



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

FERNANDO DÍAZ GONZÁLEZ

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE SINCRONIZACIÓN MANUAL PARA MÁQUINAS SÍNCRONAS

Autor: Fernando Díaz González

Director: Pablo Frías Marín

Madrid

Junio 2015

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN ACCESO ABIERTO (RESTRINGIDO) DE DOCUMENTACIÓN

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. **FERNANDO DÍAZ GONZÁLEZ**, como **ALUMNO** de la UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS (COMILLAS), **DECLARA**

que es el titular de los derechos de propiedad intelectual, objeto de la presente cesión, en relación con la obra **PROYECTO FIN DE GRADO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE SINCRONIZACIÓN MANUAL PARA MÁQUINAS SÍNCRONAS**, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual como titular único o cotitular de la obra.

En caso de ser cotitular, el autor (firmante) declara asimismo que cuenta con el consentimiento de los restantes titulares para hacer la presente cesión. En caso de previa cesión a terceros de derechos de explotación de la obra, el autor declara que tiene la oportuna autorización de dichos titulares de derechos a los fines de esta cesión o bien que retiene la facultad de ceder estos derechos en la forma prevista en la presente cesión y así lo acredita.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad y hacer posible su utilización de *forma libre y gratuita (con las limitaciones que más adelante se detallan)* por todos los usuarios del repositorio y del portal e-ciencia, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución, de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra (a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión.

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia, el repositorio institucional podrá:

(a) Transformarla para adaptarla a cualquier tecnología susceptible de incorporarla a internet; realizar adaptaciones para hacer posible la utilización de la obra en formatos electrónicos, así como incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar "marcas de agua" o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.

(b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato. .

(c) Comunicarla y ponerla a disposición del público a través de un archivo abierto institucional, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.²

(d) Distribuir copias electrónicas de la obra a los usuarios en un soporte digital.³

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra que cede con carácter no exclusivo a la Universidad por medio de su registro en el Repositorio Institucional tiene derecho a:

a) A que la Universidad identifique claramente su nombre como el autor o propietario de los derechos del documento.

b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.

c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada. A tal fin deberá ponerse en contacto con el vicerrector/a de investigación (curiarte@rec.upcomillas.es).

d) Autorizar expresamente a COMILLAS para, en su caso, realizar los trámites necesarios para la obtención del ISBN.

² En el supuesto de que el autor opte por el acceso restringido, este apartado quedaría redactado en los siguientes términos:

(c) Comunicarla y ponerla a disposición del público a través de un archivo institucional, accesible de modo restringido, en los términos previstos en el Reglamento del Repositorio Institucional

³ En el supuesto de que el autor opte por el acceso restringido, este apartado quedaría eliminado.

d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.

b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.

c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

a) Deberes del repositorio Institucional:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.

- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.

- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.

b) Derechos que se reserva el Repositorio institucional respecto de las obras en él registradas:

- retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 14 de JULIO de 2015

ACEPTA

Fdo. Fernando

Proyecto realizado por el alumno/a:

FERNANDO DÍAZ GONZÁLEZ

Fdo.: Fernando.....

Fecha: 14./ 7./ 2015

Autorizada la entrega del proyecto cuya información no es de carácter
confidencial

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

PABLO FRÍAS MARÍN

Fdo.: Pablo.....

Fecha: 14./ 7./ 2015

Vº Bº del Coordinador de Proyectos

FERNANDO DE CUADRA GARCÍA

Fdo.:

Fecha://

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE SINCRONIZACIÓN MANUAL PARA MÁQUINAS SÍNCRONAS

Autor: Díaz González, Fernando.

Director: Frías Marín, Pablo.

Entidad colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto trata de la construcción de un sincronoscopio para permitir la sincronización de una máquina con la red eléctrica. Este proceso no es de carácter actual, sino que se lleva realizando durante muchos años a lo largo de la historia. La cuestión a tratar es cómo se ha realizado dicha conexión de la máquina con la red.

Las condiciones de acoplamiento de una máquina síncrona a la red eléctrica son las siguientes:

- Las tensiones de la red y de la máquina síncrona deben coincidir en módulo y fase. Para ello se regula I_{exc} para igualar módulos.
- La frecuencia de giro del alternador y de la red deben ser iguales. Para ello se regula I_{exc_CC} .
- La secuencia de fases del alternador y de la red deben ser iguales. Esto quiere decir que el ángulo existente entre cada una de las fases del sistema trifásico de la red y del alternador sea 0° ya que en caso contrario se podría provocar un cortocircuito. Para ello se comprueba con un secuencímetro.

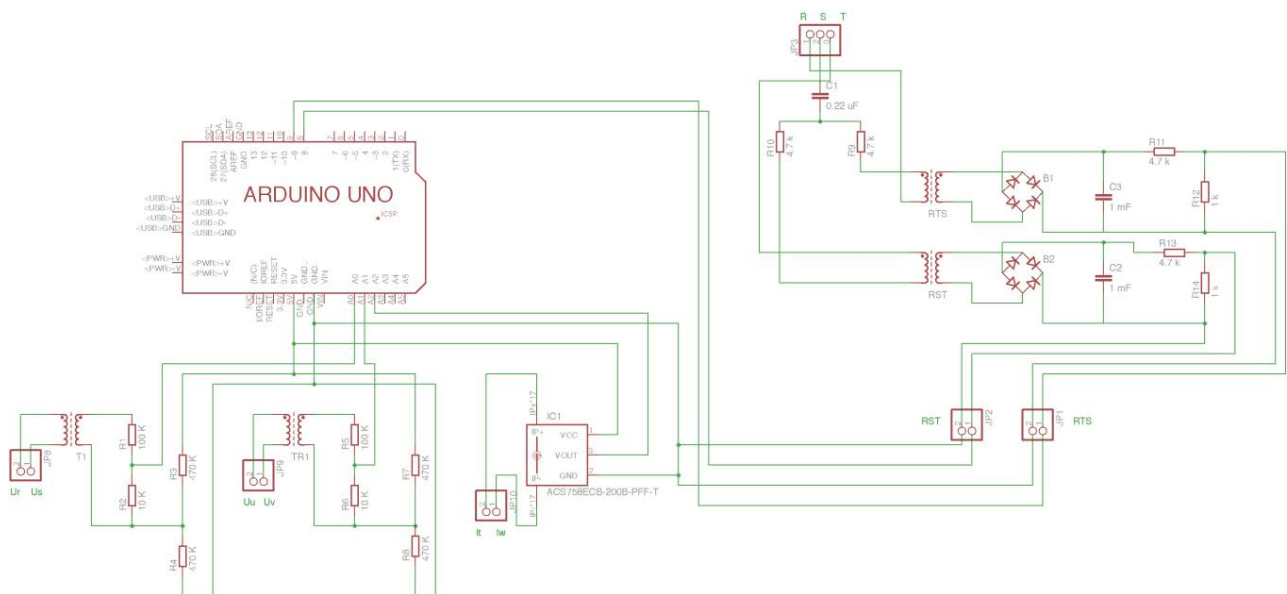
DESCRIPCIÓN DE HARDWARE

El hardware utilizado para llevar a cabo el control y la comprobación de las condiciones anteriores es una placa de Arduino Uno. Las características de esta placa se muestran en la tabla siguiente:

Microcontroller	ATmega328	Flash Memory	32 kB (ATmega328) of which 0.5 kB used by bootloader
Operating Voltage	5 V	SRAM	2 kB (ATmega328)
Input Voltage (Recommended)	7-12 V	EEPROM	1 kB (ATmega328)
Input Voltage (limits)	6-20 V	Clock speed	16 MHz
Digital I/O pins	14 (of which 6 provide PWM output)	Length	68.6 mm
Analog Input pins	6	Width	53.4 mm
DC Current per I/O pin	40 mA	Weight	25 g
DC Current for 3.3 V pin	50 mA		

Los circuitos conectados a las entradas analógicas de la placa son aquéllos destinados a medir la tensión tanto en el lado de la red como en el de la máquina síncrona, y la medida de intensidad para comprobar que la frecuencia es la misma (en este caso, la intensidad vale 0). Para conseguir una entrada de tensión en la placa, se ha utilizado la sonda de corriente LTS 6 NP. Por último, es necesario que la secuencia de fases de la máquina síncrona sea la misma que la de la red. Para ello, se construye un secuencímetro que interactúa con Arduino a través de una entrada digital. Debido a las características de los pines digitales, se tiene que rectificar la señal para obtener un valor promedio de corriente continua. El hardware utilizado es un puente de diodos más un condensador actuando como filtro. La medida del módulo de las tensiones se realiza con transformadores y divisores de tensión de manera que en primer lugar se reduce el módulo hasta conseguir un valor inferior a 5 V, y además se añade un offset para que no haya tensión negativa, ya que Arduino sólo lee entre 0 V y 5 V.

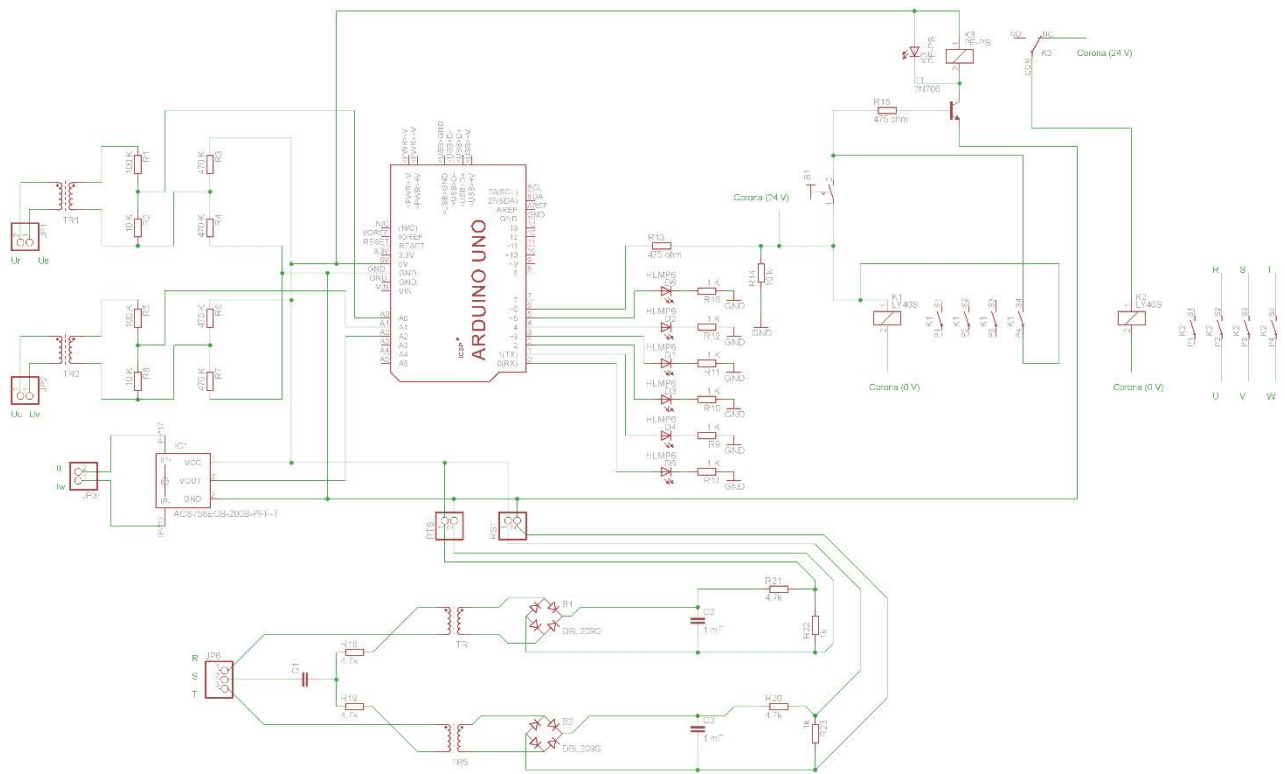
El esquema de los circuitos de entrada se muestra en la siguiente figura:



El circuito que proporciona el disparo de un relé para sincronizar la máquina con la red se conecta a un pin digital de salida de la placa. Hay que tener en cuenta que al ser un equipo manual, la sincronización la decide el propio usuario una vez que se cumplen las condiciones mencionadas anteriormente, por lo que será necesario incluir un pulsador acompañado de un relé para que mantenga dicha posición.

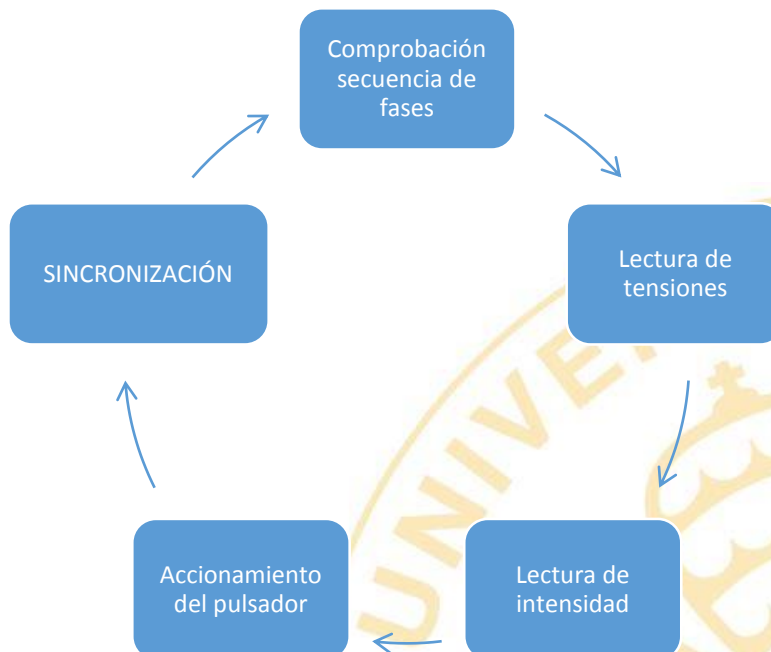
El esquema del circuito de salida se muestra en la imagen siguiente:

3



DESCRIPCIÓN DE SOFTWARE

Todo el circuito diseñado anteriormente es controlado mediante el software de la placa de Arduino, siguiendo el siguiente diagrama de flujo:



Este diagrama de flujo tiene una característica fundamental: no permite pasar a comprobar una característica si la anterior es incorrecta. Por ejemplo, no permite la lectura de intensidad si las tensiones no coinciden en módulo, por lo que se garantiza que al final del bucle las condiciones se hayan cumplido y la sincronización sea segura, para evitar daños en la máquina eléctrica.

RESULTADOS

Para concluir este proyecto, se ensaya sobre una máquina en el laboratorio situado en ICAI, obteniendo un resultado satisfactorio. Se comprueba como el sincronoscopio construido responde a las órdenes programadas en Arduino, y lleva a cabo todas las medidas correspondientes a la tensión e intensidad, encendiendo los leds correspondientes y activando la salida y el pulsador que permite el acoplamiento entre la máquina síncrona y la red eléctrica.



DESIGN AND MANUFACTURING OF A MANUAL SYNCHRONOSCOPE FOR SYNCHRONOUS MACHINES

This project is about the construction of a synchronoscope which allows the synchronisation of a machine with the electrical network. This is not a current process since it has been carried out for many years through history. The main issue dealt with in this project is how this machine's connection into the electrical network has been done.

The conditions for the connection of a synchronous machine into the electrical network are the following ones:

- The electrical network's and the synchronous machine's voltage must coincide in module and phase. To do so, I_{exc} is adjusted so as to equalize the modules.
- The alternator's frequency must be equal to the electrical network's frequency. In order to do so, I_{exc_CC} is adjusted.
- The alternator's phases sequence must be equal to the one of the electrical network. This means that the angle existing between each phase of the electrical network's three-phase system and the alternator's one must be zero because, otherwise, there will be a short-circuit. To do so, the phase sequence indicator is checked.

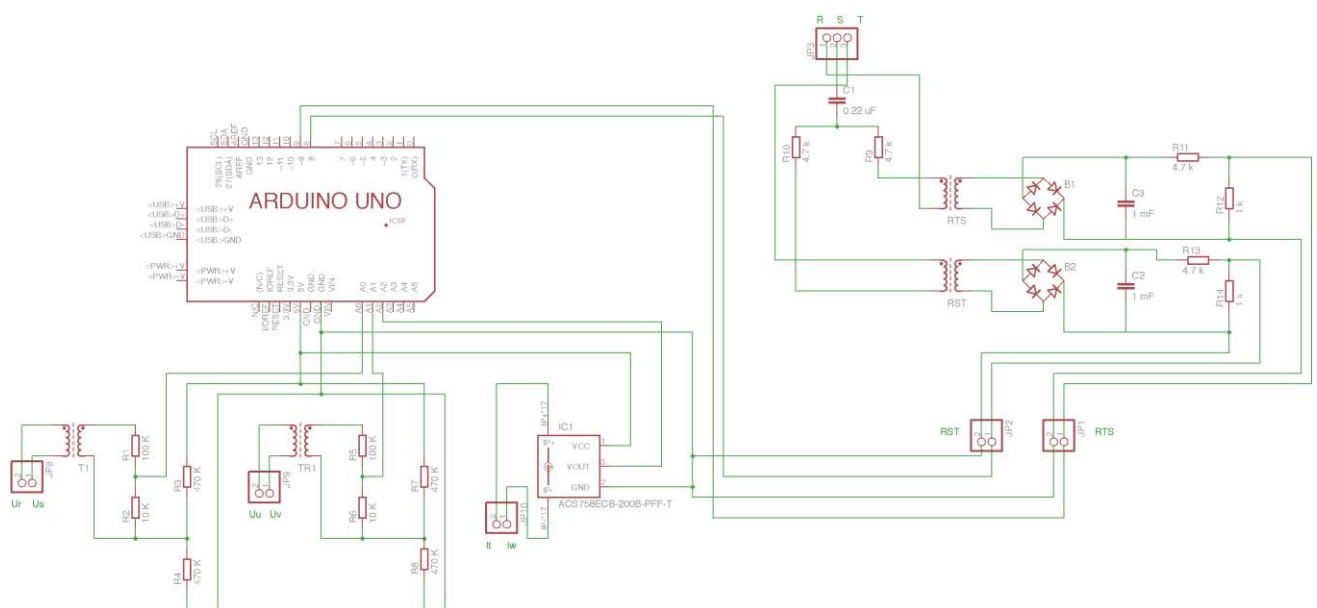
HARDWARE'S DESCRIPTION

The hardware used to carry out the control and the verification of the above-mentioned conditions is an Arduino board. This board characteristics are shown in the next table:

Microcontroller	ATmega328	Flash Memory	32 kB (ATmega328) of which 0.5 kB used by bootloader
Operating Voltage	5 V	SRAM	2 kB (ATmega328)
Input Voltage (Recommended)	7-12 V	EEPROM	1 kB (ATmega328)
Input Voltage (limits)	6-20 V	Clock speed	16 MHz
Digital I/O pins	14 (of which 6 provide PWM output)	Length	68.6 mm
Analog Input pins	6	Width	53.4 mm
DC Current per I/O pin	40 mA	Weight	25 g
DC Current for 3.3 V pin	50 mA		

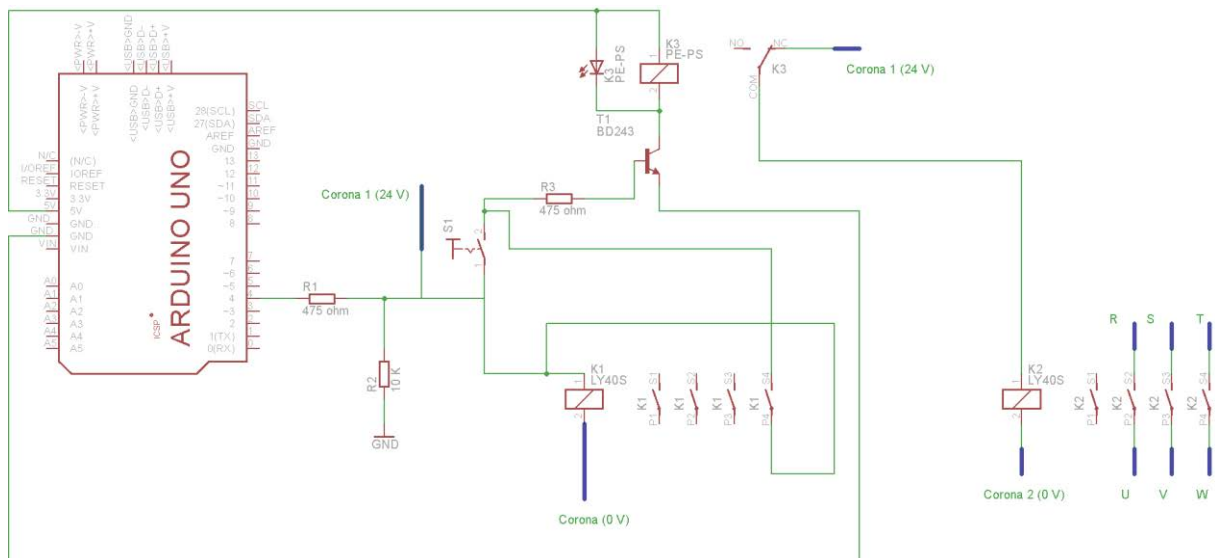
The circuits connected to the board's analogue input are those allocated to measure the voltage both of the electrical network and of the synchronous machine, as well as the intensity measurement to check that the frequency is equal (in this case, the intensity is zero). In order to get a voltage input into the board, a current transducer LTS 6 NP is used. Finally, it is necessary for the synchronous machine's phase frequency to be equal to the one of the electrical network. To do so, a phase sequence indicator which interacts with Arduino through a digital input is built. Due to the digital pins' characteristics, the signal has to be rectified so as to obtain an average value of the direct current. The hardware used is a diode bridge plus a capacitor working as a filter. The measurement of the voltage's module is done with transformers and voltage dividers so that, first, the module is reduced until getting a value below 5 V and, moreover, an offset is added so as to avoid negative voltage since Arduino only works with between 0 V and 5 V.

The outline of the input's circuit is shown in the next figure:



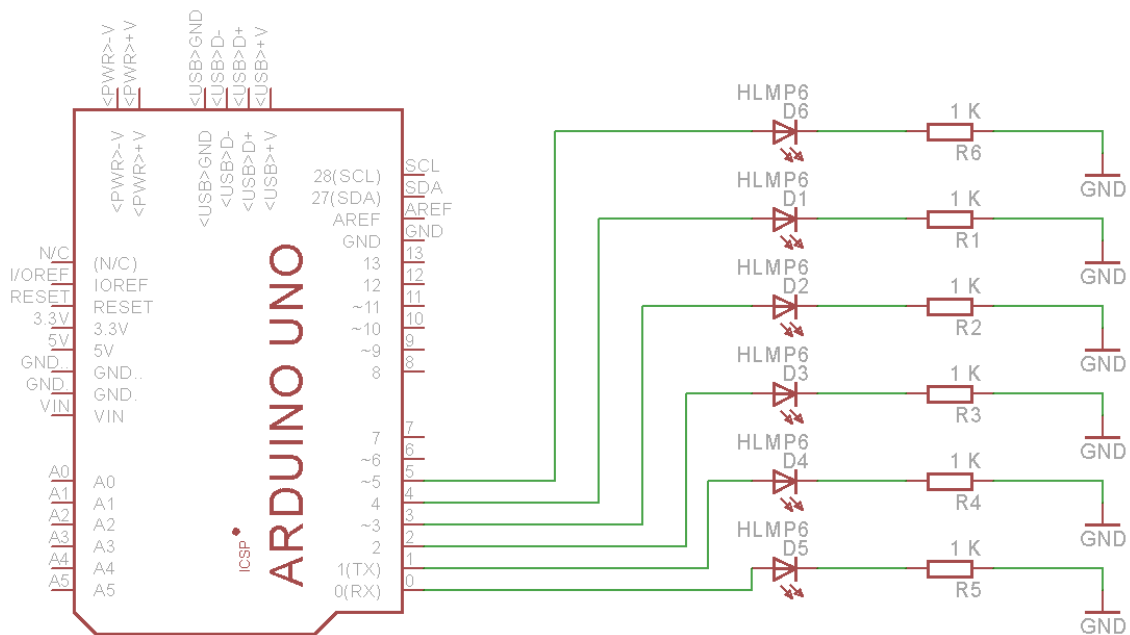
The circuit which provides with an output relay in order to synchronise the machine with the electrical network is connected to a digital output pin of the board. It should be taken into account that, since it is hand-held equipment, the synchronisation is decided by the user once the aforementioned conditions are satisfied; therefore, it is necessary to include a switch together with a relay so as to maintain such a position.

The outline of the output's circuit is shown in the next image:

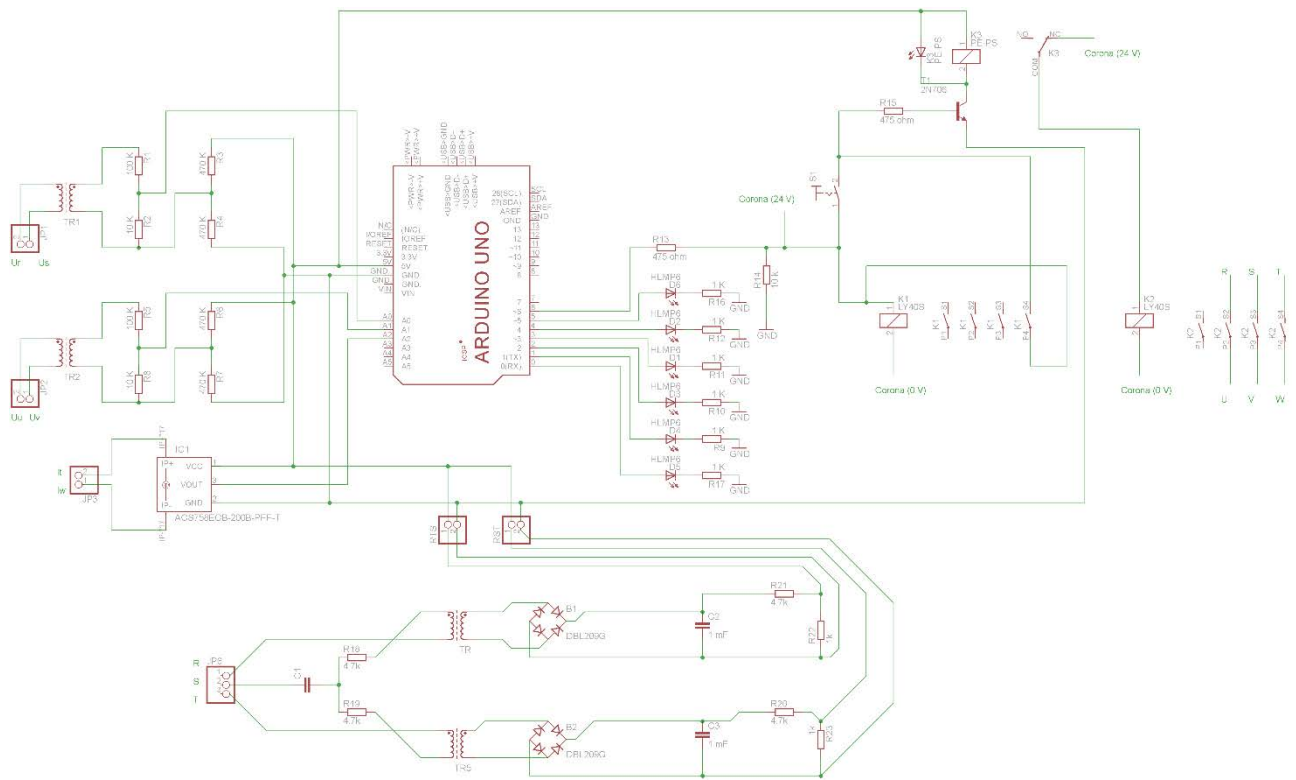


Finally, LEDs will be used to indicate the user that the voltage's modules coincide, that the intensity is zero, that the phase's sequence is appropriate and that the switch can be turned on.

The outline of LEDs is shown/can be observed in the next image:

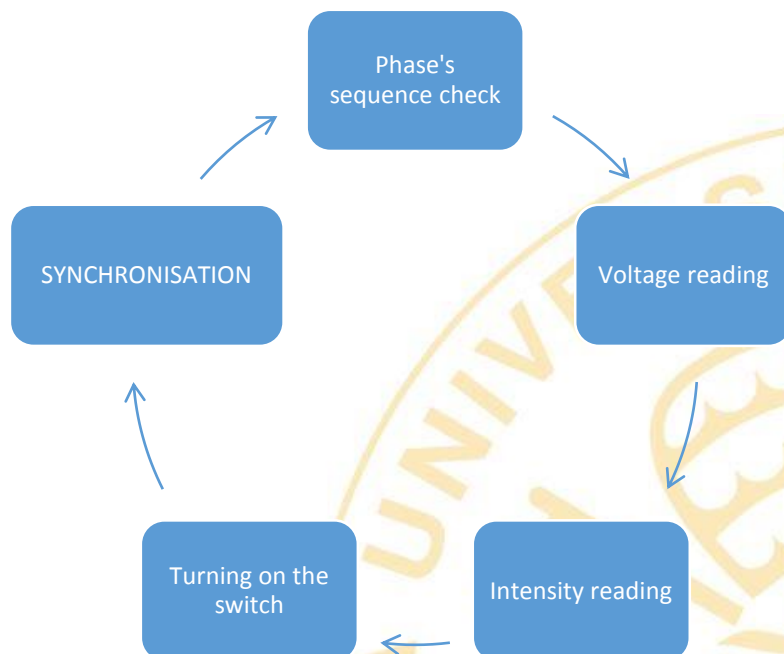


To finish, the complete outline is shown in the next picture:



SOFTWARE'S DESCRIPTION

All the circuit designed before is controlled by the Arduino board's software, following the next flowchart:



This flowchart has a main characteristic: it does not allow checking a characteristic if the previous one is incorrect. For example, it does not allow intensity reading if the voltage does not coincide in module. Thence, it is guaranteed that, at the end of the loop, the conditions have been satisfied and that the synchronisation is safe in order to avoid damage in the electric machine.

RESULTS

In order to conclude this paper, the synchronoscope is tested in Electrical Machines' Laboratory in ICAI. The results were positive and this equipment responds to all the topics successfully. It turns Leds on and off according to the software programmed in Arduino and activates the specific digital output pin to allow pushing the button and synchronise the machine and network.





ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

FERNANDO DÍAZ GONZÁLEZ

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE SINCRONIZACIÓN MANUAL PARA MÁQUINAS SÍNCRONAS

Autor: Fernando Díaz González

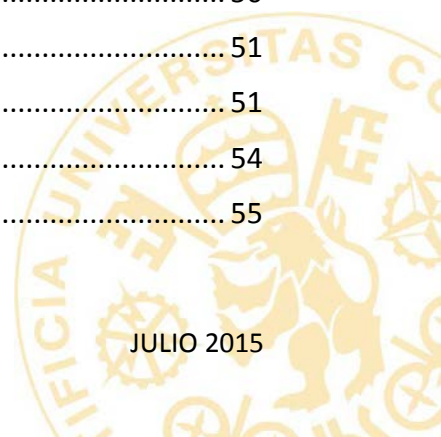
Director: Pablo Frías Marín

Madrid

Junio 2015

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN TEÓRICA	5
1.1. JUSTIFICACIÓN	10
1.2. GENERADOR SIN REGULACIÓN	10
1.3. GENERADOR CON REGULACION	11
2. ESTADO DEL ARTE	13
2.1. BOMBILLAS.....	13
2.1.1. Método de las luces apagadas	13
2.1.2. Método de la lámpara encendida	14
2.1.3. Método de las lámparas giratorias	14
2.2. SINCRONOSCOPIOS ANALÓGICOS.....	15
2.2.1. Sincronoscopios de aguja.....	15
2.2.2. Sincronoscopios de lámparas	18
2.3. SINCRONOSCOPIOS DIGITALES.....	18
3. DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE.....	26
3.1. ARDUINO UNO	26
3.2. CIRCUITO DE MEDIDA	30
3.2.1. MEDIDA DE TENSIÓN	32
3.2.2. MEDIDA DE INTENSIDAD.....	35
3.2.3. SECUENCIA DE FASES	37
3.3. CIRCUITO DE INDICACIÓN.....	42
3.4. CIRCUITO DE DISPARO	43
3.5. CIRCUITO COMPLETO.....	46
4. DESCRIPCIÓN DE SOFTWARE.....	49
4.1. COMPROBACIÓN DE LA SECUENCIA DE FASES	50
4.2. MEDIDA DE TENSIÓN	51
4.2.1. Librería Emonlib.h:.....	51
4.3. MEDIDA DE LA INTENSIDAD	54
4.4. CONDICIONES PARA LA SINCRONIZACIÓN	55



5. MONTAJE	57
5.1. MONTAJE PROTOBOARD	57
5.2. MONTAJE PCB	58
6. ENSAYOS	60
6.1. COMPROBACIÓN DE U_{RS} y U_{UV}.....	60
6.1.1. Entrada A0	60
6.1.2. Entrada A1	63
6.2. COMPROBACIÓN DE I_T.....	65
6.3. COMPROBACIÓN DEL SECUENCIÓMETRO	67
6.4. COMPROBACIÓN CIRCUITO COMPLETO	67
6.5. ENSAYO SOBRE MÁQUINA SÍNCRONA.....	70
7. MEMORIA ECONÓMICA	74
7.1. HORAS DE DISEÑO	74
7.2. HORAS DE MONTAJE.....	74
7.3. HORAS DE PROGRAMACIÓN	75
7.4. HORAS DE ENSAYOS	75
7.5. HORAS TOTALES DEL PROYECTO	75
7.6. COSTE DE HORAS DE TRABAJO	76
7.7. COSTE DE LOS MATERIALES	76
7.8. RESUMEN DEL PRESUPUESTO	77
7.9. PLAN DE VENTAS DEL SINCRONOSCOPIO	77
8. CONCLUSIÓN.....	81
8.1. FUTUROS DESARROLLOS	81
9. REFERENCIAS.....	83



10. ANEXOS	85
10.1. MONTAJES PROTOBOARD	85
10.1.1. MEDIDA DE TENSIÓN	85
10.1.1. MEDIDA DE INTENSIDAD.....	86
10.1.1. SECUENCÍMETRO	87
10.1.1. CIRCUITO DE LEDS.....	88
10.1.1. CIRCUITO DE DISPARO	89
10.2. MONTAJES PCB	90
10.1.1. MEDIDA DE TENSIÓN	90
10.1.1. MEDIDA DE INTENSIDAD.....	91
10.1.1. SECUENCÍMETRO	92
10.1.1. CIRCUITO DE LEDS.....	93
10.1.1. CIRCUITO DE DISPARO	94
10.3. CÓDIGO COMPLETO	95
10.4. SIEMENS MICROMASTER.....	98
10.5. RELÉ	99
10.6. Sonda de corriente.....	100
10.7. OSCILOSCOPIO	101
10.8. MÁQUINA SÍNCRONA	102
10.9. MULTÍMETRO	103



1. INTRODUCCIÓN TEÓRICA



1. INTRODUCCIÓN TEÓRICA

Las máquinas síncronas están entre los tres tipos más comunes de máquinas eléctricas. Son máquinas de corriente alterna que se caracterizan por tener una velocidad dependiente directamente de la frecuencia de la red. Pueden ser monofásicas o trifásicas, y reciben esta denominación porque trabajan a velocidad constante y frecuencia constante en condiciones de operación estacionarias. Como todas las máquinas rotativas, pueden trabajar como motor o como generador.

Por ser una máquina eléctrica rotativa, su principio de funcionamiento está basado en la conversión electromagnética y en la ley de Faraday, que consiste en lo siguiente: el voltaje inducido en un circuito cerrado es directamente proporcional a la rapidez con que cambia en el tiempo el flujo magnético que atraviesa una superficie cualquiera con el circuito como borde. La ecuación de la ley de Faraday es la siguiente:

$$V_e = -N \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

Ecuación 1

Para explicar mejor el significado de la ley de Faraday es necesario recurrir a la ley de Lenz, que plantea que las tensiones inducidas serán de un sentido tal que se opongan a la variación del flujo magnético que las produjo. Esta variación del flujo magnético se produce debido a un campo generado con corriente alterna o a un conductor moviéndose dentro de un campo magnético constante. Esta ley es una consecuencia del principio de conservación de la energía. La polaridad de una tensión inducida es tal, que tiende a producir una corriente, cuyo campo magnético se opone siempre a las variaciones del campo existente producido por la corriente original. El flujo de un campo magnético uniforme a través de un circuito plano viene dado por un campo magnético generado en una tensión disponible con una circunstancia totalmente proporcional al nivel de corriente y al nivel de amperios disponible en el campo eléctrico. Cuando un voltaje es generado por una batería, o por la fuerza magnética de acuerdo con la ley de Faraday, este voltaje generado, se llama fuerza electromotriz o *fem*. La *fem* representa energía por unidad de carga (voltaje), generada por un mecanismo y disponible para su uso. Estos voltajes generados son los cambios de voltaje que ocurren en un circuito, como resultado de una disipación de energía, como por ejemplo una resistencia.

El principio de conversión electromagnética se representa en la siguiente gráfica:



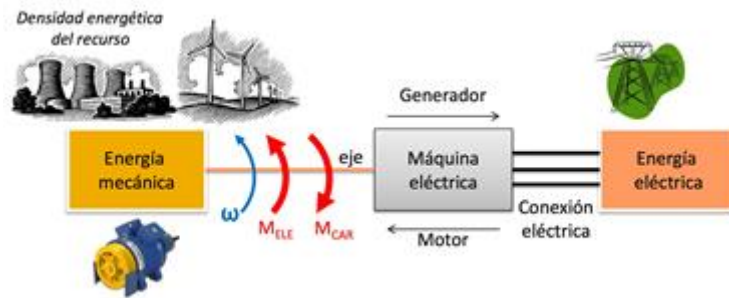


Ilustración 1

Las máquinas eléctricas rotativas están constituidas por unas partes físicas y por unas partes funcionales. Las partes físicas son el estator, el rotor, el entrehierro, la culata y los cojinetes, y las escobillas, las delgas y el colector. Entre las partes funcionales destacan el inductor o excitación, que es donde se produce el campo; y el inducido, que recibe el campo.

Además de lo explicado anteriormente, una máquina rotativa basa su funcionamiento en la ecuación mecánica ($M_{motor} - M_{carga} = J \cdot \frac{dw}{dt} + M_{pérdidas}$), y en el efecto brújula. Este efecto consiste en lo siguiente: cuando dos campos magnéticos no están alineados, aparece un par que tiende a orientarlos:

$$M = K \cdot B_{est} \cdot B_{rot} \cdot \sin \phi$$

Ecuación 2

Por lo tanto, este par tiene una distribución senoidal. Si B_{est} permaneciera fijo y B_{rot} girara con el rotor, éste giraría hasta orientar el B_{rot} con B_{est} , y el par desaparecería.

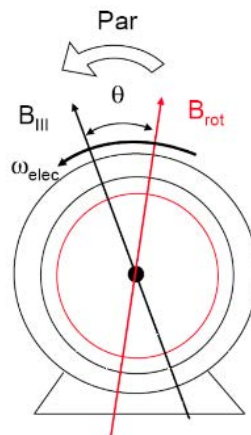


Ilustración 2

En lo que nos concierne a nuestro proyecto, hay que centrarse en las máquinas síncronas, que pueden funcionar tanto en modo motor, alimentando CC por inductor; como en modo generador, alimentando CC por inductor, y CA por inducido.

A continuación, vamos a pasar al análisis de los aspectos constructivos de la máquina síncrona:

Consta de inducido (estator), que consiste en un devanado distribuido y trifásico, y produce un campo magnético rotativo, y de inductor (rotor), que produce un campo magnético B que gira con el rotor.

Principio de funcionamiento de una máquina síncrona:

- El campo generado por el estator, gira a ω_{elec} conectado a CA.
- El campo generado por el rotor, alimentado con CC, gira a ω_{elec} .
- La interacción de ambos campos produce un par eléctrico, igual al par mecánico del motor primario.
- El ángulo θ lo determina la carga (par) en el eje:
 - Al variar la carga, θ se ajusta.
 - A mayor carga/par mayor ángulo.
 - $\theta_{m\acute{a}x} = 90^\circ$, se produce pérdida de sincronismo.

Una vez presentada la máquina síncrona y su funcionamiento, se describe como se realiza la conexión con la red eléctrica, para la posterior creación del sincronoscopio.

Las condiciones de acoplamiento de una máquina síncrona a la red eléctrica son las siguientes:

- Las tensiones deben coincidir en módulo y fase. Por tanto, hay que regular la I_{exc} para igualar módulos. Acoplar cuando las luces estén apagadas. Si se cumplen todas las demás condiciones pero los módulos de las tensiones no son iguales, hay una diferencia de tensión y provoca un flujo de potencia reactiva. Si la tensión del generador es mayor que la de la red, éste estará sobreexcitado y generará potencia reactiva. En caso de que la tensión del generador sea menor que la de la red, éste estará poco excitado y absorberá potencia reactiva.
- La frecuencia de ambas tensiones deben ser iguales. Para ello hay que regular $I_{exc,CC}$.
- La secuencia de fases del alternador y de la red deben ser iguales. En este caso hay que comprobar con secuencímetro. El encendido-apagado de las tres bombillas es simultáneo. Únicamente puede haber problemas con respecto a la secuencia de fases en el arranque de la máquina y después de haber realizado mantenimiento.



Para el proceso de sincronización del alternador a la red eléctrica se utilizan unos equipos llamados “sincronoscopios”, cuyo diseño será posteriormente detallado en este informe. Uno de los equipos más sencillos consta de tres bombillas que se conectan, cada una de ellas, entre la salida del alternador y la fase de la red a la que se quiere acoplar. Si entre ambos sistemas de tensiones trifásicos existiese un deslizamiento (producido porque el generador no gira exactamente a la velocidad de sincronismo, por ejemplo girar a 1490 rpm daría lugar a un deslizamiento de 10 rpm) las luces se encenderán y apagarán (todas a la vez) 10 veces en un minuto. El acoplamiento se deberá realizar cuando ambos sistemas trifásicos estén alineados, es decir, cuando las luces estén apagadas.

Como se comprobará a lo largo de este proyecto, los sincronoscopios comerciales, además de vigilar la diferencia angular entre los sistemas trifásicos, miden las tensiones y frecuencias de ambos sistemas.



Ilustración 3

El esquema utilizado para la sincronización de una máquina síncrona con la red eléctrica es el siguiente:

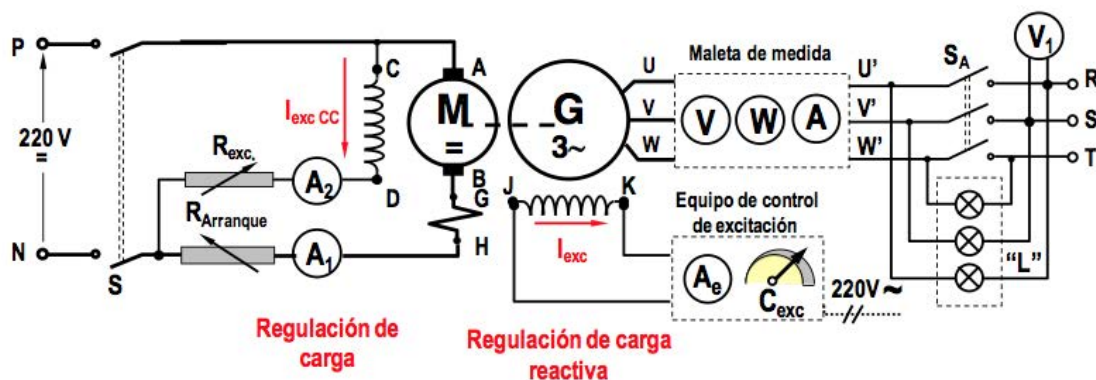


Ilustración 4

El proceso de sincronización y acoplamiento a la red eléctrica sigue los siguientes pasos:

- 1) Realizar el proceso de arranque de la máquina auxiliar de corriente continua, observando el sentido correcto de giro del grupo.
 - Comprobar que $R_{arranque}$ está intercalada en el circuito.
 - Regular R_{exc} de manera que $I_{exc,CC}$ sea igual o algo superior a $I_{exc,CC}$ de vacío.
 - Cerrar el interruptor "S" confirmando el valor de la $I_{exc, CC}$ antes de mover $R_{arranque}$.
 - Llevar lentamente $R_{arranque}$ a la posición de cortocircuito.
 - Ajustar la excitación mediante $R_{exc,CC}$ hasta obtener velocidad síncrona.
 - Variar la excitación de la máquina síncrona (C_{exc}) hasta obtener su tensión nominal.
 - En estas condiciones se conectará el equipo "secuencímetro", el cual indicará si la secuencia de fases es directa "RST" o inversa "RTS", al encenderse la luz de indicación.
 - Para la realización del arranque se ha seguido el siguiente circuito de conexión de la máquina síncrona:

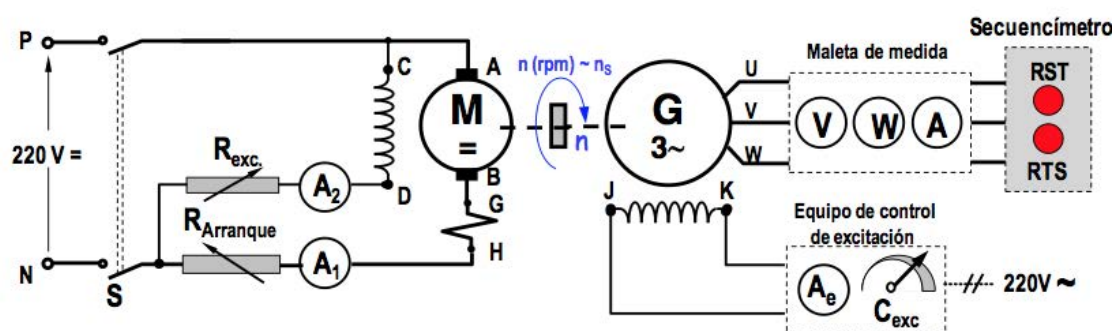


Ilustración 5

- 2) Ajustar la $I_{exc,CC}$ hasta obtener una velocidad del grupo próxima a la velocidad síncrona de la máquina.
- 3) Mediante el equipo de control de I_{exc} , ajustar su valor hasta igualar las tensiones de la red de corriente alterna y el generador.
- 4) Reajustar con " R_{exc} " el valor de la velocidad del grupo hasta conseguir una oscilación en el encendido y apagado de las luces (diferencia de frecuencias entre red y máquina), adecuada a la conexión sin riesgos del interruptor "SA" en el instante en que las lámparas estén apagadas (tensiones de máquina y red en fase y oposición respectivamente).
- 5) Una vez cerrado el interruptor "SA", ajustar mediante R_{exc} y C_{exc} los respectivos valores de potencia activa y reactiva de carga deseados en la máquina síncrona.

1.1. JUSTIFICACIÓN

El circuito equivalente lineal de la máquina síncrona se muestra a continuación. A diferencia del ensayo sobre carga pasiva, en este ensayo la tensión en la salida U queda fijada por la de la red eléctrica a que está conectada.

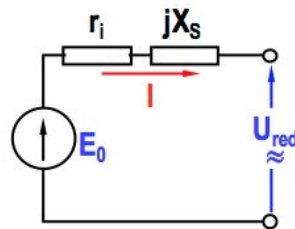


Ilustración 6

El primer elemento de regulación disponible es la corriente de excitación de la máquina síncrona, que modifica la tensión inducida E_0 . Suponiendo que la potencia activa entregada es nula, partiendo del valor de corriente de excitación en vacío ($I_{exc,0}$) si se aumenta la corriente de excitación (máquina sobreexcitada) la tensión inducida E_0 aumentará, y será mayor que la tensión de la red U . Por tanto, aumentará la corriente I inyectada en la red, lo que dará lugar a un flujo de potencia reactiva desde el generador a la red. Si por lo contrario, se reduce la corriente de excitación (máquina subexcitada) la tensión inducida tenderá a ser menor que la tensión de alimentación. Entonces la corriente cambiará de sentido, y pasará a absorber corriente el alternador y por lo tanto la máquina pasará a consumir potencia reactiva.

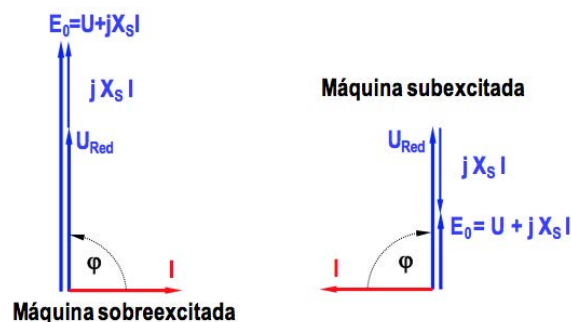


Ilustración 7

1.2. GENERADOR SIN REGULACIÓN

En este caso la velocidad, como las tensiones E_0 y U son constantes. Por tanto, si se modifica la potencia entregada a la red eléctrica (disminuye la corriente de excitación de la máquina de corriente continua) aumentará la corriente entregada. Además, observando las curvas en V de Mordey, si no se modifica la corriente de excitación de la máquina síncrona (I_{exc} constante) la potencia reactiva entregada a la red eléctrica (distancia de la línea roja a la curva de factor de potencia unidad) irá disminuyendo.

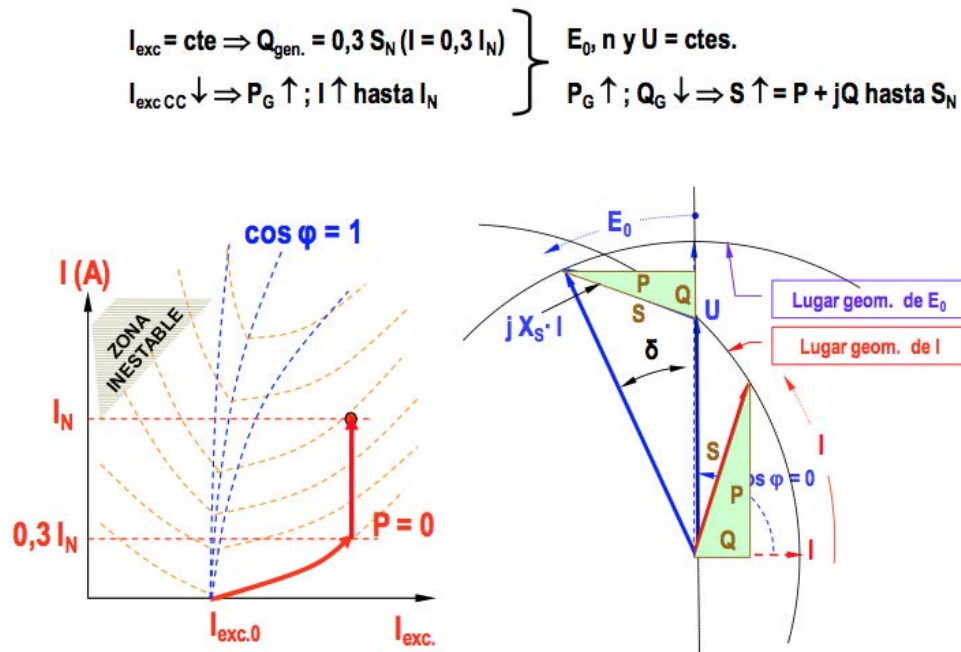


Ilustración 8

1.3. GENERADOR CON REGULACION

En este caso se mantiene la potencia activa constante (la proyección del vector corriente sobre la tensión de salida U tiene que ser constante) y únicamente se regula la corriente de excitación, por lo que se modificará la potencia reactiva. Cuando el vector corriente esté retrasado con respecto al vector tensión la máquina entregará potencia reactiva a la red, y se dirá que el generador está sobre-excitado (tiene más corriente de excitación que la corriente de excitación en vacío); mientras que si el vector corriente está adelantado respecto a la tensión el generador estará sub-excitado y absorberá potencia reactiva de la red eléctrica.

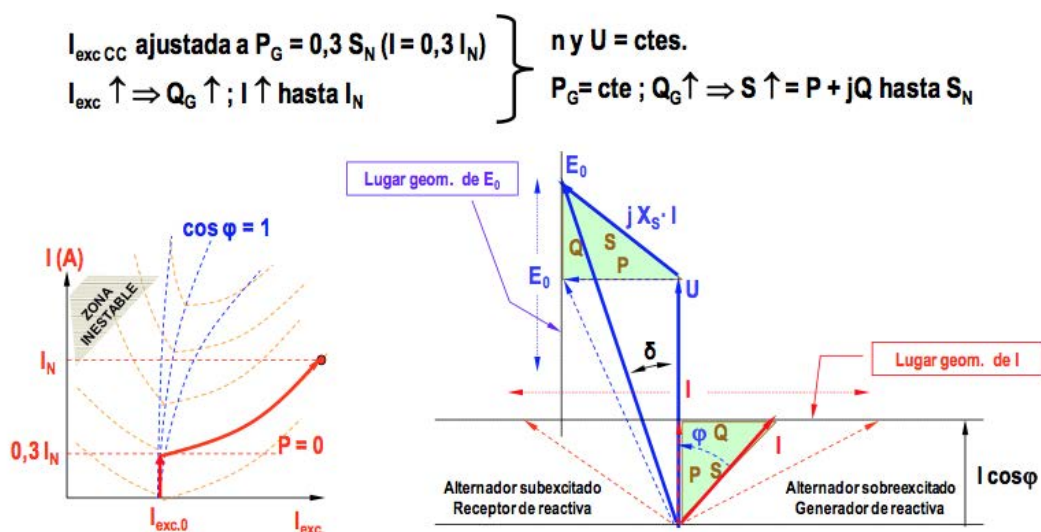


Ilustración 9

2. ESTADO DEL ARTE



2. ESTADO DEL ARTE

A lo largo de la historia, la sincronización de una máquina eléctrica con la red se ha realizado de maneras muy diversas, evolucionando desde sistemas sencillos hasta unos más complejos, aprovechando el desarrollo de la ciencia y de la tecnología para conseguir resultados más precisos.

Todos estos sistemas tienen que cumplir las condiciones de sincronización, que son las siguientes: las tensiones de la red y de la máquina deben coincidir en módulo y fase, las frecuencias de la máquina y de la red deben ser iguales y la secuencia de fases de la máquina y de la red deben ser iguales.

Debido a ello, los elementos a estudiar serán los siguientes:

- Encendido/apagado de bombillas.
- Sincronoscopios analógicos o de aguja.
- Sincronoscopios digitales.

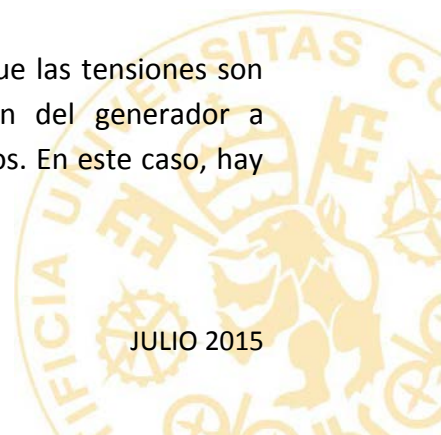
2.1. BOMBILLAS

Con respecto a la utilización de las bombillas, hay que conectar la salida de la máquina síncrona y el punto de conexión de la red eléctrica con los bornes de la bombilla. Como consecuencia de esto, tanto la máquina como la red tienen el mismo número de fases para que se pueda realizar una conexión completa.

Según el funcionamiento de las bombillas, así se detecta si la sincronización es correcta o no:

2.1.1. Método de las luces apagadas

- **Luces están apagadas:** las tensiones de los dos generadores son iguales. La resultante es cero. En el momento de conexión, puede existir una diferencia de tensión apreciable, pero insuficiente para encender las lámparas, del orden del 10% de la nominal de la lámpara, y no se puede saber el momento exacto en que la diferencia de tensiones es cero.
- **Luces varían al unísono:** existe una diferencia de frecuencias. Se corrige subiendo o bajando la frecuencia del generador a conectar.
- **Luces no varían al unísono:** la secuencia de fases es diferente. Para solucionarlo hay que intercambiar dos de las conexiones del generador a conectar. Este método tiene la ventaja de detectar este problema, por lo que se recomienda para las primeras conexiones.
- **Luces con igualdad de brillo:** se dan dos casos. El primero es que las tensiones son desiguales, y para solucionarlo hay que ajustar la excitación del generador a conectar. El segundo caso es que existe una diferencia de ángulos. En este caso, hay que variar ligeramente la velocidad del generador a conectar.



2.1.2. Método de la lámpara encendida

- **Luces con máximo brillo:** las tensiones son iguales y opuestas. La resultante es máxima. En el momento de conexión, debido a que la tensión en las lámparas alcanza valores próximos a 2 veces la tensión de fase, se recomienda utilizar lámparas cuya tensión nominal sea superior a la de los generadores o colocar dos lámparas en serie.
- **Luces apagadas:** diferencia de frecuencias. La tensión resultante es mínima. La solución consiste en subir o bajar la frecuencia del generador a conectar.
- **Luces varían al unísono:** diferencia de frecuencias. La solución consiste en subir o bajar la frecuencia del generador a conectar.

2.1.3. Método de las lámparas giratorias

- **Una luz apagada y dos encendidas.** Reúne las ventajas de los dos anteriores, es el más recomendable en operación normal.
- **Secuencia de una apagada y dos encendidas a dos apagadas y una encendida, en sentido horario.** En este caso, la frecuencia del generador a conectar es mayor. La solución consiste en reducir la velocidad del generador a conectar.
- **Secuencia de una apagada y dos encendidas a dos apagadas y una encendida, en sentido antihorario.** En este caso la frecuencia del generador a conectar es menor. La solución consiste en incrementar la velocidad del generador a conectar.

El esquema utilizado para la conexión de las bombillas es el siguiente:



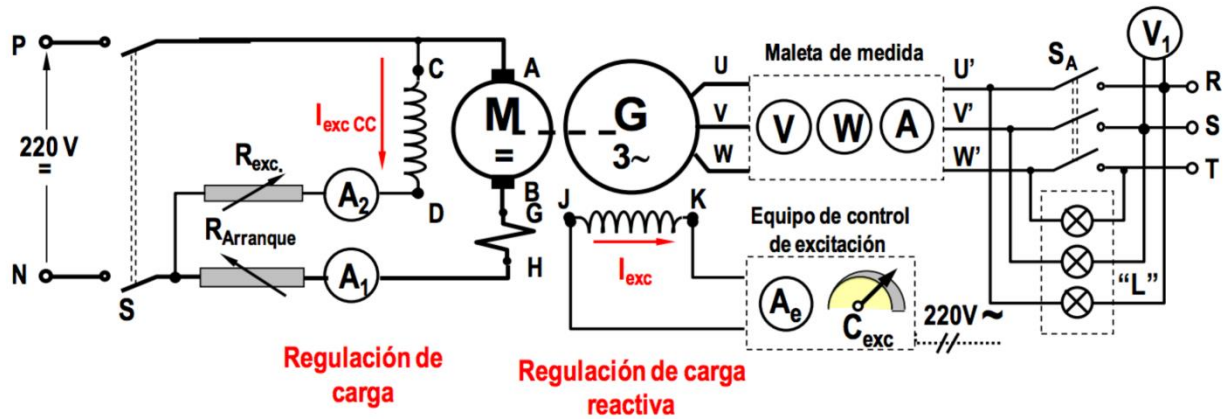


Ilustración 10

En dicho esquema se aprecia como aparece un interruptor mediante el cual se lleva a cabo la sincronización de la máquina con la red cuando las condiciones sean las adecuadas. Este método es el más sencillo y a la vez el menos preciso, ya que depende de la habilidad de la persona para detectar que las luces están apagadas y de su reacción para cerrar el interruptor en el instante correcto.

2.2. SINCRONOSCOPIOS ANALÓGICOS

2.2.1. Sincronoscopios de aguja

En la siguiente imagen se muestra un sincronoscopio de aguja:

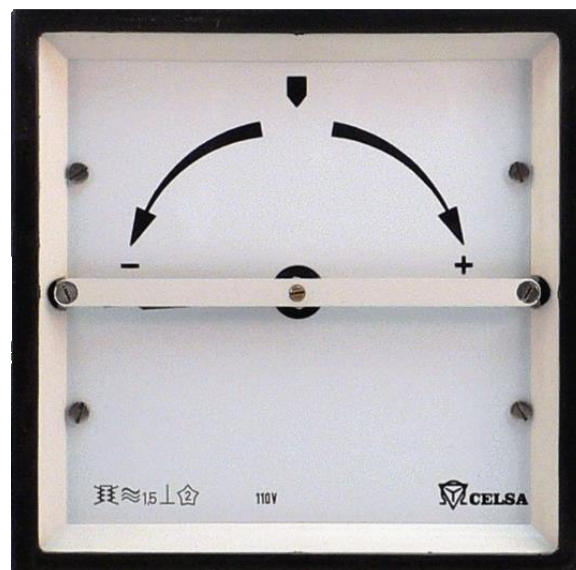


Ilustración 11

Estos sincronoscopios se caracterizan por tener aguja que se mueve en sentido horario o antihorario, o permanece fija, dependiendo de la diferencia de frecuencias entre la máquina síncrona y la red eléctrica. A continuación se explica cada una de las posibles situaciones de la aguja.

- a) **Aguja inmóvil.** Las frecuencias de ambos generadores son iguales. Este método no detecta secuencia de fase. Puede haber diferencias de tensión, por lo cual conviene disponer de aparatos de medición de tensiones.
- b) **Aguja gira en sentido horario.** La frecuencia del generador a conectar es mayor. La solución consiste en reducir la velocidad del generador a conectar.
- c) **Aguja gira en sentido antihorario.** La frecuencia del generador a conectar es menor. La solución es incrementar la velocidad del generador a conectar.

A continuación, se explica el principio de funcionamiento de un sincronoscopio de aguja:

Se produce un campo magnético giratorio mediante las bobinas M y N conectadas a las barras a través de la reactancia P y de la resistencia Q, respectivamente. En dicho campo giratorio se halla montada una lámina de hierro A, con libertad para girar, hallándose excitada mediante la bobina C, que, a su vez, se halla conectada a la máquina que debe sincronizarse. Puesto que la lámina es atraída o repelida por el campo giratorio producido por M y N, adoptará una posición en la que dicho campo se anule y, al mismo tiempo, sea cero el campo producido por C. Por consiguiente, en cualquier instante, la posición indica la diferencia de fase. Cuando las dos frecuencias son distintas, dicha posición varía constantemente, dando lugar al giro de la aguja indicadora en el sentido horario o antihorario, deteniéndose, de nuevo, en la posición correspondiente a campo nulo cuando las dos frecuencias son iguales.



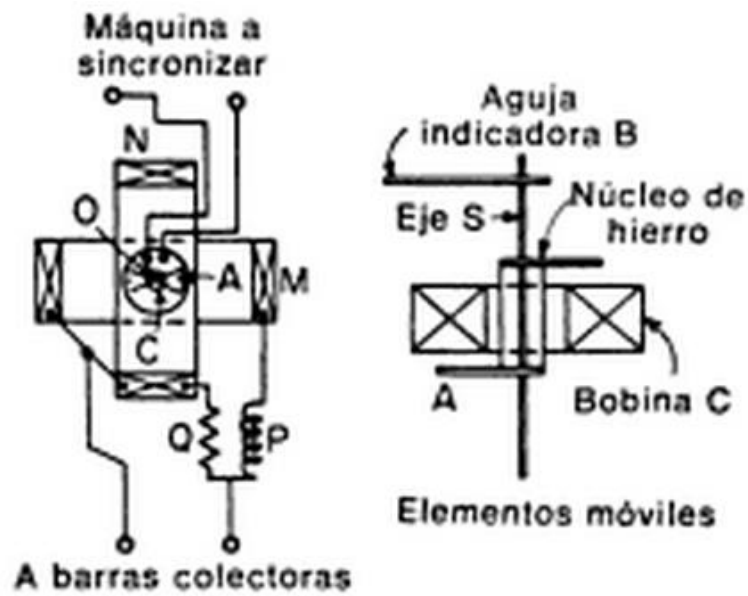


Ilustración 12

En la siguiente imagen se muestra el esquema de conexión para un sincronoscopio de aguja:

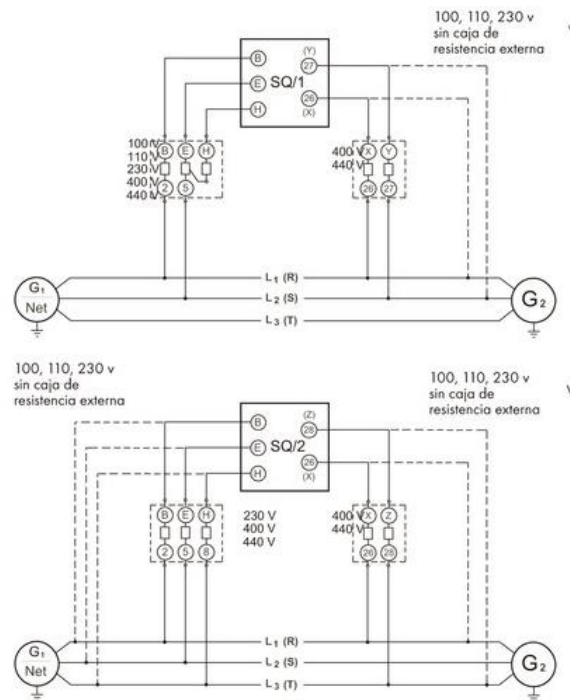


Ilustración 13



2.2.2. Sincronoscopios de lámparas



Ilustración 14

Permiten la sincronización de grupos para maniobra manual. Se utilizan con frecuencias de 50 ó 60 Hz, y para tensiones comprendidas entre 110 y 440 V con una incertidumbre de 20%.

Su funcionamiento se basa en la detección de tensión entre fases homólogas de los dos sistemas a sincronizar, de forma que cuando ésta es nula, el operador puede dar la orden de conexión.

A continuación se muestra el esquema de conexión:

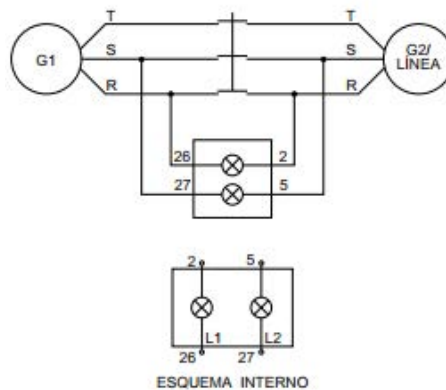


Ilustración 15

2.3. SINCRONOSCOPIOS DIGITALES

Este tipo de sincronoscopios garantizan una sincronización segura y fiable tanto en su utilización como dispositivo de vigilancia para la puesta en paralelo manual, como también en su aplicación como sistema de sincronización independiente totalmente automática. Tienen numerosas áreas de aplicación, entre ellas:

- Sincronización automática y acoplamiento en paralelo de generadores con la red.

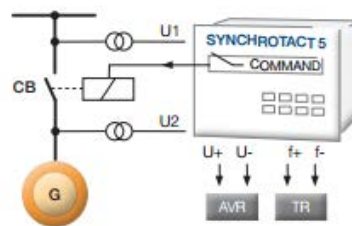


Ilustración 16

- Acoplamiento en paralelo automático de líneas sincrónicas y asíncronas y de barras conductoras de la corriente.

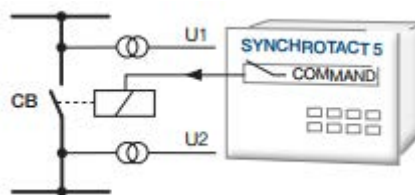


Ilustración 17

- Supervisión del acoplamiento en paralelo automático o manual de líneas ya sincrónicas y conexión de generadores y líneas sin tensión o líneas muertas.

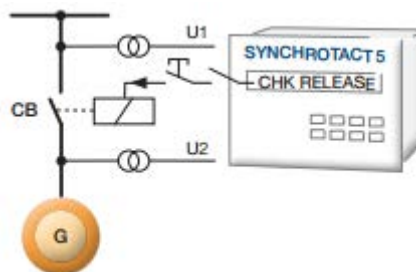


Ilustración 18

Estos sincronoscopios están diseñados para garantizar la máxima seguridad y disponibilidad del equipo para diferentes configuraciones.

Durante la sincronización, es importante el concepto de “canal doble”. Significa que los contactos de salida de dos canales están conectados en serie, de manera que una posible orden de acoplamiento de un canal dado en un momento inadecuado, resultaría bloqueada por el otro canal. Esta configuración aumenta la seguridad de servicio en la instalación. Además aparece el concepto “redundancia”, que consiste en que dos sistemas se encuentran funcionando en paralelo. En caso de pérdida de uno de los dos sistemas, el segundo asegura la ejecución de la función. Esta configuración acrecienta la disponibilidad de la instalación.

En el proceso de sincronización, la seguridad del generador y de la red gozan de la más alta prioridad. La sincronización automática segura se consigue por medio de un sistema a dos canales constituido, cada uno de ellos, por materiales (hardware) y software independientes el uno del otro. El primer canal asume la función de sincronización automática y el segundo se ocupa de la supervisión de la operación (Synchrocheck). Los materiales (hardware) y el Software de cada uno de los canales han sido diseñados por distintos equipos de ingenieros de desarrollo y utilizando microprocesadores diferentes. De esta manera se evitan las consecuencias negativas de fallas sistemáticas.

La seguridad de la sincronización manual es garantizada por un dispositivo de vigilancia (Synchrocheck) que se encuentra conectado en serie con el interruptor de puesta en paralelo manual. Un sincronizador automático puede ser usado también como un Synchrocheck para la sincronización manual.

Estos instrumentos tienen las siguientes características:

- En un mismo equipo se pueden almacenar varios juegos de parámetros para varios puntos de acoplamiento en paralelo diferentes.
- Las entradas y salidas digitales pueden ser libremente configuradas.
- Equipado para servicio a frecuencias nominales de 50 Hz, 60 Hz y $16^{2/3}$.
- El número de relés separados necesarios es reducido ya que los contactos de los equipos han sido dimensionados con gran capacidad y, las entradas y salidas poseen separación galvánica entre sí.
- No es necesaria ninguna fuente de alimentación independiente para el suministro de tensión. Existe un dispositivo auxiliar para la conexión simple de un mayor número de puntos de sincronización.
- Reducción del cableado gracias a la integración de diversos sistemas de control.
- Una rápida puesta en servicio gracias a un software específico que permite modificar diversos parámetros de ajuste.
- Ahorro de costos de desplazamiento gracias al mantenimiento remoto.

Otro tipo de sincronoscopio que se puede encontrar es el sincronoscopio multifunción de precisión con LED.

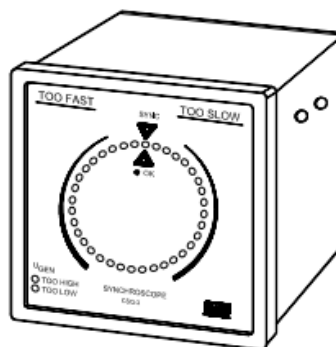


Ilustración 19

Es una unidad de sincronización basada en un microprocesador que permite la medición de todos los valores aplicables para sincronizar un generador con una red (barra colectora). Se utiliza en todas las instalaciones que requieran la sincronización manual o semiautomática.

La unidad mide las dos tensiones de entrada, la del generador (GEN) y la de la barra colectora (BC). El procesador calcula el desfase entre el cruce por cero del GEN y el de la BC y lo muestra en el círculo de LED, integrado por 36 LED rojos.

Solo se enciende un LED rojo de cada vez, y su posición indica el desfase entre el

GEN y la BC. El LED encendido imita la aguja de un instrumento analógico. Si el LED encendido es el de la posición de las doce en punto, el desfase será de 0 grados. Si es el de la posición de las seis en punto, será de 180, etc. Con 36 LED, la resolución será de 10 grados.

El movimiento de la posición del LED encendido indica la diferencia de frecuencia entre el GEN y la BC. Si gira en el sentido de las agujas del reloj (demasiado rápido), la frecuencia del GEN es demasiado alta en relación con la frecuencia de la BC. Si gira en sentido contrario a las agujas del reloj, sucede lo contrario. La velocidad de movimiento indica la diferencia de frecuencia. Cuanto más rápido gire, mayor será la diferencia de frecuencia (por ejemplo, 1 giro por segundo = 1 Hz). Si la frecuencia de la BC es de 50 Hz y la rotación es hacia la derecha, la frecuencia del GEN será de 51 Hz en este ejemplo.

Si la diferencia de frecuencia entre el GEN y la BC es demasiado grande (>3 Hz), el movimiento circular se detendrá y se encenderá un LED en la indicación «TOO

FAST» (demasiado rápido) o «TOO SLOW» (demasiado lento), en función de la dirección en que se deba ajustar la frecuencia del GEN.

Este tipo de sincronoscopio tiene varios tipos de sincronización:

- **Sincronización normal:** La unidad calcula automáticamente los parámetros de sincronización para comprobar si se dispone del espacio requerido para la sincronización en el intervalo de fase preestablecido. Estos cálculos comparan la diferencia de frecuencia con t_R y el tamaño del intervalo de fase. Cuando t_R se ha configurado en ∞ , el usuario puede configurar t_d y, de esta manera, se incluirá en los cálculos en lugar de t_R . Si la ventana $\Delta\phi$ se configura de forma simétrica, será posible tanto la sincronización de subfrecuencia como de sobrefrecuencia.



- **Sincronización de subfrecuencia o de sobrefrecuencia:** Cuando la ventana $\Delta\phi$ se configura de forma asimétrica, se activa la siguiente función:
Si la ventana $\Delta\phi$ se configura de forma asimétrica con un valor $\Delta\phi$ positivo superior al negativo, solo será posible la sincronización con la entrada del generador a una frecuencia inferior que la de la entrada de la barra colectora (sincronización de subfrecuencia).
Si la ventana $\Delta\phi$ se configura de forma asimétrica con un valor $\Delta\phi$ positivo inferior al negativo, solo será posible la sincronización con la entrada del generador a una frecuencia superior que la de la entrada de la barra colectora (sincronización de sobrefrecuencia).
- **Sincronización con la barra colectora inactiva:** Cuando se configura la función de barra colectora inactiva, se activará el relé de sincronización y se encenderá el LED verde («SYNC») si la tensión de la barra colectora está por debajo del nivel preestablecido para la barra colectora inactiva y la tensión del generador supera el 80 % del valor nominal. Tenga en cuenta que, cuando se reestablezca la tensión de la red, el CSQ-3 permanecerá en la función de barra colectora inactiva durante 5 segundos.

Se producirá un reinicio de la conexión cuando la tensión del generador supere el 80% del valor nominal. Por debajo de este nivel, no funcionará.

El CSQ-3 puede funcionar en dos modos diferentes: Modo normal y Modo de ajuste. El modo normal se utiliza para mostrar los valores de medición, mientras que el modo de ajuste sirve para visualizar o cambiar los ajustes según las funciones deseadas.

El funcionamiento del LED para cada modo es el siguiente:

LED en la parte frontal primaria (modo normal):

LED	Color	Función
Círculo	Rojo	El LED encendido en el círculo muestra el desfase entre el GEN y la BC.
SYNC	Verde	Todos los parámetros de sincronización preestablecidos son correctos y el relé de salida está activado.
ϕ OK	Amarillo	El desfase entre el GEN y la BC se encuentra dentro de la ventana preestablecida.
U_{GEN} TOO HIGH	Rojo	La diferencia de tensión entre el GEN y la BC está fuera del intervalo establecido. U_{GEN} es demasiado alta.
U_{GEN} TOO LOW	Rojo	La diferencia de tensión entre el GEN y la BC está fuera del intervalo establecido. U_{GEN} es demasiado baja.

Tabla 1

LED en la parte frontal secundaria (modo de ajuste):

LED	Color	Función
Círculo	Rojo	Las partes del círculo se usan como escalas de los diferentes ajustes.
$\Delta\phi$	Amarillo	Muestra que la escala $\Delta\phi$ está activada.
t_d	Amarillo	Muestra que la escala t_d está activada. Tenga en cuenta que t_d se activa únicamente cuando t_R se configura en ∞ .
t_R	Amarillo	Muestra que la escala t_R está activada.
ΔU	Amarillo	Muestra que la escala ΔU está activada.
U_{BC}	Amarillo	Muestra que la escala U_{BC} (barra colectora inactiva) está activada.

Tabla 2

El bucle de funcionamiento es el siguiente:

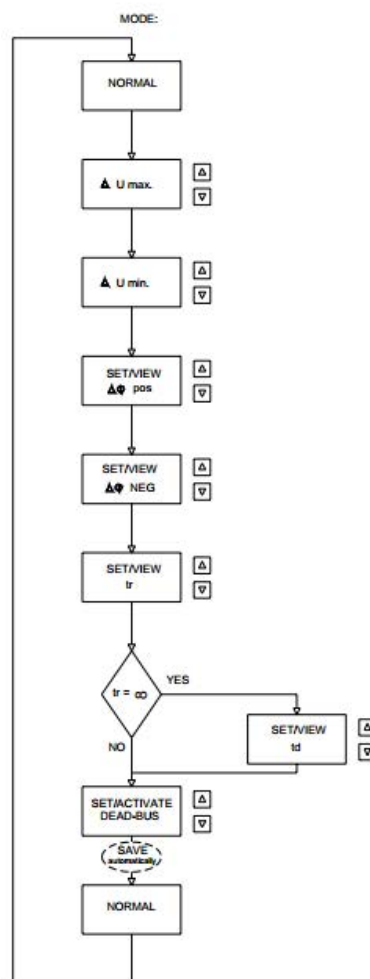


Ilustración 20

El diagrama de conexiones a utilizar es el siguiente:

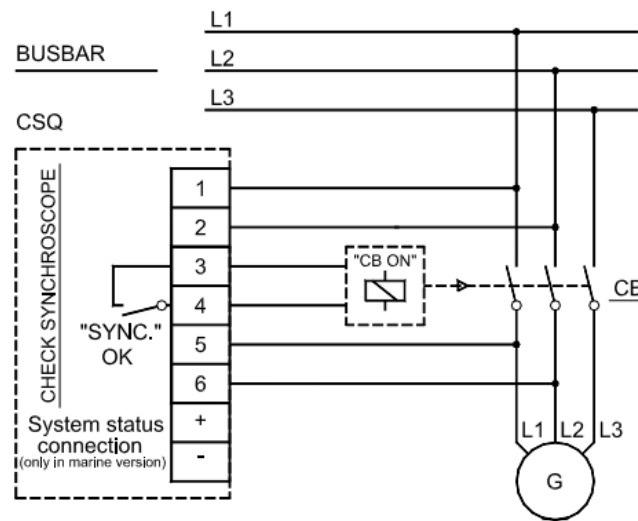


Ilustración 21



3. DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE



3. DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE

El circuito electrónico a diseñar estará formado por entradas y salidas digitales de forma que permita conectar todos los elementos necesarios para el funcionamiento correcto del sincronoscopio. Para poder realizar una sincronización correcta es necesario que se cumplan las siguientes condiciones:

- El módulo de la tensión de las fases debe coincidir tanto en la máquina síncrona como en la red.
- La secuencia de fases de la máquina y la red eléctrica debe ser la misma.
- La intensidad debe ser cero (bombillas apagadas-interruptor abierto). De esta forma se controla que el desfase sea cero.

El circuito electrónico se va a dividir en medida, disparo y en indicación. El módulo de medida se encargará de obtener los datos de las tensiones y de la intensidad necesarios para comprobar que se cumplen las condiciones anteriormente mencionadas. El circuito de disparo es el encargado de producir el cierre del interruptor que acoplará la máquina síncrona a la red eléctrica. Por último, se utilizará un circuito formado por leds de forma que indicarán diversas acciones a realizar.

3.1. ARDUINO UNO

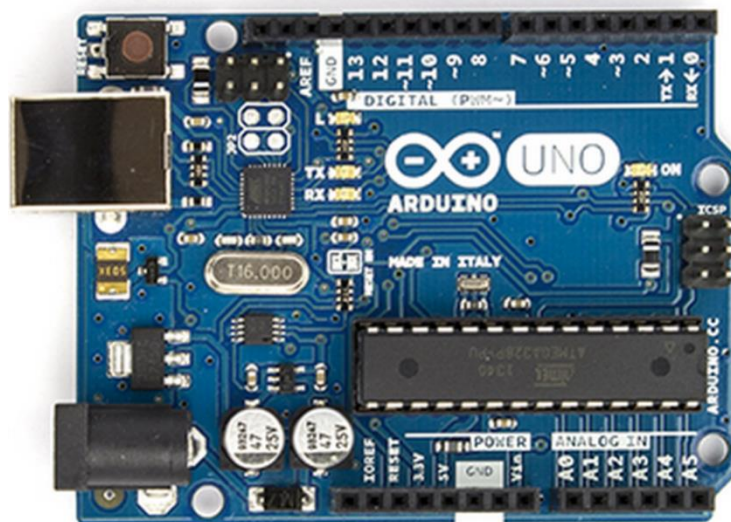


Ilustración 22

Arduino Uno es una placa electrónica basada en ATmega328. Cuenta con 14 pines digitales de entrada/salida (de los cuales 6 pueden utilizarse para salidas PWM), 6 entradas analógicas, un resonador cerámico de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP, y un botón de reset.

Contiene todo lo necesario para el correcto funcionamiento del microcontrolador; basta con conectarlo a un ordenador con un cable USB o a través de un adaptador de corriente alterna a corriente continua o mediante una batería.

La diferencia entre Arduino Uno y las placas anteriores es que no utiliza el chip FTDI USB-to serial driver. En lugar de ello, cuenta con Atmega16U2 (en su versión R2) programado como convertidor USB.

Esta placa tiene las siguientes nuevas características:

- 1-0 pinout: se han añadido SDA y pines SCL colocados cerca del pin AREF, además de dos nuevos pasadores colocados cerca del pin RESET. IOREF permite a las protecciones adaptar la tensión proporcionadas desde el panel. En el futuro, estas protecciones serán compatibles tanto con el panel que usa AVR, que trabaja con 5 V; como con Arduino Due que opera con 3.3 V. El segundo es un pin que no está conectado, reservándose para usos futuros.
- Fuerte circuito de rearme.
- ATmega16U2 sustituye al 8U2.

La nomenclatura de “Uno” significa uno en italiano, y se refiere al próximo lanzamiento de Arduino 1.0. Arduino Uno es el último modelo de una serie de placas de Arduino con conexión USB, y actualmente es el modelo de referencia.

A continuación se muestra un resumen con las principales características de la placa de Arduino:

Microcontroller	ATmega328	Flash Memory	32 kB (ATmega328) of which 0.5 kB used by bootloader
Operating Voltage	5 V	SRAM	2 kB (ATmega328)
Input Voltage (Recommended)	7-12 V	EEPROM	1 kB (ATmega328)
Input Voltage (limits)	6-20 V	Clock speed	16 MHz
Digital I/O pins	14 (of which 6 provide PWM output)	Length	68.6 mm
Analog Input pins	6	Width	53.4 mm
DC Current per I/O pin	40 mA	Weight	25 g
DC Current for 3.3 V pin	50 mA		

Tabla 3

En la siguiente imagen se muestra el esquema electrónico de una placa de Arduino, incluyendo todos los elementos necesarios para su correcto funcionamiento.

Finalmente, se ha elegido una placa de Arduino Uno porque el número de pines necesarios para la conexión de todos los elementos es suficiente. Además, como se especificará en el apartado de montajes, se han utilizado placas auxiliares para facilitar el montaje del secuencímetro y de los leds.

El esquema completo de la placa de Arduino se muestra a continuación:

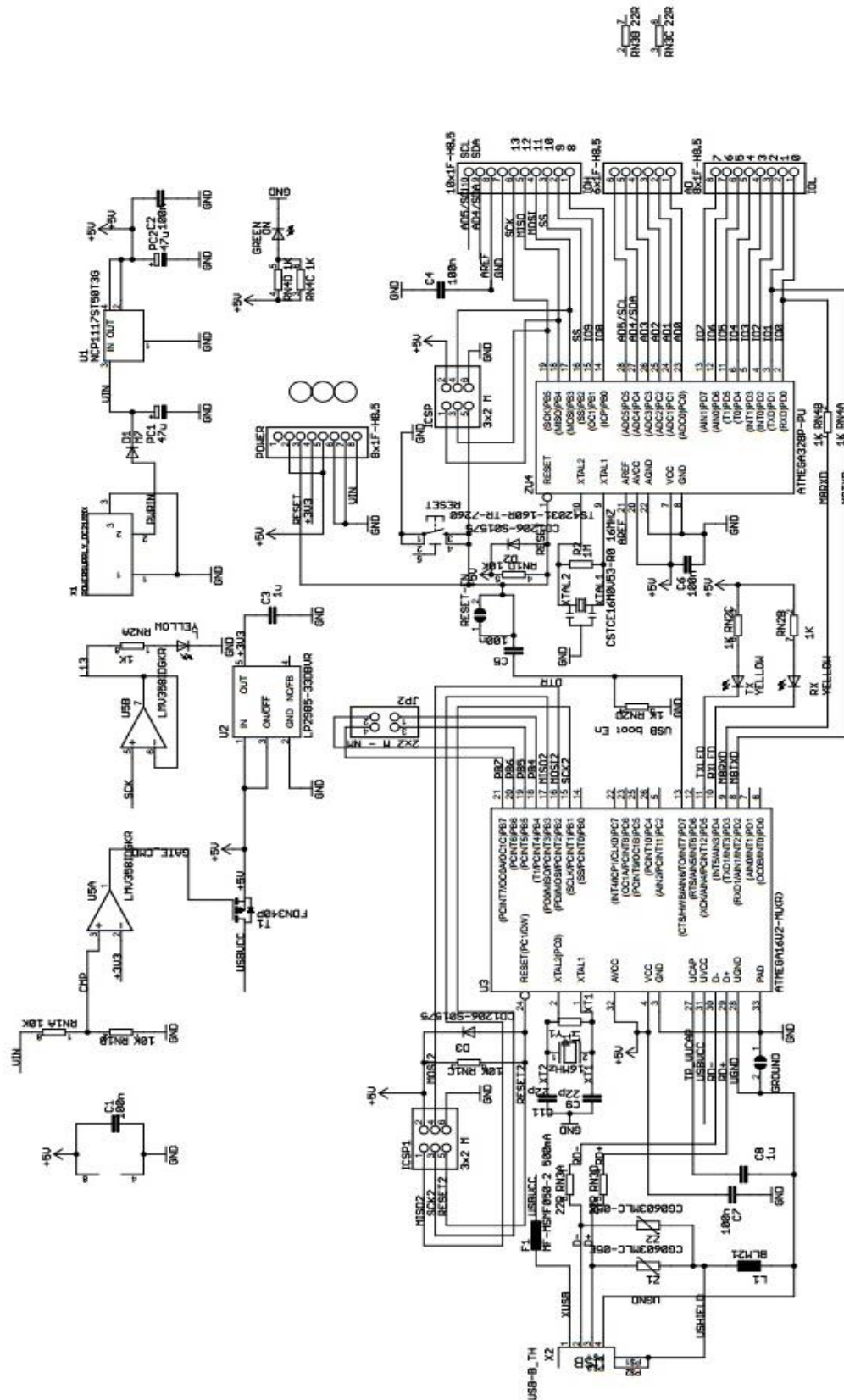


Ilustración 23

3.2. CIRCUITO DE MEDIDA

El módulo de medida va a ser el encargado de realizar los cálculos necesarios para cumplir las condiciones de sincronización. Para ello, se van a realizar las diferentes medidas:

- Medida de la tensión U_{rs} en una entrada de Arduino.
- Medida de la tensión U_{uv} en una entrada de Arduino.
- Comprobación de la secuencia de fases mediante un secuencímetro.
- Medida de la intensidad I_t en una entrada de Arduino.

Las dos medidas de tensión se van a utilizar para comparar los módulos, de forma que el proceso de sincronización puede continuar cuando ambos módulos son iguales. Para comprobar la secuencia de fases se va a utilizar un secuencímetro, que se describirá posteriormente. Finalmente, para poder completar la sincronización, es necesario que la intensidad que circula por la fase T y W de la red y la máquina respectivamente sea cero ya que esto implica que no existe desfase entre la máquina y la red. Esto es así debido a que se realiza un by-pass al interruptor de cierre. En caso de no cumplir estas tres condiciones, el proceso de sincronización será incorrecto y por tanto no se puede acoplar la máquina síncrona a la red eléctrica.

A continuación, se muestra el esquema del módulo de medida:



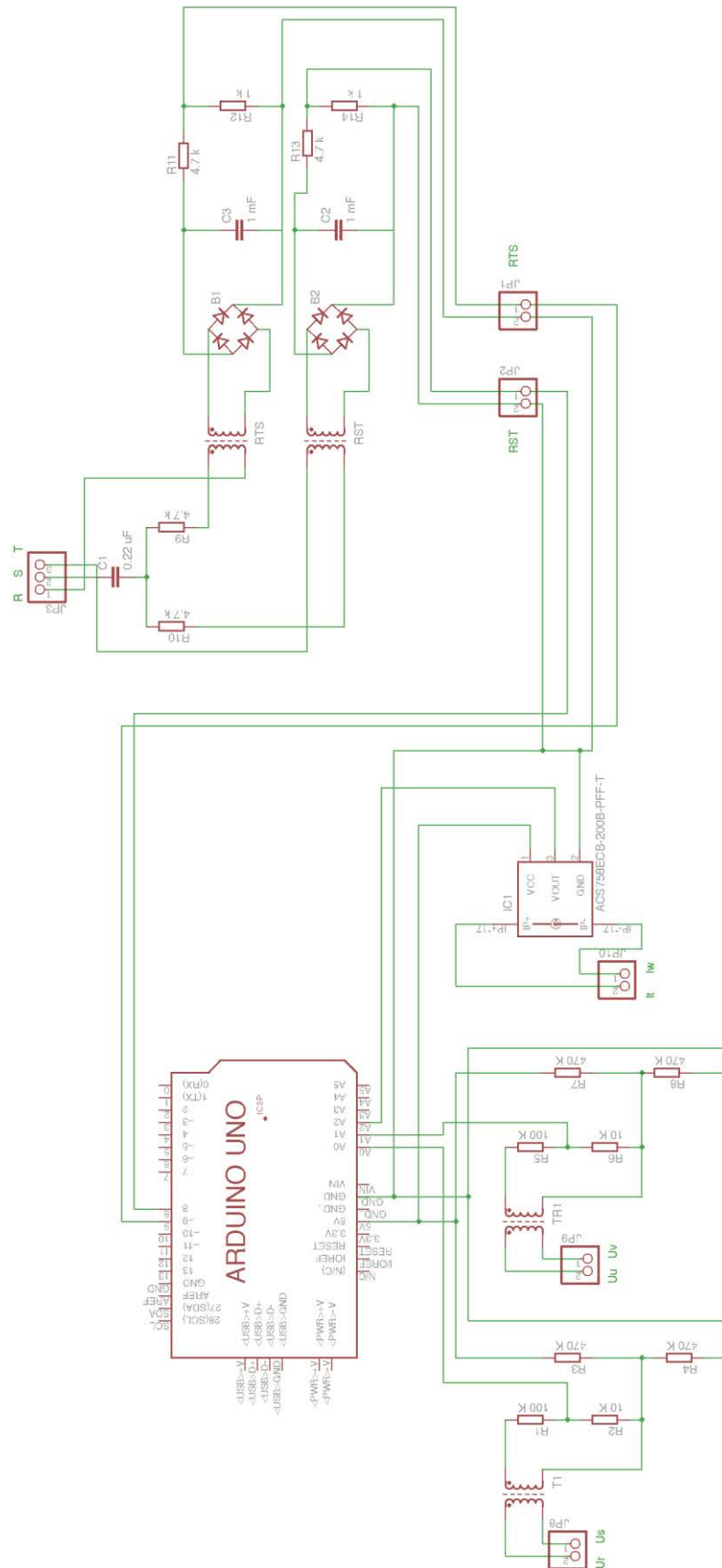


Ilustración 24



A continuación se procede a explicar cada una de las partes que forman este circuito. Está dividido en medida de tensión y medida de intensidad.

3.2.1. MEDIDA DE TENSIÓN

Para poder medir la tensión, se van a utilizar un conjunto de resistencias y un transformador que van a cumplir las siguientes funciones.

En primer lugar, la tensión nominal de la red y de la máquina es de 220 V. Como la tensión máxima que soporta la placa de Arduino es de 5 V, se necesita un transformador para reducir dicha tensión. Los transformadores disponibles son de relación 220 V/9 V. De la misma manera, 9 V es superior a la tensión máxima de la placa, por lo que se necesita volver a reducir. Para ello, se construye un divisor de tensión formado por dos resistencias, que se llamarán R1 y R2.

Para el diseño de estas resistencias hay que considerar que la tensión de pico de salida del divisor de tensión que forman deberá ser aproximadamente 1 V. La tensión de salida del transformador es de 9 V eficaces, que es equivalente a 12.7 V de valor de pico. Tomando como valores de $R_1 = 10\text{ k}\Omega$ y de $R_2 = 100\text{ k}\Omega$, se obtiene la siguiente tensión de pico de salida:

$$U_{pico-salida} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_{pico-entrada} = \frac{10k}{10k + 100k} \cdot 12.7 = 1.15\text{ V}$$

Ecuación 3

Una vez que se ha conseguido reducir la tensión, hay que añadir un offset para que no haya componente negativa, ya que Arduino sólo lee tensiones entre 0 V y 5 V. Para ello, se construye otro divisor de tensión, formado por las resistencias R3 y R4. Estas dos resistencias tienen que ser iguales para poder proporcionar la mitad de la tensión máxima de Arduino (2.5 V). Una consideración a tener en cuenta es que a mayor resistencia, menor será el consumo de energía. Por criterios de seguridad, para conseguir menor intensidad y así no dañar el circuito, se elegirán resistencias de 470 k Ω .

Como consecuencia de los dos divisores de tensión, la nueva señal de tensión será una onda senoidal con un pico positivo en $2.5\text{ V} + 1.5\text{ V} = 3.65\text{ V}$ y un pico negativo en 1.35 V. Como se comprueba, estas tensiones se encuentran en el intervalo de 0 y 5 V.

La siguiente imagen muestra un resumen de lo explicado anteriormente:



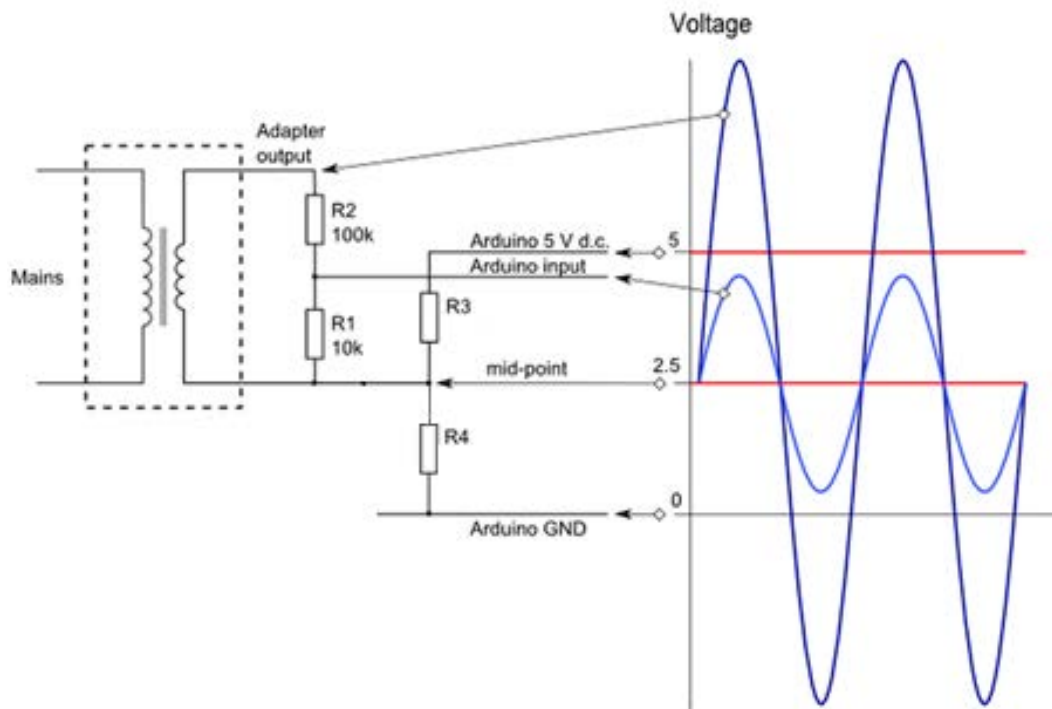


Ilustración 25

A la hora de diseñar un circuito, es importante tener en cuenta el efecto de las tolerancias e incertidumbres de los elementos que lo conforman. En este caso, hay que considerar dichas incertidumbres en la medida de tensión y en las resistencias. Para poder diseñar el mejor circuito posible hay que tener en cuenta las condiciones más desfavorables:

- La tensión alterna de la red y de la máquina no es siempre 220 V. En condiciones normales, la variación máxima de la tensión es de un 10% de la tensión nominal.
- El transformador puede que no esté trabajando a toda su carga. Los valores típicos son del 20% del valor nominal.
- La placa de Arduino puede no estar proporcionando exactamente 5 V. El regulador de dicha tensión oscila entre 4.8 V y 5.2 V. El peor caso es cuando la tensión es baja, así que será la tensión de 4.8 V la que será utilizada en los cálculos.
- Las resistencias de los divisores de tensión pueden no ser del valor nominal. En estos casos, se considera una variación del 1% en su valor nominal. En el divisor de tensión cuya función es conseguir aproximadamente 1 V a su salida, es decir, el formado por las resistencias R1 y R2, el peor caso es cuando R2 es más baja y R1 es mayor. En este caso, la tensión de salida puede variar un 2%.

Como consecuencia, estas variaciones afectan a los cálculos del circuito.

$$U_{máquina} = 220 \text{ V} + 10\% = 242 \text{ V};$$

Ecuación 4

La tensión a la salida del transformador de relación 220V/9V será:

$$U_{salida-transf} = 9 \cdot \frac{242}{220} = 9.9 \text{ V};$$

Ecuación 5

Suponiendo que no está trabajando con carga, hay que añadir un 20%. Como éste es el valor eficaz, hay que calcular también el valor de pico:

$$U_{salida-transf-sin\ carga} (eficaz) = 9.9 \text{ V} + 20\% = 11.88 \text{ V};$$

Ecuación 6

$$U_{salida-transf-sin\ carga} (pico) = 11.88 \text{ V} \cdot \sqrt{2} = 16.8 \text{ V};$$

Ecuación 7

La tensión que habrá a la entrada de Arduino será una señal alterna pico-pico con un valor de 4.8 V. La tensión mitad de este rango es 2.4. Como Arduino también tiene error de incertidumbre, este punto medio puede ser 2.376 V o 2.424 V. La situación más desfavorable es la de tensión menor, por tanto 2.376 V.

A continuación se detalla la incertidumbre de las resistencias. En primer lugar, R1 tiene un valor nominal de 10 kΩ, por lo que su máximo valor será de 10.1 kΩ. Esto implica que el pico de corriente que circula por R1 es 2.376 V / 10.1 kΩ = 0.235 mA. Esta corriente también atraviesa la resistencia R2, cuya tensión va a ser 16.8 V – 2.376 V = 14.45 V. Debido a ello, el valor exacto de R2 será 14.45 V / 0.235 mA = 61.5 kΩ. Como este valor no está estandarizado, se debe coger el valor de R2 superior a éste.

Por último, se puede añadir una mejora al circuito anterior mediante un amplificador operacional. El amplificador amortigua la tensión que aparece en el punto medio entre R3 y R4. Con ello se consigue que se reduzca la impedancia entre la fuente de tensión. Para este caso, solamente se necesita un amplificador, resultando el circuito siguiente:



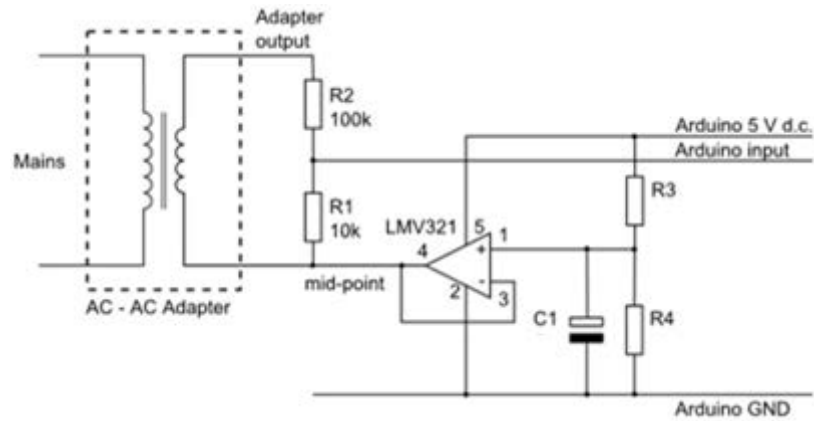


Ilustración 26

Ante esta modificación, este circuito puede no ser válido en los casos donde la fuente de potencia sea una batería. Además, se pueden elegir las resistencias R3 y R4 con valor de 100 k Ω , y el condensador C1 puede ser reducido a 100 nF.

3.2.2. MEDIDA DE INTENSIDAD

Para la medida de la intensidad se va a utilizar una sonda de corriente de modelo LTS 6 – NP. La sonda se muestra en la siguiente imagen.



Ilustración 27

La función de esta sonda de corriente se muestra en la siguiente imagen:



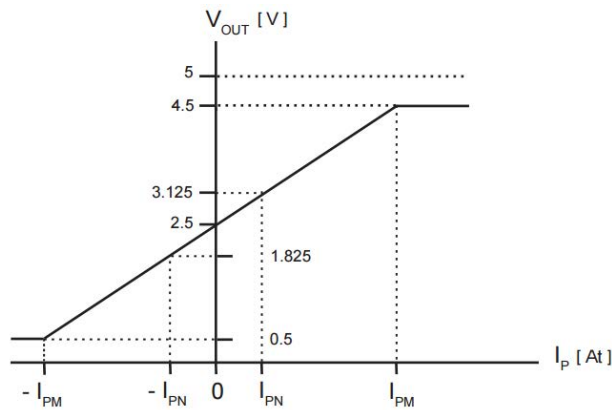


Ilustración 28

Las características de dicha sonda se detallan en el apartado de anexos.

La función de este circuito es medir la corriente que circula por la fase W de la máquina síncrona y la fase T de la red eléctrica para poder llevar a cabo la sincronización sin comprometer la seguridad de la máquina cuando el valor de dicha intensidad sea cero. En este punto, no existe desfase entre las fases de la máquina y las de la red eléctrica.

Es importante añadir que en la conexión real de la sonda de corriente con la máquina síncrona, no hay que añadir ninguna resistencia para limitar la intensidad ya que las propias bombillas actúan como resistencias. Para cualquier otro ensayo en el que no haya bombillas, sí hay que colocar resistencias, cuyo proceso de cálculo será el siguiente:

- La tensión en módulo que va a circular entre los bornes de entrada y salida de la sonda de corriente es 254 V, ya que es la suma de los fasores de U_T y U_W en oposición de fase.
- La máxima intensidad que puede soportar la sonda es 6 A. Para garantizar que no se sobrepasa esa intensidad, se da un margen de 1 A, limitando la corriente que circula a 5 A.
- En ese caso, la resistencia tiene que ser de 50 Ω .
- La tensión de salida, y por tanto, la que verá Arduino, será: $V_{out} = 2.5 \pm 0.52$ V; por lo que se encuentra en márgenes aceptables para la placa, lo que evita construir un divisor de tensión para no dañar la placa de Arduino.

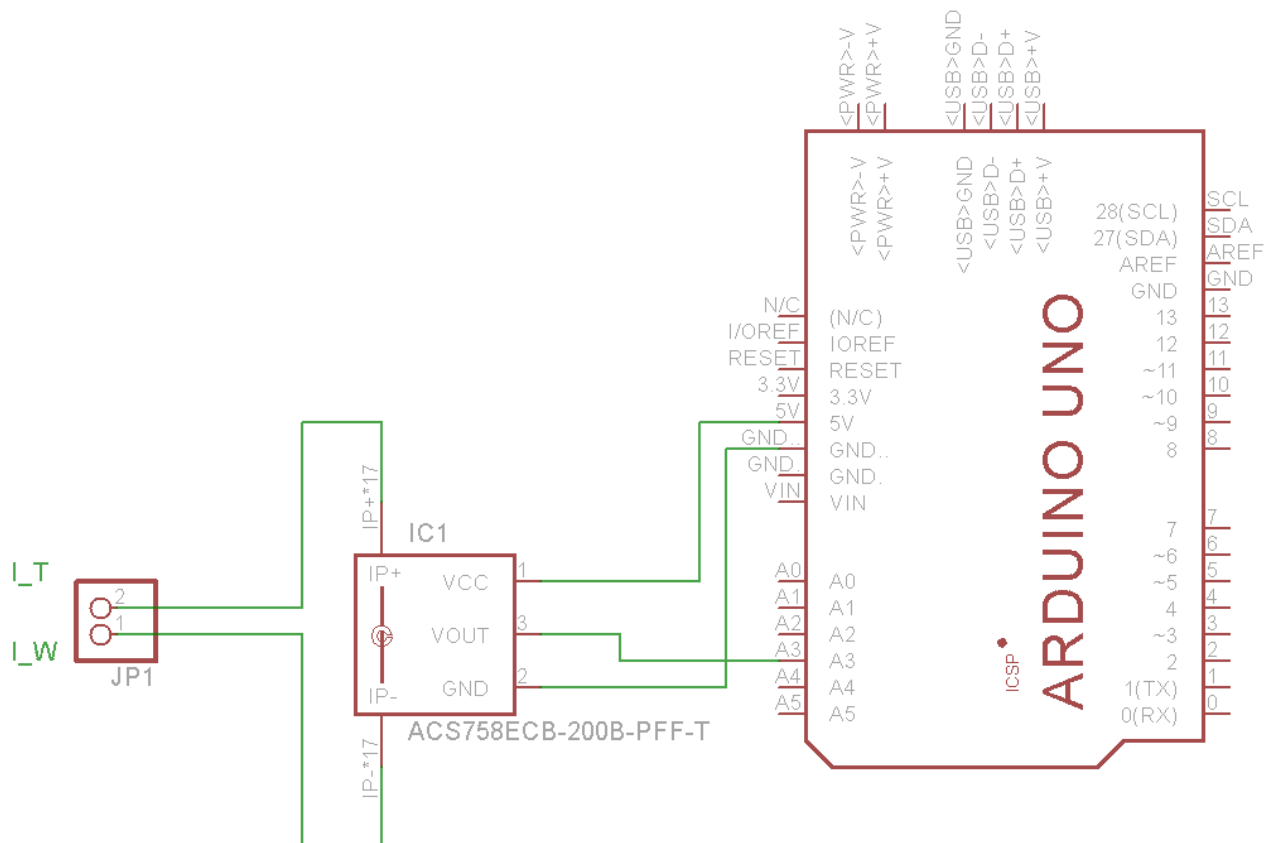


Ilustración 29

3.2.3. SECUENCIA DE FASES

Para determinar la secuencia de fases de la máquina síncrona se va a utilizar un secuencímetro, que es un aparato que se conecta a la máquina y muestra la secuencia de conexión (RST o RTS).



Ilustración 30



El secuencímetro utilizado en el laboratorio presenta el siguiente esquema:

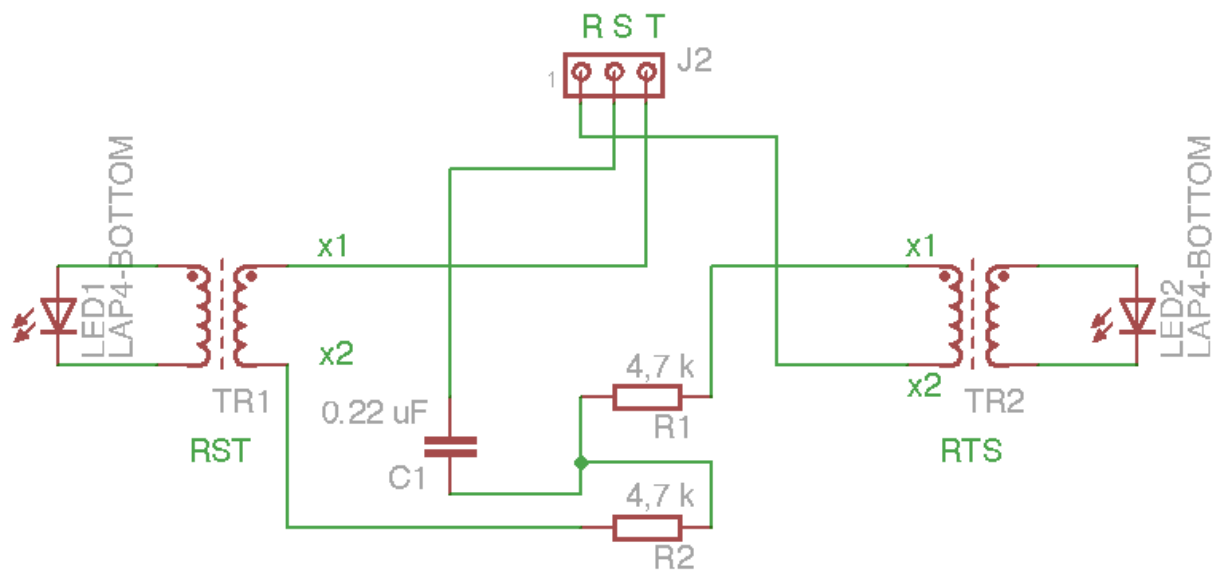


Ilustración 31

Las características de los componentes de este secuencímetro se detallan a continuación:

- Dos grupos transformador + lámpara, donde cada lámpara es de 6 V y 1.2 W y los transformadores pueden ser de 110-127 V para 50 Hz o de 110- 120 V para 60 Hz.
- Un condensador de 0.22 µF.
- Dos resistencias de 4.7 kΩ, 16 W.

El funcionamiento de un secuencímetro se describe a continuación:

- En el caso de la secuencia positiva (RST), la tensión entre la fase T y el neutro de la estrella es mayor que la tensión entre la fase R y el neutro de la estrella.
- En el caso de la secuencia negativa (RTS), la tensión de la fase R y el neutro es mayor que la tensión entre la fase T y el neutro.

Los siguientes diagramas vectoriales muestran las explicaciones anteriores:

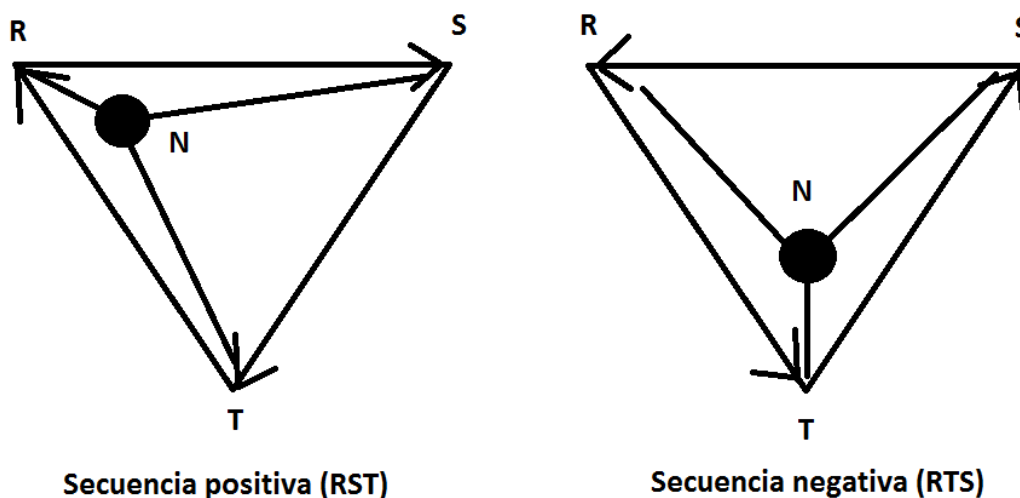


Ilustración 32

A pesar de disponer de estos aparatos para determinar la secuencia de fases, es necesario realizar un algoritmo por el cual la placa de Arduino sea capaz de determinar si el giro de la máquina es correcto o no. Para ello, hay que introducir las tensiones URN y UTN en la placa a través de un pin digital configurado como entrada.

Debido a que las entradas digitales de Arduino sólo aceptan corriente continua hay que diseñar un circuito electrónico para convertir la corriente alterna en corriente continua. Estos circuitos son llamados rectificadores. En este caso se va a utilizar un rectificador de puente con un condensador a la salida.

El proceso de conversión y el circuito del rectificador son los siguientes:

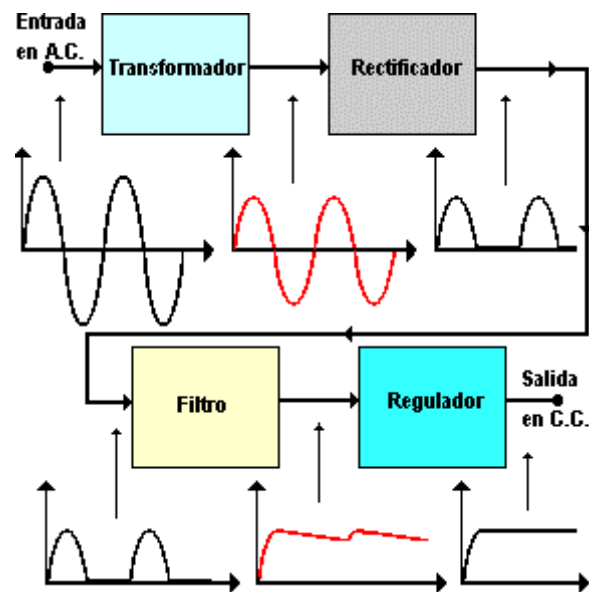


Ilustración 33

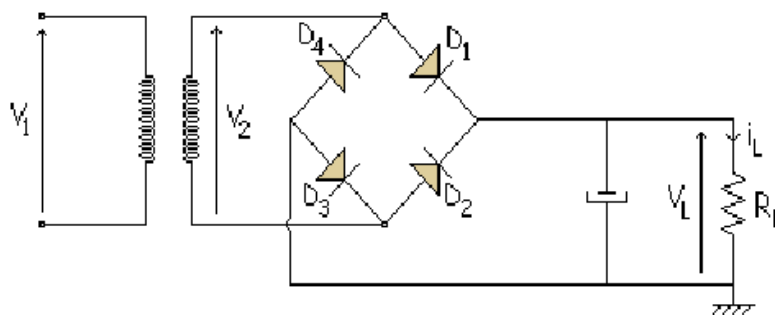


Ilustración 34

A continuación se muestra el proceso de diseño del rectificador:

En primer lugar, se supone una caída de tensión en los diodos de $V_D = 0.7 \text{ V}$. La tensión máxima que puede entrar en la placa de Arduino es 5 V y la tensión umbral para que el pin digital marque 1 es 3 V. Por ese motivo, se diseña el puente de diodos para obtener una tensión a la salida superior a 3 V.

Los parámetros de diseño y las ecuaciones a utilizar son las siguientes:

- Capacidad de manejo de corriente requerida, es decir, la mayor corriente que se espera que conduzca el diodo.
- PIV: voltaje inverso de pico.
- Tensión promedio corriente continua:

$$V_O = \left(\frac{2}{\pi}\right) \cdot V_S - 2 \cdot V_D;$$

Ecuación 8

- $PIV = V_S - V_D$;
- Intensidad máxima que circula por el diodo:

$$I_{max} = \frac{V_S - 2 \cdot V_D}{R};$$

Ecuación 9

Para garantizar un margen de seguridad de la tensión de entrada a la placa se hará todo el diseño suponiendo que la tensión de lectura es 4 V, superior además a 3 V para conseguir un estado "HIGH" en el pin digital.

Para poder introducir las tensiones RST hay que utilizar un transformador de tensión para reducirlas a las tensiones máximas permitidas por Arduino. Los disponibles en el laboratorio son de relación $N_1/N_2 = 220\text{ V}/9\text{ V}$.

En ese caso, la tensión de salida será:

$$V_2 = 220\text{ V} \cdot \frac{9\text{ V}}{220\text{ V}} = 9\text{ V};$$

Ecuación 10

Al colocar un condensador a la salida, la tensión aumentará. Una vez medido, se obtiene un valor de 22.6 V. En ese caso hay que utilizar un divisor de tensión de manera que la entrada al pin digital de Arduino tenga un valor máximo de 5 V. Considerando un margen de seguridad, se elige que la tensión a la entrada sea 4 V.

Por tanto:

$$4 = 22.6 \cdot \frac{1000\ \Omega}{1000\ \Omega + R};$$

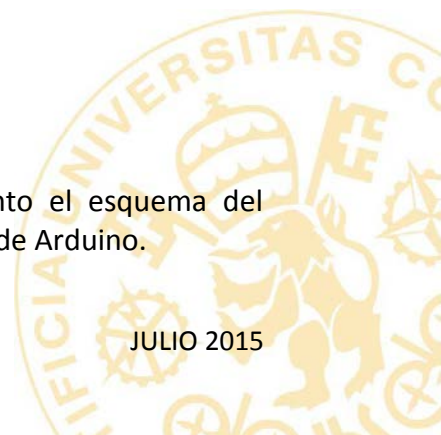
Ecuación 11

$$R = 4650\ \Omega;$$

Ecuación 12

El condensador utilizado a la salida del puente de diodos será de 1 mF.

Finalmente se presenta el esquema completo, donde se incluye tanto el esquema del secuencímetro como el del rectificador con la entrada digital en la placa de Arduino.





3.3. CIRCUITO DE INDICACIÓN

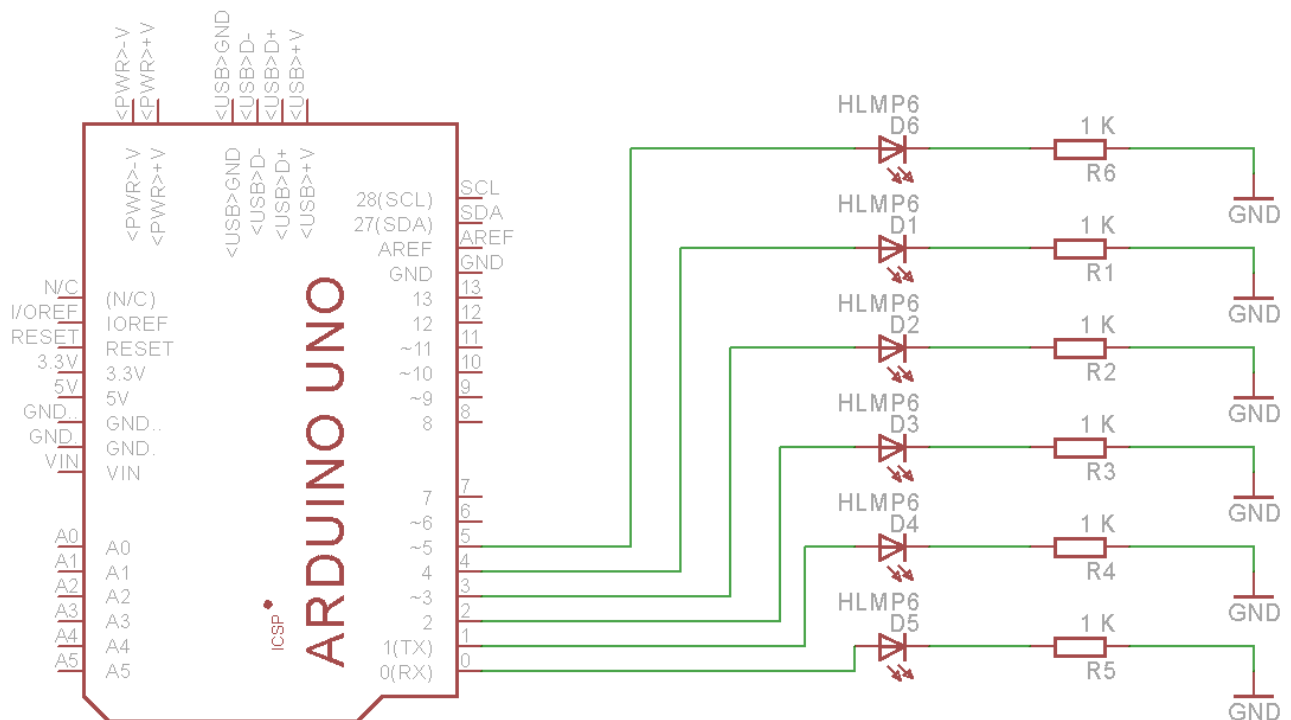


Ilustración 36

Los Leds mostrados en el esquema anterior se utilizan para las siguientes funciones:

- Indicar si hay que subir/bajar la tensión de la máquina síncrona para igualarla con la red.
- Indicar si la intensidad que circula entre las fases T y W es cero.
- Indicar que se puede accionar el pulsador para cerrar el circuito y sincronizar la máquina con la red.

Los detalles técnicos de los Leds son los siguientes: debido a que soportan una tensión máxima de 2 V (la tensión de salida de la placa de Arduino es 5 V), es necesario conectar una resistencia en serie con él para que parte de la tensión se quede en la resistencia y en el Led solo haya 2 V. La corriente óptima de funcionamiento de un Led está ubicada en torno a 15 mA.

Una vez explicado el funcionamiento del Led y sus principales características, se pasa a calcular la resistencia necesaria para su correcto funcionamiento.

Aplicando la ley de Ohm:

$$I = \frac{V}{R} ; R = \frac{V}{I} = \frac{3}{15 \cdot 10^{-3}} = 200 \, \Omega$$

Ecuación 13

Por tanto, una resistencia de 1 k Ω es válida para el correcto funcionamiento del Led.

Para determinar la potencia:

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{3^2}{1000} = 9 \cdot 10^{-3} W = 9 mW$$

Ecuación 14

3.4. CIRCUITO DE DISPARO

Una vez que se cumplen las condiciones necesarias para la sincronización, será necesario activar el pin de salida correspondiente al circuito que provoca el cierre de los relés que sincronizarán la máquina síncrona y la red eléctrica.

El circuito correspondiente se muestra en la siguiente figura:

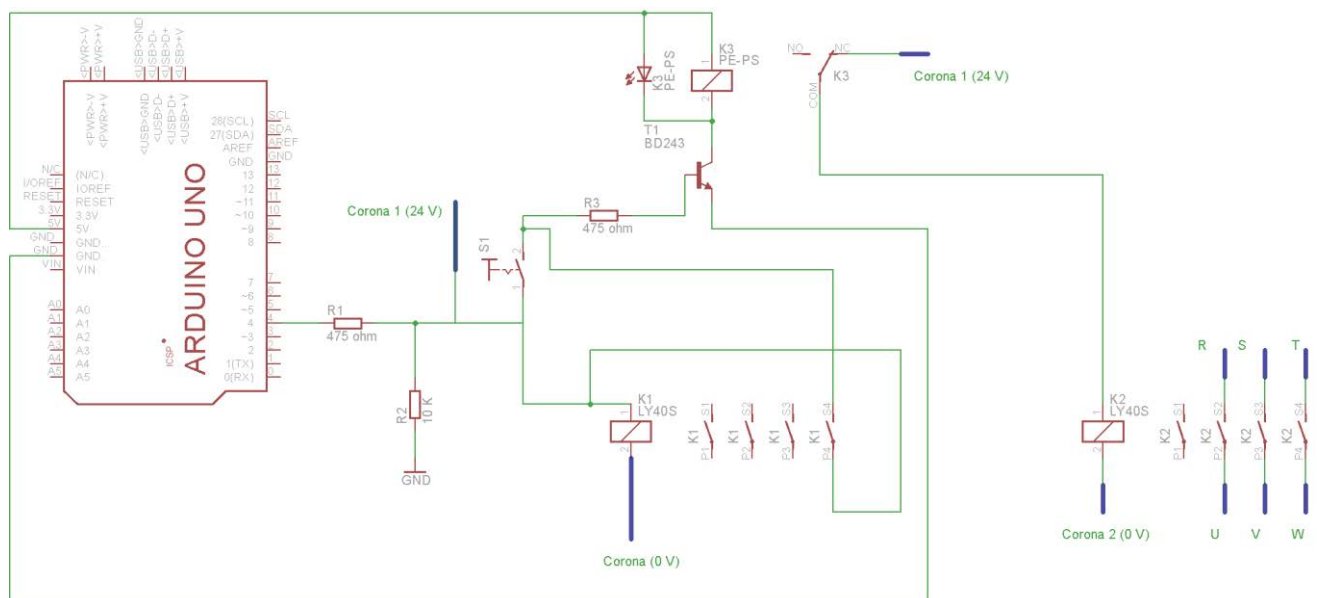


Ilustración 37

Debido a que el equipo de sincronización es manual, se instala un pulsador a la salida del pin digital de Arduino de manera que se cumpla una puerta lógica AND. El funcionamiento se muestra en la siguiente tabla:

Pin digital	Pulsador	Resultado
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0

Tabla 4

De esta forma, solamente cuando el pin digital de salida esté en un valor lógico 1 y cuando se pulse el pulsador correspondiente, se producirá la sincronización entre la máquina síncrona y la red eléctrica.

A la hora de diseñar el circuito del pulsador, hay que tener en cuenta que el pulsador no proporciona un cierre del circuito constante, sino que cuando se deja de pulsar vuelve a abrir el circuito. Para solucionar este problema, hay que situar un relé adicional de manera que cuando el pulsador deje pasar la corriente, el relé se cargue y cierre uno de sus contactos (la configuración del contacto del relé será normalmente abierto). Debido a que el relé se alimenta a 24 V, hay que tener cuidado con el pin de salida de Arduino, porque éste soporta 5 V a 40 mA. Para ello se conecta una resistencia entre dichos puntos de conexión, tal y como se muestra en la figura. El valor de la resistencia R1 es:

$$R_1 = \frac{24\text{ V} - 5\text{ V}}{0.04\text{ A}} = 475\ \Omega;$$

Ecuación 15

Una vez protegida la salida digital de la placa, se pasa a la conexión del pulsador.

Existen dos formas de conectar el pulsador y la resistencia: pull-up y pull-down. La misión de realizar esta conexión es mantener siempre un estado lógico, tanto si es alto o bajo, es decir, tener un 1 o un 0. En el caso de pull-up, establece un estado lógico alto cuando el circuito está en reposo, y pull-down un estado lógico bajo cuando el sistema está en reposo. De otra manera, si no se utilizan estas resistencias, el valor de entrada puede ser aleatorio (tanto alto como bajo) debido a los ruidos eléctricos o variaciones de la fuente de alimentación. Esto también evita los estados de alta impedancia.

En la configuración pull-up, cuando el pulsador está en reposo, Vout es prácticamente Vcc. En ese caso se considera como un nivel lógico alto. Cuando se pulsa S1, la corriente se deriva a tierra, por lo que Vout es 0, y por tanto, valor lógico bajo.

En la configuración pull-down, cuando el pulsador está en reposo, Vout es 0, por lo que se tiene un valor lógico bajo. En caso contrario, cuando se pulsa S1, Vcc es igual a Vout, con lo que se tiene valor lógico alto.

El valor clásico de estas resistencias suele estar comprendido entre 1 kΩ y 10 kΩ, aunque también puede ser mayor. Cuanto mayor sea la resistencia, en el caso de pull-up, la respuesta del pin para responder a los cambios de voltaje es más lenta. Esto se explica de la siguiente manera: el sistema que alimenta el pin de entrada es un condensador y la resistencia de pull-up. Por tanto, se forma un filtro RC. Una de las características de estos filtros es que necesitan un tiempo para cargarse y descargarse. Cuando se tiene una señal que cambia rápidamente, si la resistencia de pull-up es grande puede limitar la velocidad que tiene el pin para cambiar de estado.

A la hora de elegir la resistencia para el diseño del circuito, se suele tomar un valor de 10 kΩ, ya que es suficiente para tener una buena señal en la configuración pull-up, pero además es suficientemente flexible como para que una señal de 0 V pueda modificar el valor.

El relé adicional se conecta de la siguiente manera: el borne A1 se conecta el borne 2 del pulsador. El borne A2 del relé se conecta con corona (0 V). El contacto 5L3 se conecta con el borne 1 del pulsador y con corona (24 V). El contacto 6T3 se conecta con A1.

El relé utilizado en este caso es del tipo CWC09.01E. Las características de estos relés se detallan en el anexo correspondiente.



Ilustración 38

A continuación se conecta el siguiente módulo.



Ilustración 39

La entrada está formada por 3 conexiones. Dos de ellas son para conectarlo con la entrada de 5 V de la placa de Arduino y con el pin GND. La tercera se corresponde con la salida del pulsador citado anteriormente. Debido a que la tensión máxima va a ser de 5 V y el pulsador está trabajando con 24 V, hay que colocar en serie una resistencia del mismo valor que la resistencia R1 calculada anteriormente.

El esquema se muestra en la siguiente figura:

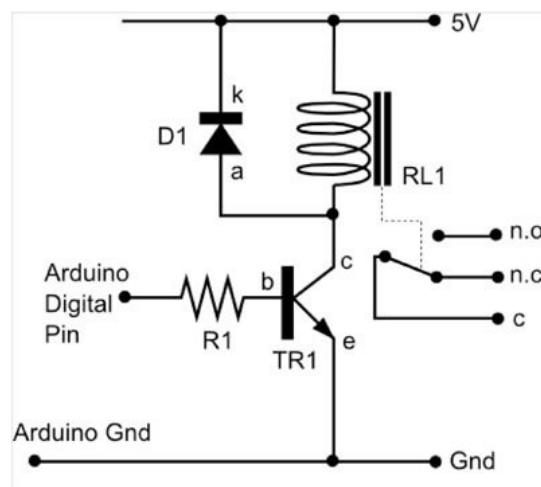


Ilustración 40



La salida de este módulo tiene 3 bornes: NC (normalmente cerrado), NO (normalmente abierto) y COM (punto común). El borne NO está conectado con corona a 24 V y el borne COM se conecta con la entrada A1 del relé encargado de cerrar el circuito y llevar a cabo la sincronización de la máquina síncrona con la red eléctrica. La salida A2 del relé se conecta con corona a 0 V.

Este relé será del mismo modelo que el relé adicional para mantener el pulsador activado. Se utilizarán sus 6 bornes normalmente abiertos de forma que 3 de ellos estarán conectados con las 3 fases de la máquina y los otros 3 serán las 3 fases de la red eléctrica.

3.5. CIRCUITO COMPLETO

Finalmente se muestra el circuito completo, en el que se integran las partes descritas anteriormente. En este esquema se incluye la máquina síncrona a acoplar con la red y el control de velocidad llevado a cabo mediante una máquina asíncrona. La documentación correspondiente a la máquina se muestra en el anexo correspondiente.





4. DESCRIPCIÓN DE SOFTWARE



4. DESCRIPCIÓN DE SOFTWARE

En este apartado se va a describir el código programado en Arduino para realizar las medidas correspondientes de tensión, intensidad y secuencia de fases, y para el posterior cierre del circuito de salida.

La siguiente imagen muestra el proceso que sigue este programa:

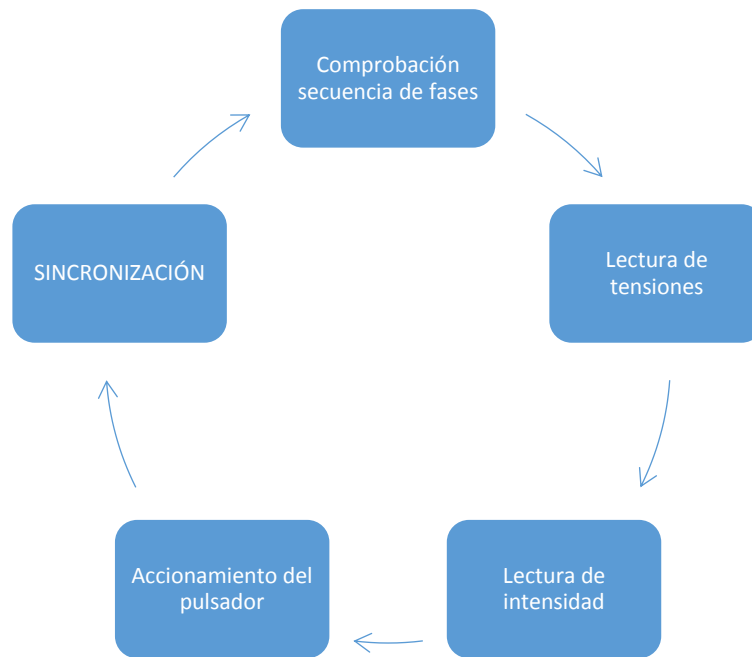


Ilustración 42

Es importante destacar que no se podrá pasar a la siguiente fase sin antes verificar el proceso anterior. Para ello, se establecerán variables que adquirirán un valor de 1 y que será de obligatorio cumplimiento para el proceso siguiente.

Antes de comenzar a analizar el código parte por parte, se describen brevemente los comandos utilizados:

pinMode(pin,mode)

Configura un pin específico como entrada o salida. Los pines digitales de Arduino están configurados por defecto como entradas.

Serial.begin(speed)

Establece comunicación con el puerto serie de la placa de Arduino. Generalmente se usa un índice de 9600.

Serial.println

Imprime los datos del puerto serie en formato ASCII.

digitalRead(pin)

Lee el valor de un determinado pin digital, tanto si es un estado lógico alto o bajo (HIGH o LOW).

<i>digitalWrite(pin,value)</i>	Escribe un estado lógico alto o bajo en un pin digital. Si el pin ha sido configurado como salida, su tensión está establecida en 5 V(3.3 V) si es estado alto, y en 0 V cuando es estado bajo.
<i>analogRead(pin)</i>	Lee el valor de un determinado pin analógico. Esto significa que puede leer tensiones comprendidas entre 0 y 5 V en formato de bits (entre 0 y 1023), por lo que lee 4.9 mV por cada bit.
<i>delay(ms)</i>	Detiene el programa una cantidad de tiempo especificada en el comando.

4.1. COMPROBACIÓN DE LA SECUENCIA DE FASES

En primer lugar hay que asegurarse de que la conexión de los bornes de la máquina síncrona coincide con la secuencia de fases de la red. Para ello se construyó un secuencímetro (descrito en el apartado descripción del circuito).

Para que el futuro usuario tenga la seguridad de que la secuencia de fases es correcta, se instala un led en el protoboard de manera que se encenderá cuando la secuencia de fases sea correcta.

Se tendrá en cuenta una variable de asignación “*cond1*”, que valdrá 1 cuando la secuencia de fases sea correcta, y por tanto, será una de las condiciones a tener en cuenta a la hora de avanzar tanto a la medida de tensión como a la medida de intensidad.

El código utilizado es el siguiente:

```
// COMPROBACION SECUENCIA DE FASES

if (cond1 == 0) {

    valor = digitalRead(sequencia_fases);

    if (valor == 1) {
        cond1 = 1;
    }
    if (cond1 == 1) {
        digitalWrite(LED_RST, HIGH);
    } else {
        digitalWrite(LED_RST, LOW);
    }
}
```

De acuerdo con las especificaciones del secuencímetro, las entradas digitales de Arduino tendrán un valor “*HIGH*” cuando la tensión sea superior a 3 V. El proceso de software es realizar una lectura de dichas entradas digitales, y activar un Led cuando éstas tengan valor “*HIGH*”. En caso contrario, el valor asignado será “*LOW*” y el Led estará apagado.

Para comprobar que los Led se encienden o se apagan exclusivamente cuando deben hacerlo, se ha establecido una comunicación con el puerto serie para mostrar el valor de la variable asignada a la lectura de la entrada digital de Arduino. Como ejemplo, la variable

“valor” tendrá valor 1 cuando la secuencia de fases sea RST. En caso contrario, su valor será 0.

En el caso de que las tensiones sean cero, no se encenderá ningún led ya que el secuencímetro no recibe alimentación, por lo que su tensión a la salida también será cero y la entrada digital de Arduino se establece en cero.

4.2. MEDIDA DE TENSIÓN

En este apartado se lleva a cabo la medición del módulo de la tensión U_{RS} y U_{UW} de la red y de la máquina respectivamente. Para ello, se va a utilizar la librería “Emonlib.h”, disponible en Open Energy Monitor. El código de esta librería se muestra a continuación:

4.2.1. Librería Emonlib.h:

```
#ifndef EmonLib_h
#define EmonLib_h

#if defined(ARDUINO) && ARDUINO >= 100

#include "Arduino.h"

#else

#include "WProgram.h"

#endif

#ifndef READVCC_CALIBRATION_CONST
#define READVCC_CALIBRATION_CONST 1126400L
#endif

#if defined(__arm__)
#define ADC_BITS 12
#else
#define ADC_BITS 10
#endif

#define ADC_COUNTS (1<<ADC_BITS)

class EnergyMonitor
{
public:

    void voltage(unsigned int _inPinV, double _VCAL, double _PHASECAL);
    void current(unsigned int _inPinI, double _ICAL);

    void voltageTX(double _VCAL, double _PHASECAL);
    void currentTX(unsigned int _channel, double _ICAL);

    void calcVI(unsigned int crossings, unsigned int timeout);
    double calcIrms(unsigned int NUMBER_OF_SAMPLES);
    void serialprint();

    long readVcc();
    //Useful value variables
    double realPower, apparentPower, powerFactor, Vrms, Irms;

private:
```

```

//Set Voltage and current input pins
unsigned int inPinV;
unsigned int inPinI;
//Calibration coefficients
//These need to be set in order to obtain accurate results
double VCAL;
double ICAL;
double PHASECAL;

//-----
// Variable declaration for emon_calc procedure
//-----
    int sampleV;

    double lastFilteredV, filteredV; //Filtered_ is the raw analog
value minus the DC offset
    double filteredI;
    double offsetV; //Low-pass filter output
    double offsetI; //Low-pass filter output

    double phaseShiftedV; //Holds the calibrated phase
shifted voltage.

    double sqV, sumV, sqI, sumI, instP, sumP; //sq = squared, sum = Sum,
inst = instantaneous

    int startV; //Instantaneous voltage at
start of sample window.

    boolean lastVCross, checkVCross; //Used to measure number
of times threshold is crossed.

};

#endif

```

Una vez mostrado este código, el proceso de medida de tensión consiste en aplicar esta librería para la medida de las tensiones citadas anteriormente. Para ello, será preciso conocer la calibración, el desfase de la medida y la entrada analógica correspondiente de Arduino. Para establecer el parámetro de calibración, se realiza un ensayo¹ con la tensión a la que se va a realizar la prueba (en este caso 220 V). Si se realiza con otra tensión, al manejar tensiones lejanas se va a perder mucha precisión y por tanto el programa no va a dar los resultados esperados.

El código utilizado para la medida de tensión es el siguiente:

```

#include "EmonLib.h" // Include Emon Library
EnergyMonitor emon1; // Create an instance

void setup()
{
    Serial.begin(9600);
}

```

¹ Ensayo "Comprobación de U_{RS} y U_{UW} " dentro del apartado ensayos.

```

    emon1.voltage(2, 234.26, 1.7);           // Voltage: input pin,
    calibration, phase_shift
}

void loop()
{
    emon1.calcVI(20,2000);                 // Calculate all. No.of half
    wavelengths (crossings), time-out

    float supplyVoltage = emon1.Vrms;       //extract Vrms into Variable
    Serial.println(supplyVoltage);
}

```

Al igual que ocurría con la comprobación de la secuencia de fases, no se podrá pasar al apartado siguiente sin satisfacer las condiciones obligatorias para la medida de tensión.

El código utilizado específico para este ensayo es el siguiente:

```

// COMPROBACION MODULO DE TENSIONES

if (cond1 == 1) {

    if(cond2 == 0) {
        emon1.calcVI(20,2000);
        float tension0 = emon1.Vrms;
        Serial.println("Umaquina");
        Serial.println(tension0);

        emon2.calcVI(20,2000);
        float tension1 = emon2.Vrms;
        Serial.println("Ured");
        Serial.println(tension1);

        if (tension0 >= tension1 - 2 && tension0 <= tension1 + 2) {
            cond2 = 1;
            digitalWrite(LED_tension_correcta, HIGH);
            digitalWrite(LED_subir, LOW);
            digitalWrite(LED_bajar, LOW);
            Serial.println("cond2");
            Serial.println(cond2);
        } else {
            digitalWrite(LED_tension_correcta, LOW);
            cond2 = 0;
            Serial.println("cond2");
            Serial.println(cond2);
        }

        if(tension0 < tension1 - 2) {
            digitalWrite(LED_subir, HIGH);
            digitalWrite(LED_bajar, LOW);
            delay(1000);
            digitalWrite(LED_subir, LOW);
        }

        if(tension0 > tension1 + 2) {
            digitalWrite(LED_subir, LOW);
            digitalWrite(LED_bajar, HIGH);
            delay(1000);
            digitalWrite(LED_bajar, LOW);
        }
    }
}

```

```

    }
  }
}

```

El proceso de medida es el siguiente:

- En primer lugar, se utiliza la librería Emonlib.h para calcular el valor eficaz de la entrada de tensión de la máquina y de la red.
- Una vez medidas, se comparan entre ellas. Si hay una diferencia menor de 4 V entre ellas, el programa enciende el led que indica que los módulos son prácticamente iguales, y se pasaría a la siguiente fase.
- En caso de que la tensión de la máquina sea mayor o menor que la red en un determinado valor, obliga al programa a encender un led que indique que hay que subir o bajar la tensión.

Finalmente, como aclaración, hay que añadir que en caso de que las dos tensiones sean 0, el programa lo ejecuta como un error y por tanto no permite pasar a la medida de intensidad en ningún caso.

4.3. MEDIDA DE LA INTENSIDAD

Esta última condición consiste en la medida de la intensidad que circula por las fases T y W de la máquina síncrona y de la red, de forma que se procederá a la sincronización una vez que la secuencia de fases sea correcta, los módulos de las tensiones sean iguales, y la intensidad sea cero.

Para medir la intensidad se utilizó una sonda de corriente, por lo que la placa de Arduino recibe una tensión de aproximadamente 2.5 V. Al ser una entrada analógica, se utiliza el comando "*analogRead*". El código utilizado para medir la intensidad es el siguiente:

```

// COMPROBACION INTENSIDAD

if (cond1 == 1 && cond2 == 1) {

    float val = analogRead(pin_analogico);
    float Usonda = val*0.00488;
    Serial.println("Usonda");
    Serial.println(Usonda);

    if (Usonda == 2.5) {
        cond3 = 1;
        digitalWrite(LED_intensidad, HIGH);
    } else {
        cond3 = 0;
        digitalWrite(LED_intensidad, LOW);
    }
}

```

4.4. CONDICIONES PARA LA SINCRONIZACIÓN

Una vez que se ha explicado cómo se han medido los diferentes parámetros, se procede a explicar qué relaciones se establecen para llevar a cabo la sincronización.

```
// SINCRONIZACION

if (cond1 == 1 && cond2 == 1 && cond3 == 1) {
    digitalWrite(LED_sincronizar, HIGH);
} else {
    digitalWrite(LED_sincronizar, LOW);
}
}
```

La sincronización se realizará cuando tanto el apartado de secuencia de fases como el de tensiones tengan sus correspondientes variables con valor igual a 1.

En ese caso, se encenderá un led que indique que se puede sincronizar.

En el apartado de anexos, se describe el código completo.



5. MONTAJE CIRCUITO



5. MONTAJE

En este apartado se muestra el montaje del circuito del sincronoscopio, tanto en el protoboard como en pcb. En el apartado de anexos se encuentra detallado cada módulo de medida y actuación.

5.1. MONTAJE PROTOBOARD

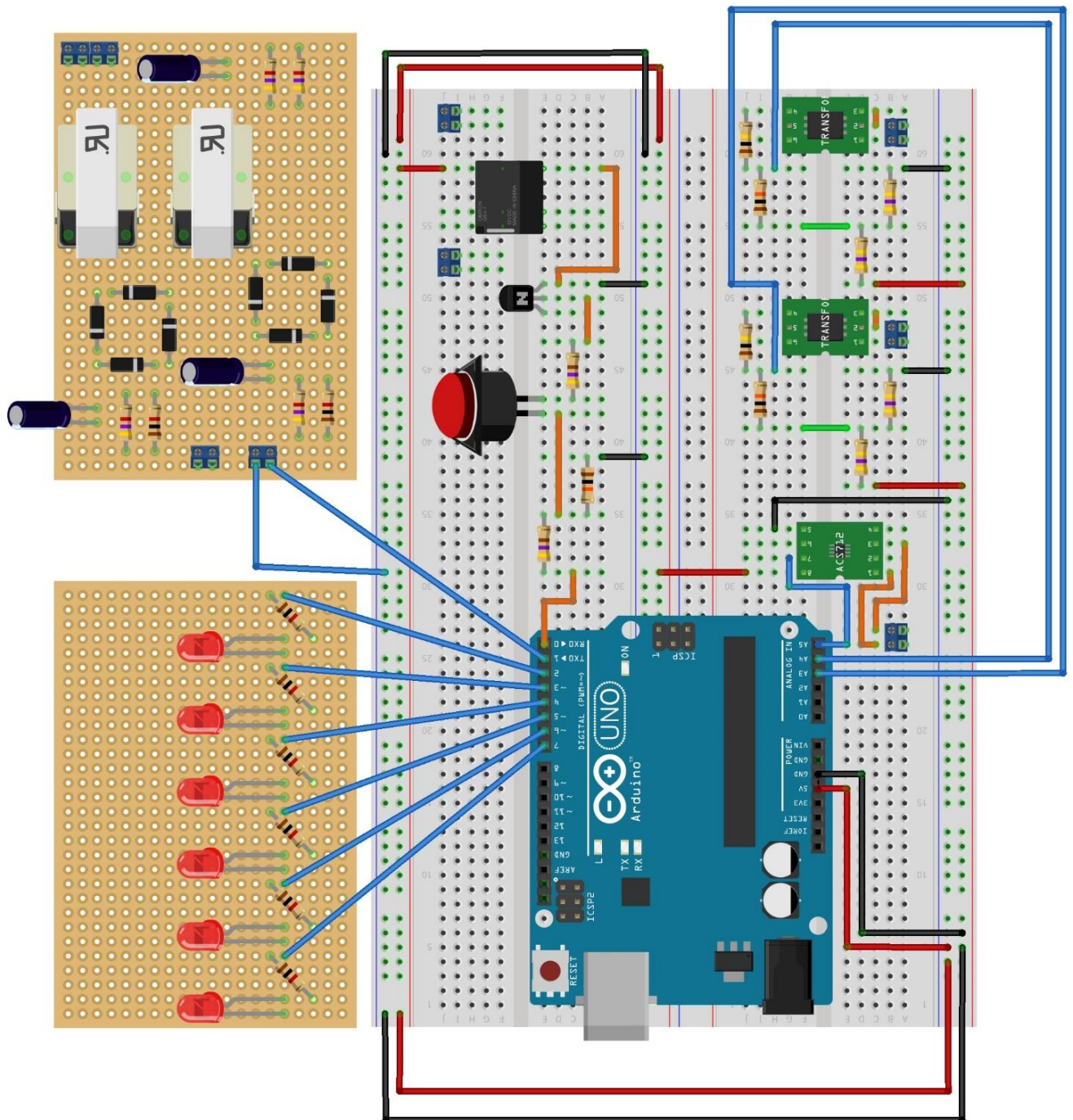


Ilustración 43

5.2. MONTAJE PCB

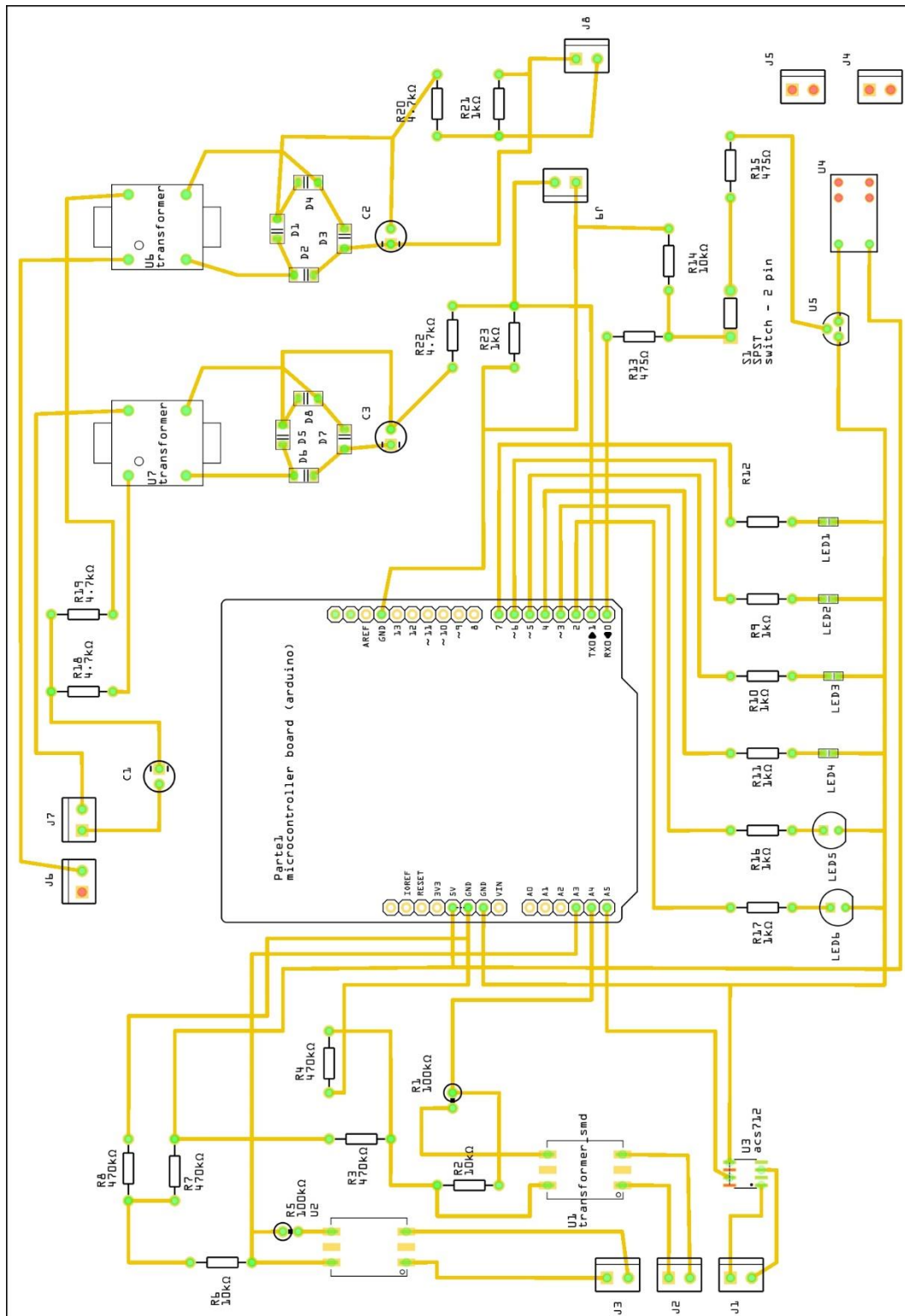


Ilustración 44

6. ENSAYOS



6. ENSAYOS

En este apartado se va a realizar el montaje del circuito y su posterior prueba para comprobar que cumple con la función de sincronizar la máquina síncrona y la red eléctrica. Se va a dividir en los siguientes ensayos:

- Comprobación de medida de tensión en U_{rs} (red).
- Comprobación de medida de tensión en U_{uv} (máquina síncrona).
- Comprobación de medida de intensidad en I_t .

Estos ensayos están destinados a comprobar que el software programado proporciona valores de forma que se pueda asegurar que los datos que se obtendrán posteriormente en la máquina eléctrica son correctos.

6.1. COMPROBACIÓN DE U_{rs} y U_{uv}

6.1.1. Entrada A0

Antes de conectar la placa de Arduino a una máquina eléctrica real para proceder a la sincronización, se utiliza un banco de pruebas con una tensión de 220 V. Hay que destacar que el transformador de relación 220 V/9 V se ha sustituido por otro de relación 330 V/ 10 V para evitar problemas con la saturación por trabajar tan cerca de sus límites.

Debido a ello, la tensión esperada a su salida es:

$$U_{salida-transf} = 220 \text{ V} \cdot \frac{10 \text{ V}}{330 \text{ V}} = 6.67 \text{ V};$$

Ecuación 16

Por tanto, el valor de pico es:

$$U_{salida-transf} = 6.67 \text{ V} \cdot \sqrt{2} = 9.42 \text{ V};$$

Ecuación 17

Aplicando el divisor de tensión formado por las resistencias de 10 kΩ y 100 kΩ, la tensión de salida será:

$$U_{divisor} = 6.67 \text{ V} \cdot \frac{10 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega + 100 \text{ k}\Omega} = 0.61 \text{ V (eficaces)};$$

Ecuación 18

$$U_{divisor} = 9.42 \text{ V} \cdot \frac{10 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega + 100 \text{ k}\Omega} = 0.86 \text{ V (pico)};$$

Ecuación 19

Los valores calculados anteriormente se corresponden con los valores teóricos de las resistencias. En la realidad, el valor de dichas resistencias no coincide con el valor teórico, por lo que se ha determinado su verdadero valor con un multímetro (Peaktech 2705). Los valores de las resistencias se muestran a continuación:

$$R_1 = 8.18 \text{ k}\Omega \pm 7.11 \%;$$

Ecuación 20

$$R_2 = 98.9 \text{ k}\Omega \pm 6.05 \%;$$

Ecuación 21

Como consecuencia de esta desigualdad, los valores esperados de tensión serán diferentes a los anteriores:

$$U_{divisor} = 6.67 \text{ V} \cdot \frac{8.18 \text{ k}\Omega}{8.18 \text{ k}\Omega + 98.9 \text{ k}\Omega} = 0.509 \text{ V (eficaces)};$$

Ecuación 22

$$U_{divisor} = 9.42 \text{ V} \cdot \frac{8.18 \text{ k}\Omega}{8.18 \text{ k}\Omega + 98.9 \text{ k}\Omega} = 0.719 \text{ V (pico)};$$

Ecuación 23

Una vez explicados estos procesos, se muestran las señales en el osciloscopio, donde se comprueba como los valores obtenidos son muy parecidos a los esperados teóricamente.

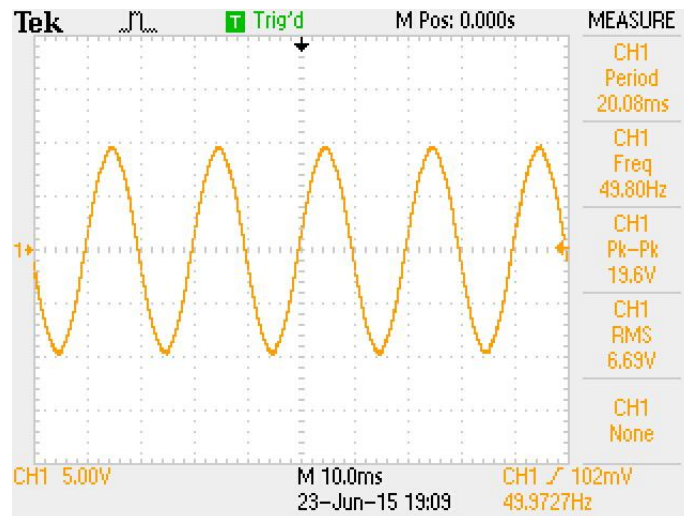


Ilustración 45

En esta primera imagen se comprueba como el valor eficaz es 6.69 V, por tanto, el error con respecto al valor teórico es:

$$\varepsilon = \frac{6.69 \text{ V} - 6.67 \text{ V}}{6.67 \text{ V}} \cdot 100(\%) = 0.29 \%;$$

Ecuación 24

En segundo lugar, la tensión de salida del primer divisor se muestra en la siguiente imagen:

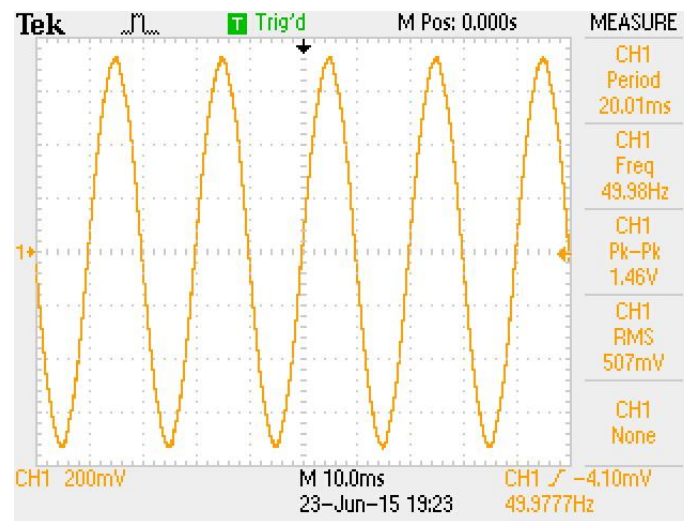


Ilustración 46

En este caso, el error obtenido en esta medición es:

$$\varepsilon = \frac{0.509 \text{ V} - 0.507 \text{ V}}{0.509 \text{ V}} \cdot 100 (\%) = 0.39 \%;$$

Ecuación 25

Como se observa, el error en esta medida es superior al anterior, como consecuencia de la suma de las incertidumbres del transformador y de las resistencias utilizadas en el divisor de tensión.

En último lugar, se muestra la señal que recibe la placa de Arduino una vez aplicado el segundo divisor de tensión, correspondiente al offset de 2.5 V que se añade para que la tensión esté comprendida entre 0 y 5 V.

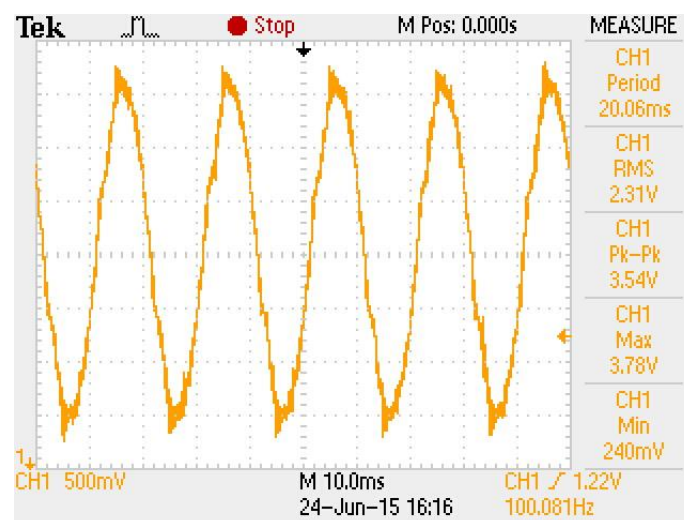


Ilustración 47

Como se comprueba, existe un mínimo en 240 mV (> 0 V) y un máximo en 3.78 V (< 5 V), por lo que queda comprobado que el circuito montado es correcto.

Finalmente, para que la placa de Arduino lea la señal senoidal de tensión se utiliza la librería "Emonlib.h". El parámetro establecido como calibración tiene un valor de 300. En este caso, la tensión medida oscila entre 218 V y 220 V.

6.1.2. Entrada A1

Al igual que en el caso anterior, se va a utilizar un transformador de 330V/10 V para reducir la tensión de entrada (220 V).

El valor teórico es igual que en la entrada A0:

$$U_{salida-transf} = 220 \text{ V} \cdot \frac{10 \text{ V}}{330 \text{ V}} = 6.67 \text{ V};$$

Ecuación 26

Por tanto, el valor de pico es:

$$U_{salida-transf} = 6.67 \text{ V} \cdot \sqrt{2} = 9.42 \text{ V};$$

Ecuación 27

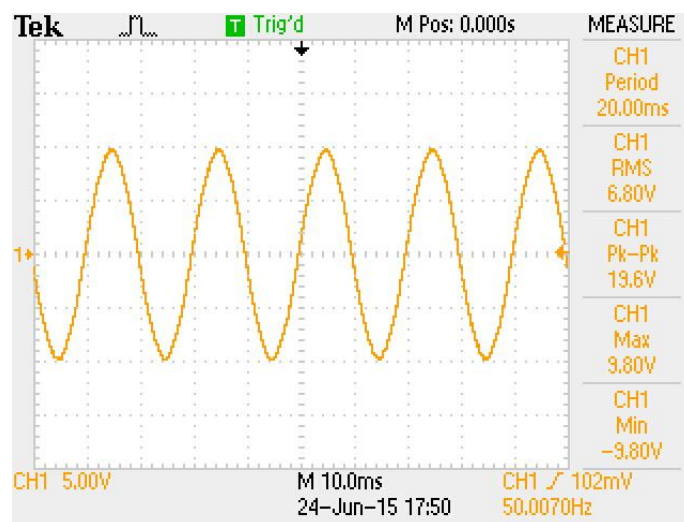


Ilustración 48

En este caso, el valor de las resistencias tampoco coincide con el valor teórico de sus especificaciones. Utilizando el mismo multímetro que en el caso anterior se obtienen los siguientes valores:

$$R_1 = 9.85 \text{ k}\Omega \pm 6.07 \%;$$

Ecuación 28

$$R_2 = 98.7 \text{ k}\Omega \pm 6.06 \%;$$

Ecuación 29

Por tanto, el valor esperado a la salida de este divisor de tensión es:

$$U_{divisor} = 6.67 \text{ V} \cdot \frac{9.85 \text{ k}\Omega}{9.85 \text{ k}\Omega + 98.7 \text{ k}\Omega} = 0.605 \text{ V (eficaces)};$$

Ecuación 30

$$U_{divisor} = 9.42 \text{ V} \cdot \frac{9.85 \text{ k}\Omega}{9.85 \text{ k}\Omega + 98.7 \text{ k}\Omega} = 0.854 \text{ V (pico)};$$

Ecuación 31

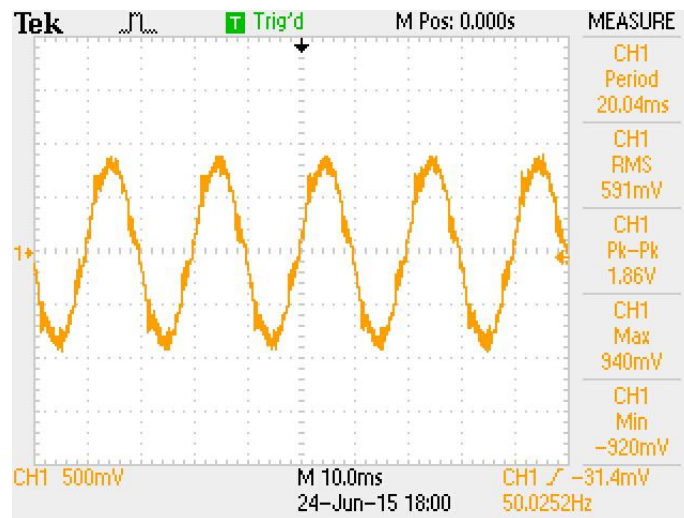


Ilustración 49

Como se muestra en la imagen anterior, el valor obtenido es 591 mV, por lo que el error de la medida es:

$$\varepsilon = \frac{0.605 \text{ V} - 0.591 \text{ V}}{0.605 \text{ V}} \cdot 100 (\%) = 2.31 \%$$

Ecuación 32

Además de este divisor de tensión, hay que construir otro para añadir un offset de valor 2.5 V de manera que la tensión de entrada a la placa esté comprendida entre 0 y 5 V.

Los resultados son los siguientes:



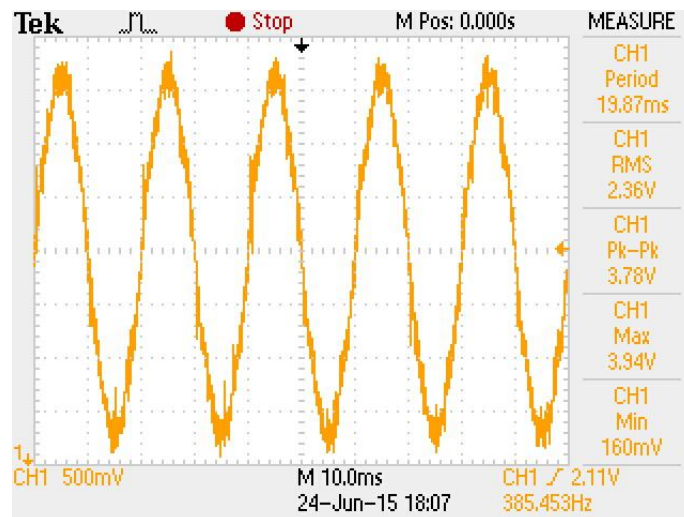


Ilustración 50

Como se comprueba en la imagen, el valor máximo es menor de 5 V (3.94 V) y el valor mínimo es mayor que 0 V (160 mV), por lo que queda comprobado que el circuito es correcto.

A la hora de la programación del software de Arduino, el valor que utiliza el parámetro de calibración de la librería "Emonlib.h" es 220.

6.2. COMPROBACIÓN DE I_T

Para ajustar la medida de intensidad se va a utilizar el siguiente circuito:

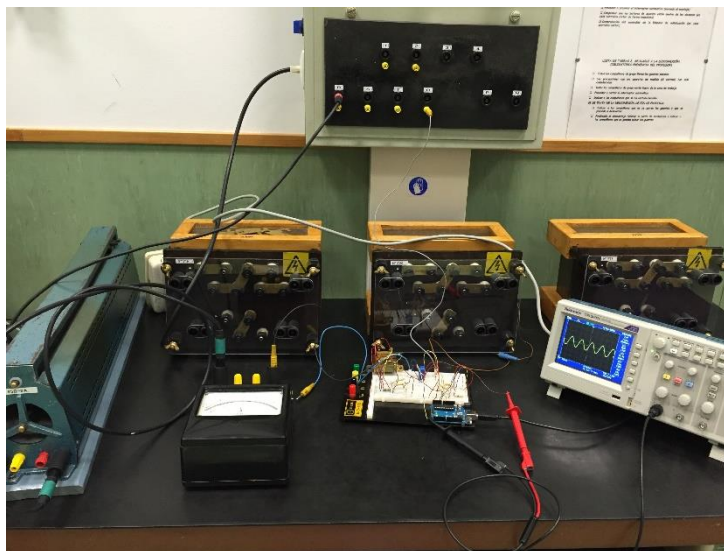


Ilustración 51

Para realizar este apartado correctamente hay que tener en cuenta la limitación de corriente que plantea el transductor. La alimentación se realizará con tensión de 127 V. La intensidad máxima que soporta la sonda de corriente es 6 A, por tanto:

$$R \geq \frac{127 \text{ V}}{6 \text{ A}} = 21.16 \Omega;$$

Ecuación 33

De las resistencias disponibles en el laboratorio se utilizará una de 45Ω y 6 A . Como estas resistencias no tienen exactamente ese valor, al medir con un ohmímetro se obtiene un valor de 47.6Ω .

Además de dicha resistencia, se va a utilizar un amperímetro analógico para controlar la intensidad que circula por el circuito y un osciloscopio para controlar la señal de tensión a la entrada de la placa de Arduino. Como intensidad de prueba se fija 3 A con la resistencia en un valor de 43.2Ω .

Aplicando la característica de la sonda:

$$V_{out} = 2.5 \text{ V} \pm 0.625 \cdot \frac{I_P}{I_{PN}};$$

Ecuación 34

$$V_{out} = 2.5 \text{ V} \pm 0.625 \cdot \frac{3 \text{ A}}{6 \text{ A}};$$

Ecuación 35

$$V_{out} = 2.5 \text{ V} \pm 0.312 \text{ V};$$

A continuación se muestra la señal de tensión registrada en el osciloscopio:

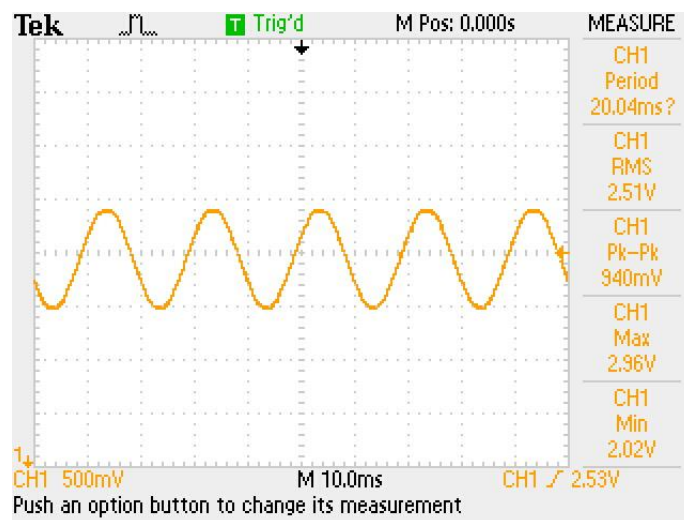


Ilustración 52

Como se comprueba, la tensión se encuentra dentro de los límites establecidos por la sonda de corriente, con un valor máximo de 2.96 V y un valor mínimo de 2.02 V , siendo el valor eficaz de 2.51 V .

Al realizar la lectura de esta tensión en la placa de Arduino, se obtuvo de igual forma valores comprendidos entre 2 y 3 V de la misma manera que en la señal del osciloscopio, por lo que el circuito montado para medir intensidad es correcto.

6.3. COMPROBACIÓN DEL SECUENCIÓMETRO

Para verificar que el secuencímetro funciona correctamente, se va a utilizar el circuito mostrado en la siguiente imagen:

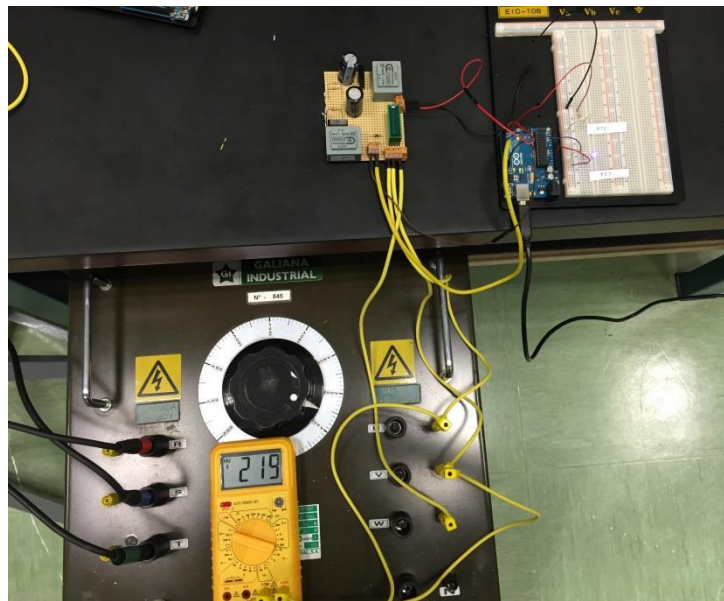


Ilustración 53

La placa construida se conecta al banco de pruebas del laboratorio a través de un autotransformador VARIAC para controlar la tensión de entrada. Además, como aparato de control se utiliza un voltímetro digital. Fijando una tensión a la salida de 220 V para simular las condiciones de funcionamiento habituales del proceso de sincronización, se obtiene un resultado satisfactorio en el encendido y apagado de los leds.

Cuando la secuencia de fases es correcta (RST), el código de Arduino obliga a encender el led correspondiente a dicha secuencia. Lo mismo ocurre en el caso de la secuencia de fases RTS. Como se describe posteriormente en el apartado de descripción del software, el programa ajusta una variable con valor 1 cuando la secuencia es RST, es decir, la misma que la de la red eléctrica.

6.4. COMPROBACIÓN CIRCUITO COMPLETO

Una vez que se ha comprobado que el sincronoscopio realiza las medidas correctamente, es hora de combinar todo el software y comprobar que el equipo responde a todas las situaciones de manera eficaz. El montaje se muestra en la siguiente imagen:

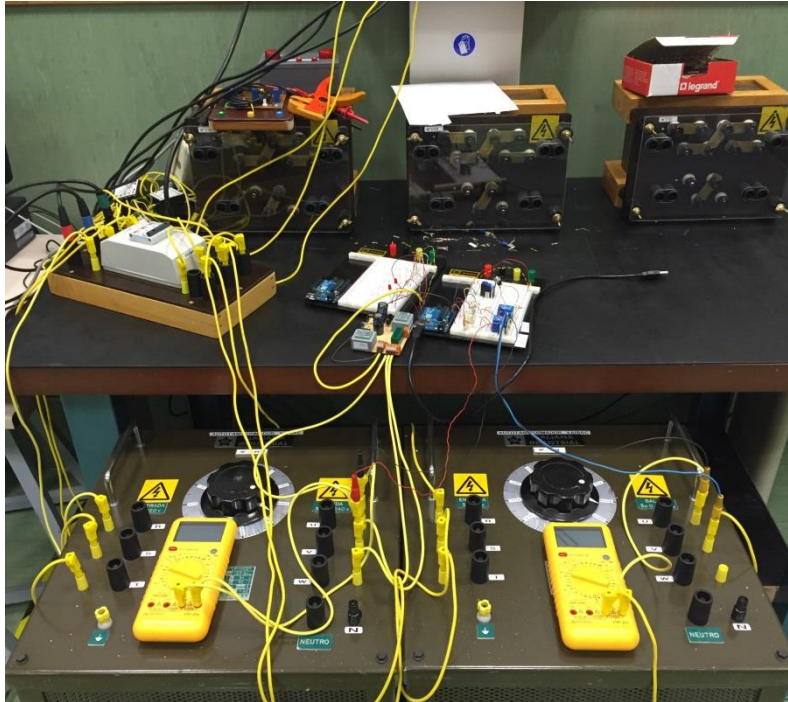


Ilustración 54

A la hora de probar el circuito completo, como el banco de pruebas solamente dispone de un punto de conexión, se utiliza un interruptor en modo abierto para generar dos puntos diferentes, y así poder introducir en la placa dos tensiones que simulan a las futuras tensiones de la máquina y de la red.

Además, para comprobar el encendido y apagado de los leds en función de la diferencia entre las dos tensiones, se utilizan autotransformadores VARIAC acompañados de voltímetros de manera que se puede controlar con mayor precisión la tensión que le llega a la placa.

El resultado de este ensayo es satisfactorio ya que para los diferentes valores de tensión, se encienden los leds de “subir tensión”, “bajar tensión” o “módulo correcto”, además del led que indica que la secuencia de fases es correcta.

Todos estos resultados se muestran en las siguientes imágenes:

En primer lugar, se muestra el encendido de los leds de secuencia de fases correcta y de módulo de tensión correcto.



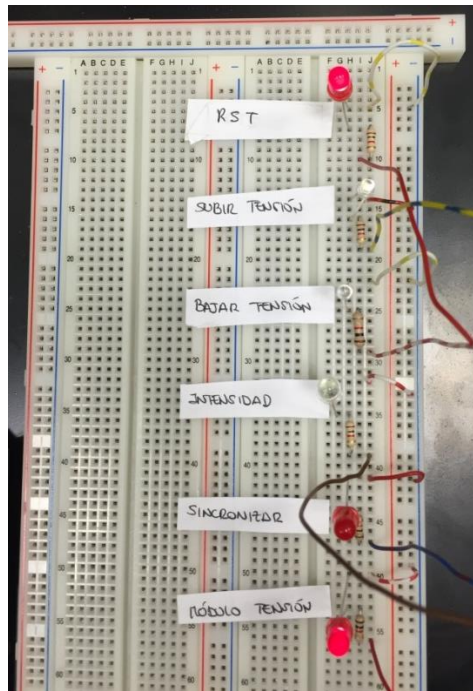


Ilustración 55

En segundo lugar, el caso en el que la tensión de la máquina es superior a la de la red, por lo que se enciende el led de bajar tensión.

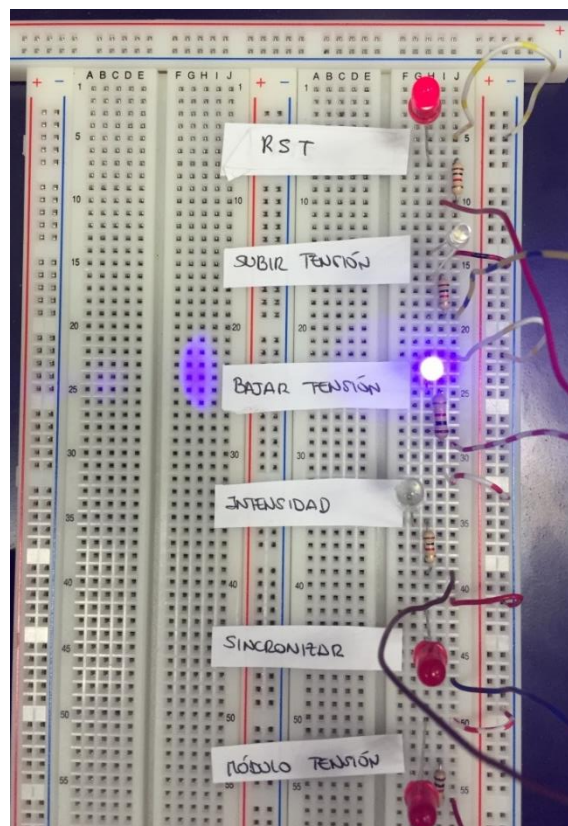


Ilustración 56



Finalmente, se muestra el caso en el que la tensión de la máquina es inferior a la de la red, y por tanto, el programa indica que hay que subir la tensión conseguir igualar los módulos.

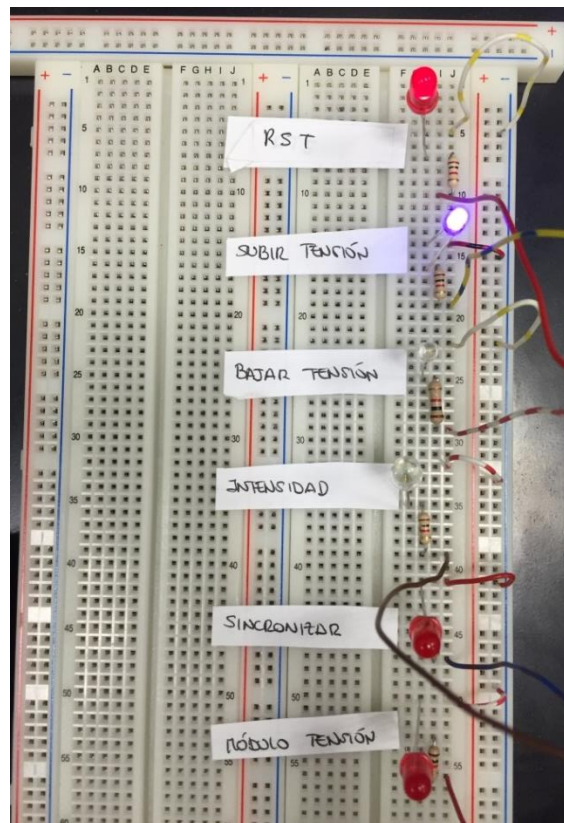


Ilustración 57

6.5. ENSAYO SOBRE MÁQUINA SÍNCRONA

Una vez que se ha probado todo el hardware en el banco de pruebas, se pasa a una máquina síncrona para verificar que el proceso de sincronización es correcto. Como recordatorio, el programa de Arduino primero verifica que la secuencia de fases sea correcta, una vez hecho esto, se pasa a la comparación de los módulos de tensiones, y finalmente, cuando los anteriores son correctos, se pasa a comprobar la intensidad. En cualquier otro caso, el programa no deja pasar a la fase siguiente. Las siguientes imágenes muestran el montaje de la placa en conjunto con la máquina síncrona.



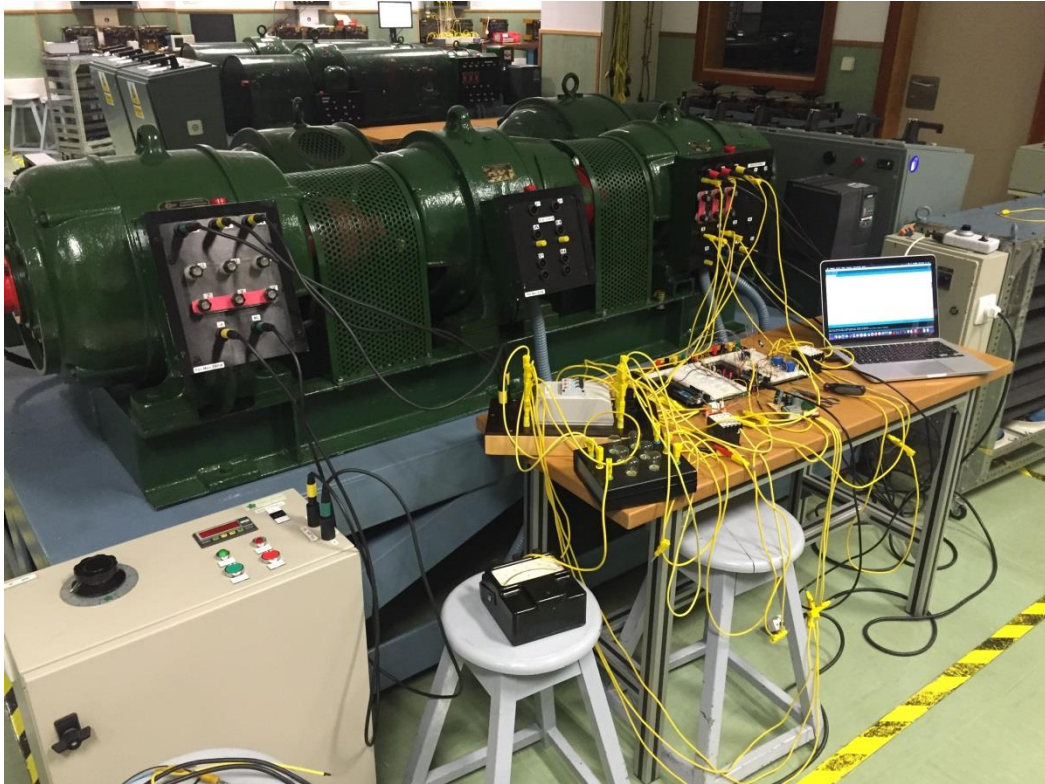


Ilustración 58

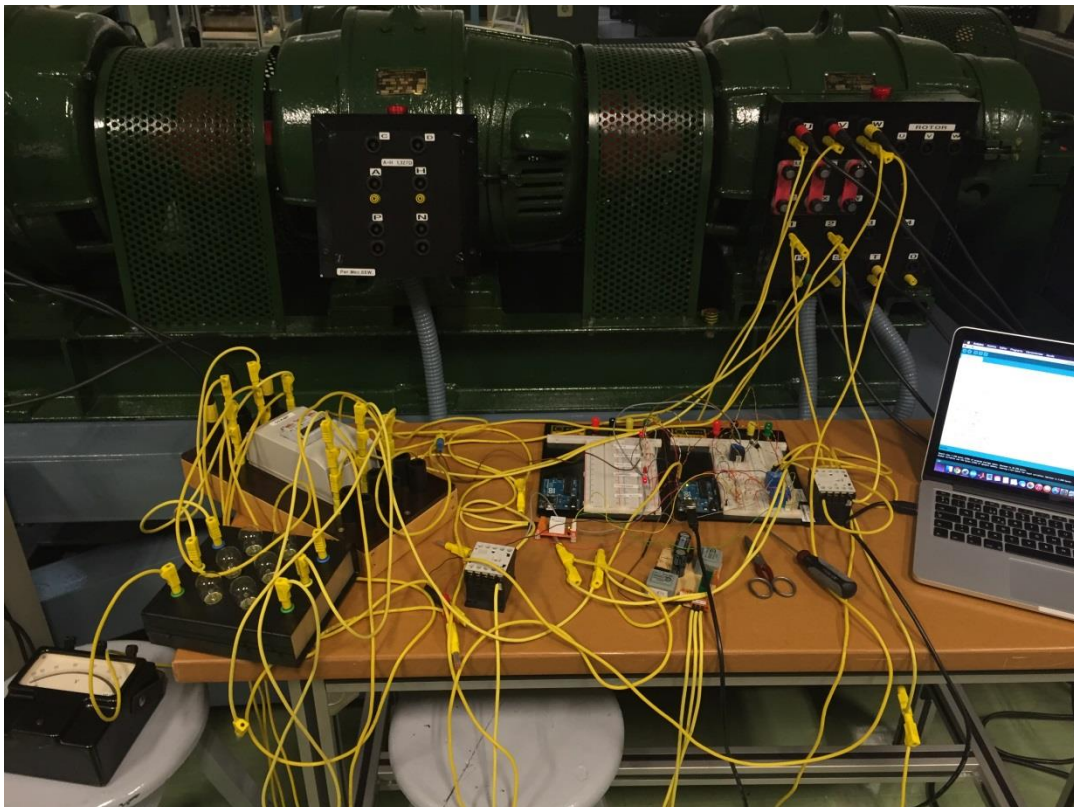


Ilustración 59

Para la realización de este ensayo se ha utilizado un regulador de velocidad, que permite no utilizar la resistencia de arranque para llevar la máquina síncrona a velocidad nominal. Este

regulador pertenece al fabricante Siemens, cuyo nombre es “Siemens Micromaster”. Sus características se detallan en el anexo correspondiente.

Además, se ha utilizado un interruptor para simular las condiciones de sincronización, y unas bombillas, que además de facilitar visualmente el momento de la sincronización, se utilizan para evitar quemar la sonda de corriente, ya que limitan la intensidad que circula entre sus bornes.

Otro aparato utilizado como ayuda visual para determinar el momento de la sincronización, es decir, cuando la intensidad es cero, es un voltímetro, ya que su valor va a oscilar a una frecuencia de 50 Hz. Esto es importante, ya que la placa de Arduino muestrea cada milisegundo.

Para finalizar este apartado, hay que añadir que no se concluyó este ensayo debido a diversos problemas con la sonda de corriente y los equipos de medida.



7. MEMORIA ECONÓMICA



7. MEMORIA ECONÓMICA

En este capítulo se va a realizar un estudio económico del proyecto, separando entre el coste que supone la labor de ingeniería de la construcción del proyecto (horas empleadas en el desarrollo del proyecto) y el coste de los materiales utilizados (coste de cada uno de los componentes utilizados).

A la hora de cuantificar el desarrollo del sincronoscopio, el presupuesto está dividido en diversos campos de trabajo, cuya ejecución es realizada por diferentes personas. En primer lugar se van a cuantificar las horas trabajadas y después se va a valorar económicamente el coste total de todos los trabajos.

Es importante destacar que todo el tiempo dedicado a labores académicas, como puede ser conocer el estado del arte o el aprendizaje de programas informáticos como Word o Excel no van a ser considerados en la elaboración del presupuesto.

7.1. HORAS DE DISEÑO

En esta sección se van a describir las horas de trabajo dedicadas al estudio de funcionamiento del sincronoscopio y a su diseño. En la siguiente tabla se incluye las horas de trabajo dedicadas a cada módulo específico del esquema eléctrico del sincronoscopio.

Horas de diseño	
Descripción	Horas estimadas
Estudio de funcionamiento del sincronoscopio	2
Módulo del secuencímetro	8
Módulo de medida de tensión	6
Módulo de medida de corriente	4
Módulo de encendido de LEDs	1
Módulo de disparo	6
TOTAL	27

Tabla 5

7.2. HORAS DE MONTAJE

Una vez diseñado el equipo, se procede al montaje de todos los componentes sobre la placa de Arduino y la máquina eléctrica a sincronizar. En este apartado se incluyen también las tareas dedicadas a ensayos de la máquina para comprobar sus características antes de sincronizarla con la red.

Horas de montaje	
Descripción	Horas estimadas
Módulo del secuencímetro	10
Módulo de medida de tensión	5
Módulo de medida de intensidad	1.5
Módulo de encendido de LEDs	0.5
Módulo de disparo	7
TOTAL	24

Tabla 6

7.3. HORAS DE PROGRAMACIÓN

Este apartado está referido a las horas dedicadas a la programación de la placa de Arduino con el software correspondiente. En él, están incluidas las horas de aprendizaje del programa y sus funciones, así como la correcta estructuración del mismo para solucionar errores o para introducir modificaciones que mejoren el funcionamiento del sincronoscopio en general.

Horas de programación	
Descripción	Horas estimadas
Módulo del secuencímetro	1.5
Módulo de medida de tensión	2
Módulo de medida de intensidad	2
Módulo de encendido de LEDs	0.5
Módulo de disparo	1
TOTAL	7

Tabla 7

7.4. HORAS DE ENSAYOS

Dentro de este apartado se va a considerar el tiempo dedicado a los diferentes ensayos de la máquina síncrona, y a la prueba de funcionamiento del sincronoscopio.

Horas de ensayos	
Descripción	Horas estimadas
Comprobación secuencia de fases	6
Comprobación de medida de U	7
Comprobación de medida de I	6.5
Comprobación del programa	12
Prueba de funcionamiento del sincronoscopio	9
TOTAL	40.5

Tabla 8

7.5. HORAS TOTALES DEL PROYECTO

En este apartado se hace un resumen de las horas totales empleadas en este proyecto, como suma de los diferentes apartados anteriores.

Horas totales del proyecto	
Trabajos	Horas estimadas
Horas de diseño	27
Horas de montaje	24
Horas de programación	7
Horas de ensayos	40.5
TOTAL	98.5

Tabla 9

7.6. COSTE DE HORAS DE TRABAJO

Una vez definidas las horas empleadas en cada fase de trabajo en el apartado anterior, se define la retribución económica de cada una de las fases del proyecto. Para ello, como se muestra en la tabla siguiente, se toma un precio unitario para cada actividad y a continuación se calcula el coste total considerando todas las horas trabajadas.

De los precios indicados en la tabla siguiente hay que destacar que a pesar de que el ingeniero industrial de diseño y el encargado de los ensayos es el mismo, la labor realizada es diferente. En este proyecto se ha dado más importancia al diseño del sincronoscopio con la finalidad de optimizar los recursos disponibles y mejorar su eficacia que a la realización de los ensayos. Por ese motivo, se ha otorgado un precio superior a la parte de diseño.

Trabajo	Coste unitario	Horas estimadas	Coste total (€)
Diseño	60 €/hora	27	1620
Técnico de montaje	25 €/hora	24	600
Programación	25 €/hora	7	175
Ensayos	55 €/hora	40.5	2227.5
TOTAL	-	98.5	4622.5

Tabla 10

7.7. COSTE DE LOS MATERIALES

En este apartado se detalla el coste de los elementos necesarios para la ejecución material del proyecto. En la tabla siguiente se detalla la lista de los materiales, así como su precio unitario y el precio total. En la tabla solamente se muestran aquellos elementos que forman parte de la placa de control, excluyéndose todos los equipos que se encuentran en el laboratorio, como puede ser la máquina eléctrica a conectar y el Variac. La placa de Arduino también se incluye debido a su importancia para la realización de este proyecto.

Producto			Precio unitario	Precio total
Nomenclatura	Valor	Unidades		
Placa Arduino Uno (SMD Rev3)	-	x1	22.01 €/ud	22.01 €
Resistencias	475 Ω	x2	0.69 €/ud	1.38 €
	1 k Ω	x8	0.338 €/ud	2.70 €
	4.7 k Ω	x4	0.058 €/ud	0.23 €
	10 k Ω	x3	0.064 €/ud	0.19 €
	100 k Ω	x2	0.034 €/ud	0.07 €
	470 k Ω	x4	0.143 €/ud	0.57 €
Condensador	100 nF	x2	0.046 €/ud	0.09 €
	0.22 μ F	x1	0.14 €/ud	0.14 €
	1 mF	x2	0.26 €/ud	0.54 €
LED	-	x6	1.57 €/ud	9.42 €
Transformador de tensión	220 V/9 V	x4	4.85 €/ud	19.4 €
Sonda de corriente LTS 6 NP	$\pm$ 19.2 A 5 V	x1	14.32 €/ud	14.32 €

Puente de diodos	30 A	x2	3.92 €/ud	7.84 €
Módulo Tinkercit	10 A	x1	15.50 €/ud	15.50 €
Relé	9 A	x2	17.64 €/ud	35.28 €
Pulsador	-	x1	1.49 €/ud	1.49 €
TOTAL				131.17 €

Tabla 11

7.8. RESUMEN DEL PRESUPUESTO

Resumen del presupuesto	
Diseño del sincronoscopio	1620.00 €
Montaje	600.00 €
Programación de Arduino	175.00 €
Ensayos	2227.50 €
Coste de materiales de montaje	131.17 €
	+ _____
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN	4753.67 €
I.V.A. (21%)	998.27 €
PRESUPUESTO DE LIQUIDACIÓN	5751.94 €

Tabla 12

El presupuesto de liquidación del proyecto realizado asciende a una suma de CINCO MIL SETECIENTOS CINCUENTA Y UN euros y NOVENTA Y CUATRO céntimos.

7.9. PLAN DE VENTAS DEL SINCRONOSCOPIO

Debido a su carácter comercial y su completa funcionalidad para ser utilizado en la sincronización de cualquier máquina eléctrica con la red, se propone un plan de venta, ajustando el precio del equipo para diferentes cantidades.

Como se vio en el apartado anterior, el precio de una unidad de este sincronoscopio asciende a 5751.94 €, una cantidad que a priori puede resultar elevada. A pesar de parecer una obviedad, para una fabricación casera solamente habría que considerar el coste de los materiales, por lo que el precio se ve reducido a 131.17 €, es decir, una reducción del 97%.

Olvidando lo mencionado en el apartado anterior, se establece el precio de venta de 10, 100 y 1000 sincronoscopios manuales debido a su producción en masa. Los resultados se muestran en la tabla siguiente:

Nº de dispositivos	Precio de venta total [€]	Precio de venta unitario [€/ud]	Descuento unitario [%]
1	5751.94	5751.94	-
10	46015.52	4601.55	20 %
100	431395.50	4313.95	25 %
1000	4026358.00	4026.35	30 %

Tabla 13

A continuación se muestra una comparativa con diferentes sincronoscopios ya existentes en el mercado, para poder comparar así la competitividad de este aparato con respecto a otros fabricantes.

En primer lugar, se compara el precio con un sincronoscopio analógico de la marca SACI. En este caso se va a utilizar como referencia el modelo SC2VI360º, con un alcance de tensión de 400 ó 440 V.

Nº de dispositivos	Precio de venta total [€]
1	360.34
10	3603.40
100	36034.00
1000	360340.00

Tabla 14

Como se puede observar, el precio de estos dispositivos es mucho menor al diseñado en este proyecto. Ello puede ser debido a que la empresa SACI realiza fabricaciones a escala industrial y por tanto el precio es más reducido ya que tiene mayores ganancias. La tabla siguiente muestra el ahorro de estos aparatos frente al sincronoscopio manual.

Nº de dispositivos	Precio de venta total sinc. Manual [€]	Precio de venta total sinc. SACI [€]	Ahorro [%]
1	5751.94	360.34	93.7
10	46015.52	3603.40	92.1
100	431395.50	36034.00	91.6
1000	4026358.00	360340.00	91.1

Tabla 15

El resultado obtenido indica que existe aproximadamente un ahorro de un 90 % al usar estos aparatos, por lo tanto su compra se justifica a excepción de que no cumpla con las características requeridas.

Una vez analizado el precio con respecto a sincronoscopios analógicos, se compara con un sincronoscopio digital. El modelo utilizado como referencia pertenece a la marca ABB, y es el modelo Synchrotact 5202.

Nº de dispositivos	Precio de venta total [€]
1	16420.08
10	164200.80
100	1642008.00
1000	16420080.00

Tabla 16



A continuación se compara el ahorro producido al utilizar el sincronoscopio manual creado en este proyecto.

Nº de dispositivos	Precio de venta total sinc. Manual [€]	Precio de venta total sinc. ABB [€]	Ahorro [%]
1	5751.94	16420.08	64.9
10	46015.52	164200.80	71.97
100	431395.50	1642008.00	73.72
1000	4026358.00	16420080.00	75.47

Tabla 17

Como queda demostrado, se produce un ahorro muy importante, del 70 % del importe del sincronoscopio vendido por ABB. En este caso, la realización del sincronoscopio manual es rentable, ya que permite ahorrar una gran cantidad de dinero.

A lo explicado anteriormente hay que considerar que el precio dado para el sincronoscopio creado en este proyecto incluye todas las horas de trabajo realizadas en el laboratorio para un estudiante de ingeniería. Realmente, el tiempo dedicado al diseño y la construcción de este equipo para un ingeniero profesional es mucho menor, por lo que el precio baja en gran medida, siendo en cualquier caso mucho más rentable este sincronoscopio manual que cualquier otro equipo comercial.



8. CONCLUSIÓN



8. CONCLUSIÓN

Una vez llevado a cabo el diseño correspondiente de este sincronoscopio manual, se puede concluir afirmando que es un equipo apto para su uso en cualquier tipo de acoplamiento, respetando siempre las características técnicas de los componentes utilizados. A pesar de ello, para los valores más comunes de tensión e intensidad, no presenta ningún inconveniente.

Como ventaja, permite un ahorro de una cantidad considerable de dinero con respecto a los sincronoscopios comerciales, y además no requiere de unos conocimientos muy complejos para su elaboración. Debido a ello, en este documento se han incluido los planos de las pcb para su futura producción.

Además, se ha diseñado el programa teniendo en cuenta posibles situaciones que pueden causar problemas de funcionamiento, como puede ser el caso de que las dos tensiones sean iguales a cero, y por tanto, según las condiciones establecidas, como sus módulos son iguales, el programa avanzaría a la fase de medida de intensidad, produciendo un error grave y consecuencias negativas sobre la máquina síncrona.

8.1. FUTUROS DESARROLLOS

El equipo diseñado en este proyecto es solo una base sobre la que se puede seguir trabajando en un futuro, ya que se pueden añadir más leds para indicar visualmente cómo de cerca se encuentra el estado óptimo para la sincronización, o mejorar el trabajo de la librería Emonlib.h para conseguir mayor precisión en la medida de tensión.

Además, se puede incluir todo ello en una envoltura de manera que el conexionado del equipo no sea visible.



9. REFERENCIAS



9. REFERENCIAS

- [SEDR06] Adel S. Sedra, **“Circuitos microelectrónicos”**, McGraw-Hill Interamericana Editores, año 2006.
- [CHAC07] Francisco J. Chacón, **“Medidas eléctricas para ingenieros”**, 2ª edición, colección Ingeniería nº 13, año 2007.
- [MORA03] J. Fraile Mora, **“Máquinas eléctricas”**, año 2003.
- [KOSO93] Irving L. Kosow, **“Máquinas eléctricas y transformadores”**, 2ª edición, Prentice Hall Hispanoamericana S.A., año 1993.
- [WILD07] Theodore Wildi, **“Máquinas eléctricas y sistemas de potencia”**, Pearson, 6ª edición, año 2007.
- [PRAC13] Icai, **“Guion de prácticas máquinas eléctricas”**, Universidad Pontificia Comillas, año 2013.
- [FERN13] Fidel Fernández Bernal, **“Guía docente del generador síncrono”**, año 2013.
- [ARTE13] Óscar Torrente Artero, **“Arduino. Curso práctico de formación”**, RC libros, año 2013.
- [PEDR14] Antonio Caicedo Pedrera, **“Arduino para principiantes”**, CreateSpace Independent Publishing Platform, año 2014.
- [ROSA01] Juan José González de la Rosa, **“Circuitos electrónicos con amplificadores operacionales”**, Marcombo, edición 1, año 2001.
- [FIOR08] James M. Fiore, **“Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales”**, Paraninfo S.A., año 2008.
- [ARDU15] Página web oficial Arduino, www.arduino.cc, año 2015.
- [SOFT15] Tutoriales de software Arduino, año 2015.
- [FRIT15] Tutoriales de software Fritzing de diseño de protoboards, año 2015.
- [EAGL15] Tutoriales de software Eagle de diseño de circuitos eléctricos, año 2015.
- [OPM_15] Página web principal “Open Energy Monitor”, <http://openenergymonitor.org/emon/>, año 2015.
- [AC__15] Página web: “Measuring AC voltage with an AC to AC power adapter”, <http://openenergymonitor.org/emon/buildingblocks/measuring-voltage-with-an-acac-power-adapter>, año 2015.



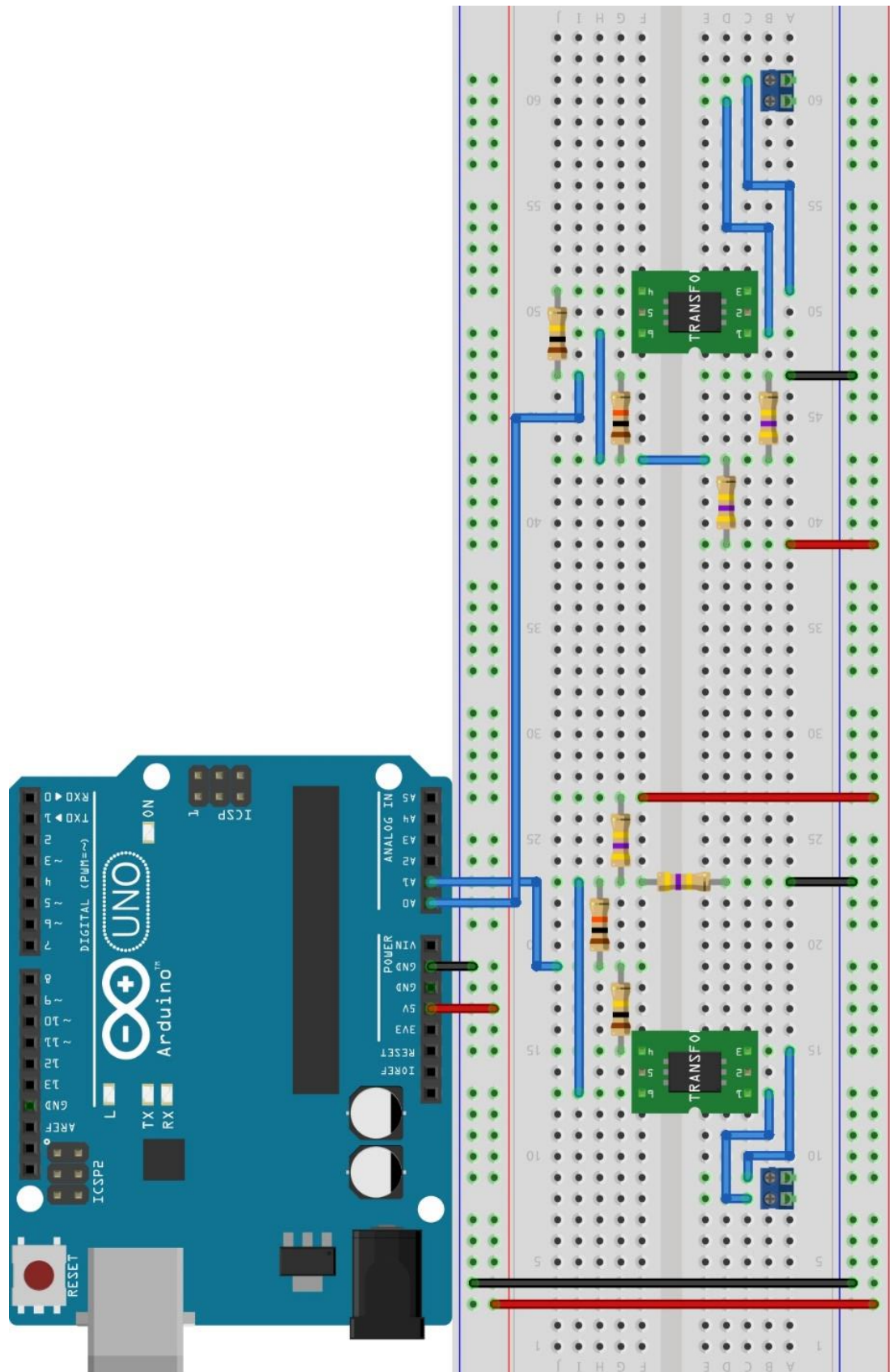
10. ANEXOS



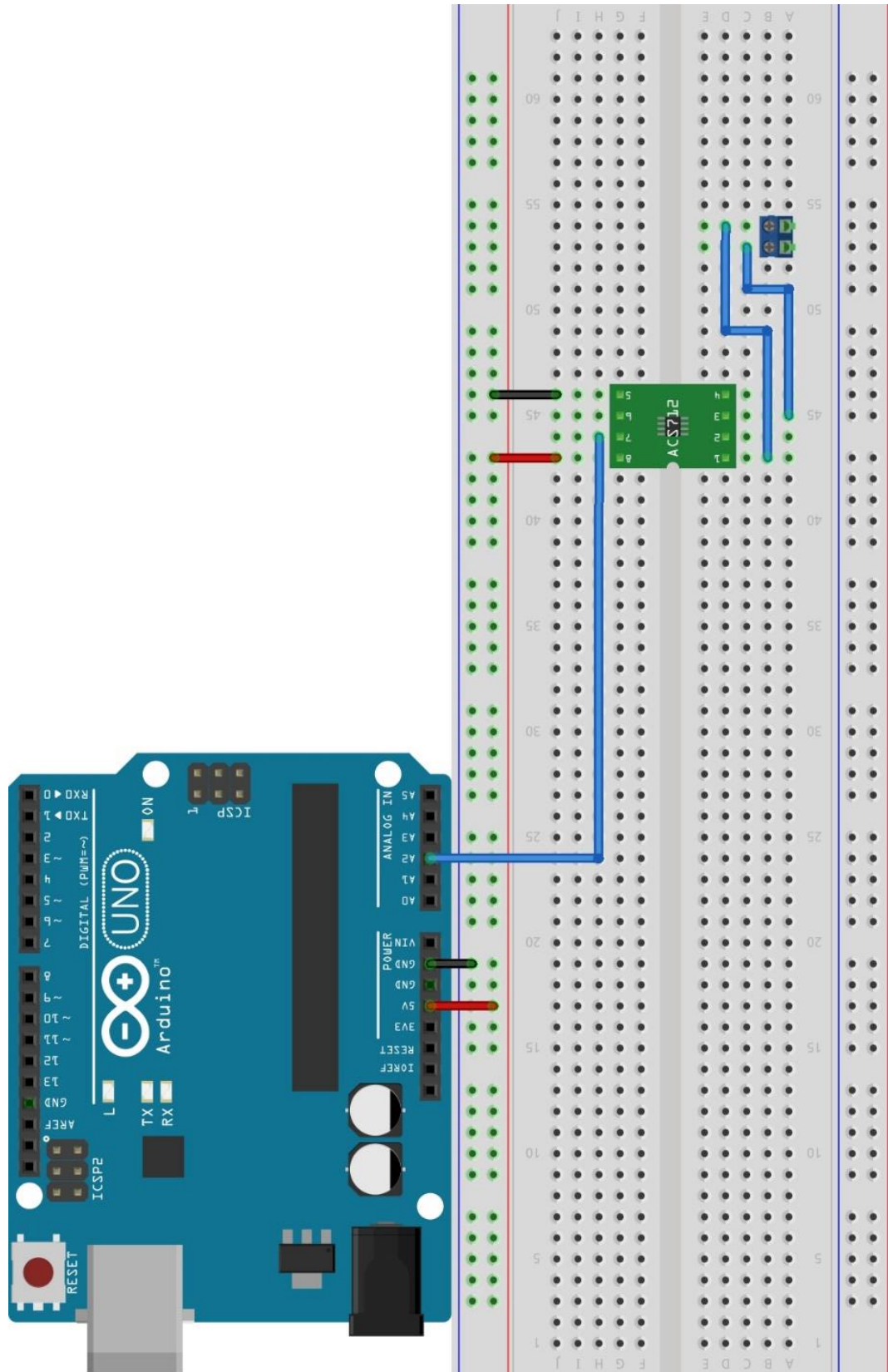
10. ANEXOS

10.1. MONTAJES PROTOBOARD

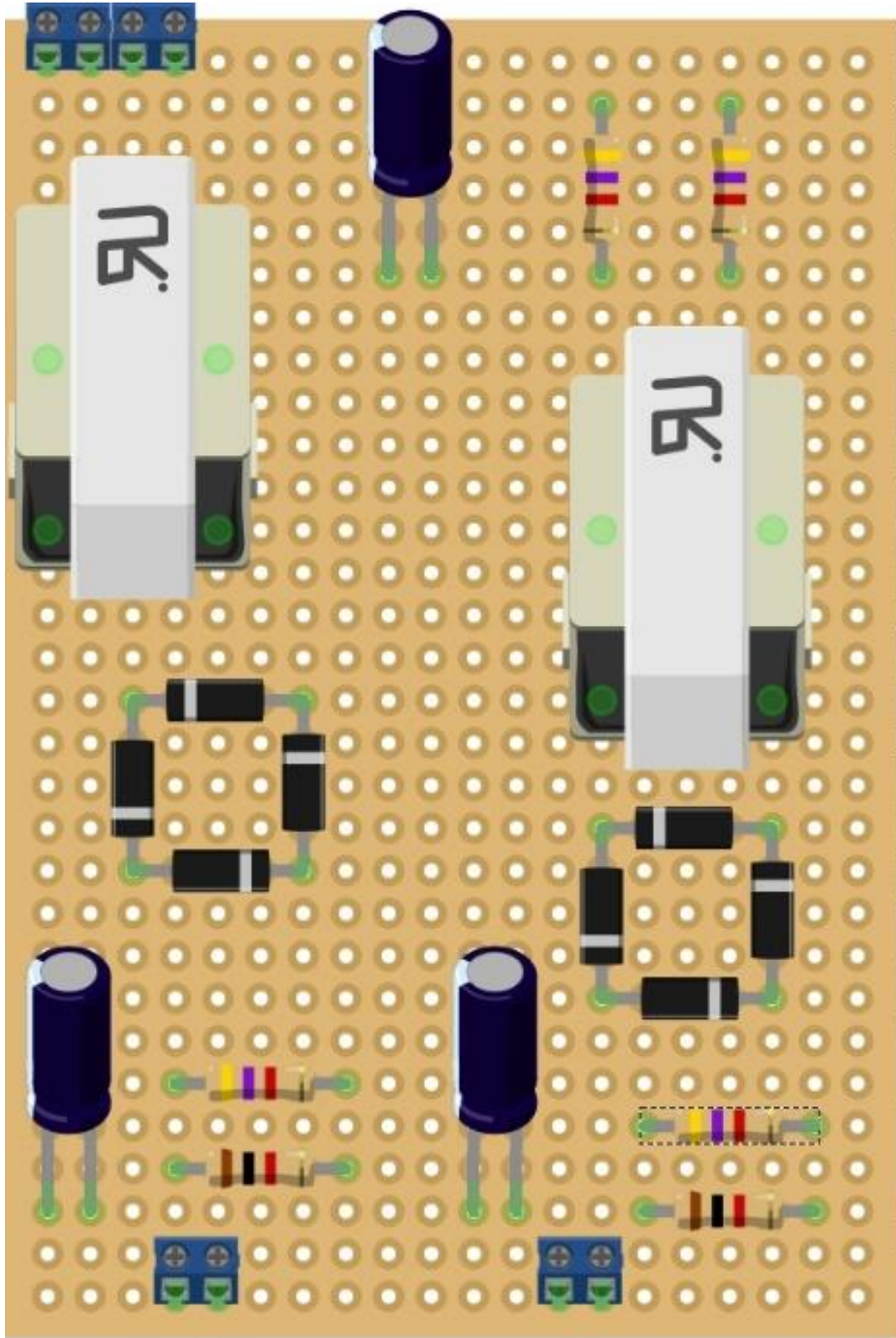
10.1.1. MEDIDA DE TENSIÓN



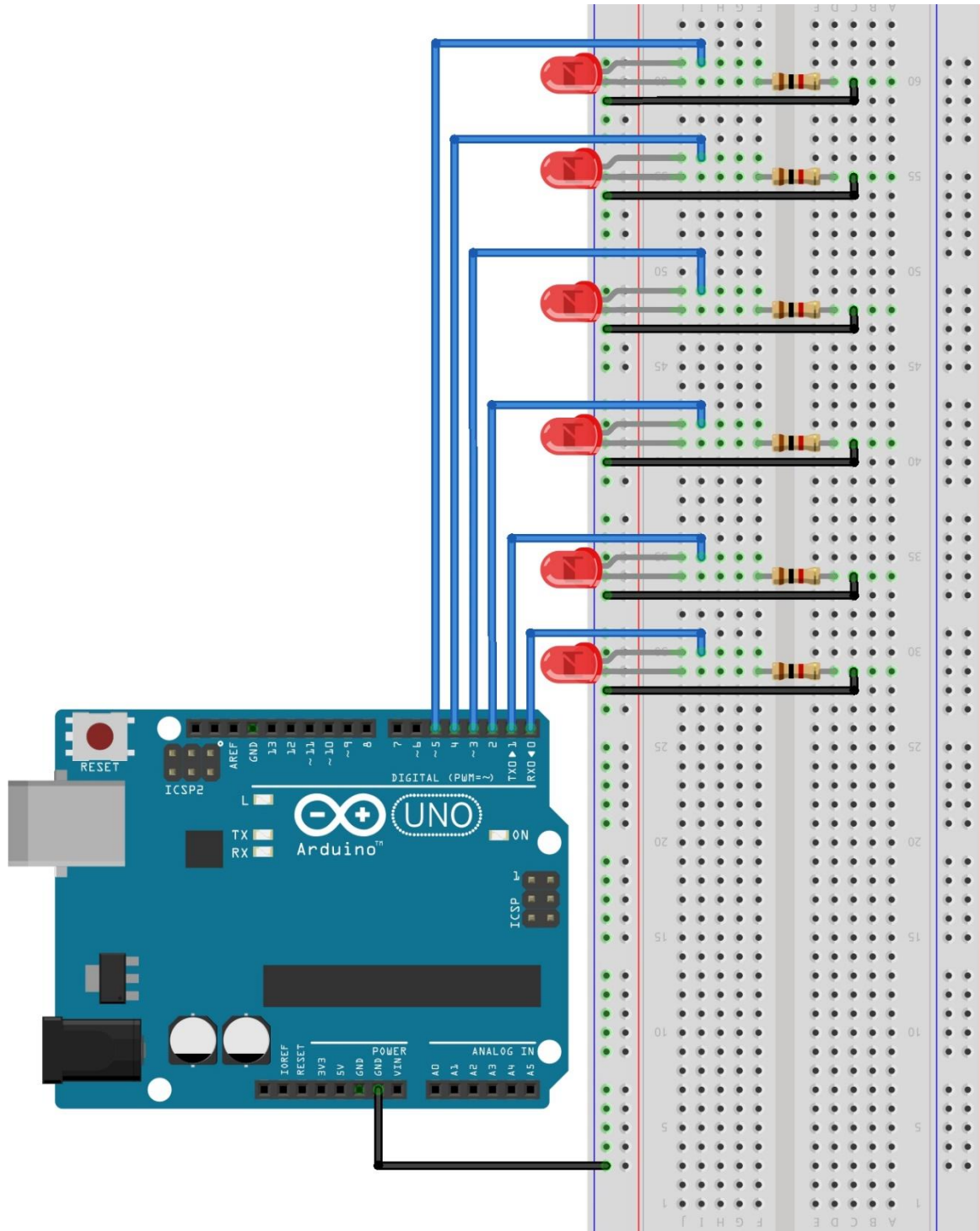
10.1.1. MEDIDA DE INTENSIDAD



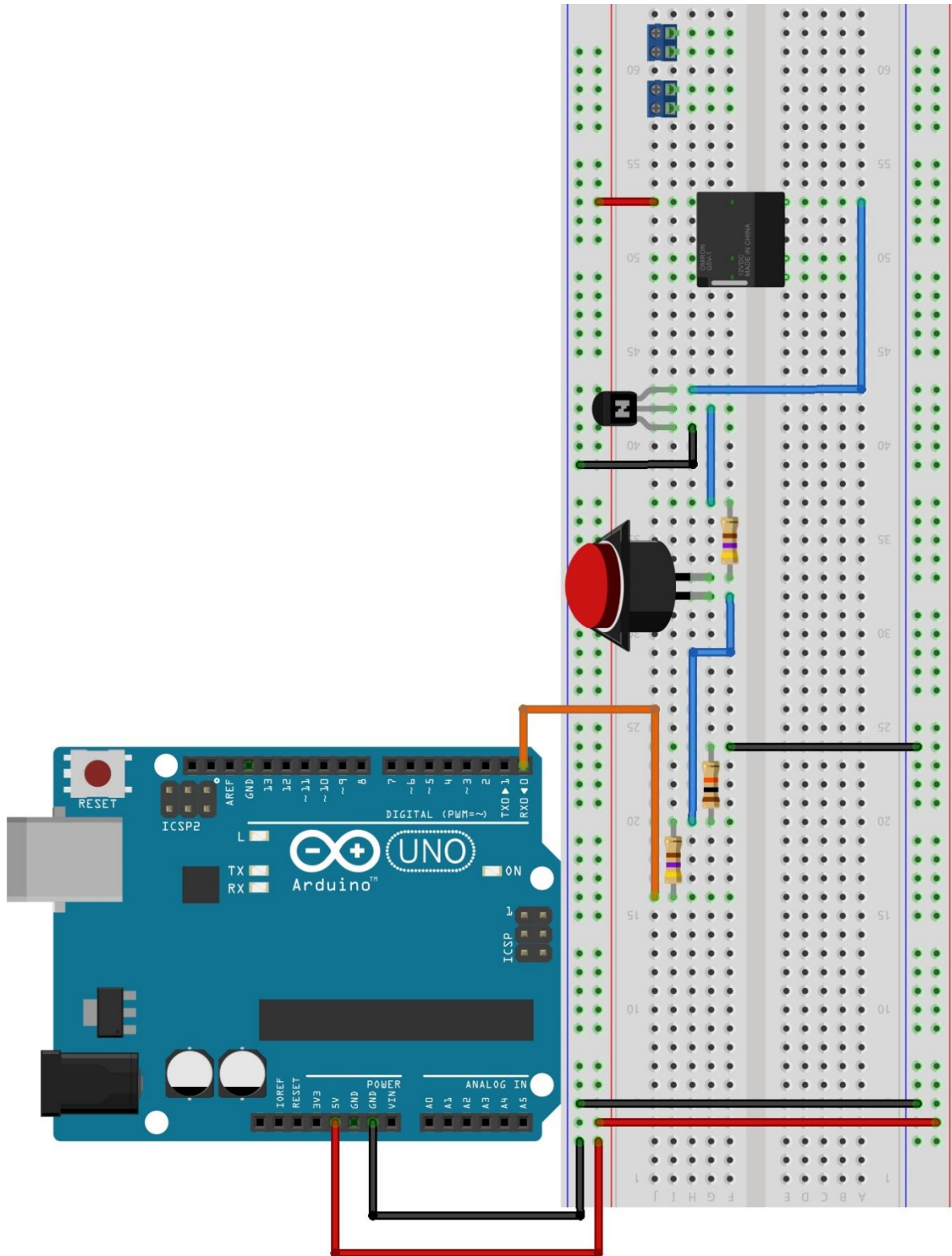
10.1.1. SECUENCÍMETRO



10.1.1. CIRCUITO DE LEDS

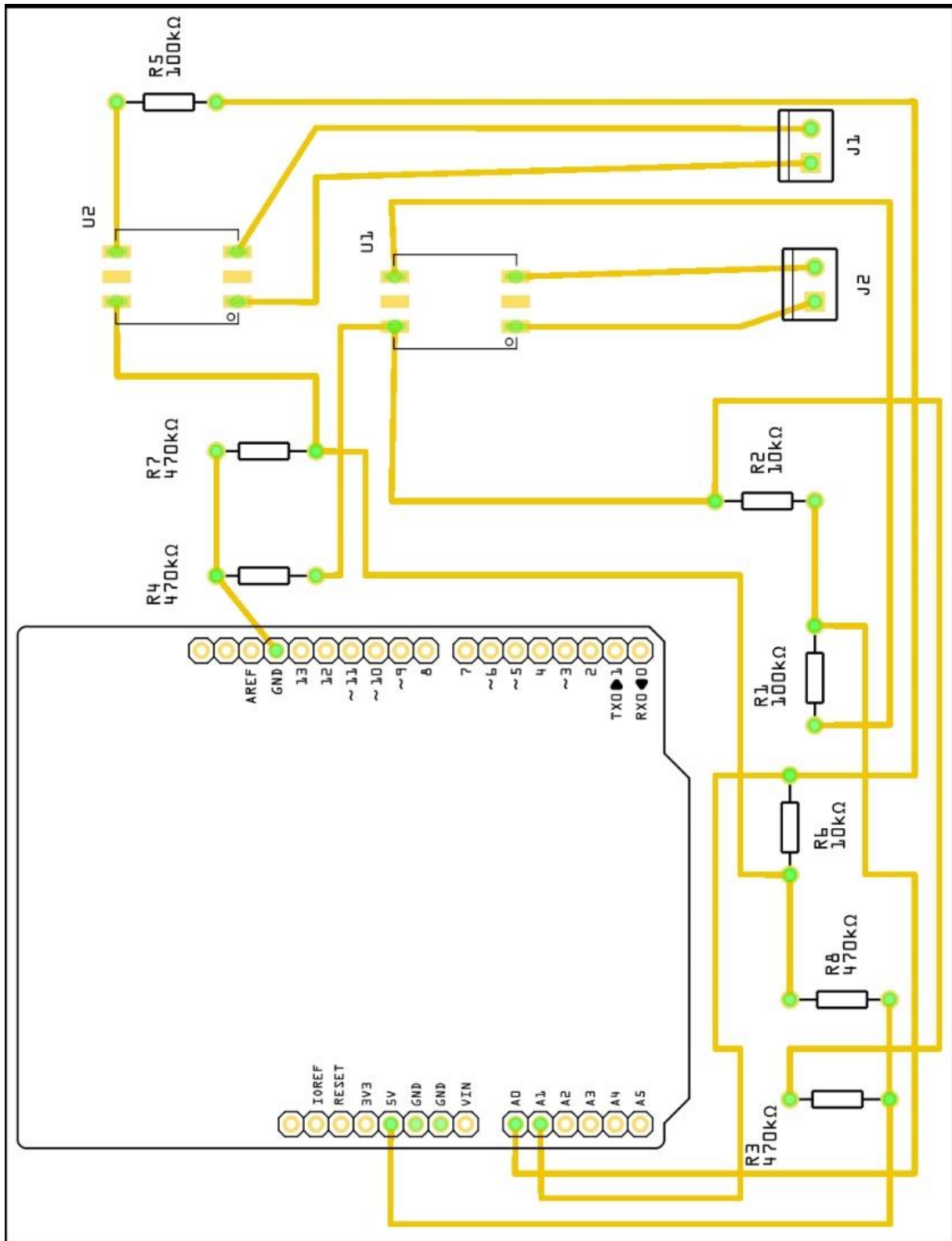


10.1.1. CIRCUITO DE DISPARO

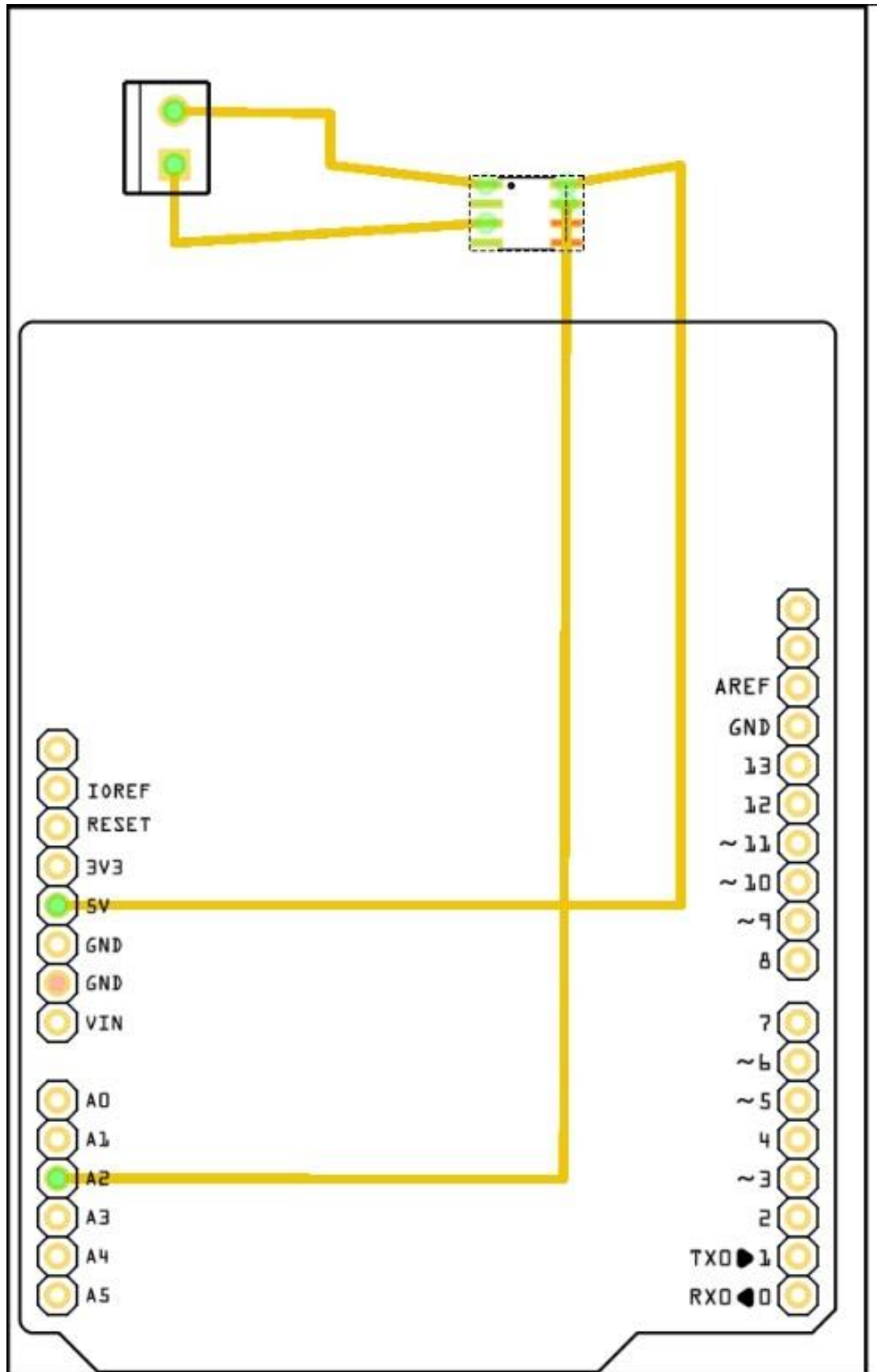


10.2. MONTAJES PCB

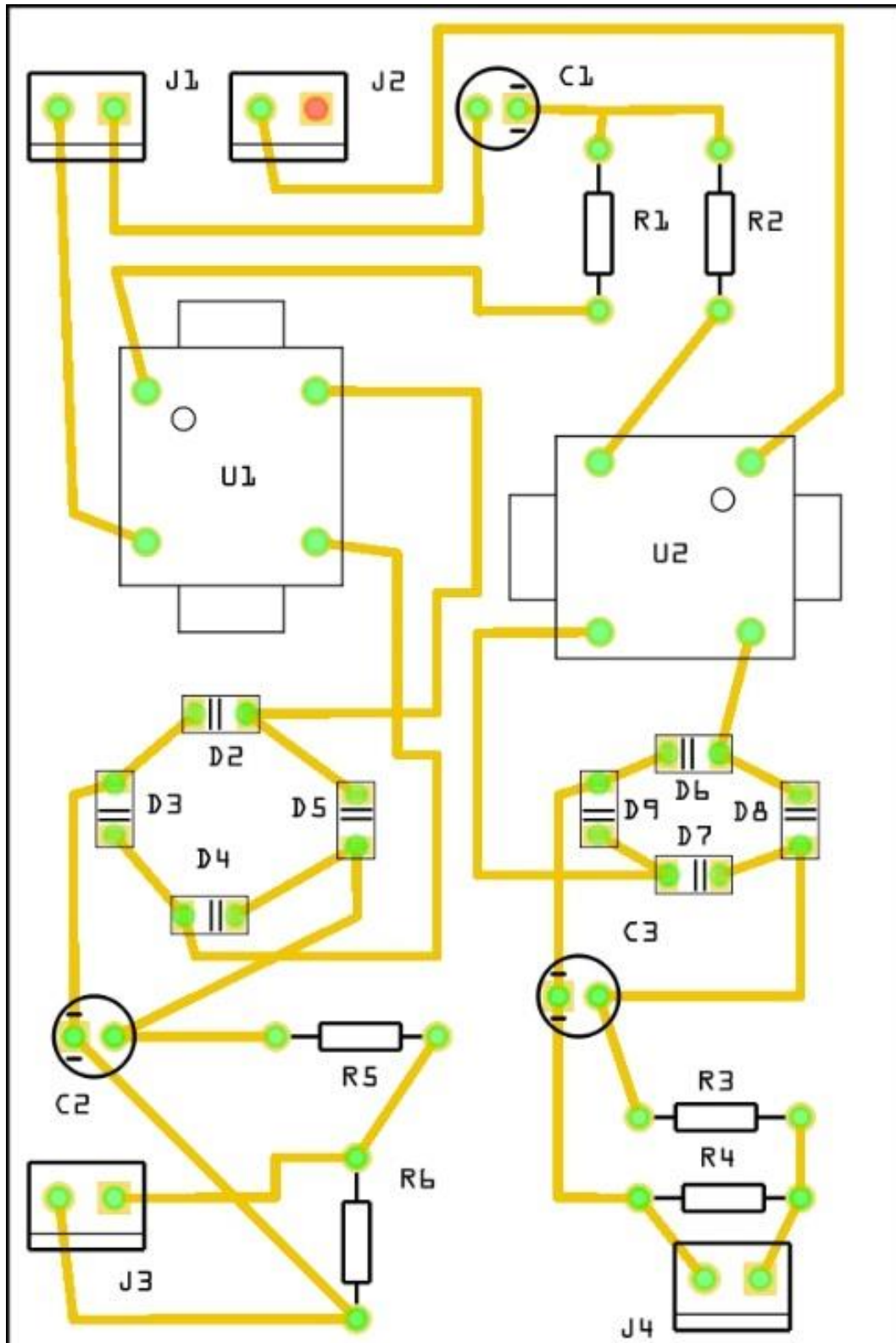
10.1.1. MEDIDA DE TENSIÓN



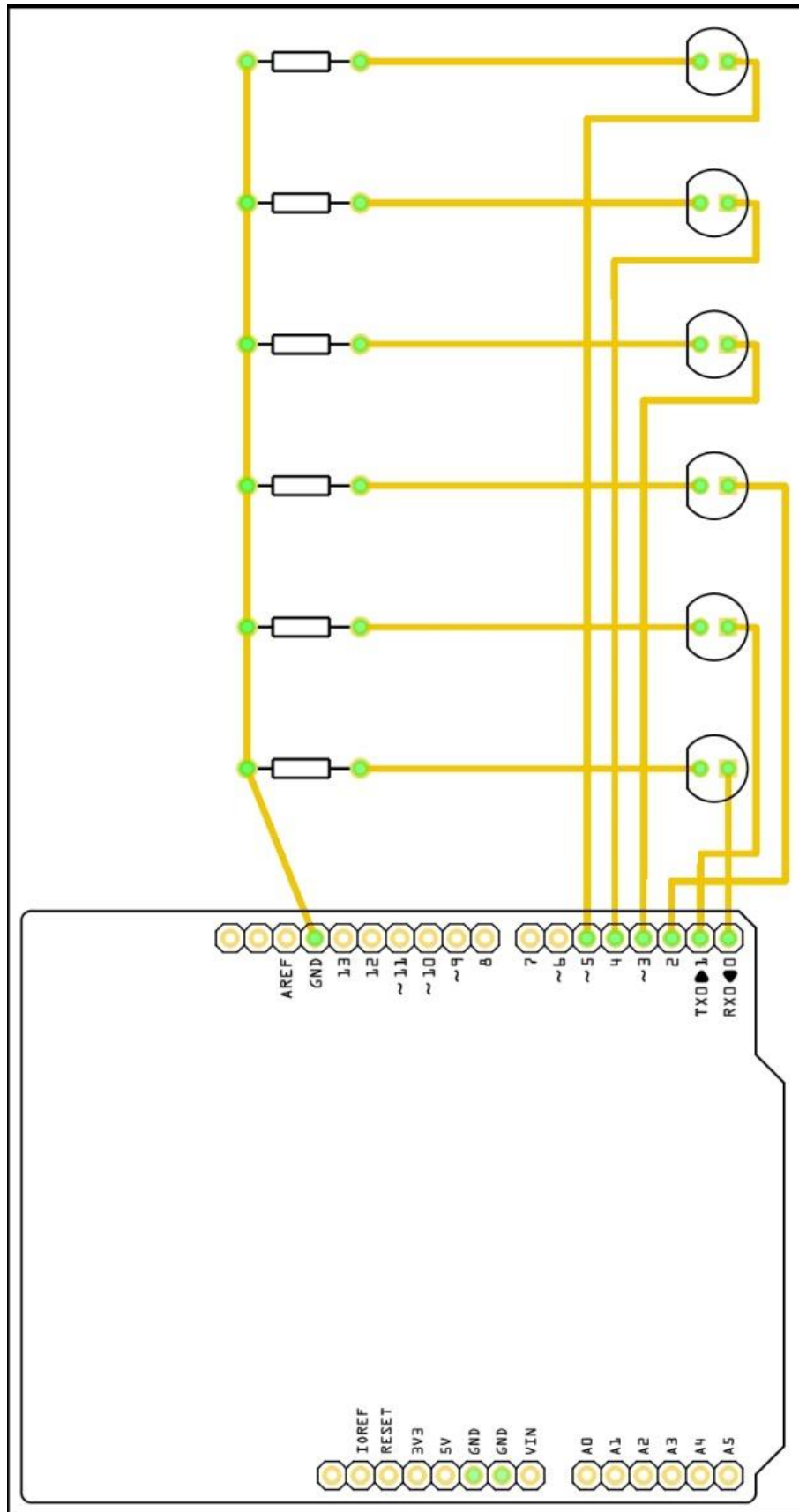
10.1.1. MEDIDA DE INTENSIDAD



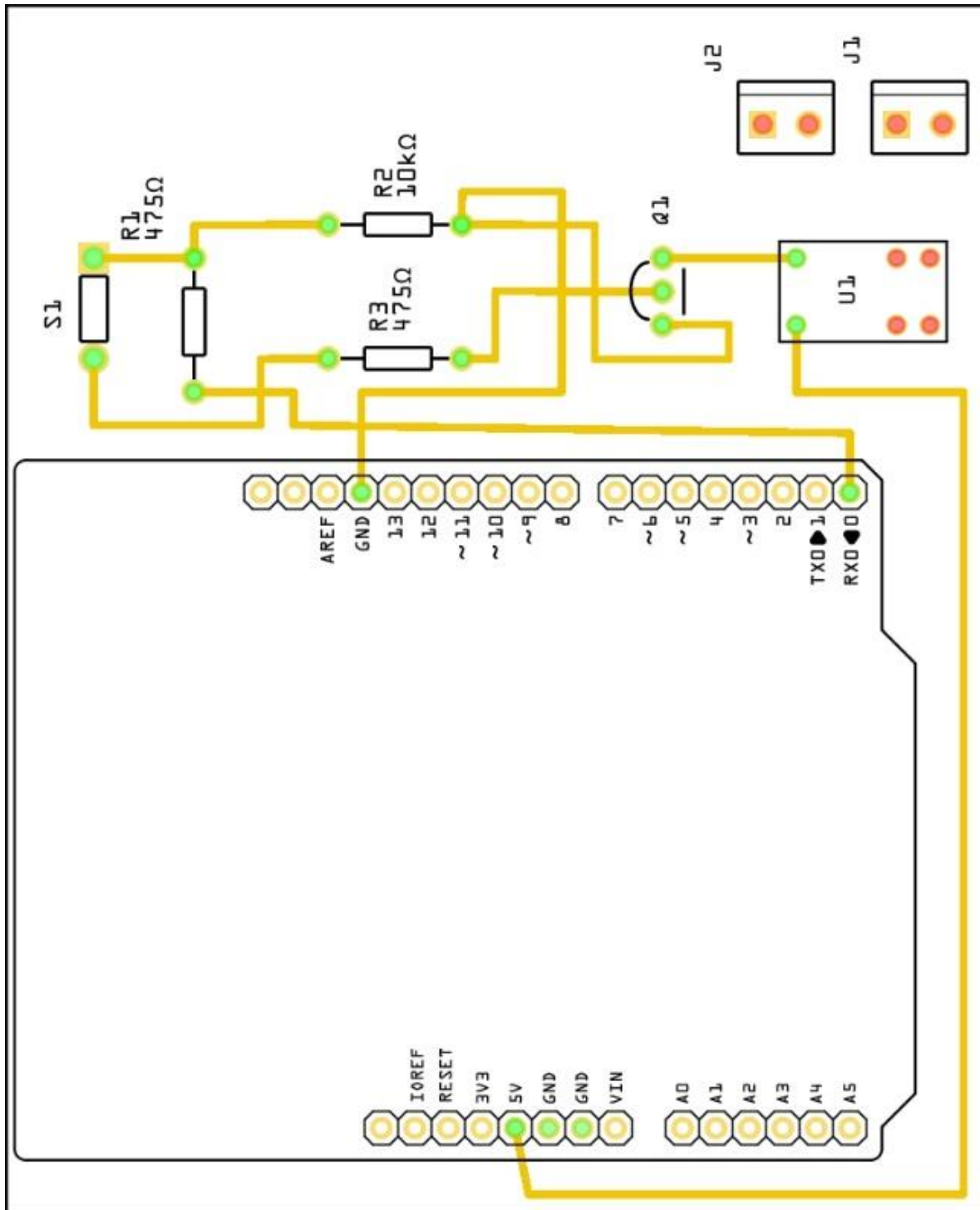
10.1.1. SECUENCIÓMETRO



10.1.1. CIRCUITO DE LEDS



10.1.1. CIRCUITO DE DISPARO



10.3. CÓDIGO COMPLETO

```

/*
Autor: Fernando Diaz Gonzalez
Director: Pablo Frias Marin
Proyecto: Construcción de un sincronoscopio manual
Fecha: 15 de Junio de 2015
*/

#include <EmonLib.h>
EnergyMonitor emon1;
EnergyMonitor emon2;

int LED_subir = 4;
int LED_bajar = 8;
int LED_intensidad = 2;
int LED_sincronizar = 3;
int LED_RST = 9;
int LED_tension_correcta = 5;
int sincronizacion = 6;

int pin_analogico = 2;

// Lectura de la secuencia de fases
int secuencia_fases = 7;
int valor = 0;

// Condiciones para indicar si la tension y frecuencia son correctas
int cond1 = 0;
int cond2 = 0;
int cond3 = 0;
int cond4 = 0;

void setup() {

    pinMode(LED_subir, OUTPUT);
    pinMode(LED_bajar, OUTPUT);
    pinMode(LED_intensidad, OUTPUT);
    pinMode(LED_sincronizar, OUTPUT);
    pinMode(LED_RST, OUTPUT);
    pinMode(LED_tension_correcta, OUTPUT);
    pinMode(sincronizacion, OUTPUT);
    pinMode(secuencia_fases, INPUT);

    Serial.begin(9600);

    emon1.voltage(0,185,0); //lectura entrada A0 (maquina)
    emon2.voltage(1,174,0); //lectura entrada A1 (red)

}

void loop() {

    // COMPROBACION SECUENCIA DE FASES

    if (cond1 == 0) {

```

```

    valor = digitalRead(sequencia_fases);

    if (valor == 1) {
        cond1 = 1;
    }
    if (cond1 == 1) {
        digitalWrite(LED_RST, HIGH);
    } else {
        digitalWrite(LED_RST, LOW);
    }
}

// COMPROBACION MODULO DE TENSIONES

if (cond1 == 1) {

    if(cond2 == 0) {
        emon1.calcVI(20,2000);
        float tension0 = emon1.Vrms;
        Serial.println("Umaquina");
        Serial.println(tension0);

        emon2.calcVI(20,2000);
        float tension1 = emon2.Vrms;
        Serial.println("Ured");
        Serial.println(tension1);

        if (tension0 >= tension1 - 2 && tension0 <= tension1 + 2) {
            cond2 = 1;
            digitalWrite(LED_tension_correcta, HIGH);
            digitalWrite(LED_subir, LOW);
            digitalWrite(LED_bajar, LOW);
            Serial.println("cond2");
            Serial.println(cond2);
        } else {
            digitalWrite(LED_tension_correcta, LOW);
            cond2 = 0;
            Serial.println("cond2");
            Serial.println(cond2);
        }

        if(tension0 < tension1 - 2) {
            digitalWrite(LED_subir, HIGH);
            digitalWrite(LED_bajar, LOW);
            delay(1000);
            digitalWrite(LED_subir, LOW);
        }

        if(tension0 > tension1 + 2) {
            digitalWrite(LED_subir, LOW);
            digitalWrite(LED_bajar, HIGH);
            delay(1000);
            digitalWrite(LED_bajar, LOW);
        }
    }
}

// COMPROBACION INTENSIDAD

if (cond1 == 1 && cond2 == 1) {

```

```
float val = analogRead(pin_analogico);
float Usonda = val*0.00488;
Serial.println("Usonda");
Serial.println(Usonda);

if (Usonda == 2.5) {
    cond3 = 1;
    digitalWrite(LED_intensidad, HIGH);
} else {
    cond3 = 0;
    digitalWrite(LED_intensidad, LOW);
}

// SINCRONIZACION

if (cond1 == 1 && cond2 == 1 && cond3 == 1) {
    digitalWrite(LED_sincronizar, HIGH);
} else {
    digitalWrite(LED_sincronizar, LOW);
}
}
```



10.4. SIEMENS MICROMASTER



3.3 Diagrama de bloques

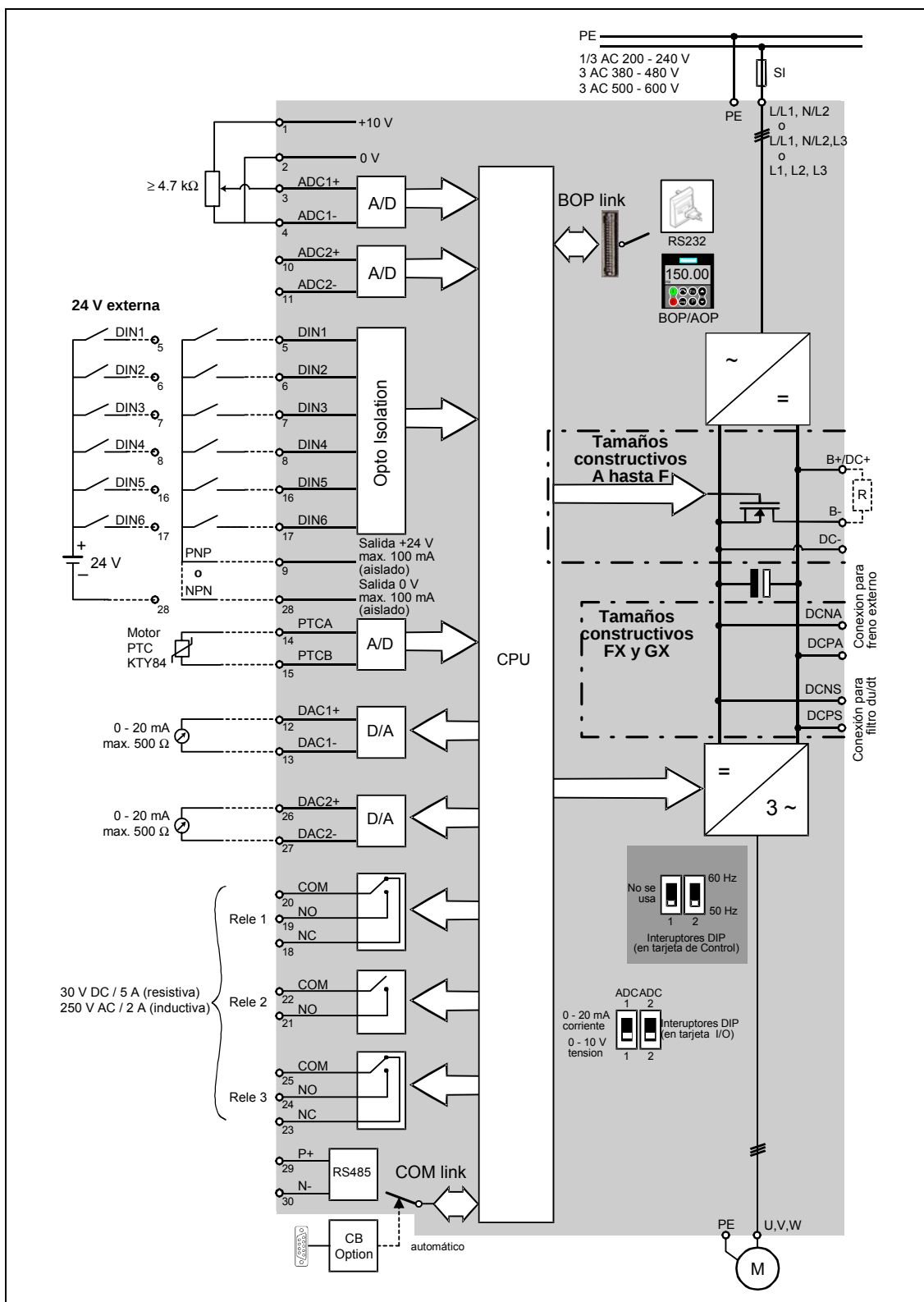


Figura 3-17 Diagrama de bloques MICROMASTER 440

10.5. RELÉ

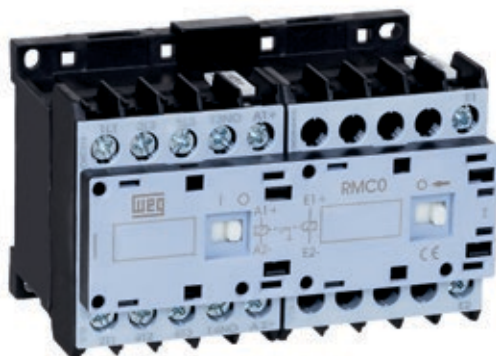


Contactores Compactos

Los contactores compactos CWC0 son ofrecidos como una solución completa para conmutación y control de motores.

Características Principales

- Contactores con terminal tornillo para categoría de servicio AC-3 hasta 22 A
- Contactores con terminal resorte para categoría de servicio AC-3 hasta 12 A (certificación CE)
- Contactores compactos CA y CC con mismo tamaño para serie hasta 16 A
- Tensión nominal de aislamiento 690 V
- Menor consumo y disipación de calor, permitiendo actuación directa de PLC sin acople de relé
- Línea completa de accesorios, compacto y rápido montaje
- Diseñado de acuerdo a las normas IEC 60947 y UL 508
- Contactos de potencia y auxiliares cumplen con IEC 60947-4-1 (contactos espejo) y IEC 60947-5-1 (contactos conectados mecánicamente)
- Fijación a través de tornillos o riel DIN 35 mm (EN 50022)
- Terminales de fácil acceso y protegidos contra contactos accidentales (IP20)



Certificaciones



Contadores Compactos CWC0



Contactor Compacto Tripolar CWC0, 7 A hasta 22 A (AC-3)⁴⁾

Corriente nominal de operación I_e AC-3 ($U_e \leq 440$ V)	Corriente térmica convencional $I_{th} = I_e$ AC-1	Potencia nominal máxima de operación motores trifásicos 50/60 Hz ¹⁾						Contactos auxiliares integrados por contactor		Referencia		Bobina CA	Bobina CC
		220 V 230 V	380 V	400 V 415 V	440 V	500 V	660 V 690 V	*3 NA	*1 NC	Terminal tornillo	Terminal resorte	Peso kg	
A	A	(kW / HP)	(kW / HP)	(kW / HP)	(kW / HP)	(kW / HP)	(kW / HP)						
7	18	1,5 / 2	3 / 4	3 / 4	3,7 / 5	3,7 / 5	3 / 4	1 0	0 1	CWC07-10-30♦ CWC07-01-30♦	CWC07-10-30♦S CWC07-01-30♦S	0,195	0,230
9	20	2,2 / 3	4 / 5	4 / 5	4,5 / 6	4,5 / 6	4 / 5	1 0	0 1	CWC09-10-30♦ CWC09-01-30♦	CWC09-10-30♦S CWC09-01-30♦S		
12	22	3 / 4	5,5 / 7,5	5,5 / 7,5	5,5 / 7,5	5,5 / 7,5	5,5 / 7,5	1 0	0 1	CWC012-10-30♦ CWC012-01-30♦	CWC012-10-30♦S CWC012-01-30♦S		
16	22	4 / 5	7,5 / 10	7,5 / 10	7,5 / 10	7,5 / 10	7,5 / 10	1 0	0 1	CWC016-10-30♦ CWC016-01-30♦	- -		
22	32	5,5 / 7,5	11 / 15	11 / 15	11 / 15	11 / 15	11 / 15	0	0	CWC025-00-30♦	-	0,200	-

Para completar la referencia, reemplazar “♦” con el código de tensión deseado²⁾.

Bobina CA - 50/60 Hz												
Aplicable para modelos CWC07...CWC025												
Códigos de tensión de bobinas	D02	D07	D13	D23	D24	D25	D33	D34	D35	D36	D39	
V ca - 50/60 Hz	24	48	110	220	230	240	380	400	415	440	480	

Bobina CC - Consumo estándar					
Aplicable para modelos CWC07...CWC016					
Códigos de tensión de bobinas	C03	C06	C07	C12	C15
V cc	24	42	48	110	220

Bobina CC - Bajo consumo ³⁾					
Aplicable para modelos CWC07...CWC016					
Códigos de tensión de bobinas	L03	L06	L07	L12	L15
V cc	24	42	48	110	220

¡Notas! 1) Los dimensionamientos presentados son válidos para motores WEG W22 Plus, IV polos, factor de servicio 1,0 y categoría de servicio AC-3.

Estos valores son orientativos y pueden cambiar de acuerdo con el número de polos o proyecto del motor.

2) Otras tensiones bajo consulta.

3) Los contactores compactos CWC0 con bobinas de bajo consumo permiten solamente 2 contactos auxiliares adicionales.

4) Para selección de accesorios, verificar página 14.

Contadores Compactos CWC0



Contadores Compactos para Arranque Reverso con Enclavamiento Mecánico CWC10 - 7 A hasta 16 A (AC-3)⁴⁾

Corriente nominal de operación I_e AC-3 ($U_e \leq 440$ V)	Corriente térmica convencional $I_m = I_e$ AC-1	Potencia nominal máxima de operación motores trifásicos 50/60 Hz ¹⁾						Contactos auxiliares integrados por contacto		Referencia		Bobina CA	Bobina CC
		220 V 230 V	380 V	400 V 415 V	440 V	500 V	660 V 690 V	*3 NA	*1 NC	Terminal tornillo	Terminal resorte	Peso	
A	A	(kW / HP)	(kW / HP)	(kW / HP)	(kW / HP)	(kW / HP)	(kW / HP)					kg	
7	18	1,5 / 2	3 / 4	3 / 4	3,7 / 5	3,7 / 5	3 / 4	1 0	0 1	CWC107-10-30 ♦ CWC107-01-30 ♦	CWC107-10-30 ♦ S CWC107-01-30 ♦ S	0,395	0,480
9	20	2,2 / 3	4 / 5	4 / 5	4,5 / 6	4,5 / 6	4 / 5	1 0	0 1	CWC109-10-30 ♦ CWC109-01-30 ♦	CWC109-10-30 ♦ S CWC109-01-30 ♦ S		
12	22	3 / 4	5,5 / 7,5	5,5 / 7,5	5,5 / 7,5	5,5 / 7,5	5,5 / 7,5	1 0	0 1	CWC1012-10-30 ♦ CWC1012-01-30 ♦	CWC1012-10-30 ♦ S CWC1012-01-30 ♦ S		
16	22	4 / 5	7,5 / 10	7,5 / 10	7,5 / 10	7,5 / 10	7,5 / 10	1 0	0 1	CWC1016-10-30 ♦ CWC1016-01-30 ♦	— —		

Para completar la referencia, reemplazar “♦” con el código de tensión deseado²⁾.

Bobina CA - 50/60 Hz												
Aplicable para modelos CWC07...CWC025												
Códigos de tensión de bobinas	D02	D07	D13	D23	D24	D25	D33	D34	D35	D36	D39	
V ca - 50/60 Hz	24	48	110	220	230	240	380	400	415	440	480	

Bobina CC - Consumo estándar					
Aplicable para modelos CWC107...CWC1016					
Códigos de tensión de bobinas	C03	C06	C07	C12	C15
V cc	24	42	48	110	220

Bobina CC - Bajo consumo ³⁾					
Aplicable para modelos CWC07...CWC016					
Códigos de tensión de bobinas	L03	L06	L07	L12	L15
V cc	24	42	48	110	220

¡Notas! 1) Los dimensionamientos presentados son válidos para motores WEG W22 Plus, IV polos, factor de servicio 1,0 y categoría de servicio AC-3.

Estos valores son orientativos y pueden cambiar de acuerdo con el número de polos o proyecto del motor.

2) Otras tensiones bajo consulta.

3) Los contactores compactos CWC0 con bobinas de bajo consumo permiten solamente 2 contactos auxiliares adicionales.

4) Para selección de accesorios, verificar página 14.

Contadores Compactos CWC0



Contadores Compactos Tripolares para Conexión en Tarjeta de Circuito Impreso CWC0 - 7 A hasta 16 A (AC-3)⁴⁾

Corriente nominal de operación I_e AC-3 ($U_e \leq 440$ V)	Corriente térmica convencional $I_{th} = I_e$ AC-1	Potencia nominal máxima de operación motores trifásicos 50/60 Hz ¹⁾						Contactos auxiliares integrados por contacto		Referencia	Bobina CA	Bobina CC
		220 V 230 V	380 V	400 V 415 V	440 V	500 V	660 V 690 V	*3 *4 NA	L1 *2 NC		Peso kg	
A	A	(kW / HP)	(kW / HP)	(kW / HP)	(kW / HP)	(kW / HP)	(kW / HP)					
7	18	1,5 / 2	3 / 4	3 / 4	3,7 / 5	3,7 / 5	3 / 4	1 0	0 1	CWC07-10-30♦ CWC07-01-30♦	0,395	0,480
9	20	2,2 / 3	4 / 5	4 / 5	4,5 / 6	4,5 / 6	4 / 5	1 0	0 1	CWC09-10-30♦ CWC09-01-30♦		
12	22	3 / 4	5,5 / 7,5	5,5 / 7,5	5,5 / 7,5	5,5 / 7,5	5,5 / 7,5	1 0	0 1	CWC12-10-30♦ CWC12-01-30♦		
16	22	4 / 5	7,5 / 10	7,5 / 10	7,5 / 10	7,5 / 10	7,5 / 10	1 0	0 1	CWC16-10-30♦ CWC16-01-30♦		

Para completar la referencia, reemplazar “♦” con el código de tensión deseado²⁾.

Bobina CA - 50/60 Hz												
Aplicable para modelos CWC07...CWC025												
Códigos de tensión de bobinas	D02	D07	D13	D23	D24	D25	D33	D34	D35	D36	D39	
V ca - 50/60 Hz	24	48	110	220	230	240	380	400	415	440	480	

Bobina CC - Consumo estándar					
Aplicable para modelos CWC07...CWC016					
Códigos de tensión de bobinas	C03	C06	C07	C12	C15
V cc	24	42	48	110	220

Bobina CC - Bajo consumo ³⁾					
Aplicable para modelos CWC07...CWC016					
Códigos de tensión de bobinas	L03	L06	L07	L12	L15
V cc	24	42	48	110	220

¡Notas! 1) Los dimensionamientos presentados son válidos para motores WEG W22 Plus, IV polos, factor de servicio 1,0 y categoría de servicio AC-3.

Estos valores son orientativos y pueden cambiar de acuerdo con el número de polos o proyecto del motor.

2) Otras tensiones bajo consulta.

3) Los contactores compactos CWC0 con bobinas de bajo consumo permiten solamente 2 contactos auxiliares adicionales.

4) Para selección de accesorios, verificar página 14.

Contadores Compactos CWC0



Contadores Compactos Auxiliares CWCA0³⁾

Corriente térmica convencional I_{th} AC-1 A	Corriente de operación I_e AC-15 A					Diagrama de contactos	Referencia		Bobina CA	Bobina CC
	220 V 230 V	380 V 400 V	415 V 440 V	500 V	660 V 690 V		Terminal tornillo	Terminal resorte	Peso kg	
10	10	6	5	4	2	22 E	CWCA0-22-00 ♦	CWCA0-22-00 ♦ S	0,180	0,200
						31 E	CWCA0-31-00 ♦	CWCA0-31-00 ♦ S		
						40 E	CWCA0-40-00 ♦	CWCA0-40-00 ♦ S		
						13 E	CWCA0-13-00 ♦	CWCA0-13-00 ♦ S		
						04 E	CWCA0-04-00 ♦	CWCA0-04-00 ♦ S		

Para completar la referencia, reemplazar “♦” con el código de tensión deseado¹⁾.

Bobina CA - 50/60 Hz												
Aplicable para modelos CWC07...CWC025												
Códigos de tensión de bobinas	D02	D07	D13	D23	D24	D25	D33	D34	D35	D36	D39	
V ca - 50/60 Hz	24	48	110	220	230	240	380	400	415	440	480	

Bobina CC - Consumo estándar					
Aplicable para modelos CWCA0					
Códigos de tensión de bobinas	C03	C07	C09	C12	C15
V cc	24	48	60	110	220

Bobina CC - Bajo consumo ²⁾					
Aplicable para modelos CWCA0					
Códigos de tensión de bobinas	L03	L06	L07	L12	L15
V cc	24	42	48	110	220

¡Notas! 1) Otras tensiones bajo consulta.

2) Los contactores compactos CWC0 con bobinas de bajo consumo permiten solamente 2 contactos auxiliares adicionales.

3) Para selección de accesorios, verificar página 14.

Contadores Compactos CWC0



Contadores Compactos Tetrapolares CWC0 (4P y 2P/2R) hasta 22 A (AC-1)³⁾

Corriente térmica convencional $I_e = I_{th}$ AC-1 A	Contactos de potencia		Referencia		Bobina CA	Bobina CC
	NA	NC	Terminal tornillo	Terminal resorte	Peso kg	
18	4	0	CWC07-00-40 ♦	CWC07-00-40 ♦ S	0,195	0,230
20			CWC09-00-40 ♦	CWC09-00-40 ♦ S		
22			CWC012-00-40 ♦	CWC012-00-40 ♦ S		
22			CWC016-00-40 ♦	—		
18	2	2	CWC07-00-22 ♦	CWC07-00-22 ♦ S		
20			CWC09-00-22 ♦	CWC09-00-22 ♦ S		
22			CWC012-00-22 ♦	CWC012-00-22 ♦ S		
22			CWC016-00-22 ♦	—		

Para completar la referencia, reemplazar “♦” con el código de tensión deseado¹⁾.

Bobina CA - 50/60 Hz											
Aplicable para modelos CWC07...CWC025											
Códigos de tensión de bobinas	D02	D07	D13	D23	D24	D25	D33	D34	D35	D36	D39
V ca - 50/60 Hz	24	48	110	220	230	240	380	400	415	440	480

Bobina CC - Consumo estándar					
Aplicable para modelos CWC07...16, 4 polos (4NA)					
Códigos de tensión de bobinas	C03	C07	C09	C12	C15
V cc	24	48	60	110	220

Bobina CC - Bajo consumo ²⁾					
Aplicable para modelos CWC07...16, 4 polos (4NA)					
Códigos de tensión de bobinas	L03	L06	L07	L12	L15
V cc	24	42	48	110	220

Bobina CC (0,75 x U _c)					
Aplicable para modelos CWC07...16, 4 polos 2P/2R (2NA + 2NC)					
Códigos de tensión de bobinas	R03	R06	R07	R12	R15
V cc	24	42	48	110	220

¡Notas! 1) Otras tensiones bajo consulta.

2) Para los contactores compactos CWC0A0 con bobina de bajo consumo, solamente es posible armar bloques de contactos auxiliares de 2 contactos.

3) Para selección de accesorios, verificar página 14.

10.6. SONDA DE CORRIENTE



Current Transducer LTS 6-NP

For the electronic measurement of currents: DC, AC, pulsed, mixed with galvanic isolation between the primary circuit (high power) and the secondary circuit (electronic circuit).



16065

Electrical data

I_{PN}	Primary nominal current rms	6	At
I_{PM}	Primary current, measuring range	0 .. ± 19.2	At
I_P	Overload capability	250	At
V_{OUT}	Output voltage (Analog) @ I_P	$2.5 \pm (0.625 \cdot I_P / I_{PN})$	V
	$I_P = 0$	$2.5^{1)}$	V
G	Sensitivity	104.16	mV/A
N_S	Number of secondary turns (± 0.1 %)	2000	
R_L	Load resistance	≥ 2	k Ω
R_{IM}	Internal measuring resistance (± 0.5 %)	208.33	Ω
TCR_{IM}	Temperature coefficient of R_{IM}	< 50	ppm/K
V_C	Supply voltage (± 5 %)	5	V
I_C	Current consumption @ $V_C = 5$ V	Typ $28 + I_S^{2)} + (V_{OUT} / R_L)$	mA

Accuracy - Dynamic performance data

X	Accuracy @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	± 0.2	%
	Accuracy with R_{IM} @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	± 0.7	%
ε_L	Linearity error	< 0.1	%
TCV_{OUT}	Temperature coefficient of V_{OUT} @ $I_P = 0$	Typ 80	Max 200 ppm/K
	- $10^\circ\text{C} \dots +85^\circ\text{C}$		250 ppm/K
	- $40^\circ\text{C} \dots -10^\circ\text{C}$		50 $^{3)}$ ppm/K
TCG	Temperature coefficient of G		
V_{OM}	Magnetic offset voltage @ $I_P = 0$, after an overload of $3 \times I_{PN}$	± 0.5	mV
	$5 \times I_{PN}$	± 2.0	mV
	$10 \times I_{PN}$	± 2.0	mV
t_{ra}	Reaction time @ 10 % of I_{PN}	< 100	ns
t_r	Response time to 90 % of I_{PN} step	< 400	ns
di/dt	di/dt accurately followed	> 15	A/ μs
BW	Frequency bandwidth (0 .. 0.5 dB)	DC .. 100	kHz
	(- 0.5.. 1 dB)	DC .. 200	kHz

General data

T_A	Ambient operating temperature	- 40 .. + 85	$^\circ\text{C}$
T_S	Ambient storage temperature	- 40.. + 100	$^\circ\text{C}$
m	Mass	10	g
	Standards	EN 50178: 1997	
		IEC 60950-1: 2001	

Notes: $^{1)}$ Absolute value @ $T_A = 25^\circ\text{C}$, $2.475 < V_{OUT} < 2.525$

$^{2)}$ $I_S = I_P / N_S$

$^{3)}$ Only due to TCR_{IM} .

$$I_{PN} = 6 \text{ At}$$

Features

- Closed loop (compensated) multi-range current transducer using the Hall effect
- Unipolar voltage supply
- Isolated plastic case recognized according to UL 94-V0
- Compact design for PCB mounting
- Incorporated measuring resistance
- Extended measuring range.

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Very low temperature drift
- Optimized response time
- Wide frequency bandwidth
- No insertion losses
- High immunity to external interference
- Current overload capability.

Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Power supplies for welding applications.

Application domain

- Industrial.

Current Transducer LTS 6-NP

Isolation characteristics

V_d	Rms voltage for AC isolation test, 50 Hz, 1 min	3	kV
$\hat{V}_w$	Impulse withstand voltage 1.2/50 μ s	> 8	kV
		Min	
V_e	Rms voltage for partial discharge extinction @ 10pC	> 1.5	kV
dCp	Creepage distance ¹⁾	15.5	mm
dCI	Clearance distance ²⁾	6.35	mm
CTI	Comparative Tracking Index (group IIIa)	175	

Notes: ¹⁾ On housing

²⁾ On PCB with soldering pattern UTEC93-703.

Applications examples

According to EN 50178 and IEC 61010-1 standards and following conditions:

- Over voltage category OV 3
- Pollution degree PD2
- Non-uniform field

	EN 50178	IEC 61010-1
dCp, dCI, $\hat{V}_w$	Rated insulation voltage	Nominal voltage
Single insulation	600 V	600 V
Reinforced insulation	300 V	300 V

Safety



This transducer must be used in electric/electronic equipment with respect to applicable standards and safety requirements in accordance with the manufacturer's operating instructions.



Caution, risk of electrical shock

When operating the transducer, certain parts of the module can carry hazardous voltage (eg. primary busbar, power supply).

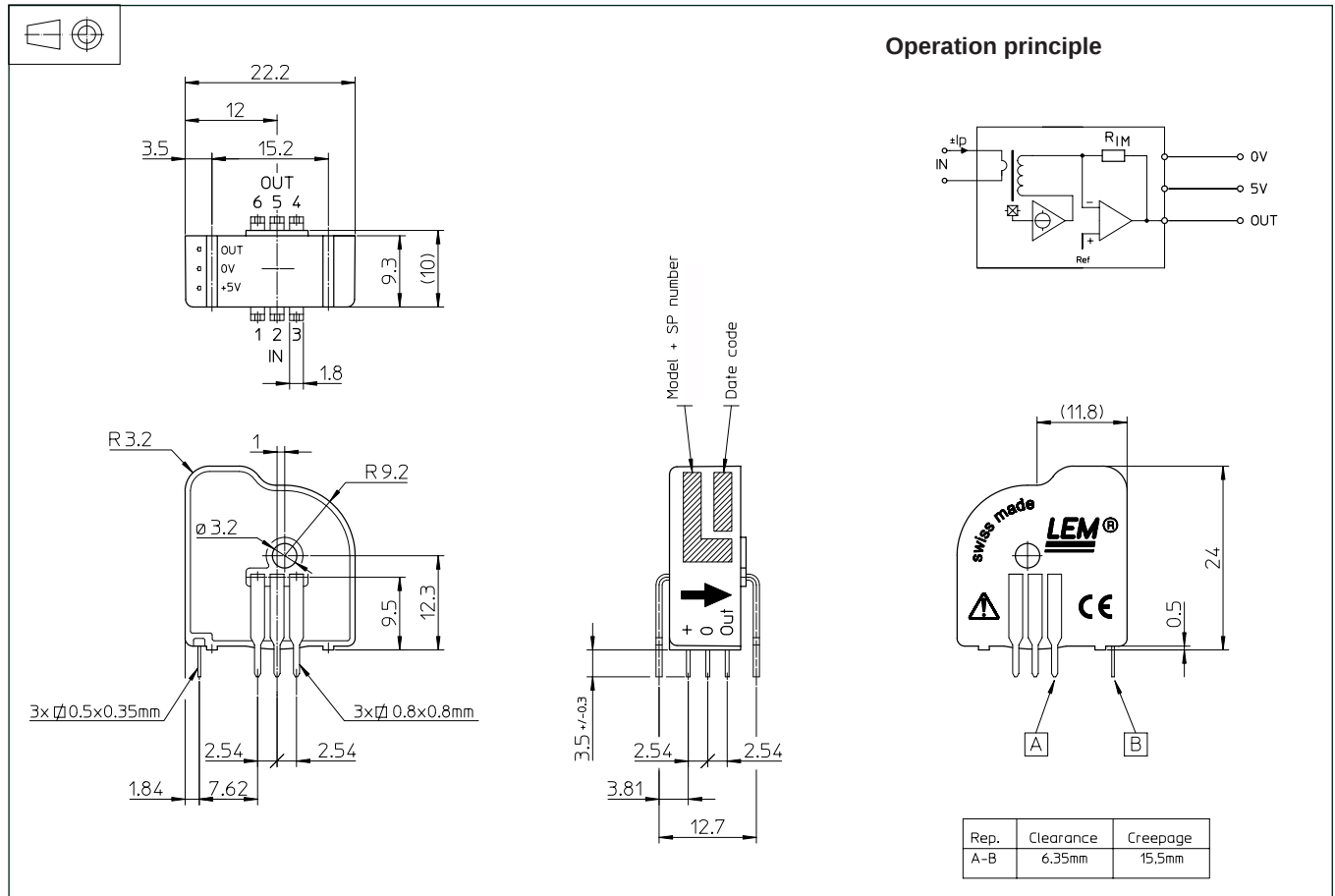
Ignoring this warning can lead to injury and/or cause serious damage.

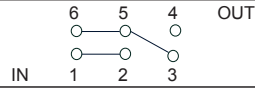
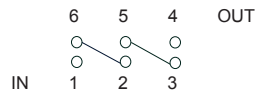
This transducer is a build-in device, whose conducting parts must be inaccessible after installation.

A protective housing or additional shield could be used.

Main supply must be able to be disconnected.

Dimensions LTS 6-NP (in mm.)



Number of primary turns	Primary nominal current rms I_{PN} [A]	Nominal output voltage V_{OUT} [V]	Primary resistance R_p [mΩ]	Primary insertion inductance L_p [μH]	Recommended connections
1	± 6	2.5 ± 0.625	0.18	0.013	
2	± 3	2.5 ± 0.625	0.81	0.05	
3	± 2	2.5 ± 0.625	1.62	0.12	

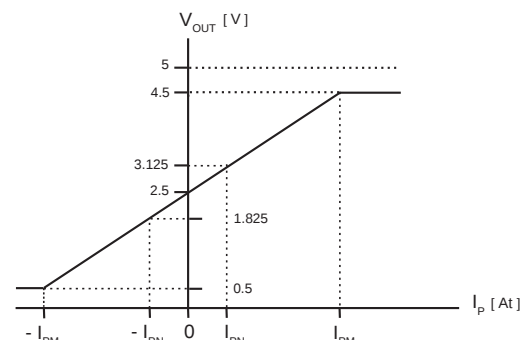
Mechanical characteristics

- General tolerance ± 0.2 mm
- Fastening & connection of primary 6 pins 0.8 x 0.8 mm
Recommended PCB hole 1.3 mm
- Fastening & connection of secondary 3 pins 0.5 x 0.35 mm
Recommended PCB hole 0.8 mm
- Additional primary through-hole Ø 3.2 mm

Remarks

- V_{OUT} swings above 2.5 V when I_p flows from terminals 1, 2, 3 to terminals 6, 5, 4 (with the arrow).
- Temperature of the primary jumper should not exceed 100°C.

Output Voltage - Primary Current

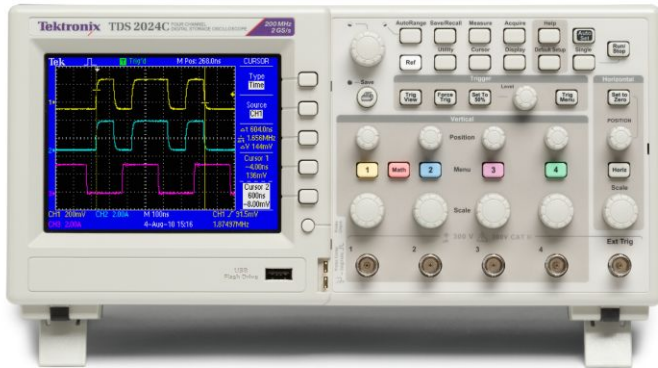


10.7. OSCILOSCOPIO



Digital Storage Oscilloscopes

TDS2000C Series Datasheet



The TDS2000C Digital Storage Oscilloscope Series provides you with affordable performance in a compact design. Packed with standard features - including USB connectivity, 16 automated measurements, limit testing, data logging, and context-sensitive help - the TDS2000C Series oscilloscopes help you get more done in less time.

Key performance specifications

- 200 MHz, 100 MHz, 70 MHz, 50 MHz bandwidth models
- 2- and 4-channel models
- Up to 2 GS/s sample rate on all channels
- 2.5k point record length on all channels
- Advanced triggers including pulse width trigger and line-selectable video trigger

Key features

- 16 automated measurements and FFT analysis for simplified waveform analysis
- Built-in waveform limit testing
- Automated, extended data logging feature
- Autoset and signal auto-ranging
- Built-in context-sensitive help
- Probe check wizard
- 11-language user interface
- 144 mm (5.7 inch) active TFT color display
- Small footprint and lightweight - only 124 mm (4.9 inches) deep and 2 kg (4.4 lb)
- USB 2.0 host port on the front panel for quick and easy data storage

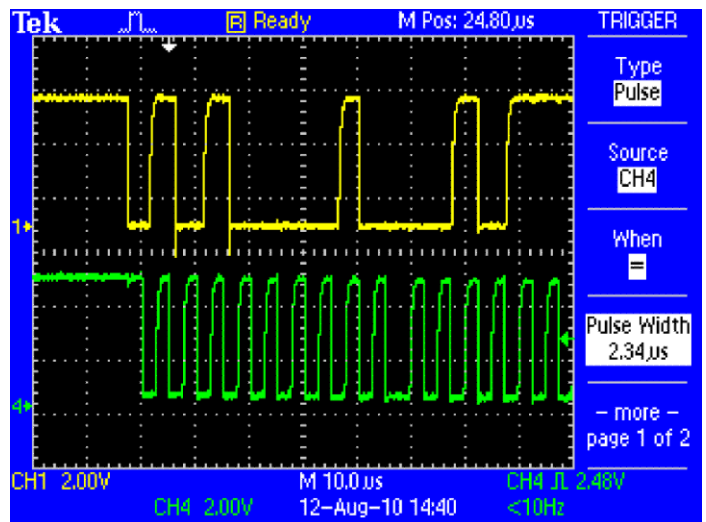
- USB 2.0 device port on the rear panel for easy connection to a PC or for direct printing to a PictBridge®-compatible printer
- Includes National Instrument's LabVIEW SignalExpress™ TE Limited Edition and Tektronix OpenChoice® Software for connecting to your bench
- Lifetime warranty. Limitations apply. For terms and conditions, visit www.tektronix.com/lifetime warranty

Digital precision for accurate measurements

With up to 200 MHz bandwidth and 2 GS/s maximum sample rate, no other digital storage oscilloscope offers as much bandwidth and sample rate for the price. Tektronix proprietary sampling technology provides real-time sampling with a minimum of 10X oversampling on all channels, all the time to accurately capture your signals. Sampling performance is not reduced when using multiple channels.

Critical tools for troubleshooting your device

Advanced triggers - rising/falling edge, pulse width, and video - help you quickly isolate your signals of interest. Once you've captured a signal, advanced math capabilities and automated measurements can speed your analysis. Quickly perform an FFT or add, subtract, or multiply waveforms. Sixteen automated measurements quickly and reliably calculate important signal characteristics such as frequency or rise time, while the built-in Limit Test function enables you to easily identify problems in your signal.



Quickly and easily capture waveforms with advanced triggering.

Specifications

All specifications apply to all models unless noted otherwise.

Overview

	TDS2001C	TDS2002C	TDS2004C	TDS2012C	TDS2014C	TDS2022C	TDS2024C
Display (QVGA LCD)	TFT on all models						
Bandwidth	50 MHz	70 MHz	70 MHz	100 MHz	100 MHz	200 MHz	200 MHz
Channels	2	2	4	2	4	2	4
External trigger input	Included on all models						
Sample rate on each channel	500 MS/s	1.0 GS/s	1.0 GS/s	2.0 GS/s	2.0 GS/s	2.0 GS/s	2.0 GS/s

Vertical system

Record length	2.5k points at all time bases on all models
Vertical resolution	8 bits
Vertical sensitivity	2 mV to 5 V/div on all models with calibrated fine adjustment
DC vertical accuracy	±3% on all models
Vertical zoom	Vertically expand or compress a live or stopped waveform
Maximum input voltage	300 V _{RMS} CAT II; derated at 20 dB/decade above 100 kHz to 13 V _{p-p} AC at 3 MHz
Position range	2 mV to 200 mV/div +2 V; >200 mV to 5 V/div +50 V
Bandwidth limit	20 MHz for all models
Input impedance	1 MΩ in parallel with 20 pF
Input coupling	AC, DC, GND on all models

Horizontal system

Time base accuracy	50 ppm
Horizontal zoom	Horizontally expand or compress a live or stopped waveform

Trigger system

Trigger modes	Auto, Normal, Single Sequence
Trigger types	
Edge (rising/falling)	Conventional level-driven trigger. Positive or negative slope on any channel. Coupling selections: AC, DC, Noise Reject, HF Reject, LF Reject
Video	Trigger on all lines or individual lines, odd/even or all fields from composite video, or broadcast standards (NTSC, PAL, SECAM)
Pulse width (or glitch)	Trigger on a pulse width less than, greater than, equal to, or not equal to, a selectable time limit ranging from 33 ns to 10 s
Trigger source	
2-channel models	CH1, CH2, Ext, Ext/5, AC Line
4-channel models	CH1, CH2, CH3, CH4, Ext, Ext/5, AC Line
Trigger view	Displays the trigger signal while the Trigger View button is depressed
Trigger signal frequency readout	Provides a frequency readout of the trigger source

Acquisition system

Acquisition modes	
Peak detect	High-frequency and random glitch capture. Captures glitches as narrow as 12 ns (typical) at all time base settings from 5 μ s/div to 50 s/div
Sample	Sample data only
Average	Waveform averaged, selectable: 4, 16, 64, 128
Single sequence	Use the Single Sequence button to capture a single triggered acquisition sequence
Roll mode	At acquisition time base settings of >100 ms/div

Waveform measurements

Automatic waveform measurements	Period, Frequency, +Width, -Width, Rise Time, Fall Time, Max, Min, Peak-to-Peak, Mean, RMS, Cycle RMS, Cursor RMS, Duty Cycle, Phase, Delay
Cursors	
Types	Amplitude and time
Measurements	ΔT , $1/\Delta T$ (frequency), ΔV

Waveform math

Operators	Add, Subtract, Multiply, FFT
Sources	
2-channel models	CH1 - CH2, CH2 - CH1, CH1 + CH2, CH1 x CH2
4-channel models	CH1 - CH2, CH2 - CH1, CH3 - CH4, CH4 - CH3, CH1 + CH2, CH3 + CH4, CH1 x CH2, CH3 x CH4
FFT	Windows: Hanning, Flat Top, Rectangular 2,048 sample points

Waveform math

Autoset menu	Single-button, automatic setup of all channels for vertical, horizontal, and trigger systems, with undo Autoset. Autoset-menu signal-type choices are: Square wave Single Cycle, Multicycle, Rising or Falling Edge Sine Wave Single Cycle, Multicycle, FFT Spectrum Video (NTSC, PAL, SECAM) Field: Alt, Odd, or Even Line: Alt or Selectable Line Number
Autorange	Automatically adjust vertical and/or horizontal oscilloscope settings when a probe is moved from point to point, or when a signal exhibits large changes

Display characteristics

Display	QVGA Active Color TFT
Interpolation	Sin(x)/x
Display types	Dots, vectors
Persistence	Off, 1 s, 2 s, 5 s, infinite
Format	YT and XY

Input-output interfaces

USB Ports	The USB host port on the front panel supports USB flash drives The USB device port on the back of the instrument supports connection to a PC and to all PictBridge-compatible printers
GPIOB	Optional

Nonvolatile storage

Reference waveform display	Two 2.5k point reference waveforms
Waveform storage without USB flash drive	TDS2001C, TDS2002C, TDS2012C, TDS2022C: Two 2.5k point waveforms TDS2004C, TDS2014C, TDS2024C: Four 2.5k point waveforms
Maximum USB flash drive size	64 GB
Waveform storage with USB flash drive	96 or more reference waveforms per 8 MB
Setups without USB flash drive	10 front-panel setups
Setups with USB flash drive	4,000 or more front-panel setups per 8 MB
Screen images with USB flash drive	128 or more screen images per 8 MB. The actual number of images depends on the file format selected
Save All with USB flash drive	12 or more Save All operations per 8 MB A single Save All operation creates 3 to 9 files (setup, image, plus one file for each displayed waveform)

Power source

Power source

Source voltage	Full range: 100 to 240 V _{AC} RMS $\pm 10\%$, Installation Category II (covers range of 90 to 264 V _{AC})
Power consumption	Power consumption: Less than 30 W at 85 to 275 V _{AC} input

Physical characteristics

Instrument dimensions

Height	158.0 mm (6.2 inches)
Width	326.3 mm (12.8 inches)
Depth	124.2 mm (4.9 inches)

Instrument weight

Instrument only	2.0 kg (4.4 lb)
Instrument with accessories	2.2 kg (4.9 lb)

Shipping package dimensions

Height	266.7 mm (10.5 inches)
Width	476.2 mm (18.7 inches)
Depth	228.6 mm (9.0 inches)

RM2000B rackmount dimensions

Height	482.6 mm (19.0 inches)
Width	177.8 mm (7.0 inches)
Depth	108.0 mm (4.3 inches)

EMC, environment and safety

Temperature

Operating	0 to +50 °C
Non-operating	-40 to +71 °C

Humidity

Operating	Up to 80% RH at or below +40 °C Up to 45% RH up to +50 °C
Non-operating	Up to 80% RH at or below +40 °C Up to 45% RH up to +50 °C

Altitude

Operating	Up to 3,000 m
Non-operating	Up to 3,000 m

Electromagnetic compatibility

Meets Directive 2004/108/EC, EN 61326-2-1 Class A; Australian EMC Framework

Safety

UL61010-2004, CSA22.2 No. 61010-1:2004, EN61010-1:2001, IEC61010-1:2001, EU Low Voltage Directive 2006/95/EC

10.8. MÁQUINA SÍNCRONA



CARACTERISTICAS

ELECTRICAS

MARCA SIEMENS

MODELO IRS - 1062

TIPO 4YA 20

N° 1366044

SISTEMA	CONEXION	TENSION	CORRIENTE	POTENCIA	VELOCIDAD
	TRIANGULO	220 V.	22 A.		
TRIFASICA				8CV- 5,9 KVA	1.410 rpm.
	ESTRELLA	380 V.	12,7 A.		

Frecuencia 50Hz

Cos ϕ

Protección IP 11

Forma B 3

Rotor Bobinado

Tensión de Rotor 110 v. / 34 A.

Excitación

Servicio

Observaciones

GRUPO - 7

MAQUINA ASINCRONA

N° 1.059

I.C.A.I. LABORATORIO DE MAQUINAS Y SISTEMAS ELECTRICOS

CARACTERISTICAS

ELECTRICAS

MARCA S I E M E N S

MODELO D.U.G. - 104

TIPO

N° 585735

SISTEMA	CONEXION	TENSION	CORRIENTE	POTENCIA	VELOCIDAD
MONOFASICA	DIAMETRAL	146 V.	27,4 A.	4 KVA.	1.500rpm.
TRIFASICA	TRIANGULO	127 V.	27,4 A.	6 KVA.	1.500rpm.
CONTINUA	DERIVACION	206 V.	27,4 A.	5,6 KVA	1.500 rpm.

Frecuencia 50 Hz.

Cos ϕ 1

Protección P00

Forma D 13

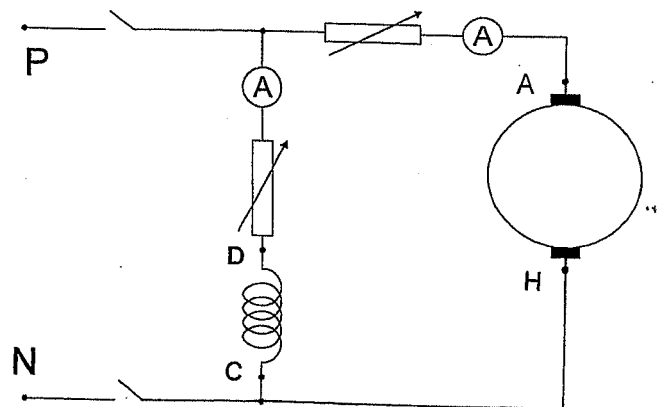
Rotor

Tensión de Rotor

Excitación Derivación $I_{ex.}$ en vacio = 0,61 A.

Servicio

Observaciones

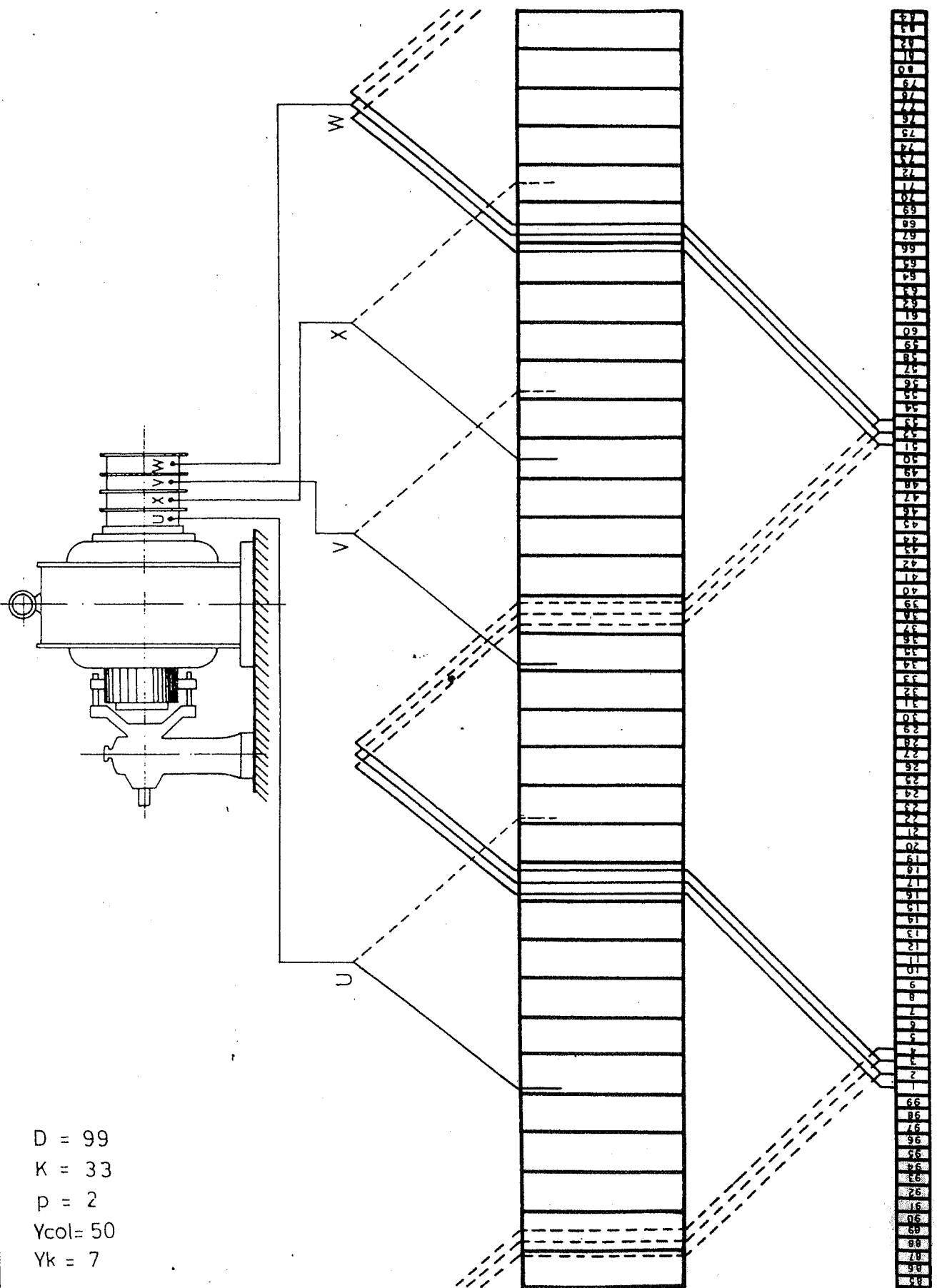


GRUPO - 7

MAQUINA CONMUTATRIZ

N° 1.101

I.C.A.I. LABORATORIO DE MAQUINAS Y SISTEMAS ELECTRICOS



D = 99
 K = 33
 p = 2
 Ycol= 50
 Yk = 7

GRUPO-7

	FECHA	NOMBRE
Calculo		
Constru.		
Compro.		

I. C. A. I.
 LABORATORIO DE MAQUINAS
 Y SISTEMAS ELECTRICOS

ARROLLAMIENTO DE LA CONMUTATRIZ

N° 1.101

10.9. MULTÍMETRO



PeakTech[®]

Prüf- und Messtechnik

 **Spitzentechnologie, die überzeugt**



PeakTech[®] 2705

**Bedienungsanleitung /
Operation manual**

Digital Milliohmmeter

3. Technical Datas

3.1. Low resistance

Range	Resolution	Accuracy	Current
400 mΩ	0.1 mΩ	± (1%+10dgt.)	200 mA
4 Ω	1 mΩ		20 mA
40 Ω	0.01 Ω		2 mA

Overload protection : 500 mA / 230 V

Max. input Voltage : 30 V DC / 25 V_{pp} AC

3.2. OHMS

Range	Resolution	Accuracy
400 Ω	0.1 Ω	± (1.0% + 4 dgt.)
4 kΩ	1 Ω	± (1.5% + 2 dgt.)
40 kΩ	10 Ω	
400 kΩ	100 Ω	
4 MΩ	1 kΩ	± (2.5% + 3 dgt.)
40 MΩ	10 kΩ	± (3.5% + 5 dgt.)

Overload Protection: 30 V DC / 25 V_{pp} AC

3.3. DC Current

Range	Resolution	Accuracy
400 μ A	0.1 μ A	$\pm (1.5\%+5 \text{ dgt.})$
4000 μ A	1 μ A	
40 mA	0.01 mA	
400 mA	0.1 mA	

Overload protection: 500 mA / 250 V

3.4. AC Current

Range	Resolution	Accuracy (50~60Hz)	Accuracy (60~400 Hz)
400 μ A	0.1 μ A	$\pm (1.5\%+5 \text{ dgt.})$	$\pm (1.5\%+5 \text{ dgt.})$
4000 μ A	1 μ A		
40 mA	0.01 mA		
400 mA	0.1 mA		

Overload protection : 500 mA / 250 V

Frequency range : 50 – 400 Hz

3.5. DC Voltage

Range	Resolution	Accuracy
400 mV	0.1 mV	$\pm (1\%+5 \text{ dgt.})$
4 V	1 mV	
40 V	0.01 V	
400 V	0.1 V	
1000 V	1 V	$\pm (1.2\%+5 \text{ dgt.})$

Overload protection : 1000 V

Input impedance : $\sim 10 \text{ M}\Omega$

3.6. AC Voltage

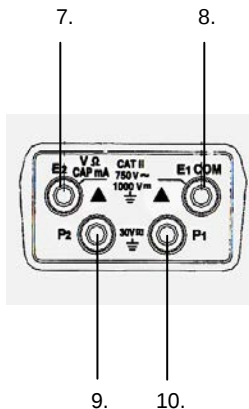
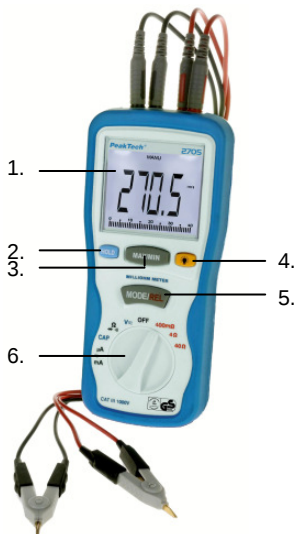
Range	Resolution	Accuracy 50~60Hz	Accuracy 400Hz
400 mV	0.1 mV	$\pm (1.2\%+10 \text{ dgt.})$	$\pm (2.5\%+10\text{dgt.})$
4 V	1 mV	$\pm (1.0\%+10 \text{ dgt.})$	$\pm (1.2\%+10\text{dgt.})$
40 V	0.01 V		
400 V	0.1 V		
750 V	1 V		

Overload protection : 750 V
Frequency range : 50 – 400 Hz
Input impedance : $\sim 10\text{M}\Omega$

3.7. Capacitance

Range	Resolution	Accuracy
4 nF	1 pF	unspecified
40 nF	10 pF	$\pm (5.0\% + 20 \text{ dgt.})$
400 nF	0.1 nF	$\pm (3\%+10 \text{ dgt.})$
4 μF	1 nF	
40 μF	10 nF	
400 μF	0.1 μF	$\pm (4\%+10 \text{ dgt.})$
4 mF	1 μF	$\pm (10\%+10 \text{ dgt.})$
40 mF	10 μF	unspecified

4. Front Panel Layout



1. Digital Display
2. Data Hold Button
3. MAX/MIN Button
4. Backlight Button
5. Mode/REL Button
6. Rotary Function switch
7. V Ω Cap mA E2 Jack
8. COM E1 jack
9. P2 Jack
10. P1 jack