

1. Resumen

En los últimos años la educación a distancia ha cobrado una gran importancia dentro del panorama docente. Muchos son los motivos que han favorecido el desarrollo de este tipo de educación, pero sin duda, el desarrollo de la tecnología de control y automatización ha tenido una importancia relevante. Gracias a esta tecnología, se pueden crear laboratorios remotos, facilitando de este modo el acceso de los estudiantes a material práctico.

El siguiente proyecto consiste en la elaboración de un laboratorio remoto, basado en un electroimán mediante el cual se tendrá control sobre un accionamiento a través de Internet. De esta forma, se permite a los estudiantes la posibilidad de disponer de material práctico para la automatización a distancia, durante las 24 h del día.

En la primera parte del proyecto a modo de introducción se da una visión general de diferentes laboratorios remotos existentes en la actualidad.

Seguidamente se lleva a cabo la construcción de la plataforma, en primer lugar se busca el modelo matemático que define la dinámica del sistema a desarrollar, seguidamente se realizan unas simulaciones del modelo matemático encontrado. Una vez estudiado el modelo se procede a construir la plataforma.

La plataforma dispone de un autómata programable Wago I/O System 750, con módulo de conexión a Internet, mediante el cual el usuario puede acceder al control del laboratorio desde cualquier ordenador que disponga del software abierto de programación CoDeSys y una conexión a Internet. Esta conexión permite la descarga del programa de control al autómata.

Finalmente, se proponen los enunciados de una serie de prácticas destinadas a realizarse mediante la plataforma previamente construida.





2. Sumario

| | |
|--|----|
| 1. RESUMEN | 1 |
| 2. SUMARIO | 3 |
| 3. GLOSARIO | 7 |
| 4. PREFACIO | 9 |
| 4.1. Origen del proyecto | 9 |
| 4.2. Motivación | 9 |
| 5. INTRODUCCIÓN | 11 |
| 5.1. Objetivos del proyecto | 11 |
| 5.2. Alcance del proyecto | 11 |
| 6. LABORATORIOS REMOTOS. | 13 |
| 6.1. Nuevas opciones de laboratorios | 13 |
| 6.1.1. El laboratorio tradicional (LT) | 14 |
| 6.1.2. Laboratorios virtuales: ventajas e inconvenientes | 15 |
| 6.1.3. Laboratorios remotos: ventajas e inconvenientes | 17 |
| 6.2. Algunos laboratorios remotos en la actualidad. | 20 |
| 6.2.1. Laboratorio remoto para el control de una maqueta de invernadero | 20 |
| 6.2.2. Desarrollo de una Web basada en el control de experimentos de dos tanques acoplados | 23 |
| 6.2.3. Maqueta industrial para docencia e investigación. | 25 |
| 6.2.4. Integración Internacional de plataformas de enseñanza a distancia de automatización con PLC Wago y software CoDeSys | 28 |
| 6.2.5. Web basada en el control remoto de un proceso electro neumático | 32 |
| 6.2.6. Laboratorio remoto a través del Pacífico usando Gigabit Network | 34 |
| 6.2.7. Célula de producción flexible SCADA con propósitos educativos | 36 |
| 6.2.8. Tabla comparativa | 41 |



| | |
|--|-----------|
| 7. ANÁLISIS Y MODELADO DE SISTEMAS DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA. | 45 |
| 7.1. Bola suspendida en un campo magnético..... | 46 |
| 7.1.1. Modelado matemático del sistema..... | 46 |
| 7.2. Actuadores electromagnéticos..... | 48 |
| 7.2.1. Modelado matemático del sistema..... | 49 |
| 7.3. Control del sistema..... | 51 |
| 7.3.1. Estructura de un PID..... | 52 |
| 7.3.2. Método de Ziegler Nichols..... | 52 |
| 8. SIMULACIÓN | 54 |
| 8.1. Bola suspendida en un campo magnético..... | 55 |
| 8.2. Actuadores electromagnéticos..... | 62 |
| 9. PLATAFORMA EXPERIMENTAL | 67 |
| 9.1. Esquema de la plataforma..... | 67 |
| 9.2. Electroimán..... | 68 |
| 9.3. Sensor..... | 70 |
| 9.4. Automata programable (PLC)..... | 73 |
| 9.4.1. Wago. Automata Wago I/O System 750..... | 74 |
| 9.4.2. Entradas y salida automata..... | 79 |
| 9.5. Convertidor CC/CC..... | 79 |
| 9.6. Fuentes de alimentación..... | 83 |
| 9.7. Futuras actuaciones a desarrollar..... | 85 |
| 9.7.1. Diseño del electroimán..... | 86 |
| 9.7.2. Sensores de posición..... | 87 |
| 9.7.3. Bola suspendida en campo magnético..... | 87 |
| 9.8. Manual y propuesta enunciados de prácticas..... | 88 |
| 10. CONCLUSIONES | 89 |
| 11. AGRADECIMIENTOS | 91 |
| 12. BIBLIOGRAFIA | 92 |
| 12.1. Referencias bibliográficas..... | 92 |
| 12.2. Bibliografía complementaria..... | 94 |





3. Glosario

AI (*Analog input*): Entrada analógica

AO (*Analog output*): Salida analógica

API: Autómata Programable Industrial

DAQ (*Data acquisition*): Adquisición de datos

DC (*Direct current*): Corriente continua

DI (*Digital input*): Entrada digital

DO (*Digital output*): Salida digital

EaD: Educación a distancia

EDS (*electrodynamic suspension*): Levitación por repulsión

EMS (*electromagnetic suspension*): Levitación por atracción

ENI (*Ethernet Network Interface*)

IEC (*International Electrotechnical Commission*): Comisión Electrotécnica Internacional

IL (*Instruction List*): Lista de instrucciones

IP (*Internet Protocol*): Protocolo de Internet

ISA (*American Society of instrumentation*): Sociedad Americana de Instrumentación

LT: Laboratorio tradicional

LV: Laboratorio virtual

LR: Laboratorio remoto

MI: Motor de inducción

PLC (*Programmable Logic Controller*): Autómata programable



PC (*Personal Computer*): Ordenador Personal

SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*)

TCP (*Transmission Control Protocol*): Protocolo del control de la transmisión

TIC: Tecnologías de la Información y la Comunicación



4. Prefacio

4.1. Origen del proyecto

El CITCEA (Centro de Innovación Tecnológica de Convertidores Estáticos y Accionamientos) dispone desde hace unos años de un laboratorio remoto basado en motores eléctricos y convertidores de frecuencia. Este proyecto, realizado en colaboración con otras universidades, ha permitido realizar prácticas en el campo de la programación de autómatas a muchos estudiantes de todo el mundo.

Debido al éxito de esta iniciativa, se plantea la posibilidad de realizar otra plataforma basada en otro tipo de componentes. Después de realizar un estudio de diferentes laboratorios remotos ya existentes, se opta por la construcción de uno basado en el movimiento de elementos por campo magnético por ser un tema poco desarrollado en los laboratorios existentes en la actualidad.

4.2. Motivación

Para poder asimilar los conocimientos teóricos explicados por un docente en una clase, es fundamental poder aplicarlos en la realización de prácticas, ya que solo realizando experiencias por uno mismo se pueden asimilar la información recibida.

Sin embargo, los laboratorios tradicionales acarrear una serie de inconvenientes como son su precio, problemas de espacio, franja horaria de utilización.

Un laboratorio remoto, si bien siempre tendrá el inconveniente de no estar en contacto con el equipamiento real, solventa estos problemas. Ofreciendo así a los docentes un complemento (no una alternativa) al uso de laboratorios tradicionales.

Este proyecto pretende crear una plataforma docente online para la formación en el ámbito de los actuadores electromagnéticos a estudiantes de cualquier parte del mundo. De esta forma se permite a los alumnos poner en práctica los conocimientos teóricos adquiridos en asignaturas del área de la automática, sin restricciones espaciotemporales.





5. Introducción

5.1. Objetivos del proyecto

El proyecto que se desarrolla en las siguientes páginas tiene como objetivo principal diseñar y construir una plataforma experimental destinada a ser utilizada en la realización de prácticas relacionadas con la programación de autómatas. La realización de este proyecto parte de cero, de forma que el objetivo es crear una primera versión de esta plataforma, teniendo presente que posteriormente podrá ser ampliada y/o mejorada. No se pretende crear una plataforma buscando el diseño óptimo de forma que ofrezca unas altas prestaciones, sino más bien crear un pequeño laboratorio remoto compacto y simple que permita a los alumnos programar autómatas y posteriormente descargar los programas realizados sobre equipamiento real.

5.2. Alcance del proyecto

Se pretende construir un laboratorio remoto completamente nuevo con todas las dificultades que eso implica. Debido a esto, debe quedar claro cual será el alcance del proyecto. Este se puede definir en los siguientes puntos:

- Investigación de algunas de las diferentes plataformas experimentales con acceso remoto existentes en la actualidad
- Propuesta, diseño y construcción de la maqueta de prácticas.
- Configuración del autómata programable con módulo de conexión a Internet, mediante los manuales proporcionados por el fabricante
- Diseño y elaboración de las placas electrónicas necesarias para el control de la maqueta
- Preparación del manual de prácticas. Consultando bibliografía específica al respecto y revisando la oferta actual existente de los fabricantes del ramo, de manera que los conceptos expuestos sean lo más actuales posible.



- Valoración económica del proyecto
- Análisis del impacto ambiental del proyecto



6. Laboratorios remotos.

En este primer apartado se realiza una visión general de los laboratorios en la actualidad. En primer lugar se definen las características de cada uno de los tres tipos de laboratorios que existen actualmente (laboratorio tradicional, laboratorio virtual y laboratorio remoto) mencionando ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos. Seguidamente se describen algunos de los laboratorios remotos existentes en la actualidad.

6.1. Nuevas opciones de laboratorios

La educación a distancia (EaD) surgió a partir de unas necesidades descubiertas por la enseñanza tradicional presencial, como son la distancia geográfica, la temporalidad, la edad, las dificultades económicas, etc. Por sus características y la flexibilidad de sus materiales se ha erigido con el tiempo en una herramienta eficaz para la solución de los problemas de acceso, calidad e igualdad de la educación. [1]

La evolución de la EaD ha venido determinada principalmente por la innovación en los recursos tecnológicos utilizados. Se pueden diferenciar cuatro etapas básicas, en las que se puede apreciar el rápido crecimiento que han permitido las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) –Fig. 6.1–.

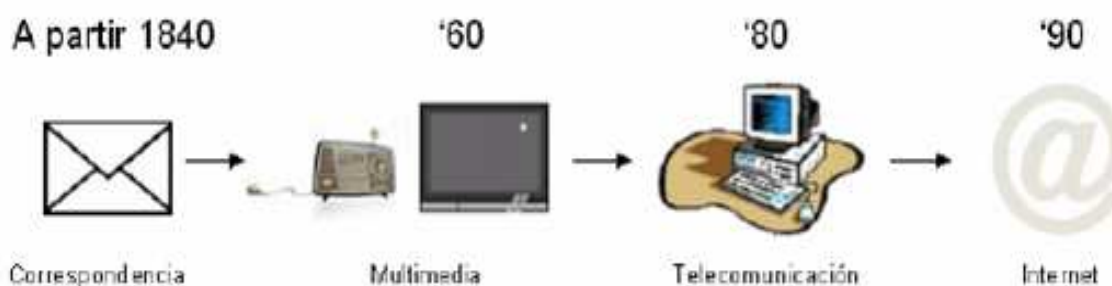


Fig. 6.1 Evolución de la educación a distancia

Si bien, Internet ha sido la herramienta que ha hecho evolucionar y crecer la EaD, ha permitido también algo muy importante, y es la posibilidad de incluir componentes prácticos a este tipo de enseñanza.

Sin duda *Internet* es una herramienta valiosa en la creación de sistemas de apoyo al aprendizaje de materias dotadas de una componente práctica. Una de las soluciones de



e-learning más interesantes son los *e-laboratorios*. Trasladando este entorno a la enseñanza actual, los elementos necesarios para abordar la realización de actividades prácticas son los laboratorios virtuales (LV) y remotos (LR), accesibles a través de *Intranet*, *Internet* o ambientes computacionales, donde el alumno realiza las prácticas de una forma lo más similar posible a como si estuviese en las dependencias del laboratorio tradicional (LT), simulando e interactuado con instrumentos virtuales.

6.1.1. El laboratorio tradicional (LT)

El laboratorio tradicional (LT), ha sido el único lugar de experimentación durante mucho tiempo, tanto de estudiantes como de profesores. Está consensuada en el ámbito académico la enorme importancia que tiene para el aprendizaje la experimentación directa del alumno [2]. En el aula, el profesor transmite al alumno gran cantidad de información en poco tiempo, sin embargo en el LT la transmisión de información es lenta pero facilita el



Fig. 6.2 Laboratorio tradicional (LT).

planteamiento de problemas que permiten al estudiante aplicar sus conocimientos. La principal ventaja del LT es su alta interactividad, al tomar contacto el alumno con el experimento real –Fig. 6.2–.

Aunque el LT es el lugar idóneo de experimentación, también presenta inconvenientes, entre los que destacamos:

- a) El material de instrumentación es excepcionalmente caro, lo que hace difícil que cada alumno pueda realizar todos los experimentos que necesite.
- b) Los recursos en personas y espacios son restringidos, debido a la masificación y problemas presupuestarios.
- c) Las prácticas necesitan de una supervisión más directa por parte del profesor
- d) El LT requiere de la presencia física del estudiante.



- e) Los alumnos suelen entrar en contacto con dispositivos y técnicas con las que no están familiarizados.

6.1.2. Laboratorios virtuales: ventajas e inconvenientes

Un laboratorio virtual (LV) es un sistema computacional que pretende aproximar el ambiente de un LT. Los experimentos se realizan paso a paso, siguiendo un procedimiento similar al de un LT: se visualizan instrumentos y fenómenos mediante objetos dinámicos (*applets* de *Java* o *Flash*, *javascripts*,...), imágenes o animaciones. Se obtienen resultados numéricos y gráficos, tratándose éstos matemáticamente para la obtención de los objetivos perseguidos en la planificación docente de las asignaturas –Fig. 6.3–. Algunas de las ventajas de los LV son:

- a) Acerca y facilita a un mayor número de alumnos la realización de experiencias, aunque alumno y laboratorio no coincidan en el espacio. El estudiante accede a los equipos del laboratorio a través de un navegador, pudiendo experimentar sin riesgo alguno, y, además, se flexibiliza el horario de prácticas y evita la saturación por el solapamiento con otras asignaturas.
- b) Reduce el coste de montaje y mantenimiento de los LT, siendo una alternativa barata y eficiente, donde el estudiante simula los fenómenos a estudiar como si los observase en el LT.
- c) Es una herramienta de autoaprendizaje, donde el alumno altera las variables de entrada, configura nuevos experimentos, aprende el manejo de instrumentos, personaliza el experimento, etc.

La simulación en el LV, permite obtener una visión más intuitiva de aquellos fenómenos que en su realización manual no aportan suficiente claridad gráfica.

- d) Los estudiantes aprenden mediante prueba y error, sin miedo a sufrir o provocar un accidente, sin avergonzarse de realizar varias veces la misma práctica, ya que pueden repetirlas sin límite; sin temor a dañar alguna herramienta o equipo. Pueden asistir al laboratorio cuando ellos quieran, y elegir las áreas del laboratorio más significativas para realizar prácticas sobre su trabajo.
- e) En Internet encontramos multitud de simulaciones de procesos físicos (en forma de *applets* de *Java* y/o *Flash*). Con estos objetos dinámicos, el docente puede



6.1.3. Laboratorios remotos: ventajas e inconvenientes

La creciente complejidad de las actividades prácticas de laboratorio y el desarrollo de las TIC y la Computación, han hecho que los LV evolucionen, transformándose en laboratorios remotos (LR). Éstos son sistemas basados en instrumentación real de laboratorio (no prácticas simuladas), que permite al estudiante realizar actividades prácticas de forma local o remota, transfiriendo la información entre el proceso y el estudiante de manera unidireccional o bidireccional –Fig. 6.4–. El alumno utiliza y controla los recursos disponibles en el laboratorio, a través de estaciones de trabajo de una red local (Intranet) o bien a través de Internet [3].

La diferencia entre el LR y el LV, reside en el tipo de computación subyacente y tratamiento del material: el LR se basa en instrumentos reales (tarjetas de adquisición de datos, instrumentos de medida, conexiones en interfaces diversas, comunicación de datos,...), mientras que en el LV sólo existen procesos de computación basados en simulaciones, ya sean *applets* de *Java*, *Flash*,... o bien programas o ambientes computacionales ejecutados en ordenadores aislados o en una Intranet. Los LR presentan mayores ventajas que los LV, debido a que éstos proporcionan un mayor nivel de interactividad y el alumno entra en contacto con equipamiento real, en lugar de entrar en contacto con programas simulados.

Las principales ventajas de los LV son las siguientes:

- a) Permite aprovechar los recursos, tanto humanos como materiales de los LT. Al integrar, en un único ordenador, los instrumentos necesarios para la ejecución de las prácticas, el ahorro en material de laboratorio es considerable. Se podría pensar que el alumno pierde así la perspectiva real, lo cual es erróneo ya que, por un lado, los instrumentos virtuales diseñados son idénticos a los reales y, por otro, la respuesta de los sistemas es la de un sistema real y no utiliza la simulación más que para la comparación de los resultados.
- b) El LR amplía la oferta horaria del alumno en su formación. Son un recurso extremadamente rentable en la formación. Ofrecen un refresco instantáneo a los



usuarios, previo a la realización de alguna tarea concreta. Los límites espaciales y temporales no son restrictivos para el trabajo de laboratorio.

- c) El alumno no necesita disponer del software de simulación. Puede disponer, en cualquier momento, de las mismas versiones del *software*, dado que éste se actualiza en el centro servidor. Además, no necesita tener un ordenador con la suficiente memoria para ejecutar el *software*.

No todo son ventajas, a continuación se muestran los inconvenientes más destacados:

- a) La experimentación en tiempo real exige períodos de muestreo relativamente pequeños, requiriendo el uso de recursos que por lo general, resulta costosos, además de la necesidad de disponer de sistemas operativos de tiempo real. Al conectar sistemas reales de laboratorio a Internet, es necesario implementar los protocolos de comunicaciones correspondientes y procesadores potentes, encareciendo el producto.
- b) Todas las actuaciones sobre los sistemas deben poder realizarse utilizando entradas y salidas digitales o analógicas. Tanto el *hardware* como el *software* han de ser suficientemente robustos para que no fallen en ningún momento, mientras el alumno los está utilizando de manera que responda a las expectativas que éste tenga.
- c) Mientras que las aplicaciones multimedia y los *applets* de experimentación con *Java* y *Flash*, están bastante extendidos en *Internet*, esto no ocurre todavía con los LR. Son escasos los ejemplos de aprendizaje remoto con experimentos en tiempo real.





Fig. 6.4 Laboratorio remoto (LR)



6.2. Algunos laboratorios remotos en la actualidad.

Si bien todos los laboratorios que se describen a continuación son laboratorios reales, hay una diferencia que resalta entre ellos y es que algunos están diseñados para realizar experimentos reales a distancia sobre distintos temas (presión, temperatura, fluidos,...) y otros están pensados para realizar practicas en el campo de la programación de autómatas (*PLCs*).

6.2.1. Laboratorio remoto para el control de una maqueta de invernadero.

Es una maqueta realizada por el *Dpto de Lenguajes y Comunicación de la Universidad de Almería* –Fig. 6.5–. El proyecto tiene como objetivo diseñar un sistema multiplataforma y escalable de control integrado y supervisión de riego y condiciones climáticas de una maqueta de invernadero a través de Internet. Se entiende por sistema multiplataforma aquél que incluye la posibilidad de realizar dichas operaciones desde un autómata programable (*PLC*) o desde un computador industrial (*PC*). El término escalable indica la posibilidad de implantación del sistema desarrollado tanto a nivel de laboratorio como a nivel industrial [4].

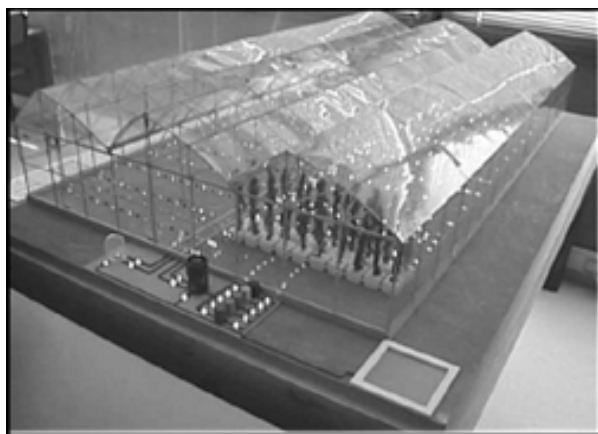


Fig. 6.5 Maqueta original *Universidad de Almería* [4]



6.2.1.1. Descripción de la maqueta.

Para el desarrollo del laboratorio remoto se realizaron una serie de modificaciones sobre la maqueta original de un invernadero, con el fin de acercar el entorno de laboratorio al ambiente real de un invernadero. A la maqueta original se le añadieron los siguientes actuadores:

- Ventilación forzada mediante un ventilador de corriente continua.
- Una resistencia para simular la calefacción.
- Foco de 500W para simular la radiación solar, haciendo uso de un opto acoplador se regula la intensidad del mismo para simular así la radiación solar a lo largo de todo el día.

Además se ha acoplado una estación meteorológica que contiene sensores de:

- Radiación global
- Radiación PAR
- Velocidad del viento
- Dirección del viento.
- Temperatura y humedad.



Fig. 6.6 Estación meteorológica.
Universidad de Almería [4]

6.2.1.2. Algoritmos de control.

Para el desarrollo de los algoritmos de control en el computador se hace uso de la herramienta *LabVIEW de National Instruments versión 6.1*, que constituye uno de los sistemas de adquisición de datos y control más extendidos en entornos industriales.



LabVIEW es una herramienta diseñada especialmente para monitorizar, controlar, automatizar y realizar cálculos complejos de señales analógicas y digitales capturadas a través de tarjetas de adquisición de datos, puertos serie y *GIPBS* (Buses i Intercambio de Propósito General).

Los algoritmos de control implementados en esta maqueta son:

- Control temperatura con ventilación.
 - Control proporcional en función de la temperatura interior, exterior y velocidad del viento y humedad.
 - Incorporación de acción integral.
 - Control teniendo en cuenta condiciones extremas.
- Control temperatura con calefacción
 - Control proporcional teniendo en cuenta condiciones externas (temperatura tubos y posición válvula). Influencia de velocidad de viento y temperatura exterior.
 - Incorporación de acción integral.
- Control de riego en bucle abierto.

6.2.1.3. Desarrollo del sistema.

El PLC utilizado ha sido un Siemens de la serie S7-200 con CPU 214. El lenguaje de programación utilizado ha sido lista de instrucciones (AWL o IL) y para la programación del autómatas se ha hecho uso de la aplicación *Step 7 MicroWin*. De esta forma se consigue un control del invernadero de forma autónoma y robusta. La adquisición de los datos de los sensores se realiza a través de un conjunto de entradas analógicas/digitales que posee el PLC. Del mismo modo, la actuación sobre el invernadero se lleva a cabo usando las salidas analógicas y digitales de las que dispone el autómatas.

Una vez desarrollada la aplicación de forma local, se desarrolla un sitio *Web* para conseguir su control a distancia. La dirección del sitio Web es: <http://aer.ual.es/maqueta>



6.2.2. Desarrollo de una Web basada en el control de experimentos de dos tanques acoplados.

Este laboratorio remoto basado en una *Web* encargada de controlar dos tanques acoplados ha sido desarrollado por el *Departamento de Ingeniería Eléctrica en La Universidad Nacional de Singapur* [5]. El laboratorio es una herramienta educativa para los alumnos de dicha Universidad, de forma que pueden realizar una serie de experimentos con estos dos tanques, a cualquier hora y desde cualquier lugar accediendo a la página: <http://vlab.ee.nus.edu.sg/vlab/control/>.

6.2.2.1. Descripción del laboratorio.

La maqueta consiste en dos tanques acoplados, montados sobre un recipiente que almacena agua –Fig. 6.7–. Los tanques están cerrados, pero con una salida para los tubos que devuelven el agua al recipiente. La cantidad de agua retornada al recipiente es aproximadamente proporcional a la crecida de altura del agua del tanque. El nivel de agua de los tanques es controlado por dos sondas capacitivas, cada una de ellas con un circuito electrónico que proporciona el nivel de agua del correspondiente tanque.

Cabe resaltar que la maqueta puede funcionar de forma manual, en la que el usuario conecta cada una de las bombas a voluntad, o controlada mediante un PID en la que el usuario debe introducir algunos valores de referencia.

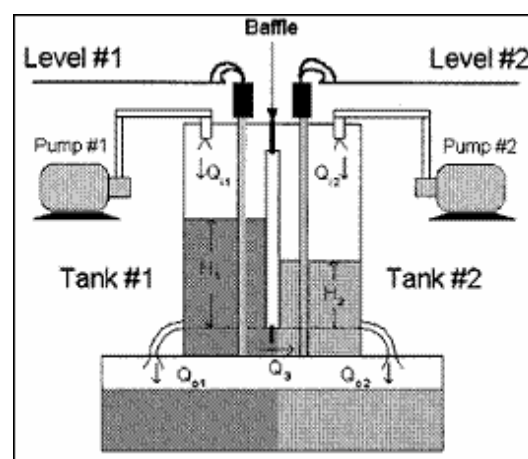


Fig. 6.7 Esquema de la maqueta [5]



6.2.2.2. Algoritmos de control.

Para el desarrollo de los algoritmos de control en el computador se hace uso de la herramienta *LabVIEW G.*

Los algoritmos de control implementados en esta maqueta son:

- Altura de fluido en el tanque 1.
- Altura de fluido en el tanque 2.
- Fluido extraído del tanque 1.
- Fluido extraído del tanque 2.
- Fluido circulando entre los 2 tanques.

6.2.2.3. Desarrollo del sistema.

El usuario accede al laboratorio remoto a través de un *PC*, conectando con un servidor *HTTP*. El *PC* a través de *LabView* funciona como controlador. Conectado a los tanques acoplados, una tarjeta de adquisición de datos de 50 pins, (*DAQ*), el *PC* implementa el control local de los tanques acoplados suministrando dos voltajes a las bombas. Una cámara conectada al *PC* proporciona un feedback al usuario. Un micrófono conectado al mismo *PC* captura el sonido de los tanques acoplados. Este funcionamiento se esquematiza en la siguiente figura. –Fig. 6.8–

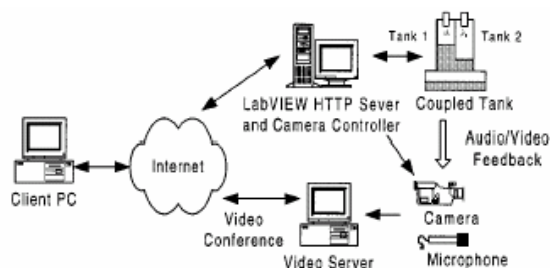


Fig. 6.8 Diagrama de funcionamiento [5]



6.2.3. Maqueta industrial para docencia e investigación.

Esta maqueta, realizada por *El Área de Automática y Control del Instituto de Automática y Fabricación de la Universidad de León* [6], tiene principalmente dos objetivos, en primer lugar diseñar un sistema que permita realizar procesos industriales manejando de forma independiente o bien de forma conjunta 4 variables: presión, temperatura, caudal y nivel. Por otra parte facilitar su operación, manejo y supervisión de forma remota mediante *Internet*.

6.2.3.1. Descripción de la maqueta.

La maqueta industrial está constituida por un circuito principal de proceso y por dos circuitos de *utilities* asociados a la variable temperatura –Fig. 6.9–:

- Circuito de proceso: diseñado para el control de cuatro variables físicas en recirculación con flexibilidad para la interacción o independencia entre ellas. Básicamente está constituido por dos depósitos en cascada de 5 y 6,5 litros de capacidad asociados a los lazos de control de nivel. La recirculación se realiza mediante un circuito de bombeo impulsado por una bomba centrífuga con accionamiento a velocidad variable. Incorpora la instrumentación necesaria para implementar los lazos de control de presión, caudal, nivel y temperatura del fluido de proceso.
- Circuito calentamiento: es el encargado de producir y almacenar agua caliente mediante resistencias eléctricas con accionamiento variable estático. La transferencia de calor al proceso se realiza mediante un intercambiador de placas de alto rendimiento que proporciona una gran transferencia térmica y una enorme reducción del espacio ocupado. Mediante una válvula de tres vías motorizada, en rango partido, se regula el caudal de agua caliente y por lo tanto la transferencia de calor al proceso.
- Circuito de enfriamiento de agua: proporciona la capacidad de reducir la temperatura del proceso utilizando agua de red como fuente. La transferencia de calor al proceso se realiza mediante un intercambiador de placas de similares características al de agua caliente, estando la regulación encomendada a una válvula de dos vías motorizada.



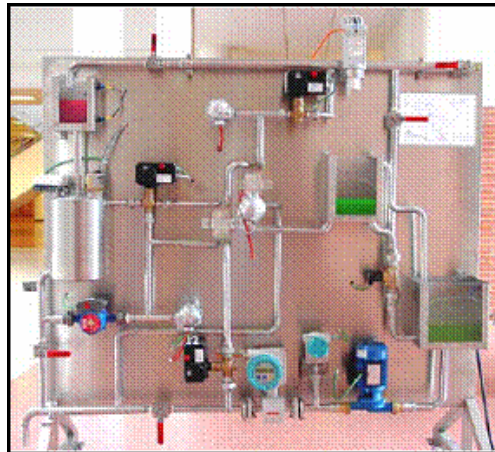


Fig. 6.9 Fotografía de la maqueta. *Universidad de León* [6]

6.2.3.2. Algoritmos de control

En función de la instrumentación que lleva incorporada la maqueta, algunas de las variables que se pueden manejar son las siguientes:

- Transmisor de temperatura agua caliente
- Transmisor de temperatura agua fría
- Transmisor de temperatura agua fría
- Interruptor nivel alto depósito D02
- Interruptor nivel bajo depósito D02
- Bomba centrífuga proceso
- Bomba agua caliente



Para designar y representar los diferentes elementos de que consta la planta, se han adoptado las normas de la Sociedad Americana de Instrumentación (*ISA*), concretamente la Norma *ISA-S5.1-84*, que es prácticamente un estándar de factor en las industrias y que además facilita la asignación de códigos y la simbología para los accionamientos, instrumentos de medida y control, y sistemas auxiliares. Con esta norma, se obtiene una etiqueta identificadora denominada *TAG*, que consta de dos partes, la primera formada por letras, en mayúsculas y hasta un número de 4, que identifica la funcionalidad; la segunda, formada por números que identifican el sistema, circuito o bucle donde se ubica el elemento. –Fig. 6.10–

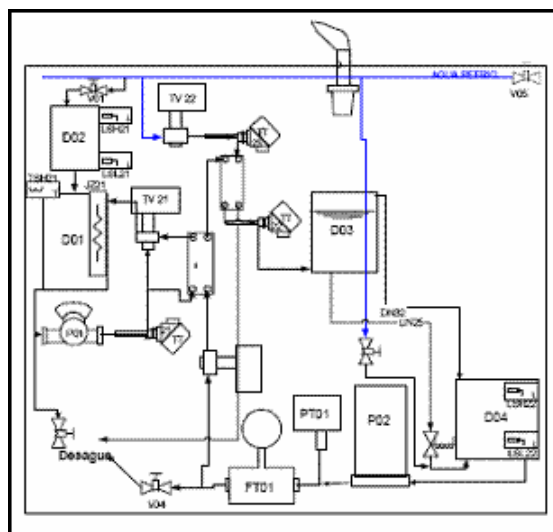


Fig. 6.10 Esquema de la maqueta. [6]

6.2.3.3. Desarrollo del sistema

En este caso, la plataforma definida consiste en una estructura de triple capa, con una capa servidor donde reside el sistema físico, una capa intermedia constituida por una base de datos (*SQL Server*) y una capa cliente que es la encargada de facilitar la *interface* hombre-máquina para el acceso de los usuarios remotos. Para acceder al sistema físico dentro de la capa servidor, se utiliza un controlador *Opto22* de la familia *Mistic*, modular y escalable. La capa intermedia, además de la base de datos requiere de un gestor de bases de datos y de un servidor Web. Respecto de la capa cliente, está constituida por los sinópticos a través de los cuales los usuarios acceden al sistema, interactúan con él y visualizan los resultados. De las diferentes opciones existentes, se escoge la basada en *applets* de *JAVA*.



En cuanto a las herramientas software utilizadas en el diseño de la plataforma tecnológica, se ha perseguido el mínimo coste posible, por lo que se han utilizado versiones de producto *freeware* o de productos comerciales de amplia difusión. –Fig. 6.11–

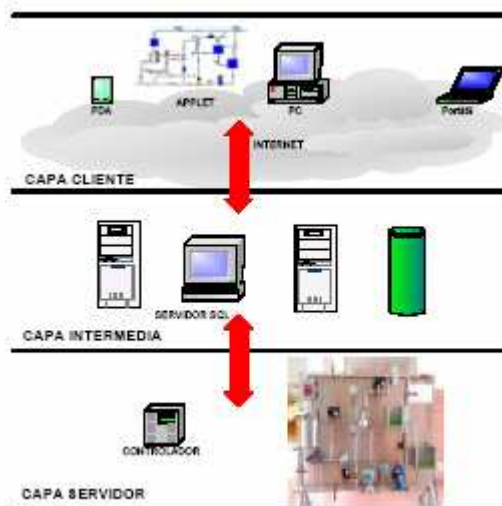


Fig. 6.11 Diagrama funcional de la aplicación. [6]

6.2.4. Integración Internacional de plataformas de enseñanza a distancia de automatización con PLC Wago y software CoDeSys.

Esta maqueta realizada en Barcelona, Manaus y Santiago de Cuba consta de diferentes plataformas para ser usadas en automática industrial. Las plataformas son accesibles vía Internet, incluyendo el *software* de licencia libre *CoDeSys* y consta de diferentes sensores y actuadores de uso común en instalaciones industriales.

La plataforma ha sido diseñada como un conjunto de distintos accionamientos eléctricos, destinada a ser utilizada para la enseñanza a distancia. La finalidad de ésta no es conseguir una gran potencia en las aplicaciones, sino disponer de un modelo compacto, simple y visual que permita a los alumnos programar los autómatas y trabajar con las diferentes estaciones que forman este laboratorio remoto [7].



6.2.4.1. Descripción de la maqueta

La maqueta consta de las siguientes plataformas:

- PLC1. Cinta corredera accionada por un motor paso a paso (MP1).

Esta estación de la plataforma está constituida por un motor paso a paso que acciona una cinta corredera que dispone de un elemento metálico. Las bobinas del motor se alimentan directamente de las cuatro salidas digitales del autómeta, a través de cuatro resistencias limitadoras de corriente, y cuatro diodos de vía libre para evitar las sobre tensiones de conmutación de cargas inductivas.

La finalidad de esta estación es que el alumno determine la secuencia de fases del motor paso a paso para accionar la cinta en ambos sentidos y aplique un control de posición.

- Motor de corriente continua accionada por un convertidor DC/DC (MCD).

Los elementos que constituyen esta estación son un motor de corriente continua que dispone de un reductor donde está acoplado un disco con elementos metálicos, a modo de encóder de baja resolución. Para controlar el motor desde el autómeta se ha diseñado un convertidor DC/DC reductor que coge como señal de consigna el valor de la salida analógica del autómeta para determinar el ciclo de trabajo del interruptor *Mosfet* que alimenta el motor.

- PLC2. Motor paso a paso (MP2).

Esta estación está constituida por un motor paso a paso que dispone de un eje metálico excéntrico. Las bobinas del motor se alimentan, de igual manera que el motor de la primera estación, de las salidas digitales del autómeta a través de un circuito intermedio limitador de corriente. La finalidad de esta estación es que el alumno determine la secuencia de fases del motor paso a paso, para que el motor gire en los dos sentidos, y que accione el motor en dos modos de funcionamiento, paso a paso completo y medio paso, para comprobar las características de par y velocidad de ambos modos.

- Motor de inducción con variador de frecuencia (MI).



Esta parte de la plataforma acciona un motor de inducción trifásico con un convertidor de frecuencia comercial. La salida analógica del autómata de tensión variable en el rango 0-10V da la consigna de velocidad al convertidor. Esta estación pretende mostrar al alumno la posibilidad de interconexión de los autómatas a accionamientos disponibles en el mercado y acercar al alumno una típica aplicación industrial de control de velocidad.

- Regulación de temperatura (RT).

Esta estación está constituida por una sonda de temperatura Pt-100, una resistencia de partencia y un ventilador. La sonda capta la temperatura de la resistencia de potencia. La señal generada por ésta se adapta a una señal de tipo 4-20mA mediante el circuito integrado XTR105, para introducirla a la entrada analógica del autómata.

El funcionamiento del sistema es aplicar una tensión variable en bornes de la resistencia generando un paso de corriente que se disipa por efecto *Joule*. Para controlar la tensión se utiliza el troceador reductor, antes mencionado, que utiliza una salida analógica del autómata para determinar el ciclo de trabajo del transistor *Mosfet*.

La finalidad del montaje es mostrar al alumno el control de un sistema de evolución lenta, en este caso un control de temperatura, para que se pueda apreciar la progresión de los cambios. Se introducirá el concepto de control con un regulador tipo PID, implementado en un bloque de *CoDeSys*.

- Cámara IP.

La enseñanza a distancia a través de laboratorios remotos requiere un dispositivo de visualización para poder comprobar el correcto funcionamiento de las aplicaciones al descargar los programas a los autómatas.

En la plataforma está instalada una cámara IP que dispone de servidor propio, sin la necesidad de estar conectada a un PC –Fig. 6.12–.





Fig. 6.12 Vista de la plataforma vía cámara IP. *ETSEIB*

6.2.4.2. Algoritmos de control.

En la Tabla. 6.1 y en la Tabla. 6.2 se adjuntan la relación de entradas y salidas digitales y analógicas de los dos PLC's que integran la plataforma indicando la estación de trabajo.

| I/O | Dirección | Descripción función | Estación |
|-----|-----------|---|----------|
| DI | %IX2.0 | Sensor inductivo posición 1 | MP1 |
| DI | %IX2.20 | Sensor inductivo posición 2 | MP1 |
| DI | %IX2.40 | Sensor inductivo posición 3 | MP1 |
| DI | %IX2.60 | Sensor inductivo detección pulsos | MCC |
| DO | %QX2.0 | Bobina 1 motor paso a paso | MP1 |
| DO | %QX2.1 | Bobina 2 motor paso a paso | MP1 |
| DO | %QX2.2 | Bobina 3 motor paso a paso | MP1 |
| DO | %QX2.3 | Bobina 4 motor paso a paso | MP1 |
| DO | %QX2.7 | Activación interruptor estático luz | IL1 |
| DO | %QW0 | Control <i>Duty Cycle</i> del convertidor DC/DC | MCD |

Tabla. 6.1. Relación de *Input* / *Output* del PLC 1



| I/O | Dirección | Descripción función | Estación |
|-----|-----------|---|----------|
| DI | %IX2.0 | Sensor Inductivo | MP2 |
| DO | %QX2.0 | Bobina 1 Motor Paso a Paso | MP2 |
| DO | %QX2.1 | Bobina 2 Motor Paso a Paso | MP2 |
| DO | %QX2.2 | Bobina 3 Motor Paso a Paso | MP2 |
| DO | %QX2.3 | Bobina 4 Motor Paso a Paso | MP2 |
| DO | %QX2.4 | Sentido de Giro Positivo Motor Inducción | MI |
| DO | %QX2.5 | Control Duty Cycle del convertidor DC/DC | IL1 |
| DO | %QX2.6 | Activación del Ventilador | RT |
| DO | %QX2.7 | Activación Interruptor Estático Luz | IL2 |
| AI | %IW0 | Velocidad del Motor de Inducción | MI |
| AI | %IW1 | Sonda de temperatura | RT |
| AO | %QW0 | Consigna de Velocidad Motor de Inducción | MI |
| AO | %QW1 | Control del <i>Duty Cycle</i> del Convertidor | MI |

Tabla. 6.2. Relación de *Input / Output* del PLC 2

6.2.5. Web basada en el control remoto de un proceso electro neumático.

Esta maqueta realizada en el *Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática de Valladolid*, tiene como objetivo mostrar el funcionamiento básico de un proceso electro-neumático sin la necesidad de ir al laboratorio. Esta herramienta se basa en un servidor de *Internet* y usa *LabVIEW* para comandar dos *PLC*'s, éstos interactúan con la planta a través de Java. [8].

6.2.5.1. Descripción de la maqueta.

El primer componente es una planta electro-neumática, diseñada haciendo énfasis en la flexibilidad, es decir que cambiando los programas del PLC se hace posible el estudio de diferentes plantas neumáticas.



Para reducir tanto el coste como el tamaño ocupado por la planta, el número de elementos utilizados es limitado (3 cilindros y 5/2 válvulas de control). Estas válvulas pueden ser controladas de forma automática y manual –Fig. 6.13–

Como la planta será controlada a distancia, se añaden unos cuantos sensores de seguridad de forma que se garantiza un correcto funcionamiento.

Finalmente, se añade un control remoto para hacer el proceso accesible desde cualquier ordenador.

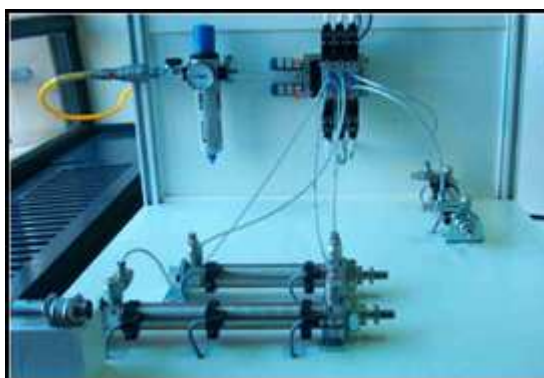


Fig. 6.13 Fotografía de la maqueta. *Universidad de Valladolid* [8]

6.2.5.2. Algoritmos de control.

Las señales de entrada y salida son visibles a través de indicadores luminosos y dan el estado actual de los sensores, botones y electro válvulas. Su estado es determinado por el proceso y por lo tanto no puede ser cambiado por el estudiante.

El estudiante puede seleccionar unos cuantos parámetros, los cuales definen el proceso a ejecutar por los cilindros. En concreto puede seleccionar:

- Cual de las 4 diferentes funciones será ejecutada:
 - Mover cilindro 1 hasta el medio
 - Mover cilindro 1 hasta el final
 - Mover cilindro 2 hasta el final



- Mover cilindro 3 hasta el final
- No mover ninguno de los 3 cilindros.
- El número de veces que el ciclo ha de ser ejecutado, limitado a 100 repeticiones
- Cuanto tiempo el cilindro 1 tiene que esperar en el final de la posición antes de retornar a la posición de inicio, limitado a 10s.
- Cuanto tiempo el cilindro 2 tiene que esperar en el final de la posición antes de retornar a la posición de inicio, limitado a 10s.

6.2.5.3. Desarrollo del sistema.

Para controlar la planta uno o más PLC's son necesarios. Los PLC seleccionados son *Schneider TSX Nano Series*, porque ofrecen conectividad *Modbus* a bajo precio, en concreto:

- TSX 07 31 2408 con 14 inputs, 10 outputs.
- TSX 07 31 1628 con 9 inputs, 7 outputs.

En cuanto al intercambio de datos entre los PLC's, el programa *LabVIEW* es el Master, debido a que los PLC's no se pueden comunicar entre ellos sin la interferencia del Master, el programa *LabVIEW* coordina la transferencia de datos entre ellos.

6.2.6. Laboratorio remoto a través del Pacífico usando Gigabit Network.

El objetivo de este estudio era el de desarrollar un laboratorio remoto de motores eléctricos usando una red de alta velocidad (15Mb/s) entre Japón y E.E.U.U. El cliente situado en *Stanford University, Stanford, CA*, accede al laboratorio remoto localizado en Japón.



6.2.6.1. Descripción de la maqueta.

En la maqueta se puede encontrar un motor *brushless* trifásico, usando un imán permanente como rotor y un estator de seis polos.

Otro tipo de motor de que consta la maqueta es el motor paso a paso –Fig. 6.14–.

La maqueta cuenta también con un relé que permite cambiar la conexión de las bobinas de forma que se pueden conseguir dos configuraciones: estrella y triángulo.[9]

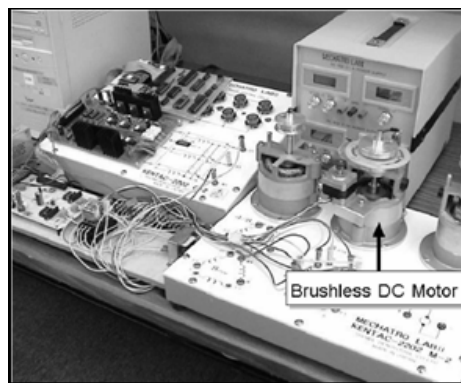


Fig. 6.14 Fotografía de la maqueta. *Standfor Univeristy* [9]

6.2.6.2. Algoritmos de control.

Los *inputs/outputs* para el control remoto, son los siguientes:

- Seleccionar 120° o 180°
- Estrella/Triángulo
- Sentido de giro horario/antihorario



6.2.7. Célula de producción flexible SCADA con propósitos educativos.

Este proyecto desarrollado por CITCEA-DEE-UPC (Centro de Innovación Tecnológica de Convertidores Estáticos y Accionamientos), Departamento de Control Automático Facultad de Ingeniería Eléctrica Universidad de Oriente (FIE-UO) y Departamento de Mecatrónica Escuela Superior de Tecnología Universidad del Estado de Amazonas (EST-UEA) trata sobre el desarrollo de un sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) empleado en una célula de producción flexible con propósitos educativos en diferentes ámbitos (SCADA, programación PLC y comunicaciones industriales) [10].

Muestra la experiencia llevada a cabo en el CITCEA-UPC situado en Barcelona, donde un laboratorio remoto con una célula de producción flexible ha sido desarrollado con la ayuda de *Schneider Electric* y su *Training Center*.

Esta célula flexible es un sistema industrial a pequeña escala, donde los estudiantes pueden adquirir experiencia trabajando con componentes reales de la industria, tales como sensores de posición, actuadores neumáticos y eléctricos, drivers, PLC's, sistemas SCADA y redes de comunicación industriales.

6.2.7.1. Descripción de la maqueta.

La célula de producción es el sistema a controlar. Esta célula –Fig. 6.15– tiene que producir diferentes elementos dependiendo de la codificación binaria de la base de los mismos. Cada pieza manufacturada debe contener al menos un cilindro y una cubierta. Dependiendo de la codificación debe contener también un plato y una bola.



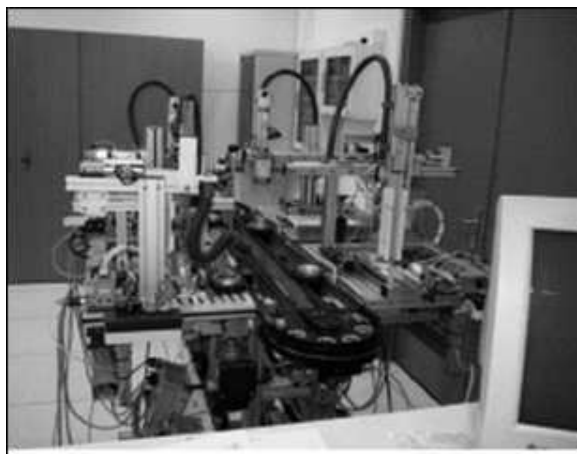


Fig. 6.15 Célula de producción flexible. *ETSEIB* [10]

La célula se compone de cuatro estaciones donde se realizan diferentes acciones. Las estaciones están conectadas mediante una cinta transportadora accionada mediante un motor de inducción más un convertidor de frecuencia, de modo que cada base se mueve a la correcta velocidad siguiendo la secuencia 1-2-3-4-1. En la primera etapa un contenedor vacío es colocado en la base. En la segunda estación, un plato o una bola es colocado dependiendo de la codificación. En la tercera, la tapa es colocada en el contenedor, y finalmente en la cuarta el elemento producido es almacenado en la correspondiente posición.

Se utiliza una cámara IP para permitir a los estudiantes trabajar a distancia y observar el desarrollo del proceso.

6.2.7.2. Desarrollo del sistema.

El control de la célula se ha llevado a cabo con PLC's (*Modicon TSX 37 Micro de Schneider Electric*). Cada estación tiene su propio autómatas, que debe controlar la secuencia de producción e intercambiar información con los otros PLC's. El software empleado es *PL7 Pro*, comercializado por Schneider Electric.

En relación a la arquitectura de comunicaciones, una tarjeta *Ethernet* capaz de soportar el Modbus y Unite sobre TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) ha sido



empleada para permitir la conectividad. Por lo tanto, los PLC's empleados son accesibles a través de Internet, tanto para ser programados usando el software PL7 Pro (*Schneider Electric*) o para permitir la lectura y escritura de información por sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*).

Los únicos ordenadores necesarios son los que trabajan como sistema SACADA. La comunicación entre SCADA y los PLC's ha sido implementada a través de aplicaciones OPC. Por lo tanto, hay un servidor OPC sirviendo datos al SCADA (*actuando como cliente de OPC*). La principal ventaja esta aplicación, es que permite un eventual cambio de la arquitectura de comunicaciones sin modificar la aplicación SCADA.

La lectura de información es llevada a cabo periódicamente cada segundo usando *Modbus TCP/IP*. Con el objetivo de minimizar la cantidad de información intercambiada entre el servidor OPC i los PLC's, la información se ha compactado en una cierta área de memoria del PLC. Cada elemento (cilindro, motor o válvula) tiene una palabra asociada. Cada bit de la palabra guarda información relevante sobre el estado del elemento.





6.2.8. Tabla comparativa.

| | QUÉ | PARA QUE | QUIEN | COMO | INTERFÍCIE |
|--------------------|--|--|---|--|---|
| Invernadero | Diseñar un sistema multiplataforma y escalable de control integrado y supervisión de riego y condiciones climáticas de una maqueta de invernadero a través de Internet. | Permitir a los alumnos comprobar sus conocimientos teóricos de modelado y control sobre una maqueta. | Dpto de Lenguajes y Comunicación de la Universidad de Almería. | El PLC utilizado ha sido un Siemens de la serie S7-200 con CPU 214 | El acceso se realiza a través de la siguiente web: http://aer.ual.es/maqueta |
| Tanques acoplados | Controlar dos tanques acoplados. | El laboratorio es una herramienta educativa para los alumnos de dicha Universidad, de forma que pueden realizar una serie de experimentos con estos dos tanques | Departamento de Ingeniería Eléctrica en La Universidad Nacional de Singapur. | Controlado mediante PC. | El acceso se realiza a través de la siguiente web: http://vlab.ee.nus.edu.sg/vlab/control/ . |
| Maqueta (P,V, ...) | Diseñar un sistema que permita realizar procesos industriales manejando de forma independientemente o bien de forma conjunta 4 variables: presión, temperatura, caudal y nivel. Manejo y supervisión remota. | Facilitar el acceso a personas (profesores, alumnos,...) de forma fácil y flexible a instalaciones reales y costosas y en las que se pueda interactuar sobre ellas de forma real y no simulada | El Área de Automática y Control del Instituto de Automática y Fabricación de la Universidad de León | La maqueta puede ser controlada por un PLC, por un DCS o por tarjetas de adquisición de datos y PC | Aplicaciones ligeras (páginas inferiores a 70k) y fácilmente reutilizables para otros sistemas físicos. |

| | | | | | |
|---------------------------|---|---|--|---|---|
| PLC Wago | Laboratorio remoto formado por las siguientes plataformas: Cinta corredera accionada por un motor paso a paso (MP1). Motor de corriente continua accionada por un convertidor DC/DC (MCD). PLC2. Motor paso a paso (MP2). Motor de inducción con variador de frecuencia (MI). Regulación de temperatura (RT) | La finalidad no es conseguir una gran potencia en las aplicaciones, sino disponer de un modelo compacto, simple y visual que permita a los alumnos programar los autómatas y trabajar con las diferentes estaciones que forman este laboratorio remoto. | CITCEA-UPC Centro de Innovación Tecnológica en Convertidores Estáticos y Accionamientos – Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. EST-UEA Escuela Superior de Tecnología – Universidad del Estado de Amazonas, Manaus, AM, Brasil. FIE-UO Facultad de Ingeniería Eléctrica – Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba. | La maqueta es controlada mediante dos PLC's | El software Codesys permite la conexión directa con los PLC's. También hay una web de apoyo con información sobre la plataforma. http://www.citcea.upc.edu |
| Proceso electro-neumático | Planta electro-neumática, diseñada haciendo énfasis en la flexibilidad. | mostrar el funcionamiento básico de un proceso electro-neumático sin la necesidad de ir al laboratorio | Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática de Valladolid | Los PLC seleccionados son Schneider TSX Nano Series, | |
| Cél. Prod. Flexible | Desarrollo de un sistema SCADA empleado en una célula de producción flexible | Propósitos educacionales en diferentes ámbitos (SCADA, programación PLC y comunicaciones industriales). | Experiencia llevada a cabo en el CITCEA-UPC situado en Barcelona, con la ayuda de Schneider Electric y su Training Center. | El control de la célula se ha llevado a cabo con PLC's (Modicon TSX 37 Micro de Schneider Electric). El software empleado es PL7 Pro, comercializado por Schneider Electric | El software PLpro7 permite la conexión directa con los PLC. También hay una web de apoyo con información sobre la plataforma. http://www.citcea.upc.edu |

7. Análisis y modelado de sistemas de levitación magnética.

Desde sus primeros estudios, la levitación magnética ha sido aplicada en numerosos sistemas, como por ejemplo, rodamientos de bajo roce, sistemas mecánicos de almacenamiento de energía, sistemas de transporte de alta velocidad o simplemente para hacer levitar un objeto de manera que se pueda estudiar el mismo con la menor interferencia mecánica posible, por ejemplo en los túneles de viento, la estructura mecánica que soporta al modelo en estudio introduce errores en la medición de empuje y elevación. Una solución a este problema es utilizar un campo magnético para sostener al modelo sin alterar las condiciones. Considerando que el fluido es un gas ordinario no conductor el campo no interferirá el flujo de aire.

Existen dos principios de levitación que sustentan todas estas aplicaciones: repulsión y atracción. En la levitación por repulsión (*electrodynamic suspension*, EDS), las corrientes inducidas en un cuerpo conductor generan las fuerzas de levitación. Este sistema es estable en su eje vertical, y tiene un punto de equilibrio natural. En la levitación por atracción (*electromagnetic suspension*, EMS) [11], un cuerpo es atraído por un flujo magnético en contra de la gravedad; el equilibrio que se produce entre la fuerza de atracción y la gravedad es inestable, por lo que la levitación por atracción es impracticable sin la ayuda de sistemas de control (teorema de Earnshaw) [12].

Se decide estudiar dos sistemas magnéticos:

- Bola suspendida en un campo magnético
- Actuadores electromagnéticos



7.1. Bola suspendida en un campo magnético

7.1.1. Modelado matemático del sistema.

Para encontrar la ecuación de movimiento del objeto, se aplica el Segundo Principio de Newton dado por la siguiente expresión:

$$\sum F = m \cdot a \tag{Ec. 7.1}$$

Donde $\sum F$ son las fuerzas aplicadas al sistema, m es la masa del cuerpo y a es la aceleración del mismo.

Las fuerzas que actúan sobre el sistema son las que se muestran en la figura 7.1 [13]:

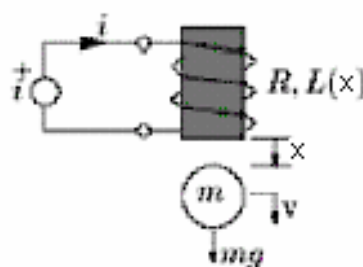


Fig. 7.1 Esquema físico del dispositivo [13]:

- mg : Fuerza producida sobre la masa m del cuerpo debido a la aceleración del campo gravitatorio terrestre g .
- $k \cdot v$: Fuerza originada por la fricción o rozamiento del cuerpo. Esta fuerza crece con la velocidad v , es decir que va a ser mayor cuanto más rápido se mueva el cuerpo oponiéndose siempre al sentido de movimiento. k es el coeficiente de fricción viscosa.
- $F(x,i)$: Fuerza ejercida por la bobina, dependiente de la posición del cuerpo y de la corriente. y es la posición vertical del objeto con respecto a la bobina e i es la corriente.

La sumatoria de fuerzas esta dada por la siguiente ecuación:

$$\sum F = m \cdot g - k \cdot v + F(x,i) \tag{Ec.7.2}$$

Por lo tanto igualando las expresiones 7.2 y 7.3:

$$m \cdot g - k \cdot v + F(x,i) = m \cdot a \tag{Ec.7.3}$$



Para interpretar el comportamiento de la fuerza aplicada por la bobina sobre el cuerpo, se debe analizar el comportamiento de la inductancia de la bobina en presencia del cuerpo metálico.

Esta inductancia varía según la posición del cuerpo metálico respecto a la bobina, de este modo la inductancia tendrá un valor de L cuando la partícula esté alejada ($x \rightarrow \infty$), y un valor de $L + L_0$ si el cuerpo metálico está próximo a la bobina, tal y como se muestra en la siguiente figura –Fig. 7.2–:

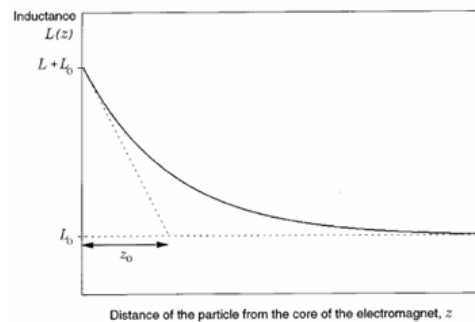


Fig. 7.2 Variación de la inductancia [14]

La variación de la inductancia entre estos dos extremos puede ser descrita de diferentes formas. Hurley y Wölfle [14] consideraron una función exponencial:

$$L(x) = L + L_0 e^{\frac{-x}{z_0}} \quad (\text{Ec.7.4})$$

Donde z_0 es una longitud constante.

Otra aproximación es la de asumir que la inductancia varía inversamente proporcional a la posición de la partícula x de forma que [15]:

$$L(x) = L + \frac{L_0}{1 + \frac{x}{x_0}} \quad (\text{Ec.7.5})$$

Una vez obtenido el modelo matemático de la variación de la inductancia, se considera la Ec.7.6 como la energía almacenada en la bobina:

$$E(x, i) = \frac{1}{2} L(x) \cdot i^2 \quad (\text{Ec.7.6})$$



De forma que la fuerza $F(x,i)$ viene definida por:

$$F(x,i) = -\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{L_0 \cdot i^2}{2 \cdot c \cdot \left(1 + \frac{x}{c}\right)^2} \quad (\text{Ec.7.7})$$

Finalmente, la ecuación que describe la dinámica del sistema viene definida por la siguiente expresión:

$$m \cdot g - k \cdot v + \frac{L_0 \cdot i^2}{2 \cdot c \cdot \left(1 + \frac{x}{c}\right)^2} = m \cdot a \quad (\text{Ec.7.8})$$

Que puede ser escrita de la forma:

$$m \cdot g - k \cdot x(t)' + \frac{L_0 \cdot i(t)^2}{2 \cdot c \cdot \left(1 + \frac{x(t)}{c}\right)^2} = m \cdot x(t)'' \quad (\text{Ec.7.9})$$

Con lo que se obtiene una ecuación diferencial ordinaria no lineal de segundo orden.

7.2. Actuadores electromagnéticos

Un actuador se puede definir como un convertidor de energía que transforma la energía de una fuente externa a energía mecánica de forma controlada.

Para los actuadores electromagnéticos, piezoeléctricos y magnetorestrictivos esta fuente de energía externa puede ser una corriente, la carga o el voltaje. [16]

Este apartado tratará sobre solenoides –Fig. 7.3–. Estos actuadores proporcionan movimiento excitando un campo magnético donde un émbolo (parte móvil) intenta minimizar la reluctancia (hueco de aire) moviéndose hacia la posición de mínima reluctancia



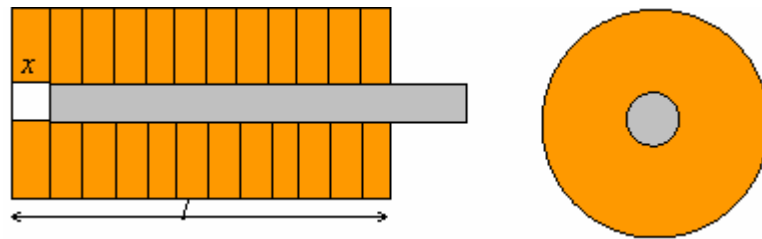


Fig. 7.3 Solenoide

7.2.1. Modelado matemático del sistema

Como en el apartado anterior, para encontrar la ecuación de movimiento del objeto, se aplica el Segundo Principio de Newton dado por la Ec. 7.1.

En este caso las fuerzas que aparecen en el sistema son las mismas:

- mg : Fuerza producida sobre la masa m del émbolo
- $k \cdot v$: Fuerza originada por la fricción o rozamiento del cuerpo. Esta fuerza crece con la velocidad v , es decir que va a ser mayor cuanto más rápido se mueva el émbolo oponiéndose siempre al sentido de movimiento. k es el coeficiente de fricción viscosa.
- $F(x,i)$: Fuerza ejercida por la bobina, dependiente de la posición del émbolo x y de la intensidad i .

Por lo que se obtiene la misma ecuación general Ec. 7.10:

$$m \cdot g - k \cdot v + F(x,i) = m \cdot a \quad (\text{Ec. 7.10})$$

Para encontrar la expresión que defina la fuerza ejercida por el electroimán en este caso, se procede de un modo similar al caso anterior:

En primer lugar es necesario encontrar un modelo de la variación de la inductancia [16]:

$$L = \frac{N \cdot \phi}{i} \quad (\text{Ec.7.11})$$



$$\phi = \frac{F_{mm}}{\mathfrak{R}} = \frac{N \cdot i}{\frac{x}{\mu_0 \cdot S} + \frac{l-x}{\mu_r \mu_0 S} + \frac{l_{eq}}{\mu_0 S}} = \frac{Ni\mu_r\mu_0 S}{x(\mu_r - 1) + l + \mu_r l_{eq}} \quad (\text{Ec.7.12})$$

Se observa como la reluctancia (\mathfrak{R}) depende del camino que sigue el flujo (ϕ). Para el cálculo de esta reluctancia (\mathfrak{R}) se ha considerado una magnitud (l_{eq}) que tiene en cuenta el camino que sigue el flujo a través del aire por el exterior del actuador –Fig. 7.4–.

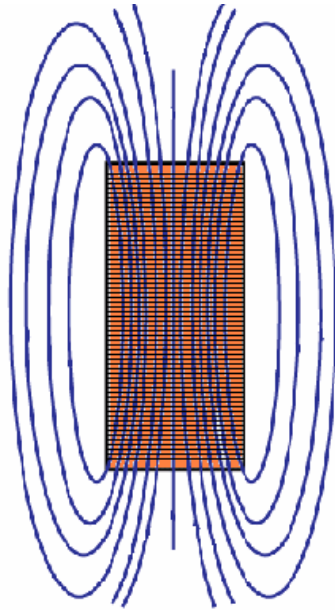


Fig. 7.4 Camino del flujo ϕ

Combinando las ecuaciones 7.11 y 7.12 se obtiene la expresión de la variación de la inductancia en función de la posición del émbolo (Ec. 7.13):

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot S}{x(\mu_r - 1) + l + \mu_r l_{eq}} \quad (\text{Ec. 7.13})$$

Llegados a este punto, se continuará exactamente igual que en el apartado anterior, es decir se considera la energía almacenada en el electroimán como:

$$E(x) = \frac{1}{2} L(x) \cdot i^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{N^2 \mu_r \mu_0 S}{x(\mu_r - 1) + l + \mu_r l_{eq}} \cdot i^2 \quad (\text{Ec. 7.14})$$



De forma que la fuerza $F(x,i)$ viene definida por la siguiente expresión:

$$F(x,i) = -\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{N^2 i^2 \mu_0 \mu_r S}{2(x(\mu_r - 1) + l + \mu_r l_{eq})^2} \cdot (\mu_r - 1) \quad (\text{Ec. 7.15})$$

Finalmente, se obtiene que la ecuación que define la dinámica del sistema, viene definida por (Ec. 7.16):

$$m \cdot g - k \cdot x' - \frac{N^2 i^2 \mu_0 \mu_r S \cdot (\mu_r - 1)}{2(x(\mu_r - 1) + l + \mu_r l_{eq})^2} = m \cdot x'' \quad (\text{Ec.7.16})$$

7.3. Control del sistema

Como se vio anteriormente, el equilibrio que se produce entre la fuerza de atracción y la gravedad es inestable, por lo que la levitación por atracción es impracticable sin la ayuda de sistemas de control (teorema de Earnshaw).

Para poder solucionar este problema se trabajará con un sistema realimentado a través de un PID. En la figura 7.5 se muestra un diagrama de bloques típico de un sistema controlado por un PID.

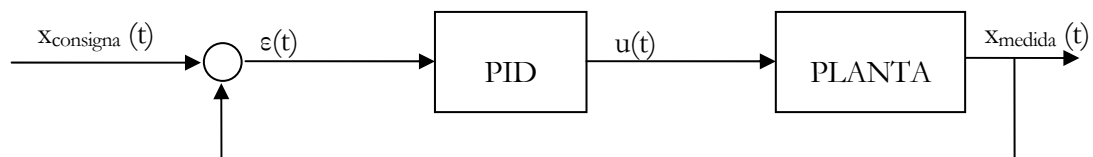


Fig. 7.5 Diagrama de bloques de un controlador



7.3.1. Estructura de un PID

Un controlador PID está formado por los siguientes componentes:

- Controlador proporcional (K_p): la salida que suministra es proporcional al error. Puede disminuir el error, pero nunca eliminar el error en régimen permanente

$$\rightarrow \text{Salida controlador proporcional} = k_p \cdot \varepsilon(t)$$

- Controlador derivativo ($k_D = K_p \cdot T_d$): proporciona una respuesta más rápida a la señal de control. Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional (nunca se utiliza un control derivativo por si solo), permite obtener un controlador de alta sensibilidad, es decir que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande.

$$\rightarrow \text{Salida controlador derivativo} = T_d \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}$$

- Controlador integral ($K_I = K_p / T_i$): la salida que suministra es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un controlador lento. Dada una referencia constante o perturbaciones, el error en régimen permanente es nulo

$$\rightarrow \text{Salida controlador integral} = k_i \cdot \int \varepsilon(t) dt = \frac{1}{T_i} \cdot \int \varepsilon(t) dt$$

De forma que la estructura general de un PID queda del siguiente modo:

$$K_{PID}(t) = k_p \cdot \varepsilon + \frac{1}{T_i} \cdot \int \varepsilon \cdot dt + T_d \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (\text{Ec. 7.17})$$

Para encontrar los valores del controlador PID, se usará el método de Ziegler y Nichols (Ziegler y Nichols, 1942).

7.3.2. Método de Ziegler Nichols

Existen dos métodos de Ziegler Nichols para ajustes de PID's [17]:

- **Primer método de Ziegler Nichols:** Respuesta escalón
- **Segundo método de Ziegler Nichols:** Respuesta en frecuencia.

Por las características del sistema, se decide emplear este segundo método.



Los pasos a seguir para realizar este método son los siguientes:

1. Utilizando sólo control proporcional, comenzando con un valor de ganancia pequeño, incrementar la ganancia hasta que el lazo comience a oscilar. Notar que se requieren oscilaciones lineales y que éstas deben ser observadas en la salida del controlador.
2. Registrar la ganancia crítica del controlador $K_P = K_C$ y el periodo de oscilación de la salida del controlador, T_c .
3. Ajustar los parámetros del controlador según la Tabla. 7.1:

| | K_p | T_i | T_d |
|-----|------------------|-------------------|-----------------|
| P | $0,5 \cdot K_c$ | ∞ | 0 |
| PI | $0,45 \cdot k_c$ | $\frac{T_c}{1,2}$ | 0 |
| PID | $0,6 \cdot k_c$ | $\frac{T_c}{2}$ | $\frac{T_c}{8}$ |

Tabla. 7.1. Parámetros de ajuste [17]



8. Simulación

Como se vio anteriormente, las ecuaciones que definen la dinámica de los sistemas, son unas edos no lineales de segundo grado, por lo tanto no se puede conseguir una solución analítica.

Ante esta situación, y con el objetivo de poder diseñar el sistema de la forma más correcta posible, se decide utilizar un programa de simulación como se hizo en [13]:

Se realizan una serie de simulaciones con la aplicación *Simulink* del programa *Matlab*.

Simulink es una plataforma para simulación multidominio y diseño basado en modelos de sistemas dinámicos. Proporciona un entorno gráfico interactivo y un conjunto de bibliotecas de bloques personalizables que permiten diseñar, simular, implementar y probar sistemas de control, procesado de señales y comunicaciones y otros sistemas de variables en el tiempo. Simulink está integrado con MATLAB, lo que ofrece acceso inmediato a una extensa gama de herramientas para el desarrollo de algoritmos, la visualización y el análisis de datos y el cálculo numérico. [18]

Tal y como se vio en el apartado anterior, las ecuaciones que define la dinámica de los dos sistemas estudiados tienen un aspecto parecido, de hecho solo varía la fuerza ejercida por el electroimán. Teniendo esto presente se crea el siguiente esquema de bloques –Fig. 8.1– :



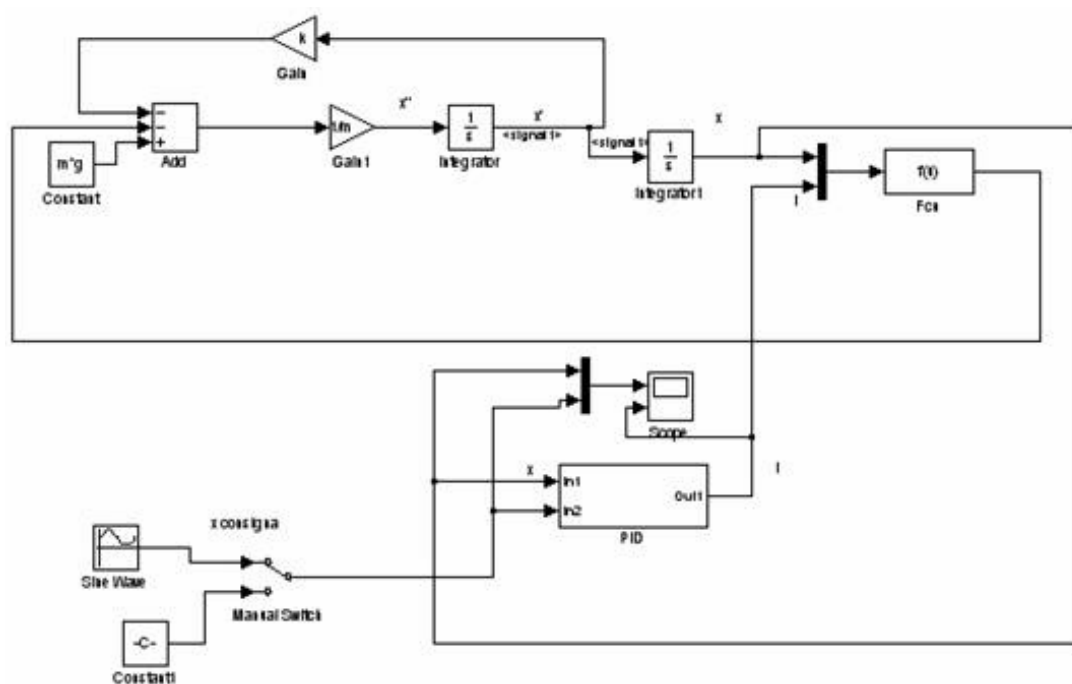


Fig. 8.1 Esquema de bloques creado en *Simulink*

Notar que este esquema de bloques es válido para ambas aplicaciones, ya que el término de la fuerza ejercida por el electroimán $F(x,i)$ se engloba todo bajo una función $f(u)$. De forma que solo será necesario cambiar la definición de este bloque entre una aplicación y otra.

Cabe destacar también que se le ha añadido al sistema un controlador PID, ya que como se vio anteriormente se trata de un sistema inestable.

8.1. Bola suspendida en un campo magnético

Para poder realizar las simulaciones, se ha de partir de unos valores constructivos. Se adoptan unos valores extraídos del modelo simulado en el experimento de *Palmieri Diego y Pucci Martín Ariel* [13], de tal forma que:

| m | L_0 | c |
|---------|----------|---------------------|
| 0,06 kg | 17 Henry | $1,5 \cdot 10^{-3}$ |

Tabla. 8.1. Parámetros constructivos [13]



De ahora en adelante y si no se especifica lo contrario, como aproximación se supone k (coeficiente de fricción viscosa) nula, de tal forma que la fuerza de fricción o rozamiento del cuerpo se considera despreciable.

Se comprueba en primer lugar la inestabilidad del sistema. Se lleva a cabo una simulación en lazo abierto –Fig. 8.2–.

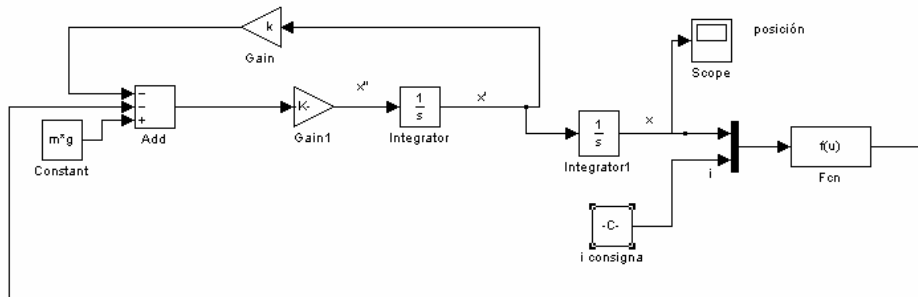


Fig. 8.2 Esquema en lazo abierto

En el momento en que la bola quede suspendida a una cierta distancia del electroimán por efecto del campo magnético, ésta quedará en reposo (x' y $x'' = 0$), por lo que la Ec. 6.9 quedará de la siguiente forma:

$$m \cdot g = \frac{L_0 \cdot i(t)^2}{2 \cdot c \cdot \left(1 + \frac{x(t)}{c}\right)^2} \tag{Ec.8.1}$$

Se puede observar que es una ecuación con dos variables $i(t)$ y $x(t)$ por la que fijando una distancia determinada, se obtiene la intensidad necesaria para mantener la bola a esa distancia del electroimán. Seguidamente, en la Tabla. 8.2 se dan algunos valores con esta relación:



| | | | | | | |
|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| x(m) | 0 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 |
| i (A) | 0,0083794 | 0.0909 | 0.1735 | 0.2560 | 0.3386 | 0.4212 |

Tabla. 8.2. Intensidad necesaria en función de la posición

Con estos valores, se probará con un valor de intensidad de referencia, para comprobar si la posición que se obtiene es la correcta.

Se prueba con un valor de intensidad de **0,4215 A** con lo que se debería obtener una posición de **5 cm**. El resultado obtenido se muestra en el siguiente gráfico –Fig. 8.3–:

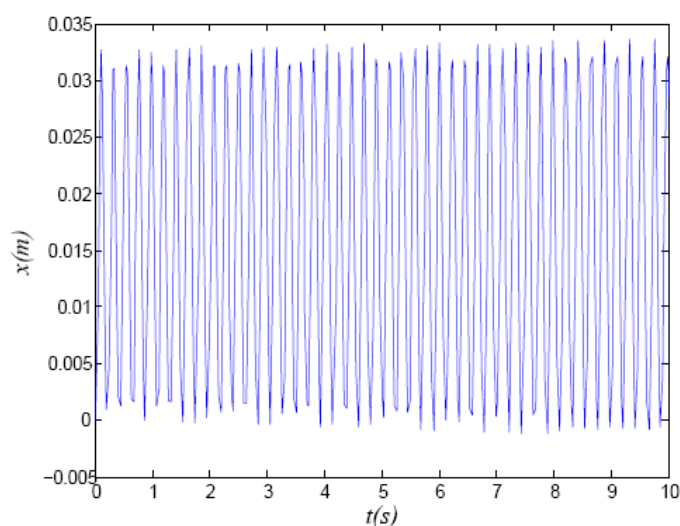


Fig. 8.3 Posición de la bola sin controlador. Lazo abierto

Se observa que la respuesta es oscilatoria no amortiguada, cosa que era de esperar por el tipo de sistema tratado.

Seguidamente se aplicarán los pasos del teorema de Ziegler Nichols descritos en el apartado anterior:

En primer lugar, conectando la entrada constante, se trabaja solo con la acción proporcional K_p (K_i y $K_d = 0$) hasta conseguir una respuesta oscilatoria de amplitud constante y periodo también constante. Se fija una posición de la bola de consigna $x_{consigna} = 5 \text{ cm}$.



Se comienza con un valor de K_c reducido y se irá aumentando hasta conseguir un movimiento oscilatorio de amplitud constante. Con $K_c = 0,0001$ se obtiene la siguiente gráfica: –Fig. 8.4–

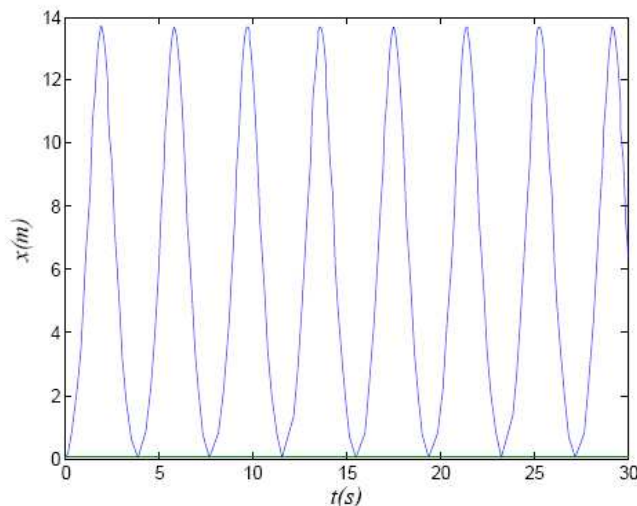


Fig. 8.4 Posición de la bola para $k_c = 0,0001$

Se observa que se obtiene más o menos lo que se está buscando, ya que el movimiento de la bola es oscilatorio de amplitud constante pero prestando un poco de atención, se observa que la bola llega a caer cerca de 14 m lo que no es aceptable. Se seguirá aumentando el valor de K_c hasta conseguir que la bola oscile con una amplitud aproximada de **10 cm**.

El siguiente paso es ir aumentando el K_c hasta conseguir que la distancia recorrida por la bola esté dentro del límite acabado de fijar. En la siguiente gráfica –Fig. 8.5– se prueba con $K_c = 0,001$ y se observa como x todavía no está dentro de los límites.



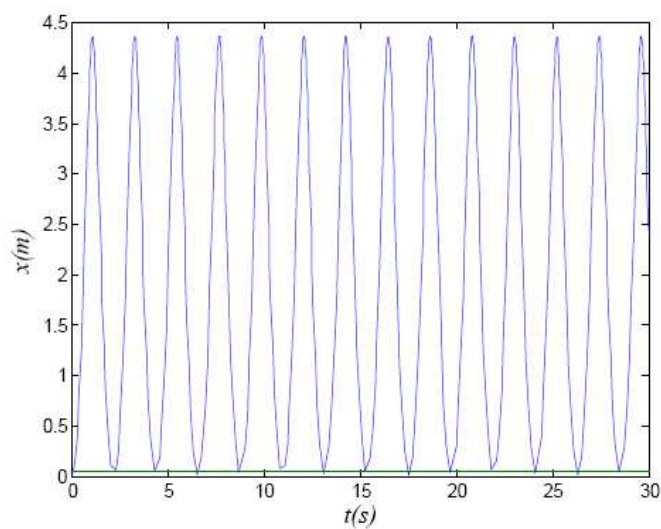


Fig. 8.5 Posición de la bola para $k_c = 0,001$

Tras repetir esta operación varias veces, finalmente, se obtiene con $K_p = 3$ el siguiente gráfico –Fig. 8.6–:

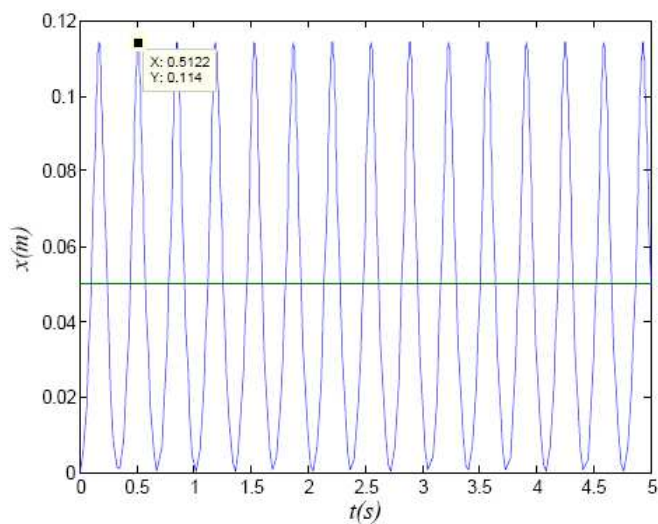


Fig. 8.6 Posición de la bola para $K_c = 3$



En la Figura 8.6 se observa como la bola oscila con una amplitud de 11,4 cm, lo que está fuera del límite anteriormente puesto, sin embargo el objetivo de esta simulación no es otro que el de conseguir un orden de magnitud del sistema, por lo que se da este valor de K_c como bueno.

Para continuar con el método de Ziegler Nichols, es necesario medir el periodo de la señal obtenida.

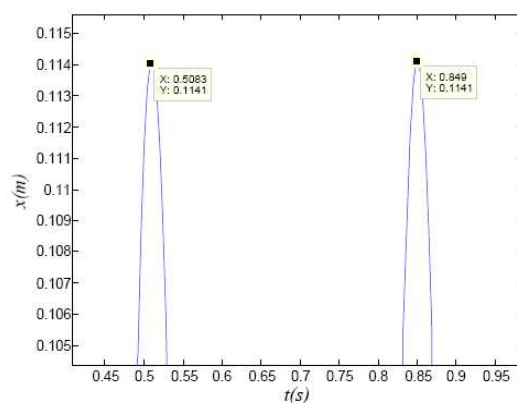


Fig. 8.7 Periodo para $k_c = 3$

A partir de las relaciones de la Tabla. 7.1 se obtienen los siguientes resultados:

$$k_p = 0,6 \cdot K_c = 1,8$$

$$T_d = \frac{T_c}{8} = \frac{0,3407}{8} = 0,0426 \Rightarrow K_d = 0,0426$$

$$T_i = \frac{T_c}{2} = \frac{0,3407}{2} = 0,1704s \Rightarrow K_i = \frac{1}{T_i} = 5,8703$$

| Parámetro | Valor |
|-----------|--------|
| K_p | 1,8 |
| K_i | 5,8703 |
| K_d | 0,0426 |

Tabla. 8.3. Valores del controlador PID



Con los valores obtenidos se obtiene la siguiente onda –Fig. 8.8–:

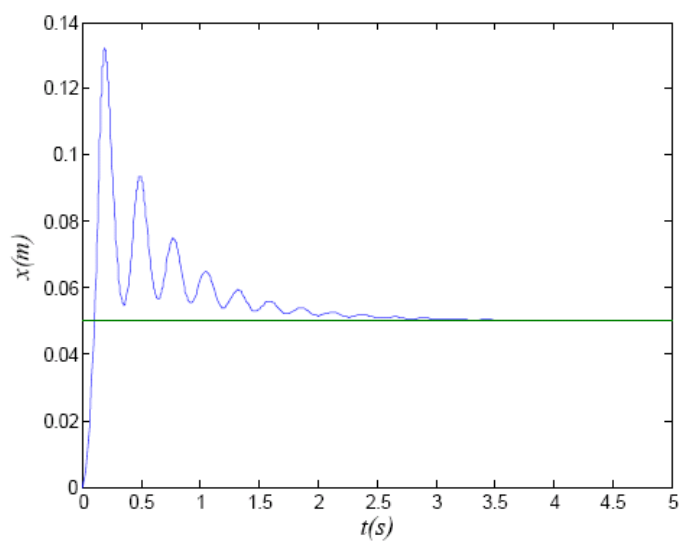


Fig. 8.8 Evolución del sistema para los parámetros encontrados



8.2. Actuadores electromagnéticos

En el caso de la simulación del actuador electromagnético es necesario también como en el caso anterior, disponer de algunos valores constructivos para poder simular la ecuación del sistema.

De este caso no se dispone de información alguna que pueda ayudar a estimar estos valores por lo que les dará un valor considerado oportuno. La información preliminar necesaria corresponde a los siguientes valores (Tabla 8.4):

| Símbolo | Descripción | Valor |
|----------|--|----------------------|
| m | Masa del émbolo (entrehierro) | 0,07 kg. |
| N | Número de vueltas del electroimán | 2000 |
| l | Longitud del electroimán | 80 mm |
| S | Sección del electroimán | 2,82 cm ² |
| μ_r | Permeabilidad relativa del entrehierro | 2000 |
| l_{eq} | Longitud del camino de aire por donde se cierra el flujo magnético | 100 mm |

Tabla 8.4. Parámetros físicos del electroimán

De todos estos valores, el más difícil de estimar es sin duda l_{eq} ya que no se dispone de ningún orden de magnitud del mismo. En este caso se considerará una distancia algo superior a la longitud del solenoide (100 mm).

Se aplica el método de Ziegler Nichols, se fija un posición de consigna $x_{consigna} = 5 \text{ cm}$.

Se comienza con un valor de $Kc = 1$. Se obtiene el siguiente resultado –Fig. 8.9–:



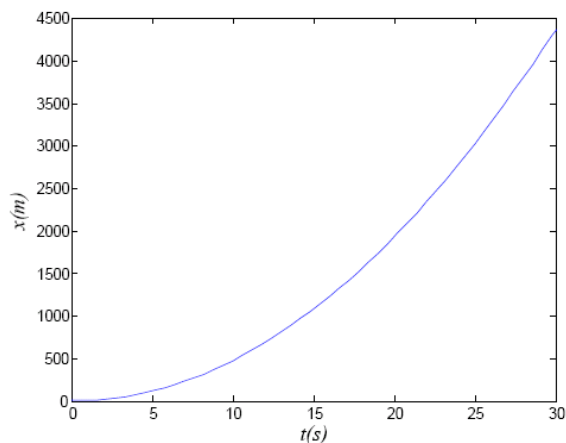


Fig. 8.9 Posición del émbolo para $K_c = 1$

Se observa como el émbolo cae sin control por lo que se prueba a aumentar el valor de K_c , se prueba con un valor de $K_c = 12$ –Fig. 8.10–:

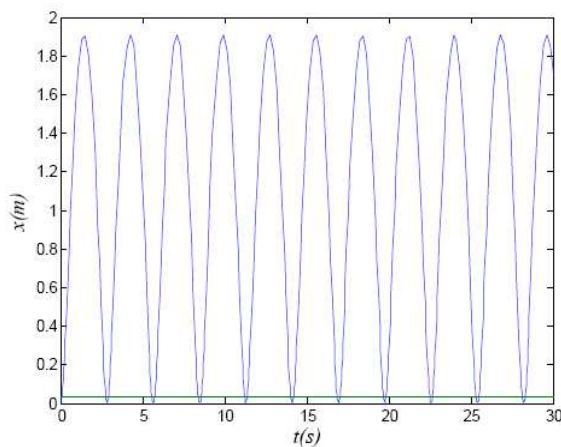


Fig. 8.10 Posición del émbolo para $K_c = 12$

Se observa como se obtiene una oscilación no amortiguada, pero al igual que en el caso anterior, el émbolo llega a caer a una distancia demasiado elevada. Se prosigue con el método hasta reducir esta distancia.

Finalmente utilizando $k_c = 32,58$ se obtiene el siguiente resultado –Fig. 8.11–:



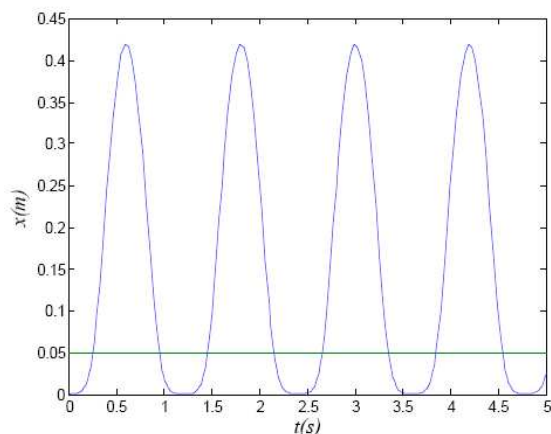


Fig. 8.11 Posición del émbolo para $K_c = 32,58$

Donde se puede observar como el émbolo oscila con una amplitud de **42 cm**. Se da este valor de K_c como bueno.

El periodo es el siguiente –Fig. 8.12–:

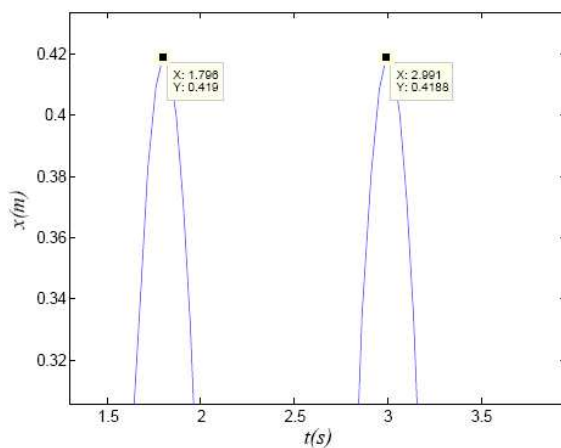


Fig. 8.12 Periodo para $K_c = 19,55$

$$T_c = 2,991 - 1,796 = 1,195s$$

A partir de las relaciones de la Tabla. 7.1 se obtienen los siguientes resultados:



$$k_p = 0,6 \cdot k_c = 19,55$$

$$T_i = \frac{T_c}{2} = \frac{1,195}{2} = 0,5975 \Rightarrow K_i = \frac{1}{T_i} = 1,6736$$

$$T_d = \frac{T_c}{8} = \frac{1,195}{8} = 0,1493 \Rightarrow K_d = 0,1493$$

| Parámetro | Valor |
|-----------|--------|
| Kp | 19,55 |
| Ki | 1,6736 |
| Kd | 0,1493 |

Tabla. 8.5. Valores del controlador PID

Con los valores obtenidos se obtiene la siguiente onda –Fig. 8.13–:

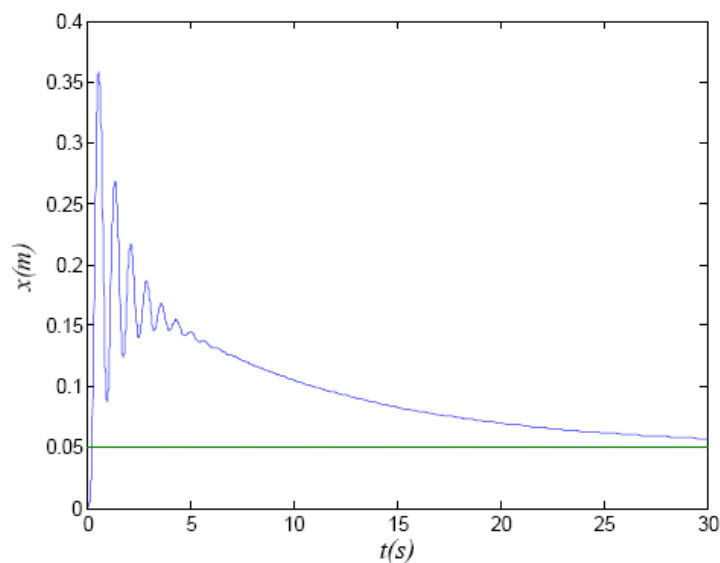


Fig. 8.13 Evolución del sistema para los parámetros encontrados

La respuesta obtenida utilizando el método de Ziegler Nichols no acaba de ser suficientemente buena, ya que el sistema evoluciona hacia la posición de consigna pero de



una forma muy lenta. También se observa como el sobrepico inicial es bastante elevado. Seguidamente se trata de ajustar el controlador PID teniendo presente los cambios que introducen en la respuesta la variación de cada uno de sus parámetros.

La parte derivativa (K_d) mejora la rapidez del transitorio de forma que se aumenta este valor. La parte integral (K_i) mejora la precisión por lo que también se aumentará este valor. Se realiza este proceso por inspección obteniéndose finalmente el siguiente resultado –Fig. 8.14–:

| Parámetro | Valor |
|-----------|-------|
| K_p | 19,55 |
| K_i | 7,57 |
| K_d | 4,7 |

Tabla. 8.6. Valores del controlador PID

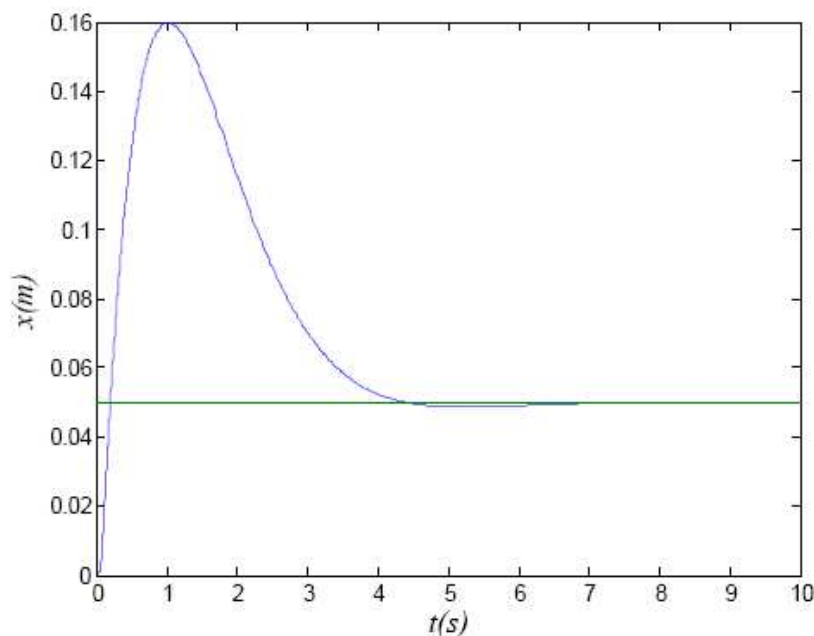


Fig. 8.14 Evolución del sistema para los parámetros modificados



9. Plataforma experimental

En este apartado se detallará el proceso de construcción de la plataforma. Se definirán los elementos que la componen y se dará una explicación del funcionamiento de los mismos.

Cabe destacar que si bien el objetivo es construir una plataforma que pueda ser utilizada en el desarrollo de cualquiera de las dos aplicaciones descritas anteriormente, el diseño de la misma se realiza teniendo presente principalmente los requerimientos necesarios para la aplicación del actuador electromagnético.

9.1. Esquema de la plataforma

Seguidamente se dará una visión global del funcionamiento de la plataforma.

Un electroimán será el encargado de ejercer la fuerza magnética suficiente para hacer mover (siempre siguiendo el eje vertical) un objeto, contrarrestando así la fuerza de la gravedad. Este electroimán estará alimentado mediante una fuente de alimentación. Esta fuente estará controlada mediante un convertidor CC/CC que será el encargado de regular la intensidad que la fuente suministra al electroimán. El convertidor, a su vez recibirá la señal de regulación de un autómata programable (PLC). Este autómata será el encargado de ejecutar la rutina que previamente el usuario le habrá programado. La información que el *PLC* necesita para llevar a cabo esta tarea le será suministrada por unos sensores que se encargarán de suministrar la posición del objeto a controlar –Fig. 9.1–.

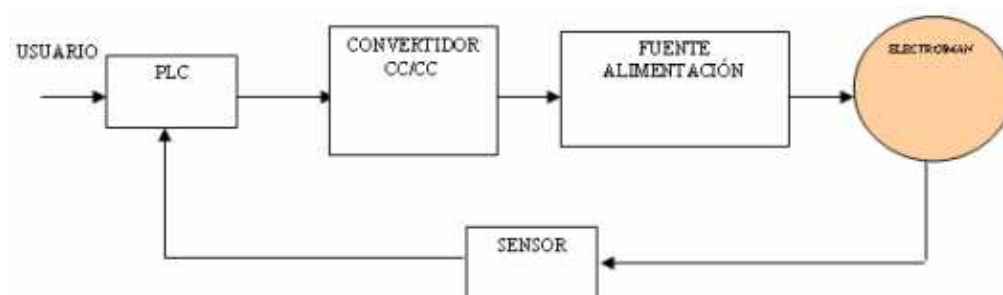


Fig. 9.1 Diagrama explicativo del funcionamiento de la plataforma



En la siguiente figura –Fig. 9.2– se muestra una fotografía de la maqueta:

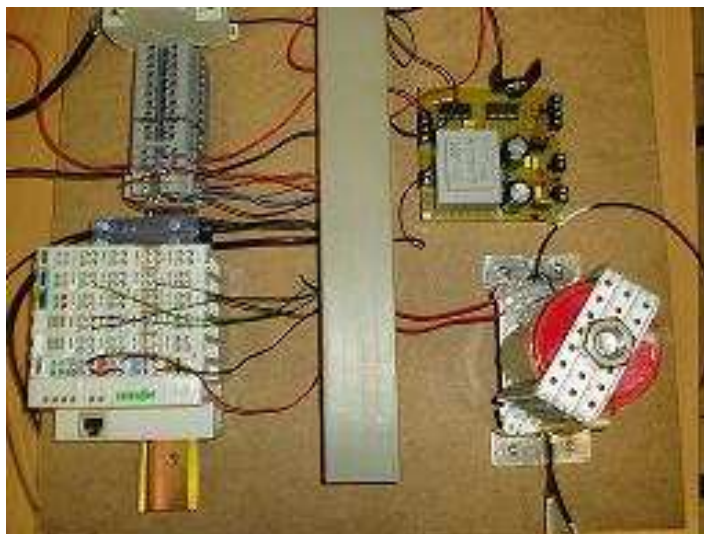


Fig. 9.2 Fotografía de la maqueta

9.2. Electroimán

Es sin duda uno de los componentes más importantes de la plataforma. Sus características constructivas (longitud, radio, número de vueltas, entrehierro,...) determinarán la fuerza que será capaz de ejercer $F(x,i)$.

Repasando la ecuación que define la fuerza ejercida por un electroimán (Ec. 7.15) se puede deducir de modo cualitativo como afecta la variación de los diferentes parámetros constructivos al valor de dicha fuerza:



| N | S | L | F(x,i) |
|---|---|---|--------|
| ↑ | ↑ | ↑ | ↑ |
| ↑ | ↑ | ↓ | ↑↑ |
| ↑ | ↓ | ↑ | ↑ |
| ↑ | ↓ | ↓ | ↑ |
| ↓ | ↑ | ↑ | ↓ |
| ↓ | ↑ | ↓ | ↓ |
| ↓ | ↓ | ↑ | ↓↓ |
| ↓ | ↓ | ↓ | ↓ |

Tabla 9.1 Parámetros constructivos del electroimán

N: Número de vueltas de la bobina

S: superficie transversal ($S = \pi \cdot r^2$)

L: longitud de la bobina

Como primera conclusión se puede extraer que un buen diseño consistiría en una bobina con un número elevado de vueltas, ancha y corta.

Aprovechando los recursos disponibles el laboratorio se decide bobinar completamente un carrete de las siguientes medidas –Fig. 9.3–:

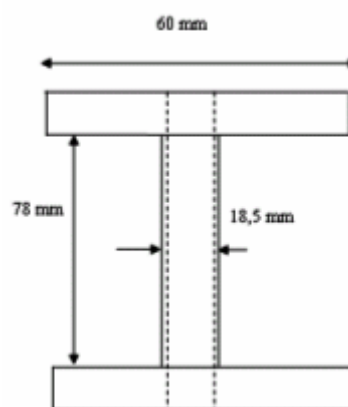


Fig. 9.3 Dimensiones del electroimán



Notar que el eje central del carrete es hueco, de forma que se le pueda colocar un entrehierro metálico.

El bobinado se realiza con hilo de cobre de $0,85 \text{ mm}^2$ de diámetro. El número de vueltas de la bobina serán aproximadamente las siguientes:

$$\frac{\theta_{ext} - \theta_{int}}{2} = \frac{60\text{mm} - 18,5\text{mm}}{2} = 20,75\text{mm} \rightarrow \frac{20,75\text{mm}}{0,85\text{mm}} = 24,41 \cong 24\text{capas}$$

$$\frac{78\text{mm}}{0,85\text{mm}} = 91,76 \cong 91 \frac{\text{vueltas}}{\text{capa}} \times 24\text{capas} = 2184\text{vueltas}$$

9.3. Sensor

Como se vio anteriormente, el sensor será el encargado de comunicar la posición del objeto a controlar al autómeta.

Existen una gran multitud de sensores en el mercado capaces de medir casi cualquier magnitud física (posición, velocidad, momento, caudal,...). Para la aplicación que se va a desarrollar es necesario un sensor capaz de medir posición. Dentro de este tipo, existen diferentes tipos, como por ejemplo:

- Sensores resistivos (Potenciómetros): Es un dispositivo electromecánico que consta de una resistencia de valor fijo sobre la que se desplaza un contacto deslizante llamado cursor. El movimiento del cursor origina un cambio en la resistencia, el cual puede utilizarse para medir desplazamientos lineales o angulares de piezas acopladas al cursor.
- Sensores inductivos; LVDT, RVDT, Resolvers: En términos generales, si bien el funcionamiento de estos distintos tipos de sensores es diferente, se basan en el cambio de inductancia que provoca un objeto metálico en un campo magnético.
- Sensores magnéticos: Magnetoresistivos, Efecto Hall: Básicamente los sensores magnetoresistivos basan su funcionamiento en la propiedad de un material que cambia su resistividad por la presencia de un campo magnético. El efecto Hall por



su parte relaciona la tensión entre dos puntos de un material conductor o semiconductor con un campo magnético a través de él.

- Sensores capacitivos: Como su nombre indica están basados en la detección de un cambio en la capacidad inducido por una superficie que se lleva cerca del elemento sensor.
- Sensores ópticos: Su funcionamiento se basa en la transmisión de una señal luminosa, esperando después la vuelta de las ondas reflejadas en algún objeto.

Seguidamente, una vez se han contemplado las distintas opciones de sensores, se hace un listado de las necesidades:

- Medir desplazamiento de un objeto metálico sin contacto
- Rango de medida: 0 – 10 cm.
- Salida analógica

Otros aspectos a tener en cuenta:

- Bajo coste
- Bajo consumo

Comentar que es necesario disponer de una salida analógica ya que esto permitirá al autómatas conocer en todo momento donde se encuentra situado el objeto.

Después de consultar las características de diferentes tipos de sensores de diferentes fabricantes y proveedores (*Omron, Sharp, Contrinex, ifm electronic, Baumer electric, Balluff*) se llega a la conclusión de que el sensor más apropiado sería uno de tipo fotoeléctrico (óptico). Seguidamente se dan algunas de las características de uno de estos sensores, en concreto OADM 12I6460/S35A de Baumer electric (Tabla 9.2):



| | |
|---------------------------|----------------------|
| Rango de medida | 16... 120 mm. |
| precisión | 0,002... 0,1 mm. |
| Voltaje alimentación | 12 ... 28 VDC |
| Máx. consumo de corriente | 100 mA. |
| Señal de salida | 4...20 mA. Analógica |

Tabla 9.2 Características sensor fotoeléctrico OADM



Fig. 9.4 Sensor fotoeléctrico con salida analógica [19]

El principal problema de este sensor es su elevado precio. Continuando con la filosofía de aprovechar el material existente en el laboratorio, se decide utilizar dos sensores fotoeléctricos pero de salida digital, de modo que la información que recibirá el autómata será la de la presencia o no del objeto en dos posiciones determinadas.

El sensor a utilizar es el siguiente: *Osiris Xuda1 de Telemecanique*. Cuyas características se definen en la Tabla 9.3:

| | |
|---------------------------|---------------|
| Rango de medida | 15 ... 250 mm |
| precisión | 0,5 ... 1 mm |
| Voltaje alimentación | 12 ... 24 V |
| Máx. consumo de corriente | 45 mA |
| Señal de salida | 200 mA |

Tabla 9.3 Características del sensor Osiris Xuda1 [20]



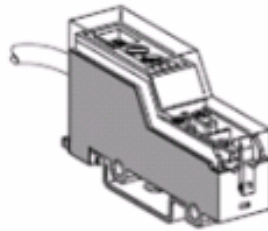


Fig. 9.5 Sensor fotoeléctrico Osiris Xuda1 [20]

9.4. Autómata programable (PLC)

Un autómata programable industrial (API) o *Programmable Logic Controller* (PLC), es un equipo electrónico con memoria programable, diseñado para controlar en tiempo real y en ambiente de tipo industrial, procesos secuenciales mediante entradas y salidas, analógicas o digitales.

Tal y como se hizo en para la elección del sensor, se detallan a continuación las necesidades que ha de cumplir el autómata:

- A de disponer de cómo mínimo dos entradas digitales (provenientes de los sensores) y una salida analógica (destinada al convertidor)
- Debe de poder ser programable con los lenguajes de programación que siguen el estándar IEC 61131-3 (*Internacional Electrotechnical Commission*) para cumplir su función educativa, ya que estos son los utilizados en ambientes industriales.
- Debe ser lo más económico posible.



En el mercado existen diversos autómatas programables que cumplen las especificaciones anteriores, entre las marcas más conocidas se encuentran: *Siemens* (Fig. 9.6), *Morón*, *ABB* (Fig. 9.7), *Allen Bradley*, *Wago*.



Fig. 9.6 PLC Siemens



Fig. 9.7 PLC ABB

Continuando con la política de utilizar material del laboratorio, se decide utilizar un autómata de la marca Wago.

9.4.1. Wago. Autómata Wago I/O System 750

El autómata de que se dispone es un Wago I/O System 750, está caracterizado sobretodo por la flexibilidad que ofrece en la configuración de entradas y salidas. Se pueden agregar tantos módulos como se desee de entradas y salidas analógicas o digitales hasta un total de 64 módulos por módulo de control.

La configuración que se dispone del autómata está compuesta por 2 módulos de control lógico programable (8 entradas digitales, 8 salidas digitales) y 2 módulos de control analógico (2 entradas analógicas y 2 salidas analógicas) con el complemento del módulo ENI (*Ethernet Network Interface*) que lo dota de conectividad *Ethernet* –Fig. 9.8–.



Si bien solo son necesarias 2 entradas digitales y una salida analógica, se decide (en previsión de otros futuros usos) montar el autómatas con los siguientes módulos:

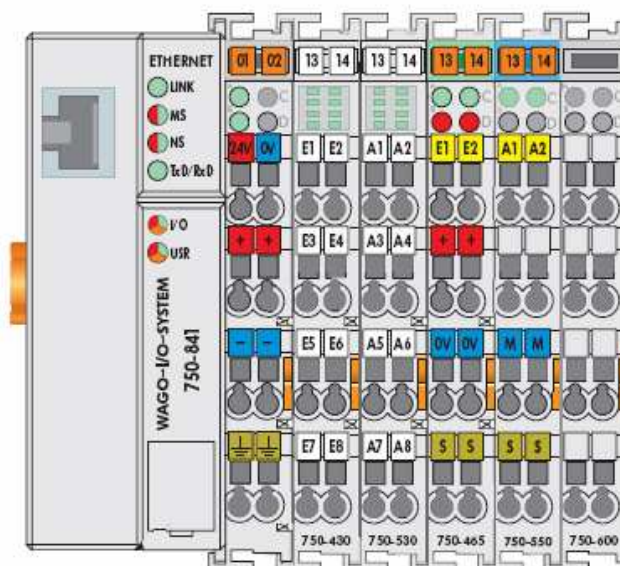


Fig. 9.8 Autómatas Wago I/O System 750

9.4.1.1. Módulo de bus de campo programable

El módulo de bus campo 750-841 permite la conexión del Wago I/O System 750 como esclavo a un bus de campo *Ethernet*. Es compatible con todos los módulos de I/O y crea automáticamente la imagen de proceso local, que puede incluir módulos digitales y analógicos –Fig. 9.9–:

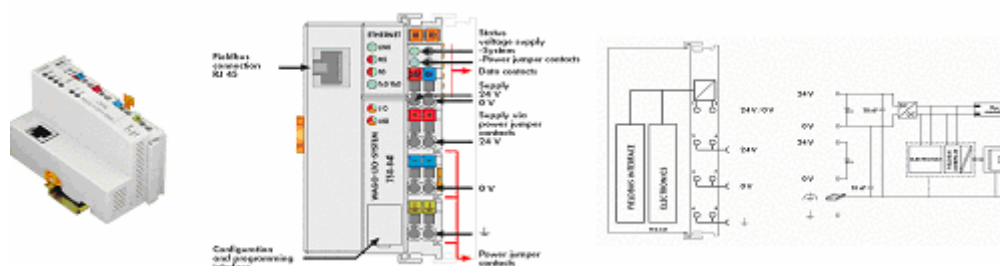


Fig. 9.9 . Módulo de bus de campo programable [21]



9.4.1.2. Módulo de entradas digitales (DI) 8 canales:

El módulo de entrada digital recibe las señales de control procedentes de los dispositivos de campo digitales (sensores, etc.). Cada módulo de entrada cuenta con un filtro de eliminación de ruido. El filtro puede tener distintas constantes de tiempo. Para el aislamiento eléctrico entre el bus y el campo se utiliza un optoacoplador: –Fig. 9.10–:

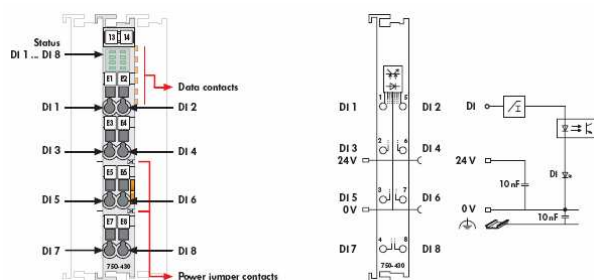


Fig. 9.10 Módulo de entradas digitales (DI) [21]

9.4.1.3. Módulo de salidas digitales (DO) 8 canales

El módulo de salidas digitales está compuesto por 8 canales manteniendo una anchura de 12mm. La carga conectada se conmuta a través de la salida digital desde el sistema de control –Fig. 9.11–:

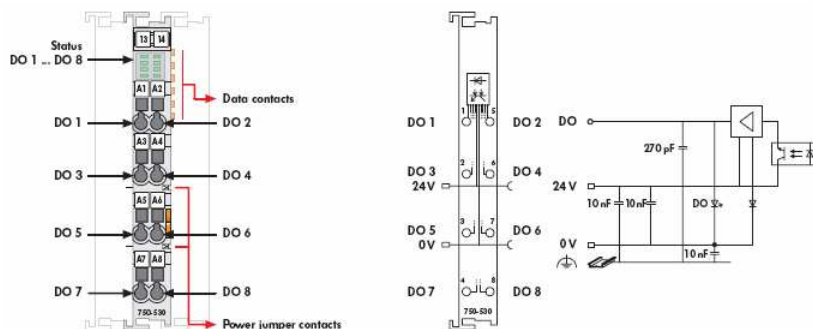


Fig. 9.11 Módulo de salidas digitales (DO) [21]



9.4.1.4. Módulo de entrada analógica (AI) 2 canales

El módulo de entradas analógicas puede suministrar potencia al dispositivo de campo, recibir las señales analógicas transmitidas, y mediante aislamiento eléctrico, transmitir las al bus de campo.

Recibe señales estandarizadas de 0-10 V, 4-20 mA. El módulo de entrada de 4-20 mA puede suministrar también la tensión para el transmisor de 2 hilos –Fig. 9.12–:

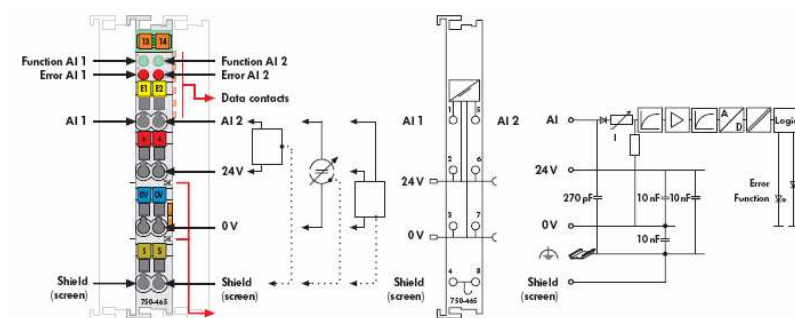


Fig. 9.12 Módulo de entrada analógica (AI) [21]



9.4.1.5. Módulo de salidas digitales (DO) 2 canales

El módulo de salida analógica crea una señal estándar de 0-10 V, 4-20 mA.

La señal de salida está aislada eléctricamente y se transmite con una resolución de 12 bits. Las salidas están protegidas contra cortocircuitos.

Los canales de salida tienen un potencial de tierra común –Fig. 9.13–:

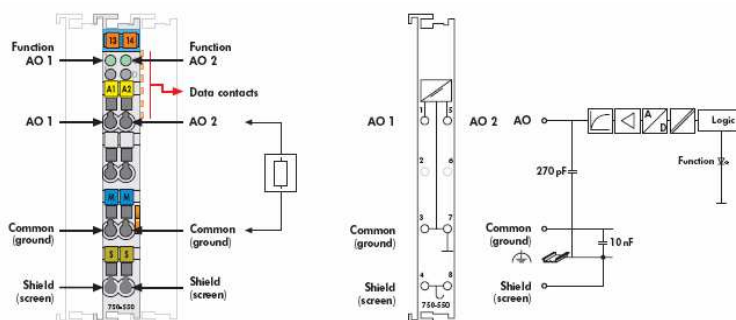


Fig. 9.13 Módulo de salidas digitales (DO) [21]

9.4.1.6. Módulo de cierre

Una vez instalado el nodo de bus de campo con los módulos de bus de campo correspondientes y los módulos de E/S seleccionados, el módulo “de cierre” se inserta en el conjunto. Este módulo cierra el circuito interno de datos y garantiza un flujo de datos correcto.

Se necesita uno para cada nodo de bus de campo y su referencia es 750-660.



9.4.2. Entradas y salida automática

En la siguiente tabla (Tabla 9.4) se detallan las entradas y salidas utilizadas para esta aplicación:

| I/O | Dirección | Descripción función |
|-----|-----------|---------------------------------|
| DI | %IX2.0 | Entrada señal sensor posición 1 |
| DI | %IX2.1 | Entrada señal sensor posición 2 |
| AO | %QW0 | Salida hacia convertidor |

Tabla 9.4 Entradas y salidas de la aplicación

9.5. Convertidor CC/CC

Para poder controlar la intensidad que la fuente inyectará al electroimán y así controlar la fuerza que ejerce el mismo es necesario utilizar un convertidor CC/CC. El convertidor que se utilizará es un trocador reductor o “*buck*”.

El convertidor tiene como señal de consigna el valor de la salida analógica del automático para determinar el ciclo de trabajo del interruptor *Mosfet* que alimenta el electroimán.

En la siguiente figura –Fig. 9.14– se puede ver un esquema de la conexión del convertidor dentro de la plataforma:

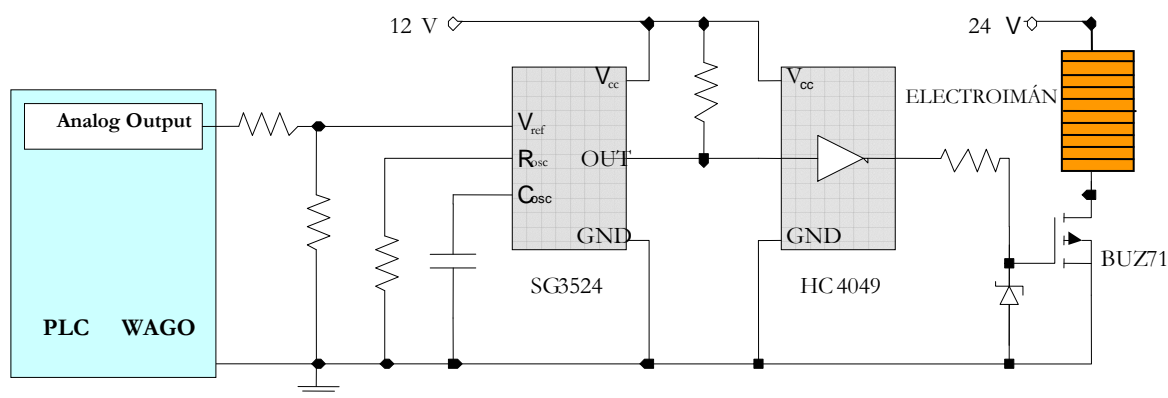


Fig. 9.14 Convertidor CC/CC para la regulación de la intensidad inyectada al electroimán



El circuito integrado SG3524 es un circuito regulador de voltaje por ancho de pulso (PWM) de frecuencia fija. Esta frecuencia de conmutación se consigue a través de una resistencia R_T y un condensador C_T . La resistencia proporciona una intensidad de carga constante a C_T . Esto resulta en una rampa lineal de voltaje en C_T .

El ciclo de trabajo se controla comparando esta señal de rampa con una continua regulable controlada mediante una salida analógica del autómata. En la siguiente figura –Fig. 9.15– se puede ver un diagrama funcional de este integrado:

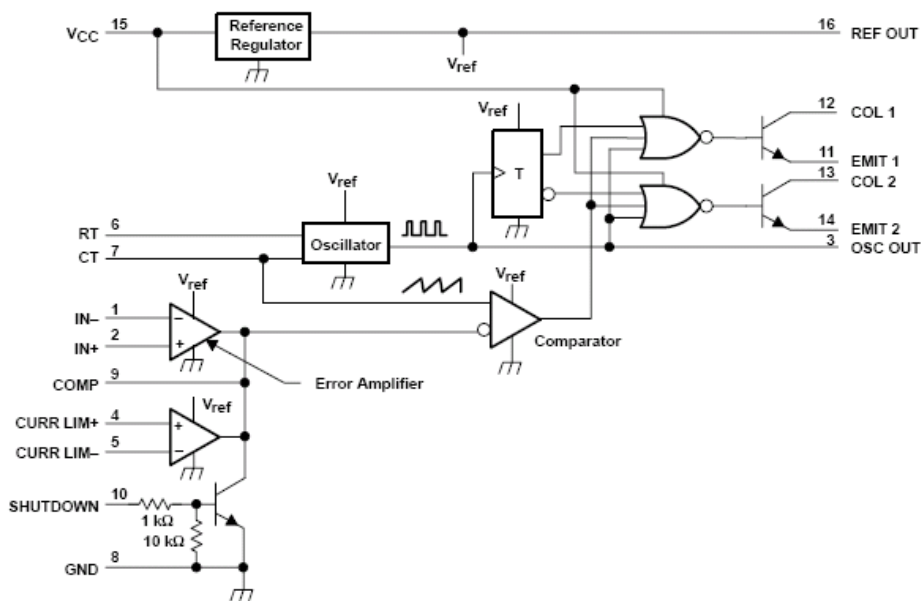


Fig. 9.15 Diagrama funcional de bloques de SG3524 [22]

Conectando las salidas de los BJT del SG3524 entre si y los emisores a tierra, se consigue que el señal de las BJT que controla la puerta del *Mosfet*, tenga la misma frecuencia que el oscilador. La frecuencia del oscilador se fija con los valores de R_T y C_T mencionados. Esta frecuencia viene definida por la siguiente expresión:

$$f \approx \frac{1.3}{R_T C_T} \tag{Ec.9.1}$$

Donde R_T está en $k\Omega$, C_T en μF i f en kHz.

Teniendo presente que los valores de R_T i C_T han de estar dentro de los siguientes márgenes:



$$1nF < C_T < 0.1\mu F$$

$$1.8k\Omega < R_T < 100k\Omega$$

Lo que implica unos valores de f entre 130 Hz i 722 kHz

Para conseguir que la frecuencia del convertidor sea aproximadamente de 20 kHz se han tomado los valores de un condensador de 22nF y una resistencia de 2,7 k Ω .

El esquema de conexiones del circuito integrado se muestra en la siguiente figura –Fig. 9.16–:

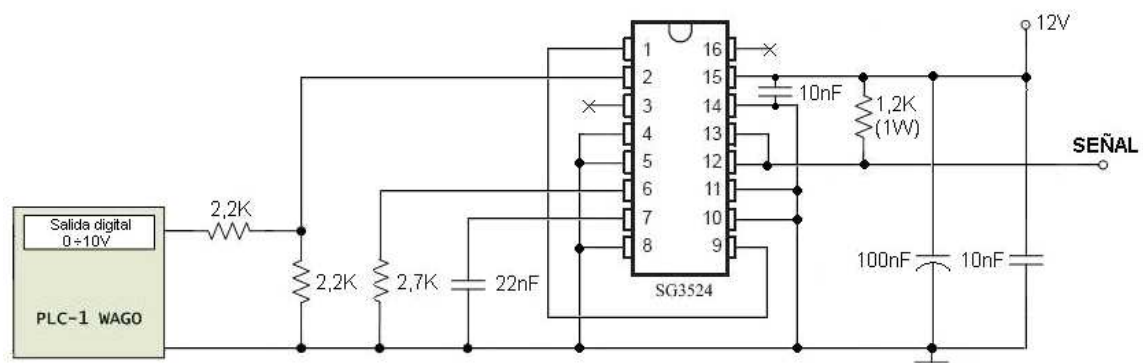


Fig. 9.16 Esquema de conexiones

Otro componente del convertidor es el integrado HC4049.

La función del Buffer 4049 es la de ampliar la corriente que llega a la puerta del *Mosfet* BUZ71 para asegurar que el condensador parásito de éste (entre la puerta y el surtidor) se cargue con suficiente rapidez, para que el transistor funcione correctamente. Por tanto los seis inversores del integrado se conectan en paralelo –Fig. 9.17–:

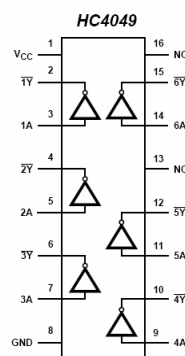


Fig. 9.17 CI HC4049 [23]



La salida de circuito de control ha de cargar y descargar la capacidad de puerta. También se conecta una resistencia de $10\ \Omega$ para amortiguar las oscilaciones durante la carga y la descarga de las capacidades parásitas (circuito RLC), aunque esto hará más lento el proceso. En la siguiente figura –Fig. 9.18– se muestra el esquema de conexiones:

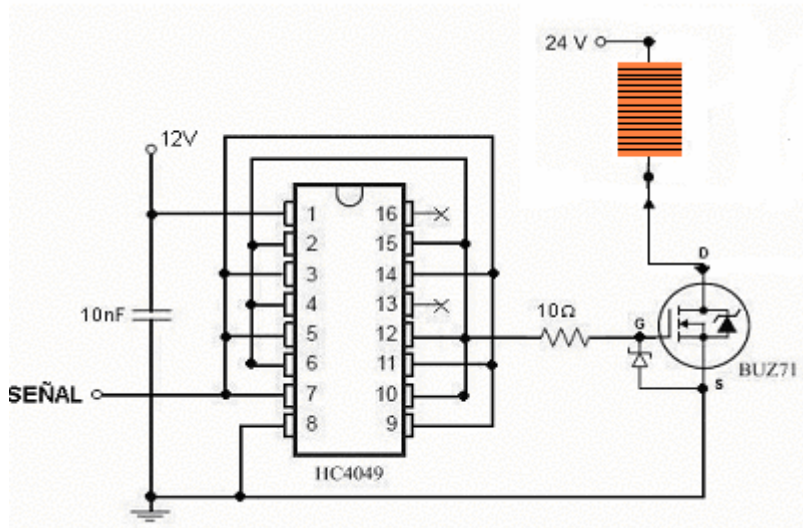


Fig. 9.18 Esquema de conexiones del CI HC4049

El componente BUZ71 –Fig. 9.19– se trata de un transistor de efecto de campo, *Mosfet* de Canal N.

Mediante la señal PWM de control del CI SG3524, se controla la puerta G del *Mosfet*, de modo que haga la función de interruptor para conseguir la conmutación del convertidor de CC/CC. La frecuencia de conmutación máxima que se puede conseguir utilizando este componente es de 1MHz.

La frecuencia de trabajo que se ha empleado para la excitación del *Mosfet* es de aproximadamente 20kHz.

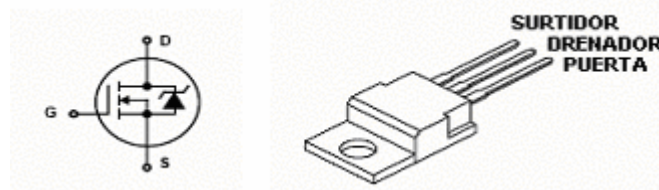


Fig. 9.19 Símbolo y encapsulado del MOSFET canal N BUZ71. [24]



9.6. Fuentes de alimentación

Para implementar esta plataforma, es necesario alimentar adecuadamente no solo el electroimán sino toda una serie de elementos como el PLC, los sensores de posición o el convertidor CC/CC. Se decide utilizar una fuente de alimentación del laboratorio y construir una fuente de alimentación lineal que proporcione la tensión adecuada a partir de la tensión de la red de alimentación. En la Tabla 9.5 se especifica el voltaje de cada elemento y como se alimentará:

| Componente | V _{alimentación} | Fuente laboratorio | Fuente alimentación lineal |
|---------------------------------|---------------------------|--------------------|----------------------------|
| PLC | 24 V | | x |
| Sensores | 12 V | | x |
| Electroimán y convertidor CC/CC | 12 V | x | |

Tabla 9.5. Alimentación de cada componente

La fuente utilizada es el modelo FTE30V5A. Es una fuente de alimentación regulable y cortocircuitable de 0 a 30 V y hasta 5 A.

La fuente de alimentación lineal que se construye, a partir de una tensión de entrada proporcionada por la red ($230\text{ V} \pm 10\%$) proporciona dos niveles de tensión en continua (V_{cc}):

- +12 V
- -12 V
- 0 V

El circuito implementado se muestra en la siguiente figura –Fig. 9.20–:



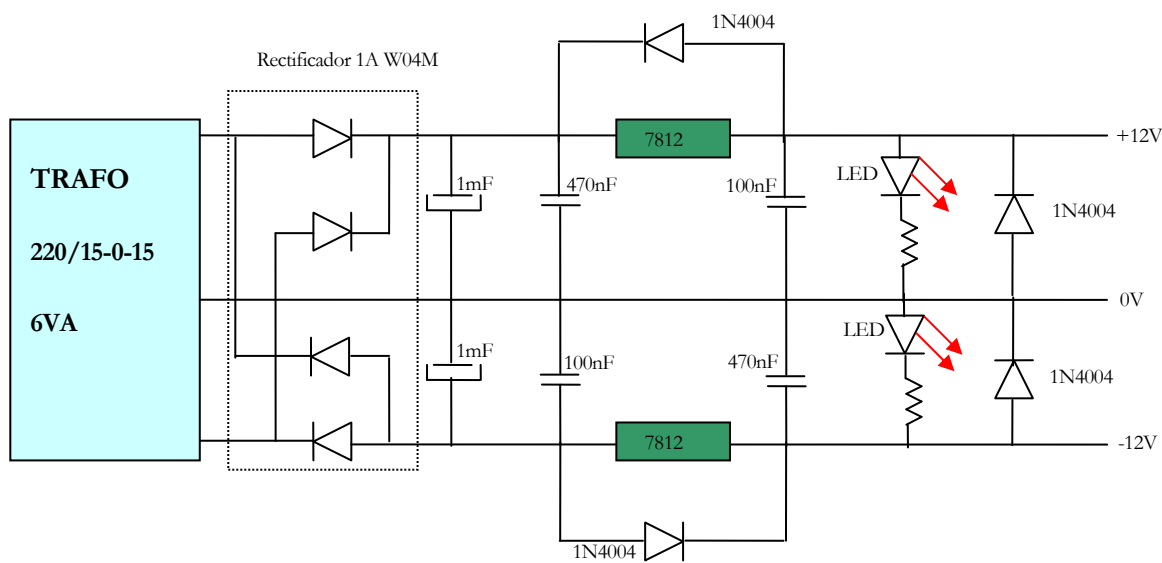


Fig. 9.20 Esquema de la fuente de alimentación lineal

Tras revisar el *datasheet* correspondiente al regulador 7812 –Fig. 9.21– [25], regulador positivo de 3 patas, se decide colocar el condensador de 470nF en la entrada del mismo, esto es debido a la distancia al filtro capacitivo. En la salida, si bien no es necesario se coloca un condensador de 100nF para estabilizar la respuesta transitoria.

En cuanto al regulador 7912 (regulador negativo de 3 patas) se realiza una operación similar, pero en este caso el condensador de 100nF se conecta a la entrada y el de 470nF a la salida para intentar asegurar la estabilidad.



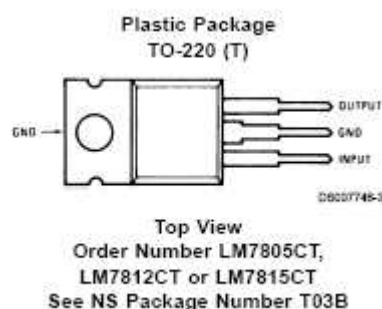


Fig. 9.21 Regulador 7812 [25]

Los diodos se conectados entre los terminales de los reguladores sirven para protegerlos en caso de cortocircuito de la entrada con tierra, evitando que la corriente de descarga del condensador de la salida los quema. Los diodos de las salidas también son dispositivos de seguridad.

En serie con el *led* se dispone una resistencia con la misión de limitar la corriente que circula por este. La caída de tensión en un *led* rojo es de 1,7 V y para que funcione necesita una corriente comprendida entre 4mA y 50mA. Aplicando la ley de Ohm y teniendo presente que la resistencia soporta una diferencia de potencial de 10,3 V (12 V – 1,7 V) se obtiene que el valor de la resistencia ha de estar comprendido entre 206 Ω y 2,57 k Ω . En este caso, interesa que la intensidad absorbida por la resistencia y el *led* sea pequeña para poder dar la máxima posible a la carga externa. En consecuencia se fija una intensidad por la resistencia de 10 mA, por tanto, se necesita una resistencia de 1030 Ω capaz de disipar 0,103 W. Las resistencias más pequeñas y apropiadas de que se disponen son de 1 k Ω y de 0,250 W.

9.7. Futuras actuaciones a desarrollar

Tal y como se ha comentado anteriormente, el proyecto que se ha desarrollado y la maqueta construida han sido el primer paso para la obtención de un laboratorio remoto. El objetivo del desarrollo era el de conseguir una plataforma que funcionara. A lo largo del proyecto se ha podido comprobar como se han llevado a cabo actuaciones priorizando



este objetivo sobre otros como pudieran ser el rigor matemático, la optimización del diseño, la búsqueda de unas elevadas prestaciones, etc.

En este apartado se proponen algunas actuaciones que se podrían llevar a cabo para mejorar la maqueta realizada.

9.7.1. Diseño del electroimán

Para conseguir un diseño óptimo del electroimán es necesario realizar un estudio exhaustivo del circuito magnético creado. Este tipo de estudio suele realizarse a utilizando simulaciones con elementos finitos. Con este estudio se obtiene la información necesaria para optimizar el diseño del electroimán (longitud, diámetro del entrehierro, espesor de la armadura, etc.).

El estudio del circuito magnético mediante elementos finitos puede ser completado con un estudio térmico del calor disipado por el electroimán. Este estudio permitirá escoger un conductor adecuado. [27]

En *Electromagnetic Design of a Magnetic Suspensión System*, William G. Hurley realizó estos estudios obteniendo los siguientes resultados.

| Parámetro | Símbolo | Medida óptima |
|-----------------------|----------|---------------|
| Diámetro del núcleo | Δ | $0.8 \cdot D$ |
| Ancho de ventana | w | $0.5 \cdot D$ |
| Altura de ventana | h | $2 \cdot w$ |
| Grosor de la armadura | t | $0,1 \cdot D$ |

Tabla 9.6 Diseño óptimo de un electroimán [27]

Donde D es el diámetro de la bola que levita en el campo magnético creado por el electroimán



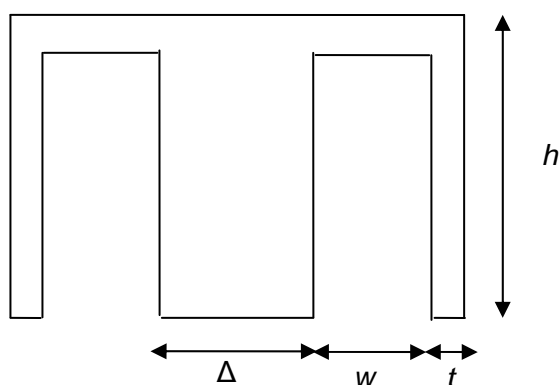


Fig. 9.22 Diseño óptimo del electroimán

9.7.2. Sensores de posición

Como ya se comentó en el apartado referente a la elección del sensor, según las necesidades especificadas, el tipo de sensor de posición adecuado para esta aplicación es uno del tipo fotoeléctrico con salida analógica. Este tipo de sensor es capaz de proporcionar la posición de un objeto metálico, en cambio los sensores finalmente utilizados son capaces de detectar la presencia de un objeto metálico (sensor con salida digital). Esta diferencia acarrea ciertas restricciones a la hora de proponer prácticas para realizar con esta plataforma.

Para próximos proyectos, se puede plantear la posibilidad de cambiar el tipo de sensor utilizado o colocar más sensores de posición con salida digital de forma que se pueda conocer la presencia del objeto en más puntos.

9.7.3. Bola suspendida en campo magnético.

Como se vio anteriormente en el proyecto se han planteado y estudiado dos sistemas de levitación magnética. Uno basado en un actuador electromagnético (el cual se ha probado en la maqueta) y otro basado en la levitación de una bola en un campo magnético. Este segundo sistema no se ha desarrollado en la plataforma de prácticas. En futuros proyectos se puede probar este segundo sistema. Para ello sería necesario implementar un programa adecuado para esta aplicación.



9.8. Manual y propuesta enunciados de prácticas

Como complemento a la construcción de la maqueta, se ha elaborado también un manual de prácticas. Éste consta de una manual de usuario en el que se describen las principales funciones del programa a utilizar en la programación del PLC (Codesys) y la propuesta y solución de una serie de prácticas destinadas a ser realizadas mediante la plataforma construida.

El manual de usuario, proporciona al alumno las herramientas necesarias para dar sus primeros pasos en la programación de PLC's. Las prácticas por su parte, servirán al alumno para asimilar los conocimientos teóricos aprendidos en clase.

Tanto el manual como las prácticas se encuentran detallados en los siguientes anejos.



10. Conclusiones

Una vez acabado el proyecto se puede concluir que los objetivos planteados en un principio se han conseguido con éxito. Se ha desarrollado un laboratorio remoto que funciona correctamente, no requiere mantenimiento ni intervención de personal para su funcionamiento continuado durante las 24 horas del día. No existe posibilidad de encasquillamiento o de que existan desperfectos debido a su sencillez y robustez.

Para el control de esta plataforma se ha desarrollado una placa electrónica que transforma y adapta las señales que recibe del PLC de forma que alimenta con la tensión requerida en todo momento al electroimán. Se ha desarrollado también un rectificador que transforma la tensión de red ($230V_{ca}$) para obtener diferentes niveles de tensión necesarios para desarrollar la plataforma.

Si bien ya se comentó en el apartado anterior, en este capítulo de conclusiones es deseable remarcar que la filosofía que se ha seguido para la construcción de este laboratorio remoto ha priorizado la robustez y sencillez del diseño frente al rigor matemático y a las amplias prestaciones.

Se ha elaborado también un amplio manual de prácticas donde se proponen diversos enunciados de prácticas para la plataforma y sus posibles soluciones. Este material permite al usuario introducirse en la programación usando del estándar IEC 61131, mediante el software CoDeSys, y de esta forma poder controlar, programando con cualquiera de los 5 lenguajes que dispone el estándar, el actuador electromagnético.



11. Agradecimientos

Para finalizar, quiero dar las más sinceras gracias a aquellas personas que han dedicado su apreciado tiempo para ayudarme a adquirir los conocimientos necesarios para la realización de este proyecto.

Agradecer al CITCEA por darme la oportunidad de participar en el desarrollo de un proyecto tan interesante y didáctico, y por haberme facilitado los recursos tanto materiales como personales disponibles.

También agradecer a la empresa Wago por facilitar, de forma gratuita, el autómata programable utilizado para el control de la plataforma.

A mi director Oriol Gomis por haberme dirigido y tutelado en este Proyecto de final de carrera. Por sus consejos, su dedicación y aportación de conocimientos.

A mi familia, por su paciencia, por su apoyo y por la ayuda que me ha proporcionado en todo momento.

Por último agradezco a todos mis amigos y a mis compañeros de universidad todo el apoyo y ayuda, y por supuesto los buenos momentos compartidos.



12. Bibliografía

12.1. Referencias bibliográficas

- [1] GARCÍA, L., SANZ, F., *Curso de Formación de Profesores en EaD*. Madrid. Ministerio de educación, cultura y deporte.
- [2] L. Rosado y J.R. Herreros, *Internet y Multimedia en Didáctica e Investigación de la Física. Tratado teórico-práctico para profesores y doctorandos*, Madrid, UNED, 2004.
- [3] P. Antsaklis et al, *Report on the NSF/CSS workshop on new directions in control engineering education*, IEEE. Control Systems Magazine, 19(5), pp. 53-58 (1999).
- [4] J.L. Guzmán et al., *Laboratorio remoto para el control de una maqueta de invernadero*, Universidad de Almería, Dpto. de Lenguajes y Computación. Área de Ingeniería de Sistemas y Automática
- [5] Ben M. Chen et al., *Development of a Web-Based Laboratory for Control Experiments on a Coupled Tank Apparatus*, IEEE TRANSACTIONS ON EDUCATION, VOL. 44, NO.1, FEBRUARY 2001
- [6] M. Domínguez, P. Reguera, J.J. Fuertes, *Maqueta industrial para docencia e investigación*, Instituto de Automática y Fabricación. Área: Automática y Control. Escuela de Ingenierías Industriales e Informática, Universidad de León.
- [7] L. Molas, C. Ferrater, O. Gomis, et al., *Integración internacional de plataformas de enseñanza a distancia de automatización con PLC's*, Revista Iberoamericana de Tecnologías del aprendizaje Vol. 1, No. 1, Noviembre 2006.
- [8] H. Laget, F. del Valle y F. Tadeo, *Web based remote control of an electro-pneumatic process*, Universidad de Valladolid. Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática 47005 Valladolid, Spain.
- [9] Tatsuya Kikuchi et. al., *DTV-S-Based Remote Laboratory Across the Pacific Over the Gigabit Network*, IEEE TRANSACTIONS ON EDUCATION, VOL. 47, NO. 1, FEBRUARY 2004



- [10] Oriol Gomis-Bellmunt et al., *A Distance PLC Programming Course Employing a Remote Laboratory Based on a Flexible Manufacturing Cell*, IEEE Transaction on Education, vol. 2, n. 49, pàg. 278-284, ISSN 0018-9359.
- [11] D. Alcetagaray, R. Semersano, *Monografía de control robusto. Diseño de un controlador para un levitador magnético utilizando técnicas de Quantitative Theory Feedback (QTF)*, Instituto de Ingeniería Eléctrica – Facultad de Ingeniería – UdeLar.
[<http://iie.fing.edu.uy/ense/asign/cr/mon02/levitacion.pdf>, 15 de Octubre 2006]
- [12] Earnshaw, S., “*On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether*”, Trans. Cambridge Philos. Soc., vol. 7, pp. 97-112, 1842.
- [13] Palmieri Diego and Pucci Martin Ariel, “*Construcción de un sistema de levitación magnética para laboratorio controlado por PC en tiempo real*”. IACI, Universidad Nacional de Quilmas
- [14] Hurley, W. G. and Wölfle, W. H., ‘*Electromagnetic design of a magnetic suspension system*’, IEEE Transactions on Education 40(2), 1997, 124–130
- [15] Barie, W. and Chiasson, J., ‘*Linear and nonlinear state-space controllers for magnetic levitation*’, International Journal of Systems Science 27(11), 1996, 1153–1163
- [16] Oriol Gomis-Bellmunt et al., *Linear electromagnetic actuator modeling for optimization*, Mechatronics (2006), doi:10.1016/j.mechatronics.2006.07.002
- [17] CONTROL PID MÓDULOS ANALÓGICOS. [<http://www.esi2.us.es/IntroLCPI.pdf>, 10 de Junio 2006]
- [18] MATLAB. Simulink [<http://www.mathworks.es/products/simulink/description1.html>, 15 de Octubre 2006]
- [19] ALLDATASHEET. Sensor fotoeléctrico OADM 12I6460/S35A [<http://sensors-transducers.globalspec.com/datasheets/9/BaumerElectric/C50F4789-E09C-4FD5-B21E-F589F72D04BE>, 15 de Enero 2007]
- [20] TELEMECANIQUE. Sensor fotoeléctrico OSIRIS XUDA 1 [[http://download.telemecanique.com/85256E54006445AD/all/F2D5F665D6E1FBA185256DE2005C8760/\\$File/163432101a55.pdf](http://download.telemecanique.com/85256E54006445AD/all/F2D5F665D6E1FBA185256DE2005C8760/$File/163432101a55.pdf), 15 de Enero 2007]



- [21] CATÁLOGO ONLINE DE WAGO. Módulos del Wago I/O System 750. [http://www.wagocatalog.com/okv3/index.asp?cid=1&lid=2&strProductGruppe=Is_Null&strE1=3&strE2=23000&strE3=23101#zumanker, 15 de Enero 2007].
- [22] ALLDATASHEET. SG3524. [http://www.datasheetcatalog.net/es/datasheets_pdf/S/G/3/5/SG3524.shtml, 15 de Enero 2007].
- [23] ALLDATASHEET. HC4050. [http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/M/7/4/H/M74HC4050C1R.shtml, 15 de Enero 2007].
- [24] ALLDATASHEET. Mosfet BUZ71. [<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/22131/STMICROELECTRONICS/BUZ71.html>, 15 de Enero 2007].
- [25] ALLDATASHEET. 7812 [<http://www.datasheetarchive.com/search.php?search=7812&sType=part>, 23 de Enero 2007]
- [26] BURDEN, Richard., FAIRES, J.Douglas. *Análisis numérico*. Thompson Learning Ibero (2001)
- [27] William G. Hurley, Werner H. Wölfe, *Electromagnetic Design of an Magnetic Suspension System*, IEEE TRANSACTION ON EDUCATION, VOL 40, N0. 2, MAY 1997

12.2. Bibliografía complementaria

- BOIX, O., [et al.]. *Tecnología eléctrica*. Barcelona, Ceysa, 2002. Páginas 229 y 230.
- GUTIÉRREZ, E. Curso de automatización industrial con prácticas de autómatas programables por Internet. PFC. Barcelona, ETSEIB, 2004.
- LORENZO, N. *Aplicación docente de una plataforma de accionamientos mecatrónicos controlada a través de Internet*. PFC Barcelona, ETSEIB 2007.
- BARRY's MAGNETIC LEVITATIO [<http://www.coilgun.info/levitation/home.htm>]
- FÍSICA CON ORDENARO. Curso interactivo de física en Internet.



[<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/magnetico/cMagnetico.html>]

