



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Diseño de sistema mecatrónico para la automatización de relojes mecánicos antiguos

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERIA EN TECNOLOGIAS INDUSTRIALES

Autor: Laura Salas Lajarín
Director: Roque Torres Sánchez

Cartagena, 1 Septiembre 2023



Universidad
Politécnica
de Cartagena



ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	3
INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN	4
INTRODUCCIÓN.....	5
MOTIVACIÓN	6
ANTECEDENTES Y CONTEXTO	7
ANTECEDENTES	8
CONTEXTUALIZACIÓN HISTÓRICA	9
FUNCIONAMIENTO DE UN RELOJ DE CUERDA	13
OBJETIVOS.....	16
1. AUTOMATIZAR EL PROCESO DE ENERGIZACIÓN DEL RELOJ ANTIGUO. .	17
2. AUTOMATIZAR EL FUNCIONAMIENTO DE LAS CAMPANAS.....	18
CÁLCULOS PREVIOS.....	20
VELOCIDAD ANGULAR DEL EJE DEL RELOJ	21
MOMENTO DE FUERZA NECESARIO PARA ENERGIZAR EL RELOJ.....	24
MATERIAL Y MÉTODOS.....	25
HARDWARE	26
Autómata.....	26
Motores	27
Bancada externa.....	28
Relés	30
Sensores inductivos	32
SOFTWARE.....	33
TIA Portal	33
PRIMERA PROPUESTA.....	34
Sistema de acople y desacople.....	35
CONCLUSIONES DE LA PRIMERA PROPUESTA	42
SEGUNDA PROPUESTA	43
Programación del autómata.	46



CONCLUSIONES DE LA SEGUNDA PROPUESTA	49
GUÍA GEMMA Y SOLUCIÓN FINAL.....	51
GUÍA GEMMA.....	52
PROGRAMA FINAL DEL PROYECTO	56
CAMPANAS	59
CONFIGURACIÓN DE LA HORA DEL AUTÓMATA.	60
SISTEMA DE ACCIONAMIENTO/BLOQUEO DE LAS CAMPANAS.	62
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	63
BIBLIOGRAFÍA.....	67
ANEXO I	69



Índice de figuras

Figura 1. Edificio de la Sociedad de Económicas de Cartagena.	9
Figura 2. Reloj de las económicas.	10
Figura 3. Sistema de contrapesos del reloj de las económicas.	11
Figura 4. Esfera del reloj de las económicas.	11
Figura 5. Placa del reloj.	12
Figura 6. Iluminación de la esfera	12
Figura 7. Mecanismo del reloj de las económicas.	13
Figura 8. Escape del reloj de las económicas.	13
Figura 9. Manecillas del reloj de las económicas.	14
Figura 10. Esfera del reloj de las económicas.	14
Figura 11. Péndulo del reloj de las económicas.	14
Figura 12. Grafcet N°1.	21
Figura 13. PLC Siemens S7 1200.	26
Figura 14. Motor XD80KTYZ-BC-S1.	27
Figura 15. Estructura principal de la bancada.	29
Figura 16. Pieza estructura motores N°1.	29
Figura 17. Pieza estructura motores N°2.	29
Figura 18. Pieza estructura motores N°3.	29
Figura 19. Bancada montada.	30
Figura 20. Esquema eléctrico motores.	31
Figura 22. Sensor inductivo IME18-05BNSZW2KF38.	33
Figura 21. Sensor inductivo XS612B1NAL2.	33
Figura 23. Acoplamiento mecánico.	37
Figura 24. Posición acoplamiento al dar cuerda.	37
Figura 25. Posición acoplamiento al dar margen después de dar cuerda.	38
Figura 26. Posición acoplamiento cuando el eje del reloj ha girado.	38
Figura 27. Posición acoplamiento al dar margen por segunda vez.	38
Figura 28. Grafcet N°2.	39
Figura 29. Grafcet N°3.	41
Figura 30. Corona motor.	44
Figura 31. Corona reloj.	44
Figura 32. Soportes individuales sensores.	45
Figura 33. Soporte único sensores.	45
Figura 34. Grafcet N°4.	46
Figura 35. Sistema ensamblado.	49
Figura 36. Representación general guía GEMMA.	52
Figura 37. Guía GEMMA del proyecto.	53
Figura 38. Grafcet N°5.	56
Figura 39. Conjunto de tambores del reloj de las económicas.	62



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN



Introducción

Actualmente el antiguo reloj conocido como el “Reloj de las Económicas”, situado en la calle del Aire en Cartagena, lleva meses parado debido al problema que supone que se requiera a una persona para darle cuerda periódicamente, prácticamente cada día. El reloj de las económicas forma parte del patrimonio cultural e histórico de España y automatizarlo permitiría conservar y mantener este valioso elemento para generaciones futuras. Actualizando la tecnología, se puede garantizar que este reloj siga funcionando correctamente y siga siendo apreciado como parte de la identidad cultural local. Además, la automatización puede simplificar las labores de mantenimiento y el uso del propio reloj. Automatizando el proceso de energización del reloj, lo que se pretende fundamentalmente es reducir la necesidad de intervención manual frecuente que requiere este tipo de relojes antiguos, lo que ahorra tiempo y recursos.

El objetivo principal de este trabajo consiste en automatizar el proceso de energización de un reloj de cuerda antiguo que funciona con un sistema de contrapesos, es decir, automatizar el proceso de dar cuerda. Para automatizar este proceso se pretende implementar un sistema formado por motores y sensores, de forma que la interacción se realice sin modificar el mecanismo actual para preservar la autenticidad del reloj.

Además de la automatización del proceso de energización, se plantea como objetivo complementario la automatización del sistema de campanas del reloj. El objetivo es programar las campanas para que suenen únicamente durante el día. Con esto, lo que se pretende es evitar posibles molestias a los vecinos durante sus horas de descanso.

Un aspecto fundamental y lo que hace particularmente atractivo la realización de este proyecto para los estudiantes del grado en Tecnologías Industriales, es la interdisciplinariedad ya que será necesario combinar los conocimientos adquiridos en distintas asignaturas de la carrera relacionadas con física, mecánica, diseño, electricidad y automatización. El conocimiento de física y mecánica será un factor crítico para entender el funcionamiento del reloj de cuerda y la forma en la que la automatización afecta a los contrapesos y engranajes del mismo. Además, la electricidad y la automatización son materias claves para la implementación de los sensores y de los motores que harán posible que la energización del reloj se haga de forma automática. Por último, también se utilizarán conocimientos sobre diseño durante el desarrollo de la solución automatizada, para garantizar que los componentes se integren al reloj sin alterar su estética ni su valor histórico.



Motivación

La ejecución de este proyecto supone un reto considerable para un estudiante de ingeniería industrial, debido principalmente a su naturaleza multidisciplinaria. Esta cualidad lo convierte en una oportunidad para emplear de manera práctica los conocimientos adquiridos en diversas asignaturas del programa de estudio, creando una conexión entre áreas que aparentaban ser independientes entre sí.

Al mismo tiempo, el proyecto en cuestión permite poner en práctica conceptos teóricos y destrezas técnicas adquiridas, pero centrándose sobre todo en la resolución de problemas reales. Este aspecto consigue profundizar la comprensión de los temas tratados en el aula, así como experimentar la dinámica de cómo los profesionales abordan situaciones de este tipo en su día a día. De este modo, el proyecto contribuye en el desarrollo de competencias como el análisis de problemas, el planteamiento de soluciones efectivas y la toma de decisiones. Siendo estas habilidades fundamentales para abordar retos en la futura carrera profesional de un ingeniero.

Otra característica de este proyecto es su estrecha relación con problemas reales. El objetivo consiste en adaptar un elemento histórico a las demandas actuales, lo que refleja la esencia de la ingeniería industrial. Esta relación directa con situaciones del mundo real pone en evidencia la importancia que pueden llegar a tener las aportaciones de la ingeniería en la sociedad.

En resumen, el diseño de sistema mecatrónico para la automatización de relojes mecánicos antiguos es un proyecto caracterizado por su enfoque multidisciplinario y práctico, que promueve la aplicación de los conocimientos adquiridos en un caso particular. Además, permite desarrollar habilidades esenciales para el futuro profesional. Otro aspecto relevante del proyecto es su conexión con un problema real de la sociedad de Cartagena y la relación directa con la Universidad Politécnica, sus estudiantes y profesores para intentar solventarlo.



CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES Y CONTEXTO



Antecedentes

El reloj sujeto de estudio para este proyecto constituye una obra única debido a que fue diseñado y construido por un relojero artesanal. Sin embargo, aunque no se pueda encontrar otro reloj idéntico a este, los relojes de torre se convirtieron en el siglo pasado en un elemento característico de la mayoría de pueblos y ciudades marcando el paso del tiempo. Independientemente del diseño y las características de cada mecanismo, todos los relojes de cuerda antiguos funcionan de forma similar gracias a la energía potencial que se acumula en sus cilindros al darles cuerda. En la mayoría de pueblos había una persona encargada del mantenimiento de estas máquinas y de darles cuerda periódicamente para mantenerlas en marcha. Actualmente, son muchos los relojes que permanecen parados debido al problema que supone su energización, ya que es un proceso que puede resultar tedioso y cada vez menos valioso. Como consecuencia, muchos ayuntamientos e iglesias han sustituido los mecanismos tradicionales de sus relojes por relojes automáticos, que cumplen la misma función y reducen significativamente las necesidades de mantenimiento y puesta en marcha de los mismos. Sin embargo, cuando se trata de elementos con un significativo valor histórico su sustitución puede no representar la solución más acertada. Es por esto que ya se han llevado a cabo proyectos de automatización de relojes de cuerda antiguos que permiten que estas máquinas sigan funcionando sin la necesidad de un operario externo y que, además, respetan su carácter histórico.

Un proyecto de estas características es el que se llevó a cabo con el Reloj de la Torre de Vegas del Condado. En este caso, los objetivos eran reparar, automatizar y poner en marcha el antiguo reloj. Como en este trabajo, un requisito es que ninguna de las modificaciones realizadas puede alterar la maquinaria original. De este modo, todas las adaptaciones deben poderse suprimir en cualquier momento para dejar el reloj en funcionamiento manual como el que ha tenido hasta este momento. Se puede encontrar más información sobre este documento en el archivo *Cronología de la reparación, automatización y nueva puesta en marcha del Reloj de la Torre de Llamazares*, C. (2016), citado en la bibliografía.

Otro proyecto que no se centra tanto en la automatización como en la restauración y puesta en marcha de un reloj de cuerda antiguo es el llevado a cabo en el reloj del Ayuntamiento de Iruñea. Este trabajo resulta interesante porque además de explicar cómo funciona un reloj de cuerda y de cómo se ha realizado su restauración, también realiza una reconstrucción virtual del reloj. Para esta reconstrucción se ha utilizado el programa Solid Works el cual permite ver de manera detallada las distintas piezas y elementos que componen ese reloj en cuestión. En la bibliografía se puede encontrar el documento completo *Restauración y puesta en marcha del antiguo reloj del Ayuntamiento de Iruñea* de Aginaga, J. y Claver, A. (2019).



Contextualización histórica

Las Sociedades Económicas de Amigos del País son asociaciones nacidas en la segunda mitad del siglo XVIII en España durante el reinado de Carlos III. Fue el rey quien las puso bajo la protección real para poder utilizarlas como un instrumento de reformismo borbónico, con el objetivo de difundir las nuevas ideas, conocimientos científicos y técnicos de la Ilustración. El objetivo principal de la Sociedad de Económicas de Amigos del País de Cartagena es promover el desarrollo económico, social y cultural de la ciudad y de la Región de Murcia. Desde su origen en 1972, fecha de su fundación, la institución ha participado y promovido numerosas actividades y proyectos relacionados con diversas áreas del conocimiento, como el arte, la educación, la cultura, la ciencia y la tecnología. Para ello ha participado en la creación de escuelas, museos y bibliotecas, y ha fomentado la investigación científica y el desarrollo tecnológico a nivel regional. Además, este organismo ha defendido la democracia y la libertad a lo largo de su historia. Concretamente, sirvió de refugio para muchos ciudadanos que huían de la violencia y la represión durante la Guerra Civil española, y participó activamente en la lucha contra la dictadura franquista en las siguientes décadas.

El edificio que en este momento alberga la sede de la Sociedad de Económicas de Cartagena, fue construido en 1876 por Carlos Mancha en estilo ecléctico y está ubicado en la calle del Aire, en pleno centro histórico de la ciudad. Este edificio fue diseñado por el arquitecto Antonio Sánchez y es una de las obras más destacadas de la arquitectura neoclásica de Cartagena. Su fachada se compone de cinco ejes y tres cuerpos, destacando el balcón corrido de la primera planta donde se encuentran tres vanos en cuyos dinteles se hallan los bustos de Mercurio, Minerva y Hércules. En el interior del edificio se distingue una escalera monumental de mármol que lleva al salón de actos, decorado en estilo barroco y presidido por una gran lámpara de cristal de Murano. A lo largo del tiempo la Sociedad de Económicas de Cartagena ha realizado diversas obras de restauración y conservación en el edificio, para mantener la estructura original y su patrimonio histórico y artístico.



Figura 1. Edificio de la Sociedad de Económicas de Cartagena.



La Sociedad de Económicas de Cartagena posee un reloj de torre histórico conocido como el "Reloj de las Económicas", que ha sido objeto de estudio y restauración en diferentes ocasiones. Este reloj se encuentra en una espadaña en la parte superior, rematando la fachada coronada con el escudo de Cartagena. El reloj se trajo de Inglaterra, montándose entre los años 1886 y 1887, y empezó a funcionar el 18 de febrero de 1888, costando 2.465 pesetas. El diario local "El Eco de Cartagena", publica la siguiente noticia: "Hace tres días que está funcionando con la mayor regularidad, el magnífico reloj instalado recientemente en la casa propiedad de la Sociedad Amigos del País. El referido reloj marca las horas de Cartagena y de Madrid, distinguiéndose por un minuterero encarnado que señala la de esta última ciudad. Las campanas serán colocadas dentro de unos días." (21/02/1888 El Eco de Cartagena p2)



Figura 2. Reloj de las económicas.

El reloj es un modelo similar al del ayuntamiento, compuesto por un conjunto de mecanismos y elementos necesarios para su funcionamiento (ruedas, piñones, coronas, palancas y engranajes) que están encasquillados en ejes de acero cuyas extremos están introducidos en unos orificios que tienen practicados mecánicamente las dos piezas de fundición paralelas entre sí que les sirven de apoyo. Estas dos piezas de fundición con forma geométrica, descansan sujetas sobre los cuatro pies de un bastidor metálico rectangular en cuyos extremos laterales tiene las iniciales del fabricante P.F. (HERMANOS PROST-FRÉRES) adornado con dos rosas en ambos lados, que han sido mutiladas. El bastidor también sirve de apoyo a los cojinetes sobre los cuales giran los dos tambores motrices de la sonería y uno de marcha para el movimiento de los mecanismos del reloj. El tambor de la derecha, el más grande, sirve para dar los cuartos gobernado por una pesa de 100 kg, el tambor de la izquierda es el de las horas gobernado por una pesa de 75kg y en el centro ligado a los mecanismos de funcionamiento, el reloj ligado a los mecanismos de funcionamiento, el reloj tiene un reloj testigo y un péndulo oscilante que regula el escape de áncora, lo que recibe el movimiento de un tambor central gobernado por una pesa de 50 kg. Este conjunto dota al reloj de una autonomía de 120 horas (cinco días). Sin embargo, tras analizar el comportamiento del reloj se ha comprobado que en la práctica la autonomía es de aproximadamente dos días.



Figura 3. Sistema de contrapesos del reloj de las económicas.

El reloj cuenta con dos campanas para anunciar la hora, una de 45 cm de diámetro y 53 kg de peso, y la otra de 60cm de diámetro y 125 kilos. Las campanas proceden del reloj que existía en el Hospital de Marina. La mayor de ellas fue construida en 1740 por Simón Francisco Vidal y exhibe la siguiente inscripción que proclama su patronazgo regio: PHLLIPVS V D G HISPANIARUMREX POVR EL REAL. La menor se fundió en 1762 por autor desconocido, y está dedicada a IESUS MARIA IOSEPH. El precio de las mismas fue de 122,25 pesetas, pagado con fecha uno de marzo de 1888 al Ministerio de la Guerra.

La primera esfera era de cristal, pulida, pintada de blanco y embutida en un aro metálico sujeto a la pared con unas garras metálicas, tenía un diámetro de un metro, y la numeración arábica del 1 al 12 junto con los 60 minutos repartido alrededor de la esfera están grabados al ácido y pintados de negro. Las agujas del reloj reciben el movimiento desde el conjunto de toda su maquinaria a través de una larga varilla de transmisión de cinco metros de largo y unos piñones cónicos calcados a 90 grados, que le sirve al relojero para hacer algún ajuste puntual con la ayuda del reloj testigo. En la actualidad la esfera es de metacrilato blanco con numeración romana (del I al XII) pegada a la esfera junto con los 60 minutos.



Figura 4. Esfera del reloj de las económicas.



El reloj fue comprado en 1883 por D. Cirilo Molina y Cros por valor de 2.465 pesetas, estimándose en 15 pesetas los gastos para su mantenimiento mensual. En la base de madera que sirve de apoyo a toda la maquinaria de reloj se encuentra una placa cromada con la siguiente inscripción: “Sociedad Económica de Amigos del País Cartagena siendo director el Excmo. Sr. D. Cirilo Molina y Cros”. Para su mantenimiento se contrataba a un relojero, cobrando D. Agustín Porras, en 1951, 20 pesetas por cuidar y dar cuerda al reloj. En enero de 1895 fue necesaria su reparación, reparando uno de los martillos de las campanas y cambiando un aparato de su maquinaria.



Figura 5. Placa del reloj.

En 1904 se aprueba la colocación de dos faroles eléctricos detrás de la esfera del reloj, para permitir su lectura desde la calle durante la noche; también restablecer una escalera para el campanario, que fue destruida al variar las cubiertas. Como curiosidad, se cuenta que la esfera del reloj fue destruida por una bomba durante la guerra civil, “reparada” con dos trozos de cristal viejo que había en el patio.



Figura 6. Iluminación de la esfera

En la actualidad, la Sociedad de Económicas de Cartagena es una institución que continúa teniendo relevancia en la vida social, cultural y económica de la ciudad y la Región de Murcia, sigue siendo un importante centro cultural y social de la ciudad, ofreciendo una amplia variedad de actividades y programas, como conferencias, exposiciones, talleres y cursos, y continúa contribuyendo en el progreso y el bienestar de la sociedad por medio de la cultura, la educación y la tecnología. Del mismo modo, el reloj de las Económicas es considerado uno de los símbolos de la ciudad de Cartagena y es una atracción turística de la ciudad que se puede visitar en la torre de la Sociedad de Económicas.



Funcionamiento de un reloj de cuerda

Un reloj de cuerda antiguo de torre funciona mediante la energía almacenada en un resorte que se enrolla de forma manual mediante una llave. La energía potencial acumulada en el resorte es liberada gradualmente impulsando un conjunto de engranajes, a través de un mecanismo de escape encargado de controlar el ritmo al que el resorte se desenrolla, que a su vez hacen girar las manecillas del reloj. Cuando se da cuerda al reloj, se enrolla el resorte principal, que almacena la energía que impulsa el movimiento del reloj. A medida que el resorte se desenrolla, la energía se transfiere al mecanismo de escape, que a su vez controla el ritmo del movimiento del volante. El volante oscila hacia adelante y hacia atrás, y cada oscilación se registra mediante un engranaje que mueve las agujas del reloj.

Los elementos principales de un reloj de cuerda son:

- El *mecanismo del reloj*, constituido por un conjunto de engranajes, piñones y palancas que se mueven sincronizados para mantener la hora con precisión.



Figura 7. Mecanismo del reloj de las económicas.

- El *escape*, formado por una rueda de escape y un volante, que oscila de manera constante, tiene el objetivo de la transmisión del movimiento del péndulo al sistema de engranajes. El escape garantiza que el reloj avance a una velocidad constante y controlada para que no se produzcan adelantos ni retrasos en la hora.



Figura 8. Escape del reloj de las económicas.



- Las *manecillas*, son las agujas conectadas al sistema de engranajes que indican la hora, los minutos y los segundos.



Figura 9. Manecillas del reloj de las económicas.

- La *esfera*, es la cara del reloj donde se muestra la hora.



Figura 10. Esfera del reloj de las económicas.

- Las *campanas*, están conectadas al mecanismo del reloj mediante un sistema de martillos y palancas y suenan en momentos específicos del día para anunciar las horas y los cuartos de hora.
- El *péndulo*, es una barra metálica que realiza un movimiento oscilatorio constante y controlado que regula la velocidad del movimiento del reloj.



Figura 11. Péndulo del reloj de las económicas.



- El *regulador*, es el elemento que permite establecer la velocidad del movimiento del reloj, pudiéndose ajustar manualmente para corregir cualquier desviación en la precisión del tiempo.

Todas estas partes del reloj trabajan conjuntamente con el fin de mantener la precisión del tiempo y hacer sonar las campanas en determinados momentos del día.

Los relojes de cuerda antiguos requieren mantener la energía potencial asociada al peso que es controlado por el cilindro central, lo que requiere subir dicho peso cada cierto tiempo para mantener la energía almacenada en el resorte. La frecuencia con la que se les debe dar cuerda depende de la capacidad del resorte y del diseño del reloj. Uno de los aspectos más importantes de este proyecto consiste en determinar cuándo se debe energizar el reloj para garantizar que permanezca siempre activo.



CAPÍTULO 3

OBJETIVOS



El objetivo principal de este proyecto es la automatización del funcionamiento de un reloj antigua preservando su estructura y funcionamiento. Para alcanzar este objetivo principal, he dividido este objetivo en dos subobjetivos fundamentales que serían la automatización del proceso de energización (dar cuerda) y la discriminación del horario de toque de campanas, para preservar el descanso de los vecinos en horas nocturnas. A su vez, los subobjetivos principales se han dividido en tareas fundamentales que tienen importancia propia para el correcto desarrollo del proyecto global.

1. Automatizar el proceso de energización del reloj antiguo.

La primera cuestión que se debe resolver en este proyecto es la mecánica del sistema que se empleará para la automatización del proceso de energización del reloj antiguo, para ello es necesario establecer el funcionamiento que debe realizar el sistema que se está diseñando. En la energización del reloj se empleará un motor que transmitirá su movimiento al eje del reloj cuando sea necesario enrollar la cuerda con las pesas. Una vez energizado el reloj, es decir, cuando las pesas se hayan subido hasta el punto determinado, el eje del mismo deberá girar libremente liberando la energía potencial acumulada. Para alcanzar este objetivo, se han establecido los siguientes objetivos específicos:

1.1 Establecer los cálculos previos necesarios para diseñar el sistema automático.

Para que el sistema se adapte correctamente al reloj en cuestión será necesario hacer una serie de estudios previos sobre el mismo que permitan obtener resultados con los que determinar aspectos fundamentales como pueden ser la velocidad de giro del eje principal del reloj o el par que se requiere para energizarlo. Estos resultados son fundamentales, entre otras razones, para elegir las especificaciones de los motores de forma adecuada.

1.2 Diseñar y fabricar una estructura externa donde alojar los motores.

Con el fin de preservar la originalidad del mecanismo del reloj, los motores no pueden actuar directamente sobre los cilindros que deben mover. Por este motivo, es necesario diseñar una bancada externa y complementaria donde puedan ir alojados los motores de forma que simulen el movimiento de la manivela manual que se ha utilizado hasta el momento para energizar el reloj.

1.3 Establecer un elemento de acople y desacople.

Una vez fabricada y montada la estructura que albergará los motores, habrá que establecer un elemento mecánico que permita transmitir el movimiento del eje motriz al eje conducido, es decir, del motor al reloj, durante la energización del reloj y que el reloj se mueva libremente mientras libera energía potencial.



Una vez tratado el aspecto mecánico, se deberá estudiar la parte electrónica del sistema. Esta parte comprende todos los elementos electrónicos, como pueden ser controladores, sensores y actuadores, que forman parte del sistema, así como su programación. A continuación, se recogen los objetivos específicos que inciden en este ámbito:

1.4 Establecer el elemento de control del proceso automático.

Como controlador se pretende emplear un PLC igual o similar a los que se utilizan en las prácticas de la asignatura de Automatización Industrial, con el fin de poder aplicar en este proyecto los conocimientos adquiridos en la misma. Sin embargo, más adelante se estudiará la idoneidad de este tipo de controlador para este proyecto en concreto.

1.5 Definir los actuadores y sensores del sistema automático.

El autómatá permitirá activar los actuadores y obtener la información de los sensores que formen parte del sistema para que este funcione según los requisitos establecidos. Estos sensores y actuadores se elegirán atendiendo a los resultados de los cálculos previos obtenidos en el objetivo 1.1 y a las propias características del reloj. Este aspecto resulta fundamental debido a que, al tratarse de un proyecto práctico, será necesario estudiar y tomar decisiones que se adapten a las particularidades del proyecto motivadas por las condiciones e incidencias que puedan surgir durante la implementación del mismo.

1.6 Detectar y corregir los puntos críticos del funcionamiento del sistema automático.

Resulta necesario conseguir que el sistema sea robusto desde el punto de vista de la seguridad, es decir, el sistema debe comportarse según lo esperado ante posibles fallos o paradas de emergencia. Con este fin, se pretende monitorizar los puntos críticos en el funcionamiento del reloj y corregir o adaptar el proceso para que continúe funcionando correctamente. Para ello, se utilizará como herramienta la guía GEMMA para realizar un estudio de los modos de marcha y paro del sistema y de los saltos o transiciones entre los distintos modos de funcionamiento.

1.7 Programar el sistema automático.

La programación del autómatá se realizará a través de TIA Portal y la lógica de todos los programas que se utilicen a lo largo del proyecto se verán recogidos en el correspondiente Grafcet o diagrama de bloques. Estos diagramas irán acompañados de una breve descripción de las etapas, así como de las entradas y salidas del autómatá que estén involucradas.

2. Automatizar el funcionamiento de las campanas.

El siguiente objetivo del proyecto consiste en controlar el sistema de campanas para que suenen únicamente dentro de un horario determinado. Para alcanzar este objetivo general, se han definido los siguientes objetivos específicos:



2.1 Reproducir el proceso de energización del cilindro principal en los cilindros de las campanas.

El sistema deberá contar con unos motores adicionales encargados de energizar los cilindros complementarios del reloj que hacen que las campanas de este suenen marcando las horas. Para llevar a cabo la energización de estos cilindros se pretende seguir la misma estrategia definida para el cilindro principal.

2.2 Establecer el elemento de bloqueo/activación de las campanas.

Es necesario establecer un elemento mecánico que permita que las campanas suenen cuando se libere la energía de los cilindros del reloj únicamente durante el día. Se debe prestar especial atención para que este elemento no debe suponer un bloqueo en el funcionamiento del reloj durante el periodo de tiempo en el que las campanas no deben sonar.

2.3 Programar el horario de funcionamiento de las campanas.

Para limitar el horario de funcionamiento del sistema de campanas, el autómatas debe tener una correcta configuración de la hora. El software TIA Portal cuenta con los bloques necesarios para realizar dicha configuración.



CAPÍTULO 4

CÁLCULOS PREVIOS



Velocidad angular del eje del reloj

1. Programa “Test dientes/hora”:

Para que el programa final se ajuste adecuadamente al reloj en el que va incorporado el sistema, es necesario conocer una serie de parámetros del reloj y su funcionamiento. En concreto, el primer test pretende determinar la relación entre la velocidad angular de un engranaje de fácil acceso y la velocidad angular del eje principal del reloj. El engranaje del eje principal del reloj no se encuentra lo suficientemente accesible como para posicionar un sensor que detecte el paso de los dientes, por lo que resulta más conveniente detectar los dientes de otro engranaje más accesible. El test evaluará el número de dientes de uno de los engranajes que pasan por un punto en un determinado periodo de tiempo. Esto permite establecer la velocidad del engranaje, lo que será fundamental para controlar el giro que debe realizar el motor durante la etapa de funcionamiento del reloj para que no afecte al giro del eje del mismo. En concreto, el test evaluará el número de dientes que detecta el sensor en periodos de 60 minutos, durante una duración total de 24 horas. Almacenando los datos de 24 horas distintas, lo que se pretende reducir al máximo posibles errores en el muestreo.

Para establecer la relación entre la velocidad angular del engranaje más accesible y la velocidad angular del eje principal del reloj, se realizará el “Test dientes/hora” dos veces. Para el primer test, el sensor se coloca en un punto fijo donde detecte la presencia o ausencia de un diente del engranaje accesible. Para el segundo test, el eje principal del reloj tiene acoplado una pieza con un número de dientes determinado y el sensor detectará los dientes de este acoplamiento. Combinando los resultados de ambas experiencias, se puede calcular la relación entre la velocidad de giro del eje y del engranaje con el objetivo de utilizar el engranaje más accesible como referencia de la posición del eje del reloj.

A continuación, se muestra el diagrama de bloques en el que se basa el programa:

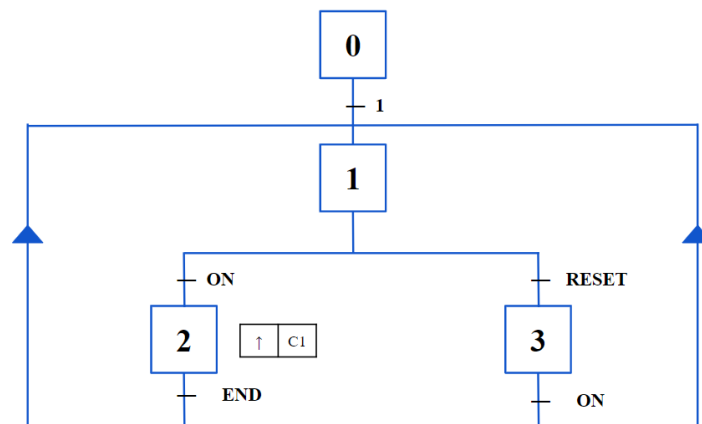


Figura 12. Grafcet N°1.

El diagrama representado en la figura anterior consta de las siguientes cuatro etapas:

- *First Scan* (etapa 0): Esta etapa permite activar todas las marcas del sistema que se requieren a lo largo del programa. En el siguiente capítulo del documento se especifica el software empleado para programar el autómatas, ya que este cuenta con un bloque específico para llevar a cabo esta tarea.



- *Inicio hora* (etapa 1): Se reinicia la hora local del autómatas para que, cuando pase a la etapa dos del diagrama, el tiempo esté inicializado en cero.
- *Contador* (etapa 2): Esta es la etapa principal del programa. Aquí se cuentan las veces que se activa el sensor durante una hora y guarda el valor en una posición del array de los datos del test.
- *Reinicio* (etapa 3): Se inicializan en cero todos los valores del array que almacena los datos del test. Esta etapa permite garantizar que al iniciar el test no haya ningún dato guardado en el array que pueda provocar una evaluación incorrecta.

Cabe mencionar que la etapa número tres no se puede juntar con la etapa uno, debido a que se reiniciarían los datos medidos del test cada vez que se apaga y enciende el autómatas. Separando las etapas, se puede llevar el autómatas a hacer las mediciones a la torre del reloj y traerlo al laboratorio para leer los datos desde aquí sin perderlos.

Se procede a explicar las condiciones que permiten pasar de una etapa a otra del diagrama:

- *ON*: Para iniciar el test hay que activar una de las entradas del autómatas.
- *RESET*: La inicialización de los valores tomados en el test se realizará cuando al encender el autómatas en vez de activar la entrada de la condición ON se activa la de RESET. Como herramienta de seguridad se bloqueará la entrada de RESET una vez que se haya realizado el test, con el fin de evitar que se pierdan los valores durante el transporte del autómatas desde la torre del reloj al laboratorio.
- *END*: A diferencia de las anteriores, esta condición no se activa con una de las entradas del autómatas, sino que se cumple cuando la hora local es “23:59:59”.

Una vez realizado el “Test dientes/hora” en el engranaje accesible del reloj, se han recogido los datos obtenidos en la siguiente tabla:

Hora:	Número de dientes:	Hora:	Número de dientes:
1	1792	13	1798
2	1798	14	1797
3	1798	15	1798
4	1797	16	1798
5	1798	17	1798
6	1797	18	1797
7	1798	19	1798
8	1797	20	1797
9	1798	21	1798
10	1797	22	1797
11	1798	23	1798
12	1797	24	1798



En vista de dichos resultados, podemos establecer que la media es de 1797.37 dientes por hora, es decir, 0.5 dientes por segundo.

Al repetir el mismo test en el acoplamiento del eje, los resultados son los siguientes:

Hora:	Número de dientes:	Hora:	Número de dientes:
1	1	13	1
2	2	14	2
3	1	15	1
4	1	16	1
5	2	17	2
6	1	18	1
7	1	19	1
8	2	20	2
9	1	21	1
10	1	22	1
11	2	23	2
12	1	24	1

La media de estos resultados es de 1,2 dientes por hora. El número de dientes del acoplamiento es 3, por lo que la velocidad angular del eje se puede calcular como:

$$\omega_{\text{eje}} = \frac{\alpha}{t} = 1.2 \cdot \frac{360}{3} = 144 \text{ }^\circ/\text{h}$$

Por lo tanto, la relación entre el número de dientes del engranaje accesible y el ángulo que recorre el eje del reloj es:

$$\frac{144 \frac{^\circ}{\text{hora}}}{1797.37 \frac{\text{dientes}}{\text{hora}}} = 0.08 \frac{^\circ}{\text{diente}}$$



Momento de fuerza necesario para energizar el reloj.

A la hora de definir las características que deben tener los motores empleados en el proyecto resulta fundamental establecer el par que deben ser capaces de transmitir. Al no contar con un medidor de par expreso con el que determinar el momento de fuerza que hace que el cilindro principal del reloj se mueva, el par se ha estimado de forma orientativa y se han escogido unos motores con un par considerablemente mayor para garantizar que son capaces de generar el momento suficiente para mover el cilindro.

El par o momento de fuerza, se conoce en física como una magnitud que describe la tendencia de una fuerza a rotar un objeto alrededor de un punto de pivote o eje. El par se relaciona con la fuerza aplicada y la distancia desde el punto de aplicación de la fuerza hasta el eje de rotación. Matemáticamente, el momento de fuerza (τ) se calcula como el producto del valor de la fuerza aplicada en un objeto (F) y la distancia desde el punto de aplicación de la fuerza hasta el eje de rotación (r).

$$\tau = r \cdot F$$

En el Sistema Internacional (SI), el par se expresa en unidades de Newton metro (Nm)

Para determinar el par que hace que el cilindro del reloj gire se ha utilizado la manivela con la que se da cuerda al reloj y una serie de pesos. Multiplicando la longitud de la manivela por el peso que hace que se mueva el cilindro, se puede obtener una medida orientativa del momento de fuerza. La manivela en cuestión tiene una longitud de 20 cm y empezó a girar al colocar un peso de 17,5 kg en su extremo. De este modo, el par resultante es:

$$\tau = 0.2 \cdot 9.81 \cdot 17.5 = 34.34 \text{ Nm}$$

Por motivos de seguridad el resultado anterior se ha multiplicado por dos, con el fin de garantizar que el motor tenga la fuerza suficiente como para dar cuerda al reloj. Por lo tanto, se establece que el par de los motores debe ser al menos de 68.67 Nm.



CAPÍTULO 5

MATERIAL Y MÉTODOS



Hardware

Autómata

El autómata que se ha escogido para incorporar en el proyecto es un PLC Siemens S7 1200. Este autómata programable presenta un diseño compacto y permite la utilización de una gran variedad de instrucciones de programación. En concreto, este modelo de PLC tiene la potencia suficiente como para controlar una gran cantidad de dispositivos a través de la programación que se realice en su interior.

Algunas de las principales características por las que se trabaja con este autómata son: la flexibilidad que ofrece para controlar cualquier dispositivo o actuador externo, el amplio juego de instrucciones que se pueden utilizar para programación, que admite funciones matemáticas complejas y diferentes lenguajes de programación, que se puedan acoplar hasta 8 módulos de entradas y salidas y hasta 3 módulos de comunicaciones adicionales, se puede utilizar una contraseña para proteger el autómata, contiene protección de “KNOW HOW” para esconder código en el programa y funciones de diagnóstico Online para detectar errores, que permite utilizar tarjeta de memoria y que la programación se pueda realizar con el Software TIA Portal.



Figura 13. PLC Siemens S7 1200.

En la imagen anterior se detallan las distintas partes del autómata S7 1200 que se pueden ver desde fuera:

- *Conector de corriente:* Para proporcionar alimentación al autómata. Es necesario revisar en el manual del autómata si se debe alimentar a 230VAC o a 24VDC.
- *Memory Card:* En esta ranura se puede introducir una tarjeta de memoria de Siemens para transferir un programa de un autómata a otro o para aumentar la memoria de trabajo.
- *Conectores extraíbles:* Estos conectores permiten acoplar módulos extraíbles al autómata en caso de que sea necesario. En este proyecto no se van a utilizar módulos extraíbles, por lo que no se hará uso de estos conectores.
- *LEDs de estado:* Estos LEDs indican el estado de cada una de las entradas y salidas del autómata. Los LEDs indican que dicha entrada o salida está activa, lo que resulta útil para distinguir entre errores de programación y errores en los dispositivos que van conectados a las entradas y salidas.



- *Conector PROFINET*: A través de él es posible acceder al PLC mediante un cable ETHERNET. Esta comunicación es la que se utiliza para subir y cargar en el autómata el programa creado mediante el Software TIA Portal.
- *Carcasa*: Esta carcasa compacta permite proteger al autómata de las condiciones ambientales que le rodean y que pueden ser perjudiciales para todos los componentes electrónicos que contiene.

Además de los elementos anteriores, el autómata lleva incorporado en su interior los siguientes elementos:

- *Microprocesador*: Esta unidad de procesamiento es la encargada de ejecutar el programa que se cargue en el autómata.
- *Circuitos de entrada y salida integrados*: A estos circuitos se conectan todos los sensores y actuadores que se requieran en cada aplicación.

Motores

Los motores que componen el sistema son unos motores de corriente alterna con inductor desfasado para poder cambiar el sentido de giro, concretamente unos motores modelo XD80KTYZ-BC-S1 fabricados por XIN DA MOTOR CO LTD. Estos motores tienen una tensión de alimentación de 220 Voltios y una frecuencia de alimentación de 50-60 Hz, valores que coinciden con el estándar de la red eléctrica suministrada por la red en la mayoría de países europeos por lo que se pueden conectar a un enchufe ordinario en España. Otra característica a tener en cuenta es la potencia nominal del motor, que es de 28 W durante su funcionamiento normal. En particular, el modelo escogido tiene una velocidad de rotación fija de 5 rpm.



Figura 14. Motor XD80KTYZ-BC-S1.

Tal y como se ha establecido el funcionamiento del sistema de automatización, es necesario alternar el sentido de giro de los motores. Los motores de corriente alterna con inductor desfasado, también conocidos como motores asíncronos, generan el movimiento empleando la interacción de campos magnéticos rotativos entre el rotor y el estator. Para impulsar la rotación, el inductor desfasado crea un campo magnético en el rotor que busca alinearse con el campo del estator. Al cambiar la secuencia de fases de la corriente alterna, lo que se consigue es cambiar el sentido de giro del motor. Esta función la debe realizar algún dispositivo de forma automática actuando como un interruptor, como puede ser un relé.



Bancada externa

Los motores se encuentran alojados en una estructura externa al reloj, diseñada a tal efecto con el objetivo de preservar el mueble y mecanismo originales del reloj, considerado como patrimonio. La estructura en cuestión es una bancada metálica equipada con elementos móviles que permiten ajustar de forma precisa la posición de los motores. Este diseño permite lograr un ajuste perfecto entre los motores y los tres ejes del reloj que deben hacer girar: el eje del cilindro principal del reloj y los dos ejes de los cilindros de las campanas. Cabe mencionar que realizar la instalación de los motores utilizando una estructura externa permite preservar la integridad y autenticidad del mecanismo original del reloj, lo que representa un aspecto fundamental en este proyecto debido al valor histórico y cultural del reloj en cuestión. Además, el uso de la estructura facilita posibles labores de mantenimiento y reparación que puedan ser requeridas en el futuro, ya que se puede acceder a los motores y estos pueden ser reemplazados de manera más sencilla sin interferir con el sistema principal del reloj.

Esta estructura cuenta con un total de doce piezas que han sido ensambladas mediante el uso de tornillos, tanto para la sujeción de las piezas entre sí como para su sujeción con la bancada. Estas piezas desempeñan un papel fundamental para conseguir la correcta alineación y fijación de los motores en la estructura externa. Además, las patas de la estructura son regulables de tipo Silentblock, lo que ofrece ventajas significativas en términos de nivelación, absorción de vibraciones, protección de superficies y durabilidad. Considerando factores como durabilidad, resistencia y compatibilidad con el sistema del reloj se han fabricado las piezas de la estructura en hierro galvanizado soldado y pintado.

La bancada, además de servir como soporte para los motores, también se encarga de proteger el mecanismo original del reloj de posibles daños durante el proceso de instalación y funcionamiento de los motores. Gracias a su diseño y construcción robusta, la bancada garantiza la estabilidad y seguridad de los motores, evitando movimientos indeseados o vibraciones que puedan afectar el funcionamiento del reloj.

Una vez colocados los motores en la estructura externa, se deben realizar los ajustes necesarios para garantizar que el sistema funcione correctamente. Para ello, se han realizado mediciones precisas y utilizado las herramientas adecuadas con el fin de garantizar la alineación óptima de los motores con los ejes correspondientes del reloj.

A continuación, se muestra el diseño de los distintos elementos de la bancada en proyección isométrica:

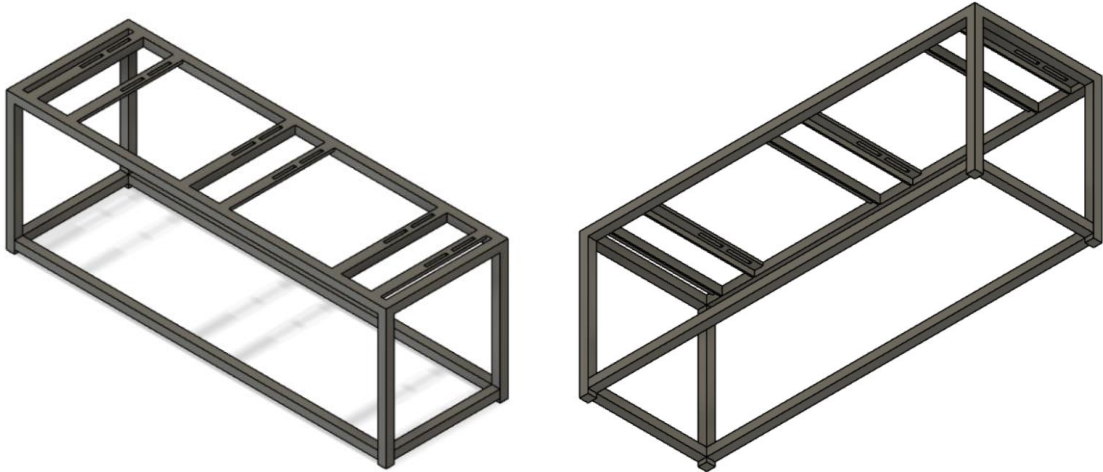


Figura 15. Estructura principal de la bancada.

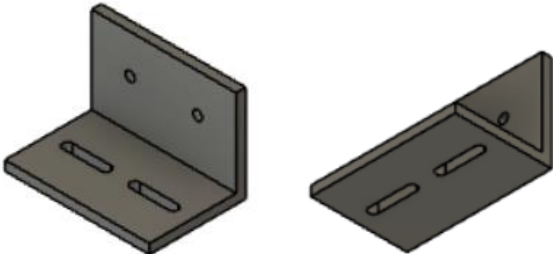


Figura 16. Pieza estructura motores N°1.

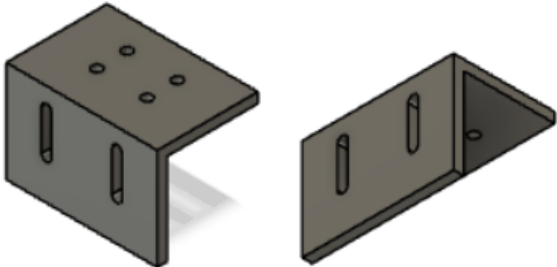


Figura 17. Pieza estructura motores N°2.

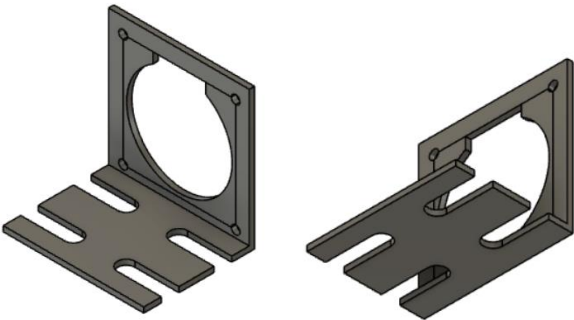


Figura 18. Pieza estructura motores N°3.



Las siguientes imágenes muestran el aspecto final de la bancada con los motores, una vez completada la fabricación y el montaje de la misma.

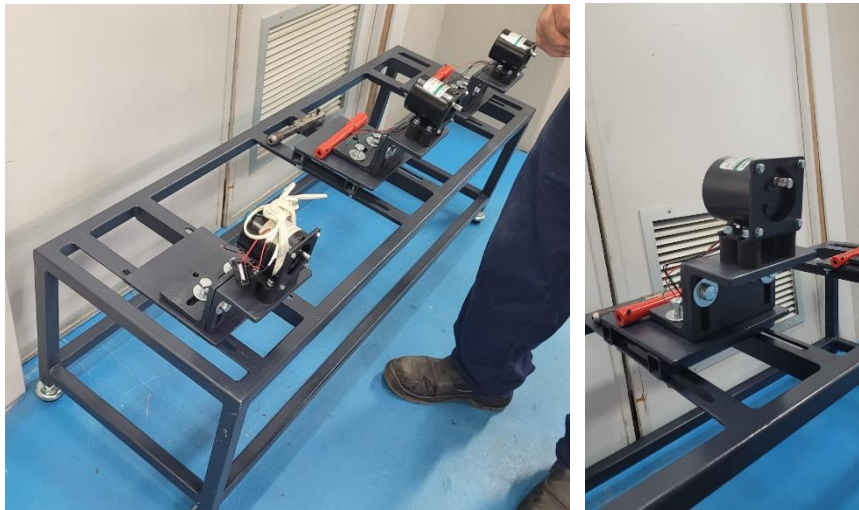


Figura 19. Bancada montada.

Relés

Los relés son dispositivos electromecánicos que se pueden emplear en un circuito eléctrico para controlar el flujo de corriente eléctrica. Un relé tiene una bobina electromagnética que con su activación hace que se abran o se cierren un conjunto de contactos eléctricos, permitiendo o interrumpiendo el flujo de corriente eléctrica en el circuito. Las aplicaciones más frecuentes de los relés son aplicaciones de automatización industrial, sistemas de seguridad, control de motores, etc.

El funcionamiento de un relé se basa en un principio electromagnético. Al aplicar una corriente eléctrica a la bobina del relé, se genera un campo electromagnético alrededor de la misma. El campo magnético atrae o repele los contactos del relé, dependiendo del diseño del mismo, que hace que se abran o se cierran. Por el contrario, cuando no se aplica ninguna corriente eléctrica a la bobina del relé, el campo magnético se interrumpe y los contactores vuelven a su posición original. En un relé de contacto normalmente abierto (NO), la corriente eléctrica activa la bobina y los contactos se cierran, permitiendo que la corriente eléctrica fluya a través del relé. En un relé de contacto normalmente cerrado (NC), la corriente eléctrica activa la bobina y los contactos se abren, interrumpiendo el flujo de corriente eléctrica en el circuito.

Entre las características de un relé, es importante distinguir a qué corresponde cada una de las tensiones con las que trabaja para garantizar que se está haciendo de forma segura y evitar romper el dispositivo o tener un accidente.

- *Tensión nominal de la bobina o tensión de control:* Es la tensión que se debe aplicar a la bobina del relé para que se active o se desactive, suele tener valores entre los 5VDC y los 240VAC. La tensión de control de los relés utilizados en el proyecto es de 24 VDC.
- *Tensión nominal de contacto:* Corresponde con la tensión máxima que pueden soportar los contactos del relé cuando se encuentra en un circuito cerrado, normalmente está en el rango de los 12VDC a los 600VAC. Los relés utilizados tienen una tensión nominal de contacto de 1KV.



- *Tensión nominal de aislamiento*: Es la tensión máxima que puede soportar el dispositivo para que no se produzca un cortocircuito entre los contactos abiertos del relé, suele estar en el rango de los 12VDC a los 600VAC. La tensión nominal de aislamiento de los relés utilizados es de 1KV.

Estos dispositivos resultan idóneos para este proyecto ya que los motores no se pueden conectar directamente al autómatas porque trabajan a una tensión superior, de 230 voltios, mientras que las salidas del autómatas están a 24 voltios. De este modo, el relé actúa como un aislante eléctrico entre ambos circuitos.

El siguiente esquema representa la conexión de cada uno de los motores que lleva incorporado el sistema:

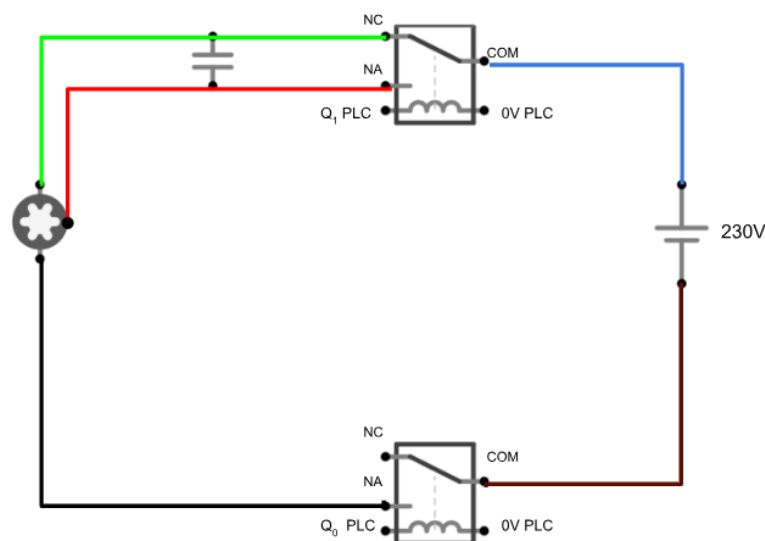


Figura 20. Esquema eléctrico motores.

El primer relé, es decir, el que está conectado a la salida Q0 del autómatas, es el que permite encender o apagar el motor. Cuando la salida Q0 se activa, el contacto pasa de NO a NA, cerrando la malla del circuito del motor y permitiendo que la corriente circule por el mismo haciendo que el motor funcione. De este modo, el motor gira siempre que la salida Q0 del autómatas está activa.

Como se explicó anteriormente, para cambiar el sentido de giro de los motores basta con cambiar la secuencia de las fases de la corriente alterna. De esta acción es de la que se encarga precisamente el segundo relé, es decir, el que está conectado a la salida Q1 del autómatas. Los motores constan de dos cables, uno rojo y otro verde, de forma que si la corriente circula por el cable rojo la secuencia de las fases es una y si la corriente circula por el cable verde la secuencia es otra. De este modo, activando o desactivando la salida Q1 lo que se consigue es alternar la secuencia de las fases de la corriente alterna y, siempre que el motor esté funcionando, cambiar el sentido en el que éste gira.



Sensores inductivos

Este tipo de sensores trabajan mediante el principio de inducción electromagnética. El dispositivo emite un campo magnético de alta frecuencia que es perturbado cuando un objeto de material conductor se acerca a la superficie del sensor. El sensor detecta el cambio en el campo magnético, lo que permite determinar la presencia o ausencia del objeto dentro de un rango determinado. La distancia a la que el sensor es capaz de identificar una perturbación en el campo magnético, denominada distancia de detección, es una de las características más importantes de los sensores inductivos y depende de la frecuencia del campo magnético, la forma del sensor y el tamaño del objeto que se está detectando.

En cuanto a la aplicación de los sensores inductivos, cabe mencionar que son adecuados para detectar objetos metálicos y otros materiales conductores, pero no son efectivos para detectar materiales no conductores, como plásticos o madera, debido a que un material no conductor no provoca ninguna perturbación en el campo generado por el sensor. Además, los sensores inductivos no requieren tener un contacto físico con el objeto que se quiere detectar, por lo que son adecuados para aplicaciones donde se debe realizar una medición sin tocar el objeto y con el paso del tiempo presentan menor desgaste que otros sensores que requieren contacto como los finales de carrera. Otras ventajas de estos sensores son la frecuencia de trabajo, su inmunidad a interferencias externas y la salida de señal. Los sensores inductivos trabajan en un amplio rango de frecuencias, que generalmente oscilan entre pocos KHz hasta varios MHz, por lo que se pueden adecuar en función de la aplicación y el tipo de objeto que se está detectando. Las interferencias eléctricas y electromagnéticas externas no provocan perturbaciones significativas en las detecciones de estos sensores. Los sensores inductivos pueden tener salidas analógicas, proporcionando una señal proporcional a la distancia entre el objeto y el sensor, o digitales, indicando únicamente la presencia o la ausencia del objeto.

Lo que se pretende detectar en este test son los dientes de uno de los engranajes metálicos que componen el reloj, de forma que el objeto provocará una perturbación en el campo magnético y el sensor lo detectará sin problema. Además, como se requiere que el mecanismo de automatización del proceso de energización interfiera lo menos posible con el mecanismo del reloj, un sensor que no requiere contacto físico resulta adecuado para esta aplicación. Características como la frecuencia de trabajo o la inmunidad a interferencias externas, no son de vital importancia para el proyecto, ya que el entorno de trabajo no es un entorno industrial donde puedan estar presentes otros dispositivos eléctricos o electromagnéticos. La señal de salida de los sensores inductivos que se emplean es de tipo digital, lo que simplifica la programación del autómatas y resulta suficiente para este trabajo.

Concretamente los sensores inductivos utilizados en el proyecto son los siguientes:

- Sensor inductivo IME18-05BNSZW2KF38.



Figura 22. Sensor inductivo IME18-05BNSZW2KF38.

- Sensor inductivo XS612B1NAL2 (- L54mm - brass -Sn4mm - 12..48VDC - cable 2m).



Figura 21. Sensor inductivo XS612B1NAL2.

Software

TIA Portal

La programación del autómatas se ha realizado a través de TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal), que es una plataforma de ingeniería de Siemens que integra todas las etapas del ciclo de vida de automatización industrial en un único entorno de software. Esto incluye el diseño del hardware, la programación del software, la configuración de la red y la visualización de los sistemas. Además, TIA Portal ofrece herramientas intuitivas y eficientes que facilitan el proceso de desarrollo de sistemas de automatización. Estas características, entre las que destacan la reutilización de bloques de programación, bibliotecas de funciones predefinidas y la posibilidad de copiar configuraciones, permiten ahorrar tiempo y esfuerzo al desarrollar proyectos. También ofrece herramientas avanzadas de diagnóstico que facilitan la detección y resolución de problemas en los sistemas de automatización, lo que ayuda a minimizar el tiempo de inactividad y optimizar el rendimiento del sistema. Por otro lado, esta plataforma es compatible con una amplia gama de dispositivos de automatización de Siemens, lo que proporciona una gran flexibilidad al seleccionar y combinar componentes para adaptarse a las necesidades específicas de cada proyecto.



CAPÍTULO 6

PRIMERA PROPUESTA



Sistema de acople y desacople.

Una vez establecido el funcionamiento del sistema, el siguiente paso será buscar un elemento mecánico que permita transmitir el movimiento desde el eje del motor hasta el eje del reloj mientras se de cuerda al mismo y que no transmita ningún movimiento mientras el reloj funciona mediante energía potencial. A continuación, se exponen las posibles soluciones que se van a considerar.

A) *Rueda libre:*

El sistema de rueda libre es un sistema mecánico que permite a un eje girar libremente en un sentido, mientras que en sentido contrario es engranado recibiendo el movimiento del eje motriz. Esta solución fue la primera que se planteó, pero se descartó rápidamente porque, al engranar el eje motriz del motor al eje del reloj para darle cuerda, el motor no permitiría que el eje del reloj girase por su cuenta durante el funcionamiento, sino que estaría actuando como un freno.

B) *Embrague:*

El embrague es un mecanismo que permite transmitir o interrumpir la transmisión de una energía mecánica a su acción final de manera voluntaria, dicha transmisión o interrupción debe efectuarse tanto si los ejes están en movimiento como si están parados. Este sistema permitiría el funcionamiento deseado del reloj y, tras considerar los distintos tipos de embrague que existen, se realizó una comparación más exhaustiva entre embragues electromagnéticos y embragues de fricción.

Por un lado, se encuentran los embragues electromagnéticos, estos embragues actúan como un imán cuando circula corriente por la bobina que se encuentra en el interior de la corona de acero provocando que se produzca el acoplamiento. Entre las ventajas de estos dispositivos se encuentra lo sencillo que sería controlar el acoplamiento o desacoplamiento de los ejes a través del autómatas. Sin embargo, este factor se vería desplazado al considerar el precio de este tipo de embragues (cuánto) y el par reducido que son capaces de transmitir los embragues que se encuentran en tiendas enfocadas en consumidores particulares, que es aproximadamente de 3 Nm siendo insuficiente para mover el eje del reloj.

Por otro lado, los embragues de fricción están formados por una parte motriz, que es la que se encarga de transmitir el giro a la parte conducida. Para que se transmita el movimiento es necesario que se produzca adherencia entre estos dos elementos, por lo que debe haber una presión determinada que acople fuertemente uno contra el otro. Con el objetivo de que no se produzca un deslizamiento relativo entre la parte motriz y la parte conducida durante la transmisión del movimiento, es necesario que la presión ejercida por los muelles y la adherencia de las superficies de contacto sean adecuadas, estos parámetros establecen fundamentalmente el par máximo que el embrague es capaz de transmitir. Este tipo de embrague es más adecuado para la aplicación del sistema del reloj debido a que soportan mayor par de transmisión, siendo el máximo que se ha encontrado de 300 Ncm. Sin embargo, requieren de un accionamiento mecánico, por lo que no se podría accionar directamente desde el autómatas, y esto provocaría que la mecánica del sistema se complicase.



C) Acople con juego:

Otra opción es emplear un acople con juego de forma que a la hora de dar cuerda al reloj los ejes queden acoplados y el eje motriz transmita su movimiento, mientras que cuando el reloj esté funcionando por energía potencial se vaya aprovechando el juego del acople para que no haya contacto entre los dos ejes. De este modo, se puede utilizar el autómeta para que haga girar el motor poco a poco de forma que no interfiera con el movimiento del eje del reloj. Esta última opción es la opción más simple desde el punto de vista mecánico y permite controlar todo el funcionamiento del sistema a través del autómeta.

Las **conclusiones** obtenidas de esta primera búsqueda de información es que la solución denominada como acople con juego es una buena opción para comenzar a probar. Esto es debido principalmente a la simplicidad mecánica, ya que se busca conseguir un sistema que perdure en el tiempo y que no requiera de mucho mantenimiento. Esta solución también permite simular el comportamiento del sistema en el laboratorio sin ser necesaria una inversión inicial demasiado costosa. De este modo, las primeras pruebas del sistema se realizarán con este mecanismo y, en caso de obtener unos resultados insuficientes, se evaluaría el uso de la opción del embrague.

Tras considerar si sería más conveniente el diseño y la fabricación de un acoplamiento o comprar uno comercial, se ha optado por comprar uno para probar su funcionamiento y, en caso de que los resultados no sean los esperados, fabricar uno propio. El acoplamiento que se ha elegido para hacer las pruebas es un acoplamiento flexible con las siguientes características:

- El eje de acoplamiento está confeccionado con acero 45#, útil para unir servomotores, motores paso a paso, codificadores, atornilladores, plataformas de máquinas, etc.
- Diámetro interior: 10mm a 10mm/0,39 pulgadas a 0,39 pulgadas
- Longitud: 52mm/2,05 pulgadas
- Diámetro exterior: 44,5mm/1,75 pulgadas
- Ancho de la ranura: 4mm/0,16 pulgadas; Tamaño de rosca: M6*1,0; Color: Negro
- La flexibilidad del eje de acoplamiento suprime la tensión entre el motor y los componentes de accionamiento.
- Alta dureza, durabilidad y excelente respuesta.
- Error de +/- 0,1 pulgadas.

El acoplamiento está formado por dos piezas cilíndricas idénticas y una junta de goma. Las piezas tienen tres salientes o dientes de 40° de forma que, quitando la junta de goma, el acoplamiento tiene un margen de 40° entre las piezas principales. Este margen resulta conveniente para que el reloj pueda girar libremente durante un tiempo suficiente que se establecerá más adelante cuando se realicen las pruebas pertinentes sobre el propio reloj.



Figura 23. Acoplamiento mecánico.

La energización del reloj que hasta este momento se ha hecho de forma manual, se realizará con un sistema automático mediante un motor de corriente alterna controlado con un autómata:

El reloj comienza energizado con un determinado número de vueltas dado, en ese momento el motor gira durante un determinado tiempo en sentido contrario permitiendo que el reloj funcione por energía potencial durante un tiempo sin actuar como bloqueo.

Después el motor se mantiene en esa posición y, antes de interferir en el movimiento del eje del reloj, vuelve a girar un determinado ángulo. La duración en la que el motor se mantiene parado viene dada por el número de dientes del reloj que detecta el sensor que define la posición angular del eje del reloj.

Este proceso de giro y pausa se repite de forma continua hasta que las pesas del reloj llegan a la parte inferior.

En ese punto, es necesario volver al paso inicial de dar cuerda al reloj girando el motor en el sentido inicial.

De este modo, después de dar cuerda las dos piezas del acoplamiento quedan en contacto, tal y como se muestra en la figura 24. En ese momento, el motor se activa en sentido antihorario dejando las dos piezas del acoplamiento separadas entre sí, figura 25. Transcurrido un tiempo, el eje del reloj habrá recorrido el ángulo que separa las dos piezas, figura 26, y es necesario que se active el motor para volver a dar margen, figura 27.



Figura 24. Posición acoplamiento al dar cuerda.



Figura 25. Posición acoplamiento al dar margen después de dar cuerda.



Figura 26. Posición acoplamiento cuando el eje del reloj ha girado.



Figura 27. Posición acoplamiento al dar margen por segunda vez

El proceso consta de seis etapas:

- *First Scan* (Etapa 0): Esta etapa permite activar todas las marcas del sistema que se requieren a lo largo del programa.
- *Parada de emergencia* (Etapa 1): Esta etapa detiene el proceso de energización cuando el usuario activa la entrada del Reset.
- *Energización* (Etapa 4): Para dar cuerda al reloj se activa el motor en sentido CW (agujas del reloj) hasta que los pesos suban el mismo recorrido que han realizado mientras funcionaba el reloj.
- *Margen de giro* (Etapa 2): Es necesario que el motor gire un determinado ángulo en sentido opuesto al anterior, es decir, en sentido (CCW). Este ángulo se determina con el tiempo que debe estar el motor activado, para establecer dicho tiempo se utilizan los datos obtenidos en los test realizados anteriormente. En esta etapa se activa un



temporizador, que permite establecer la duración de la misma, y un contador, que almacena el número de dientes del engranaje del reloj que pasan por un determinado punto donde se encuentra el sensor.

- *Pausa* (Etapa 3): En esta etapa el motor se apaga hasta que sea necesario volver a dar margen de giro al eje del reloj. Para determinar cuándo es necesario volver a activar el motor se utiliza como dato la posición angular del eje del reloj, determinada a partir del número de dientes que ha detectado el sensor. Por lo tanto, el contador de pulsos del sensor que se inició en la etapa anterior debe seguir activado en esta etapa.
- *Reset de contadores* (Etapa 5): Etapa donde se ponen a cero los distintos contadores que intervienen en el proceso.

El diagrama de bloques que representa este proceso queda de la siguiente forma:

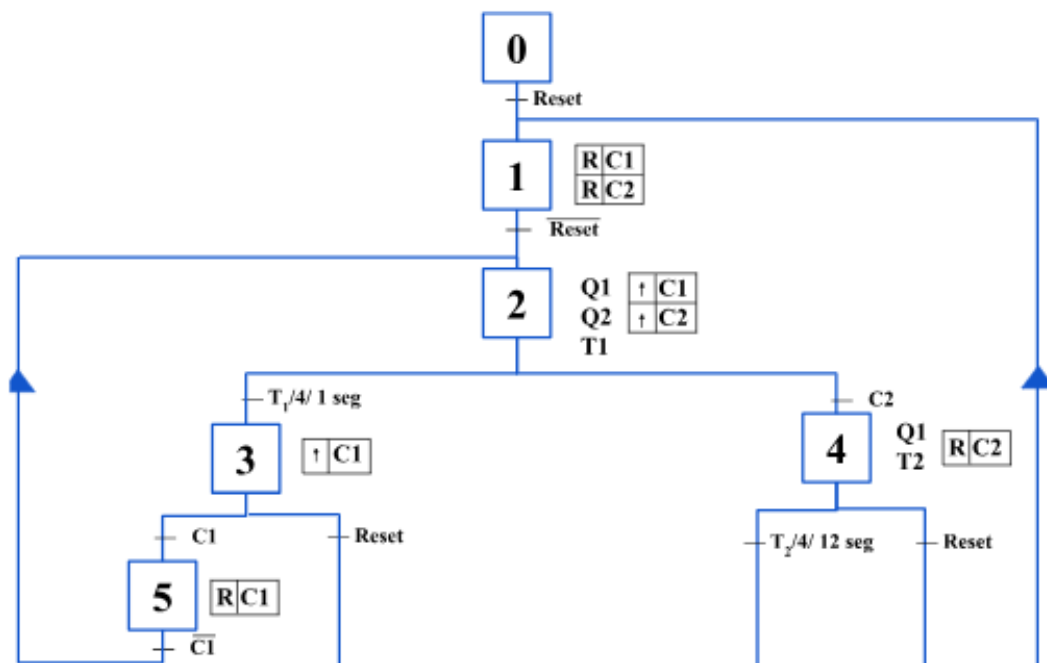


Figura 28. Grafcet N°2.

Las entradas, salidas, contadores y temporizadores que intervienen en el programa se explican a continuación:

- $Q1$: Es la salida que activa el motor. De este modo, el reloj funciona únicamente en las etapas en las que la salida $Q1$ está activa, mientras que en las demás el motor permanece parado.
- $Q2$: Esta salida determina el sentido de giro del motor. Cuando la salida $Q2$ está activa el reloj gira en un sentido antihorario y gira en sentido contrario cuando $Q2$ no está activa. Cabe mencionar que el motor debe estar funcionando para que gire en un sentido o en otro, si la salida $Q1$ está desactivada y, por lo tanto, el motor está parado, da igual el sentido de giro establecido.
- $I1$: Esta entrada del autómatas recibe la señal proporcionada por un sensor inductivo que detecta la posición de los dientes del engranaje principal del reloj.



- *I2*: La señal que recibe esta entrada es generada por un sensor tipo que detecta si las pesas han alcanzado la posición más elevada. Si bien no permite establecer la altura a la que están las pesas en cada momento, este sensor indica en qué momento el reloj está completamente energizado y no es necesario darle más cuerda.
- *C1*: Es un contador que mide el número de pulsos positivos de la entrada *I1*. Dicho de otro modo, *C1* cuenta el número de dientes del engranaje del reloj que pasan por el sensor. Esto permite establecer de forma indirecta la posición angular del eje del reloj, empleada para controlar el funcionamiento del motor de forma que se evite la obstaculización del movimiento del reloj.
- *C2*: Este contador mide el número de veces que se activa la etapa en la que se da margen al reloj. Con esto es posible calcular cuándo completa una vuelta, lo que resulta esencial para mantener constante la cuerda que tiene el reloj.
- *T1*: Este temporizador se utiliza para establecer el tiempo que el motor debe funcionar y, por lo tanto, el ángulo que debe girar, para que no interfiera en el funcionamiento del reloj.
- *Reset*: Es un interruptor que permite al usuario detener el proceso de energización del reloj. Cuando se activa esta entrada, el proceso se detiene, y cuando se vuelve a desactivar, el sistema realiza los movimientos necesarios para volver a retomar el proceso sin necesidad de que el usuario actúe físicamente.

Por último, se va a detallar en qué consisten cada una de las condiciones que se deben verificar para pasar de una etapa a otra en el diagrama de bloques:

- *I1*: La entrada del autómatas se activa cuando el sensor detecta un diente de la rueda del reloj.
- *I2*: La entrada del autómatas se activa cuando el sensor detecta que las pesas están arriba.
- *Reset*: La entrada del autómatas se activa cuando el usuario pulsa el interruptor de la parada de emergencia.
- *T1*: Ha transcurrido el tiempo establecido en el temporizador *T1*.
- *C1*: Se ha alcanzado el número de pulsos establecido en el contador *C1*, es decir, se ha contado un número determinado de dientes de la rueda dentada.
- *C2*: Se ha alcanzado el número de pulsos establecido en el contador *C2*, es decir, la etapa 2 se ha activado un número determinado de veces.

Tras cargar este programa en el autómatas y analizar su funcionamiento del sistema, se ha comprobado que el motor no opera de forma ideal, sino que en la práctica su funcionamiento es distinto al esperado. En primer lugar, el motor no alcanza el funcionamiento estacionario de forma instantánea, lo que dificulta el método necesario para establecer su velocidad de giro. De este modo, el ángulo que recorre el motor en el periodo de tiempo que está activo no coincide con el calculado. Además, al cambiar el sentido de giro el motor se para durante un corto periodo de tiempo hasta que funciona en sentido contrario. Esto provoca que el ángulo que da de margen la primera vez después de dar cuerda sea mucho menor que el resto de ocasiones.



Para subsanar este último aspecto, se ha creado una nueva etapa en el esquema GRAFCET para que el motor esté más tiempo dando margen justo después de dar cuerda (etapa 6) y otra para resetear el nuevo contador que establece el tiempo de la etapa anterior (etapa 7). El esquema del programa queda de la siguiente forma:

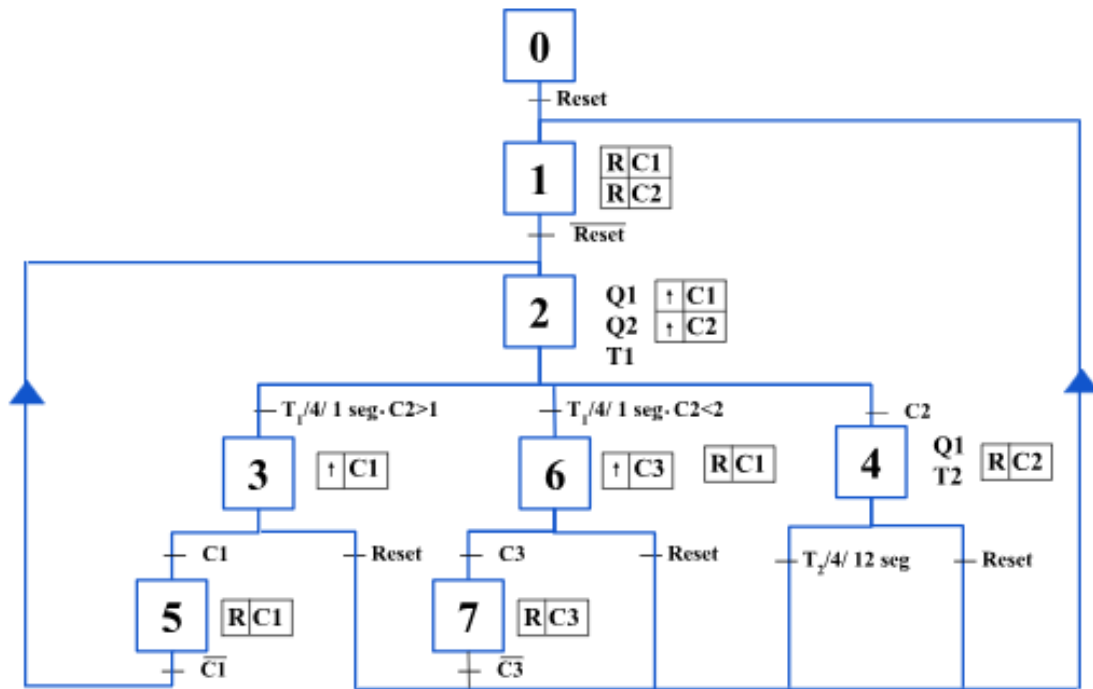


Figura 29. Grafcet N°3.

Este nuevo Grafcet hace una distinción sobre si es la primera vez que se da margen de giro al reloj después de energizarlo para realizar la compensación necesaria debido al comportamiento real de los motores utilizados y del propio mecanismo del reloj.



Conclusiones de la primera propuesta

Esta primera propuesta consistía en utilizar un acoplamiento entre el eje del reloj y del motor que permitiese el recorrido de un determinado ángulo entre ellos. De esta forma, el motor se activa en un sentido para dar cuerda y se activa de forma intermitente en sentido contrario para girar 30° , que es un ángulo inferior a los 40° tiene el acoplamiento de margen, para permitir que el cilindro principal gire libremente ese ángulo hasta que vuelva a ser necesario dar margen de nuevo. Para determinar cuándo es necesario dar cuerda y cuándo hay que dejar el margen de giro al reloj se utilizaba el número de dientes de una de las ruedas más accesibles detectado por un sensor inductivo. Tras establecer la relación entre el número de esos dientes y el ángulo recorrido por el eje principal del reloj de forma teórica, se implementó el programa basado en contadores y temporizadores que realizaba la secuencia descrita anteriormente.

Al realizar los últimos ajustes en el programa, se ha podido observar que los resultados han sido más favorables en el funcionamiento del sistema. A pesar de ello, todavía no se han alcanzado los objetivos deseados, ya que en cuestión de dos o tres días el reloj se detiene. La principal conclusión que se puede obtener de esta primera solución es que los comportamientos reales del reloj y del motor dificultan que sea posible tener un control sobre el utilizando únicamente temporizadores e información del reloj. La principal sospecha reside en que el movimiento del sistema de escape no es uniforme en el tiempo. De este modo, para garantizar un mayor control sobre el conjunto, resulta necesario buscar una manera de cuantificar cuánto se desplaza la pesa del reloj a través del mecanismo del resorte.

Una posible solución para esta situación se basa en emplear sensores para determinar la posición angular de los dos ejes involucrados de forma precisa, con el objetivo de reducir el error cometido y así garantizar que tanto el reloj como el motor realizan el movimiento esperado. El uso de sensores podría proporcionar información directa del reloj y del motor que permitiría realizar adaptaciones a los movimientos reales de estos, de forma que cualquier irregularidad que se presente podría corregirse.

Cabe mencionar que la estructura externa actual no está pensada para alojar sensores, lo que implica la necesidad de adaptar la estructura para integrar los sensores sin que estos afecten al mecanismo del reloj. Es necesario diseñar y fabricar componentes específicos para que se pueda llevar a cabo la integración y el posicionamiento adecuados de los sensores en el sistema.



CAPÍTULO 7

SEGUNDA PROPUESTA



En esta solución se mantiene el acople con juego de la solución anterior, pero esta vez no se determinan las posiciones angulares de los ejes mediante el tiempo y la detección de un determinado número de dientes del reloj, sino que se medirá directamente la posición de los ejes del motor y del reloj. Para controlar la posición angular de ambos ejes de forma más precisa se han diseñado unas piezas con forma de corona circular en las que irán insertados unos elementos metálicos distribuidos simétricamente. Utilizando dos sensores inductivos, uno para la corona del eje del motor y otro para la corona del eje del reloj, es posible determinar la posición del motor y del reloj para establecer cuándo es necesario dar margen al reloj y el ángulo exacto que gira el motor para dar ese margen.

Las coronas se han fabricado en primera instancia en PLA mediante fabricación aditiva y más adelante, en base a los resultados que proporcionen, se estudiará si este material resulta adecuado para esta aplicación o si resulta más conveniente fabricarlas en otro material con otras características. Para diseñar las coronas se ha tenido en cuenta el sitio donde van colocados los sensores inductivos que deben detectar los elementos metálicos de las mismas. Por esta razón, como el soporte de los sensores va colocado sobre la bancada de los motores, la corona del eje del motor es más pequeña que la del eje del reloj para evitar que la tape. A continuación, se muestra una representación tridimensional de ambas coronas:

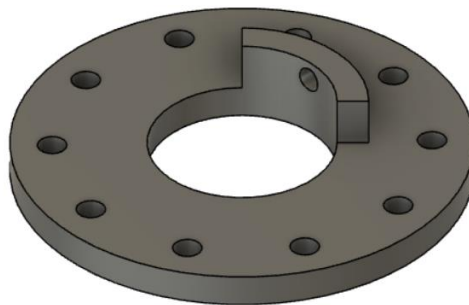


Figura 30. Corona motor.

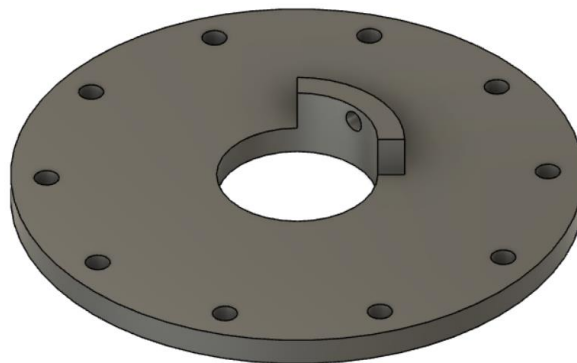


Figura 31. Corona reloj.



El soporte de los sensores se ha diseñado inicialmente en dos piezas separadas ensambladas mediante tornillos con el fin de que se pueda ajustar la posición de los sensores. También se ha fabricado el primer prototipo en PLA mediante fabricación aditiva. Esto permite estudiar si es necesario realizar algún ajuste en el diseño sin invertir muchos recursos. La siguiente imagen es una representación tridimensional de las dos piezas que forman el soporte de los sensores:

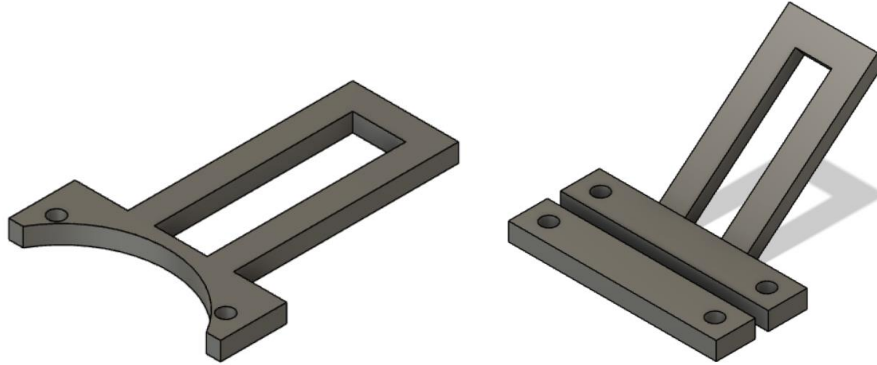


Figura 32. Soportes individuales sensores.

Tras realizar la instalación de las coronas y los soportes se ha podido comprobar que todo encaja y que los elementos utilizados son aptos para realizar una serie de pruebas sobre el funcionamiento de la segunda propuesta. Sin embargo, se ha decidido fabricar el soporte de los sensores en una única pieza para que sea más ligera y más resistente a la vez. El nuevo diseño se puede ver en la siguiente imagen:

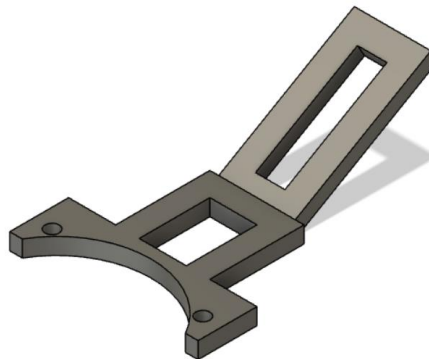


Figura 33. Soporte único sensores.

Las imágenes anteriores son simples representaciones de las piezas que se han diseñado y fabricado para esta propuesta. El [Anexo 1](#) recoge los planos de todas las piezas que se han diseñado para el proyecto con mayor detalle.



Programación del autómata.

1. Programa “Energización por posición”:

La energización del reloj sigue una secuencia similar a la de la solución anterior, pero con algunas diferencias:

El reloj comienza energizado con un determinado número de vueltas dado, en ese momento el motor gira un determinado ángulo en sentido contrario permitiendo que el reloj funcione por energía potencial durante un tiempo sin actuar como bloqueo.

Después el motor se mantiene en esa posición y, antes de interferir en el movimiento del eje del reloj, vuelve a girar un determinado ángulo. La duración en la que el motor se mantiene parado viene dada por la posición angular del eje del reloj.

Este proceso de giro y pausa se repite de forma continua hasta que las pesas del reloj llegan a la parte inferior.

En ese punto, es necesario volver al paso inicial de dar cuerda al reloj girando el motor en el sentido inicial.

El diagrama de bloques que representa este proceso es el siguiente:

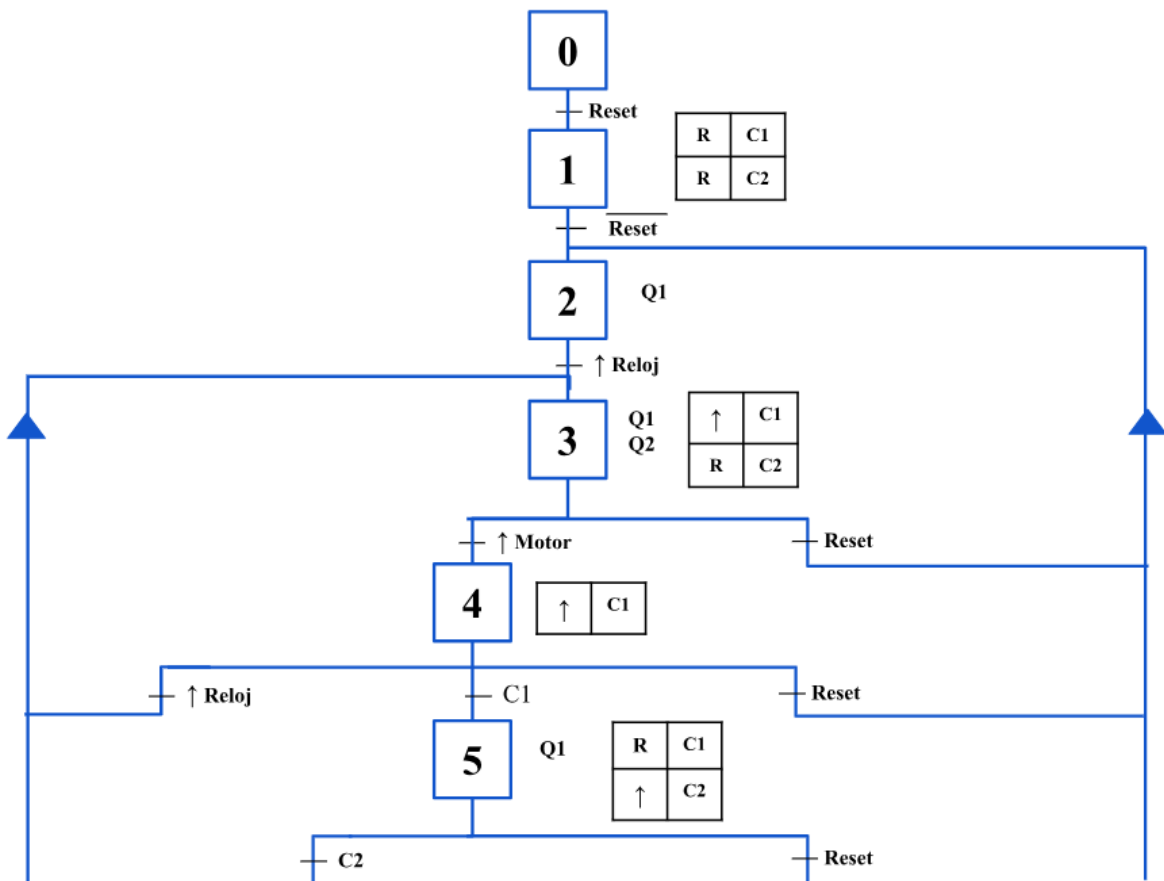


Figura 34. Grafcet N°4.



El proceso consta de seis etapas:

- *First Scan* (Etapa 0): Esta etapa permite activar todas las marcas del sistema que se requieren a lo largo del programa.
- *Parada de emergencia* (Etapa 1): Esta etapa detiene el proceso de energización cuando el usuario activa la entrada del Reset. En esta etapa se ponen a cero los distintos contadores que intervienen en el proceso.
- *Puesta en marcha* (Etapa 2): En esta etapa se prepara el sistema. Para ello, se gira el motor hasta que los ejes lleguen a una posición inicial controlada, a partir de la cual repetirá el proceso de energización y margen de giro de manera continua.
- *Margen de giro* (Etapa 3): Es necesario que el motor gire un determinado ángulo en sentido opuesto al anterior, es decir, en sentido antihorario. Este ángulo viene dado por la separación de los distintos elementos metálicos que contiene la corona del reloj, siendo concretamente 30°. De este modo, en esta etapa el motor gira en sentido antihorario hasta que la entrada correspondiente al sensor del motor vuelve a activarse.
- *Pausa* (Etapa 4): En esta etapa el motor se apaga hasta que sea necesario volver a dar margen de giro al eje del reloj. Durante esta etapa el eje del reloj debe girar el mismo ángulo que ha girado el motor en las etapas en las que se daba el margen de giro, para lo que se utiliza la corona del reloj. El reloj recorre libremente un ángulo de 30°, que es la separación que existe entre los elementos metálicos de la corona del reloj, hasta que la entrada correspondiente al sensor del reloj se activa.
- *Energización* (Etapa 5): Para dar cuerda al reloj se activa el motor en sentido horario hasta que los pesos suban el mismo recorrido que han realizado mientras funcionaba el reloj.

A continuación, se detallan las entradas, salidas, contadores y temporizadores que intervienen en el programa:

- *Q1*: Es la salida que activa el motor. De este modo, el reloj funciona únicamente en las etapas en las que la salida Q1 está activa, mientras que en las demás el motor permanece parado.
- *Q2*: Esta salida determina el sentido de giro del motor. Cuando la salida Q2 está activa el reloj gira en un sentido antihorario y gira en sentido contrario cuando Q2 no está activa. Cabe mencionar que el motor debe estar funcionando para que gire en un sentido o en otro, si la salida Q1 está desactivada y, por lo tanto, el motor está parado, da igual el sentido de giro establecido.
- *I1*: Esta entrada del autómatas recibe la señal proporcionada por un sensor inductivo que detecta la posición del eje del motor.
- *I2*: Esta entrada del autómatas recibe la señal proporcionada por un sensor inductivo que detecta la posición del eje del reloj.
- *C1*: Es un contador que mide el número de pulsos positivos de la entrada I1 durante el periodo de tiempo en el que está proporcionando margen de giro al eje del reloj. Dicho de otro modo, C1 cuenta el número de veces que el motor recorre un determinado



ángulo. Este contador permite establecer cuándo completa una vuelta el motor para volver a dar cuerda.

- *C2*: Es un contador que mide el número de pulsos positivos de la entrada *I1* mientras que el reloj está siendo energizado. Este contador permite establecer cuándo completa una vuelta el motor para volver a dar margen de giro al reloj.
- *Reset*: Es un interruptor que permite al usuario detener el proceso de energización del reloj. Cuando se activa esta entrada, el proceso se detiene, y cuando se vuelve a desactivar, el sistema realiza los movimientos necesarios para volver a retomar el proceso sin necesidad de que el usuario actúe físicamente.

Por último, una breve explicación sobre cada una de las condiciones que se deben verificar para pasar de una etapa a otra en el diagrama de bloques:

- *I1*: La entrada del autómata se activa cuando el sensor detecta uno de los elementos metálicos de la corona circular montada sobre el eje del motor.
- *I2*: La entrada del autómata se activa cuando el sensor detecta uno de los elementos metálicos de la corona circular montada sobre el eje del reloj.
- *Reset*: La entrada del autómata se activa cuando el usuario pulsa el interruptor de parada de emergencia.
- *C1*: Se ha alcanzado el número de pulsos establecido en el contador *C1*, es decir, se ha completado una vuelta dando margen de giro al reloj.
- *C2*: Se ha alcanzado el número de pulsos establecido en el contador *C2*, es decir, se ha completado una vuelta energizando al reloj.



Conclusiones de la segunda propuesta

Esta propuesta mantiene el uso del acoplamiento entre el eje del reloj y del motor que permite el recorrido de un ángulo de 40° entre ellos. Del mismo modo, el motor se activa en un sentido para energizar el reloj y se activa de forma intermitente en sentido contrario para girar 30° y permitir que el cilindro principal del reloj gire libre ese ángulo hasta que vuelva a ser necesario dar margen de nuevo. Sin embargo, el control de la posición de los ejes no se hace mediante temporizadores y contadores que determinan el número de dientes de una de las ruedas del reloj, sino que se realiza de forma más precisa. Se han diseñado unas piezas con forma de corona circular con elementos metálicos para poder detectar con sensores inductivos. Estas piezas van instaladas en cada uno de los ejes implicados y permiten determinar cuándo recorren el ángulo que hay entre dos piezas metálicas, con un margen de error mucho menor que midiendo el tiempo que está el motor activo y el número de dientes de la rueda del reloj.

El primer aspecto a evaluar de esta solución es el material de las piezas que se han diseñado, tanto de las coronas circulares como de los soportes de los sensores. En primer lugar, una de las desventajas del PLA es su baja resistencia al calor, ya que puede experimentar cierta deformación a partir de 50°C . Como las piezas van a trabajar bajo condiciones de mucho calor en verano, esto podría suponer un problema para la durabilidad de las mismas. Otra desventaja de este material es su baja resistencia en comparación con otros materiales empleados en fabricación aditiva. Teniendo estos aspectos en cuenta, se ha decidido fabricar las coronas circulares en ABS, debido a que, además de presentar mayor resistencia y durabilidad, no comienza a deformarse hasta temperaturas de $90\text{-}105^\circ\text{C}$. Por otro lado, se ha decidido fabricar los soportes de los sensores en chapa adonizada para garantizar que no se deformen bajo los esfuerzos mecánicos a los que puedan verse sometidos y sean duraderos. A continuación, se muestra una imagen donde se pueden ver, una vez montados y ajustados, las coronas de los ejes y el soporte de los sensores.



Figura 35. Sistema ensamblado.



Después de montar todas las piezas en la bancada externa y cargar el software en el autómeta, se ha podido comprobar que el reloj funciona durante días sin pararse por lo que los resultados de esta propuesta han sido positivos. Una vez comprobado que el sistema se comporta adecuadamente, el siguiente objetivo es conseguir que el sistema sea robusto desde el punto de vista de la seguridad, es decir, el sistema debe comportarse según lo esperado ante posibles fallos o paradas de emergencia. Para ello, se puede emplear la guía GEMMA para realizar un estudio de los modos de marcha y paro del sistema y de los saltos o transiciones entre los distintos modos de funcionamiento.



CAPÍTULO 8

GUÍA GEMMA Y SOLUCIÓN FINAL



Guía GEMMA

En un proceso productivo la máquina puede operar en distintos modos de funcionamiento, que se clasifican en: funcionamiento manual o semiautomático, paradas de emergencia y puesta en marcha. La guía GEMMA constituye una representación estructurada de los distintos modos de Marcha y Parada, así como los saltos o transiciones que pueden darse para pasar de un modo de funcionamiento a otro. Al emplearla, es posible estudiar los distintos puntos críticos que tiene el sistema y aumentar la robustez del mismo ante posibles fallos o perturbaciones.

El automatismo del proyecto consta, como cualquier otro, de dos partes principales: el sistema de producción y el control de este sistema. En este caso, el control es el autómatas programable, que puede estar en dos estados: alimentado o sin alimentar. Cuando el autómatas está alimentado, el proceso automatizado puede encontrarse en las siguientes tres situaciones:

- En funcionamiento normal, o en producción.
- Parado, o en proceso de parada.
- En defecto, cuando no está produciendo o no lo está haciendo correctamente.

De forma general, la guía GEMMA muestra estas situaciones con rectángulos, tal y como se representa en el siguiente esquema:

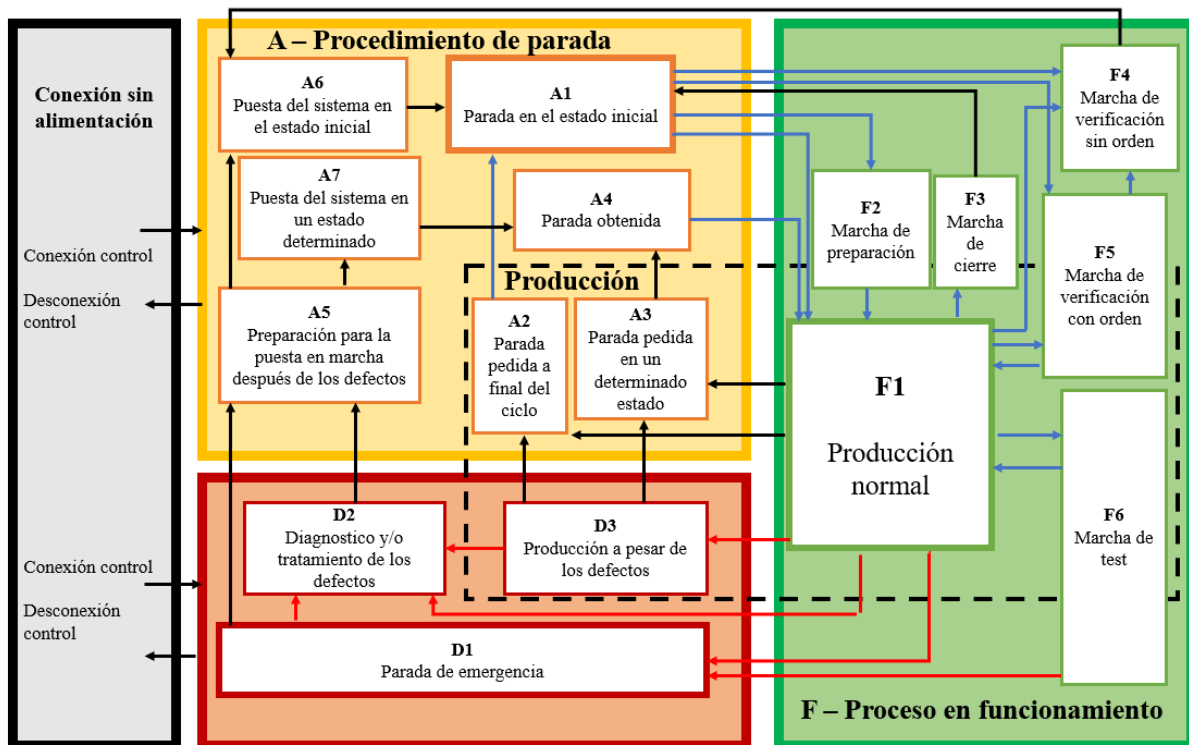


Figura 36. Representación general guía GEMMA.



En particular, en este proceso automático se han establecido los distintos modos de funcionamiento y transiciones que se muestran en el siguiente esquema:

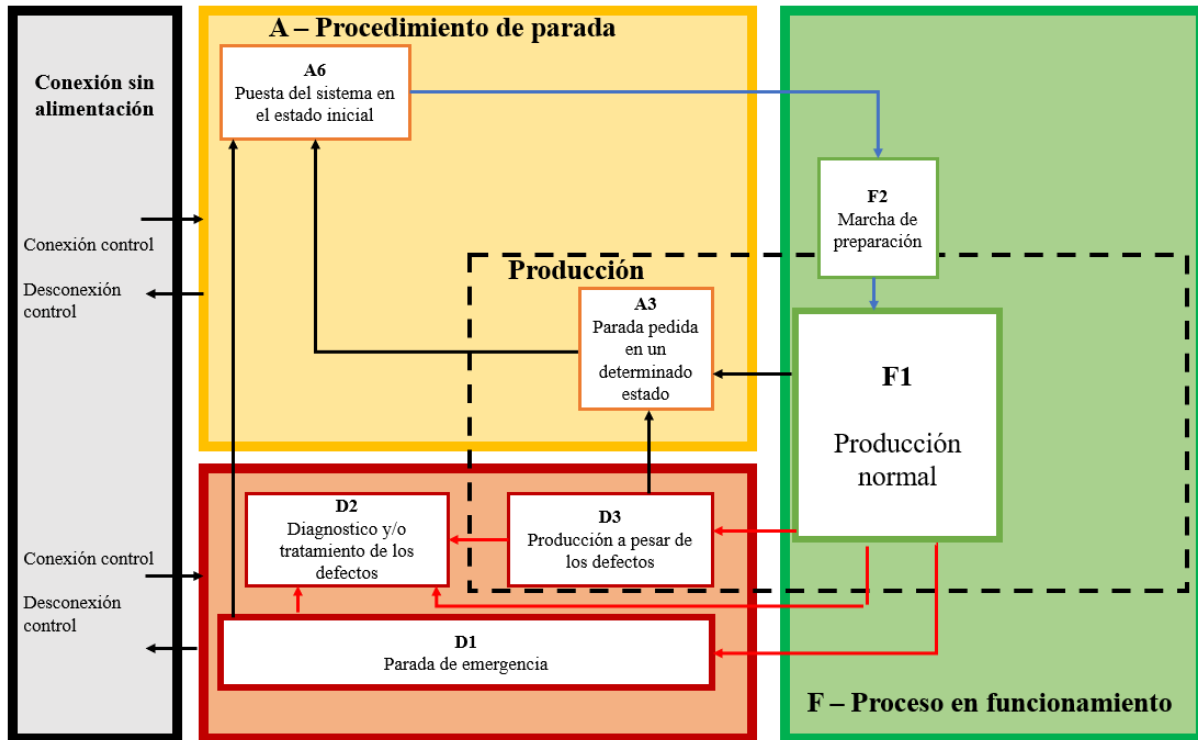


Figura 37. Guía GEMMA del proyecto.

A continuación, se detalla cada uno de los procedimientos, según en qué situación se encuentre cuando el control está alimentado, que forman parte de la guía GEMMA de este proyecto.

Grupo F: Procedimientos de funcionamiento

F1 - Producción normal

El reloj comienza energizado con un determinado número de vueltas dado, en ese momento el motor gira un determinado ángulo en sentido contrario permitiendo que el reloj funcione por energía potencial durante un tiempo sin actuar como bloqueo.

Después el motor se mantiene en esa posición y, antes de interferir en el movimiento del eje del reloj, vuelve a girar un determinado ángulo. La duración en la que el motor se mantiene parado viene dada por la posición angular del eje del reloj.

Este proceso de giro y pausa se repite de forma continua hasta que las pesas del reloj llegan a la parte inferior.

En ese punto, es necesario volver al paso inicial de dar cuerda al reloj girando el motor en el sentido inicial.

F2 - Marcha de preparación

Para garantizar que el motor no interfiere en el funcionamiento del reloj la primera vez que da margen, es necesario que el proceso de producción normal comience en una posición inicial



controlada. Para ello se activa el motor en sentido horario (CW), es decir, en el sentido en el que da cuerda, hasta que se detecte un flanco positivo del sensor del reloj. En ese momento, el sistema se encuentra en una posición adecuada para iniciar el proceso de dar cuerda y dar margen repetidamente.

Grupo A: Procedimientos de paradas y puestas en marcha

A3 - Parada solicitada en un estado determinado

El usuario puede llevar a cabo una parada mediante un interruptor. Activando el interruptor el proceso de energización se detiene hasta que este se desactiva. Después de esta parada, el sistema realiza la puesta del sistema en el estado inicial para llevar a cabo posteriormente la producción normal.

A6 - Puesta del sistema en el estado inicial

Después de un reinicio, es necesario que el proceso de producción normal comience en una posición inicial controlada. Para ello se activa el motor en sentido CW, es decir, en el sentido en el que da cuerda, hasta que se detecte un flanco positivo del sensor del reloj. En ese momento, el sistema se encuentra en una posición adecuada para iniciar el proceso de dar cuerda y dar margen repetidamente.

Grupo D: Procedimientos de defecto

D1 - Parada de emergencia

Tal y como está diseñado el sistema, se puede afirmar que se ha producido un fallo del mismo si en un momento determinado no hay activo ningún sensor ni ninguna salida ya que durante todo el proceso debe estar activo al menos uno de ellos. Cuando esto se produce se activa la etapa 8, 9 o 10 del Grafcet, donde se para el proceso y se informa al usuario para que la persona encargada de arreglarlo lo haga. Para ello se activa de forma intermitente la salida del autómeta número 0.5, 0.6 o 0.7, correspondientemente. Una vez solucionado el fallo, el usuario debe hacer un reset para que el proceso vuelva a funcionar.

D2 - Diagnóstico y/o tratamiento de fallos

Los posibles fallos que puede tener el sistema pueden deberse a: fallo del sensor del reloj, fallo del sensor del motor, fallo general.

Cuando se produce uno de estos fallos, el proceso entra en la etapa 6, 7 u 11 del Grafcet dependiendo del tipo de fallo. La etapa 7 corresponde con el fallo de sensor del motor, cuando esto ocurre se activa la salida 0.3 como señal de aviso. La etapa 6 se activa con el fallo del sensor del reloj (a), activando a su vez la salida 0.4 del autómeta. Por último, la etapa 11 está relacionada con el fallo del sensor reloj (b), en este momento se activa la salida 0.8 de manera intermitente a modo de alarma.



D3 - Producción a pesar de los defectos

Para que un fallo no significativo, como la falta de una lectura de los sensores, no provoque que se pare el proceso completo o que el motor quede encendido durante demasiado tiempo, es necesario buscar un camino alternativo para que el sistema continúe operando. Las etapas 6, 7 y 11 del Grafcet permiten que el reloj siga funcionando si no se produce la lectura de uno de los sensores, utilizando para ello temporizadores. Los temporizadores se han programado utilizando la información obtenida en el diseño y desarrollo de la primera propuesta.



Programa final del proyecto

En base a las consideraciones que se han hecho a lo largo del desarrollo del proyecto y de la aplicación de la guía GEMMA, el programa final que queda cargado en el autómatas sigue el siguiente Grafcet:

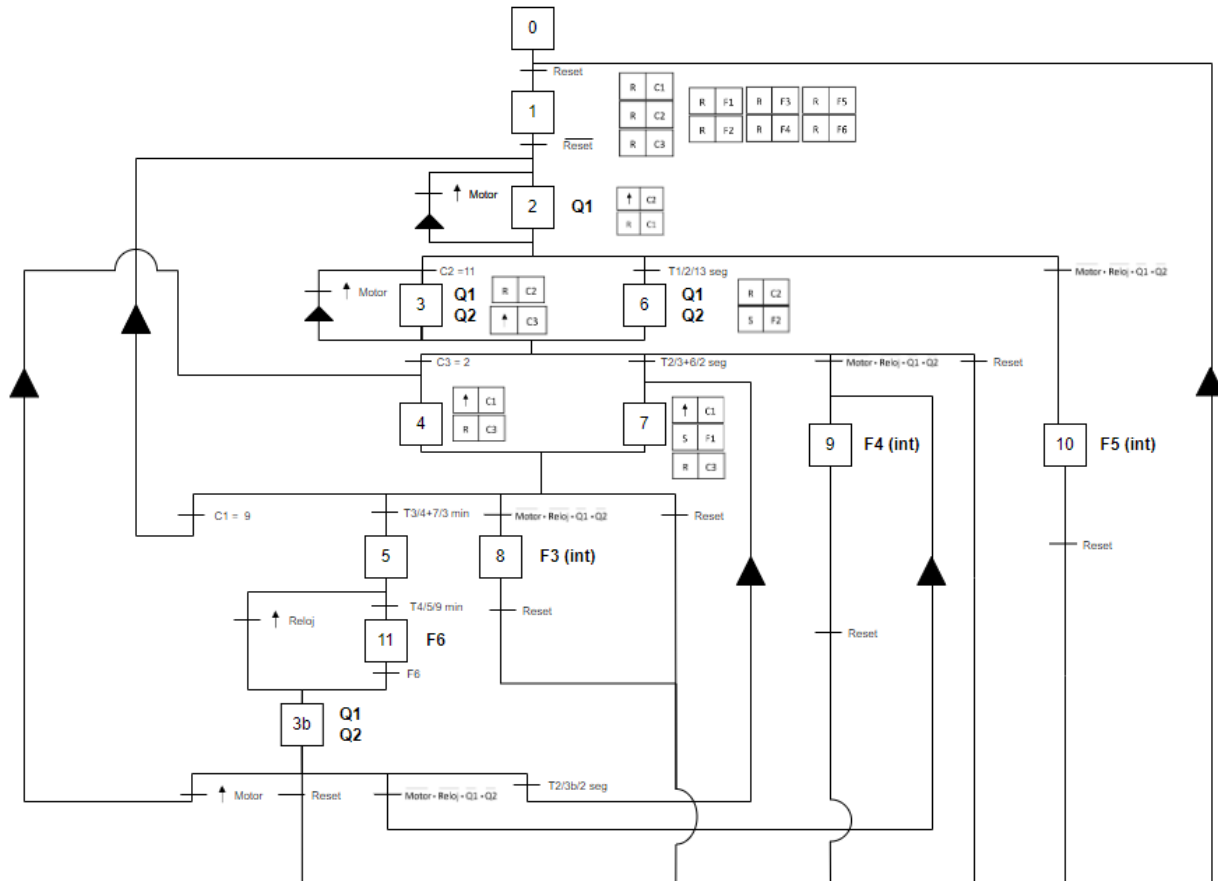


Figura 38. Grafcet N°5.

Siendo las siguientes las entradas y salidas del autómatas involucradas:

Motor: Sensor eje motor (entrada 0.0)

Reloj: Sensor eje reloj (entrada 0.1)

Reset: Pulsador de parada (entrada 1.5)

Q1: Motor activo (salida 0.0)

Q2: Giro inverso (salida 0.1)

F1: Fallo sensor motor (salida 0.3)

F2: Fallo sensor reloj (a) (salida 0.4)

F3: Fallo del sistema (salida 0.5)

F4: Fallo del sistema (salida 0.6)

F5: Fallo del sistema (salida 0.7)

F6: Fallo sensor reloj (b) (salida 0.8)



El proceso consta de trece etapas que se van a explicar a continuación:

- *First Scan* (Etapa 0): Esta etapa permite activar todas las marcas del sistema que se requieren a lo largo del programa.
- *Paradas de emergencia* (Etapas 8, 9 y 10): Estas etapas se activan cuando se detecta un fallo del sistema, momento en el que se detiene el proceso de energización hasta que el usuario activa la entrada del Reset.
- *Energización* (Etapa 2): Para dar cuerda al reloj se activa el motor en sentido horario hasta que los pesos suban el mismo recorrido que han realizado mientras funcionaba el reloj de forma libre, es decir, el mismo ángulo que recorre el reloj en la etapa de pausa.
- *Margen de giro* (Etapas 3, 3b y 6): Es necesario que el motor gire un determinado ángulo en sentido opuesto al anterior, es decir, en sentido antihorario. Este ángulo viene dado por la separación de los distintos elementos metálicos que contiene la corona del reloj, siendo concretamente 30°. De este modo, en estas etapas el motor gira en sentido antihorario hasta que la entrada correspondiente al sensor del motor vuelve a activarse.
- *Pausa* (Etapas 4,7, 5 y 11): En estas etapas el motor se apaga hasta que sea necesario volver a dar margen de giro al eje del reloj. Durante esta etapa el eje del reloj debe girar el mismo ángulo que ha girado el motor en las etapas en las que se daba el margen de giro, para lo que se utiliza la corona del reloj. El reloj recorre libremente un ángulo de 30°, que es la separación que existe entre los elementos metálicos de la corona del reloj, hasta que la entrada correspondiente al sensor del reloj se activa.
- *Reset de contadores* (Etapa 1): Etapa donde se ponen a cero los distintos contadores que intervienen en el proceso. Esta etapa se activa cuando el usuario activa la entrada asociada al reset.

Las entradas, salidas, contadores y temporizadores que intervienen en el programa son las siguientes:

- *Q1*: Es la salida que activa el motor. De este modo, el reloj funciona únicamente en las etapas en las que la salida Q1 está activa, mientras que en las demás el motor permanece parado.
- *Q2*: Esta salida determina el sentido de giro del motor. Cuando la salida Q2 está activa el reloj gira en un sentido antihorario y gira en sentido contrario cuando Q2 no está activa. Cabe mencionar que el motor debe estar funcionando para que gire en un sentido o en otro, si la salida Q1 está desactivada y, por lo tanto, el motor está parado, da igual el sentido de giro establecido.
- *I1*: Esta entrada del autómata recibe la señal proporcionada por un sensor inductivo que detecta la posición del eje del motor.
- *I2*: Esta entrada del autómata recibe la señal proporcionada por un sensor inductivo que detecta la posición del eje del reloj.
- *C1*: Es un contador que mide el número de pulsos positivos de la entrada I1 durante el periodo de tiempo en el que está proporcionando margen de giro al eje del reloj. Dicho de otro modo, C1 cuenta el número de veces que el motor recorre un determinado ángulo. Este contador permite establecer cuándo completa una vuelta el motor para volver a dar cuerda.



- *C2*: Es un contador que mide el número de pulsos positivos de la entrada I1 mientras que el reloj está siendo energizado. Este contador permite establecer cuándo completa una vuelta el motor para volver a dar margen de giro al reloj.
- *C3*: Es un contador que, justo después de dar cuerda al reloj, mide el número de pulsos positivos de la entrada I1 durante el periodo de tiempo en el que está proporcionando margen de giro al eje del reloj. Este contador se ha añadido debido a que después de energizar el reloj es necesario que el motor recorra un ángulo mayor en sentido contrario para garantizar que no interfiere con el movimiento del eje del reloj.
- *T1*: Es un temporizador empleado como un elemento de seguridad. Este temporizador limita el tiempo en el que el motor da cuerda al reloj a 13 segundos. Este elemento garantiza que, el motor no se mantiene activo durante más tiempo, aunque se produzca un error en la detección de la posición del eje del motor, ya que esto podría provocar que el sistema de contrapesos alcance su límite y se dañe el mecanismo del reloj o el propio motor.
- *T2*: Es un temporizador empleado como un elemento de seguridad. Este temporizador limita el tiempo en el que el motor gira en sentido antihorario para dar margen al reloj a 2 segundos. Este elemento garantiza que el motor no se mantiene activo durante más tiempo, aunque se produzca un error en la detección de la posición del eje del motor, ya que esto podría forzar el mecanismo del reloj y producir la rotura del mismo o del motor.
- *T3*: Este un temporizador es empleado para garantizar que la activación del sensor del eje del reloj se produce por la detección de un elemento metálico de la corona circular distinto al anterior. De este modo, solo se vuelve a dar margen al reloj cuando el sensor del reloj se active después de un periodo de 3 minutos. Este elemento garantiza que las pequeñas vibraciones en el eje que se producen cuando el motor se pone en marcha no dé lugar a lecturas falsas que reflejen un comportamiento del sistema distinto del real.
- *T4*: Es un temporizador empleado como un elemento de seguridad. Este temporizador limita el tiempo en el que el motor permanece apagado al tiempo correspondiente a la suma de T3 y T4, siendo 3 y 9 minutos respectivamente. Este elemento garantiza que el motor vuelva a dar margen transcurrido ese tiempo, evitando que el reloj se pare.
- *Reset*: Es un interruptor que permite al usuario detener el proceso de energización del reloj. Cuando se activa esta entrada, el proceso se detiene, y cuando se vuelve a desactivar, el sistema realiza los movimientos necesarios para volver a retomar el proceso sin necesidad de que el usuario actúe físicamente.



CAPÍTULO 9

CAMPANAS



Otro de los objetivos de este proyecto es automatizar el sistema de campanas para que suenen únicamente durante las horas del día, concretamente de (hora). Este apartado del trabajo no se podrá poner en práctica debido a la temporalización y a los recursos con los que se cuentan para el desarrollo del mismo, no obstante, se expone una propuesta de solución de forma teórica.

En primer lugar, es necesario configurar la hora del autómatas para poder hacer diferencia entre el horario en el que las campanas deben funcionar y el horario en el que deben permanecer paradas. Otro aspecto importante, consiste en establecer un mecanismo que sea capaz de bloquear las campanas sin alterar el funcionamiento del propio reloj. El siguiente punto recoge las soluciones que se proponen para satisfacer estos requisitos.

Configuración de la hora del autómatas.

El autómatas con el que se ha llevado a cabo este proyecto es un PLC Siemens 1200, estos autómatas cuentan con un reloj de tiempo real que se puede utilizar para llevar a cabo operaciones de tiempo basadas en dicho reloj interno. Después de configurar la hora del dispositivo, Siemens proporciona bloques de función específicos en TIA Portal para que sea posible leer y modificar el valor del reloj interno. Con la hora disponible en el programa, es posible controlar las salidas para que solo se activen en determinados periodos de tiempo, que es precisamente lo que se necesita hacer con el mecanismo de las campanas.

El programa que va cargado en el autómatas se encargará de actualizar la hora del reloj interno del mismo cada vez que se conecte a un ordenador. Para ello, se ha seguido el siguiente procedimiento en TIA Portal:

1. Crear un nuevo Bloque de Datos de Sistema, denominado SDB, donde poder almacenar la fecha y la hora actual del ordenador.

Para crear este bloque hay que desplegar la opción de “Bloques del sistema” y seleccionar “Añadir nuevo bloque”. En la nueva pestaña aparecen distintos tipos de bloques, en este momento hay que seleccionar el tipo “Bloque de datos” y elegir “Bloque de datos del sistema”. Para crearlo es necesario introducir un nombre adecuado, como por ejemplo “SystemTime_SDB”. Una vez creado el bloque de datos, el siguiente paso es definir las variables donde se almacenarán la hora y la fecha como variables de tipo TIME y DATE respectivamente, en este caso se han definido como “ActualTime” y “ActualDate”.

2. Añadir un nuevo Bloque Organizativo, denominado OB, para poder realizar la actualización de la fecha y la hora del autómatas.

Este tipo de bloque es una parte del programa que, bajo determinadas condiciones, se ejecuta automáticamente. Para esta aplicación en concreto, este bloque permite actualizar la fecha y la hora del autómatas cada vez que se establezca una conexión con el mismo.



Este bloque se crea de forma similar al anterior: hay que desplegar la opción de “Bloques del sistema” y seleccionar “Añadir nuevo bloque”. Esta vez el tipo de bloque que hay que seleccionar es “Bloque de Organización” y elegir un tipo de bloque adecuado para la actualización, como el OB1 (ciclo principal). Para terminar de crear el bloque solo faltaría introducir el nombre, en este caso se denomina “UpdateTime_OB1”.

3. Programar la actualización de fecha y hora.

Dentro del bloque “UpdateTime_OB1” se emplean los bloques de funciones disponibles en TIA Portal que permiten obtener la fecha del ordenador y asignarlos posteriormente a las variables del bloque de datos “SystemTime_SDB”. Una vez obtenidos estos valores, hay que asignarlos a las variables “ActualTime” y “ActualDate” del SDB creado anteriormente.

Concretamente, se ha utilizado la función “GET” y la función “TIMETOD” para obtener la hora y la fecha actual. Por un lado, la función “GET” es una función que no requiere ningún parámetro de entrada y que se emplea con el fin de obtener la hora actual del sistema (hh:mm:ss) y almacenarla en una variable de tipo TIME. Por otro lado, la función “TIMETOD” se utiliza para convertir una variable de entrada de tipo TIME en una fecha, para que pueda ser almacenada posteriormente en una variable de salida de tipo DATE.

Es fundamental comprobar que está habilitada la descarga automática del bloque “SystemTime_SDB” a cada ciclo de carga en el autómata, para garantizar que el PLC tiene siempre la hora actualizada. Esto se puede configurar dentro de las propiedades del propio bloque de datos del sistema “SystemTime_SDB”.



Sistema de accionamiento/bloqueo de las campanas.

El reloj de cuerda de torre tiene un mecanismo principal descrito anteriormente en el capítulo 2 de este documento, que consta de engranajes y contrapesos que permiten el funcionamiento del reloj en sí. Junto al mecanismo principal, se encuentra el denominado sistema de campanas. Este sistema consta de unos tambores adicionales conectados a las campanas ubicadas en el campanario, que también deben ser energizados. Cada una de las campanas tiene su propia cuerda y está colocada de forma que cuando se activa, la campana se mueve y emite su sonido característico. A continuación, una imagen donde se muestran de manera numerada los cilindros que componen el mecanismo del reloj, siendo el primer cilindro el cilindro principal, el segundo el de la campana que anuncia los cuartos y el tercero el de la campana que anuncia las horas.

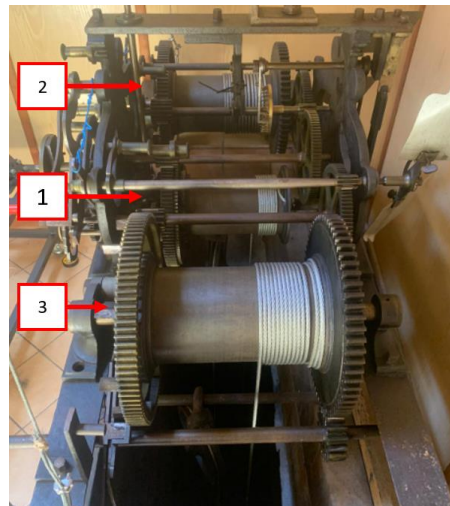


Figura 39. Conjunto de tambores del reloj de las económicas.

Cuando el mecanismo principal del reloj avanza, los tambores de las campanas también giran, desenrollando las cuerdas de las mismas según su programación. Esto se realiza mediante una serie de levas y pernos, que establecen cuándo se activa el movimiento de cada una de las campanas, así como su detención. Cuando la campana se activa, la cuerda asociada a la misma se desenrolla, provocando que la campana se balancee debido a la energía potencial acumulada. Cada una de las cuerdas está conectada físicamente a una palanca que impulsa un martillo, siendo este elemento el que golpea a la campana y produce el sonido de la misma.

Tras consultar al relojero se descartó la opción de bloquear el giro de los tambores de las campanas, debido a que esto podría interferir con el giro del tambor principal del reloj y hacer que se detenga. Como consecuencia, la solución que se propone consiste en sustituir los martillos actuales de las campanas por unos electroimanes que se puedan controlar automáticamente. De este modo, cuando el mecanismo del reloj mueve las palancas, el autómatas activa los electroimanes y las campanas suenan. Para detectar el movimiento de las palancas se pueden utilizar sensores inductivos, debido a que las características descritas en el apartado correspondiente del capítulo 5 resultan idóneas para esta aplicación. Atendiendo al requisito de que las campanas deben sonar únicamente durante el día, las salidas de los electroimanes permanecen apagadas dentro del periodo de descanso, aunque el sistema de campanas siga funcionando y mueva las palancas durante la noche.



CAPÍTULO 10

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS



El reloj de cuerda de torre tiene un mecanismo principal descrito anteriormente en el capítulo dos del documento, que consta de engranajes y contrapesos que permiten el funcionamiento del reloj en sí. Junto al mecanismo principal, se encuentra el denominado sistema de campanas. Este sistema consta de unos tambores adicionales conectados a las campanas ubicadas en el campanario, que también deben ser energizados. Cada una de las campanas tiene su propia cuerda y está colocada de forma que cuando se activa, la campana se mueve y emite su sonido característico.

En las conclusiones de este proyecto, se recogen los principales resultados adquiridos a partir del proceso de investigación, análisis y desarrollo del mismo. Durante la realización de este proyecto, se han explorado y analizado distintos aspectos a fin de alcanzar los objetivos planteados. No obstante, las conclusiones alcanzadas no solo ponen de manifiesto el logro de objetivos concretos, sino también la acumulación de conocimientos, las estrategias exitosas y posibles oportunidades futuras. En ese último capítulo, se recogen las reflexiones fundamentales obtenidas en base a la experiencia, así como las implicaciones que pueden tener las mismas en la extensión de este proyecto o en el desarrollo de otros similares.

1. Alineación entre los ejes del reloj y de los motores.

Tras analizar el comportamiento del sistema mecatrónico se ha llegado a la conclusión de que los principales fallos se producen cuando los sensores inductivos no detectan los elementos metálicos de las coronas acopladas en los ejes. Esto se debe principalmente a la desalineación que existe entre los ejes del reloj y del motor que debe energizarlo. La bancada, pese a constar de una serie de elementos móviles que permiten ajustar la posición de los motores, tiene una altura ligeramente insuficiente de forma que el motor encargado de energizar el cilindro principal del reloj queda aproximadamente 0.5 cm por debajo de la posición óptima.

Este fallo puede tener un impacto significativamente negativo, ya que no solo provoca que el sistema mecatrónico funcione de forma inadecuada en el presente, sino que puede causar implicaciones de gravedad para el mecanismo del reloj en el futuro. La desalineación que existe entre los ejes puede causar una serie de efectos negativos, como puede ser la aplicación de fuerzas desequilibradas en distintas piezas del mecanismo del reloj. A largo plazo, esto podría comprometer la integridad estructural de las partes involucradas debido a la fatiga de los materiales. Esta degradación de los elementos del reloj podría acabar con roturas de componentes esenciales, afectando tanto a la funcionalidad como a la autenticidad del reloj que es considerado como un elemento histórico. Como resultado, solucionar este problema de alineación resulta un aspecto fundamental que se deberá tratar en el futuro del proyecto.

La solución más óptima consiste en sustituir los tornillos actuales de la estructura externa por unos con una longitud nominal mayor. De este modo, se podría conseguir elevar la posición final del motor y que, tras los ajustes pertinentes, quede perfectamente alineado con el eje del cilindro principal del reloj.



2. Capacidad de detección de los sensores.

Como se ha mencionado anteriormente, los problemas en el funcionamiento del sistema eran debidos principalmente a que las lecturas de los sensores no siempre reflejaban adecuadamente el estado en el que se encontraba el proceso de energización. Con los ajustes en la alineación de los ejes del reloj y del motor, deberían reducirse considerablemente el número de fallos de esta índole. Sin embargo, para garantizar que el sistema sea robusto, se podrían utilizar otros sensores inductivos con un rango de detección mayor. Esta característica de los sensores, junto a un correcto posicionamiento, conseguiría garantizar la detección de la posición angular de ambos ejes de manera precisa.

3. Diseño de soportes para los sensores.

Un aspecto crucial para el diseño de un sistema mecatrónico no se basa únicamente en la correcta elección que conformarán el sistema en cuestión, sino también en la adecuada selección de los sensores que permitirán monitorizar de manera precisa dicho proceso. La combinación de estos elementos es fundamental para lograr el funcionamiento del sistema en su conjunto. No obstante, la utilidad de los sensores no solo radica en su elección, sino también en establecer la manera en la que integrarlos de forma efectiva y de posicionarlos adecuadamente.

Durante el desarrollo del proyecto, se ha prestado especial atención a la etapa de diseño de los soportes de los sensores del reloj y del motor, con el fin de garantizar que cumplan su función de forma óptima. A lo largo del proceso de diseño de estos soportes, se prestó especial atención a encontrar una combinación adecuada entre funcionalidad y posición, debido a que factores como el entorno o la ubicación pueden afectar a la eficacia y la funcionalidad del sensor. Para lograrlo, se han realizado una serie de pruebas con diferentes prototipos de soportes para los sensores. Durante las pruebas se han tenido en consideración distintos factores tales como la durabilidad, la estabilidad y la posibilidad de posicionar el sensor en una ubicación adecuada que permita obtener datos del proceso de manera precisa. La experimentación llevada a cabo con los prototipos ha permitido realizar un diseño final más óptimo que se ajusta a los requisitos técnicos y funcionales del proyecto.

Una vez definido el diseño definitivo, adquirió gran importancia la elección del material con el que fabricar el soporte final. Aunque los prototipos se elaboraron mediante fabricación aditiva, se decidió fabricar el soporte del sistema final en una chapa de acero de 2 mm de espesor. Esta elección está fundamentada en la necesidad de que el soporte sea duradero y resistente, características esenciales para su desempeño en condiciones reales debido que el sistema en su conjunto debe ser confiable a largo plazo.

Tanto los conocimientos como la experiencia adquiridos durante el diseño y la fabricación de los soportes de los sensores serán de vital importancia para la creación de los nuevos soportes necesarios para el sistema de las campanas. La solución planteada requiere de la monitorización de la posición de las campanas para controlar la activación del badajo electrónico que producirá el repique de las mismas. El enfoque a seguir para el diseño y la fabricación de los nuevos soportes será similar al proceso aplicado con los soportes de los sensores de los ejes. De este modo, el proceso deberá incluir las fases de prototipado, evaluación de los prototipos y elección de materiales.



4. Sincronización horaria del PLC.

Los requisitos de operación establecidos para el sistema de campana implican la necesidad de coordinar el reloj interno del autómatas con la hora real. Para alcanzar este objetivo, se puso en marcha un proceso de investigación y análisis sobre las posibilidades que ofrece el software TIA Portal en relación a este asunto. Esta etapa del proyecto constituye un desafío y una oportunidad para aprender, debido a que la materia en cuestión no había sido abordada previamente durante el periodo de formación académica.

5. Robustez del sistema mecatrónico.

El capítulo ocho de este proyecto está dedicado a la creación de una solución confiable que ofrezca un funcionamiento correcto incluso si se producen perturbaciones o condiciones inusuales. Esta fase del proyecto ha demostrado ser de utilidad desde el punto de vista de la formación de las habilidades que debe poseer un ingeniero industrial. Concretamente, ha implicado la identificación y evaluación de puntos críticos tanto en el proceso como en el sistema en su conjunto, la formulación de soluciones efectivas, su aplicación y la posterior evaluación del rendimiento del sistema una vez que estas soluciones se han implementado.

Para abordar este tema, se ha empleado la Guía GEMMA como una herramienta esencial. Esta guía ha proporcionado una estructura sólida con la que poder alcanzar los objetivos antes descritos. Su enfoque se ha centrado en aumentar la robustez del sistema, es decir, en aumentar la capacidad del mismo de mantener un funcionamiento aceptable incluso en presencia de fallos inesperados o perturbaciones externas.

La etapa que consiste en evaluar y abordar los puntos críticos ha supuesto una parte esencial del proceso. Concretamente, se han aplicado diferentes principios de ingeniería para garantizar la fiabilidad y la eficacia del sistema. En primer lugar, es necesario identificar áreas de vulnerabilidad y evaluar las posibles consecuencias de los fallos. Un ejemplo de esto sería que una lectura errónea de algún sensor puede provocar que la monitorización de la posición angular de los ejes sea incorrecta.

Una vez determinados los puntos críticos, se han propuesto soluciones que incluyen mejoras en el código y la introducción de protocolos de seguridad adicionales. Concretamente, se han introducido etapas en el Grafset que limitan el tiempo en el que puede estar activo el motor, con el fin de evitar su avería o la del reloj. A partir de ahí, se han puesto en práctica, se ha llevado a cabo una evaluación del comportamiento del sistema. Esto se ha hecho para garantizar que las medidas tomadas sean efectivas, que no afecten a otros elementos del proyecto y que el sistema funcione de acuerdo con las especificaciones requeridas incluso ante circunstancias adversas.



CAPÍTULO 11

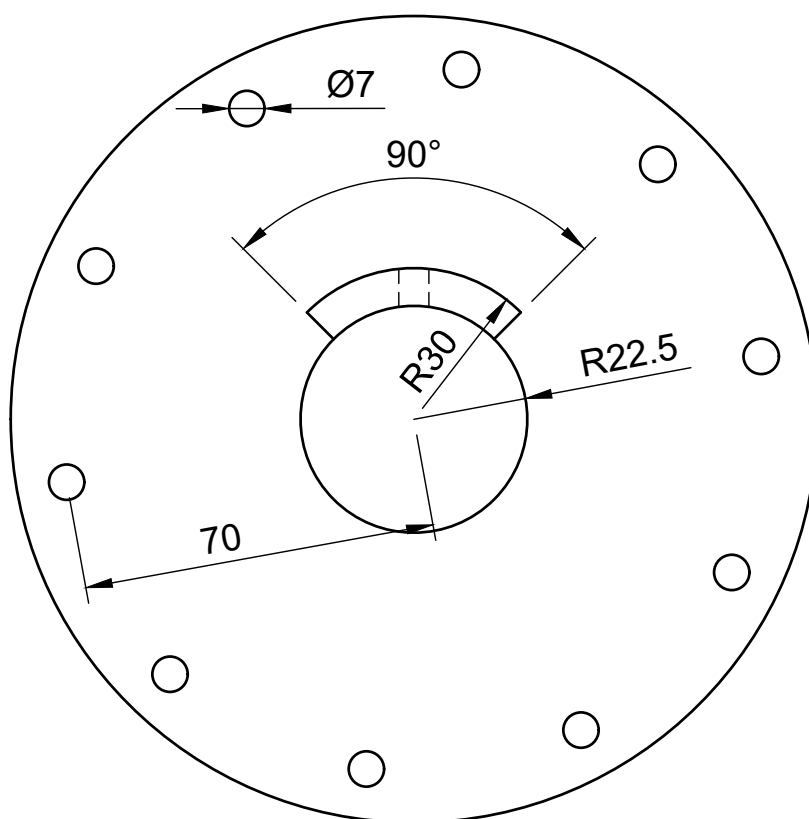
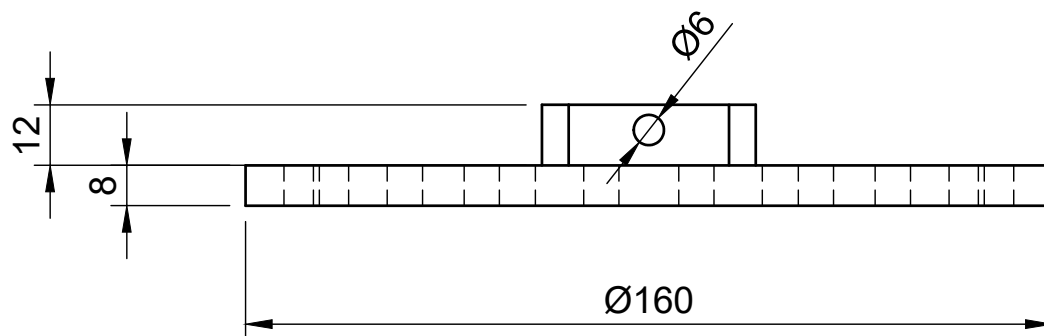
BIBLIOGRAFÍA



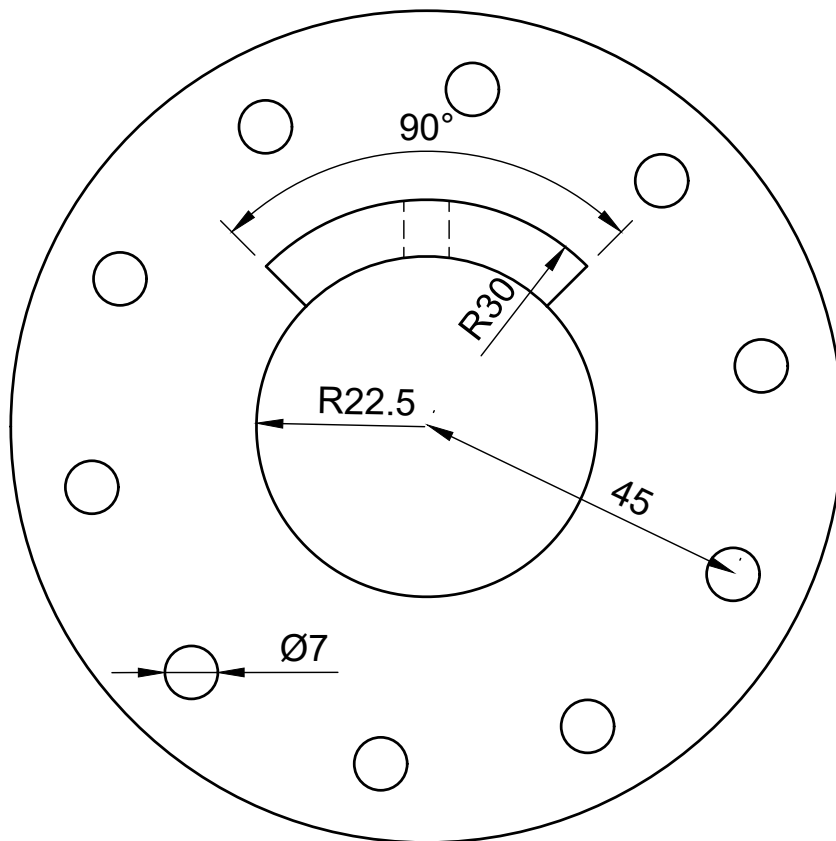
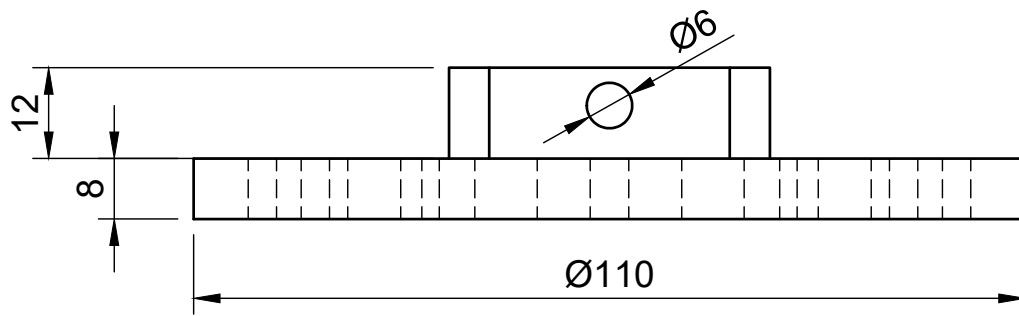
- Aginaga, J. y Claver, A. (2019) *Restauración y puesta en marcha del antiguo reloj del Ayuntamiento de Iruñea* [Trabajo de Fin de Grado, Universidad Pública de Navarra]. https://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/33715/CLAVER_ALBA_ADRIAN_TFG_2019.pdf?sequence=1
- Cañibano, R. (2014) *Modelado y animación de un reloj de péndulo* [Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Valladolid]. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/13227>
- Del Medico, A.J. (2017) *Propiedades mecánicas de componentes fabricados mediante modelado por deposición fundida* [Trabajo de Fin de Grado, Universidad de La Laguna]. <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/5823/Propiedades+mecanicas+de+componentes+fabricados+mediante+modelado+por+deposicion+fundida.pdf?sequence=1>
- Llamazares, C. (2016). *Cronología de la reparación, automatización y nueva puesta en marcha del Reloj de la Torre* [Archivo PDF]. <http://vegadelcondado.com/docs/CronologiaReparacionRelojVegas.pdf>



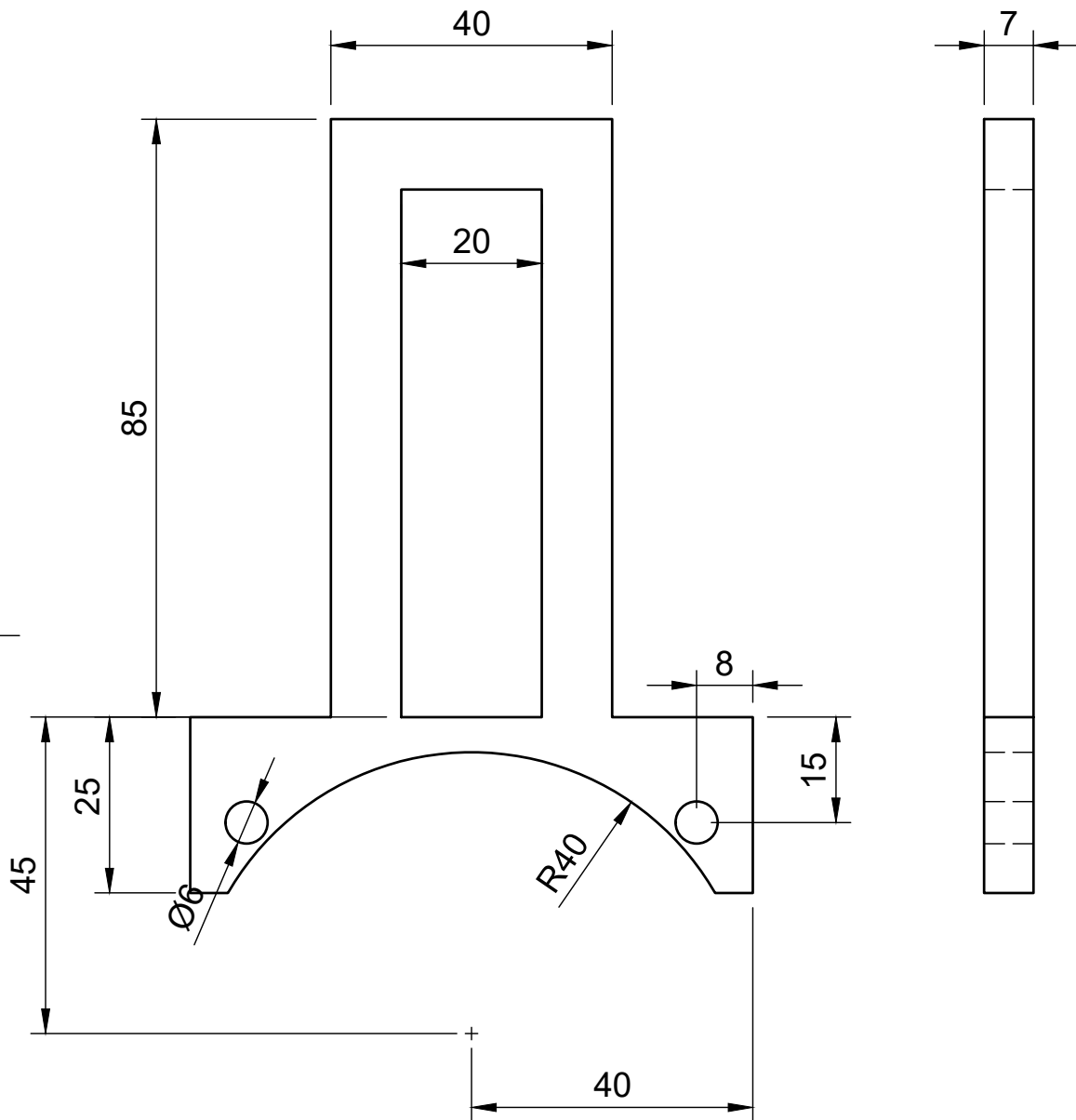
ANEXO I



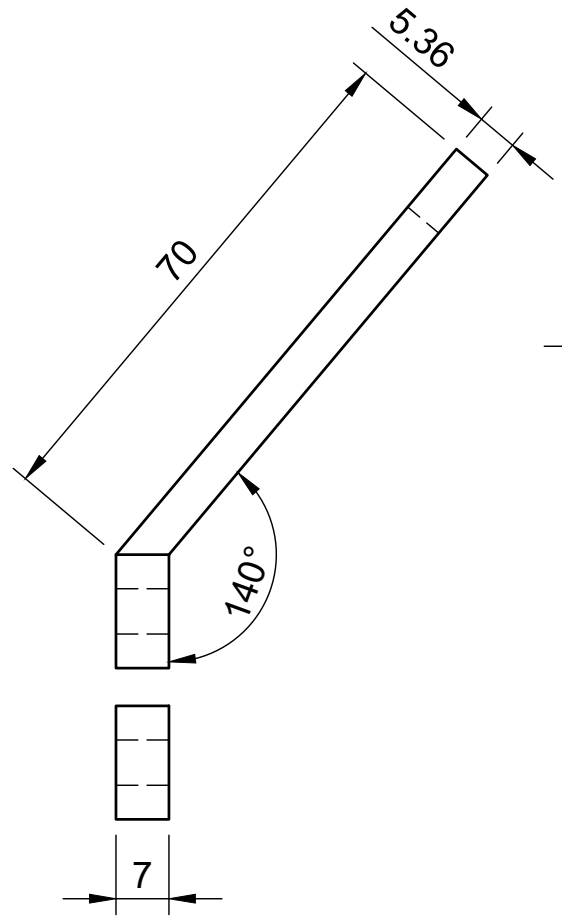
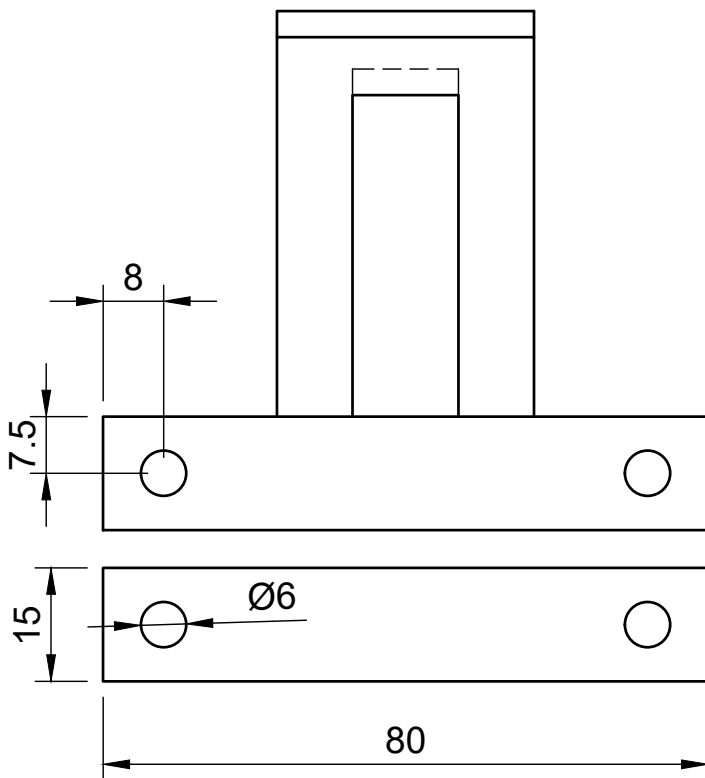
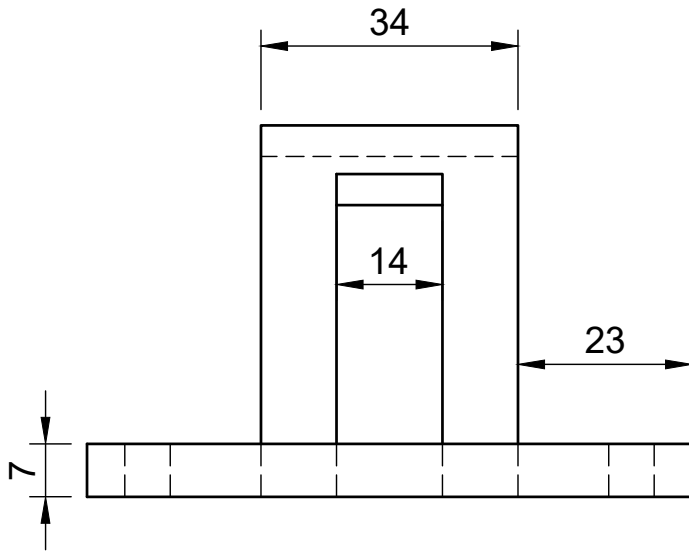
Dept. Automatización	Technical reference	Created by Laura Salas 01/07/2023	Approved by Laura Salas 01/07/2023
		Document type Technical Drawing	Document status Final
		Title Corona Reloj	DWG No. 001
		Rev.	Date of issue
		Sheet 1/1	



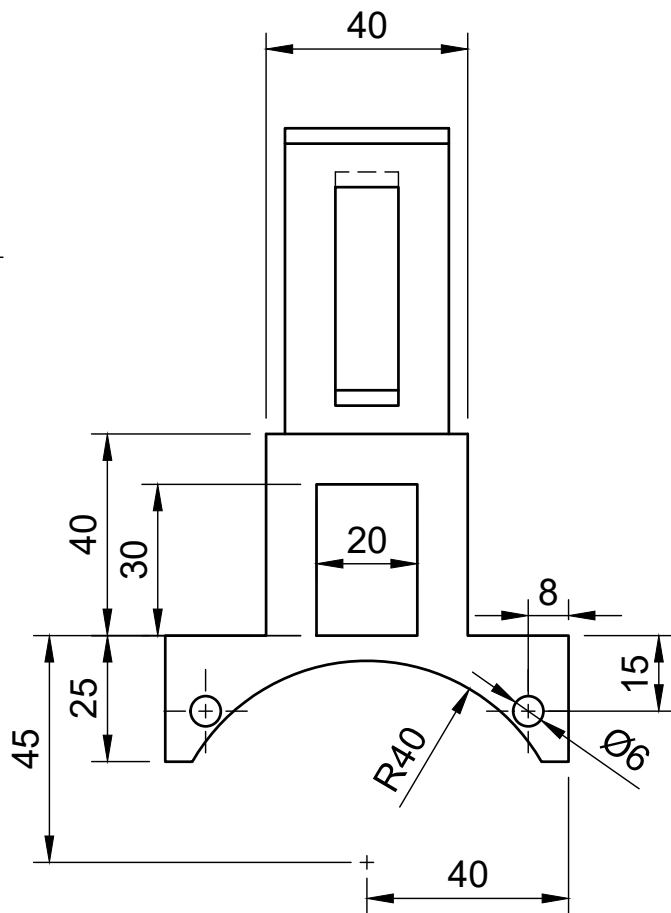
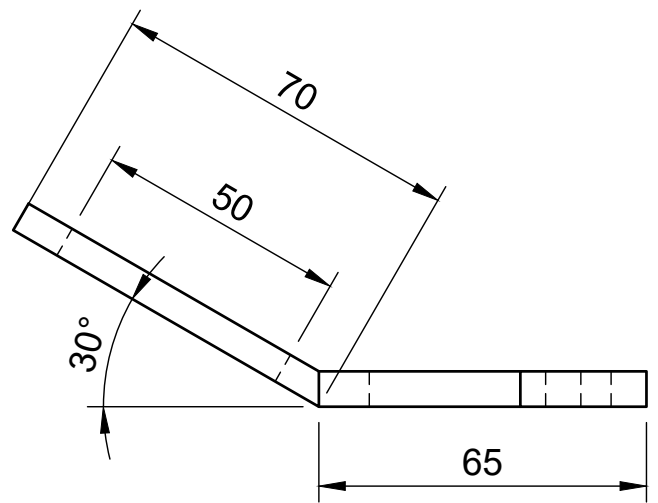
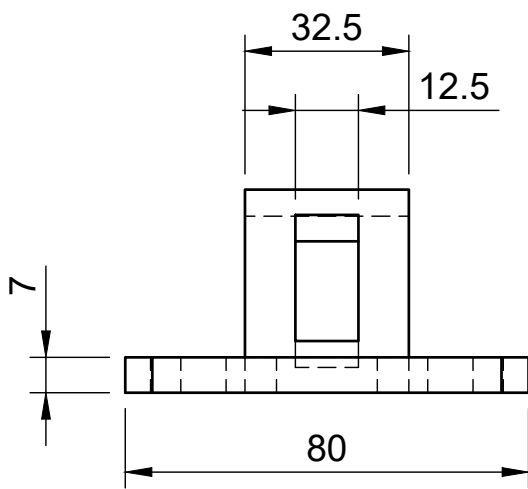
Dept. Automatización	Technical reference	Created by Laura Salas 01/07/2023	Approved by Laura Salas 01/07/2023
		Document type Technical Drawing	Document status Final
		Title Corona Motor	DWG No. 002
		Rev.	Date of issue
		Sheet 1/1	



Dept. Automatización	Technical reference	Created by Laura Salas 06/07/2023	Approved by Laura Salas 06/07/2023
		Document type Technical Drawing	Document status Final
		Title Sensor 1	DWG No. 003
		Rev.	Date of issue
		Sheet 1/1	



Dept. Automatización	Technical reference	Created by Laura Salas 06/07/2023	Approved by Laura Salas 06/07/2023
		Document type Technical Drawing	Document status Final
		Title Sensor 2	DWG No. 004
		Rev.	Date of issue
		Sheet 1/1	



Dept. Automatización	Technical reference	Created by Laura Salas 14/07/2023	Approved by Laura Salas 14/07/2023
		Document type Technical Drawing	Document status Final
		Title Soporte sensores	DWG No. 005
		Rev.	Date of issue
		Sheet 1/1	