explica que muestran cada uno de los indicadores luminosos, visuales y numéricos y por último el llamado “*Como arrancar*” que explica que hacer antes de seleccionar un sentido de giro para el motor paso a paso y como activar una serie de funciones del sistema como pueden ser enclavamiento, el paso a actuar como alternador por parte de la máquina síncrona, ...
- Tres estructuras condicionales cuya condición de activación es que su respectivo pulsador valga un 1 lógico. Al cumplirse la

condición de activación una ventana de dialogo de una sola opción muestra el contenido de la cadena de caracteres que tiene dentro de la estructura condicional en que se encuentra.

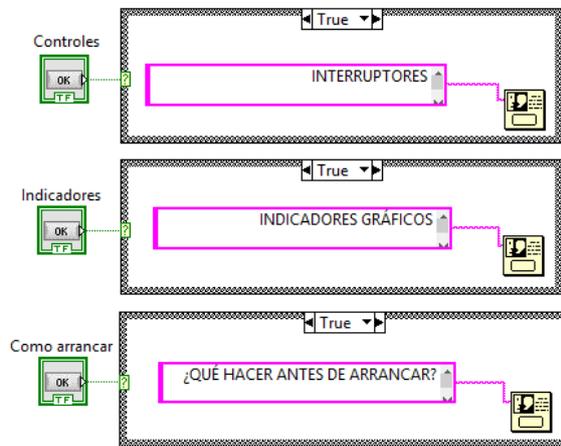


Figura 89: Sistema de bloques que conforma la ayuda del programa de control

Con el fin de generar las cadenas de caracteres que se pueden ver en la figura 89 ha sido necesario crear un programa auxiliar al que se ha llamado ayuda.vi, el contenido de este se encuentra en la figura 90.

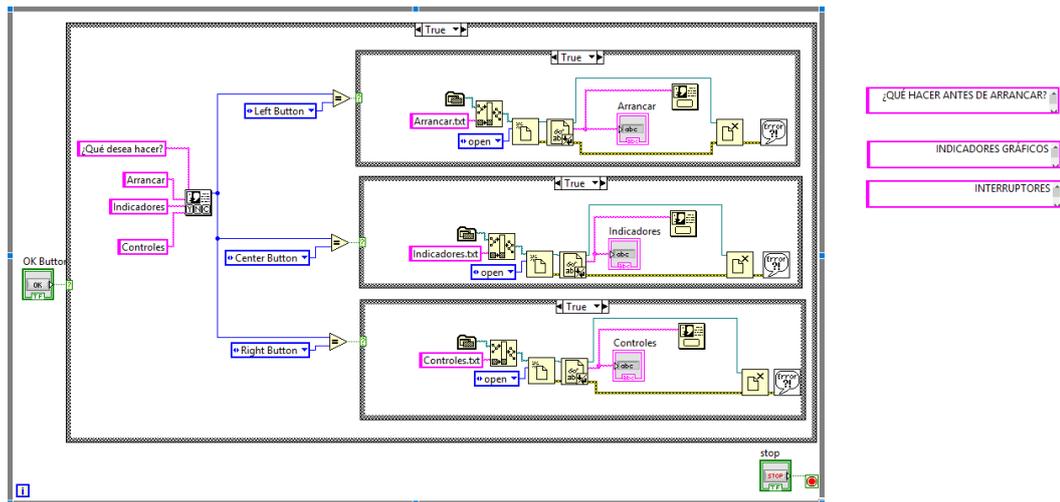


Figura 90: Programa para generar las cadenas de caracteres que conforman la ayuda del programa de control

Como se puede ver en esta figura dicho programa se encuentra dentro de una estructura bucle la cual contiene un botón “Ok Button” el cual cuando vale uno activa la estructura condicional a la que está conectado.

Esto a su vez da lugar a que se abra una ventana de diálogo preguntándonos porqué ayuda queremos consultar. Tras haber seleccionado una de ellas la salida de dicho bloque diálogo adquirirá un valor tal que activará una de las tres estructuras condicionales contenidas dentro de esta.

Por último, dentro de estas se tiene un bloque parecido a una carpeta el cual indica que ha de buscar el archivo con el nombre definido en el bloque debajo de este en la misma carpeta en que se encuentra el programa ayuda. Estos dos bloques se unen para conformar la dirección del archivo a leer en cada caso y se manda a un bloque de apertura del mismo. Luego se manda a un bloque de lectura del cual salen tres ramales uno que va a un bloque que cierra el archivo una vez leído, otro que va a una ventana de diálogo con una sola opción la cual nos sacará por pantalla el contenido del archivo txt y otra que va a un bloque indicador. La cuarta línea de este bloque, que va desde el bloque de apertura, atraviesa los bloques de lectura y cierre y llega al de error simple, el cual se usa para que el programa genere un mensaje en caso de error.

Tras haber ejecutado el sistema y haber pulsado las tres ayudas los bloques indicadores de cada una tienen cargado el contenido de los archivos txt por lo cual se procede a copiarlos y pegarlos fuera de la estructura bucle donde se les pasa a cadena de caracteres constantes (ver figura 90) y estos se copian y se pegan en el sistema de bloques que producen la ayuda del programa de control (figura 89).

Nota: El resto de componentes del mismo permanecen inalterados con respecto a la versión anterior del programa de control.

4.2.2. Construcción del circuito físico

El circuito físico a desarrollar se genera a partir del esquematizado en las figuras 7, 8 y 9 del anexo 6. Al cual se le añade un relé de estado sólido (figura 91) y dos contactores (figura 92) con el fin de poder pasar de motor paso a paso a generador síncrono, y viceversa, con solo pulsar un botón.



Figura 91: Relé de estado sólido

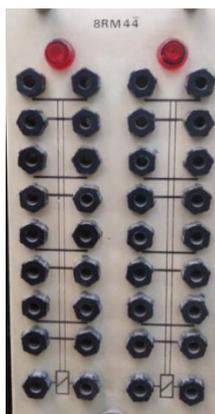


Figura 92: Contactores

El circuito resultante se encuentra esquematizado en la figura 10 del anexo 6 y el esquema del sistema motor, contactor y relé de estado sólido del mismo, en la figura 11 del mismo anexo.

4.2.3. Prueba del circuito

Tras probar el circuito resultante, circuito esquematizado en la figura 10 del anexo 6 con el programa de control definitivo (motor y generador), se observa que este funciona correctamente. Por lo cual se procede a realizar las pruebas correspondientes para la obtención de los datos necesarios para la realización del estudio de los resultados experimentales.

4.3. Resultados experimentales

Debido a que los resultados experimentales para este circuito ya se han estudiado en el subapartado 3.6.3 en este se procederá únicamente al estudio del sistema motor cuando la máquina síncrona actúa como generador síncrono, la explicación de la interfaz de usuario para este programa se encuentra en el anexo 7 Manual de usuario.

Al igual que con el caso anterior, los datos serán medidos por los transductores, enviados al panel de adquisición de datos y grabados por el programa Paso a Paso CRI02 para su posterior lectura en el programa Leer Datos Laboratorio. El circuito utilizado para la obtención de estos valores es el indicado en el subapartado 4.2.2.

La primera de las pruebas se lleva a cabo suministrando a la máquina de corriente continua una tensión de excitación de 100V y una tensión en el inducido de 220V. La tensión suministrada al circuito de excitación de la máquina síncrona es de 30V. Los resultados obtenidos se encuentran representados en las gráficas de las figuras 93 y 94.

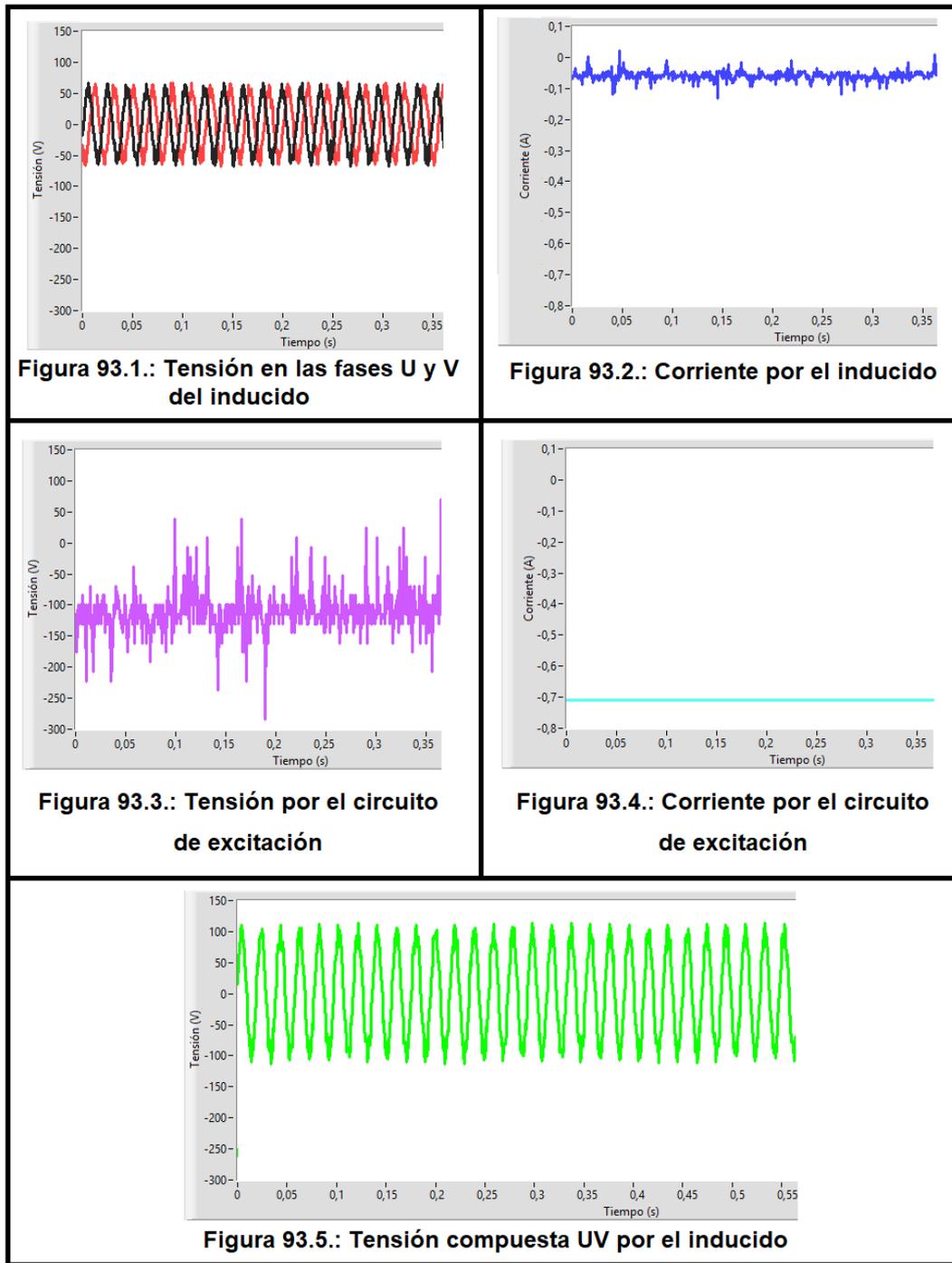


Figura 93: Resultados obtenidos para la máquina síncrona actuando como generador síncrono

En las gráficas de esta figura se puede ver como la forma de onda esperada teóricamente para el generador síncrono se cumple. En la gráfica de la figura 93.1 se encuentran las ondas descritas por las tensiones de fase U y V, las cuales tienen forma sinusoidal y están desfasadas 120° entre sí con un valor de pico que ronda los 70V, mientras que la corriente por la fase U está dibujada

en la gráfica de la figura 93.2 y tiene un valor que ronda los 0.5A. También se puede ver en la figura 93.5 la tensión compuesta UV la cual también posee una forma sinusoidal con un valor de pico de unos 115V.

Por otra parte se tiene una tensión que ronda los 110V en el circuito de excitación de este con bastantes picos de tensión (ver figura 93.3) y una corriente continua de 0.7A la cual se encuentra representada en la figura 93.5.

Los valores del motor de corriente continua, para esta prueba, están dibujados en las gráficas de la figura 94 donde se observa que las tensiones por el inducido y circuito de excitación de esta máquina no son constantes sino que tienen un ligero rizado (figuras 94.1 y 94.3) lo cual se traduce en que la corriente por el inducido, representada en la figura 94.2, adquiere una forma sinusoidal cuyo valor varía entre los 0.3A y los 0.7A. La corriente en el circuito de excitación presenta un valor contante de 0.7A tal y como se muestra en la figura 94.4.

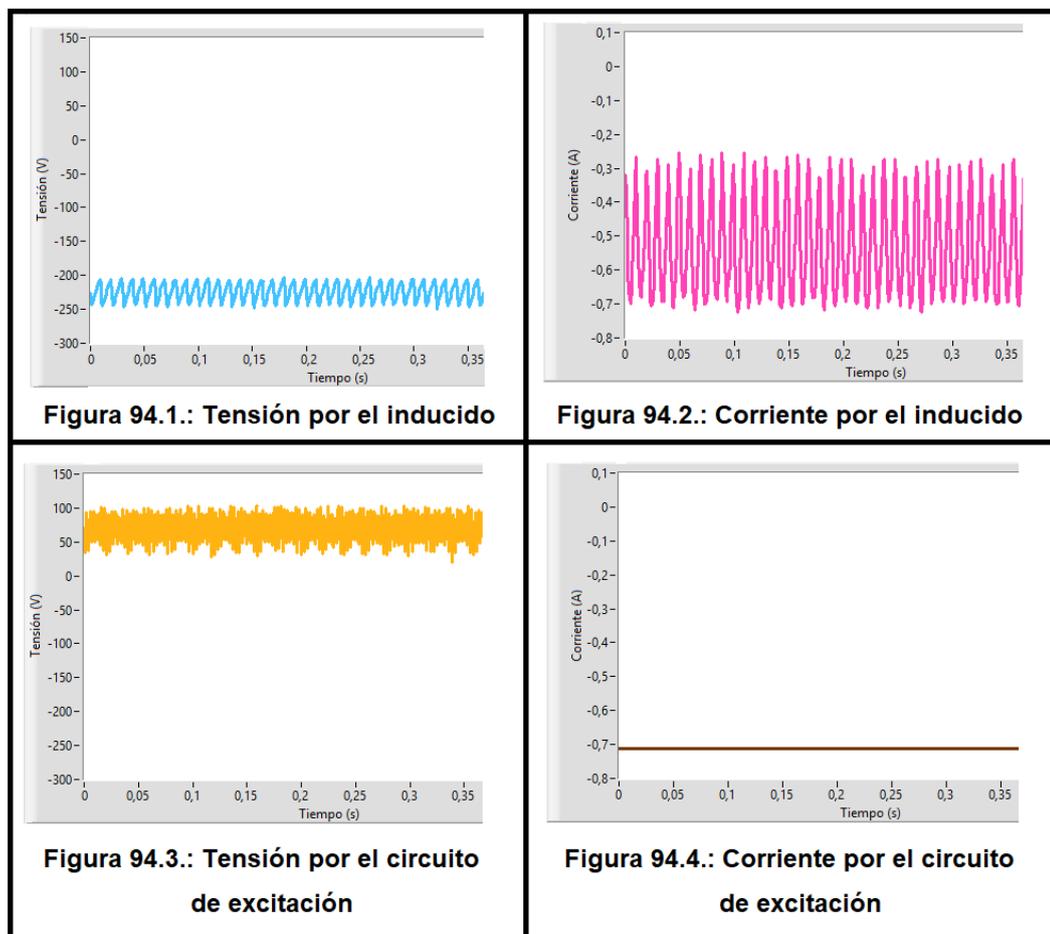


Figura 94: Resultados obtenidos para la máquina de corriente continua actuando como motor con una tensión de excitación de 100V

La siguiente prueba se realiza manteniendo los valores de tensión suministrados al sistema motor de la anterior pero incrementando en 40V el valor de la tensión del circuito de excitación del motor de corriente continua. Las gráficas obtenidas se encuentran en las figuras 95 y 96.

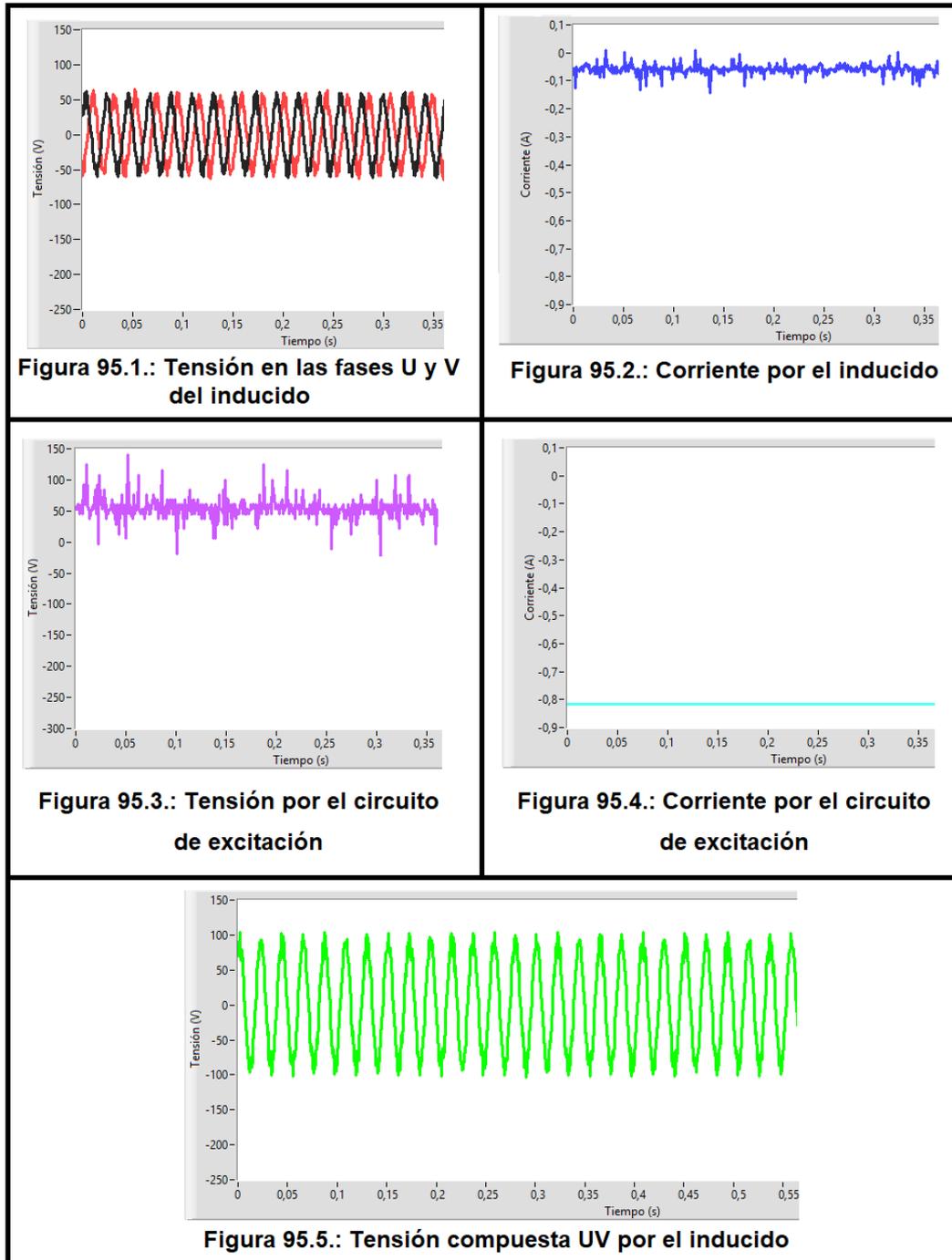


Figura 95: Resultados obtenidos para la máquina síncrona actuando como alternador

Con respecto al caso anterior se ve como la tensión por el circuito inducido de la máquina síncrona ha disminuido, ahora tiene un valor de pico que ronda los 55V (figura 95.1) y una tensión compuesta de unos 100V de pico (figura 95.5), mientras que la corriente por este mantiene su valor con respecto al caso anterior (figura 95.2).

Por otra parte la tensión en el circuito de excitación de dicha máquina (figura 95.3) ha visto reducido su valor a unos 60V, aunque sigue teniendo bastantes picos de tensión, y la corriente por el mismo (figura 95.4) ha aumentado su valor hasta los 0.82A.

Por último, al igual que en el caso anterior, los valores que da la máquina de corriente continua para este caso (figura 96) muestran que las tensiones en el circuito de excitación y el inducido de estas (figuras 96.3 y 96.1) muestran un rizado en vez de tener un valor constante.

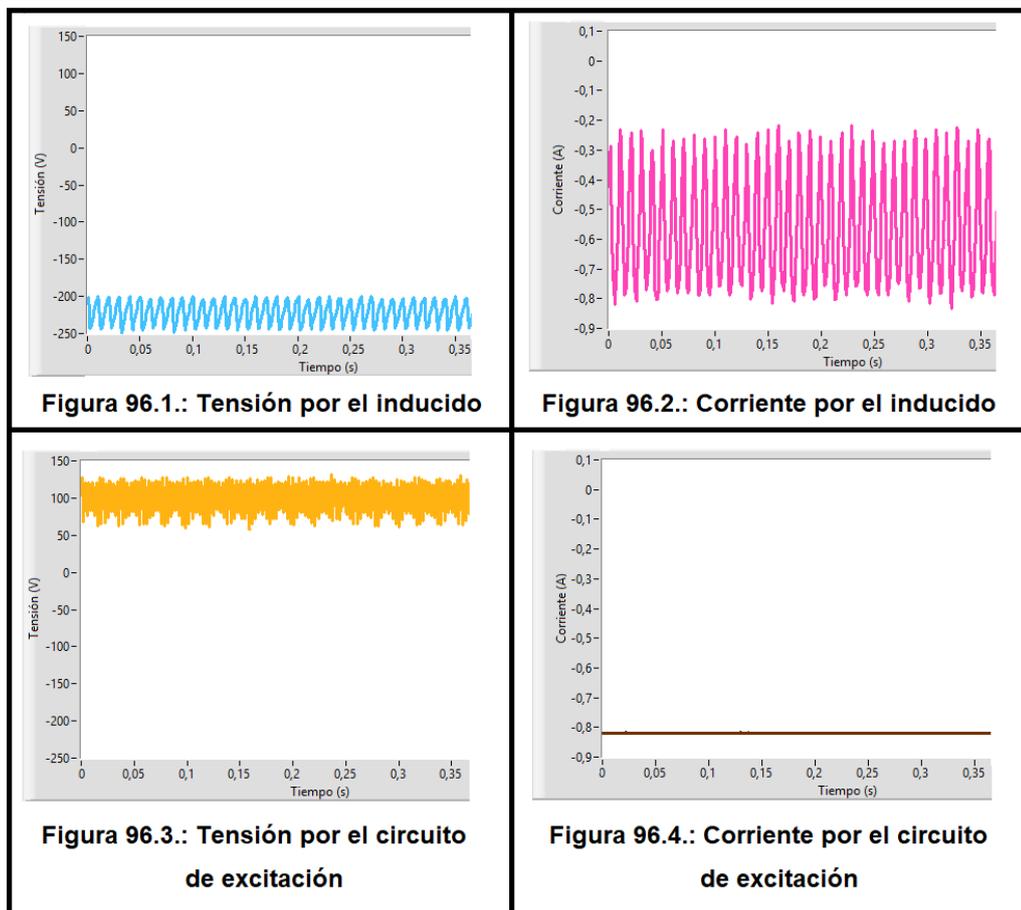


Figura 96: Resultados obtenidos para la máquina de corriente continua actuando como motor con una tensión de excitación de 140V

Las diferencias en estas gráficas con respecto a sus homólogas del caso anterior se encuentran en:

- El valor de la corriente por el inducido (figura 96.2) en el cual se ve un aumento en el valor de la amplitud de la onda sinusoidal que la describe variando ahora este entre 0.25 y 0.8A.
- El valor de la tensión del circuito de excitación el cual ha aumentado.
- El aumento en el valor de la corriente por el circuito de excitación (figura 96.4) la cual ahora vale 0.82A.

El último caso a estudiar es aquel en el que la tensión suministrada al circuito de excitación de la máquina síncrona tiene un valor de 170V y se mantienen los otros valores de tensión de las dos pruebas anteriores. Los resultados obtenidos se encuentran representados en las figura 97 y 98.

En la figura 97 se encuentran las gráficas obtenidas por parte de la máquina síncrona actuando como alternador. En ellas se puede ver como los valores de las corrientes en el circuito inducido y el de excitación de la misma casi no cambian con respecto al caso anterior.

Por otra parte, se tiene que la tensión generada a disminuido ligeramente con respecto a este, teniendo ahora unos valores de pico de unos 48V para las tensiones de fase y 90V para la tensión compuesta del circuito inducido de dicha máquina (figuras 97.1 y 97.5). Sin embargo el cambio más destacado se encuentra en la tensión por el circuito de excitación (figura 97.3), la cual presenta unos picos de tensión mucho mayores que en el caso anterior, aunque su valor medio es prácticamente el mismo.

Por último en la figura 98 la cual muestra las gráficas generadas por el motor de corriente continua para esta prueba, en ella se puede ver que la tensión por el circuito inducido, representada por la gráfica de la figura 98.1, no varía su valor. Sin embargo el resto de gráficas contenidas en esta figura sí que han cambiado.

En la figura 98.2 se encuentra dibujada la gráfica de la corriente por el inducido la cual presenta una forma sinusoidal cuya amplitud ha crecido con respecto al caso anterior moviéndose ahora entre los 0.23A y 0.85A.

La tensión y corriente por el circuito de excitación de esta máquina (figuras 98.3 y 98.4) también han visto incrementado su valor, siendo este ahora de unos 110V y 0.9A.

Para concluir, tras haber estudiado los diversos resultados experimentales y compararlos con lo esperado teóricamente, se llega a la conclusión de que el sistema motor funciona correctamente pues ambos coinciden.

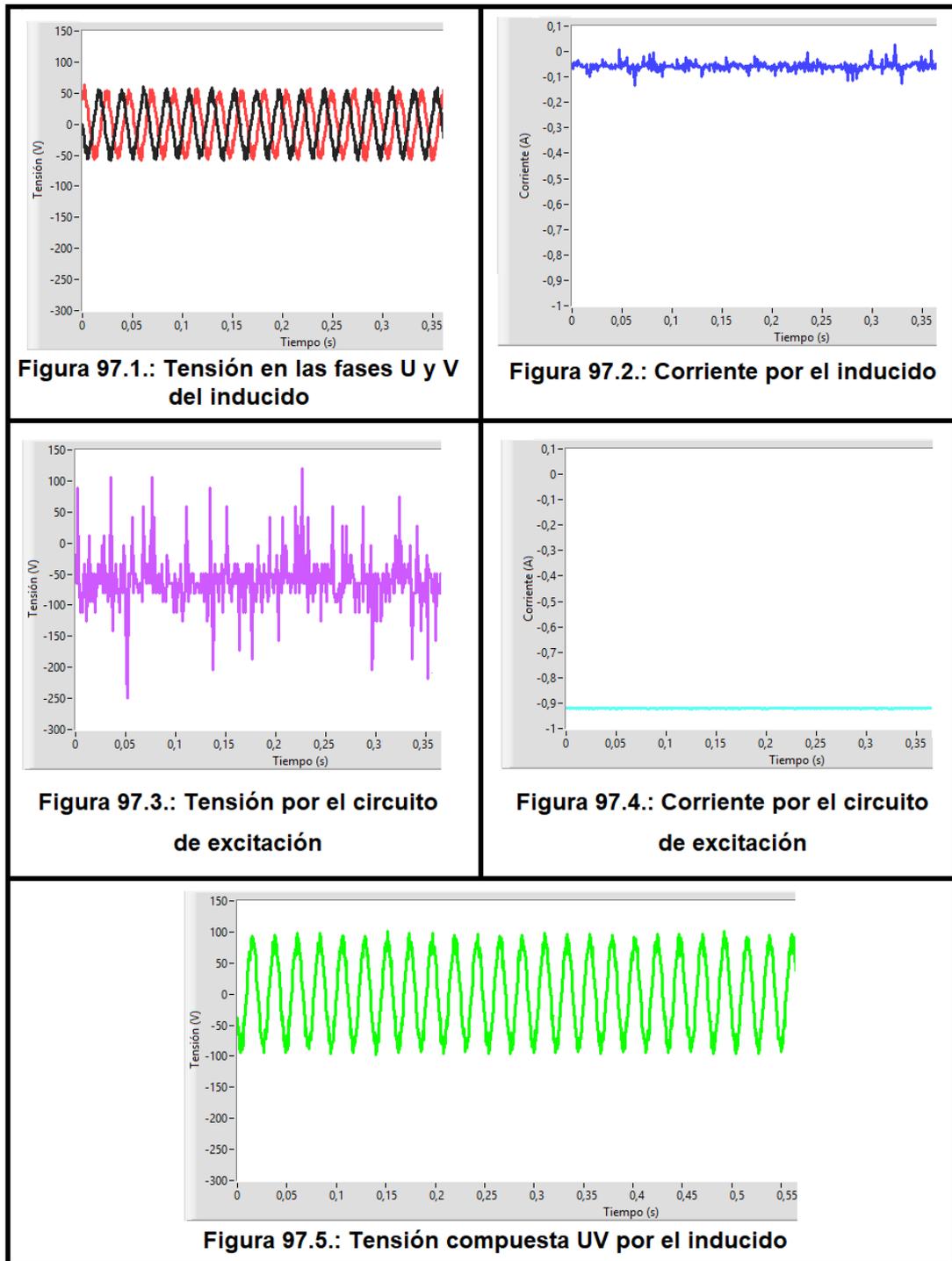


Figura 97: Resultados obtenidos para la máquina síncrona actuando como alternador

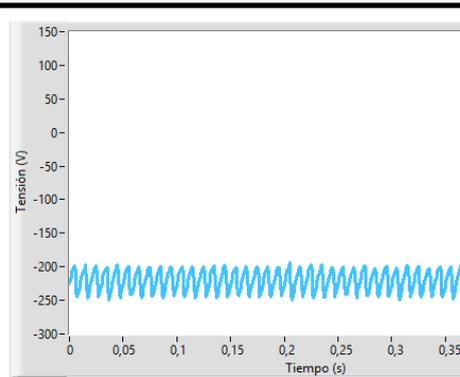


Figura 98.1.: Tensión por el inducido

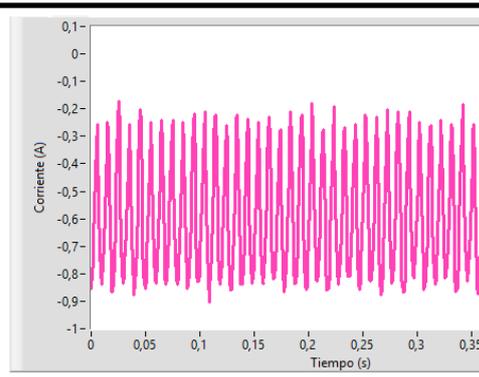


Figura 98.2.: Corriente por el inducido

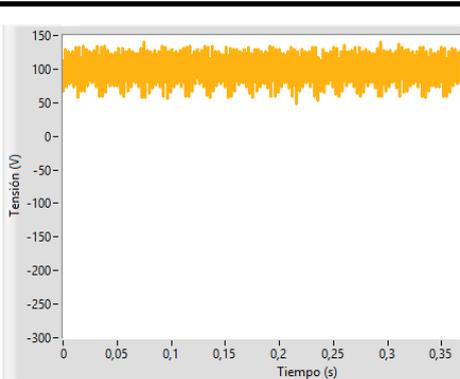


Figura 98.3.: Tensión por el circuito de excitación

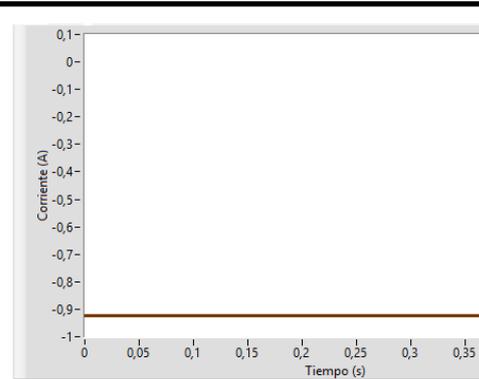


Figura 98.4.: Corriente por el circuito de excitación

Figura 98: Resultados obtenidos para la máquina de corriente continua actuando como motor con una tensión de excitación de 170V

5. Conclusiones

1. El programa de control desarrollado para el manejo del sistema de tracción es versátil pues se adapta a cualquier máquina síncrona que se quiera utilizar. En el sistema de control se ha empleado el circuito integrado IRAMY20UP60B y el equipo NI MyRIO-1900.
2. Dicho programa permite que la máquina síncrona actúe como motor paso a paso y generador síncrono.
3. El funcionamiento de este circuito se puede mejorar reduciendo el desplazamiento angular producido al cambiar de posición. Esto se puede conseguir de dos formas:
 - Trabajando con una máquina síncrona con más pares de polos en el inducido.
 - Usar dos circuitos integrados IRAMY20UP60B. Esto nos permitirá duplicar el número de posiciones a recorrer para que el motor de una vuelta completa, pues ahora tendríamos acceso a todos los bornes del motor de forma individual.

6. Líneas de trabajo abiertas

Como líneas de trabajo abiertas para continuar y mejorar este programa de control y/o sistema motor tenemos:

1. Desarrollo de un programa de control que dé una respuesta más adecuada a frecuencias de conmutación muy bajas.
2. Desarrollo de lazos de control para ajustar la tensión de salida en su funcionamiento como generador síncrono, en función de la velocidad de giro y de la excitación de la máquina.
3. Prueba del programa de control en el sistema de tracción de un coche, coordinando la velocidad de varios motores simultáneamente.
4. Modificar el lazo de realimentación de la frecuencia de conmutación, introduciendo el valor de esta desde el exterior a partir de la velocidad de la máquina.
5. Usar dos unidades IRAMY20UP60B para el control de la máquina síncrona.

7. Bibliografía

[1]. J. Mazón, J. F. Miñambres, M. A. Zorroza, G. Buigues, V. Valverde, *Guía de autoaprendizaje de máquinas eléctricas*, Madrid, PEARSON EDUCACIÓN, 2008.

[2]. J. Fraile Mora, *Máquinas eléctricas*, Sexta Edición, Madrid, McGrill-Hill, 2008.

[3]. I. Boldea, *Synchronous Generators: Volume 1 (Electric Generators Handbook)*, Second Edition, CRC Press, 2015.

[4]. I. Boldea, S. A. Nasar, *Electric Drives, Third Edition*, CRC Press, 2016.

[5]. M. A. Rodríguez Pozueta, *Máquinas de corriente continua*, Universidad de Cantabria (España), Departamento de ingeniería Eléctrica y Energética, Consultado el día 7 de marzo de 2019 en la página web:

<https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Maquinas%20cc.pdf>

[6]. F. Moeller, E. Kübler, TH. Werr, *Electrotecnia general y aplicada II. Primera parte. Máquinas de corriente continua Máquinas de corriente alterna (incluso transformadores)*, Barcelona, EDITORIAL LABOR, 1972.

[7]. A. Hughes, *Electric Motors and Drivers: Fundamentals, Types and Applications, Third Edition*, Newnes, 2006.

[8]. V.R. González Fernández, *Motor paso a paso (step- / stepper / stepping motors)*, Profesor del IES Zorrilla – Valladolid, Investigador de la Universidad de Valladolid, Dr. en Física, Ing. Téc. De Telecomunicaciones, Consultado el día 10 de marzo de 2019 en la página web:

http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/cyr_01/robotica/sistema/motores_p-p.htm#iman_permanente

[9]. *Motor paso a paso ¿que es y como funciona?*, Consultado el día 10 de marzo de 2019 en la página web fue:

<https://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/motor-paso-a-paso/>

[10]. P. Acarnley, *Stepping Motors: A guide to theory and practice, Fourth Edition*, IET (Institution of Engineering and Technology), 2002.

[11]. R.H. Engelmann, W.H. Middenford, *Handbook of Electric Motors*, New York, Marcel Dekker Inc., 1995

[12]. National Instruments, *USER GUIDE AND SPECIFICATIONS NI myRIO-1900*, Consultado el día 21 de marzo de 2019, Página web:

<http://www.ni.com/pdf/manuals/376047c.pdf>

[13]. A. Zafra Cabeza, *TUTORIAL DE LABVIEW*, Universidad de Sevilla (España), Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Consultado el día 22 de marzo de 2019, Página web:

<http://www.esi2.us.es/~asun/LCPC06/TutorialLabview.pdf>

[14]. International Rectifier, *IRAMY20UP60B datasheet*, Consultado el día 24 de marzo de 2019, Página web:

<https://www.infineon.com/dgdl/iramy20up60b.pdf?fileId=5546d462533600a4015355da3e391879>

[15]. *ELECTROMAGNETISMO, ELECTRICIDAD, TIPOS DE SUMINISTRO ELÉCTRICO*, Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad de Vigo. Consultado el día 30 de mayo de 2019, Página web:

http://quintans.webs.uvigo.es/recursos/Web_electromagnetismo/electromagnetismo_electricidad_tipodesuministro.htm

Anexos

Anexo 1. Esquema del circuito integrado IRAMY20UP60B

En la siguiente figura se puede ver el esquema de la circuitería que conforma este circuito integrado.

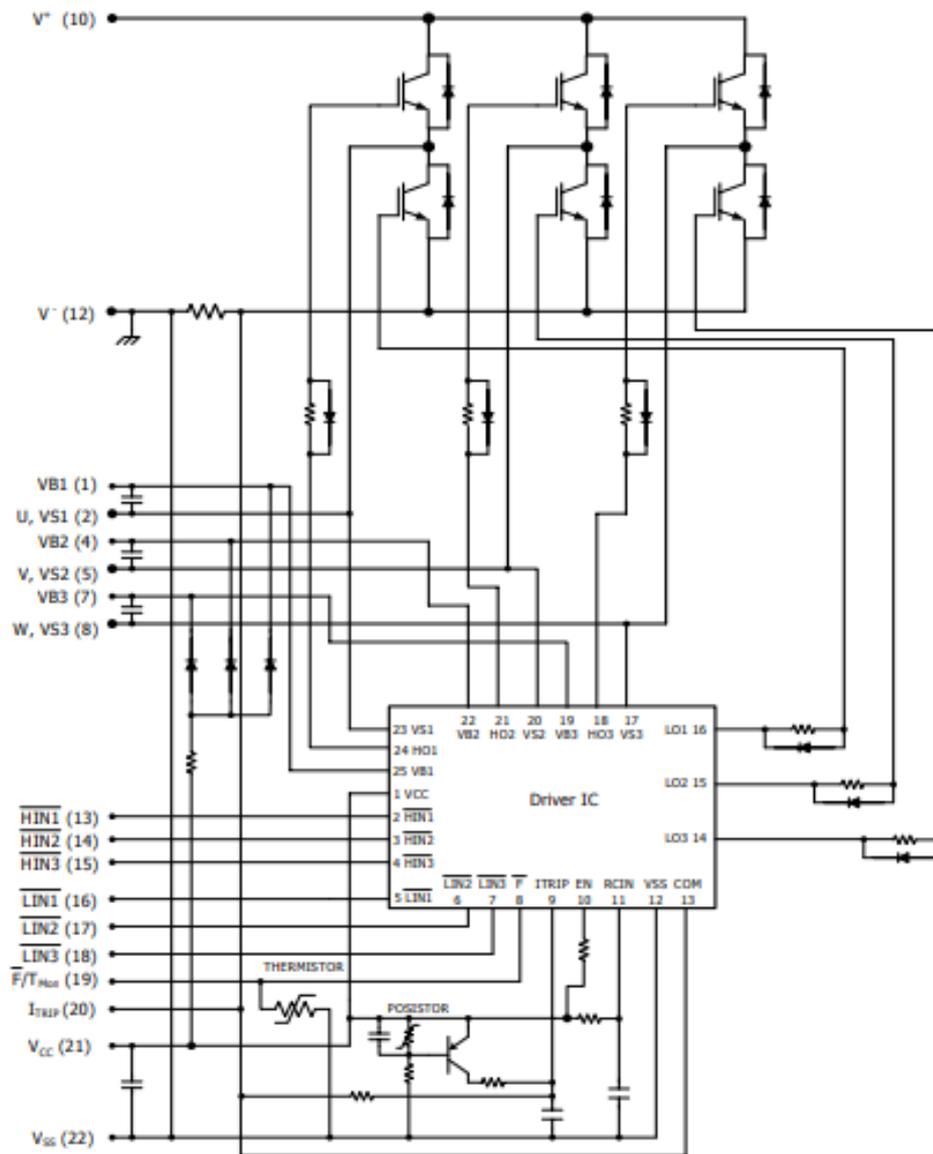


Figura 1: Esquema eléctrico interno del circuito integrado ([14] página 2)

Pin	Name	Description
1	V_{B1}	High Side Floating Supply Voltage 1
2	U, V_{S1}	Output 1 - High Side Floating Supply Offset Voltage
3	NA	none
4	V_{B2}	High Side Floating Supply voltage 2
5	V, V_{S2}	Output 2 - High Side Floating Supply Offset Voltage
6	NA	none
7	V_{B3}	High Side Floating Supply voltage 3
8	W, V_{S3}	Output 3 - High Side Floating Supply Offset Voltage
9	NA	none
10	V^+	Positive Bus Input Voltage
11	NA	none
12	V^-	Negative Bus Input Voltage
13	\overline{H}_{IN1}	Logic Input High Side Gate Driver - Phase 1
14	\overline{H}_{IN2}	Logic Input High Side Gate Driver - Phase 2
15	\overline{H}_{IN3}	Logic Input High Side Gate Driver - Phase 3
16	\overline{L}_{IN1}	Logic Input Low Side Gate Driver - Phase 1
17	\overline{L}_{IN2}	Logic Input Low Side Gate Driver - Phase 2
18	\overline{L}_{IN3}	Logic Input Low Side Gate Driver - Phase 3
19	$\overline{\text{Fault}}/T_{\text{MON}}$	Temperature Monitor and Fault Function
20	I_{TRIP}	Current Monitor
21	V_{CC}	+15V Main Supply
22	V_{SS}	Negative Main Supply



Tabla 1: Descripción de los pines de conexionado del IRAMY20UP60B ([14] página 8)

Anexo 3. Instrumentos de medición utilizados

En este anexo se pueden ver los elementos de medida utilizados a lo largo de este trabajo de fin de grado.



Figura 1: Medidor de resistencias, inductancias y capacitancias



Figura 2: Osciloscopio

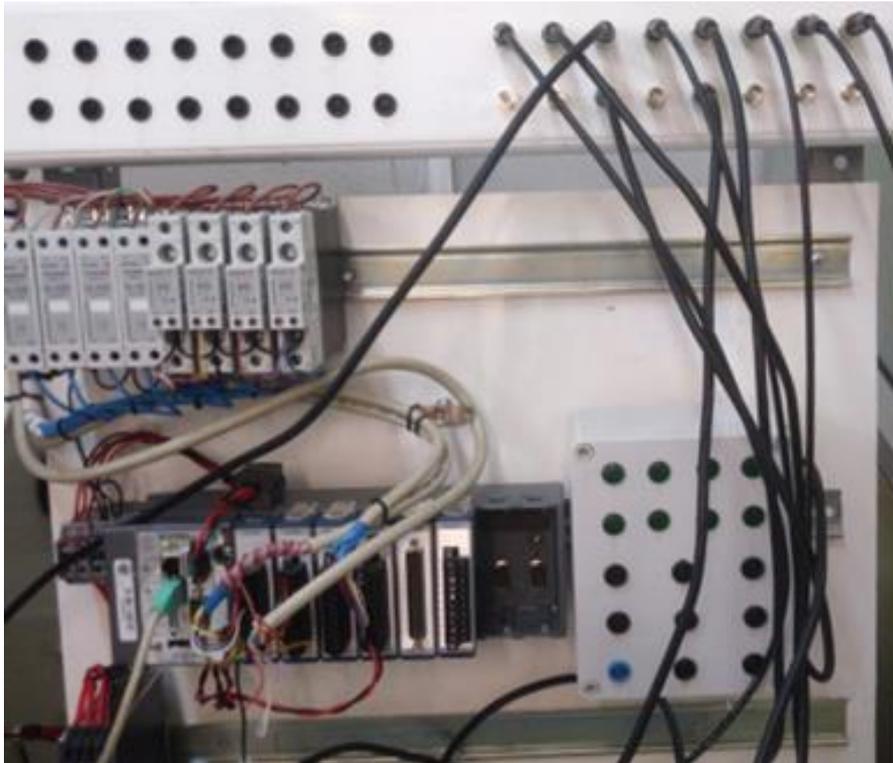


Figura 3: Panel de adquisición de datos



Figura 4: Transductores



Figura 5: Tacómetro (15V x 1000rpm)



Figura 6: Tacómetro (30V x 1000rpm)



Figura 7: Voltímetro y amperímetro



Figura 8: Indicador de velocidad (tacómetro)

Anexo 4. Motores y generadores empleados

En este anexo se pueden ver los diversos motores y generadores utilizados a lo largo de este trabajo de fin de grado.

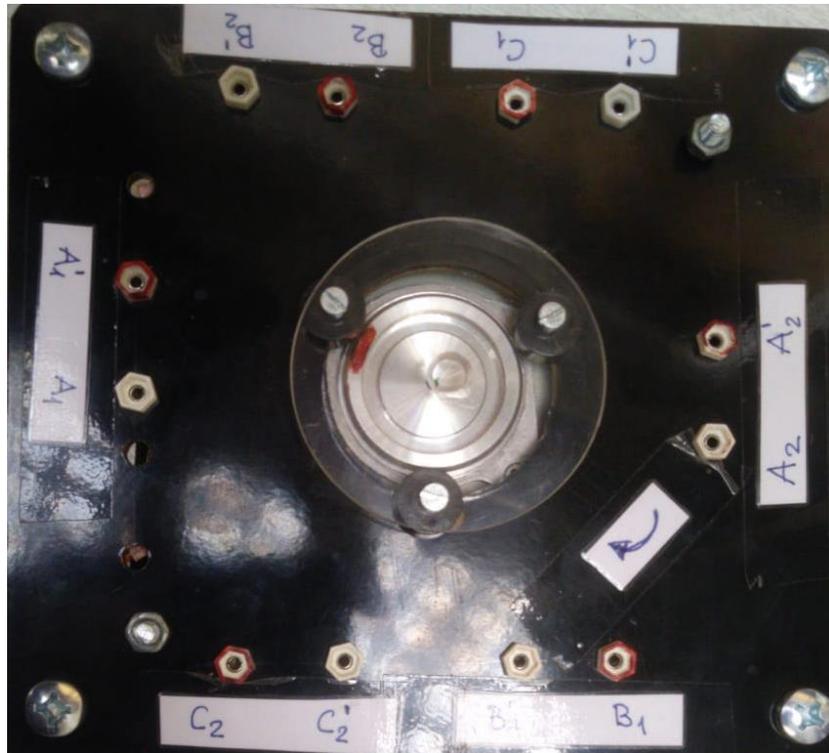


Figura 1: Alternador de 5V, en este TFG se hará funcionar como motor paso a paso



Figura 2: Máquina síncrona. Actúa como motor paso a paso o generador síncrono. A su derecha se puede ver su tabla de características



<i>distesa</i>			
Tipo	MA - 05	N°	G16659
Maquina SER+SHUNT+COMP		Hz	
0.44	Kw	0.6	CV.
220		V	2.7
		V	A
1500		R.p.m.	IP-2 3

Figura 3: Máquina de corriente continua. Actúa como motor o generador de corriente continua. A su derecha se encuentra su tabla de características



Tipo		AL - 406	
3- Gen		Nr. A-08027	
Δ 220	V	1.4 A	
0.3 KVA		cos φ 0.8	
1500		/min	50 Hz
Ex 220		V	1.4 A
Aisl Cl.	F	P 22	

Figura 4: Máquina síncrona. Actúa como motor paso a paso o generador síncrono. A su derecha se puede ver su tabla de características



Tipo	ANEDS 67/95	N° F.	G7766
Motor C/Cont.: C.V.	0.5/0.4	Ser.	C %ED
Inducido	220 V.	3.6 A.	1300/1500 R.p.m.
Excit.	SH-S- C	220/- V.	0.5/3.6 A.
Aisl. Cl.	B	Prot	P22 VDE 0530 76/1

Figura 5: Máquina de corriente continua. Actúa como motor o generador de corriente continua. A su derecha se encuentra su tabla de características



Figura 6: Sistema motor 1



Figura 7: Sistema motor 2

Anexo 5. Tablas de corrientes esperadas

En este anexo se pueden ver las tablas de corrientes esperadas en la máquina síncrona de la figura 2 del Anexo 4 al hacerla trabajar con una frecuencia de conmutación igual a 0Hz. Es decir, cuando se encuentra enclavada en una posición.

Tensión (V)	Resistencia (Ω)	Corriente (A)
5	26,65	0,188
10	26,65	0,375
15	26,65	0,563
20	26,65	0,750
25	26,65	0,938
30	26,65	1,126
35	26,65	1,313
40	26,65	1,501
45	26,65	1,689
50	26,65	1,876
55	26,65	2,064
60	26,65	2,251
65	26,65	2,439
70	26,65	2,627
75	26,65	2,814
80	26,65	3,002
85	26,65	3,189
90	26,65	3,377
95	26,65	3,565
100	26,65	3,752
105	26,65	3,940
110	26,65	4,128
115	26,65	4,315
120	26,65	4,503
125	26,65	4,690
130	26,65	4,878
135	26,65	5,066
140	26,65	5,253
145	26,65	5,441
150	26,65	5,629
155	26,65	5,816
160	26,65	6,004
165	26,65	6,191
170	26,65	6,379
175	26,65	6,567
180	26,65	6,754
185	26,65	6,942
190	26,65	7,129
195	26,65	7,317
200	26,65	7,505

Tabla 1: Tensión, resistencia y corriente en una de las fases del inducido del circuito equivalente de la máquina síncrona de la figura 2 del anexo 4

Tensión (V)	Resistencia (Ω)	Intensidad (A)
5	470	0,011
10	470	0,021
15	470	0,032
20	470	0,043
25	470	0,053
30	470	0,064
35	470	0,074
40	470	0,085
45	470	0,096
50	470	0,106
55	470	0,117
60	470	0,128
65	470	0,138
70	470	0,149
75	470	0,160
80	470	0,170
85	470	0,181
90	470	0,191
95	470	0,202
100	470	0,213
105	470	0,223
110	470	0,234
115	470	0,245
120	470	0,255
125	470	0,266
130	470	0,277
135	470	0,287
140	470	0,298
145	470	0,309
150	470	0,319
155	470	0,330
160	470	0,340
165	470	0,351
170	470	0,362
175	470	0,372
180	470	0,383
185	470	0,394
190	470	0,404
195	470	0,415
200	470	0,426

Tabla 2: Tensión, resistencia y corriente en el circuito de excitación del circuito equivalente de la máquina síncrona de la figura 2 del anexo 4

Anexo 6. Esquema de los circuitos desarrollados

En este anexo se pueden ver los esquemas de los circuitos físicos utilizados durante el desarrollo de este trabajo de fin de grado, los cuales se han construido a partir del esquema de la figura 1 del anexo 2.

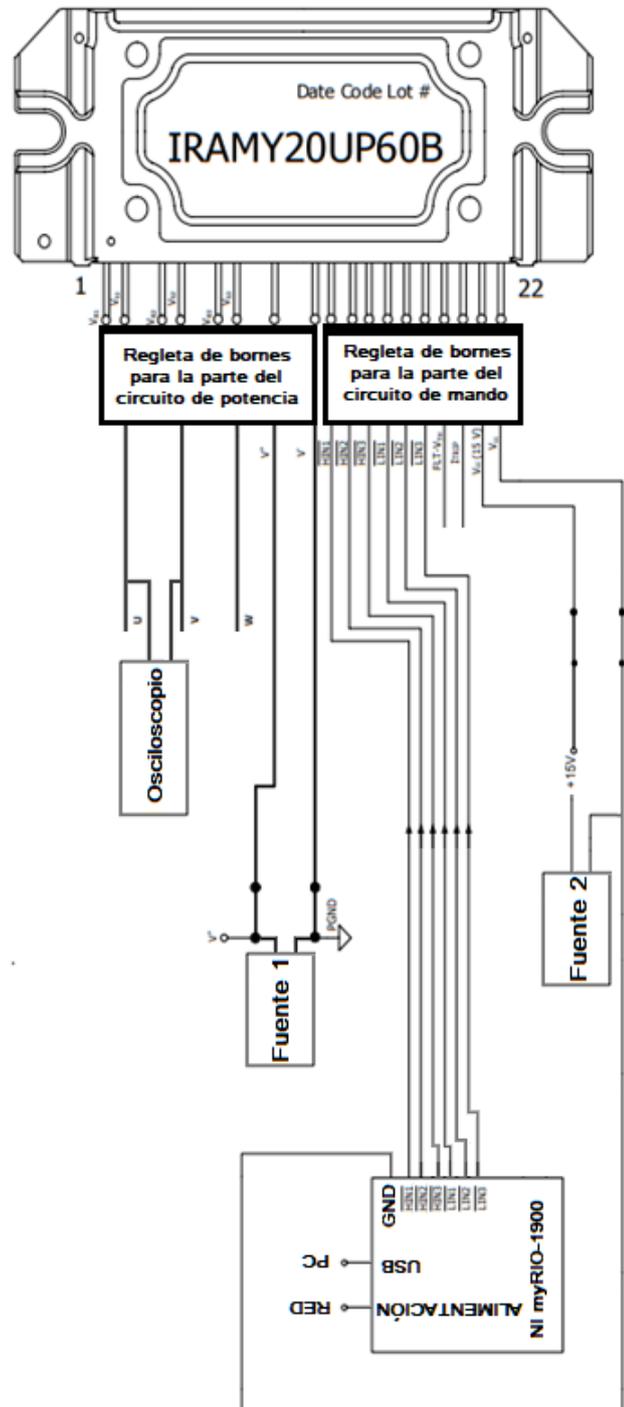


Figura 1: Esquema del circuito físico a montar para la comprobación del correcto funcionamiento del programa de control básico

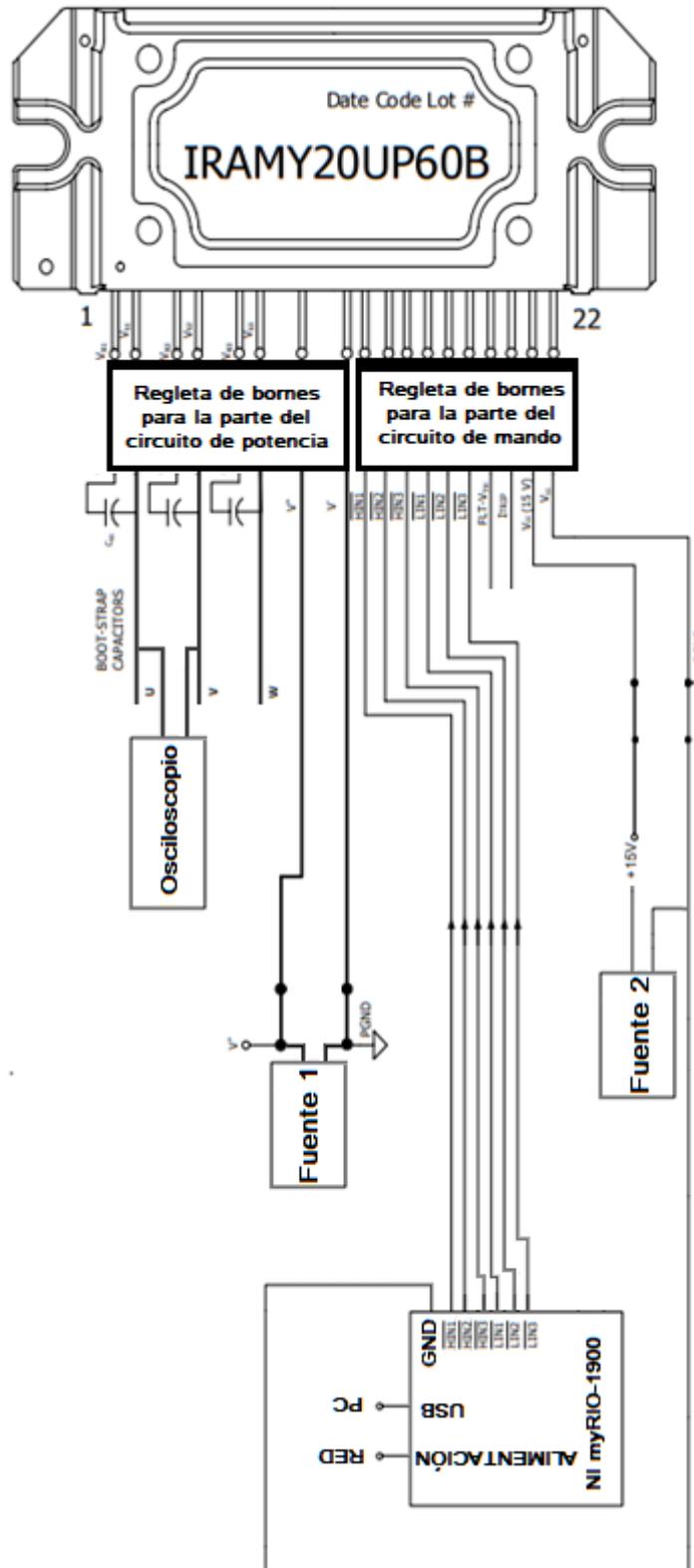


Figura 2: Esquema del circuito físico a crear con el fin de mejorar la respuesta producida por el circuito cuyo esquema se puede ver en la figura 1 de este anexo

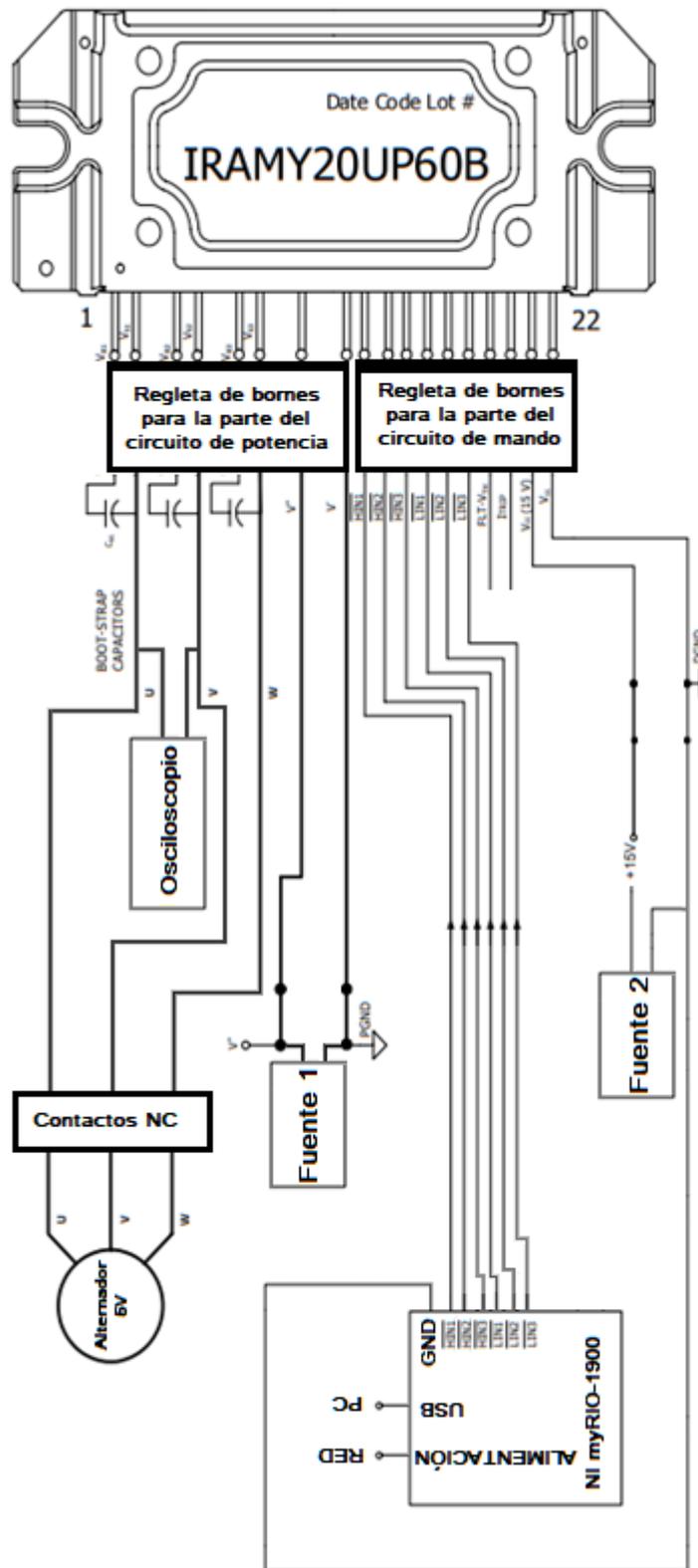


Figura 3: Esquema del circuito resultante de añadir los contactos NC y el alternador de 5V de tensión nominal al circuito esquematizado en la figura 2 de este anexo

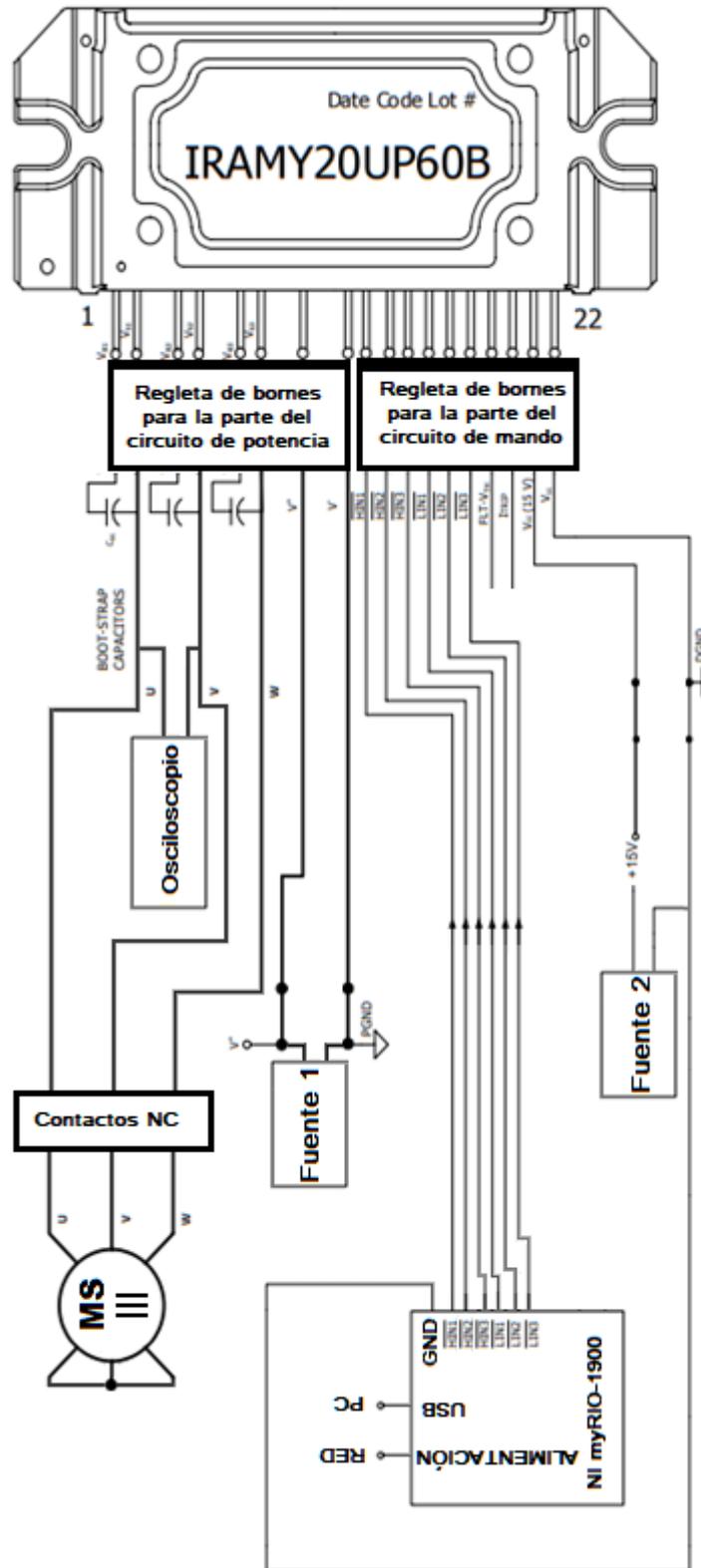


Figura 4: Esquema del circuito resultante de sustituir el alternador de la figura 3 de este anexo por una máquina síncrona

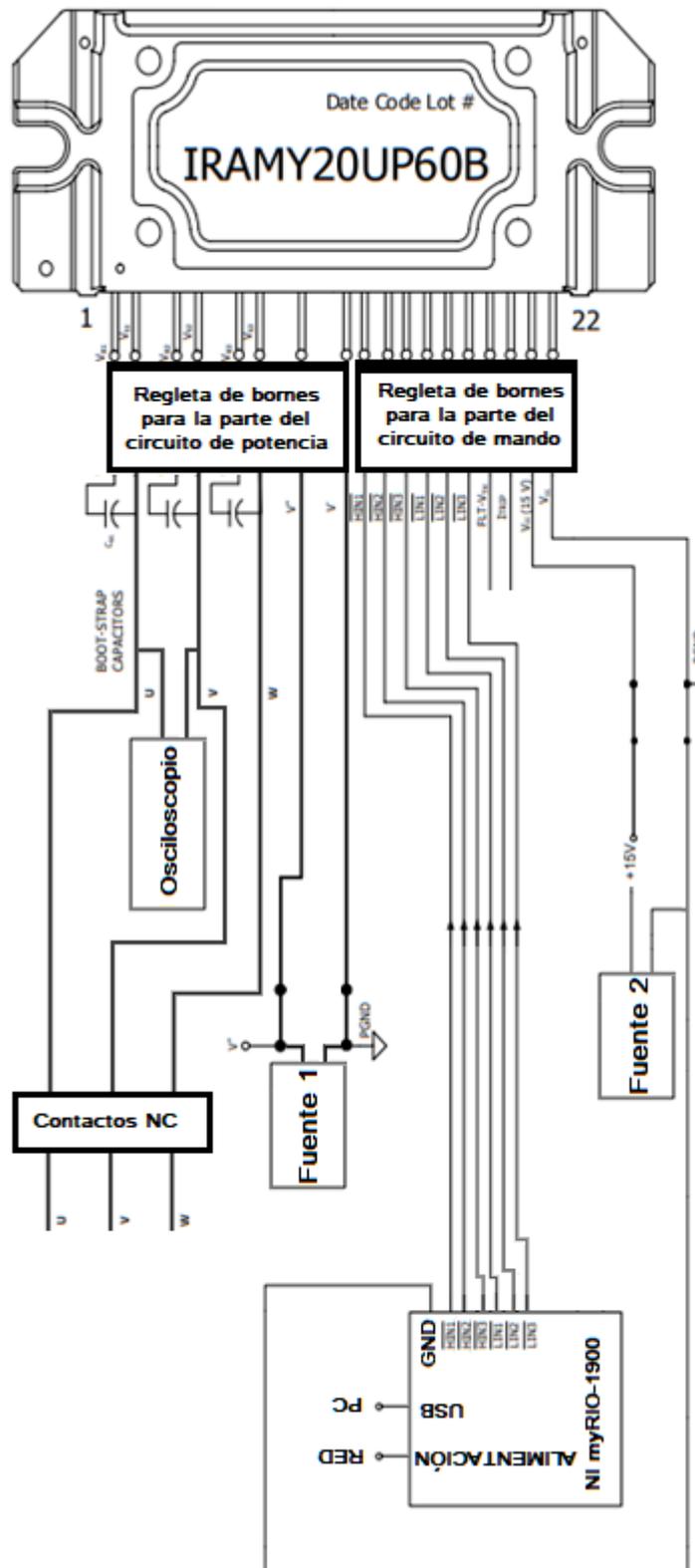


Figura 5: Esquema del circuito base para la obtención de los valores experimentales

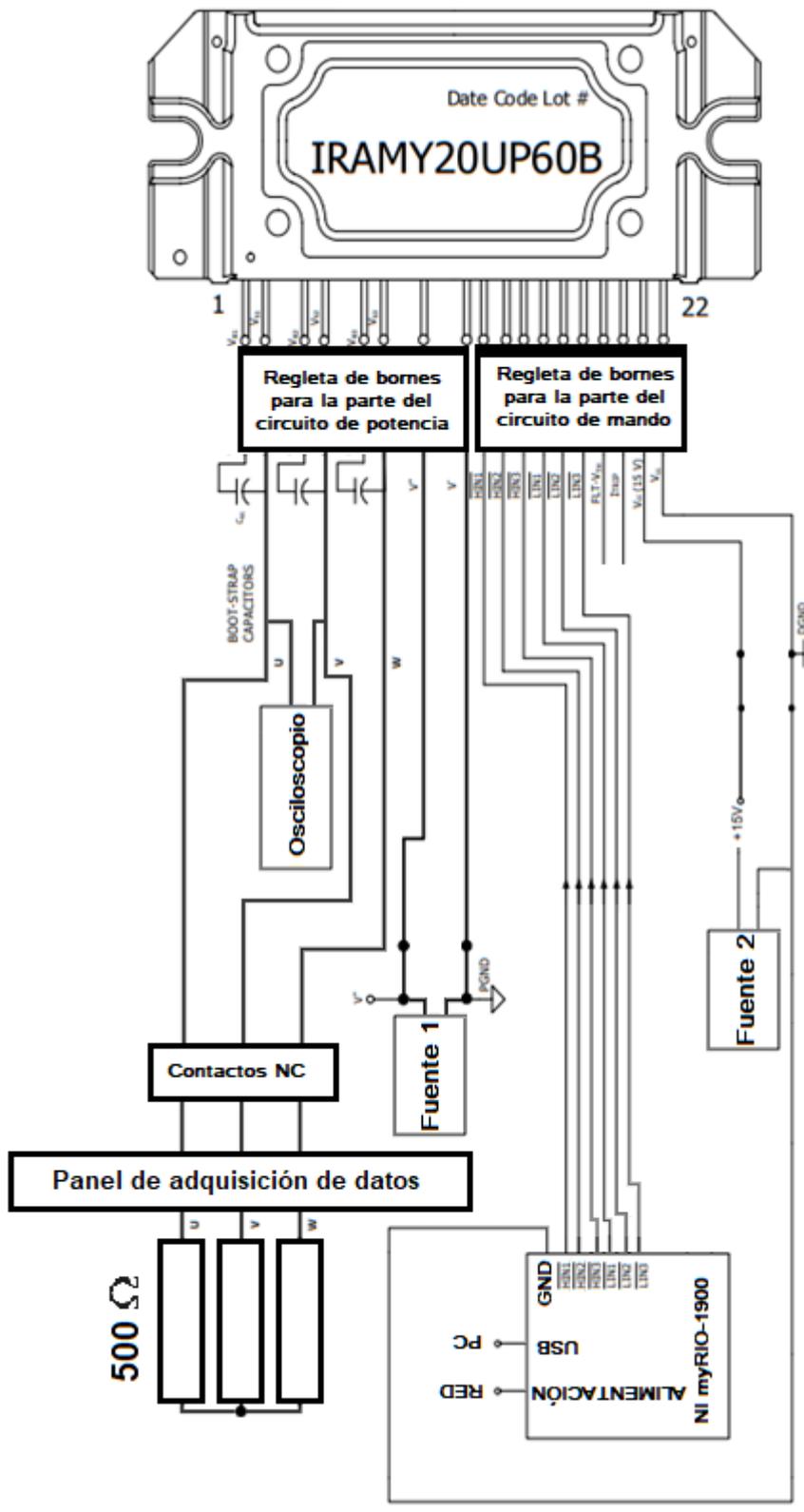


Figura 6: Esquema para la adquisición de datos con carga resistiva

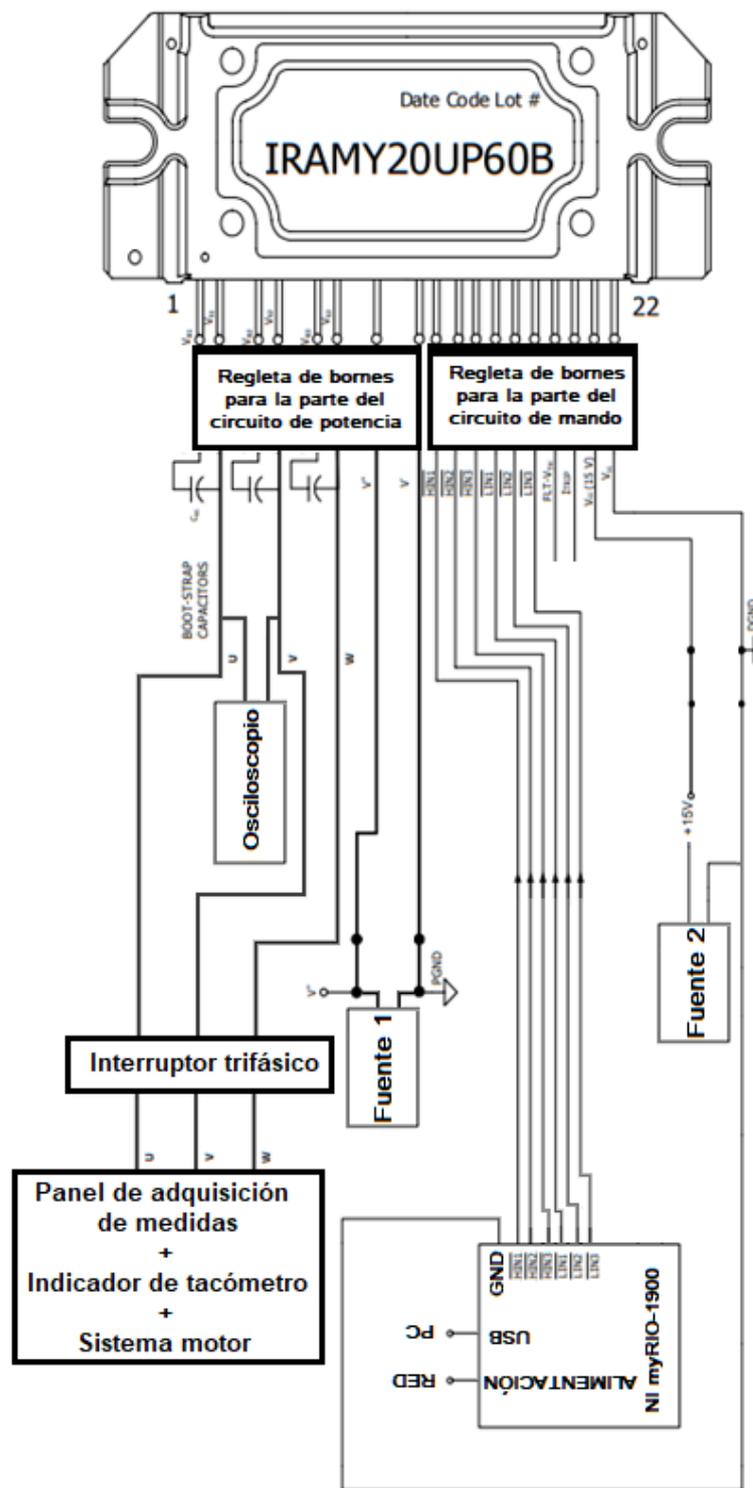


Figura 7: Esquema para la adquisición de datos del sistema de tracción

El sistema motor de la figura 7 puede funcionar de dos formas siendo estas las siguientes:

1. Representada en la figura 8 de este anexo, en ella la máquina síncrona actúa como motor paso a paso y la máquina de corriente continua como generador de corriente continua.
2. Representada en la figura 9 de este anexo, en ella la máquina síncrona actúa como generador síncrono y la máquina de corriente continua como motor de corriente continua.

Nota: Los voltímetros y amperímetros representados en las figuras 8 y 9 son los valores que se han de enviar al panel de adquisición de datos de la figura 3 del anexo 3.

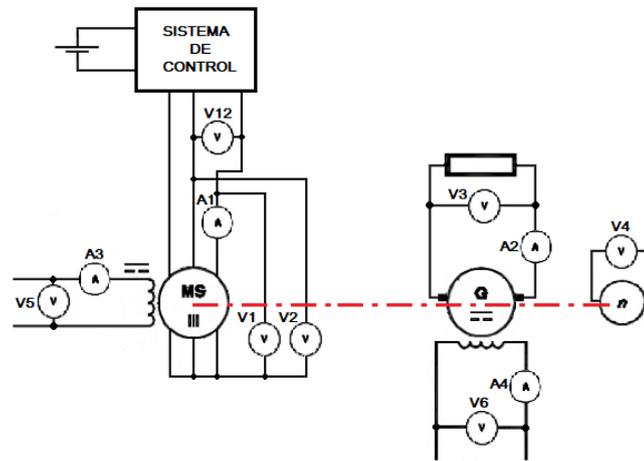


Figura 8: Sistema motor funcionando la máquina síncrona como motor paso a paso

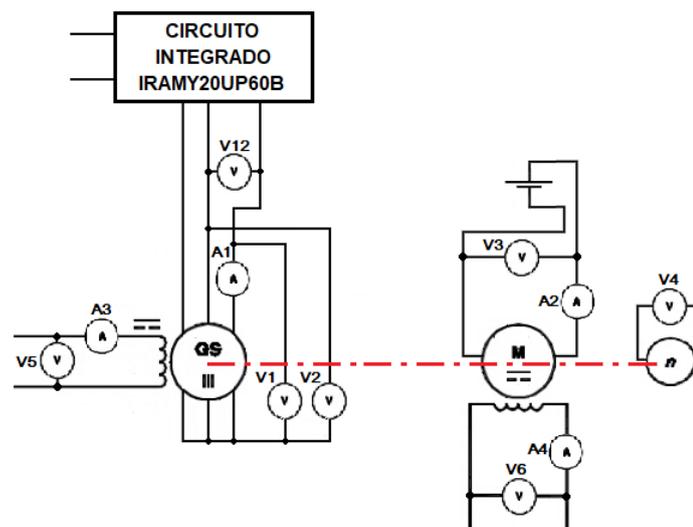


Figura 9: Sistema motor funcionando la máquina síncrona como generador síncrono

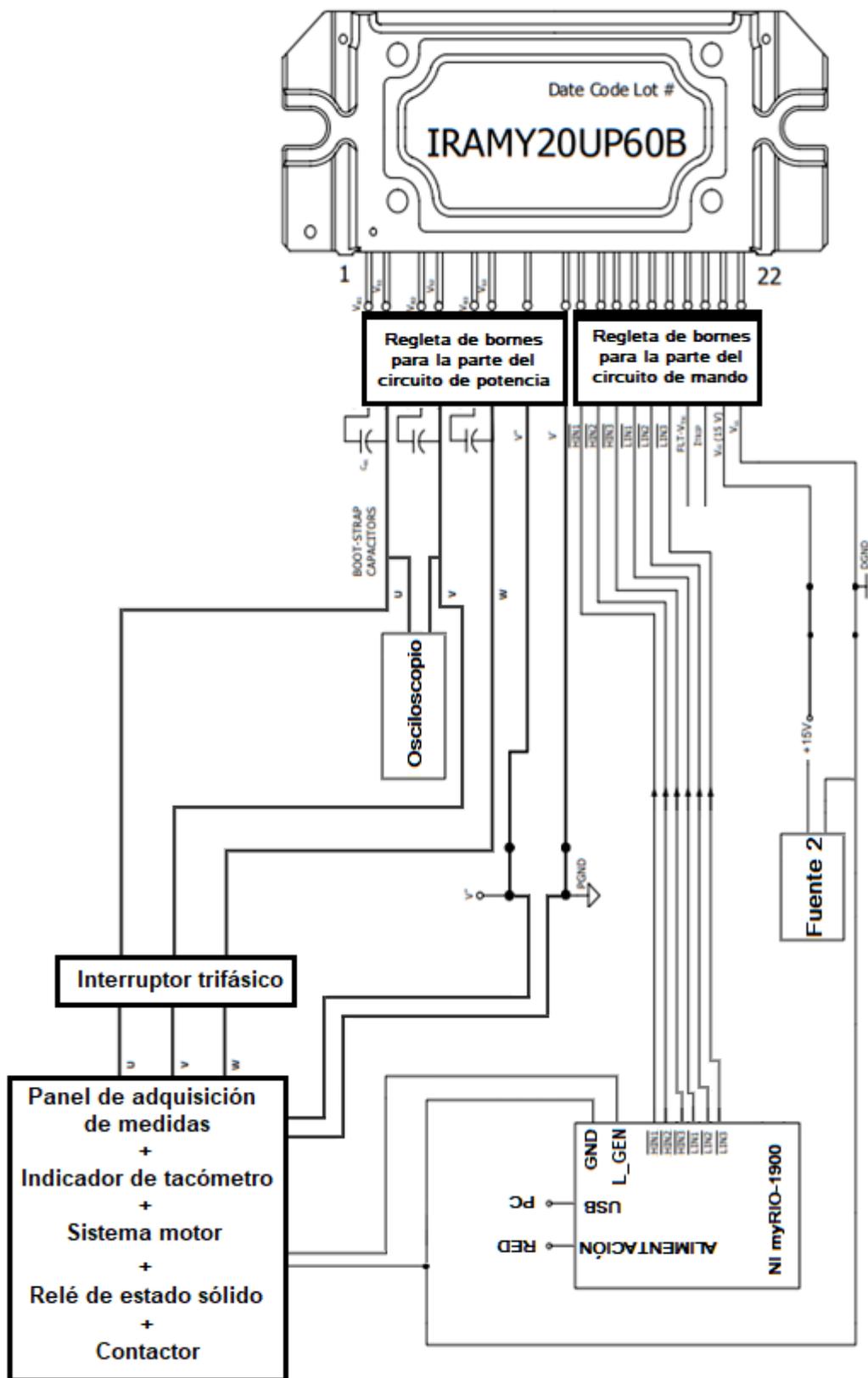


Figura 10: Esquema del circuito que conforma el sistema de tracción

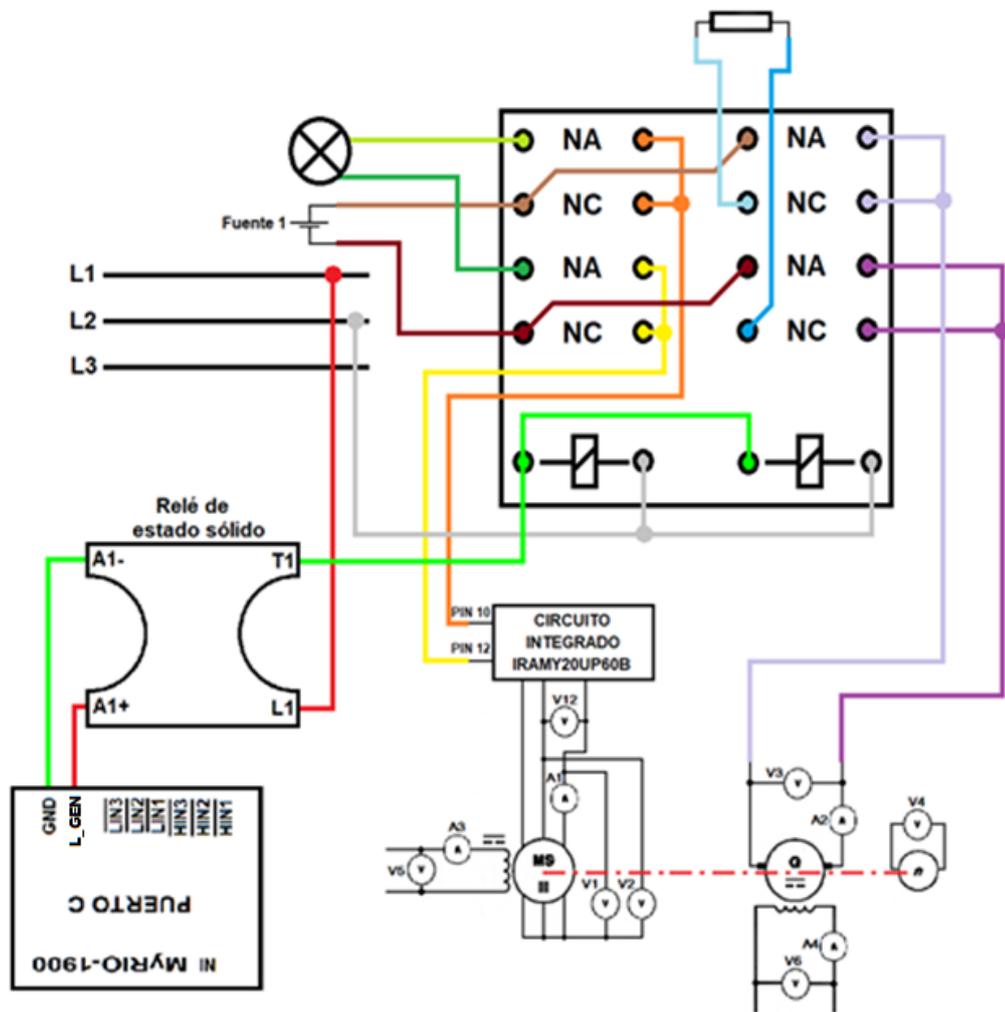


Figura 11: Esquema del sistema motor, contactores y relé de estado sólido para el circuito de la figura 10

Anexo 7. Manual de usuario

Lo primero que hay que hacer es abrir el programa, para ello entramos en la carpeta programa y luego en la subcarpeta programa de control definitivo (motor y generador). Una vez dentro de esa subcarpeta se procede a abrir el archivo **Programa de control definitivo (motor y generador).lvproj** usando para ello el programa NI LabVIEW 2015, o una versión posterior del mismo.

Hecho esto se abre una ventana en LabVIEW la cual, tras desplegar los archivos que cuelgan de NI-myRIO-1900-030536ac (172.22.11.2), nos deja con la imagen representada en la figura 1.

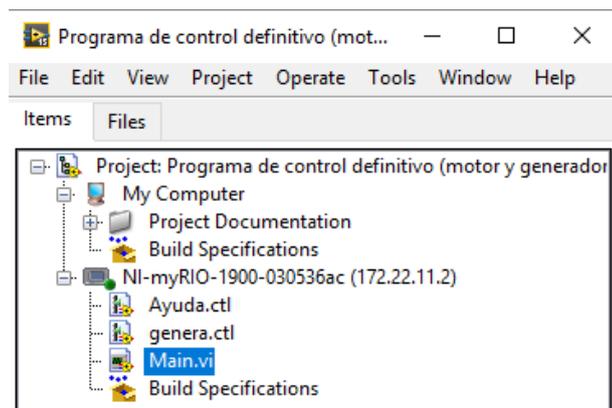


Figura 1: Ventana general del programa de control

Posteriormente se procede a abrir el archivo **Main.vi** resaltado en azul en la figura 1 con lo que conseguiremos que se abra una nueva ventana la cual contendrá la interfaz de usuario del programa de control siendo esta constituida por la ventana Panel Frontal de dicho programa (ver figura 2).

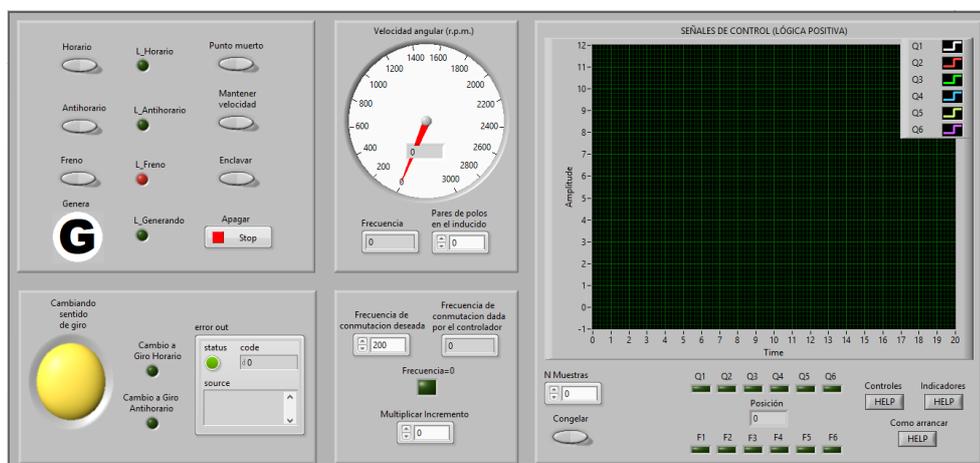


Figura 2: Interfaz de usuario

Con el fin de poder ver los distintos componentes que la conforman en las figuras 3 y 4 se encuentra la representación de la misma dividida en dos partes.

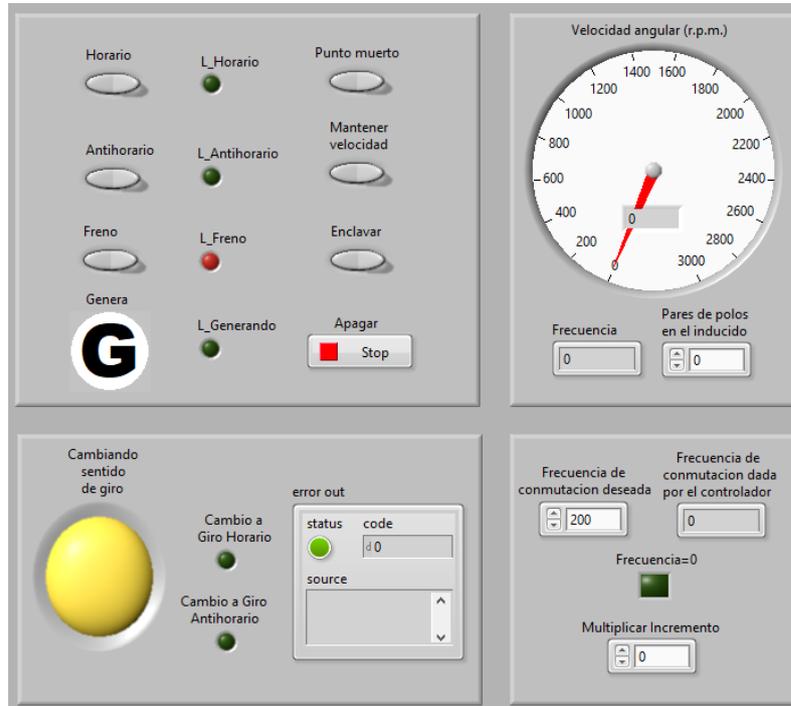


Figura 3: Parte de la interfaz de usuario que controla el sistema de tracción

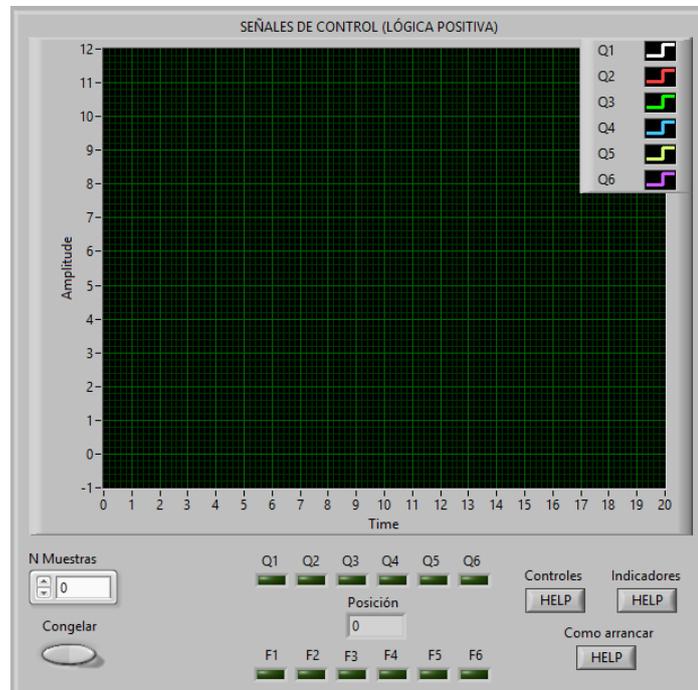


Figura 4: Parte de la interfaz de usuario que indica el valor de las señales de control y posición del motor paso a paso

Una vez hecho esto es necesario antes de arrancar el programa seguir los siguientes pasos:

1. Introducir en el bloque Pares de polos en el inducido de la figura 3 el número de pares de polos que tiene en el inducido la máquina síncrona a utilizar.
2. Introducir en el bloque Frecuencia de conmutación deseada, la frecuencia de conmutación a la que queremos que trabaje el programa de control y por ende la máquina síncrona. Si tiene un valor negativo o cero el programa la interpreta como si valiese 0.
3. Introducir en el bloque Multiplicar incremento por cuanto queremos multiplicar el incremento/decremento de la frecuencia de conmutación por ciclo de lectura del programa de control. Los diversos valores de incremento se pueden ver en la tabla 1. Tras varias pruebas se recomienda introducir en este bloque un valor de 5.
4. Introducir en el bloque N Muestras el número de valores, por señal de control, a almacenar en un array para su representación en la gráfica SEÑALES DE CONTROL (LÓGICA POSITIVA). Un buen valor para esta es 50.

Con el fin de hacer más visual la tabla 1 en ella al valor de frecuencia de conmutación dado por el controlador (figura 3) se le llama S y al del bloque Multiplicar incremento N.

Valor de la frecuencia de conmutación dado por el controlador	Formula del incremento/decremento
$S \leq 0$	$S = 0$
$0 < S \leq 10$	$S = S \pm (0.1 * N)$
$10 < S \leq 30$	$S = S \pm (0.05 * N)$
$30 < S$	Si $30 < S \leq 100$: $S = S \pm ((0.025 * N) / (S / 5))$
	Si $100 < S$: $S = S \pm ((0.025 * N) / ((S / 5) * 3))$

Tabla 1: Formulas para el cálculo del incremento por ciclo de lectura

Con estos datos se procede a hablar de los distintos controles e indicadores de los que consta este programa los cuales se encuentran explicados en las tablas 3 y 4.

Nombre del control	Función que desempeña
INTERRUPTORES	
Horario	Indica al programa que queremos que el motor gire en sentido horario.
Antihorario	Indica al programa que queremos que el motor gire en sentido antihorario.
Freno	Indica al programa que queremos frenar.
Genera	Al estar accionado permite la posibilidad de que la máquina síncrona pase de actuar como motor paso a paso a generador síncrono.
Punto muerto	Al accionarse deshabilita los interruptores Horario y Antihorario, las luces L_Horario, L_Antihorario, Cambiando sentido de giro, Cambio a Giro Horario, Cambio a Giro Antihorario y todas las variables correspondientes al protocolo de inversión de giro.
Mantener velocidad	Mantiene la frecuencia de conmutación que tenía el programa de control en el momento de la activación de este interruptor, aunque esta no coincida con la deseada.
Enclavar	Enclava al motor en la posición que tuviese en ese momento.
Apagar	Finaliza el programa de control.
Congelar	Congela la gráfica SEÑALES DE CONTROL (LÓGICA POSITIVA).
INTERRUPTORES DE AYUDA	
Controles	Explica la función que desempeña cada uno de los controles de la interfaz de usuario.
Indicadores	Explica que muestra cada uno de los indicadores de la interfaz de usuario.
Como arrancar	Explica que hacer antes de arrancar el programa de control así como una serie de datos que es interesante conocer para el correcto funcionamiento del programa de control.

Nombre del control	Función que desempeña
CONTROLES NUMÉRICOS	
Pares de polos en el inducido	En él se introduce el número de pares de polos que tiene la máquina síncrona con la que se va a trabajar en el inducido.
Frecuencia de conmutación deseada	En él se introduce la frecuencia de conmutación a la que queremos que funcione el programa de control, esta se introduce en hercios.
Multiplicar incremento	En él se introduce por cuanto se ha de multiplicar el incremento en la frecuencia por ciclo de lectura (ver tabla 1).
N Muestras	En él se introduce el tamaño de los array que contendrán los valores de las señales de control a representar en la gráfica de la figura 4

Tabla 2: Controles de la interfaz de usuario

Nombre del indicador	Función que desempeña
INDICADORES LUMINOSOS	
L_Horario	Indica que el motor está girando en sentido horario.
L_Antihorario	Indica que el motor está girando en sentido antihorario.
L_Freno	Indica que está accionado el interruptor Freno.
L_Generando	Indica que la máquina síncrona está actuando como generador.
Cambiando sentido de giro	Indica que está activo el protocolo de inversión de giro.
Cambio a Giro Horario	Indica que estamos disminuyendo la velocidad de giro en sentido antihorario para proceder a cambiar el sentido de giro a horario.

Nombre del indicador	Función que desempeña
Cambio a Giro Antihorario	Indica que estamos disminuyendo la velocidad de giro en sentido horario para proceder a cambiar el sentido de giro a antihorario.
Frecuencia=0	Indica que la frecuencia de conmutación es igual a 0Hz.
Luces Q1 a Q6	Indican, en lógica negativa, el valor de las señales de control. Cuando están encendidas valen 1 lógico.
Luces F1 a F6	Indican la posición del motor en un equivalente de motor síncrono trifásico con un par de polos en el inducido.
INDICADORES GRÁFICOS	
Velocidad angular (r.p.m.)	Indica en revoluciones por minuto el valor de la velocidad angular de la máquina síncrona.
SEÑALES DE CONTROL (LÓGICA POSITIVA)	Indica el valor de las señales de control en lógica positiva.
INDICADORES NUMÉRICOS	
Frecuencia	Indica, en hercios, la frecuencia del motor.
Frecuencia de conmutación dada por el controlador	Indica en hercios la frecuencia de conmutación a la que trabaja el programa de control (1/tiempo que permanece en una posición).
Posición	Da la posición en que se encuentra el motor en equivalente a una máquina síncrona trifásica con un par de polos en el inducido.
Error out	Indica si en el programa se ha producido algún error.

Tabla 3: Indicadores de la interfaz de usuario

Para concluir es importante conocer la siguiente información con el fin de poder llevar a cabo un adecuado manejo del programa de control:

1. Existe un protocolo de inversión de giro, por lo cual no es necesario detener el motor para invertir el sentido de giro.
2. Si se ha activado el protocolo de inversión de giro y se desea cancelarlo, pues se quiere continuar girando en el sentido de giro que tenía la máquina previamente, se ha de accionar el interruptor Punto muerto, desaccionarlo y luego pulsar el interruptor con el sentido de giro que se tenía previo a la activación del protocolo de inversión de giro.
3. Para que la máquina síncrona pase de actuar como motor paso a paso a generador síncrono es necesario tener accionados los interruptores Freno y Genera.
4. Si Multiplicar incremento vale 0, la frecuencia de conmutación dada por el controlador no crece ni decrece.
5. Para que la luz de Frecuencia=0 esté encendida es necesario que los bloques de Frecuencia de conmutación deseada y Frecuencia de conmutación dada por el controlador valgan 0 o que este último valga 0 y esté accionado el interruptor Freno.
6. Para poder accionar el interruptor Enclavar es necesario que la luz Frecuencia=0 esté encendida.
7. Para desactivar el interruptor Mantener velocidad se puede desaccionar manualmente o pulsar el interruptor Freno.