



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)  
GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA  
ESPECIALIDAD ELÉCTRICA

# **DISEÑO DE UNA PLACA DE CONTROL PARA UN REGULADOR DE TENSIÓN DE FLUJO LUMINOSO**

Autor:  
Jorge Nieto Gavilán

Director:  
Pablo Frías Marín

Madrid  
Junio 2014

## **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. JORGE NIETO GAVILÁN**, 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 **TRABAJO DE FIN DE GRADO: DISEÑO DE UNA PLACA DE CONTROL PARA UN REGULADOR DE TENSIÓN DE FLUJO LUMINOSO**, 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.

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

#### **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](mailto:curiarte@rec.upcomillas.es)).

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

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 ..... de ..... de .....

**ACEPTA**

Fdo.....

Proyecto realizado por el alumno/a:

Jorge Nieto Gavilán

Fdo.: ..... Fecha: ...../ ...../ .....

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

EI DIRECTOR DEL PROYECTO

Pablo Frías Marín

Fdo.: ..... Fecha: ...../ ...../ .....

Vº Bº del Coordinador de Proyectos

Fernando de Cuadra

Fdo.: ..... Fecha: ...../ ...../ .....



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)  
GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA  
ESPECIALIDAD ELÉCTRICA

# **DISEÑO DE UNA PLACA DE CONTROL PARA UN REGULADOR DE TENSION DE FLUJO LUMINOSO**

Autor:  
Jorge Nieto Gavilán

Director:  
Pablo Frías Marín

Madrid  
Junio 2014

**DISEÑO DE UNA PLACA DE CONTROL DE UN REGULADOR DE  
TENSIÓN DE FLUJO LUMINOSO**

**Autor: Nieto Gavilán, Jorge.**

Director: Frías Marín, Pablo.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

### **Introducción**

Las variaciones de tensión de larga duración constituyen un reto central en la operación de los sistemas eléctricos. Es responsabilidad de los operadores de las redes eléctricas el mantener dentro de unos rangos los niveles de tensión, que garanticen el correcto funcionamiento de las cargas del sistema eléctrico. Las variaciones de tensión pueden mitigarse en la red de transporte así como en las redes de distribución, pero su importancia es mucho mayor cuando se trata de las redes rurales más aisladas. Por ello, resulta necesario buscar alternativas eficientes para el correcto funcionamiento del suministro.

Dentro de estas alternativas el uso de reguladores de tensión es una opción económica y eficaz. Hoy en día existen una enorme cantidad de modelos disponibles en el mercado, entre los que destacan aquellos cuyo funcionamiento está basado en la electrónica de potencia. Su empleo es sinónimo de robustez, fiabilidad y eficiencia energética; además de ser una solución bastante económica y de fácil mantenimiento. Sin embargo, para que el uso de un regulador de tensión sea óptimo, es fundamental que esté supeditado a un sistema de control que sea capaz de predecir las variaciones en la red, detectarlas y, a través de una placa de control, enviar señales que ajusten los niveles de regulación de tensión deseados para poder alimentar a la carga con una tensión casi constante.

A lo largo del siguiente documento se presenta todo el desarrollo de una placa de control para un regulador de tensión, incluyendo montaje, programación del software y ensayos para la puesta en funcionamiento. La placa se desarrollará íntegramente con Arduino y su función principal será el accionamiento de los tres relés que controlan los escalones de regulación del equipo (Figura R1).

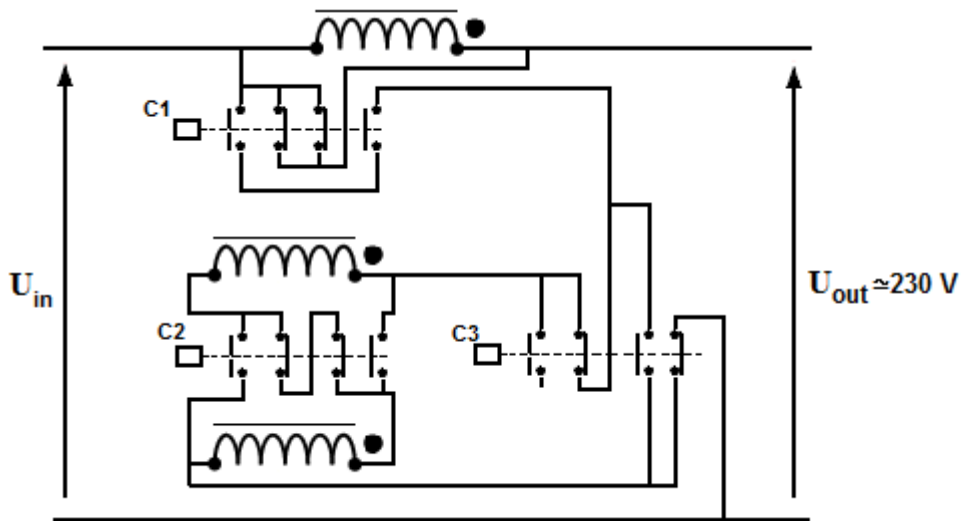


Figura R1: Esquema interno de los contactos del regulador.

### Diseño general del sistema de control

El sistema de control del equipo está constituido por varios elementos que se agrupan en tres módulos principales (medida, relés y Arduino). El primero de los módulos se refiere a la medida de tensión, corriente y posición de los relés; el segundo a la actuación de los relés y el último a las conexiones de la placa de control y la programación del código con Arduino. Dichos módulos se interrelacionan entre sí tal y como se indica de forma esquemática en la Figura R2.

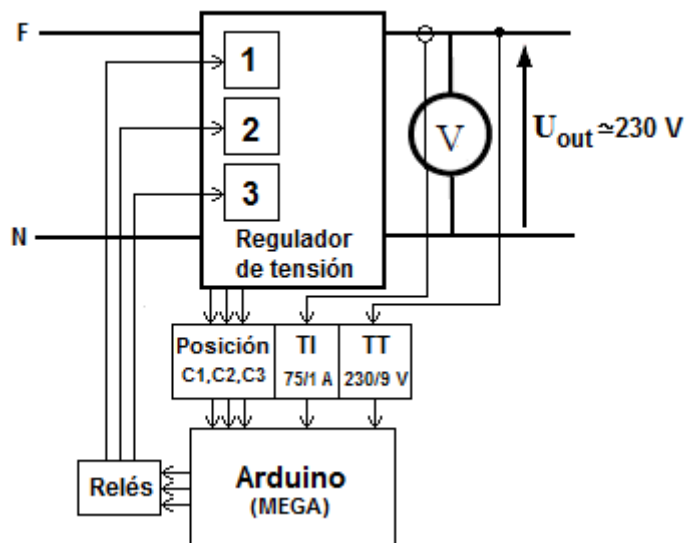


Figura R2: Esquema simplificado del circuito de control.



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)**  
**GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

A continuación se analizarán los dos bloques principales del esquema de control, detallando sus características más importantes.

Módulo de medida

Tal y como se ha explicado, el diseño del módulo de medida abarca tres variables: tensión de entrada, intensidad y posición de los contactos de los relés.

- *Medida de tensión:* constituye la base del diseño, ya que toda la actuación se produce en función de la tensión medida. Para llevarla a cabo se realiza un montaje que incluye dos reducciones de tensión sucesivas, mediante un transformador 230/9 V y un circuito divisor de tensión respectivamente, junto con el montaje de un circuito que introduce un offset que elimine la parte negativa para hacer compatible la señal con la entrada de Arduino
- *Medida de intensidad:* se realiza con una doble finalidad. Por un lado, permite programar la actuación para que se produzca en los pasos por cero de la intensidad; y, por otro, se considera un dato de interés de cara al cliente, que permite, además, calcular la potencia activa y reactiva consumida, así como el factor de potencia de la carga el tiempo real. El montaje en este caso se realiza a partir de un diseño análogo al anterior.
- *Medida de la posición de los relés:* su función es la determinación del escalón de compensación activo en tiempo real, lo que permite evitar una actuación redundante (es decir, ejecutar un nivel de compensación que ya se encuentre activado). El montaje se lleva a cabo mediante la conexión de los contactos auxiliares de los relés con la tensión de alimentación de 5 Vcc de Arduino.

Módulo de actuación

El diseño de la actuación se programará para dos tipos de condiciones, que se corresponderán con una actuación instantánea y otra temporizada, y se producirá en el primer paso por cero de la señal de intensidad a partir del cumplimiento de cualquiera de los dos.

- Sobretensión o caída de tensión moderadas de duración superior a cinco segundos: actuación temporizada.
- Sobretensión o caída de tensión bruscas: actuación inmediata.

El sistema completo de actuación queda definido tal y como se presenta en la Tabla R1, en la que se muestra también la posición correspondiente de los tres contactos en cada escalón, que es lo que se utilizará a la hora de programar la actuación. En dicha tabla se distinguen además las dos formas de actuación descritas, así como el nivel de compensación definido para cada uno.

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)**  
**GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA**

Toma	Nivel de compensación de tensión	Relación de transformación	Actuación en $t > 5$ s	Actuación instantánea	Posición de los contactos		
					C1	C2	C3
1	- 40 V	190/230	$U \geq 265$ V	$U \geq 297$ V	C	C	C
2	- 20 V	210/230	$U < 265$ V $U \geq 241$ V	$U < 297$ V $U \geq 265$ V	C	A	C
3	0 V	1	$U < 241$ V $U \geq 221$ V	–	A	A	A
4	+ 20 V	250/230	$U < 221$ V $U \geq 204$ V	$U < 204$ V $U \geq 183$ V	C	A	A
5	+ 40 V	270/230	$U < 204$ V	$U < 183$ V	C	C	A

*Tabla R1: Actuación de los relés y posición de los contactos correspondiente.*

## Hardware

La construcción del sistema de control se realizó en una placa de Arduino Mega 2560. Las cinco variables del módulo de medida (tensión, intensidad y posición de los tres relés) constituyen las entradas analógicas de la placa, mientras que las variables de salida son las tres señales digitales a partir de las cuales se accionan, o no, cada uno de los relés.

Para llevar a cabo el accionamiento de estos relés se utiliza una placa de relés de hasta cuatro contactos Arduino Relay Shield V2.0, compatible con la placa base y cuyos contactos se corresponden con los pines de salida 4, 5, 6 y 7 de dicha placa.

El montaje de cada uno de los módulos y los ensayos se llevaron a cabo en una placa de prototipos, mientras que la construcción definitiva se realizó en una placa Arduino Proto Shield Rev3, mediante la soldadura de los componentes.

## Software

El diseño del software se corresponde con la implementación del código de control. Dicho código se programa íntegramente con Arduino y se llevará a cabo por fases, de acuerdo con el proceso de control dividido en módulos tal y como se ha descrito.

Para cada uno de los módulos se programarán funciones lógicas, que se utilizan de forma recurrente en la parte central del código.

## Resultados y conclusiones

Los resultados más tangibles del desarrollo y construcción del sistema de control son los ensayos en los que se comprobó el funcionamiento del mismo. Dichos ensayos

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)**  
**GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA**

se llevaron a cabo en un elevador de tensión al no poder disponer del equipo para el cual se ha especificado el diseño.

En cuanto al sistema de control desarrollado, se ha podido comprobar que se trata de un sistema bastante fiable, cuya construcción no resulta demasiado compleja y con un coste bastante asequible.

Además, como consecuencia de las condiciones de los ensayos descritas se puede deducir otro aspecto muy interesante del sistema de control. Aunque fue necesario realizar algunos ajustes en el código, el sistema diseñado se pudo utilizar sin problema en el elevador de tensión ensayado. Esto demuestra de alguna manera la utilidad del sistema de control y la posibilidad de ser utilizado en diferentes equipos cuyo funcionamiento se base en el control de relés.

Por ello este hecho no ha impedido la consecución de los objetivos marcados en el proyecto. En primer lugar, se puede decir que todos los objetivos referentes al manejo de la aparamenta y los elementos que intervienen en el sistema, así como el montaje de los mismos se han cubierto con éxito. Se ha comprobado que la placa de control construida funciona, tanto la parte de medidas como la parte de actuación, lo que denota que el montaje está bien hecho.

Asimismo, todo lo relativo al desarrollo del código fuente y su implementación a través de la placa de Arduino ha resultado igualmente satisfactorio. El desarrollo del código ha sido capaz de cubrir tanto la actuación instantánea como la temporizada, compilando correctamente y cargándose en la placa de control.

Por último, se podría decir que el objetivo de comprobación del funcionamiento del sistema en el regulador de tensión en carga es el único que no se ha cumplido, al no haber podido ensayar en el equipo previsto. Sin embargo, gracias a esto se ha conseguido un objetivo adicional, que en principio no estaba previsto como tal, que es la instalación de la placa en otros equipos similares para ver si en ellos el comportamiento es igualmente bueno. Por ello, y pese a no haber podido ensayar con un regulador de tensión como el especificado, se puede considerar que el desarrollo del proyecto ha sido un éxito y que se han cumplido los objetivos marcados, por lo que el nivel de satisfacción alcanzado es alto.

DESIGN OF A CONTROL PLATE OF A VOLTAGE REGULATOR  
FOR ILLUMINATING FLOW

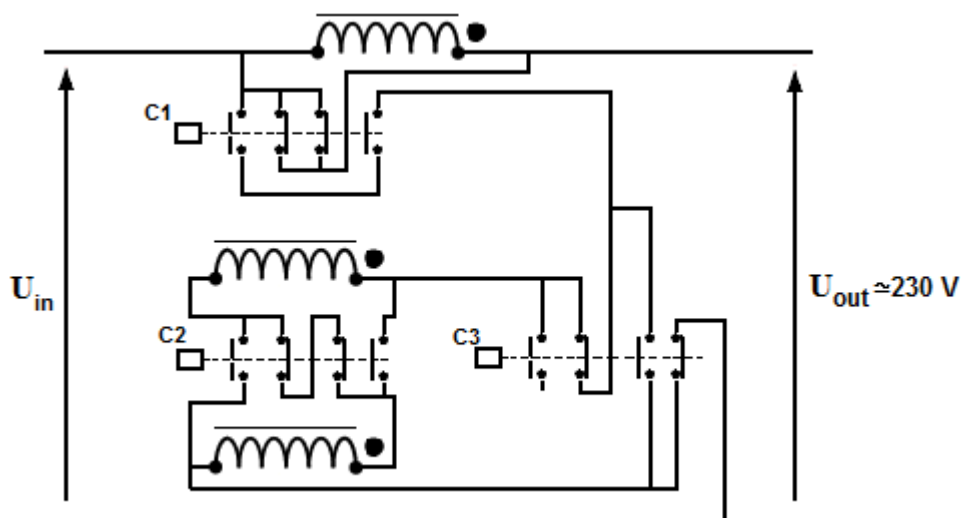
**ABSTRACT**

**Introduction**

Long term voltage variations are a major problem in the study of the supply of the electric system. The operators of the networks are responsible for maintaining the voltage level within a range, so that the correct operation of the charges of the system is guaranteed. This effect can be mitigated in transport network, but the importance of this is much larger when dealing with isolated rural networks. Therefore, it is necessary to look for efficient alternatives for the correct operation of the supply.

Within these alternatives the utilization of voltage regulators is an efficient and economic option. Nowadays there are a huge number of models available on the market, among which those that are based on power electronics stand out. Their use is synonymous to robustness, reliability and energetic efficiency; as well as being a quite an economic solution which is easy to maintain. However, to achieve an optimal use of a voltage regulator it is essential that it is dependent on a control system which is able to predict variations on the network, detect them and, through a control plate, send signals that adjust the desired voltage regulation levels so that the charge can be supplied with a quasi-constant voltage.

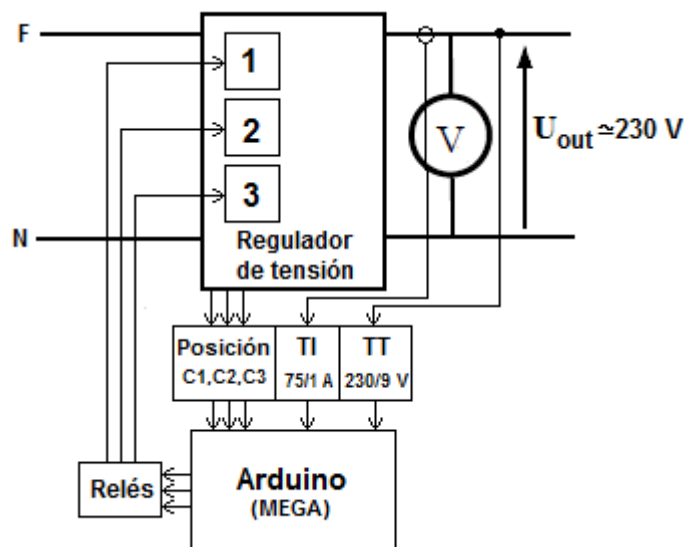
Throughout the present document the full development of a control plate for a voltage regulator is introduced, including assembly, software programming and tests for setting it in operation. The plate will be fully developed with Arduino and its main function will be the operation of the three relays that control the regulation steps of the equipment (Figure R1).



*Figure R1: Internal diagram of the regulator contacts.*

## General design of the control system

The control system of the equipment is formed by several elements that are put into three main modules (measuring, relays and Arduino). The first of the modules is related to measuring voltage, current and position of the relays, the second to the operation of the relays and the third to the connections of the control plate and the programming of the code with Arduino. These modules are interrelated as outlined in Figure R2.



*Figure R2: Simplified diagram of the control system.*

The two main blocks of the control system will be analysed below, detailing their most important features.

### Measuring module

As previously explained, the measuring module includes three variables: entrance voltage, current and position of the contacts of the relays.

- *Voltage measure*: this is the base of the design, as the whole operation is produced in function of the voltage measured. To carry this out, an assembly, which includes two consecutive voltage reductions is made by a 230/9 V transformer and a voltage divider circuit respectively together with the set-up of a circuit that introduces an offset which eliminates the negative part of the signal so that it is compatible with the entrance of Arduino.
- *Current measure*: this is carried out with a dual aim; on one hand it allows the operation to be programmed so that it functions in the moments when

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)**  
**GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA**

there is zero current, and on the other this is considered a an interesting piece of information for the customer that allows for the calculation of the active and reactive power consumed as well as the power factor in real time. The assembly in this case is made from an analogous design.

- *Measuring of the relays' position:* this function is to determine the current compensation step in order to avoid a redundant operation (that is, executing a compensation level when already active). The assembly is carried out with the connection of the auxiliary contacts of the relays to the supply of 5 Vdc of Arduino.

Operation module

The design of the operation will be programmed for two types of conditions which correspond with an instant and a temporized operation, and will occur as soon as the intensity signal is at zero when either of the following occurs:

- Moderate surge or voltage fall with duration of over five seconds: temporized operation.
- Sharp surge or voltage fall: immediate operation.

The complete operation system is fully defined as-shown in Table R1, in which the related position of the three contacts is also shown for each step-that is going to be used in order to program the operation. In this table the two described forms of operation are also outlined, as well as the level of compensation of each step.

Step	Level of voltage compensation	Transforming relation	Operation for $t > 5$ s	Instant operation	Position of the relays		
					C1	C2	C3
1	- 40 V	190/230	$U \geq 265$ V	$U \geq 297$ V	C	C	C
2	- 20 V	210/230	$U < 265$ V $U \geq 241$ V	$U < 297$ V $U \geq 265$ V	C	O	C
3	0 V	1	$U < 241$ V $U \geq 221$ V	–	O	O	O
4	+ 20 V	250/230	$U < 221$ V $U \geq 204$ V	$U < 204$ V $U \geq 183$ V	C	O	O
5	+ 40 V	270/230	$U < 204$ V	$U < 183$ V	C	C	O

*Table R1: Operation of the relays and related positions.*

## **Hardware**

The construction of the control system was done on an Arduino Mega 2560 plate. The five variables of the measuring module (voltage, current and position of the relays) are the analogical entrances for the plate, while the outing variables are the three digital signals which are used to operate, or not, each of the relays.

To carry out the operation of these relays an Arduino Relay Shield V2.0 (with up to four contacts) is used, compatible with the main plate and whose contacts correspond with output pins 4, 5, 6 and 7 of the mentioned plate.

The assembly of each of these modules and the tests were carried out on a prototype plate, while the final construction was made on an Arduino Proto Shield Rev3, by means of the welding of the components.

## **Software**

The software design corresponds with the implementation of the control code. This code is entirely programmed with Arduino and carried out by phases, according to the control process divided in modules as described.

For each module logic functions are programmed that can be used in a recurrent way in the principal part of the code.

## **Results and conclusions**

The most concrete results of the development and construction of the control systems are the tests in which the functioning was checked. These tests were carried out on a voltage elevator, since the equipment for which the design was specified was not available.

Regarding the control system developed, this was found to be quite a reliable system whose construction is not too complex and which is quite affordable.

Furthermore, as a consequence of the conditions described for the tests another interesting aspect of the control system can be deduced. Although some attachments on the code were necessary, the system could be used without trouble on the voltage elevator testes. This fact proves in some ways the usefulness of the control system and the possibility of it being used in different equipment whose performance is based on the control of relays.

For this reason, this fact has not impeded the attainment of the aims marked for the project. First of all, it can be said that all the objectives related to the use of the equipment and elements which take part in the system, as well as its assembly, have

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)**  
**GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA**

been successfully achieved. Both the measuring and the operating part of the final control plate have proved to work which denotes that the assembly has been well made.

Additionally, the development of the code and its implementation through the Arduino plate have been equally satisfactory. The development of the code has been able to cover both the instant and the temporized operation, compiling correctly and charging on the control plate.

Last but not least, it could be said that the verification of the functioning of the system with the voltage regulator on charge is the only aim which has not been achieved, as the tests could not be done on the planned equipment. However, thanks to this fact another additional aim that was not predicted has been achieved; the installation of the plate on other similar equipment to check if its behaviour is equally as good. For this reason, and despite not having been able to test the system in a regulator as specified, it can be considered that the development of the project has been a success and that the aims set out have been achieved, and therefore the level of satisfaction obtained is high.





# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS .....</b>	<b>I</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>IV</b>
<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>V</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Estructura del proyecto.....	2
1.2. Motivación.....	4
1.3. Objetivos .....	5
1.4. Metodología de trabajo.....	6
1.5. Recursos informáticos .....	7
<b>2. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>8</b>
2.1. Problemática .....	9
2.2. Teoría de la regulación de tensión .....	10
2.3. Algoritmos de control.....	12
2.4. Normativa: UNE 50-160 .....	15
2.5. Reguladores de tensión de BT.....	16
2.5.1. Tipos.....	16
2.5.2. Referencia de fabricantes y modelos. ....	19
<b>3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS .....</b>	<b>24</b>
3.1. Esquema eléctrico simplificado.....	25
3.2. Esquema general del equipo .....	26
3.3. Esquema general de control.....	27
3.3.1. Módulo de medida .....	28
3.3.1.1. Medida de la tensión de entrada .....	28
3.3.1.2. Medida de la intensidad de salida.....	30
3.3.1.3. Posición de los contactos de los relés .....	32



---

3.3.2. Módulo de actuación de los relés.....	33
3.3.3. Módulo de control completo con Arduino .....	37
<b>4. CARACTERÍSTICAS DEL HARDWARE DEL SISTEMA DE CONTROL .....</b>	<b>39</b>
4.1. Construcción del modelo y Ensayos .....	40
4.2. Módulo de medida .....	42
4.2.1. Medida de la tensión .....	42
4.3. Placa de actuación de los relés.....	43
4.4. Placa de Arduino.....	44
4.5. Montaje definitivo .....	45
<b>5. DISEÑO DEL SOFTWARE DEL SISTEMA DE CONTROL .....</b>	<b>46</b>
5.1. Consideraciones previas.....	47
5.2. Medida de tensión y corriente .....	48
5.2.1. Calibración .....	48
5.3. Medida de la posición de los relés .....	49
5.4. Identificación del nivel de compensación .....	51
5.5. Actuación de los relés.....	53
5.5.1. Niveles de compensación .....	53
5.5.2. Actuación instantánea .....	54
5.5.3. Actuación temporizada.....	55
<b>6. ENSAYOS DE VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL .....</b>	<b>57</b>
6.1. Consideraciones previas.....	58
6.2. Protocolo y resultados de los ensayos .....	61
6.2.1. Ensayo 1: Posiciones de interés.....	61
6.2.2. Ensayo 2: Identificación del nivel de compensación .....	61
6.2.3. Ensayo 3: Actuación en función de $V_{in}$ .....	62
<b>7. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>64</b>
7.1. Resultados del proyecto.....	65
7.2. Conclusiones.....	67
7.3. Consecución de objetivos.....	69



---

7.4. Futuros desarrollos.....	70
7.4.1. Mejoras en la medida de tensión .....	70
7.4.2. Mejoras en el sistema de actuación .....	70
7.4.3. Medida de la tensión de salida .....	71
7.4.4. Módulo de almacenamiento .....	71
7.4.5. Elementos de protección.....	72
7.4.6. Comunicaciones.....	72
<b>8. PRESUPUESTO .....</b>	<b>73</b>
8.1. Horas de desarrollo del proyecto .....	74
8.1.1. Horas de diseño .....	74
8.1.2. Horas de montaje .....	75
8.1.3. Horas de programación .....	75
8.1.4. Horas destinadas a otras tareas .....	76
8.1.5. Total de horas de proyecto.....	76
8.2. Coste de las horas de trabajo .....	77
8.3. Coste de materiales.....	78
8.4. Resumen del presupuesto.....	79
<b>9. REFERENCIAS.....</b>	<b>80</b>
9.1. Bibliografía.....	81
9.2. Páginas Web .....	82
9.3. Catálogos .....	83
<b>10. ANEXOS.....</b>	<b>84</b>
10.1. Código.....	85
10.2. Script de los ensayos .....	96
10.2.1. Ensayo 1: Posiciones de interés.....	96
10.2.2. Ensayo 2: Identificación del nivel de compensación .....	97
10.2.3. Ensayo 3: Actuación en función de $V_{in}$ .....	98



---

# LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1: Impacto de la GD en los niveles de tensión de la red de distribución .....	10
Figura 2: Regulador automático Unitrol 1020, de ABB. ....	19
Figura 3: Reguladores monofásicos de la serie SLC-8000 Twin Pro de Salicru. ....	20
Figura 4: Regulador de la serie LAN de Vogar. ....	21
Figura 5: Regulador de tensión AMCR de Industronic. ....	22
Figura 6: Emplazamiento del equipo en una red de suministro .....	25
Figura 7: Esquema interno de los contactos del regulador .....	26
Figura 8: Esquema simplificado del circuito de control .....	27
Figura 9: Diagrama de bloques del proceso de control .....	27
Figura 10: Esquema del circuito de medida de tensión. ....	29
Figura 11: Circuito de medida de intensidad. ....	31
Figura 12: Medida de la posición de los relés. ....	33
Figura 13: Esquema de accionamiento de los relés. ....	36
Figura 14: Placa de control Arduino Mega 2560, semejante a la utilizada. ....	37
Figura 15: Esquema de entradas y salidas de la placa de Arduino Mega. ....	38
Figura 16: Placa de prototipos usada para el montaje y los ensayos. ....	40
Figura 17: Transformador de tensión VB1.5/2/9- Block. ....	42
Figura 18: Placa de control de relés con Arduino (de hasta 4 contactos). ....	43
Figura 19: Arduino Proto Shield Rev 3. ....	45
Figura 20: Fotografía de muestra del Protocolo de Ensayos. ....	58
Figura 21: Reseña fotográfica del Ensayo 3. ....	59
Figura 22: Resultado final del montaje de la placa de control. ....	65
Figura 23: Detalle de la conexión de las tres placas que conforman el sistema. ....	66
Figura 24: Tarjeta de almacenamiento. ....	71



## LISTA DE TABLAS

---

Tabla 1: Características de los principales tipos de reguladores de BT. ....	18
Tabla 2: Comparativa de fabricantes y modelos de reguladores de tensión .....	22
Tabla 3: Tensión de salida para cada toma para posibles tensiones de entrada. ....	35
Tabla 4: Actuación de los relés y posición de los contactos correspondiente. ....	36
Tabla 5: Características del transformador de tensión VB1.5/2/9 de Block.....	42
Tabla 6: Especificaciones del Arduino Relay Shield V2.0. ....	43
Tabla 7: Resumen de las características técnicas de la placa de Arduino Mega 2560. 44	
Tabla 8: Características de los pines del Shield de montaje. ....	45
Tabla 9: Resultados del Ensayo 1. ....	61
Tabla 10: Resultados del Ensayo 2 .....	62
Tabla 11: Resultados del Ensayo 3.....	63
Tabla 12: Estimación de horas dedicadas al diseño del sistema de control. ....	74
Tabla 13: Estimación de horas dedicadas al montaje e instalación del hardware. ....	75
Tabla 14: Estimación de horas dedicadas al desarrollo del código con Arduino.....	75
Tabla 15: Estimación de horas dedicadas a otras tareas. ....	76
Tabla 16: Estimación de horas totales en el desarrollo del proyecto.....	76
Tabla 17: Desglose del coste del personal en función de cada rol de trabajo.....	77
Tabla 18: Desglose del coste de los elementos necesarios para el montaje.....	78



# 1. INTRODUCCIÓN

---



## 1.1. ESTRUCTURA DEL PROYECTO

A lo largo del siguiente documento se presenta todo el desarrollo de una placa de control para un regulador de tensión, incluyendo montaje, programación del software y ensayos para la puesta en funcionamiento. La placa se desarrollará íntegramente con Arduino y su función principal será el accionamiento de los relés que controlan los escalones de regulación del equipo.

El primer capítulo es una introducción al proyecto, indicando los objetivos y la metodología de trabajo del mismo. Asimismo, se indica la referencia del equipo sobre el que se va a trabajar así como la motivación para el proyecto. Por último, se incluye una breve reseña de los recursos que se utilizarán en su desarrollo.

En el segundo capítulo se presenta una revisión del estado de la cuestión, presentando en primer lugar la problemática, para dar una visión global de la importancia de este campo de la ingeniería eléctrica. A continuación se analizarán de forma genérica la teoría de la regulación de la tensión y los algoritmos de control, y se incluirá una reseña de la normativa vigente en este campo. Por último, se presentan los equipos que actualmente se pueden encontrar en el mercado, distinguiendo entre los diferentes tipos de reguladores de tensión e incluyendo una comparativa a modo de reseña de algunos fabricantes y modelos.

El tercer capítulo se refiere a las especificaciones técnicas de la placa de control. En primer lugar se indica el emplazamiento del regulador en la red de distribución y el esquema del mismo, para posteriormente centrarse en la descripción técnica del esquema de control. Este apartado constituye uno de los núcleos centrales del documento y en él se analizan cada uno de los módulos en los que se dividirá el desarrollo del sistema de control, indicando todas las especificaciones que se llevarán a cabo en el montaje y en la programación del mismo.

En el cuarto capítulo se detallan las características de los elementos utilizados en el montaje de la placa de control (hardware), de acuerdo siempre con las especificaciones técnicas descritas en el capítulo anterior.

El capítulo cinco hace referencia al desarrollo del código fuente. Como ya se ha indicado la programación se realiza con Arduino y es la base del funcionamiento del sistema de control. A lo largo de este capítulo se indican las principales partes del código de control, así como los criterios que se han tenido en cuenta para programarlo.

El capítulo sexto presenta los ensayos formales que se han llevado a cabo en el laboratorio para comprobar el correcto funcionamiento del montaje y del software desarrollado con Arduino.



En el capítulo siete se presentan los resultados del trabajo, así como las principales conclusiones que se pueden sacar una vez terminado todo el desarrollo del proyecto. Además, también se han incluido en este capítulo una reseña de las vías de desarrollo en las que se podría dar continuidad al proyecto en el futuro.

El capítulo ocho hace referencia a la valoración económica del proyecto. En dicha valoración se incluyen tanto el coste de los materiales necesarios para el montaje, como el de las horas de trabajo de ingeniería, incluyendo montaje y programación.

El capítulo nueve incluye una lista con todas las referencias que se irán indicando a lo largo del documento. Dicha lista se divide en tres niveles al distinguir entre referencias bibliográficas, páginas web y catálogos utilizados para la comparativa de fabricantes y modelos que se incluye en el estado de la cuestión.

Por último, el capítulo diez presenta los anexos, aquellas partes del documento cuya inclusión en el mismo dificultaría la lectura y que, por tanto, se ha decidido incluir al final. Forman parte del apartado de anexos, por un lado, el código completo y, por otro, el script de los ensayos descritos en el capítulo seis.





## 1.2. MOTIVACIÓN

En el desarrollo del proyecto se trabajará con un regulador de tensión como el que se presenta en [1], y el objetivo será el diseño de una placa de control, incluyendo el montaje de la misma y el desarrollo del código fuente que regirá la actuación, intentando encontrar el sistema de control óptimo para el mismo de acuerdo con la normativa vigente y las especificaciones dadas. Dicho regulador de tensión funciona como un transformador, constituido por dos devanados primarios independientes y un devanado secundario de compensación, conectado en serie con los anteriores. Los diferentes valores de compensación se obtienen al cambiar las conexiones entre los devanados primarios y secundarios, de forma que un control automático seleccione la conexión que corresponde para obtener un valor de compensación óptima en cada caso.

El regulador está diseñado para ser utilizado en redes de distribución, tanto en el exterior como en el interior, especialmente en aquellas que son más susceptibles a las variaciones de tensión en el sistema (como las redes rurales). Cabe destacar, además, que el diseño propuesto en este regulador puede ser utilizado tanto en sistemas trifásicos como para una sola fase.

Para realizar el sistema de control del mismo se emplean varios relés, cuyos contactos están asociados a los diferentes devanados. Un equipo de medida conectado a la placa de control registrará el valor de la tensión en tiempo real. Desde la placa se envía una señal de salida hacia el ordenador, de forma que el programa reconozca dicha señal y determine cuál es la compensación óptima en cada momento y su conexión correspondiente. Desde el ordenador se envían señales a la placa de control para que desde está se activen y desactiven los contactos de los relés para que la conexión sea la que corresponde en cada caso y se consiga una compensación óptima de la tensión en tiempo real.



### 1.3. OBJETIVOS

1. Estudio previo de la necesidad de la regulación de tensión.
2. Manejo de toda la aparamenta asociada con un regulador de tensión: equipos de medida, relés, contactores, etc.
3. Construcción y montaje de cada uno de los módulos en una placa de prototipos.
4. Programación con Arduino de un algoritmo de control para el regulador.
5. Implantación del código en la placa de control y realización de ensayos que permitan estudiar su comportamiento.
6. Montaje definitivo de la placa, soldando todas las partes de forma que se consiga un único bloque robusto que pueda ser instalado en cualquier equipo.
7. Comprobación del funcionamiento del regulador de tensión sobre una carga, para su posterior implantación en el alumbrado público o en cualquier otra aplicación.



## 1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Como ya se ha indicado, el objetivo final del proyecto es la realización completa del sistema de control, incluyendo hardware (la placa) y software (programación del código con Arduino). Para ello, en primer lugar se realizará un estudio previo de la regulación de tensión presentando la problemática y las soluciones que existen en la actualidad, de forma que se conozca que se pretende aportar con la realización de este proyecto.

A partir de ahí el objetivo será familiarizarse con el regulador que se va a utilizar para conocer sus características y su funcionamiento. De esta forma se determinarán las especificaciones técnicas del mismo para comprar los equipos de control y medida necesarios. Una vez que se tengan los equipos comenzará la parte de trabajo más experimental, que constituye el núcleo central del proyecto, que consistirá en el trabajo de laboratorio de montaje de la placa y los ensayos. Asimismo, se realizará el código con Arduino y se implantará en la placa de control para observar si el comportamiento se ajusta con lo esperado. En función de los resultados de las primeras pruebas se irán realizando los cambios oportunos, considerando que en esta fase puedan surgir algunos imprevistos que requieran la modificación del código. Finalmente se deja un período abierto para posibles ampliaciones en aquellas facetas del trabajo que se presten más a ello. Por último, el período final de trabajo se reserva para la redacción del documento y las conclusiones del proyecto.



## 1.5. RECURSOS INFORMÁTICOS

Como ya se ha especificado anteriormente, el código de control se programará con Arduino. En principio se empleará la versión disponible en la universidad (puede ser descargada de la propia página web de Arduino [W1]).

Para la redacción del documento se empleará el procesador de textos Microsoft Word y la elaboración de la presentación se realizará con PowerPoint.



# 2. ESTADO DEL ARTE

---



## 2.1. PROBLEMÁTICA

Las variaciones de tensión de larga duración constituyen un reto central en la operación de los sistemas eléctricos. Es responsabilidad de los operadores de las redes eléctricas el mantener dentro de unos rangos los niveles de tensión, que garanticen el correcto funcionamiento de las cargas del sistema eléctrico. Las variaciones de tensión pueden mitigarse en la red de transporte así como en las redes de distribución, pero su importancia es mucho mayor cuando se trata de las redes rurales más aisladas. Por ello, resulta necesario buscar alternativas eficientes para el correcto funcionamiento del suministro.

El valor de la tensión es una característica esencial en cualquier elemento eléctrico, ya que de ella depende su correcto funcionamiento. En Europa la normativa vigente establece que la máxima variación de tensión admitida es del  $\pm 10\%$  [EN 50160], mientras que en Estados Unidos se define un rango normal de funcionamiento de 120 V  $\pm 5\%$  [ANSI C84-1]. Dentro de estos estándares mínimos cada país puede definir normas propias más restrictivas; en España, por ejemplo, se establecen un valor de tensión normalizado de 230 V  $\pm 7\%$ .

Todos los valores de tensión que se encuentren fuera de estos criterios normalizados constituyen un problema para los equipos, motores o aparataje eléctrica. Un nivel de tensión inferior prolongado en el tiempo conlleva problemas como el retraso y mal funcionamiento de contactores, atenuación de la iluminación, fallos en cargas no lineales, desconexión de iluminación de descarga o pérdida de capacidad de dar mar en motores de inducción. Por el contrario, una sobretensión prolongada en el tiempo provoca un sobrecalentamiento de la aparataje y de las cargas (motores, transformadores, etc.), lo que disminuye su durabilidad.

En cualquier caso, las variaciones de tensión son posiblemente uno de los aspectos más importantes que se deben controlar dentro del sistema eléctrico y, en consecuencia, la regulación de tensión surge como una necesidad básica y con connotaciones legales para el operador del sistema y las compañías distribuidoras.

## 2.2. TEORÍA DE LA REGULACIÓN DE TENSIÓN

De acuerdo con todo lo que se ha analizado en la problemática, la regulación de tensión es un aspecto fundamental de la ingeniería del sector eléctrico. Tal y como se ha explicado, la tensión afecta de forma directa al correcto funcionamiento de los equipos a nivel particular y del sistema a nivel global. Por tanto, la regulación de tensión se presenta como una necesidad desde el punto de vista teórico y es por ello que el control de las variaciones de tensión, de acuerdo con la normativa vigente y las especificaciones dadas, en la red resulta crucial.

A la hora de minimizar las variaciones y de tensión su efecto sobre el suministro eléctrico, las compañías eléctricas de distribución han llevado a cabo principalmente tres tipos de políticas:

- Control por cambio manual a través del transformador de distribución principal.
- Instalación de equipos de compensación: bancos de condensadores, reguladores de tensión, elevadores o auto-elevadores de tensión...
- Aumentando el nivel de tensión de la red de BT (esto solo se utiliza como última opción, puesto que se trata de la alternativa más costosa y actualmente está en desuso).

Sin embargo, hoy en día el impacto derivado de la introducción de la generación distribuida dentro del sistema supone que la regulación de los niveles de tensión dentro de la red de distribución resulte mucho más complicada [2]. Además, la tercera de las alternativas resulta inadecuada en caso de existir GD dentro de la red de distribución, tal y como se muestra en la siguiente gráfica de forma aproximada (Figura 1). Es por ello que en la actualidad esta alternativa se empieza a considerar obsoleta y ya no resulta de utilidad.

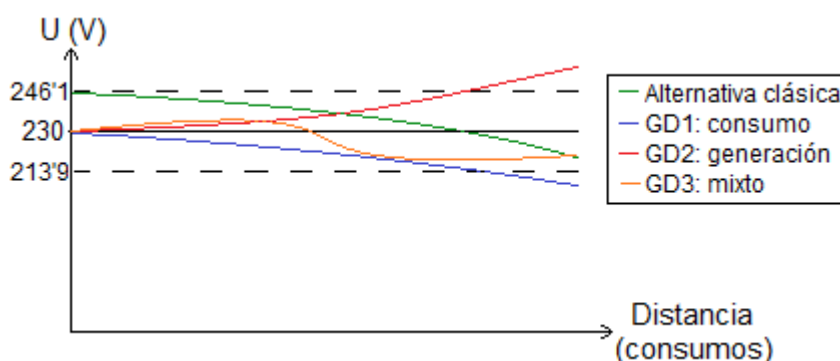


Figura 1: Impacto de la GD en los niveles de tensión de la red de distribución.

De acuerdo con la gráfica, siendo los valores representados los límites legales de tensión en España ( $230\text{ V} \pm 7\%$ ), la alternativa clásica, representada en verde, era de utilidad cuando todos los elementos conectados a la red eran consumos de forma que



contribuyeran a reducir la tensión de red. Sin embargo, al introducir GD lo que antes eran consumos pueden consumir o generar energía, dando lugar a diferentes curvas:

1. Sólo consumo: la tensión cae (curva azul).
2. Sólo generación: la tensión sube (curva roja).
3. Puntos de consumo intercalados con otros de generación: la tensión fluctúa (curva naranja).

Esta circunstancia se traduce en una mayor dificultad en la regulación de la tensión en las redes de distribución, requiriendo una mayor atención y una regulación en tiempo real. Además, tal y como se ha comentado, el aumento de la tensión de red deja de ser una alternativa viable, ya que en caso de existir generación la tensión subirá por encima del límite legal.

En cualquier caso, dentro de estas tres alternativas, el uso de reguladores de tensión es posiblemente la opción más destacada y utilizada. Hoy en día existen una enorme cantidad de ellos, entre los que destacan aquellos cuyo funcionamiento está basado en la electrónica de potencia. Su empleo es sinónimo de robustez, fiabilidad y eficiencia energética; además de ser una solución bastante económica y de fácil mantenimiento. Sin embargo, para que el uso de un regulador de tensión sea óptimo es fundamental que este supeditado a un sistema de control que sea capaz de predecir las variaciones en la red, detectarlas y, a través de una placa de control, enviar señales que ajusten los niveles de regulación de tensión deseados para poder alimentar a la carga con una tensión casi constante.

Para estudiar la regulación de tensión es necesario tener en cuenta que hay una gran variedad de formatos de reguladores de tensión. En este proyecto se analizará un regulador discreto, con cinco puntos de compensación tensión de salida distintos, que son simétricos entre sí, de forma que el punto central no presenta compensación alguna. El regulador actúa por tanto como un autotrafo de 5 puntos cuya tensión de salida es  $230\text{ V} \pm 2 \times 20\text{ V}$  (lo que equivale a  $230\text{ V} \pm 17'4\%$  en escalones del 8'7%).

La teoría de un regulador de tensión discreto de este tipo se basa en la conexión de transformadores. El regulador en conjunto se comporta como un único transformador, pero, en lugar de tener un único devanado primario y otro secundario, está formado por tres devanados (dos con un número de espiras igual, y cuya tensión equivalente en caso de funcionamiento aislado sería la de entrada, y otro con menor número de espiras). Las diferentes conexiones que se establecen entre ellos vienen dadas por 3 contactos, que según como se combinen dan los cinco valores de compensación de tensión descritos.





## 2.3. ALGORITMOS DE CONTROL

El Control automático desempeña un papel importante en los procesos de manufactura, industriales, navales, aeroespaciales, robótica, económicos, etc. Los tipos de control empleados para estos procesos serán descritos a continuación, pero en primer lugar es necesario indicar algunos términos que son empleados en todo sistema de automatizado [3].

- Señal de salida: es la variable que se desea controlar (posición, velocidad, presión, temperatura, etc.). También se denomina variable controlada (PROCESS VARIABLE). En el caso del objeto de este proyecto la variable de salida es la tensión.
- Señal de Referencia (SET POINT): Es el valor que se desea que alcance la señal de salida. El valor de referencia tomado será el valor de tensión normalizado de 230 V, de acuerdo con la norma [ver sección 2.4: Normativa].
- Error: es la diferencia entre la señal de referencia y la señal de salida real.
- Señal de control (OUTPUT): es la señal que produce el sistema de control para modificar la variable controlada de tal forma que se disminuya, o elimine, el error. En el caso de estudio, el output sería el conjunto de señales que actúan sobre los relés para ajustar el nivel de compensación deseado [ver sección 3.3: Esquema general de control].
- Señal analógica: es una señal continua en el tiempo. La tensión y la intensidad (cuya medida se hace en el apartado 3.3.1) son ejemplos de señales analógicas.
- Señal digital: es una señal que solo toma valores de 1 y 0. La actuación de los relés se llevará a cabo a partir de señales de este tipo.
- Planta: Es el elemento físico que se desea controlar. En este caso, el regulador de tensión.
- Sistema: consiste en un conjunto de elementos que actúan coordinadamente para realizar un objetivo determinado.
- Perturbación: es una señal que tiende a afectar la salida del sistema, desviándola del valor deseado.

Aunque en [3] se pueden encontrar más definiciones referentes a los sistemas de control éstas no serán incluidas aquí al no aparecer explícitamente en el sistema de control que se va a desarrollar.

El control automático nace de la consideración del principio de realimentación. El concepto se resume en que el proceso es tal que cuando el valor de la variable manipulada



se incrementa, entonces se incrementan los valores de las variables del proceso. Bajo este concepto simple, el principio de realimentación puede ser expresado como Incrementar la variable manipulada cuando la variable del proceso sea más pequeña que la referencia y disminuirla cuando ésta sea más grande. De acuerdo con este criterio, se pueden diferenciar dos tipos de sistemas de control:

- Sistema de control de lazo cerrado: es aquel sistema en el que la acción de control está en función de la señal de salida. Es decir, aquel en el cual se mide la señal de salida continuamente (en tiempo real) para compararla con la señal de referencia y calcular la señal de error, la cual a su vez es aplicada al controlador para generar la señal de control y tratar de llevar la señal de salida al valor deseado. También recibe el nombre de control realimentado.
- El control en lazo cerrado es más estable frente a perturbaciones y/o variaciones internas, aunque al mismo tiempo suele ser más complejo y requiere controlar un mayor número de parámetros.
- Sistema de control de lazo abierto: es aquel sistema en que solo actúa el proceso sobre la señal de entrada y da como resultado una señal de salida independiente a la señal de entrada, pero basada en la primera. En estos sistemas de control la señal de salida no es monitoreada para generar una señal de control. Esto significa que no hay retroalimentación hacia el controlador para que éste pueda ajustar la acción de control. Es decir, la señal de salida no se convierte en señal de entrada para el controlador.
- Estos sistemas se caracterizan por ser sencillos y de fácil concepto, pero más vulnerables frente a perturbaciones y con menor estabilidad.

De acuerdo con este criterio, el sistema de control que se va a desarrollar se considera del segundo tipo (lazo abierto), puesto que el nivel de compensación del regulador depende únicamente de la tensión de entrada al mismo. Evidentemente, la señal de salida depende directamente de la tensión de entrada, pero no se controla de forma explícita ya que se presupone que el sistema no presenta fallos internos y que las imprecisiones que se dan como consecuencia de la actuación de los relés son despreciables frente a la compensación.

En lo que se refiere al código utilizado y los algoritmos de control, en [4] se define que las estructuras de control, en programación, son métodos que se utilizan para controlar el flujo de lógica en un algoritmo o en un programa informático. Con estas estructuras, el programador puede determinar el orden de ejecución de los pasos en un algoritmo o el de las instrucciones en un programa.



En general, un algoritmo es una secuencia finita de instrucciones específicas completamente definidas y organizadas, la cual, a partir de variables confiables para un sistema, genera las variables de salida que se desean obtener. Aplicando este concepto a un sistema de control se concluye que un algoritmo de control es aquel cuyas instrucciones describen formalmente la estrategia de control. Un algoritmo realiza procesos de cálculo en forma secuencial, de acuerdo con un esquema determinado.

En el sistema de control que se desea implementar, el algoritmo corresponde con el código que se desarrollará en Arduino, tal y como se explica posteriormente en los apartados 3.3.3 y, más específicamente, en el capítulo 5.



## 2.4. NORMATIVA: UNE 50-160

La normativa vigente en el suministro eléctrico está definida en la norma UNE-EN 50160. Tal y como se especifica en [5], la norma UNE-EN 50160 tiene por objeto describir las características principales de la tensión suministrada por una red pública de distribución de baja y media tensión, en las condiciones normales de explotación.

La norma se encarga por tanto de proporcionar los principales parámetros de tensión y los correspondientes márgenes de desviación permisibles en el punto de acoplamiento común (PCC) del usuario en sistemas públicos de distribución de electricidad en baja tensión (BT, la tensión de red no supera los 1000 V) y de media tensión (MT, tensión de red comprendida entre 1 y 35 kV), en condiciones de funcionamiento normales. Tal y como se comentó previamente en el apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el valor de tensión normalizado en España es de  $230\text{ V} \pm 7\%$ .

En [6] se establece una comparación de las exigencias de la Norma EN 50160 con las especificaciones de las normas EMC de la serie EN 61000, mostrando diferencias significativas en varios parámetros. Estas diferencias se deben a dos razones principales:

- Las especificaciones de las normas EMC se refieren a la tensión de servicio, según IEC 038, mientras que la Norma EN 50160 hace referencia a la tensión de suministro. Las diferencias entre estas tensiones se deben a las caídas de tensión en la instalación y a las perturbaciones que se originan en la red o en otros equipos de la instalación. Por este motivo, en muchas normas de la serie EN 61000 la corriente del equipo es un parámetro importante, mientras que la corriente de carga no es relevante para la norma EN 50160.
- La EN 50160 sólo proporciona límites generales que son técnica y económicamente factibles de mantener por el proveedor en sistemas de distribución públicos. En aquellos casos en que se requieran unas condiciones más rigurosas, será preciso negociar un acuerdo detallado entre el proveedor y el consumidor. Las medidas para mejorar la Calidad de la Energía implican costes y la utilización de equipos adicionales, que se abordan en otras secciones de esta guía.

Asimismo, en [5] se incluye también una tabla en la que se muestran diferencias significativas en varios parámetros.



## 2.5. REGULADORES DE TENSIÓN DE BT

### 2.5.1. Tipos

En la actualidad existen multitud de equipos cuya finalidad es la regulación de tensión en baja tensión [7]. Sin embargo, dentro de los equipos utilizados para este fin destacan especialmente los reguladores de tensión, debido principalmente a su alta eficiencia y su facilidad de uso en múltiples aplicaciones.

En cuestión de reguladores de tensión en la actualidad puede encontrarse una infinidad de modelos de diferentes tipos, por lo que presentar únicamente una reseña sobre ello no resulta fácil. En cualquier caso, en esta sección se analizarán algunos modelos análogos al que se presenta en el proyecto, destacando las características propias de cada uno así como sus ventajas e inconvenientes más relevantes.

Para ello, en [6] se detallan igualmente una gran variedad de reguladores de tensión, que también aparecen de forma sintetizada en [8], particularizando su uso en redes de distribución. De acuerdo con este criterio, los principales reguladores de tensión se dividen en tres grupos: el ferorrresonante, el controlable mediante escobillas y regulador de tomas (o de taps, por su nombre en inglés).

#### A. Regulador de tensión ferorrresonante

El regulador de tensión ferorrresonante consiste básicamente en un transformador con una relación 1:1, el cual se excita en su curva de saturación de forma que la tensión de salida que no se vea afectada por las variaciones en la tensión de entrada. Estos equipos han sido muy utilizados principalmente por su alta fiabilidad, ya que no utilizan elementos activos. Su rango típico de variación de la tensión de entrada puede ser desde  $\pm 10\%$  hasta un  $\pm 20\%$ , con una variación de la tensión de salida de  $\pm 3\%$ . Tienen un tiempo de respuesta de alrededor de 30 ms.

Cabe destacar que la corriente de salida en este caso es similar a aquella en los circuitos lineales con condensadores o inductancias en serie, donde la impedancia tiene un pico a una frecuencia en particular [9].

Entre sus principales ventajas sobresale especialmente la regulación de entrada extrema, como ya se ha comentado, pudiendo operar a tensiones inferiores al 50% de la tensión normal, proporcionando tensión de salida nominal con regulación de  $\pm 1\%$  siempre que la carga no rebase el 60% de la capacidad nominal del regulador [10]. Asimismo, destaca la capacidad de atenuar ruidos y transitorios tanto en modo común como en modo diferencial, y de compensar interrupciones de alrededor de 2 ms. Por otra parte, presentan las desventajas de



un peso elevado y baja eficiencia (alrededor de 70% para una potencia de 2 kVA). Además, tienen el problema de que su uso está normalmente acotado para potencias mayores, debido a las altas pérdidas del núcleo. Esto se debe a que manejan una potencia reactiva del orden 2.5 veces la nominal y deben de funcionar con el núcleo saturado, de acuerdo a su principio de operación.

#### B. Regulador por autotransformador controlable mediante escobillas

Este tipo de regulador está formado por un autotransformador con una toma de salida deslizable sobre el devanado mediante una escobilla motorizada, la cual es controlada por un circuito que tiende a mantener la tensión de salida constante. La escobilla toca una o dos espiras, lo que puede producir una corriente de cortocircuito de valor admisible.

Aunque en realidad la tensión de salida da saltos iguales a la tensión que aparece en media espira, se pueden considerar como de resolución continua al ser de un valor muy pequeño. Su principal ventaja es su robustez, ya que soportan sobrecargas de valor elevado y corta duración. Sus desventajas principales son el alto precio (en comparación con los reguladores de tomas), la lentitud de la respuesta (alrededor de 0.5 s), y la incapacidad para trabajar en atmósferas sucias y explosivas. El rango de variación de la tensión de salida está alrededor del  $\pm 2\%$ . Actualmente su aplicación principal se encuentra en potencias mayores a 50 kVA.

#### C. Regulador de tomas

El funcionamiento de los reguladores de tomas o taps (on-load tap changer) de baja tensión se basa en un autotransformador o transformador cuyo primario o secundario se conecta a través de tomas seleccionadas por interruptores estáticos, constituidos por dispositivos de potencia (tiristores). Dependiendo de la tensión de entrada, el circuito de control selecciona la toma adecuada para mantener la tensión de salida dentro del rango especificado. El margen de la tensión de entrada suele ser de  $\pm 15\%$ , con una variación de la tensión de salida de  $\pm 3\%$ . Su tiempo de respuesta es de alrededor de 100 ms. Son equipos muy utilizados actualmente debido a su alta relación calidad/precio. El equipo sobre el que se está realizando el sistema de control estaría englobado dentro de este bloque.

El problema principal de este tipo de reguladores consiste en la corriente de cortocircuito que se establece entre el interruptor que conduce y el nuevo interruptor encendido. Existen varias soluciones para este problema, como implementar un circuito sensor de paso por cero de la corriente, efectuar la conmutación sin la previsión anterior y confiar a la resistencia del devanado entre dos tomas consecutivas la limitación de la corriente de cortocircuito que se



establecería durante medio ciclo de línea o insertar una bobina de devanados múltiples limitadora de sobrecorriente entre cada toma y el interruptor. En cualquier caso, llevar a cabo un protocolo de pruebas previo a su instalación es siempre recomendable [11].

Además del problema relacionado con la corriente de cortocircuito, los reguladores de taps presentan un retardo considerable en su respuesta ante una variación de tensión, ya que al utilizar tiristores como interruptores de potencia, resulta necesario un tiempo de espera mínimo igual a medio ciclo de la tensión de línea para realizar una conmutación entre tomas. Como consecuencia, este tipo de reguladores no resultan útiles para responder frente a variaciones de tensión de corta duración.

Para su aplicación en sistemas trifásicos, se pueden considerar como tres módulos independientes, donde cada uno de ellos ajusta su tensión de salida dependiendo de la tensión fase-neutro.

En la Tabla 1, tomada también de [7], se muestra un comparativa-resumen de las características principales que se han comentado en los tres tipos de equipos.

Tipo	Compensa	Eficiencia	Tiempo de respuesta (ms)	Genera armónicos	Atmósferas sucias o explosivas	Potencia	Costo
Ferrorresonante	Ruido, transitorios, interrupciones menores a 2ms, variaciones de larga duración	Baja	30	No	Sí	Baja	Medio
Autotransformador controlable	Variaciones de larga duración	Alta	500	No	No	Media	Alto
De taps	Variaciones de larga duración	Alta	100	No	Sí	Media	Bajo

Tabla 1: Características de los principales tipos de reguladores de BT.

### 2.5.2. Referencia de fabricantes y modelos.

Tal y como se ha comentado en la sección anterior, la cantidad de reguladores de tensión que se puede encontrar en el mercado es enorme. Por ello, lo que se presenta a continuación no es más que una reseña a modo de comparativa entre algunos fabricantes.

Para realizar la comparativa se analizarán modelos monofásicos de una potencia nominal y características técnicas similares al equipo sobre el que se va a realizar el diseño. Los fabricantes que se consideran serán los siguientes.

#### A. ABB: Regulador automático Unitrol 1020

ABB es una de las mayores empresas en lo referente a aparatación eléctrica a todos los niveles y, posiblemente, el proveedor al por mayor líder en ventas a nivel mundial [W2].

El modelo elegido es el UNITROL 1020 (Figura 2), que combina circuitos de alimentación y control de alto rendimiento con un diseño mecánico sencillo [C1]. Se utiliza en una amplia gama de pequeñas aplicaciones, y es especialmente útil para aquellas que se desarrollan en condiciones medioambientales muy exigentes. El regulador admite tensiones de entrada en un rango de 0 a 300 V, tanto en continua como en alterna. Asegura una precisión del 0'1% a 25°C y un tiempo de respuesta inferior a 50 ms para montajes monofásicos. Puede trabajar entre -40 y +70°C y tiene unas dimensiones de 302 x 170 x 111 (mm). Está especialmente diseñado para alimentar generadores síncronos y máquinas industriales pequeñas.



Figura 2: Regulador automático Unitrol 1020, de ABB.



### B. Salicru: Regulador monofásico SLC TWIN PRO

Se trata de una multinacional dedicada a la potencia eléctrica que está especializada en equipos de protección de BT, estabilizadores de tensión y alumbrado público. Se enfoca sobre todo al cliente en pequeña escala (hogares, comercios, pymes), aunque también tiene productos para uso industrial [W3].

El modelo escogido para la comparativa es el SLC-8000-TWIN PRO [C2]. Utiliza tecnología On-line doble conversión, la más fiable del mercado y se trata de un modelo de salida monofásica con entrada monofásica, factor de potencia de salida 0,9 y potencia nominal de 8000 VA (7200 W). Entre otras ventajas, permite amplias opciones de comunicación y monitorización y alternativas para ampliar la autonomía. El margen de regulación está comprendido entre 110 y 276 V y la precisión a la salida es del  $\pm 1\%$ . Puede trabajar entre 0 y 45°C. Sus dimensiones son 560 x 260 x 508 (mm) y su peso es de 92 kg. En la Figura 3 se muestran varios reguladores monofásicos de la marca.



*Figura 3: Reguladores monofásicos de la serie SLC-8000 Twin Pro de Salicru.*

### C. Vogar: Reguladores serie LAN

Vogar es una firma especializada en la regulación profesional del voltaje, la vigilancia electrónica y la protección de equipos y circuitos. En su página web pueden encontrarse infinidad de equipos destinados a la regulación de tensión [W4].

El equipo que se va a estudiar en la comparativa es el regulador bifásico LAN 28 (cuyo diseño se presenta en la Figura 4). Se trata de un equipo que ofrece

regulación electrónica basado en la tecnología de conmutación Tap Changer de 5 pasos [W5].



Figura 4: Regulador de la serie LAN de Vogar.

Para la comparativa se buscaba un regulador monofásico (por ejemplo el modelo LAN 18), pero este modelo no permitía trabajar con tensiones fase-fase (220-230 V). El modelo elegido tiene una potencia nominal de 8 kVA y admite tensiones de entrada en un rango del  $\pm 15\%$  con respecto a la tensión nominal (220 V). La precisión a la salida es del  $\pm 3\%$ . El tiempo normal de respuesta es de medio ciclo, aunque hay que tener en cuenta que este modelo está diseñado para trabajar a 60 Hz. Puede trabajar a una temperatura de entre 0 y 50 °C. Sus dimensiones son de 465 x 250 x 425 (mm).

#### D. Industronic: Reguladores AMCR

Industronic es una empresa mejicana que se encarga de desarrollar, fabricar, comercializar y distribuir sistemas de ahorro, regulación, respaldo y acondicionamiento de la energía eléctrica de máxima calidad [W6].

En este caso se escoge el modelo AMCR-3142, monofásico en 220 V (AC), con una potencia nominal de 7.5 kVA [C3]. Se trata de un modelo cuya eficiencia es del 99%, con capacidad de supresión de picos de voltaje de hasta el 400% y corte automático. Dentro de las opciones disponibles en el catálogo se puede escoger entre un margen de tensión a la entrada del  $\pm 15$ , 25 o 40%, con una regulación a la salida de  $\pm 3\%$  (también disponible en  $\pm 5\%$ ). El tiempo de restablecimiento en este caso es de medio ciclo (8.3 ms). El rango de temperatura de operación para el que está diseñado es de 0 a 40°C. Sus dimensiones son de 460 x 270 x 450 (mm) y su peso de 22 kg.

Dicho modelo se puede ver a continuación en la Figura 5.



Figura 5: Regulador de tensión AMCR de Industronic.

Una vez analizados los modelos de los cada uno de los cuatro fabricantes, en la Tabla 2 se presenta un resumen de las principales características técnicas especificadas para cada uno de ellos.

Fabricante	ABB	Salicru	Vogar	Industronic
Modelo	UNITROL 1020	SLC 8000 TWIN PRO	LAN 28	ACMR 3142
Potencia nominal (kVA)	4,6	8	8	7,5
Tensión (V)	-	200/208/220/230/240	220	220
Frecuencia (Hz)	10 - 150	50/60	60	50/60
Eficiencia	-	92%	99%	99%
Precisión	± 1%	± 1%	± 3%	± 3%
Picos de Tensión	500 V	-	Hasta 4000 V	Hasta 400%
Tensiones de entrada	18 - 300 V	110 - 276 V	± 15%	± 15, 25 o 40%
Tiempo de actuación	< 50 ms	-	medio ciclo	medio ciclo (8,3 ms)
Rango de temperaturas (°C)	De -40 a +70	0 - 45	0 - 50	0 - 40
Dimensiones (mm)	302 x 170 x 111	560 x 260 x 508	465 x 250 x 425	460 x 270 x 450

Tabla 2: Comparativa de fabricantes y modelos de reguladores de tensión

Lo primero que resulta interesante comentar dentro de los resultados de esta comparativa es que hoy en día existen muchísimos modelos de reguladores de tensión diferentes. Este hecho, que puede parecer obvio, resulta de mucha importancia a la hora de poder analizar los modelos estudiados. Esto se debe a que



dentro de cada gama de reguladores de cada uno de los fabricantes existen una infinidad de modelos diferentes en función de las características que se requieran. Por ello, resulta complicado encontrar cuatro modelos idénticos en diferentes fabricantes, ya que cada uno de ellos será mejor o peor en función de lo que se busque.

En cualquier caso, para poder realizar una comparativa de interés el criterio seguido ha sido seleccionar reguladores con una potencia nominal lo más parecida posible y unas características de regulación similares. A partir de esta comparativa se concluye que las prestaciones que ofrecen todos ellos son bastante similares dentro del rango especificado, aunque tal y como se ve en la tabla se pueden encontrar también muchas diferencias entre ellos.



# 3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

---

### 3.1. ESQUEMA ELÉCTRICO SIMPLIFICADO

En el siguiente esquema (Figura 6) se muestra a grandes rasgos cual sería el emplazamiento del regulador de tensión dentro del esquema eléctrico de una red de suministro. Asimismo se incluyen en el los elementos de control externos que se creen necesarios (no se incluyen todos los elementos de control que afectan solo a los devanados internos del regulador).

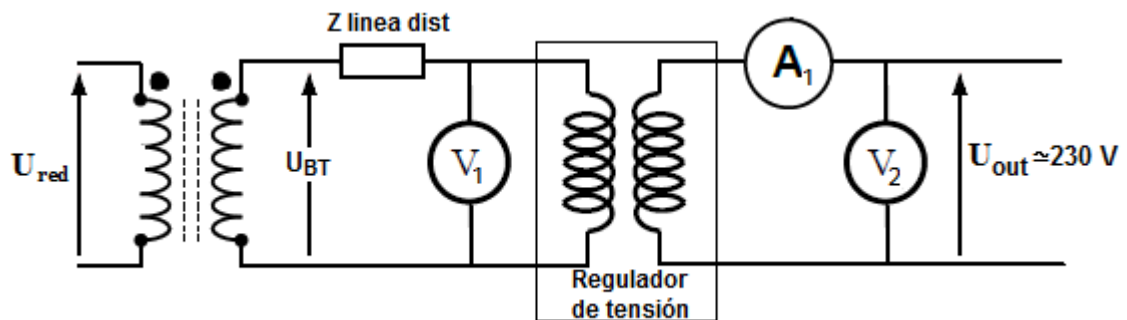


Figura 6: Emplazamiento del equipo en una red de suministro.

Ambos voltímetros deben medir tensiones de un orden de magnitud cercano a los 230 V, teniendo en cuenta además que el primero es el que necesita mayor margen (se estima un margen de  $\pm 60\ V$ ), mientras que en el segundo la tensión ya está corregida y su valor debería ser siempre cercano a los 230 V (se puede considerar un margen de  $\pm 7\%$ ).

Conviene señalar también que en el esquema no se incluyen los elementos de protección, sino solo los de medida (para el control).

## 3.2. ESQUEMA GENERAL DEL EQUIPO

A continuación, se muestra el esquema simplificado de los devanados del regulador, con sus el conexionado de sus correspondientes relés (Figura 7). Tal y como se ha comentado anteriormente, el equipo consta de un sistema de contactos formado por un total de tres relés. Los contactos de los relés tienen dos posiciones (Abierto/Cerrado), que se ajustan formando combinaciones que permiten cambiar las conexiones de los distintos devanados y obtener los 5 niveles de compensación a la salida.

El objeto del trabajo de laboratorio será registrar la posición de los contactos, conectando los mismos a la placa de control como entradas todo/nada para el Arduino. El programa, de acuerdo con la posición de los contactos y la tensión medida a la salida en tiempo real deberá ser capaz de dar la orden de mantener o cambiar posición (apertura o cierre) de cada uno de ellos de forma que se consiga siempre el nivel de compensación necesario. Dicha orden será ejecutada de forma automática por el código

Resulta oportuno señalar que en el esquema no se incluyen los contactos desde los cuales se controlan los relés, sino tan solo la conexión de los mismos con respecto a cada uno de los devanados.

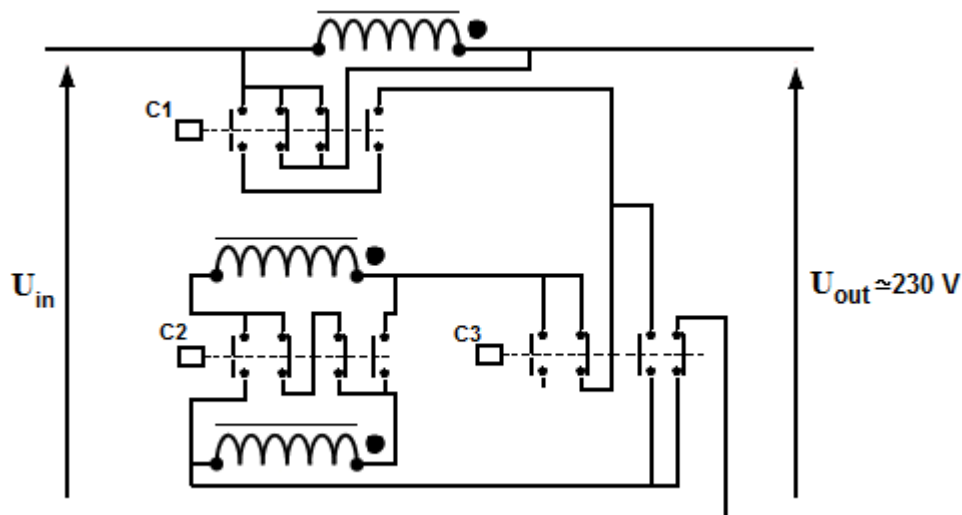


Figura 7: Esquema interno de los contactos del regulador.

### 3.3. ESQUEMA GENERAL DE CONTROL

El sistema de control del equipo está constituido por varios elementos que se agrupan en tres módulos principales (medida, relés y Arduino). El primero de los módulos se refiere a la medida de tensión, corriente y posición de los relés; el segundo a la actuación de los relés y el último al conexionado de la placa de control y la programación del código con Arduino. Dichos módulos se interrelacionan entre sí tal y como se indica de forma esquemática en la siguiente figura (Figura 8).

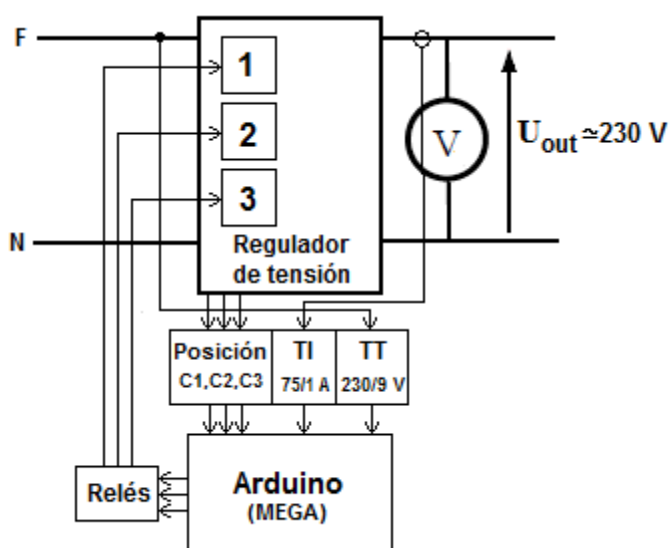


Figura 8: Esquema simplificado del circuito de control.

Si se representan en cascada las relaciones que hay entre los diferentes elementos, el esquema anterior quedaría definido con un diagrama clásico de bloques como el que se presenta a continuación (Figura 9):

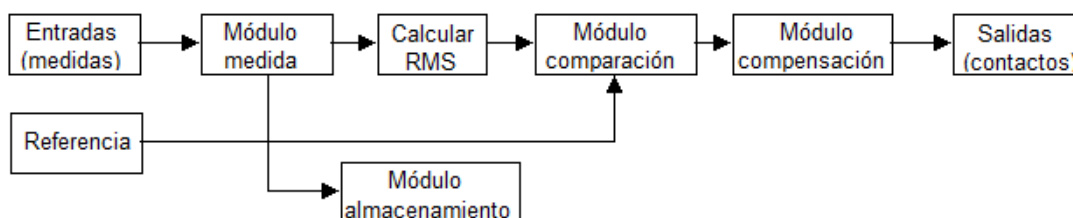


Figura 9: Diagrama de bloques del proceso de control.

A continuación se analizarán cada uno de los bloques importantes del diagrama, detallando sus características técnicas así como el conexionado que se va a llevar a cabo en el montaje del equipo y los ensayos del laboratorio.





### 3.3.1. *Módulo de medida*

Dentro del módulo de medida se incluyen 3 bloques: medida de tensión, medida de intensidad y posición de los contactos de los relés. En todos los casos hay que tener en cuenta que para poder inyectar la señales como una entradas a la placa de control es necesario convertirlas para obtener señales cuyo valor eficaz oscile se encuentre en el intervalo de 0-5 V, que es el rango que admite el Arduino para su correcto funcionamiento. Por ello es necesario diseñar y montar circuitos conversores que lo permitan, tal y como los que se presentan a continuación.

#### 3.3.1.1. Medida de la tensión de entrada

En primer lugar se realizará la medida en tiempo real de la tensión a la entrada del regulador, ya que es la magnitud principal y el objeto de estudio del proyecto. También se podría medir la tensión de salida e implementar un sistema de control realimentado, pero eso dificultaría la instalación de la placa en otros equipos. Como consideración previa conviene indicar que se utilizará siempre un voltímetro de control que permita medir en el rango de 230 V, tal y como se indicaba en las figuras 6 y 8.

La tensión medida será el parámetro que determine la actuación o no de los relés, de acuerdo con dos criterios que se explicarán más detalladamente en el módulo de los relés.

Para poder realizar la medida de tensión la primera consideración que se debe hacer es que es necesario tanto reducir el valor de la magnitud medida como realizar una conversión que permita añadir un offset que elimine los valores de tensión negativos (incompatibles con Arduino) y que calcule el valor eficaz de la señal. Para ello se realizarán dos montajes sucesivos:

- Transformador de tensión 230/9 V → permite realizar una primera reducción de la tensión a un valor de unos 9 V, para poder alimentar el circuito divisor de tensión.
- Circuito divisor de tensión → reduce la tensión de forma que el máximo se sitúe en los 5 V, añade un offset que haga corresponder el valor mínimo con el 0 y no con una tensión negativa y convierte la señal para que tener a la salida el valor RMS de la misma. En la Figura 10 se presenta un esquema del divisor de tensión similar al que se va a utilizar y en consonancia con las condiciones que se han explicado.

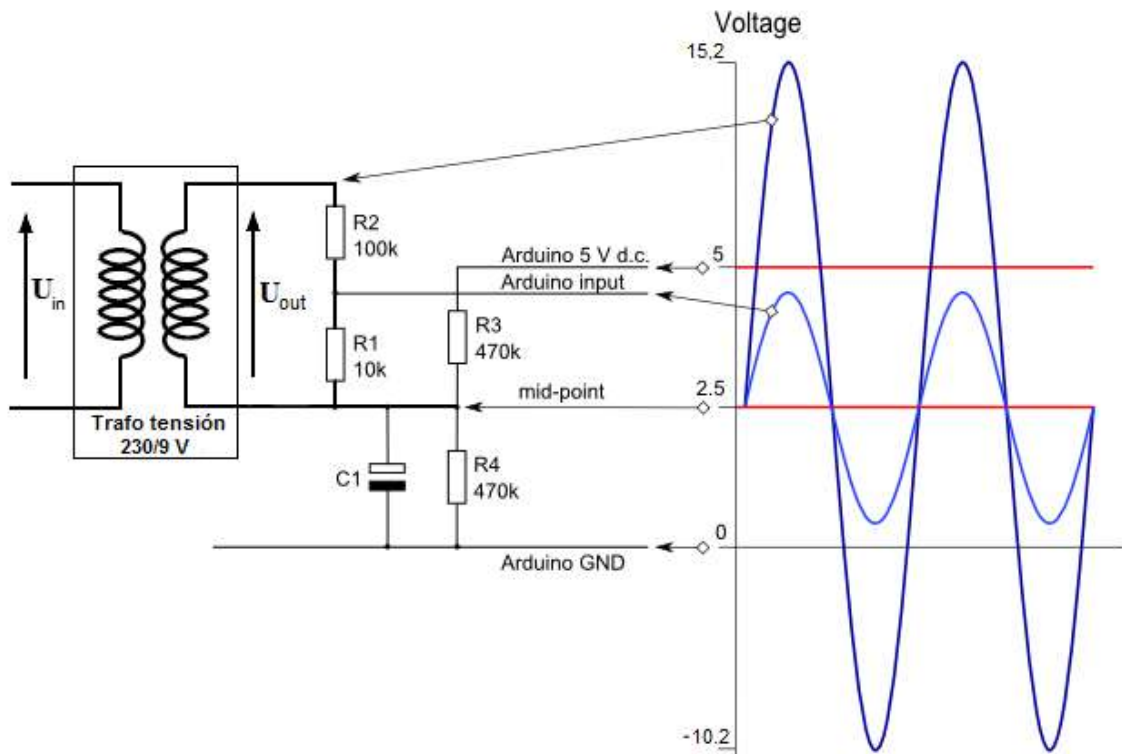


Figura 10: Esquema del circuito de medida de tensión.

Teniendo en cuenta que la tensión de salida será de unos 9 V, la tensión de pico será igual a:

$$U_{out\_pico} = 9 V * \sqrt{2} \approx 12,7 V \quad (1)$$

Sin embargo, debido a las tensiones Si se toma la alimentación de Arduino de 5 V d.c. se conseguiría una componente de continua (offset) cuyo punto medio es de 2'5 V, por lo que:

$$U_{out\_max} = 12,7 V + 2,5 V = 15,2 V \quad (2)$$

$$U_{out\_min} = -12,7 V + 2,5 V = -10,2 V \quad (3)$$

Las resistencias R1 y R2 conforman el divisor de tensión que reduce los 9 V de salida. Dichas resistencias deben elegirse de forma que se obtenga una tensión cuyo valor de pico a la salida sea aproximadamente 1 o 1'5 V (de esta forma la señal con offset oscilaría entre valores extremos de 1 y 4 V si se toma la alimentación de 5 V y entre 0,15 y 3,15 V si se toma la alimentación de 3'3 V, dejando un margen de seguridad para no sobrepasar los límites de



la placa). Para ello se toman dos resistencias de 10k y 100k, respectivamente, con lo que se consigue una tensión de pico de 1'15 V.

$$U_{R1\_AC} = \frac{R1}{R1 + R2} * U_{out\_pico} = \frac{10k}{10k + 100k} * 12,7 V = 1,15 V \quad (4)$$

Las resistencias R3 y R4 se utilizan para conseguir el offset que evite una entrada de tensión negativa en el pin de entrada de la placa de Arduino. Dicha componente de continua debe hacer coincidir el cero de la señal de alterna medida coincida con el punto medio de la corriente de continua de alimentación de la placa. Para ello ambas resistencias deben de ser iguales. Con el software que se va a utilizar en la medida resulta importante que la corriente que circula por ellas sea pequeña, por lo que se toma un valor alto, de 470k, para ambas resistencias.

Así pues, añadiendo este efecto del offset se obtiene que:

$$U_{input\_max} = 2,5 + 1,15 V = 3,65 V \quad (5)$$

$$U_{input\_min} = 2,5 V - 1,15 V = 1,35 V \quad (6)$$

Además los valores de R1 y R2 también serían válidos para la alimentación de 3,3 V d.c., dando un pico máximo de 2,8 V y un pico mínimo de 0,5 V.

El condensador C1 se emplea únicamente como medida de seguridad, para que la señal alterna tenga un camino de baja impedancia a tierra. En este caso se toma un condensador de 4.7μF de capacidad y 63 V.

Por último, conviene señalar que este margen de valores permite asumir también los errores por las tolerancias y el efecto del trafo de 230/9 V trabajando en vacío [W7].

### 3.3.1.2. Medida de la intensidad de salida

A continuación se realizará de forma análoga la medida de la intensidad a la salida. La medida de la intensidad de salida resulta de interés por dos motivos diferentes:

- En primer lugar se utilizará para determinar el momento de la actuación de los relés en los reguladores que alimentan grandes cargas. Dicha actuación viene determinada por las dos condiciones

que se explican en el módulo correspondiente (módulo de los relés). Sin embargo, en sistemas de mucha potencia, la actuación no se produce de forma instantánea al cumplirse las condiciones sino que se espera a que el valor de la intensidad sea nulo para que se produzca. Este sistema evita problemas de estabilidad y es el principal motivo por el que se realiza esta medida.

- En segundo lugar, se plantea la ventaja de poder informar al cliente no sólo de la tensión sino también de la intensidad de salida. Dicho parámetro permite además calcular el ángulo  $\varphi$  y las potencias, tal y como se explica posteriormente en el apartado de cálculos, lo que también puede resultar de interés para el cliente.

Para realizar la medida de la intensidad hay que tener en cuenta que el equipo cuenta con un transformador de intensidad 75/1 A que ya está acoplado. Por tanto la intensidad se medirá siempre a partir de la intensidad de salida del secundario de dicho transformador, donde se espera una intensidad máxima de aproximadamente 1 A (y en condiciones normales será mucho menor).

Para poder inyectar la señal en la placa de control es necesario utilizar un circuito conversor como el que se muestra en la Figura 11 gracias al cual se consigue obtener una señal analógica del orden de 0-5 V, compatible con las entradas de la placa de control.

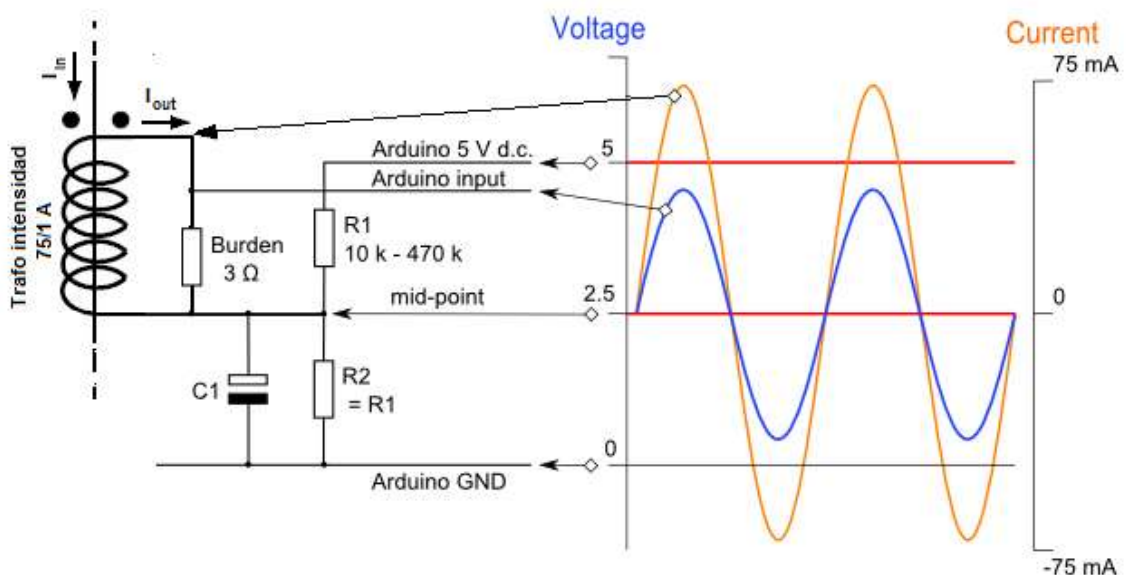


Figura 11: Circuito de medida de intensidad.



En este caso para calcular los valores del circuito se ha partido del caso límite, es decir, de una intensidad de salida del secundario de 1 A. De acuerdo con este criterio la intensidad máxima de pico será:

$$I_{out\_pico} = 1 A * \sqrt{2} \approx 1,41 A \quad (7)$$

Si se mantiene un procedimiento análogo a lo que se ha especificado para la medida de tensión, se escoge una resistencia de carga (Burden) cuya caída de tensión inferior a los 2'5 V para el caso de intensidad límite, esto es:

$$R_{Burden} \geq \frac{2,5 V}{1,41 A} = 1,77 \Omega \quad (8)$$

Al igual que antes, las resistencias que se utilizan para conseguir el offset que evite una entrada de tensión negativa en el pin de entrada de la placa de Arduino (en este caso R1 y R2) deben de ser iguales. Por tanto, siguiendo el mismo criterio se escoge de nuevo un valor para ambas de 470k.

#### Cálculo del valor RMS

Dentro de las medidas también hay que tener en cuenta que para que las señales sean entradas del Arduino se requiere además calcular su valor eficaz. Esto es posible gracias a los circuitos mostrados anteriormente (ver figuras 5 y 6), con los cuales obtenemos señales cuyo valor eficaz es del orden de 0-5 V, tal y como se ha señalado anteriormente, lo que permite que las señales puedan inyectarse como entradas en la placa de control. A partir de dichas señales es posible calcular:

- Desfase entre ambas señales (ángulo  $\varphi$ ).
- Potencias.

Una vez calculados estos datos el circuito eléctrico queda perfectamente definido y se permite que el código disponga de estos parámetros, de forma que puedan ser almacenados y/o utilizados en los cálculos si fuera necesario.

#### 3.3.1.3. Posición de los contactos de los relés

Por último, resulta imprescindible incluir como entradas de la placa de control la posición de los contactos de los relés en tiempo real. El código determina en cada caso que posición es necesaria en cada relé en función de la compensación requerida. Pero hay que tener en cuenta que para decidir si

los relés deben actuar o no es necesario saber primero la posición de los mismos para que el código determine si es necesaria la actuación o si debe mantenerse la posición.

Para conocer la posición de los relés en tiempo real se utilizarán los contactos auxiliares de los mismos, cuya señal todo/nada en cada caso será la entrada correspondiente a la placa de control. Para ello se realizará un montaje para cada uno de los tres relés como el que se muestra a continuación (Figura 12).

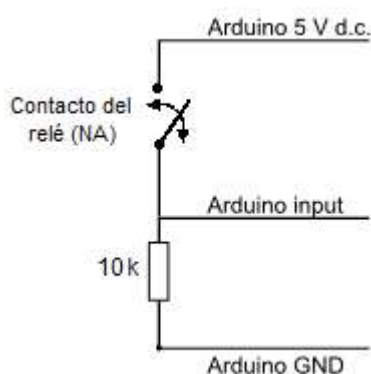


Figura 12: Medida de la posición de los relés.

En este caso la resistencia sólo se utiliza de forma auxiliar para que pueda caer en ella la tensión de alimentación de Arduino y conectar con la tierra. Por tanto, su valor no tiene demasiada importancia, únicamente se trata de una resistencia auxiliar por donde se disipe la potencia. En cualquier caso siempre es preferible un valor razonablemente elevado para que la corriente sea pequeña, por lo que se elige un valor estándar como es 10k.

### 3.3.2. Módulo de actuación de los relés

Como ya se ha explicado anteriormente, en el sistema de control se utilizarán un total de tres relés, que se corresponden con los tres contactos que forman el regulador (tal y como se observa en la Figura 7). Además ya se ha explicado que para el control se requiere que los relés dispongan de contactos auxiliares que permitan conocer en tiempo real su posición (abierto/cerrado) lo que se ha considerado como una parte del circuito de medida (al tratarse de magnitudes de entrada a la placa de control).

Lo que a continuación se describe será por tanto lo relativo a la actuación de los relés, así como los contactos a través de los cuales se controlarán, decidiendo su posición desde la placa de control. Como ya se ha indicado anteriormente la



actuación de los relés se programará para dos supuestos y se producirá en el primer paso por cero de la señal de intensidad a partir del cumplimiento de cualquiera de los dos:

- Sobretensión o caída de tensión moderadas de duración superior a cinco segundos.
- Sobretensión o caída de tensión bruscas (actuación inmediata).

Teniendo en cuenta estos dos supuestos resulta imprescindible definir los valores de tensiones correspondientes a cada uno de los supuestos. Para ello, y teniendo en cuenta la normativa (UNE-EN 50-160), se definen en primer lugar los límites de tensión admisibles dentro del  $\pm 7\%$  que indica la ley. De acuerdo con esta norma los límites inferior y superior quedan definidos como 246'1 V y 213'9 V respectivamente.

A continuación, se realiza un estudio comparativo de la tensión de salida resultante para cada conexión posible en función de diferentes valores de entrada (Tabla 3). A partir de esta tabla se determina qué conexión resulta más adecuada para cada tensión de entrada así como cuál será el valor límite que diferencie los intervalos de actuación en el caso 1 (duración superior a 5 segundos), y la toma correspondiente a dichos valores límite (tal y como aparece señalado en la propia tabla). Todos los valores de la tabla corresponden a una tensión medida en V.

	Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
190	157,0	173,5	190	206,5	223,0
192	158,6	175,3	192	208,7	225,4
194	160,3	177,1	194	210,9	227,7
196	161,9	179,0	196	213,0	230,1
198	163,6	180,8	198	215,2	232,4
200	165,2	182,6	200	217,4	234,8
202	166,9	184,4	202	219,6	237,1
203	167,7	185,3	203	220,7	238,3
204	168,5	186,3	204	221,7	239,5
206	170,2	188,1	206	223,9	241,8
208	171,8	189,9	208	226,1	244,2
210	173,5	191,7	210	228,3	246,5
212	175,1	193,6	212	230,4	248,9
214	176,8	195,4	214	232,6	251,2
216	178,4	197,2	216	234,8	253,6
218	180,1	199,0	218	237,0	255,9



220	181,7	200,9	220	239,1	258,3
221	182,6	201,8	221	240,2	259,4
222	183,4	202,7	222	241,3	260,6
224	185,0	204,5	224	243,5	263,0
226	186,7	206,3	226	245,7	265,3
228	188,3	208,2	228	247,8	267,7
230	190,0	210,0	230	250,0	270,0
232	191,7	211,8	232	252,2	272,3
234	193,3	213,7	234	254,3	274,7
236	195,0	215,5	236	256,5	277,0
238	196,6	217,3	238	258,7	279,4
240	198,3	219,1	240	260,9	281,7
241	199,1	220,0	241	262,0	282,9
242	199,9	221,0	242	263,0	284,1
244	201,6	222,8	244	265,2	286,4
246	203,2	224,6	246	267,4	288,8
248	204,9	226,4	248	269,6	291,1
250	206,5	228,3	250	271,7	293,5
252	208,2	230,1	252	273,9	295,8
254	209,8	231,9	254	276,1	298,2
256	211,5	233,7	256	278,3	300,5
258	213,1	235,6	258	280,4	302,9
260	214,8	237,4	260	282,6	305,2
262	216,4	239,2	262	284,8	307,6
264	218,1	241,0	264	287,0	309,9
265	218,9	242,0	265	288,0	311,1
266	219,7	242,9	266	289,1	312,3
268	221,4	244,7	268	291,3	314,6
270	223,0	246,5	270	293,5	317,0

Tabla 3: Tensión de salida para cada toma para posibles tensiones de entrada.

A partir de esta tabla quedan definidos los intervalos de actuación para un tiempo superior a cinco segundos a partir de los valores límite señalados (tal y como se ha explicado anteriormente). A continuación, se establecen los valores de actuación instantánea a partir de la ampliación de los intervalos de actuación anteriores, quedando definido el sistema completo de actuación en la Tabla 4. En dicha tabla se muestran también la posición correspondiente de los tres contactos, que es lo que se utilizará a la hora de programar la actuación. Asimismo, se debe tener en cuenta que la actuación en cualquier caso siempre se producirá en el





primer paso por cero de la señal de intensidad y no de forma inmediata, tal y como se ha explicado en el apartado 3.3.1.2.

Toma	Nivel de compensación de tensión	Relación de transformación	Actuación en $t > 5$ s	Actuación instantánea	Posición de los contactos		
					C1	C2	C3
1	- 40 V	190/230	$U \geq 265$ V	$U \geq 297$ V	C	C	C
2	- 20 V	210/230	$U < 265$ V $U \geq 241$ V	$U < 297$ V $U \geq 265$ V	C	A	C
3	0 V	1	$U < 241$ V $U \geq 221$ V	–	A	A	A
4	+ 20 V	250/230	$U < 221$ V $U \geq 204$ V	$U < 204$ V $U \geq 183$ V	C	A	A
5	+ 40 V	270/230	$U < 204$ V	$U < 183$ V	C	C	A

Tabla 4: Actuación de los relés y posición de los contactos correspondiente.

Para el control de los relés se utilizará una placa de control de relés para Arduino. En dicha placa se requieren un mínimo de tres contactos, uno para cada uno de los relés que se quieren accionar. En el capítulo 4, sección 4.3, se presenta la placa Arduino Shield V2, con hasta cuatro posibles contactos, que fue la que finalmente se decidió utilizar en el montaje.

Para llevar a cabo la actuación se debe alimentar los relés a tensión de red (220-230 V), interponiendo el contacto normalmente abierto de la placa de relés entre los contactos A1 y A2 de los relés. De esta forma, cuando se dé la orden de cierre desde la placa de control los relés serán accionados. El montaje descrito se corresponde con el que se muestra a continuación (Figura 13) y será el mismo en cada uno de los tres relés. Al existir hasta 4 contactos en la placa de control de relés hay espacio para los tres, quedando libre uno de ellos.

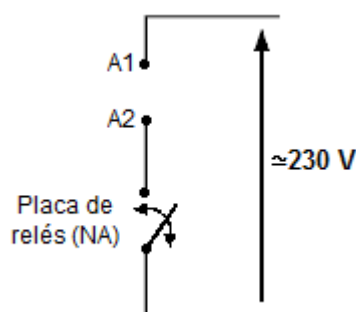


Figura 13: Esquema de accionamiento de los relés.

### 3.3.3. *Módulo de control completo con Arduino*

Este módulo constituye la parte principal de sistema de control. En el proyecto se utilizará una placa de Arduino Mega 2560, como ya se ha comentado, similar a la que se presenta a continuación (Figura 14). Los motivos de elegir una placa del tipo Mega respecto a otros modelos más comunes, como Arduino Uno son principalmente que la placa Arduino Mega es más potente, tiene un mayor número de entradas y salidas (hasta un total de 54 pines de entrada/salida digitales y 16 entradas analógicas) y, sobre todo, una memoria Flash mucho mayor (256 kB frente a 32 kB), lo que permite registrar un mayor número de datos y, por tanto, dar una mayor fiabilidad en las medidas de cara al cálculo de los valores RMS de la tensión y la intensidad.



Figura 14: Placa de control Arduino Mega 2560, semejante a la utilizada.

Esta placa base será el nexo de unión entre el regulador y el código y a ella irán conectadas las entradas y salidas del circuito, así como las entradas y salidas que conectan con el ordenador. El sistema de control será llevado a cabo a través de un código informatizado implementado con Arduino. Dicho código recibirá las señales de entrada (tensión medida, posición de los contactos) y a partir de la tensión de referencia y en los datos recibidos mandará la orden a los relés. El proceso se repetirá en intervalos de 1 ms, como ya se comentó al principio.

A continuación se incluye el circuito completo de Arduino, con las correspondientes entradas y salidas a las que se han hecho referencia en los distintos módulos, asociadas a sus pines correspondientes de entrada y salida según corresponde en cada caso (Figura 15). Hay que tener en cuenta que las conexiones de salida se hacen a través de la placa de los relés, por lo que los pines

de salida que se muestran en la figura son los correspondientes a cada uno de los contactos utilizados en dicha placa.

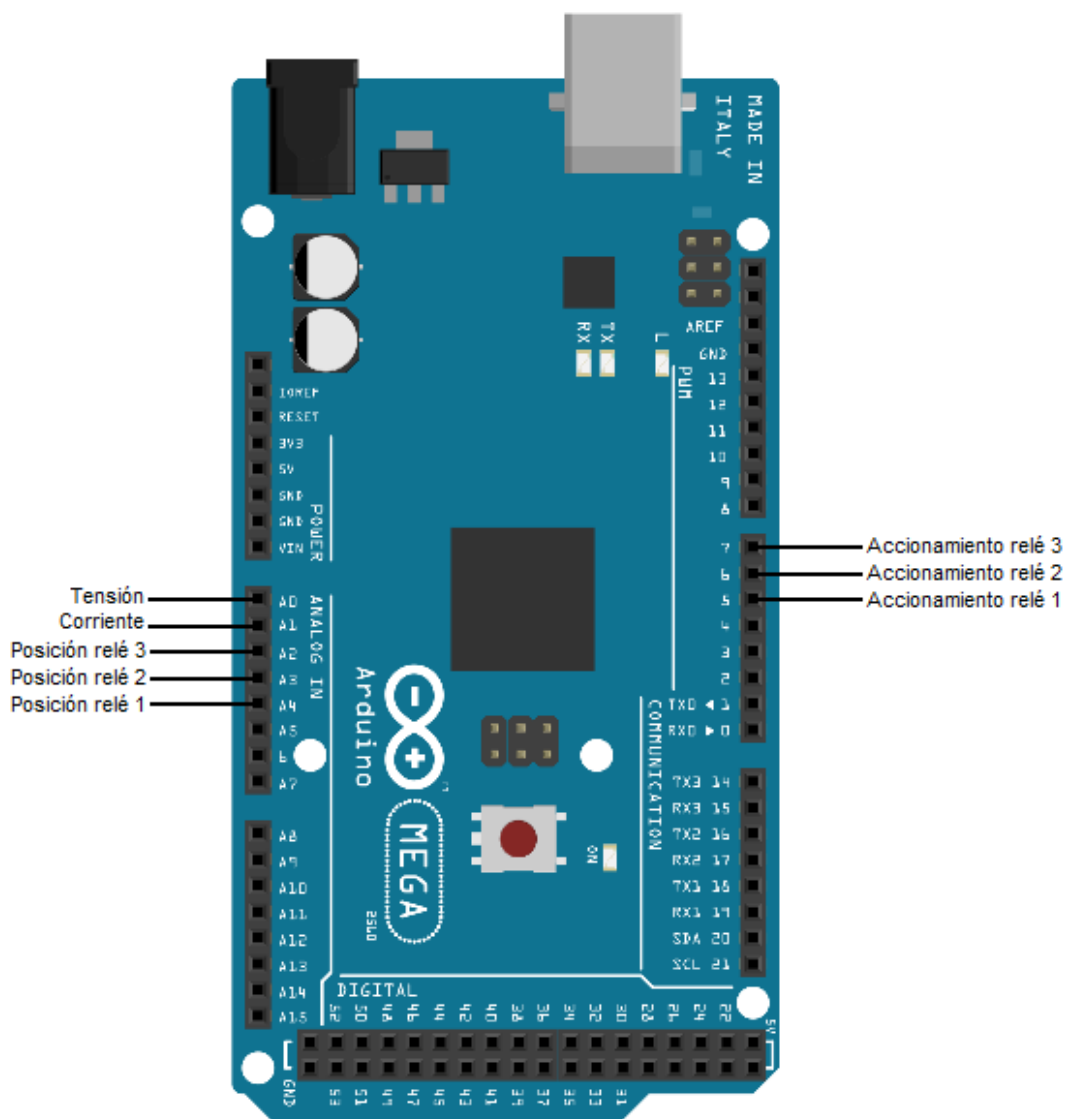


Figura 15: Esquema de entradas y salidas de la placa de Arduino Mega.



# 4. CARACTERÍSTICAS DEL HARDWARE DEL SISTEMA DE CONTROL

---



## 4.1. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO Y ENSAYOS

La construcción física del sistema de control se realizará de acuerdo a las especificaciones técnicas dadas en la sección 3. El montaje se realiza de forma progresiva, construyendo cada módulo por separado de acuerdo con la descripción, en una placa de prototipos como la que se muestra en la Figura 16. Dicha placa será la que se utilice durante toda la fase de montaje y los ensayos del laboratorio [12].

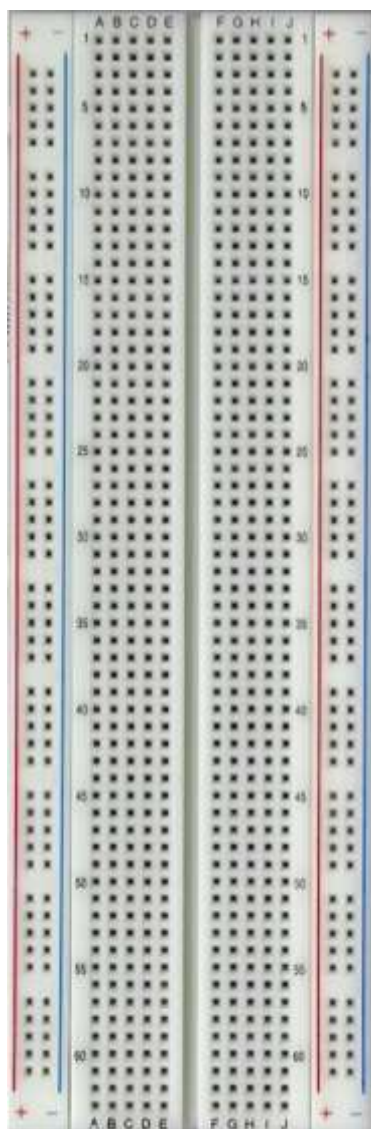


Figura 16: Placa de prototipos usada para el montaje y los ensayos.

Para realizar el montaje de cada uno de los módulos se tomará como criterio que en los nodos de conexión situados a la izquierda del canal central se conectarán las señales de entrada del regulador de tensión, mientras que los nodos de conexión derechos se conectarán a las entradas de la placa de control de Arduino Mega. En el bus de



alimentación izquierda se alimentará la tensión de salida del regulador, mientras que en el bus de alimentación derecha se alimentarán los terminales positivo y negativo con los 5 V y la tierra (GND) de la placa de Arduino, respectivamente.

A la hora de realizar el montaje todos los cables auxiliares utilizados (posición de los relés y montaje de los circuitos de medida) serán de cobre estañado de mínima sección. Las conexiones que alimenten los relés para su posterior accionamiento serán de hilo de cobre trenzado de 1'5 mm de sección.

Por último, en las siguientes secciones se detallarán las características técnicas de algunos de los elementos destacados del montaje del sistema de control, de acuerdo con los criterios que se especificaron en la descripción técnica. Para todos los demás elementos se tendrán en cuenta las consideraciones dadas en las Especificaciones Técnicas, tal y como ya se ha comentado.



## 4.2. MÓDULO DE MEDIDA

### 4.2.1. Medida de la tensión

Tal y como se especificó en el capítulo 3, sección 3.3.1.1, en la medida de la tensión de entrada se utilizará un transformador de 230/9 V para realizar una primera reducción de tensión que alimente al circuito divisor de tensión con offset. El transformador utilizado será el modelo VB1.5/2/9 del fabricante Block, presentado en la Figura 17.



Figura 17: Transformador de tensión VB1.5/2/9- Block.

Se trata de un modelo sin SVHC, cuyas características técnicas se detallan a continuación en la Tabla 5.

Características del transformador VB1.5/2/9 de Block	
Tensiones primarias	1 x 230 V
Tensiones del secundario	2 x 9 V
Potencia nominal	1.5 VA
Anchura externa	27.3 mm
Diámetro del pin	0.8 mm
Espaciado del cable	5 mm
Espaciado, paso	20mm
Espaciamiento del Orificio - Longitud	20 mm
Longitud / Altura externa	32.3 mm
Longitud del pin	5 mm
Profundidad externa	23.8 mm

Tabla 5: Características del transformador de tensión VB1.5/2/9 de Block.

### 4.3. PLACA DE ACTUACIÓN DE LOS RELÉS

Para llevar a cabo el accionamiento de los relés se utilizará una placa de control de relés para Arduino como la que se presenta a continuación en la Figura 18. Dicha placa, que permite hasta cuatro contactos, se conectará sobre la placa base y a ella se conectarán los contactos auxiliares de los relés, que serán los que indiquen en cada instante la posición de los mismos, tal y como se ha comentado.



Figura 18: Placa de control de relés con Arduino (de hasta 4 contactos).

Al tener un total de cuatro contactos permite el accionamiento de todos los relés, quedando un tercer contacto libre. Las características técnicas de esta placa se detallan a continuación en la Tabla 6.

Arduino Relay Shield V2.0 - Specification			
Características	Mínimo	Típico	Máximo
Tensión	4.75 V	5 V	5.25 V
Corriente	8 mA	-	250 mA
Tensión de conmutación	-	-	35 V <sub>DC</sub>
Corriente de conmutación	-	-	8:00 AM
Potencia de conmutación	-	1 Hz	-
Frecuencia	-	-	70W
Vida del relé	100.000 ciclos		
ESD descarga en contacto	±4 kV		
ESD descarga en aire	±8		
Dimensiones	68.7 x 53.5 x 30.8 mm		
Peso neto	55 ± 2 g		

Tabla 6: Especificaciones del Arduino Relay Shield V2.0.





## 4.4. PLACA DE ARDUINO

Tal y como se comentó en la sección 3.3.3 la placa utilizada en el sistema de control es la Arduino Mega 2560. Aunque muchas de las características técnicas ya se comentaron en la parte de diseño, en la Tabla 7 se incluye un resumen de todas ellas.

Arduino Mega 2560 R3 - Summary	
Microcontrolador	ATmega2560
Tensión Nominal	5V
Tensiones de entrada recomendadas	7-12V
Tensiones de entrada límite	6-20V
Pins digitales E/S	54 (15 proporcionan salidas PWM)
Pins digitales de entrada	16
Corriente DC por pin E/S	40mA
Corriente DC por pin 3.3V	50mA
Memoria Flash	256KB (8KB empleados en el cargador)
SRAM	8KB
EEPROM	4KB
Velocidad del procesador	16MHz

Tabla 7: Resumen de las características técnicas de la placa de Arduino Mega 2560.

## 4.5. MONTAJE DEFINITIVO

Una vez terminado en montaje de todos módulos en la placa de prototipos y una vez que se compruebe que el equipo funciona satisfactoriamente, de acuerdo con lo especificado, se implantará todo el montaje en una placa de montaje de Arduino como la que se muestra en la Figura 19 [W8].

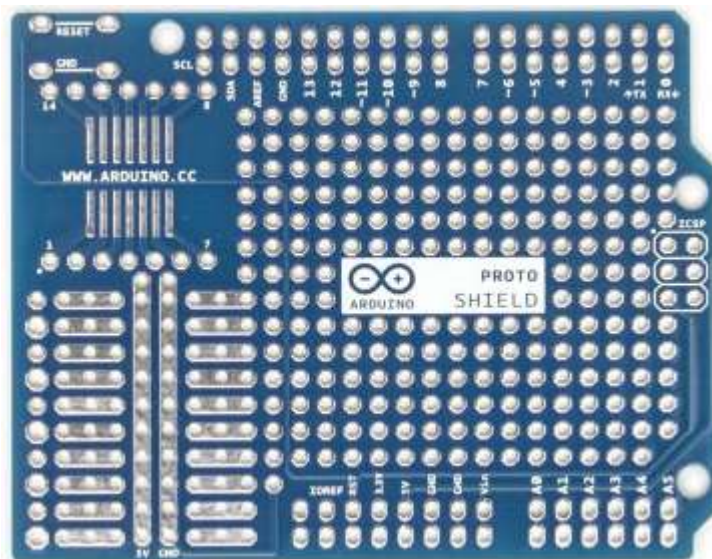


Figura 19: Arduino Proto Shield Rev 3.

Las características adicionales de los pines de esta placa se detallan en la Tabla 8.

Arduino Proto Shield- Summary	
1.0	Arduino pinout
1	Reset button
1	ICSP connector
14	pin SMD footprint (50 mils pitch)
20	pin Through Hole footprint (100 mils pitch)

Tabla 8: Características de los pines del Shield de montaje.

Una vez realizado el montaje definitivo se fijarán todas las partes mediante soldadura, de forma que no quede ningún elemento móvil en el sistema de control. Asimismo, resulta igual de importante que las entradas y salidas que conectan con el regulador queden igualmente fijas. Finalmente el Proto Shield se conectará con la placa base de Arduino Mega, quedando fijado el montaje definitivo como un único bloque sin partes móviles.



# 5. DISEÑO DEL SOFTWARE DEL SISTEMA DE CONTROL

---



## 5.1. CONSIDERACIONES PREVIAS

El software del sistema de control hace referencia al código fuente que rige el comportamiento del mismo, que será programado íntegramente con Arduino, tal y como se indicó en la sección 1.5. El código completo se incluye en el apartado 10.1 como un Anexo, pero en esta sección se indicarán los principios que se han llevado a cabo para programarlo y se incluirán algunas de sus partes.

Al igual que el Hardware, el código se divide por partes de acuerdo con cada uno de los módulos descritos y en coherencia con las fases de trabajo.



## 5.2. MEDIDA DE TENSION Y CORRIENTE

Aunque a la hora de realizar el montaje se trabajó con ambos módulos por separado y se realizaron los ensayos de ambas medidas de forma diferenciada y en dos fases distintas, el código que se utilizó en ambos casos es el mismo [W9]. Dicho código se basa en la librería EmonLib, que puede ser descargada de forma gratuita [W10].

A continuación se incluye el extracto del código utilizado en la medida. Dicho código requiere un sistema de calibración, que se detalla a continuación.

Código fuente: Llamada a la librería 'EmonLib'

```
#include <EmonLib.h>

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

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

  emon1.voltage(0, 159, 0); // Voltage: input pin, calibration, phase_shift
  emon1.current(1, 111.1); // Current: input pin, calibration.
}

void loop()
{
  //emon1.calcVI(20,50); // Calculate all. No.of crossings, time-out
  //emon1.serialprint(); // Print out all variables
}
```

### 5.2.1. Calibración

La calibración se llevará a cabo de acuerdo con lo especificado en [W11].



### 5.3. MEDIDA DE LA POSICIÓN DE LOS RELÉS

La medida de la posición relés se implementará con una función tipo void, en la cual se incluirán como variables no enteras las tres entradas correspondientes a la tensión en los contactos auxiliares de los relés. Dicha tensión será casi nula (puede no ser nula del todo en función de resistencias parásitas en el circuito de medida de la posición de los relés) o de 5 V, en función de la posición del relé.

En los ensayos, se comprobó experimentalmente que la posición de cierre de los relés, en la cual la entrada medida será de 5 V, se corresponde a un valor medido algo superior a 1000. Asimismo, la posición de abierto de los relés correspondía a una lectura siempre inferior a 300 (y típicamente nula). Dichas lecturas no requieren ser calibradas, ya que no interesa el valor exacto sino únicamente la posición. Por tanto, se puede considerar que las entradas son todo/nada y por ello se toma un valor intermedio de 500. Si la lectura es inferior a este valor el relé correspondiente estará accionado, mientras que si es superior el contacto estará abierto.

Dicha condición se implementa en Arduino a través de estructuras de control condicionadas tipo if para cada uno de los tres relés, incluyendo un Serial.print en cada una de las condiciones especificando si el relé está abierto o cerrado.

A continuación se incluye la parte del código correspondiente a dicha función, donde se puede comprobar además que se han incluido dos funciones temporales tipo delay de 100 ms cada una, una al principio y otra al final. Esto se debe a que la función se llamará cada vez que se accione un nuevo nivel de compensación, por lo que es conveniente esperar unos instantes para dar tiempo a que la tensión en los contactos auxiliares varíe y la medida sea la correcta.

#### Código fuente: Función 'Posición'

```
void Posicion(){
  delay(100);
  float ten1=analogRead(2);
  float ten2=analogRead(3);
  float ten3=analogRead(4);

  Serial.println("La posicion de los rele es: ");
  Serial.print(" -Rele 1: ");
  if(ten3>500){
    Serial.println("Abierto");
  }else if(ten3<500){
```



```
    Serial.println("Cerrado");
}

Serial.print(" -Rele 2: ");
if(ten2>500){
    Serial.println("Abierto");
}else if(ten2<500){
    Serial.println("Cerrado");
}

Serial.print(" -Rele 3: ");
if(ten1>500){
    Serial.println("Abierto");
}else if(ten1<500){
    Serial.println("Cerrado");
}

Serial.println("_____");
//delay(100);
}
```



## 5.4. IDENTIFICACIÓN DEL NIVEL DE COMPENSACIÓN

A partir de las posiciones de los relés se puede determinar el punto de compensación en tiempo real. Para ello se implementará una función cuya ejecución devolverá una magnitud entera (función tipo int), cuyo valor será el punto de compensación (numerado del 1 al 5, conforme con las condiciones especificadas). En caso de no encontrar coincidencia con ninguno de los niveles de compensación definidos se devolverá un 0, correspondiente al valor de inicialización de la función, que además puede servir a la placa de control (y por consecuencia a un posible operador/cliente) para identificar la presencia de un error en el regulador o en el hardware.

Para la implementación de esta función se seguirá un proceso análogo al anterior, incluyendo una función temporal tipo delay de 100 ms al comienzo, realizando la medida de las tres tensiones después y estableciendo las estructuras de control tipo if en la parte central de la función. En este caso, sin embargo, las condiciones que se establecen afectan simultáneamente a las tres tensiones medidas, de forma que para que el valor devuelto (res) se actualice con alguna de las posiciones de interés (1-5), se debe cumplir que las tres tensiones medidas correspondan simultáneamente con lo especificado. Esto se implementará de igual manera que en la función 'Posición', comprobando si el valor de cada una de las tres lecturas es superior o inferior a 500 según corresponda.

A continuación se muestra la parte del código correspondiente a esta función.

Código fuente: Función 'MedComp'

```
int MedComp(){
    delay(100);
    float ten1=analogRead(2);
    float ten2=analogRead(3);
    float ten3=analogRead(4);

    int res=0;

    if(ten1<500 && ten2<500 && ten3<500){
        res=1;
    }

    if(ten1<500 && ten2>500 && ten3<500){
        res=2;
    }
}
```





```
if(ten1>500 && ten2>500 && ten3>500){  
    res=3;  
}  
  
if(ten1>500 && ten2>500 && ten3<500){  
    res=4;  
}  
  
if(ten1>500 && ten2<500 && ten3<500){  
    res=5;  
}  
  
return res;  
}
```



## 5.5. ACTUACIÓN DE LOS RELÉS

La actuación de los contactores constituye el módulo central del proyecto y, en consecuencia, también del software. Para programarla se distinguen tres partes: programación para la implementación de cada uno de los niveles de compensación, actuación instantánea y actuación temporizada. A continuación se detallan cada una de las partes, incluyendo un extracto del código y los criterios de programación de las mismas.

### 5.5.1. *Niveles de compensación*

Para ejecutar la actuación de los relés de acuerdo con lo especificado en cada uno de los escalones de compensación se definirán cinco funciones de tipo void, una para cada uno de los niveles. Dichas funciones se llamarán de acuerdo con los criterios de actuación que se definen en los siguientes apartados.

En cada una de las funciones se incluirán tres partes. En primer lugar un Serial.print en el que se especifica el nivel de compensación que se va a ejecutar. La segunda parte es la actuación en sí misma, actuando las salidas correspondientes de la placa de relés conforme al escalón de compensación que se desea ejecutar. Para ello, en todos los niveles se repetirá el mismo proceso de maniobra, dividido en tres fases:

1. Apertura del contactor principal (by-pass). Esto permite maniobrar los otros dos contactores de forma más segura y sin tensión.
2. Maniobra de los contactores secundarios, que son los que determinan, respectivamente, la magnitud de compensación y la polaridad.
3. Cierre del contactor principal para que el escalón de compensación definido se active. Este punto sólo será diferente en el tercer nivel (compensación nula), ya que al no haber compensación los tres contactores permanecerán abiertos.

Las tres fases se separan temporalmente por dos funciones temporal tipo delay que darán un retraso 1 segundo cada una para que las maniobras se realicen dando tiempo a los contactos a cambiar la posición sin riesgos.

Por último, la tercera parte de las funciones será la llamada, a su vez, de la función posición (definida en el apartado 5.3). Con esta llamada se comprobará la posición de los contactos para asegurar que se ajusta con la actuación especificada.

A continuación se muestra un extracto del código fuente, correspondiente a la primera de las cinco funciones de compensación. Dicha función servirá de ejemplo



de los criterios de programación descritos, ya que la actuación se realiza de forma análoga en todos los casos (como ya se ha explicado, el único punto diferente es el tercero, en el que el contactor principal permanece abierto al no haber compensación. Sin embargo, el criterio de programación no varía y la función se implementa sin tener esto en cuenta, para dar uniformidad al código fuente y definir una actuación en bloque).

Código fuente: Función 'Comp1'

```
void Comp1(){
  Serial.println("\nNivel de compensacion 1");
  digitalWrite(5,LOW);
  delay(1000);
  digitalWrite(6,HIGH);
  digitalWrite(7,HIGH);
  delay(1000);
  digitalWrite(5,HIGH);
  Posicion();
}
```

### 5.5.2. Actuación instantánea

Conforme con lo especificado en el apartado 3.3.2 se establecen dos criterios de actuación: actuación instantánea y actuación temporizada. La actuación instantánea se programa a través de una función tipo void a la que se le da el nombre de 'Ins'. En dicha función se define en primer lugar la variable auxiliar entera (variable tipo int) 'nivel', que será el resultado de la función 'MedComp' definida en el apartado 5.4.

En segundo lugar se realiza una medida de tensión de acuerdo conforme a lo descrito en el apartado 5.2. Por último, se implementan las condiciones de actuación descritas en la Tabla 4 por medio de estructuras de control tipo if en las que se comprueban dichos requisitos de actuación. En dichas estructuras tipo if se incluirá también una condición simultánea para verificar que el regulador no esté ya accionado en el nivel correspondiente. Esto se consigue a través de la variable nivel, descrita anteriormente, mediante una condición de no igualdad.

Una vez establecida las condiciones de cada nivel de actuación conforme se ha descrito, lo que se incluye dentro de cada estructura de control tipo if es una llamada a la función 'Comp' correspondiente, conforme a lo que se ha descrito en



el apartado anterior, acompañada de un retraso temporal de 1 segundo que se consigue mediante una función delay.

A continuación se muestra, a modo de ejemplo, una de las estructuras de control tipo if que se incluyen dentro de la función 'Ins'.

Código fuente: ejemplo de actuación instantánea (escalón de compensación 4)

```
if(emon1.Vrms<204 && emon1.Vrms>=183 && nivel!=4){  
    Comp4();  
    delay(1000);  
}
```

### 5.5.3. Actuación temporizada

Para programar la actuación temporizada se toma de nuevo como criterio lo establecido en la Tabla 4. De acuerdo con las especificaciones dadas, la actuación temporizada se producirá siempre que se la tensión de entrada se encuentre dentro de alguno de los intervalos de actuación definidos durante cada una de las mediciones realizadas a lo largo de un tiempo de 5 segundos.

Para programar este requisito se definirán dos variables enteras auxiliares para cada uno de los escalones de compensación. Dichas variables se denotan respectivamente con las letras k y t, seguidas del número del nivel de compensación en el que se utilizan. Ambas variables se inicializan en cero y servirán como contadores del número de veces que la tensión está dentro del intervalo definido para el nivel de compensación correspondiente y del tiempo, respectivamente.

A través de una estructura en bucle tipo do-while apoyada por los retrasos temporales correspondientes (delays) se realizarán mediciones de tensión cada 100 ms. En cada medición se comprobará si la tensión sigue dentro del intervalo con una estructura de control tipo if y, en caso de cumplirse, se incrementará el contador k en una unidad. Al mismo tiempo, el contador t se incrementará en una unidad en cada iteración del bucle do-while independientemente de lo que ocurra con el contador k. Dicho bucle termina cuando el contador temporal llega a los 5 segundos (t=50) o, evidentemente, cuando la tensión medida sale del intervalo.

Por último, una vez terminado el bucle do-while, se comprueba si la variable k se ha incrementado en cada una de las mediciones mediante otra estructura de control (if). En caso de ser así, se realiza una llamada a la función de actuación del nivel de compensación correspondiente y se impone un retraso temporal de un segundo una vez que se ha producido la actuación.



En este caso, al igual que en la actuación instantánea, se incluye también una variable auxiliar 'nivel' que comprobará el escalón de compensación que está actuando para no entrar en el bucle do-while en caso de estar ya aplicándose el nivel de compensación correspondiente al intervarlo.

A continuación se incluye un ejemplo de actuación temporizada, con toda la estructura de programación descrita.

Código fuente: ejemplo de actuación temporizada (escalón 4)

```
int k4=0;
int t4=0;
nivel=MedComp();

do{
    emon1.calcVI(20,50);

    if(emon1.Vrms<221 && emon1.Vrms>=204){
        delay(50);
        k4++;
    }

    t4++;
}while(emon1.Vrms<221 && emon1.Vrms>=204 && t4<50 && nivel!=4);

if(k4>49){
    Comp4();
    delay(1000);
}
```



# 6. ENSAYOS DE VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

---

## 6.1. CONSIDERACIONES PREVIAS

En primer lugar, es importante especificar que lo que se describe en este capítulo no son todas las pruebas que se han llevado a cabo hasta conseguir un funcionamiento óptimo en el equipo, sino únicamente un breve protocolo, compuesto por tres ensayos, en el que se comprueba el correcto funcionamiento de alguna de las partes del software de control diseñado. Todas las pruebas intermedias que se han realizado se consideran como parte del montaje y la puesta en marcha de la placa, por lo que aquí únicamente se muestran ensayos realizados una vez que se consiguió el comportamiento esperado en el sistema de control.

Los tres ensayos se llevaron a cabo en la propia placa de prototipos, utilizada para el montaje (como se explica en la sección 4.1), tal y como se muestra en la Figura 20.

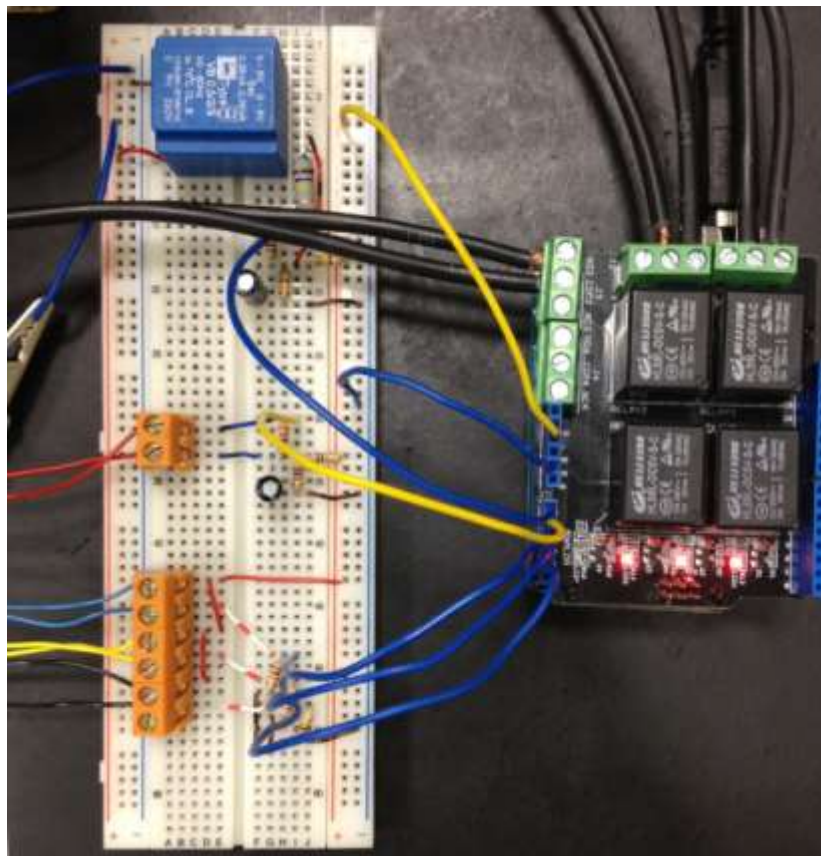


Figura 20: Fotografía de muestra del Protocolo de Ensayos.

Asimismo, conviene señalar que a la hora de realizar el montaje de la placa en el laboratorio no se disponía del regulador de tensión para el que a priori estaba diseñado el proyecto. En su lugar, se trabajó con un elevador de tensión cuyo funcionamiento es análogo al regulador descrito.



Así pues, el elevador de tensión ensayado cuenta con tres cuyas posiciones relativas dan lugar a cinco escalones diferentes de elevación de tensión. Dichas posiciones corresponden exactamente con las descritas en la descripción técnica del equipo, con la única excepción de que en este caso la posición 1 corresponde con el punto de máxima elevación de tensión, seguido por la posición 2; la posición 3 no tiene compensación (al igual que ocurría con el regulador); y las posiciones 4 y 5 corresponden a un nivel de elevación de tensión más pequeño.

Por ello, para realizar los ensayos fue necesario realizar pequeños ajustes en el código, para que la numeración de las posiciones coincidiera con una elevación de tensión creciente y no con el criterio de numeración del regulador inicial. Además, para llevar a cabo un ensayo de actuación razonable (Ensayo 3) se desarrolló un breve código en el cual accionaban cada uno de los escalones de elevación de tensión de forma ordenada a medida que la tensión de entrada se iba reduciendo.

Para realizar este último ensayo así como para una mayor seguridad en los otros dos, se conectó el regulador a red a través de un autotransformador VARIAC, conectado en dos fases, tal y como se muestra en la Figura 21. En los contactos del primario de dicho autotransformador se conectaron las terminales que alimentaban los circuitos de potencia de los relés y en el secundario la entrada de tensión al regulador. Todos los ensayos se realizaron en vacío.

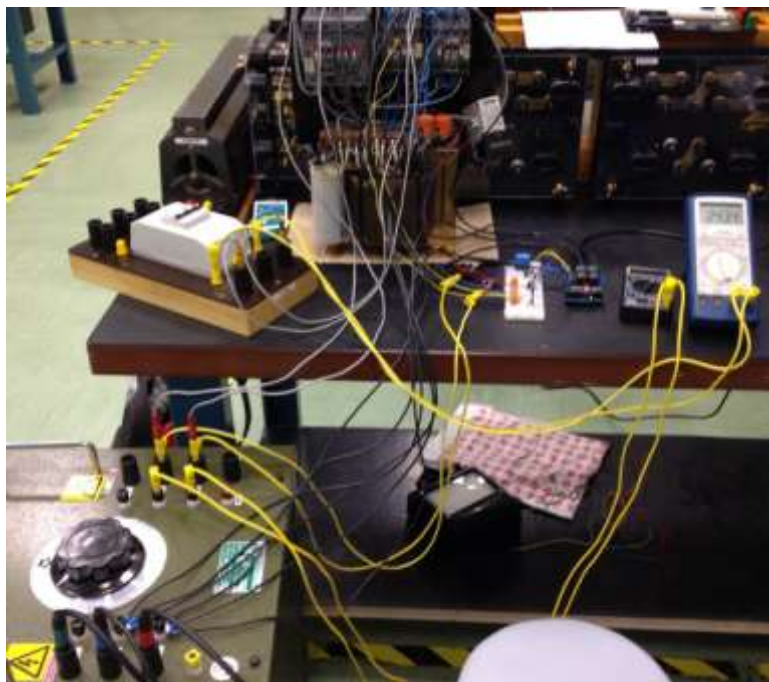


Figura 21: Reseña fotográfica del Ensayo 3.





Por último, se debe tener en cuenta que los scripts obtenidos como consecuencia de la realización de los ensayos no se incluyen en este capítulo para no entorpecer su lectura, sino que se han añadido como anexos en el apartado 10.2. Lo que a continuación se muestra es la descripción de cada ensayo junto con una tabla de resultados.



## 6.2. PROTOCOLO Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

### 6.2.1. Ensayo 1: Posiciones de interés

El objetivo de este ensayo es únicamente comprobar que la posición de los relés se corresponde con lo esperado si se accionan cada uno de los cinco niveles de compensación especificados. Para ello se implementa un código en el cual se llama sucesivamente a cada una de las cinco funciones 'Comp' encargadas de accionar los relés en función de las especificaciones de cada nivel. Entre cada una de ellas se dejará un tiempo prudencial, para lo cual se emplea un retraso temporal tipo delay de 10 segundos.

El ensayo se realiza en vacío y a tensión de entrada nominal (230 V). En la Tabla 9 se muestran los resultados del ensayo, incluyendo la tensión medida a la entrada y a la salida (en vacío), la posición de los relés en cada escalón y el factor de elevación correspondiente. La medida de la tensión de entrada y de salida en cada punto se realizó con un polímetro de 20.000 cuentas.

Escalón de compensación	Factor elevación	Vin [V]	Vout [V]	Posición de los contactos		
				C1	C2	C3
1	1,000	229,9	229,8	A	A	A
2	1,060	229,7	243,5	C	A	A
3	1,098	230,1	252,6	C	C	A
4	1,123	230,4	258,7	C	A	C
5	1,200	230,0	276,1	C	C	C

Tabla 9: Resultados del Ensayo 1.

### 6.2.2. Ensayo 2: Identificación del nivel de compensación

El desarrollo de este ensayo es similar al anterior, aunque en este caso el objetivo es determinar si el programa es capaz de identificar correctamente el nivel de compensación activo a partir de la medida de la posición de los relés. En otras palabras, este ensayo verificará la función 'MedComp' del código fuente, que es de vital importancia para que la actuación funcione correctamente.

El procedimiento de este ensayo es exactamente el mismo que el anterior, sólo que esta vez lo que se comprueba es si el nivel se detecta en lugar de si la posición de los relés es la correcta. Por ello, para la realización de este ensayo es necesario previamente un resultado favorable en el ensayo anterior, ya que si la



actuación a la hora de accionar cada escalón de compensación no es correcta tampoco lo sería la identificación de los mismos a partir de las posiciones medidas.

Para programar el ensayo se parte del código del anterior, pero introduciendo una variable entera (int) a la cual se le dará el valor de la función 'MedComp' después de la actuación de cada función 'Comp'. Una vez realizado basta con introducir un Serial.print a continuación para mostrar la información en pantalla.

En la Tabla 10 se muestra el resultado del ensayo, que en esta ocasión es bastante sencillo.

Escalón de compensación accionado	Escalón de compensación medido
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5

Tabla 10: Resultados del Ensayo 2

### 6.2.3. Ensayo 3: Actuación en función de $V_{in}$

El último ensayo tiene por objetivo comprobar si la placa de control es capaz de funcionar de forma automática a partir de la medida de la tensión de entrada. Como ya se ha comentado en las consideraciones previas (apartado 6.1), a la hora de realizar los ensayos no se pudo disponer del regulador de tensión para el que se especifica el diseño. Por ello, mientras que la implementación de los dos ensayos anteriores no se ve afectada por el cambio, en este caso sí que fue necesario programar un nuevo código para comprobar la actuación. Dicho código no es más que una aplicación de la actuación instantánea ya diseñada, pero trasladada a un elevador de tensión.

Teniendo esto en cuenta es necesario programar un nuevo fragmento de código para desarrollar este ensayo. Dicho código se basa tal y como ya se ha comentado en la actuación instantánea ya diseñada, de forma que en este caso la actuación de cada nivel se produzca al caer la tensión de entrada por debajo de un cierto valor, accionando un punto de mayor compensación cuanto menor es dicha tensión. Con esto se consigue que la tensión a la salida se mantenga cercana a los valores nominales pese a que la tensión de entrada disminuya.



Evidentemente, el ensayo de la actuación sería mucho más completo si se realizara sobre el regulador original. Al tratarse de un ensayo no tiene sentido programar todo un nuevo código solo para comprobar la actuación en todos los casos (instantánea y temporizada) con un nuevo equipo. Pero en cualquier caso el ensayo resulta muy útil para verificar la estructura del código, ya que el procedimiento es exactamente el mismo al cambiar de equipo, bien sea el regulador original, el elevador ensayo o cualquier otro equipo de regulación de tensión cuyo funcionamiento se base en accionar relés que lo controlen.

En cualquier caso, a continuación se muestran los resultados obtenidos en este ensayo (Tabla 11). Al igual que en el ensayo 1 el ensayo se realiza en vacío, pero en esta caso la tensión de entrada se va disminuyendo con el Variac, y es la tensión de salida la que permanece estable en las medidas realizadas en cada nuevo punto. Al igual que antes, en la tabla de resultados se incluyen la tensión medida a la entrada y a la salida medidas en vacío con un polímetro de 20.000 cuentas, la posición de los relés en cada escalón y el factor de elevación correspondiente a cada punto (que, como es lógico, es prácticamente idéntico).

Escalón de compensación	Factor elevación	Vin [V]	Vout [V]	Posición de los contactos		
				C1	C2	C3
1	1,000	229,3	229,2	A	A	A
2	1,061	219,1	232,4	C	A	A
3	1,098	208,7	229,2	C	C	A
4	1,122	204,5	229,5	C	A	C
5	1,201	190,4	228,7	C	C	C

Tabla 11: Resultados del Ensayo 3.



# 7. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

---

## 7.1. RESULTADOS DEL PROYECTO

Los resultados más tangibles del desarrollo y construcción del sistema de control son los ensayos que se llevaron a cabo para comprobar el funcionamiento del mismo, cuya descripción ya se ha hecho en el capítulo 6. En este mismo capítulo se incluyen tres tablas en las que se resumen los resultados obtenidos en la realización de cada uno de los tres ensayos, respectivamente.

Por otra parte, otro resultado que se ha podido extraer en la realización del proyecto es que donde más problemas se registran es en la medida de tensión. Esto se debe a que, de acuerdo con el sistema utilizado, la medida resulta muy precisa en los valores cercanos a la tensión de calibración pero pierde precisión conforme se aleja de estos valores. No obstante, en el apartado 7.4.1 se retoma este problema.

Por último, resulta interesante el hecho de haber podido probar la placa de control diseñada en un elevador de tensión. Además, este hecho no ha impedido la consecución de los objetivos marcados en el proyecto, tal y como se detalla en la sección 7.3.

Por último, se incluye dos fotografías del montaje definitivo de la placa, ya soldada, que se pueden ver en la Figura 22 y en la Figura 23, respectivamente.

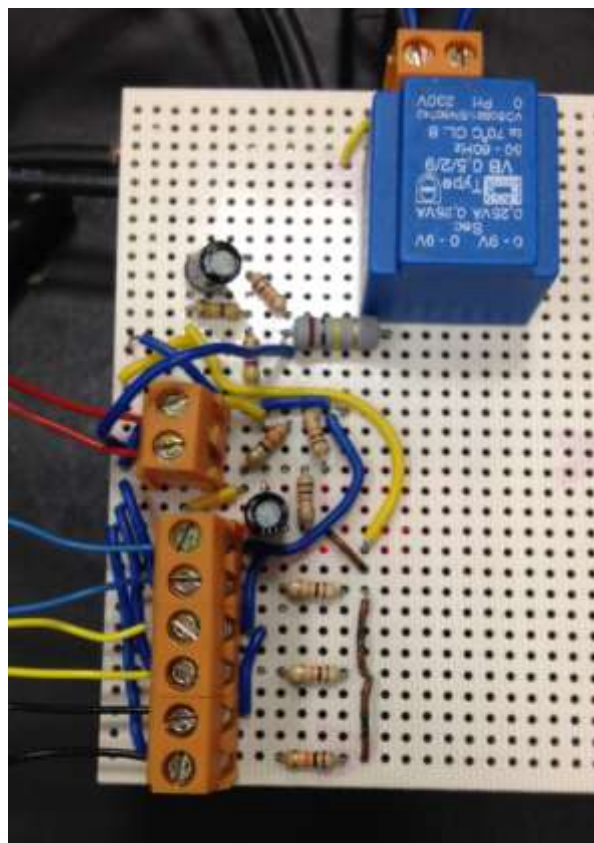
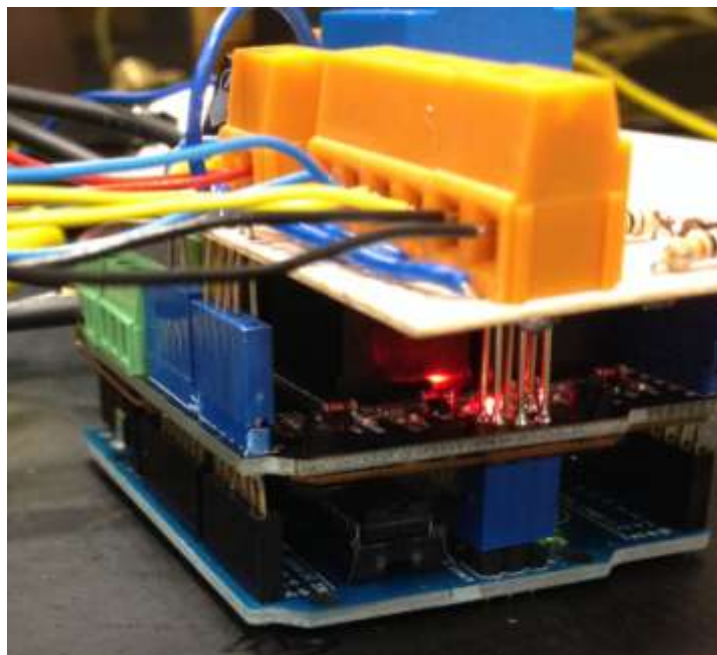


Figura 22: Resultado final del montaje de la placa de control.



*Figura 23: Detalle de la conexión de las tres placas que conforman el sistema.*



## 7.2. CONCLUSIONES

En este proyecto se ha desarrollado el sistema de control de un regulador de tensión mediante la construcción de una placa de control con Arduino. Para el desarrollo del sistema de control se han considerado tres fases de trabajo principales:

- Medida de tensión y corriente.
- Medida de la posición de los relés e identificación del nivel de compensación activo a partir de la misma.
- Actuación de los relés, regulada por una condición de actuación instantánea y otra de actuación temporizada.

Asimismo, el proyecto recoge la investigación realizada sobre la regulación de tensión, su importancia dentro de los sistemas eléctricos y las posibilidades de regulación de tensión actuales. Dentro de ellas, se destaca el uso de reguladores de tensión, distinguiendo entre los principales tipos y presentando algunos modelos.

De esta investigación se concluye que el mantenimiento de la tensión es un aspecto indispensable dentro de la operación y explotación del sistema eléctrico. Los reguladores resultan un elemento indispensable para el correcto funcionamiento del mismo y, como tal, están sujetos a una normativa estricta.

Dentro de los reguladores de tensión, el sistema de mayor importancia es el basado en la conmutación de distintas tomas dentro de un equipo cuyo comportamiento es el de un transformador con varios niveles de transformación y que se regula mediante contactores. La principal desventaja de este sistema es que solo se pueden conseguir una serie de posiciones de compensación concretas, lo que se traduce en magnitudes discretas en la tensión a la salida.

En cuanto al sistema de control desarrollado, se ha podido comprobar que se trata de un sistema bastante fiable, cuya construcción no resulta demasiado compleja y con un coste bastante asequible. En el capítulo 8, evaluando el presupuesto del proyecto se concluye que el precio de una placa de control de estas características ronda los 70 euros. Teniendo en cuenta además que es posible sustituir la placa de Arduino Mega por otra de Arduino Uno sin perder demasiadas prestaciones y que si se fabrican placas en serie y se adquieren las componentes al por mayor el precio unitario se abarata, se podría estar hablando de un sistema de control cuyo precio se situaría en torno a los 50 euros.

Además, como consecuencia de las condiciones de los ensayos se puede deducir otro aspecto muy interesante del sistema de control. Tal y como se ha comentado, los ensayos se realizaron con un equipo diferente al especificado en la fase de diseño. Sin embargo,





con realizar algunos ajustes en el código se pudo utilizar sin problema en el elevador de tensión ensayado. Esto demuestra de alguna manera la utilidad del sistema de control y la posibilidad de ser utilizado en diferentes equipos cuyo funcionamiento se base en el control de relés.

Esta conclusión se traduce además en que una vez realizado el diseño de un sistema de control y desarrollado el código, este puede ser de utilidad para la construcción de muchos sistemas similares más adelante. Esto significa que en el desarrollo de placas de control sucesivas se eliminan horas de trabajo en materias de diseño y programación, gracias a lo cual el proceso quedaría reducido fundamentalmente al montaje, junto con algunos arreglos en el diseño y la programación. Teniendo esto en cuenta, se podría desarrollar una placa similar en un tiempo cercano a 20 horas o incluso menor (en la sección 8.1 se desarrolla en profundidad el número de horas de trabajo en el proyecto).

Por último, se puede concluir que en relación al nivel de satisfacción obtenido con la realización del presente proyecto los resultados son excepcionalmente buenos y que se ha logrado con creces el objetivo final del mismo. En cualquier caso, en la sección 7.3 se realiza un análisis más exhaustivo en cuanto a la consecución de objetivos del proyecto.



### 7.3. CONSECUCIÓN DE OBJETIVOS

A partir de los resultados y conclusiones que han obtenido se puede, y resulta interesante, valorar la consecución de los objetivos del proyecto. En primer lugar, se puede decir que todos los objetivos referentes a la parte previa, la del estudio de la importancia de la regulación de tensión y la revisión del estado del arte, han sido satisfechos con creces, a la vista del análisis que se lleva a cabo en el capítulo 2.

Asimismo, los concernientes al manejo de la aparamenta y los elementos que intervienen en el sistema, así como el montaje de los mismos también se han cubierto con éxito. Se ha comprobado que la placa de control construida funciona, tanto la parte de medidas como la parte de actuación, lo que denota que el montaje está bien hecho.

Por otra parte, todo lo relativo al desarrollo del código fuente y su implementación a través de la placa de Arduino ha resultado igualmente satisfactorio. El desarrollo del código ha sido capaz de cubrir tanto la actuación instantánea como la temporizada, compilando correctamente y cargándose en la placa de control.

Por último, se podría decir que el objetivo de comprobación del funcionamiento del regulador de tensión en carga es el único que no se ha cumplido, al no haber podido ensayar en el equipo previsto. Sin embargo, gracias a esto se ha conseguido un objetivo adicional, que en principio no estaba previsto como tal, que es la instalación de la placa en otros equipos similares para ver si en ellos el comportamiento es igualmente bueno. Por ello, y pese a no haber podido ensayar con un regulador de tensión como el especificado, se puede considerar que el desarrollo del proyecto ha sido un éxito y que se han cumplido los objetivos marcados.



## 7.4. FUTUROS DESARROLLOS

En esta sección se recogen una lista de posibles campos en los cuáles se podría continuar desarrollando en proyecto en el futuro. Se ha decidido incluir este apartado dentro del capítulo 7 porque estas vías han surgido como una consecuencia indirecta del desarrollo del proyecto y no de forma paralela al mismo. Es decir, los futuros desarrollos son fruto del trabajo que se ha llevado a cabo en el proyecto y en parte se deducen como consecuencia de los desarrollos obtenidos.

Conviene señalar que los futuros desarrollos abarcan desde mejoras puntuales que podrían añadirse al sistema de control diseñado como campos enteros en los cuales se podría investigar para mejorar y/o complementar dicho sistema. El orden en el que se presentan sigue este criterio, de forma que el desarrollo lógico de las mismas sería de acuerdo con este mismo orden, ya que la continuidad en cada una de las vías sería más útil o más lógica una vez desarrollada la anterior.

### 7.4.1. *Mejoras en la medida de tensión*

A lo largo del trabajo de laboratorio se registraron numerosos problemas a la hora de realizar la medición de tensión de forma precisa. Esto es debido a que el sistema utilizado demostró una gran fiabilidad en los valores cercanos a la tensión utilizada para calibrar, pero su precisión empeoraba al alejarse de esos valores. Por ello, una primera mejora del sistema sería diseñar un nuevo software de medida a partir del montaje ya realizado. Otra posibilidad sería incorporar un sistema de diodos al montaje que permitan rectificar las semiondas negativas de tensión de entrada, de forma que no sea necesario el montaje del circuito que introduce el offset, con lo que quizá se podría mejorar el sistema de medida.

### 7.4.2. *Mejoras en el sistema de actuación*

Las mejoras especificadas en la medida de tensión podrían tener como consecuencia indirecta un sistema de actuación mejorado. Al medir de forma más precisa se podrían añadir nuevas condiciones, como obviar los valores máximo y mínimo dentro de un intervalo de tiempo, ampliar la actuación temporizada a mayores intervalos (10-30 segundos) o revisar la actuación instantánea para que no actúe por errores de precisión en la medida.

### 7.4.3. Medida de la tensión de salida

Una posibilidad muy sencilla y de bastante utilidad sería la incorporación de un segundo módulo de medida de tensión que midiera la tensión a la salida. Las ventajas de esta nueva instalación son evidentes: posibilidad de comprobar el correcto funcionamiento del sistema y comprobar el nivel de consumo en función de la tensión de salida del regulador, que es la que alimenta las cargas.

Además, el desarrollo de este módulo no presentaría ningún tipo de complicación, ya que resulta suficiente con realizar un duplicado del módulo ya existente y realizar un montaje idéntico y con los mismos elementos.

### 7.4.4. Módulo de almacenamiento

Como otra posible mejora del sistema se propone la incorporación al mismo de un módulo de almacenamiento. Dicho módulo constaría de una placa, como la que se muestra a continuación (Figura 24). Esta placa se conectaría a la placa base y permitiría almacenar en una tarjeta de memoria de tipo SD cada uno los datos de las medidas registradas a lo largo de un período de tiempo.



Figura 24: Tarjeta de almacenamiento.

Las ventajas de incorporar un módulo de almacenamiento al sistema de control son varias. Por una parte, se puede informar al cliente acerca de las características de la variación de tensión en la red de distribución en un determinado período de tiempo, así como de su consumo. Sin embargo, si se lleva a cabo un desarrollo mayor, esta información podría servir para realizar una previsión de las variaciones de tensión en base al estudio de las variaciones del pasado, lo que sería de gran interés.



#### *7.4.5. Elementos de protección*

Un futuro desarrollo bastante interesante es la instalación de sistemas de protección, tanto en el propio equipo como de cara a evitar que una sobretensión afecte a la carga. Dentro de la primera parte se incluiría cualquier instalación de elementos de protección típicos del sistema eléctrico, mientras que la segunda se podría conseguir programando una orden de desconexión en caso de una sobretensión extrema o de un corte en el suministro.

#### *7.4.6. Comunicaciones*

Por último, dentro del ámbito de las comunicaciones es donde se incluyen la mayor parte de los futuros desarrollos. Estos abarcan desde la instalación de cualquier sistema de comunicaciones propio de las redes inteligentes modernas hasta el desarrollo de un posible sistema de control remoto, por lo que las posibilidades de continuidad en esta vía son incontables.



# 8. PRESUPUESTO

---



## 8.1. HORAS DE DESARROLLO DEL PROYECTO

A lo largo del siguiente capítulo se realiza un estudio económico del proyecto, distinguiendo entre los costes personales (horas empleadas en la gestión y desarrollo del proyecto) y los costes materiales (coste de componentes de la placa de control).

Dentro del desarrollo del proyecto se incluyen varios campos de trabajo, cuya ejecución se realiza de forma diferenciada. A continuación se detallan las horas empleadas en cada una de ellas, así como las principales tareas asociadas en cada fase. A la hora de elaborar el presupuesto hay que tener en cuenta que en todos los procesos, especialmente en lo relativo al manejo de programas informáticos (programación con Arduino o redacción de la memoria con Word) no se consideran las horas de aprendizaje, sino únicamente las horas útiles para la realización del proyecto (es decir, aquellas que tardaría un profesional en desarrollar el sistema de control).

Asimismo, tampoco se incluyen por el mismo motivo las horas destinadas a labores académicas, como la investigación y el análisis del estado del arte.

### 8.1.1. Horas de diseño

Dentro de esta categoría se incluye todas las horas de trabajo dedicadas a realizar la descripción técnica del sistema de control, así como el diseño de cada uno de sus módulos. En la Tabla 12 se detalla la estimación de horas dedicadas a las diversas tareas de diseño. Asimismo, se incluyen también en esta tabla las horas de trabajo dedicadas al estudio del funcionamiento del equipo, ya que se entiende que esta es la base para el posterior diseño del sistema de control.

Horas de diseño	
Tareas	Horas estimadas
Estudio del funcionamiento del regulador	3
Módulo de medida de tensión y corriente	5
Módulo de medida de la posición de los relés	3
Diseño de la actuación de los relés	8
Diseño del módulo de control	1
Total	20

Tabla 12: Estimación de horas dedicadas al diseño del sistema de control.



### 8.1.2. Horas de montaje

La tercera parte del trabajo corresponde a las tareas de montaje e instalación de todos los elementos del hardware. En ellos no se incluye lo necesario para realizar las pruebas, la puesta a punto y los ensayos (como las conexiones a red a través del autotransformador VARIAC), sino sólo aquellas tareas que son parte específica de la construcción de la placa de control. En la Tabla 13 se detalla la estimación de las horas de trabajo en esta área.

Horas de montaje	
Tareas	Horas estimadas
Módulo de medida de tensión y corriente	2
Módulo de medida de la posición de los relés	2
Montaje del circuito de potencia	3
Montaje definitivo y soldadura	3
Total	10

Tabla 13: Estimación de horas dedicadas al montaje e instalación del hardware.

### 8.1.3. Horas de programación

Este apartado se refiere al desarrollo del código fuente con Arduino. En este caso hay que tener en cuenta que las horas de diseño no se incluyen, ya que ya se consideraron dentro del apartado 8.1.1. Es cierto que para la implementación del código se requiere un proceso previo en el cual se estructure cómo se van a programar las diversas condiciones de medida y actuación, pero todo este proceso no se considera parte de la programación en sí mismo, por lo que lo que aquí se incluye son sólo las horas dedicadas a elaborar el código ya diseñado.

En la Tabla 14 se detallan las horas dedicadas para este fin.

Horas de programación	
Tareas	Horas estimadas
Módulo de medida de tensión y corriente	1,5
Módulo de medida de la posición de los relés	1
Identificación del nivel de compensación	1
Funciones de actuación de cada escalón	1,5
Actuación instantánea	1
Actuación temporizada	2
Total	8

Tabla 14: Estimación de horas dedicadas al desarrollo del código con Arduino.





También hay que tener en cuenta que la programación de los ensayos, que como ya se ha explicado en el apartado 6.1 fue necesario desarrollarla de forma independiente, no se considera dentro de las tareas de programación.

#### 8.1.4. Horas destinadas a otras tareas

Por último, dentro de este apartado se consideran todas las horas de trabajo que no pueden ser incluidas dentro del resto de funciones, que en este caso se corresponden con los ensayos. Dichas horas de trabajo y sus correspondientes tareas se detallan en la Tabla 15.

Horas destinadas a otras tareas	
Tareas	Horas estimadas
Ensayos	3

Tabla 15: Estimación de horas dedicadas a otras tareas.

Conviene señalar que en relación a la memoria y la presentación del proyecto en esta tabla sólo se consideran las horas referentes a la elaboración de las mismas, es decir, a la redacción y presentación del documento y no a la elaboración de las plantillas sobre las que se realizó el trabajo en cada caso.

#### 8.1.5. Total de horas de proyecto

En este apartado se presenta el total de horas dedicadas a cada una de los programas de trabajo indicados en los apartados anteriores. En la Tabla 16 se muestran el resumen del total de horas de cada campo de trabajo junto con el total de horas de proyecto.

Horas de proyecto	
Campos de trabajo	Horas estimadas
Horas de diseño	20
Horas de montaje	10
Horas de programación	8
Horas de otras tareas	3
Total	33

Tabla 16: Estimación de horas totales en el desarrollo del proyecto.



## 8.2. COSTE DE LAS HORAS DE TRABAJO

Una vez definido en el apartado anterior las horas empleadas en cada fase de trabajo del proyecto, es necesario definir la retribución económica unitaria que se atribuye en cada uno de los campos de trabajo. Para ello, se considera un coste unitario en función de la tarea considerada como el que se especifica a continuación en la Tabla 17. En dicha tabla se incluye también el coste total calculado como el producto del coste unitario de cada rol de trabajo por el número de horas estimadas.

Rol	Coste unitario	Horas estimadas	Coste total (€)
Ingeniero de diseño	50 €/hora	20	1000
Técnico de montaje	20 €/hora	10	200
Programador	20 €/hora	8	160
Ingeniero responsable de ensayos	50 €/hora	3	150
Total		33	1510

Tabla 17: Desglose del coste del personal en función de cada rol de trabajo.

Como se puede observar, el coste de hora de trabajo de ingeniero industrial se establece en 50€/hora, independientemente de la complejidad y nivel de formación necesario para cada programa, ya que las tareas se ha realizado por un único individuo. Dentro del trabajo de ingeniería se incluye el diseño, los ensayos y la elaboración de la memoria. Para el trabajo de revisión se considera una tarifa algo menor, de 30 €/hora; mientras que el coste unitario más pequeño se reserva para las tareas de montaje y programación, para las cuales se define una tarifa de 20 €/hora.



### 8.3. COSTE DE MATERIALES

En este apartado se detalla el coste de los elementos necesarios para la ejecución material del proyecto. En la Tabla 18 se detalla toda la lista de los materiales utilizados, así como su precio unitario y total. En ella sólo se incluyen aquellos elementos que forman parte de la propia placa de control, excluyendo todos los equipos prestados por la entidad colaboradora (U.P. Comillas) para la puesta a punto y la realización de los ensayos como pueden ser el propio elevador de tensión ensayado o el autotransformador Variac. El único elemento incluido dentro del presupuesto que no es estrictamente necesario sería la placa de prototipos, cuyo coste se incluye por considerar que resulta fundamental su utilización en el montaje de cada módulo y las pruebas y ensayos, aunque no forme parte del montaje definitivo de la placa.

Coste de materiales de montaje			
Elemento	Precio Unitario	Cantidad	Precio Total
Placa Arduino Mega 2560	39,00 €	1	39,00 €
Placa de relés Arduino Relay Shield V2	17,60 €	1	17,60 €
Placa de Prototipos (utilizada en el montaje)	3,00 €	1	3,00 €
Arduino Proto Shield Rev 3	3,00 €	1	3,00 €
Transformador de tensión 230V/9V	4,01 €	1	4,01 €
Condensador Fixapart 63V 105º (4.7µF)	0,88 €	2	1,76 €
Otros: resistencias, cables, etc.			3,00 €
Total			71,37 €

Tabla 18: Desglose del coste de los elementos necesarios para el montaje.

Como se puede observar dentro de la propia tabla, el coste de las resistencias y cables se estima de forma conjunta atribuyendo un precio total de 3,00 €. Esto se debe a que el coste unitario de cada uno de estos elementos se considera despreciable, ya que en el caso de las resistencias es muy pequeño y en el caso de los cables resulta relativo, al tener que comprar los cables en rollos cuya longitud es muy superior a la longitud total utilizada.



#### 8.4. RESUMEN DEL PRESUPUESTO

Resumen del presupuesto	
Horas de diseño	1.000,00 €
Horas de montaje	200,00 €
Horas de programación	160,00 €
Horas de otras tareas	150,00 €
Coste de materiales de montaje	71,37 €
	+ _____
<b>PRESUPUESTO POR EJECUCIÓN</b>	<b>1.581,37 €</b>
IVA (21%)	332,09 €
<b>PRESUPUESTO POR LIQUIDACIÓN</b>	<b>1.913,46 €</b>

**El presupuesto de liquidación del presente proyecto asciende a una suma de mil ciento trece con cuarenta y seis euros.**



# 9. REFERENCIAS

---



## 9.1. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Frías Marín, P.; et al: *High-Efficiency Voltage Regulator for Rural Networks*, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, Vol. 25, No. 3, July 2010.
- [2] Gómez San Román, T.; et al: *Las redes eléctricas inteligentes*, apartado 3.1.4.: *Impacto de la generación distribuida sobre la red de distribución*, Fundación gasNatural-fenosa, 1ª edición, 2011.
- [3] Amadori, A.: *Algoritmo de control PID*, EL ABC DE LA AUTOMATIZACION, mayo 2013.
- [4] Rivera-Morales, C.A.: *Estructuras de Control y Ejemplos de Algoritmos*, Programación Básica, octubre 2013.
- [5] Sánchez Calvo, V. y Rivera Chamorro, B.: *Seminario de Calidad de Suministro Eléctrico*. MEGACAL INSTRUMENTS IBÉRICA.
- [6] Markiewicz, H. & Klajn, A.: *Voltage disturbances - Standard EN 50160*, Voltage Characteristics in Public Distribution Systems, Wroclaw University of Technology, July 2004.
- [7] Echevarría Solís, R.A.: *Síntesis de un regulador monofásico de tomas de C.A. para aplicaciones de media y baja tensión*, Capítulo I: *Introducción*, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, mayo 2002.
- [8] Echevarría, R.A. y Berber, E.: *Reguladores rápidos de tensión*, RIEE&C, Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación, Vol. 6 No. 1, junio 2009.
- [9] Hernández Enríquez, W.: *Reguladores de voltaje*, Curso 40104, 2010.
- [10] Arellano Martínez, A.: *Mejora de la confiabilidad en el edificio Valdés Vallejo de la UNAM*, Capítulo 4, Sección 4.4.3: *Reguladores ferroresonantes*, Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.
- [11] Pérez García, A.: *Reguladores de tensión*, Anales de Mecánica y Electricidad, 2001.
- [12] Toledano Gasca, J. C. y Olmeda Moreno, P.: *Desarrollo y Construcción de Prototipos Electrónicos*, 2010.



## 9.2. PÁGINAS WEB

- [W1] Software de Arduino, descargable desde su propia página web.  
<http://arduino.cc/en/Main/Software>.
- [W2] Página web corporativa de ABB.  
<http://www.abb.com/>
- [W3] Página web corporativa de Salicru.  
<http://www.salicru.com/es/index.php>
- [W4] Página web corporativa de Vogar.  
<http://www.vogar.com.mx/>
- [W5] Características técnicas de los modelos monofásicos serie LAN del catálogo de Vogar.  
<http://www.vogar.com.mx/reguladores/fichas-tecnicas/bifasicos-2-10-kVA.htm>
- [W6] Página web corporativa de Industronic.  
<http://www.industronic.com.mx/>
- [W7] Efecto de las tolerancias sobre la medida de tensión.  
<http://openenergymonitor.org/emon/buildingblocks/acac-component-tolerances>
- [W8] Arduino Proto Shield Rev 3.  
[http://store.arduino.cc/index.php?main\\_page=product\\_info&products\\_id=207](http://store.arduino.cc/index.php?main_page=product_info&products_id=207)
- [W9] Código de medida de tensión y corriente con la librería EmonLib.  
<http://openenergymonitor.org/emon/buildingblocks/arduino-sketch-voltage-and-current>
- [W10] Software de Arduino, descargable desde su propia página web.  
<https://github.com/openenergymonitor/EmonLib>
- [W11] Software de Arduino, descargable desde su propia página web.  
<http://openenergymonitor.org/emon/buildingblocks/calibration>



### 9.3. CATÁLOGOS

[C1] Extracto del catálogo de reguladores de tensión de ABB: modelos UNITROL 1000.

[http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0CEMQFjAC&url=http%3A%2F%2Fwww05.abb.com%2Fglobal%2Fscot%2Fscot232.ns%2Fveritydisplay%2F6457a67bd0b547b1c12579bf003ac13c%2F%24file%2F3BHS353843\\_S01\\_A\\_O.pdf&ei=Ro9\\_U6qKI\\_SW0QXxwIGwDw&usg=AFQjCNF7XbVb06YlG5ItA4DOoe7c2Bt73Q&sig2=visdpU7oj8grEZUD3lKeiw&bvm=bv.67720277,d.d2k&cad=rja](http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0CEMQFjAC&url=http%3A%2F%2Fwww05.abb.com%2Fglobal%2Fscot%2Fscot232.ns%2Fveritydisplay%2F6457a67bd0b547b1c12579bf003ac13c%2F%24file%2F3BHS353843_S01_A_O.pdf&ei=Ro9_U6qKI_SW0QXxwIGwDw&usg=AFQjCNF7XbVb06YlG5ItA4DOoe7c2Bt73Q&sig2=visdpU7oj8grEZUD3lKeiw&bvm=bv.67720277,d.d2k&cad=rja)

[C2] Catálogo general de productos de Salicru, marzo 2014.

[catalogo.salicru.com//documentos/catalogos\\_generales/catalogo-general-salicru-es.pdf](http://catalogo.salicru.com//documentos/catalogos_generales/catalogo-general-salicru-es.pdf)

[C3] Características técnicas del Regulador AMCR de Industronic (extracto del catálogo).

[www.industronic.com.mx/sites/default/files/ficha\\_AMCR.pdf](http://www.industronic.com.mx/sites/default/files/ficha_AMCR.pdf)





# 10. ANEXOS

---



## 10.1. CÓDIGO

Nota explicativa: el código que aquí se adjunta es una versión completa, que incluye de forma ordenada todas y cada una de las partes descritas en el capítulo 5 (incluyendo ensayos). Sin embargo, a la hora de una implementación real hay que tener en cuenta que la parte de los ensayos tendría que ser suprimida o, al menos, desactivada como si fuera un comentario.

Asimismo, a la hora de implementar la actuación para que la placa pueda ser instalada y funcionar de forma automática habría que incluir llamadas a la función 'Ins' en cada una de las partes del código, incluso dentro de la actuación temporizada, de forma que la actuación instantánea se produzca también en caso de estar dentro de un bucle. Lo que se incluye en el código no es más que un ejemplo de llamada a dicha función.

----- O -----

### Código fuente completo

```
#include <EmonLib.h>

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

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

  emon1.voltage(0, 159, 0); // Voltage: input pin, calibration, phase_shift
  emon1.current(1, 111.1); // Current: input pin, calibration.

  pinMode(5,OUTPUT);
  pinMode(6,OUTPUT);
  pinMode(7,OUTPUT);
}

void loop()
{
  int nivel;
  //Medidas
  //emon1.calcVI(20,50); // Calculate all. No.of crossings, time-out
```



---

```
//emon1.serialprint();    // Print out all variables
//_____

//Ensayo 1
Serial.println("\nProtocolo de ensayo");
Serial.println("\n1.Actuacion de todos los escalones de compensacion en vacio");
Serial.println("\n-----");

delay(10000);
Comp1();

delay(10000);
Comp2();

delay(10000);
Comp3();

delay(10000);
Comp4();

delay(10000);
Comp5();
//_____

//Ensayo 2
Serial.println("\nProtocolo de ensayo");
Serial.println("\n2.Determinacion del nivel de compensacion a partir de la medida de la
posicion de los relees");
Serial.println("\n-----");

delay(15000);
Comp1();
nivel=MedComp();
Serial.print("Nivel de compensacion medido: ");
Serial.println(nivel);

delay(15000);
Comp2();
```



```
nivel=MedComp();
Serial.print("Nivel de compensacion medido: ");
Serial.println(nivel);

delay(15000);
Comp3();
nivel=MedComp();
Serial.print("Nivel de compensacion medido: ");
Serial.println(nivel);

delay(15000);
Comp4();
nivel=MedComp();
Serial.print("Nivel de compensacion medido: ");
Serial.println(nivel);

delay(15000);
Comp5();
nivel=MedComp();
Serial.print("Nivel de compensacion medido: ");
Serial.println(nivel);
//_____

//Ensayo 3
Serial.println("\nProtocolo de ensayo");
Serial.println("\n3.Ensayo de actuacion con tension de entrada descendente");
Serial.println("\n-----");

Comp3();
int k=1;
int nivel;

do{

emon1.calcVI(20,2000);
nivel=MedComp();

if(emon1.Vrms<222 && emon1.Vrms>=214 && nivel!=4){
    Serial.print("La tension de entrada ha disminuido a ");
```



```
Serial.print(emon1.Vrms);
Serial.println(" V");
delay(3000);
Comp4();
}

emon1.calcVI(20,2000);

if(emon1.Vrms<214 && emon1.Vrms>=206 && nivel!=5){
  Serial.print("La tension de entrada ha disminuido a ");
  Serial.print(emon1.Vrms);
  Serial.println(" V");
  delay(3000);
  Comp5();
}

emon1.calcVI(20,2000);

if(emon1.Vrms<206 && emon1.Vrms>=198 && nivel!=2){
  Serial.print("La tension de entrada ha disminuido a ");
  Serial.print(emon1.Vrms);
  Serial.println(" V");
  delay(3000);
  Comp2();
}

emon1.calcVI(20,2000);

if(emon1.Vrms<198 && nivel!=1){
  Serial.print("La tension de entrada ha disminuido a ");
  Serial.print(emon1.Vrms);
  Serial.println(" V");
  delay(3000);
  Comp1();
  Serial.println("\nEnsayo completado");
}

}while(k>0);
//_____
```



```
Ins()); //Ejemplo de llamada a la función de actuación instantánea

//Actuacion temporizada
//-----Nivel 1-----
int k1=0;
int t1=0;
nivel=MedComp();

do{
    emon1.calcVI(20,50);

    if(emon1.Vrms>=265){
        delay(50);
        k1++;
    }

    t1++;
}while(emon1.Vrms>=265 && t1<50 && nivel!=1);

if(k1>49){
    Comp1();
    delay(1000);
}

//-----Nivel 2-----
int k2=0;
int t2=0;
nivel=MedComp();

do{
    emon1.calcVI(20,50);

    if(emon1.Vrms<265 && emon1.Vrms>=241){
        delay(50);
        k2++;
    }

    t2++;
}while(emon1.Vrms<265 && emon1.Vrms>=241 && t2<50 && nivel!=2);
```



```
if(k2>49){
    Comp2();
    delay(1000);
}

//-----Nivel 3-----
int k3=0;
int t3=0;
nivel=MedComp();

do{
    emon1.calcVI(20,50);

    if(emon1.Vrms<241 && emon1.Vrms>=221){
        delay(50);
        k3++;
    }

    t3++;
}while(emon1.Vrms<241 && emon1.Vrms>=221 && t3<50 && nivel!=3);

if(k3>49){
    Comp3();
    delay(1000);
}

//-----Nivel 4-----
int k4=0;
int t4=0;
nivel=MedComp();

do{
    emon1.calcVI(20,50);

    if(emon1.Vrms<221 && emon1.Vrms>=204){
        delay(50);
        k4++;
    }
}
```



```
t4++;
}while(emon1.Vrms<221 && emon1.Vrms>=204 && t4<50 && nivel!=4);

if(k4>49){
  Comp4();
  delay(1000);
}

//-----Nivel 5-----
int k5=0;
int t5=0;
nivel=MedComp();

do{
  emon1.calcVI(20,50);

  if(emon1.Vrms<204){
    delay(50);
    k5++;
  }
  t5++;
}while(emon1.Vrms<204 && t5<50 && nivel!=5);

if(k5>49){
  Comp5();
  delay(1000);
}

//_____
}

//Actuacion instantanea
void Ins(){
  int nivel;
  nivel=MedComp();
  emon1.calcVI(20,50);

  if(emon1.Vrms<183 && nivel!=5){
    Comp5();
```





```
    delay(1000);
}

if(emon1.Vrms<204 && emon1.Vrms>=183 && nivel!=4){
    Comp4();
    delay(1000);
}

if(emon1.Vrms>=265 && emon1.Vrms<297 && nivel!=2){
    Comp2();
    delay(1000);
}

if(emon1.Vrms>=297 && nivel!=1){
    Comp1();
    delay(1000);
}
}

//Medida de la posicion de los reles
void Posicion(){
    delay(100);
    float ten1=analogRead(2);
    float ten2=analogRead(3);
    float ten3=analogRead(4);

    Serial.println("La posicion de los reles es: ");
    Serial.print(" -Rele 1: ");
    if(ten3>500){
        Serial.println("Abierto");
    }else if(ten3<500){
        Serial.println("Cerrado");
    }
}

Serial.print(" -Rele 2: ");
if(ten2>500){
    Serial.println("Abierto");
}else if(ten2<500){
    Serial.println("Cerrado");
}
```



```
}  
  
Serial.print(" -Rele 3: ");  
if(ten1>500){  
    Serial.println("Abierto");  
}else if(ten1<500){  
    Serial.println("Cerrado");  
}  
  
Serial.println("_____");  
//delay(100);  
}
```

```
//Determinacion del nivel de compensacion activo
```

```
int MedComp(){  
    delay(100);  
    float ten1=analogRead(2);  
    float ten2=analogRead(3);  
    float ten3=analogRead(4);  
  
    int res=0;  
  
    if(ten1<500 && ten2<500 && ten3<500){  
        res=1;  
    }  
  
    if(ten1<500 && ten2>500 && ten3<500){  
        res=2;  
    }  
  
    if(ten1>500 && ten2>500 && ten3>500){  
        res=3;  
    }  
  
    if(ten1>500 && ten2>500 && ten3<500){  
        res=4;  
    }  
  
    if(ten1>500 && ten2<500 && ten3<500){
```



```
    res=5;
}

return res;
}

//Escalones de compensación
void Comp1(){
    Serial.println("\nNivel de compensacion 1");
    digitalWrite(5,LOW);
    delay(1000);
    digitalWrite(6,HIGH);
    digitalWrite(7,HIGH);
    delay(1000);
    digitalWrite(5,HIGH);
    Posicion();
}

void Comp2(){
    Serial.println("\nNivel de compensacion 2");
    digitalWrite(5,LOW);
    delay(1000);
    digitalWrite(6,LOW);
    digitalWrite(7,HIGH);
    delay(1000);
    digitalWrite(5,HIGH);
    Posicion();
}

void Comp3(){
    Serial.println("\nNivel de compensacion 3");
    digitalWrite(5,LOW);
    delay(1000);
    digitalWrite(6,LOW);
    digitalWrite(7,LOW);
    digitalWrite(5,LOW);
    delay(1000);
    Posicion();
}
```



```
void Comp4(){
  Serial.println("\nNivel de compensacion 4");
  digitalWrite(5,LOW);
  delay(1000);
  digitalWrite(6,LOW);
  digitalWrite(7,LOW);
  delay(1000);
  digitalWrite(5,HIGH);
  Posicion();
}
```

```
void Comp5(){
  Serial.println("\nNivel de compensacion 5");
  digitalWrite(5,LOW);
  delay(1000);
  digitalWrite(6,HIGH);
  digitalWrite(7,LOW);
  delay(1000);
  digitalWrite(5,HIGH);
  Posicion();
}
```



---

## 10.2. SCRIPT DE LOS ENSAYOS

### 10.2.1. Ensayo 1: Posiciones de interés

Protocolo de ensayo

1. Actuación de todos los escalones de compensación en vacío

-----

Nivel de compensación 1

La tensión de entrada es: 230.01 V

La intensidad de entrada es: 0.03 A

La posición de los relés es:

- Relé 1: Abierto
- Relé 2: Abierto
- Relé 3: Abierto

---

Nivel de compensación 2

La tensión de entrada es: 230.68 V

La intensidad de entrada es: 0.03 A

La posición de los relés es:

- Relé 1: Cerrado
- Relé 2: Abierto
- Relé 3: Abierto

---

Nivel de compensación 3

La tensión de entrada es: 229.39 V

La intensidad de entrada es: 0.02 A

La posición de los relés es:

- Relé 1: Cerrado
- Relé 2: Cerrado
- Relé 3: Abierto

---

Nivel de compensación 4

La tensión de entrada es: 231.64 V

La intensidad de entrada es: 0.03 A



---

La posición de los relés es:

- Relé 1: Cerrado
- Relé 2: Abierto
- Relé 3: Cerrado

---

Nivel de compensación 5

La tensión de entrada es: 230.74 V

La intensidad de entrada es: 0.07 A

La posición de los relés es:

- Relé 1: Cerrado
- Relé 2: Cerrado
- Relé 3: Cerrado

---

Ensayo completado

### *10.2.2. Ensayo 2: Identificación del nivel de compensación*

Protocolo de ensayo

2. Determinación del nivel de compensación a partir de la medida de la posición de los relés

-----  
Nivel de compensación 1

La posición de los relés es:

- Relé 1: Cerrado
- Relé 2: Cerrado
- Relé 3: Cerrado

---

Nivel de compensación medido: 1

Nivel de compensación 2

La posición de los relés es:

- Relé 1: Cerrado
  - Relé 2: Abierto
  - Relé 3: Cerrado
-



---

Nivel de compensacion medido: 2

Nivel de compensacion 3

La posicion de los reles es:

- Rele 1: Abierto
- Rele 2: Abierto
- Rele 3: Abierto

---

Nivel de compensacion medido: 3

Nivel de compensacion 4

La posicion de los reles es:

- Rele 1: Cerrado
- Rele 2: Abierto
- Rele 3: Abierto

---

Nivel de compensacion medido: 4

Nivel de compensacion 5

La posicion de los reles es:

- Rele 1: Cerrado
- Rele 2: Cerrado
- Rele 3: Abierto

---

Nivel de compensacion medido: 5

Ensayo completado

### ***10.2.3. Ensayo 3: Actuación en función de $V_{in}$***

Protocolo de ensayo

3.Ensayo de actuacion con tension de entrada descendente

-----  
Nivel de compensacion 1

La tension de entrada es: 229.29 V

La intensidad de entrada es: 0.02 A



---

La posición de los relés es:

- Relé 1: Abierto
- Relé 2: Abierto
- Relé 3: Abierto

---

La tensión de entrada ha disminuido a 219.13 V

Nivel de compensación 2

La tensión de entrada es: 219.82 V  
La intensidad de entrada es: 0.02 A

La posición de los relés es:

- Relé 1: Cerrado
- Relé 2: Abierto
- Relé 3: Abierto

---

La tensión de entrada ha disminuido a 208.68 V

Nivel de compensación 3

La tensión de entrada es: 208.40 V  
La intensidad de entrada es: 0.02 A

La posición de los relés es:

- Relé 1: Cerrado
- Relé 2: Cerrado
- Relé 3: Abierto

---

La tensión de entrada ha disminuido a 204.56 V

Nivel de compensación 4

La tensión de entrada es: 204.65 V  
La intensidad de entrada es: 0.06 A

La posición de los relés es:

- Relé 1: Cerrado
- Relé 2: Abierto
- Relé 3: Cerrado

---

La tensión de entrada ha disminuido a 190.30 V

Nivel de compensación 5

La tensión de entrada es: 190.24 V  
La intensidad de entrada es: 0.06 A





La posición de los reles es:

- Rele 1: Cerrado
  - Rele 2: Cerrado
  - Rele 3: Cerrado
- 

Ensayo completado