



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA

TEMA:

**Diseño e implementación de aplicación práctica de un control SCADA
para controles eléctricos usando LabView y DAQ**

AUTOR:

Siguenza Riofrio, José Ricardo

Trabajo de Titulación previo a la obtención del grado de
INGENIERO EN ELÉCTRICO-MECÁNICA

TUTOR:

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

13 de septiembre del 2019



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr.
Siguenza Riofrio, José Ricardo como requerimiento para la obtención del
título de **INGENIERO EN ELÉCTRICO-MECÁNICA**.

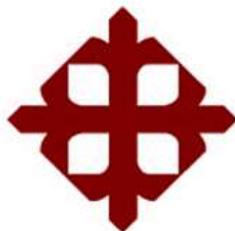
TUTOR

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

DIRECTOR DE CARRERA

M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, 13 de septiembre del 2019



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Siguenza Riofrio, José Ricardo**

DECLARÓ QUE:

El trabajo de titulación: “**Diseño e implementación de aplicación práctica de un control SCADA para controles eléctricos usando LabView y DAQ**”, previo a la obtención del Título de **Ingeniero en Eléctrico-Mecánica**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, 13 de septiembre del 2019

EL AUTOR

SIGUENZA RIOFRIO, JOSÉ RICARDO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **Siguenza Riofrio, José Ricardo**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **“Diseño e implementación de aplicación práctica de un control SCADA para controles eléctricos usando LabView y DAQ”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 13 de septiembre del 2019

EL AUTOR

SIGUENZA RIOFRIO, JOSÉ RICARDO

REPORTE DE URKUND

The screenshot shows the URKUND web interface. On the left, a document summary is displayed:

- Documento:** [Jose_Siguenza_Final.docx](#) (D55220646)
- Presentado:** 2019-09-02 19:25 (-05:00)
- Presentado por:** fernandopm23@hotmail.com
- Recibido:** edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com
- Mensaje:** Revisión TT José Siguenza [Mostrar el mensaje completo](#)
1% de estas 27 páginas, se componen de texto presente en 2 fuentes.

On the right, a 'Lista de fuentes' (List of sources) is shown:

- Category: Enlace [Cerrar sesión](#)
- [Carrera_Bryan.docx](#)
- [TT_Rivera_Joel.docx](#)
- [TT-Miguel-Flores-31-08-17 SDA.doc](#)
- [Diseño y análisis HMI de un motor síncrono \[auta de a...](#)
- <http://repositorio.espe.edu.ec/ispui/handle/21000/4059>

At the bottom, there is a toolbar with icons for navigation and actions, including a warning icon for '1 Advertencias', 'Reiniciar', 'Exportar', and 'Compartir'.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL FACULTAD DE
EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO CARRERA DE INGENIERÍA
ELÉCTRICO-MECÁNICA

TEMA:
Diseño
e implementación de aplicación práctica de un control
SCADA para controles eléctricos usando LabView y DAQ

AUTOR: Siguenza Rlofrio, José Ricardo

Trabajo de Titulación previo a
la obtención del grado de INGENIERO EN ELÉCTRICO-MECÁNICA

Dedicatoria

El presente trabajo va dedicado en especial a mis Hijos, Emily y Lionel que desde el día que vinieron al mundo cada logro es por Uds. y para Uds., quiero verlos sentirse orgulloso de su padre que los ama y que mi vida les pertenece; también para una de las personas más fuertes que conozco mi madre, que tuvo que tomar decisiones muy difíciles a lo largo de su vida, para que yo esté en este momento, es una LEONA, mamá es el inicio y quiero que sepas que nunca olvidaré lo que hiciste y haces por mí, tu sacrificio nunca será en vano, TE AMO MAMITA..

EL AUTOR

SIGUENZA RIOFRIO, JOSÉ RICARDO

Agradecimientos

La vida tiene un sentido inexplicable, hace que la cosas ocurran cuando tengan que pasar; Y llego mi momento de éxito. Agradezco en primer lugar a DIOS por darme salud y permitirme alcanzar este sueño, que solo es el principio.

Agradezco a mi Madre Fátima de Jesús Riofrio Elizalde que su larga lucha e inalcanzable cansancio nunca se dio por vencida, Te amo madre. A mi padre Richard Antony Sigüenza Sánchez que tuvo los consejos y siempre guardo la ilusión de que este día llegaría.

A mis abuelitos; Rosario Elizalde y Ángel Riofrio que nunca perdieron la fe en mí.

A mi hermano, Ricardo Antonio Sigüenza Riofrio que mi ejemplo por todo lo bueno y malo que me ha pasado lo coja como experiencia y que recuerde que lo amo como un hijo.

A mis hermanas, Lucia Montero y Amelia Sigüenza que sepan que mis logros también son de ellas.

A mi FAMILIA; a mi esposa Alicia Viviana Galarza Romero, que ha sido mi muro inquebrantable una mujer que ha luchado hombro con hombro para que yo pueda tener mi tiempo para mis estudios...Mi amor te amo y quiero que te sientas orgullosa de mi, mis hijos Emily y Lionel Sigüenza Galarza, Hijos míos todo lo que hago es por ustedes mi vida les pertenece.

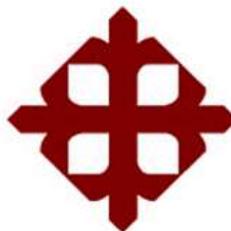
No podía faltar mis queridos Suegros Alicia Romero y Vicente Galarza han sido como padres, su apoyo desinteresado y su buen corazón han sido una ayuda inexplicable... suegros tengo una deuda con Uds., a mis cuñadas Amada, Tanya y Katty Galarza Romero que siempre ha tenido la mano extendida y sé que se sentirán orgullosas de mí.

A mis amigos-hermanos, Hernán Zambrano, Gino Suarez y Gabriel Robles, personas con un alma noble que pese a las circunstancias siempre tuve su mano y su ayuda.

Finalmente, mis agradecimientos a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, a toda la Facultad Técnica para el Desarrollo, a mis profesores quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional, gracias a cada una de ustedes por su paciencia, dedicación, apoyo incondicional y amistad.

EL AUTOR

SIGUENZA RIOFRIO, JOSÉ RICARDO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO-MECÁNICA

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

M. Sc. ROMERO PAZ, MANUEL DE JESÚS
DECANO

f. _____

M. Sc. PHILCO ASQUI, LUIS ORLANDO
COORDINADOR DE TITULACIÓN

f. _____

Ing. ROMERO ROSERO, CARLOS BOLÍVAR
OPONENTE

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVI
Resumen	XVII
Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.....	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Antecedentes.....	3
1.3. Definición del problema.....	3
1.4. Justificación del problema a investigar.....	3
1.5. Objetivos	3
1.6. Hipótesis.....	4
1.7. Metodología de investigación.....	4
Capítulo 2: Marco Teórico de la Ingeniería de controles.....	6
2.1. Avance motivacional de la ingeniería de control	6
2.2. Motivación para la Ingeniería de Control	6
2.2.1. Problemas de globalización del mercado	9
2.2.2. Cuestiones ambientales en sistemas de control modernos.....	10
2.3. Períodos históricos de la teoría de control.....	11
2.4. Tipos de diseño de sistemas de control	12
2.4.1. Diseño inicial de base.....	13
2.4.2. Puesta en marcha y sintonización.....	13
2.4.3. Mantenimiento y actualizaciones.....	14
2.4.4. Estudios forenses.....	14
2.5. Integración de sistema de control.....	14
2.5.1. Planta.....	15
2.5.2. Objetivos de control	15
2.5.3. Sensores.....	16
2.5.4. Actuadores.....	16
2.5.5. Comunicaciones entre sensores y actuadores.....	17
2.5.6. Dispositivos computacionales.....	18

2.5.7. Arquitecturas e Interfaces	18
2.5.8. Algoritmos	20
2.5.9. Perturbaciones e incertidumbre.	20
2.6. Revisión de los principios de retroalimentación.....	21
2.7. El objetivo principal del control	21
2.8. Motivador ejemplo industrial.....	23
2.8.1. Especificaciones de rendimiento.....	25
2.8.2. Modelado de sistemas de control.	26
2.8.3. Control de retroalimentación y preventiva.....	28
2.8.4. Indicador de compensaciones	29
2.9. El problema fundamental del control.	30
2.10. Solución prototipo al problema de control a través de Inversión	31
2.11. Retroalimentación e inversión de alta ganancia.	34
2.12. Arquitecturas de circuito abierto a circuito cerrado.....	35
2.13. Compromisos involucrados en la elección de la ganancia de retroalimentación	37
2.14. Mediciones	38
2.15. Resumen	40
Capítulo 3: Desarrollo de la propuesta.....	42
3.1. Explicación de la aportación del trabajo de titulación.	42
3.2. Diseño de aplicación 1: control eléctrico mediante instrumentos virtuales (LabView) y tarjeta de adquisición de datos DAQ 6009.	42
3.2.1. Objetivos de la práctica de aplicación 1:.....	42
3.2.2. Recursos:.....	43
3.2.3. Tiempo estimado:	43
3.2.4. Procedimiento:	43
3.3. Diseño de aplicación 2: Tipo de arranque en estrella-delta mediante instrumentos virtuales (LabView) y tarjeta de adquisición de datos DAQ 6009.	49
3.3.1. Objetivos de la práctica de aplicación 1:.....	49
3.3.2. Recursos:.....	50
3.3.3. Tiempo estimado:	50

3.3.4. Procedimiento	50
3.4. Resultados obtenidos de las aplicaciones prácticas.....	57
3.4.1. Resultados de la aplicación práctica 1.....	57
3.4.2. Resultados de la aplicación práctica 2.....	60
Conclusiones	63
Recomendaciones	64
Bibliografía	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2:

Figura 2. 1: Gobernador de Fly-Ball de Watt	7
Figura 2. 2: Esquema de proceso de una planta de amoníaco Kellogg	10
Figura 2. 3: Configuración típica de control de planeidad para laminador ...	16
Figura 2. 4: Esquema de proceso de una ruedecilla industrial	24
Figura 2. 5: Lanzador continuo: floración típica (izquierda) y diagrama simplificado (derecha).....	25
Figura 2. 6: Diagrama de bloques de la dinámica simplificada de nivel de molde, sensores y actuador	28
Figura 2. 7: Modelo del control de nivel de molde simplificado con compensación de avance para la velocidad de fundición	29
Figura 2. 8: Indicador de compensaciones: mayor capacidad de respuesta a los cambios del punto de ajuste también aumenta la sensibilidad al ruido de medición y al desgaste del actuador.....	30
Figura 2. 9: Controlador conceptual.....	33
Figura 2. 10: Realización del controlador conceptual.	34
Figura 2. 11: Control de nivel de tanque mediante inversión aproximada ...	35
Figura 2. 12: Control de bucle abierto con inverso incorporado.....	36
Figura 2. 13: Control de circuito cerrado.....	36
Figura 2. 14: Control de circuito cerrado con sensores.....	39
Figura 2. 15: Bucle de retroalimentación típico	41

Capítulo 3:

Figura 3. 1: Dispositivo de adquisición de datos de National Instrument.	43
Figura 3. 2: Creación de nuevo VI en blanco para la primera aplicación práctica.	44
Figura 3. 3: Detección del controlador NI USB 6009.	44
Figura 3. 4: DAQmx- Data Acquisition	45
Figura 3. 5: DAQmx- Data Acquisition	45
Figura 3. 6: Creación del enlace para la salida digital.....	45

Figura 3. 7: Creación de las 2 salidas y la inicialización.	46
Figura 3. 8: Creación del control para escritura de las salidas.....	46
Figura 3. 9: Diagramas de control de la aplicación práctica 1.....	47
Figura 3. 10: Diagramas de bloques del control eléctrico de la aplicación práctica 1.	47
Figura 3. 11: Diagrama eléctrico de la aplicación práctica 1.....	48
Figura 3. 12: Diagrama eléctrico de fuerza para giro a la derecha.	48
Figura 3. 13: Diagrama eléctrico de fuerza para giro a la izquierda.....	49
Figura 3. 14: Dispositivo DAQ 6009 de National Instrument.....	50
Figura 3. 15: Creación de nuevo VI en blanco para la segunda aplicación práctica.	51
Figura 3. 16: Ventana de configuración para dispositivos NI USB-6009.....	51
Figura 3. 17: Ventana para configuración de adquisición de datos usando DAQmx.	52
Figura 3. 18: Configuración como puerto de salida digital para la adquisición de datos mediante DAQmx.....	52
Figura 3. 19: Creación del enlace para la salida digital.....	52
Figura 3. 20: Creación Bloque de control Select Case	53
Figura 3. 21: Creación protector mediante código de Bloques	54
Figura 3. 22: Diagrama de bloques del programa.....	54
Figura 3. 23: Diagramas de control.....	55
Figura 3. 24: Diagramas de control y fuerza de la aplicación práctica 2.	55
Figura 3. 25: Diagramas de control y fuerza de la aplicación práctica 2.	56
Figura 3. 26: Diagrama eléctrico de fuerza para giro a la derecha de la aplicación 2.....	56
Figura 3. 27: Diagrama eléctrico de fuerza para giro a la derecha de la aplicación 2.....	57
Figura 3. 28: Resultados obtenidos de aplicación práctica 1.	57
Figura 3. 29: Resultados obtenidos de aplicación práctica 1 – caso 1.....	58
Figura 3. 30: Vista del banco de pruebas de la aplicación práctica 1 – caso 1.	58

Figura 3. 31: Resultados obtenidos de aplicación práctica 1 – caso 2.....	59
Figura 3. 32: Vista del banco de pruebas de la aplicación práctica 1 – caso 2.	59
Figura 3. 33: Representación gráfica del GUI para la aplicación práctica 2.	60
Figura 3. 34: Resultados obtenidos de aplicación práctica 2 – tipo de arranque estrella.	60
Figura 3. 35: Vista del banco de pruebas de la aplicación práctica 2 – tipo estrella.	61
Figura 3. 36: Vista del banco de pruebas de la aplicación práctica 2 – tipo de arranque delta.....	61
Figura 3. 37: Vista del banco de pruebas de la aplicación práctica 2 – tipo delta.	62

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 2:

Tabla 2. 1: Jerarquía de sistemas control típico.....	20
---	----

Resumen

El desarrollo del trabajo de titulación se basa en el estudio de la ingeniería de control ya que está presente en prácticamente todos los sistemas de ingeniería modernos. En la actualidad el control es a menudo la tecnología oculta, ya que su éxito lo elimina de la vista. El control es una tecnología habilitadora clave con respecto a calidad de producto mejorada, minimización de residuos y emisiones, protección del medio ambiente, mayor rendimiento para una capacidad instalada dada, mayor rendimiento, actualizaciones de plantas, y mayores márgenes de seguridad. Los ejemplos de sistemas controlados incluyen sensores, actuadores, interconexión, entre otros dispositivos, estos fueron discutidos en el capítulo 2. El proyecto de titulación desarrollado en el capítulo 3, consiste en implementar dos aplicaciones prácticas de controles eléctricos mediante un tablero de pruebas a escala, que permita la supervisión, control y adquisición de datos (conocido como SCADA), mediante el equipo de adquisición DAQ 6009 y el desarrollo de una interfaz gráfica de usuario utilizando el software LabView.

Palabras claves: CONTROL, ELÉCTRICO, SENSORES, ADQUISICIÓN, SUPERVISIÓN, SCADA.

Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.

1.1. Introducción.

Un sistema de control eléctrico es una interconexión física de dispositivos que influye en el comportamiento de otros dispositivos o sistemas. Un sistema electrónico simple se compone de una entrada, un proceso y una salida. Las variables de entrada y salida al sistema son señales. Ejemplos de estos sistemas incluyen bombas de circulación, compresores, sistemas de fabricación, planta de refrigeración y paneles de control de motores.

Los dispositivos de entrada, como los sensores, recopilan y responden a la información y controlan un proceso físico mediante el uso de energía eléctrica en forma de acción de salida. Los sistemas electrónicos pueden clasificarse como de naturaleza "causal". La señal de entrada es la "causa" del cambio en el proceso o en el funcionamiento del sistema, mientras que la señal de salida es el 'efecto', la consecuencia de la causa. Un ejemplo es un micrófono (dispositivo de entrada) que hace que las ondas sonoras se conviertan en señales eléctricas y se amplifican por un altavoz (dispositivo de salida) produciendo ondas sonoras.

Los sistemas electrónicos se representan comúnmente como una serie de bloques y señales interconectados. Cada bloque se muestra con su propio conjunto de entradas y salidas. Esto se conoce como representación de diagrama de bloques. Mientras que, los sistemas eléctricos funcionan con señales de tiempo continuo (*Continuous-Time, CT*) o señales de tiempo discreto (*Discrete-Time, DT*).

Un sistema de CT es donde las señales de entrada son continuas en el tiempo. Estos tienden a ser sistemas analógicos que producen una operación lineal con señales de entrada y salida a las que se hace referencia durante un período de tiempo establecido, como entre las 13:00 y las 14:00. Mientras que, un sistema DT es donde las señales de entrada son una secuencia o una serie de valores de señal definidos en intervalos de tiempo específicos, como 13:00 y 14:00 por separado.

En consecuencia, los sistemas de control son uno de los dos tipos diferentes, ya sea un sistema de bucle abierto o un sistema de bucle cerrado.

1.2. Antecedentes.

Los sistemas de control eléctrico que se han desarrollado en los trabajos de titulación fueron desplegados para diferentes aplicaciones, aunque no conllevaron una plataforma de adquisición de datos (a través del DAQ 6009) ni el programa de instrumentos virtuales (LabView). Los sistemas de control que pueden ser eléctricos y electrónicos, pero en la actualidad son implementados para supervisión, control y adquisición de datos, conocido como SCADA.

En otras palabras, SCADA proporciona una capa de alto nivel sobre la capa de controladores lógicos programables (*Programmable Logic Controllers, PLC*) que se coloca sobre los dispositivos de hardware de la planta. Aunque no necesariamente los PLCs son prescindibles al momento de realizar la implementación de un sistema de control eléctrico.

1.3. Definición del problema

Necesidad de realizar el diseño e implementación de dos aplicaciones prácticas de un sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA) para controles eléctricos utilizando LabView y el equipo DAQ 6009.

1.4. Justificación del problema a investigar.

El diseño de un banco de pruebas de un sistema de control SCADA a escala será de gran utilidad en el equipo de adquisición de datos (DAQ 6009) y con la ayuda del software LabView se podrá visualizar las señales recibidas al sistema SCADA.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General:

Realizar el diseño e implementación de aplicaciones prácticas de un control SCADA para controles eléctricos usando LabView y DAQ.

1.5.2. Objetivos específicos:

- ✓ Describir la fundamentación teórica de los sistemas de controles.
- ✓ Diseñar el banco de pruebas del sistema de control eléctrico industrial a escala.
- ✓ Implementar dos aplicaciones prácticas de sistemas de control eléctrico en el banco de pruebas utilizando el equipo DAQ y software LabView.

1.6. Hipótesis

A través del diseño e implementación de aplicaciones prácticas de un control SCADA para controles eléctricos utilizando LabView y DAQ mejorará el proceso de aprendizaje al contar con una herramienta de ayuda académica en la asignatura de controles eléctricos.

1.7. Metodología de investigación.

Los métodos de investigación son formas generalizadas y establecidas de abordar la problemática o las preguntas de investigación. Los métodos de investigación se dividen en enfoques cualitativos y cuantitativos e implican las actividades de estudio específicas de recopilación y análisis de datos de investigación con el fin de responder la problemática o las preguntas de investigación en particular.

No todos los métodos se pueden aplicar a todas las preguntas de investigación: (a) los métodos cualitativos deben desplegarse cuando el objetivo de la investigación sea un análisis contextual en profundidad de un fenómeno. Estos métodos son muy buenos para responder a las preguntas sobre qué y quién, pero no son adecuados para responder por qué y dónde las preguntas de investigación, y (b) los métodos cuantitativos deben desplegarse cuando el objetivo de la investigación sea producir resultados generalizables que muestren prevalencia, incidencia, relaciones estadísticas entre variables y causalidad. Estos métodos son adecuados para responder por qué y dónde las preguntas, pero pueden carecer de una comprensión profunda de un fenómeno, especialmente si el área de investigación es de naturaleza sensible.

El tipo de investigación que se utiliza es empírico. Este tipo de investigación requiere que se recopilen datos. Por lo tanto, la investigación empírica se basa en la realidad y no en el ámbito abstracto. Los datos pueden ser recogidos por observación o por experimento. El propósito de la investigación empírica es explicar los datos recogidos a través del desarrollo de un modelo o teoría que hipótesis sobre la relación entre los datos y las variables relevantes del entorno. Los resultados de la investigación empírica deben poder replicarse ya que la adhesión a este método implica el uso de metodología y criterios de investigación objetivos, fiables y válidos.

Capítulo 2: Marco Teórico de la Ingeniería de controles.

2.1. Avance motivacional de la ingeniería de control

El objetivo de este capítulo es proporcionar la motivación para estudiar ingeniería eléctrica de control. En particular, esto trata de cubrir: (a) una visión general del alcance del control, (b) períodos históricos en el desarrollo de la teoría del control, (c) tipos de problemas de control, (d) introducción a la integración del sistema, y (e) análisis de beneficios económicos.

2.2. Motivación para la Ingeniería de Control

El control de retroalimentación tiene una larga historia, que comenzó con el temprano deseo de los humanos de aprovechar los materiales y las fuerzas de la naturaleza en su beneficio. Los primeros ejemplos de dispositivos de control incluyen sistemas de regulación de reloj y mecanismos para mantener los molinos de viento apuntando hacia el viento.

Un paso clave en el desarrollo del control ocurrió durante la revolución industrial. En ese momento, se desarrollaron máquinas que mejoraron en gran medida la capacidad de convertir las materias primas en productos beneficiosos para la sociedad. Las máquinas asociadas, específicamente las máquinas de vapor involucraban grandes cantidades de energía, y pronto se dieron cuenta de que esta energía debía controlarse de manera organizada, así los sistemas debían operar de manera segura y eficiente.

Para Richards, (2014) un desarrollo importante en este momento fue el gobernador de Fly-Ball de Watt, tal como se muestra en la figura 2.1. Este dispositivo regulaba la velocidad de una máquina de vapor al acelerar el flujo de vapor. Estos dispositivos permanecen en servicio hasta el día de hoy. Las guerras mundiales también llevaron a muchos desarrollos en la ingeniería de control. Algunos de estos estaban asociados con los sistemas de orientación, mientras que otros estaban relacionados con los requisitos de fabricación mejorados necesarios por el esfuerzo de guerra.

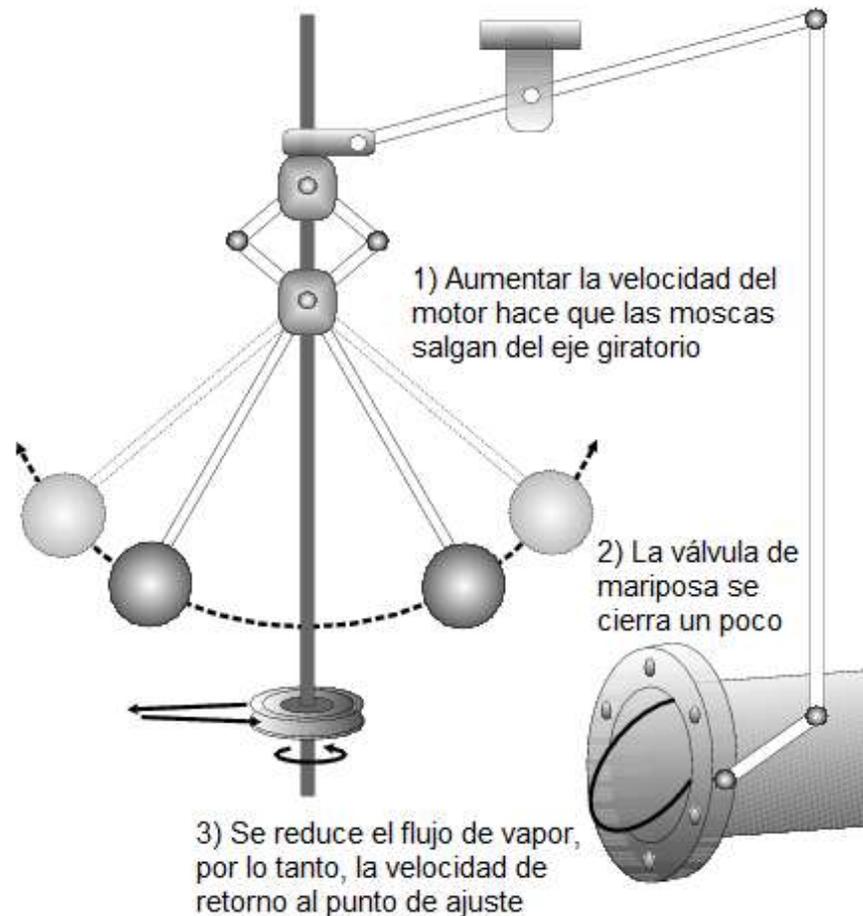


Figura 2. 1: Gobernador de Fly-Ball de Watt
Fuente: (Lawson, 2019; Richards, 2014)

El impulso al espacio en las décadas de los años 1960 y 1970 también dependía de los desarrollos de control. Estos desarrollos luego volvieron a los bienes de consumo, así como a aplicaciones comerciales, ambientales y médicas. Estas aplicaciones de control avanzado han continuado a un ritmo rápido. Para citar solo un ejemplo, el control del grosor de la línea central en los trenes de laminación ha sido una gran historia de éxito para la aplicación de ideas de control avanzadas.

De hecho, la precisión del control del grosor de la línea central ha mejorado en dos órdenes de magnitud en los últimos 50 años, gracias, en parte, al control mejorado. Para muchas empresas, estos desarrollos fueron fundamentales no solo para aumentar la rentabilidad sino incluso para permanecer en el negocio. A finales del siglo XX, el control se ha convertido

en un elemento omnipresente (pero en gran medida invisible) de la sociedad moderna.

Prácticamente todos los sistemas con los que se tiene contacto están respaldados por sofisticados sistemas de control. Los ejemplos van desde productos domésticos simples (regulación de temperatura en aires acondicionados, termostatos en calentadores de agua caliente, etc.), a sistemas más sofisticados, como el automóvil familiar (que tiene cientos de circuitos de control), a sistemas a gran escala (tales como plantas químicas, aviones y procesos de fabricación).

Por ejemplo, la figura 2.2 (ver sección 2.2.1) muestra el esquema del proceso de una planta de amoníaco Kellogg. Hay alrededor de 400 de estas plantas en todo el mundo. Una planta química integrada del tipo que se muestra en la figura 2.2 típicamente tendrá muchos cientos de bucles de control. De hecho, por simplicidad, no se ha mostrado muchas de las utilidades en la figura 2.2, pero estas también tienen un número sustancial de bucles de control asociados con ellas. (Pattabathula & Richardson, 2016)

Muchos de estos controladores industriales implican tecnologías de vanguardia. Por ejemplo, en el caso de los trenes de laminación (véase la figura 2.3), el sistema de control involucra fuerzas del orden de 2000 toneladas, velocidades de hasta 120 km/h y (en la industria del aluminio) tolerancias de 5 μm o 1/500 del grosor de un cabello humano. Todo esto se logra con hardware de precisión, herramientas informáticas avanzadas y algoritmos de control sofisticados.

Más allá de estos ejemplos industriales, los mecanismos reguladores de retroalimentación son fundamentales para el funcionamiento de los sistemas biológicos, las redes de comunicación, las economías nacionales e incluso las interacciones humanas. De hecho, si uno piensa cuidadosamente, el control de una forma u otra se puede encontrar en todos los aspectos de la vida. En este contexto, la ingeniería de control se ocupa del diseño, implementación y

mantenimiento de estos sistemas. Como se verá más adelante, esta es una de las áreas más desafiantes e interesantes de la ingeniería moderna.

De hecho, para llevar a cabo el control con éxito, es necesario combinar muchas disciplinas, incluido el modelado, la tecnología de sensores (para medir el estado del sistema), los actuadores (para aplicar la acción correctiva al sistema), comunicaciones (para transmitir datos), computación (para realizar la compleja tarea de cambiar los datos medidos en acciones apropiadas del actuador) e interconexión (para permitir que la multitud de diferentes componentes en un sistema de control se comuniquen entre sí sin problemas)

Por lo tanto, la ingeniería de control es un tema multidisciplinario emocionante con una gama enormemente amplia de aplicaciones prácticas. Además, es poco probable que el interés en el control disminuya en el futuro previsible. Por el contrario, es probable que se vuelva cada vez más importante, debido a la creciente globalización de los mercados y las preocupaciones ambientales.

2.2.1. Problemas de globalización del mercado

La globalización del mercado está ocurriendo cada vez más, y esta situación significa que, para mantenerse en el negocio, las industrias manufactureras están poniendo cada vez más énfasis en cuestiones de calidad y eficiencia. De hecho, en la sociedad actual, pocas o ninguna compañía puede permitirse ser la segunda mejor. A su vez, esto enfoca la atención en el desarrollo de sistemas de control mejorados, para que los procesos funcionen de la mejor manera posible. En particular, el control mejorado es una tecnología clave que permite apuntalar

- calidad de producto mejorada,
- minimización de residuos,
- protección del medio ambiente,
- mayor rendimiento para una capacidad instalada dada,
- mayor rendimiento,

- aplazamiento de costosas mejoras de planta, y
- mayores márgenes de seguridad.

Todos estos problemas son relevantes para el control de una planta integrada como la que se muestra en la figura 2.2. (Pattabathula & Richardson, 2016)

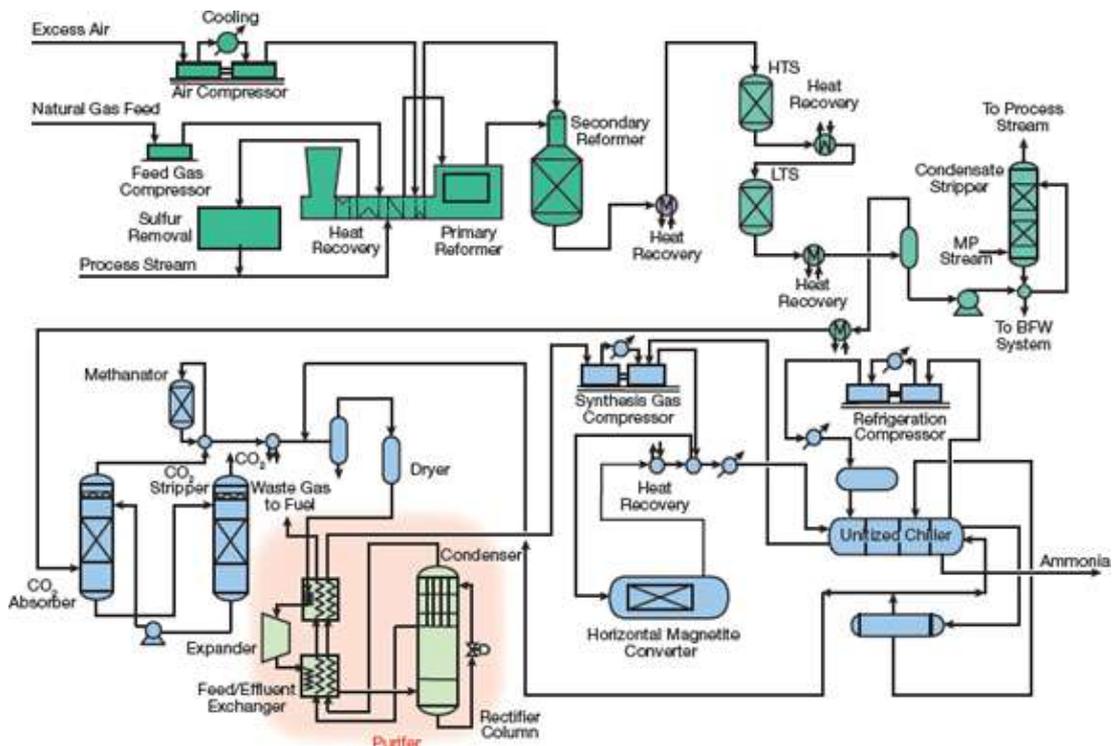


Figura 2. 2: Esquema de proceso de una planta de amoníaco Kellogg
Fuente: (Pattabathula & Richardson, 2016)

2.2.2. Cuestiones ambientales en sistemas de control modernos.

Todas las empresas y gobiernos son cada vez más conscientes de la necesidad de lograr los beneficios descritos anteriormente, al tiempo que respetan los recursos naturales finitos y preservan nuestro frágil medio ambiente. Nuevamente, la ingeniería de control es una tecnología central que permite alcanzar estos objetivos. Para citar un ejemplo bien conocido, los cambios en la legislación que cubren las emisiones de los automóviles en California han llevado a los fabricantes de automóviles a cambios significativos en la tecnología, incluidas estrategias de control mejoradas para motores de combustión interna. Por lo tanto, se observa que la ingeniería de control está impulsada por las principales fuerzas económicas, políticas y

ambientales. Las recompensas para aquellos que pueden acertar todos los factores pueden ser enormes.

2.3. Períodos históricos de la teoría de control.

Como se vio anteriormente la ingeniería de control ha dado varios pasos importantes hacia adelante en eventos cruciales de la historia (por ejemplo, la revolución industrial, la segunda guerra mundial, el impulso al espacio, entre otras). Cada uno de estos pasos ha sido acompañado por una explosión correspondiente de desarrollo en la teoría subyacente del control.

Al principio, cuando se aplicaba el convincente concepto de retroalimentación, los ingenieros a veces encontraban resultados inesperados. Estos se convirtieron en catalizadores para un análisis riguroso. Por ejemplo, si se vuelve al gobernador de Fly Ball de Watt, se descubrió que, bajo ciertas circunstancias, estos sistemas podrían producir oscilaciones auto sostenidas. Hacia fines del siglo XIX, varios investigadores (incluido Maxwell) mostraron cómo se podrían describir estas oscilaciones a través de las propiedades de las ecuaciones diferenciales ordinarias. (Pattabathula & Richardson, 2016)

Los desarrollos alrededor del período de la segunda guerra mundial también fueron acompañados por desarrollos significativos en la teoría de control. Por ejemplo, el trabajo pionero de Bode, Nyquist, Nichols, Evans y otros aparecieron en este momento. Esto dio como resultados gráficos simples para analizar problemas de control de retroalimentación de entrada y salida única. Estos métodos ahora se conocen generalmente por el término genérico, teoría de control clásico.

La década de 1960 vio el desarrollo de un enfoque alternativo de control del espacio. Esto siguió a la publicación del trabajo de Wiener, Kalman (y otros) sobre estimación y control óptimos. Este trabajo permitió que los problemas multivariados se trataran de manera unificada. Esto había sido difícil, si no imposible, en el marco clásico. Este conjunto de desarrollos se

denomina en términos generales teoría del control moderno. (Cohen Tenoudji, 2016)

En la década de 1980, estos diversos enfoques para el control habían alcanzado un nivel sofisticado, y el énfasis se desplazó a otros problemas relacionados, incluido el efecto del error del modelo en el rendimiento de los controladores de retroalimentación. Esto se puede clasificar como el período de la teoría de control robusto. Paralelamente, ha habido un trabajo sustancial en problemas de control no lineal. Esto ha sido motivado por el hecho de que muchos problemas de control del mundo real implican efectos no lineales.

Para Creus Solé, (2011) existen muchos otros desarrollos, incluyendo control adaptativo, autoajuste y control inteligente. Estos son demasiado numerosos para detallarlos aquí. De todos modos, el propósito no es dar una historia completa, sino simplemente dar un resumen de la evolución del campo. Finalmente, el control se ha convertido en una disciplina madura. Por lo tanto, es posible dar un tratamiento de control que tenga en cuenta muchos puntos de vista diferentes y unificarlos en un marco común.

2.4. Tipos de diseño de sistemas de control

El diseño del sistema de control en la práctica requiere un esfuerzo cíclico, en el que uno itera a través del modelado, diseño, simulación, prueba e implementación. El diseño del sistema de control también toma varias formas diferentes, y cada una requiere un enfoque ligeramente diferente. Un factor que afecta la forma que toma el esfuerzo es si el sistema es parte de una misión predominantemente comercial. Los ejemplos en los que este no es el caso incluyen la investigación, la educación y las misiones, como el aterrizaje del primer hombre en la luna. Aunque el costo siempre es una consideración, estos tipos de diseño de control están dictados principalmente por cuestiones técnicas, pedagógicas, de confiabilidad y seguridad.

Por otro lado, si el diseño del control está motivado comercialmente, uno vuelve a tener situaciones diferentes dependiendo de si el controlador es un pequeño subcomponente de un producto comercial más grande (como el

controlador de cruce o el ABS en un automóvil) o si es parte de un proceso de fabricación (como el controlador de movimiento en los robots que ensamblan un automóvil). En el primer caso, también se debe considerar el costo de incluir el controlador en cada producto, lo que generalmente significa que hay una prima importante en el costo y, por lo tanto, uno se ve obligado a utilizar microcontroladores bastante simples. En el segundo caso, uno puede permitirse controladores significativamente más complejos, siempre que mejoren el proceso de fabricación de una manera que aumente significativamente el valor del producto fabricado.

En todas estas situaciones, el ingeniero de control se ve afectado aún más por el estado del sistema de control en su ciclo de vida: (a) diseño inicial de base; (b) puesta en marcha y sintonización; (c) mantenimiento y actualizaciones; y (d) estudios forenses

2.4.1. Diseño inicial de base.

En esta fase, el ingeniero de control se enfrenta a un proyecto de campo verde o denominado de base y, por lo tanto, el diseñador puede dirigir el desarrollo de un sistema desde el principio. Esto incluye garantizar que el diseño del sistema general tenga en cuenta los problemas de control posteriores. Con demasiada frecuencia, los sistemas y las plantas se diseñan basándose únicamente en consideraciones de estado estacionario. Por lo tanto, no es de extrañar que las dificultades operativas puedan aparecer en el camino. Se cree que los ingenieros de control deben ser una parte integral de todos los equipos de diseño. El ingeniero de control debe interactuar con las especificaciones de diseño y garantizar que se tengan en cuenta los problemas dinámicos y de estado estable.

2.4.2. Puesta en marcha y sintonización.

Una vez que la arquitectura básica de un sistema de control está en su lugar, el trabajo del ingeniero de control se convierte en ajustar el sistema de control para cumplir con las especificaciones de rendimiento requeridas lo más cerca posible. Esta fase requiere una comprensión profunda de los

principios de retroalimentación para garantizar que el ajuste del sistema de control se lleve a cabo de manera conveniente, segura y satisfactoria.

2.4.3. Mantenimiento y actualizaciones.

Una vez que un sistema está en funcionamiento, el trabajo de ingeniero de control se convierte en uno de mantenimiento y actualizaciones. La motivación para el refinamiento puede provenir de muchas direcciones, tales como:

- fuerzas internas: por ejemplo, la disponibilidad de nuevos sensores o actuadores puede abrir la puerta para mejorar el rendimiento;
- fuerzas externas, por ejemplo, las presiones del mercado o la nueva legislación ambiental pueden requerir un mejor rendimiento del control.

2.4.4. Estudios forenses.

Las investigaciones forenses son a menudo el papel de consultores de ingeniería de control. Aquí, el objetivo es sugerir acciones correctivas que rectifiquen un problema de control observado. En estos estudios, es importante que el ingeniero de control adopte una visión holística, ya que el desempeño exitoso del control generalmente depende de la operación satisfactoria de muchos componentes interconectados.

En nuestra experiencia, es probable que un rendimiento de control deficiente esté asociado con fallas básicas de diseño de la planta, actuadores deficientes, sensores inadecuados o problemas de la computadora, ya que es el resultado de un ajuste de control deficiente. Sin embargo, todos estos problemas pueden y deben ser parte del dominio del ingeniero de control. De hecho, a menudo solo el ingeniero de control tiene la visión general necesaria para resolver estos problemas complejos con éxito.

2.5. Integración de sistema de control.

Como es evidente en la discusión anterior, el éxito en la ingeniería de control depende de adoptar un punto de vista holístico. Las cuestiones que están incorporados en un diseño de control típico son:

- Planta, es decir, el proceso a controlar;
- Objetivos de control;
- sensores;
- actuadores;
- comunicaciones entre sensores y actuadores;
- dispositivos computacionales
- arquitecturas e interfaces;
- algoritmos
- perturbaciones e incertidumbre.

2.5.1. Planta

La disposición física de una planta es una parte intrínseca de los problemas de control. Por lo tanto, un ingeniero de control necesita estar familiarizado con la física del proceso en estudio. Esto incluye un conocimiento rudimentario del equilibrio energético básico, el equilibrio de masa y los flujos de material en el sistema. También se deben comprender las dimensiones físicas de los equipos y cómo se relacionan con las especificaciones de rendimiento. En particular, se recomienda la producción de modelos físicos de la parte posterior de la envoltura como un primer paso para diseñar y mantener sistemas de control. Estos modelos generalmente se refinarán a medida que uno avanza.

2.5.2. Objetivos de control

Antes de diseñar sensores, actuadores y arquitecturas de control, es importante conocer el objetivo, es decir, formular los objetivos de control. Este conocimiento incluye lo siguiente:

- ¿Qué se quiere lograr (reducción de energía, aumento de rendimiento, ...)?
- ¿Qué variables necesitan ser controladas para lograr estos objetivos?
- ¿Qué nivel de rendimiento es necesario (precisión, velocidad, ...)?

Por el contrario, los actuadores inadecuados o pobres a menudo se encuentran en el centro de las dificultades de control. Un problema de control industrial típico generalmente implicará muchos actuadores diferentes; consulte, por ejemplo, la configuración del control de planeidad que se muestra en la figura 2.3. Fuente: (Allwood et al., 2016)

2.5.5. Comunicaciones entre sensores y actuadores.

La interconexión de sensores a actuadores implica el uso de sistemas de comunicación. Una planta típica puede tener muchos miles de señales separadas para ser enviadas a largas distancias. Por lo tanto, el diseño de sistemas de comunicación y sus protocolos asociados es un aspecto cada vez más importante de la ingeniería de control moderna. Existen problemas y requisitos especiales para los sistemas de comunicación con datos en tiempo real.

Por ejemplo, en la comunicación de voz, pequeños retrasos e imperfecciones en la transmisión a menudo no son importantes en virtud de ser transparentes para el receptor. Sin embargo, en los sistemas de control en tiempo real de alta velocidad, estos problemas podrían ser de gran importancia.

Por ejemplo, hay una tendencia creciente a usar conexiones de tipo Ethernet para la transmisión de datos bajo control. Sin embargo, como es bien sabido por aquellos familiarizados con esta tecnología, si se produce un retardo en la línea de transmisión, el transmisor simplemente lo intenta nuevamente en algún momento aleatorio posterior. Obviamente, esto introduce un retardo no determinista en la transmisión de los datos.

En conclusión, todos los sistemas de control dependen de un conocimiento preciso, no solo de lo que sucedió, sino también de cuándo sucedió, por lo que la atención a tales demoras es muy importante para el desempeño del sistema en general.

2.5.6. Dispositivos computacionales.

En los sistemas de control modernos, la conexión entre sensores y actuadores se realiza invariablemente a través de una computadora de algún tipo. Por lo tanto, los problemas informáticos son necesariamente parte del diseño general. Los sistemas de control actuales utilizan una variedad de dispositivos computacionales que incluyen DCS (Sistemas de control distribuido), PLC (controladores lógicos programables) y PC (computadoras personales).

En algunos casos, estos elementos informáticos son bastante limitados con respecto a las instalaciones que ofrecen. Al igual que con los retardos en la comunicación, los retardos computacionales pueden ser cruciales para el éxito o el fracaso en la operación de los sistemas de control. El determinismo en el tiempo es importante, por lo que puede ser necesario un sistema operativo multitarea en tiempo real.

Otro aspecto de la informática es el de la precisión numérica. Se conocen varios sistemas de control que no lograron cumplir con las especificaciones de rendimiento deseadas simplemente debido a una atención inadecuada a los problemas numéricos. Por esta razón, se dedica algo de atención a este problema en la secuela.

Una última pregunta basada en computadora en control se refiere a la facilidad de diseño e implementación. Las modernas herramientas asistidas por computadora para la creación rápida de prototipos de sistemas de control proporcionan entornos integrados para el modelado, diseño, simulación e implementación de sistemas de control. Estas imágenes de las instalaciones de código en tiempo real han permitido que los tiempos de desarrollo de los algoritmos de control avanzados se reduzcan de muchos meses a períodos del orden de días o, en algunos casos, horas.

2.5.7. Arquitecturas e Interfaces

La cuestión de qué conectar con lo que no es trivial en el diseño del sistema de control. Uno podría sentir que la mejor solución siempre sería llevar

todas las señales a un punto central, de modo que cada acción de control se base en información completa (que conduzca al denominado control centralizado). Sin embargo, esta es rara vez (si alguna vez) la mejor solución en la práctica. De hecho, hay muy buenas razones por las cuales uno podría no desear llevar todas las señales a un punto común. Las objeciones obvias a esto incluyen la complejidad, el costo, las limitaciones de tiempo en la computación, el mantenimiento y la confiabilidad.

Por lo tanto, generalmente se divide el problema de control en subsistemas manejables. Cómo se hace esto es parte del dominio del ingeniero de control. De hecho, una de las principales herramientas que un diseñador de sistemas de control puede usar para mejorar el rendimiento es ejercitar el pensamiento lateral en relación con la arquitectura del problema de control.

Como ilustración, se presenta un ejemplo real donde el rendimiento del control de espesor en un tren de laminación reversible está irrevocablemente restringido por una arquitectura particular. Se muestra que ninguna mejora en actuadores, sensores o algoritmos (dentro de esta arquitectura) puede solucionar el problema.

Sin embargo, simplemente cambiando la arquitectura para incluir actuadores adicionales (es decir, corrientes en los motores de bobinado y desenrollado), entonces la dificultad se resuelve. Como una ilustración más simple, se puede comparar la diferencia al tratar de equilibrar una escobilla en el dedo con los ojos abiertos o cerrados. Nuevamente, aquí hay una diferencia arquitectónica: esta vez es una función de los sensores disponibles.

Por lo tanto, se observa que los problemas de arquitectura son de suma importancia en los problemas de diseño de control. Otro problema arquitectónico gira en torno a la necesidad de dividir y conquistar problemas complejos. Esto conduce a una vista jerárquica del control, como se ilustra en la tabla 2.1.

Tabla 2. 1: Jerarquía de sistemas control típico.

Nivel	Descripción	Objetivos	Periodo de tiempo	Herramienta de diseño típico
4	Optimización de toda la planta.	Satisfacer los pedidos de los clientes y programar el suministro de materiales.	Todos los días	Optimización estática
3	Optimización de estado estable a nivel operativo de la unidad	Operación eficiente de una sola unidad (por ejemplo, columna de destilación)	Cada hora	Optimización estática
2	Control dinámico a nivel de operación de la unidad.	Alcanzar los puntos de ajuste especificados en el nivel 3 y lograr una recuperación rápida de las perturbaciones	Cada minuto	Control multivariable (por ejemplo, modelo de control predictivo)
1	Control dinámico a nivel de actuador único	Lograr tasas de flujo de líquido como se especifica en el nivel 2 mediante la manipulación de actuadores disponibles (por ejemplo, válvulas)	Cada segundo	Control de variable única (por ejemplo, controlador PID)

Elaborado por: Autor.

2.5.8. Algoritmos

Finalmente, se llega al verdadero corazón de la ingeniería de control: los algoritmos que conectan los sensores a los actuadores. Es demasiado fácil subestimar el aspecto final del problema. Como un simple ejemplo, se va considerar el problema de jugar tenis al más alto nivel internacional. Uno puede aceptar fácilmente que necesita una buena vista (sensores) y músculos fuertes (actuadores) para jugar tenis a este nivel, pero estos atributos no son suficientes. De hecho, la coordinación ojo-mano (es decir, control) también es crucial para el éxito. Por lo tanto, más allá de los sensores y actuadores, el ingeniero de control debe preocuparse por la ciencia de la dinámica y el control de retroalimentación. En otras palabras, los sensores proporcionan a los ojos y los actuadores el músculo, pero la ciencia de control proporciona la delicadeza.

2.5.9. Perturbaciones e incertidumbre.

Una de las cosas que hace que la ciencia del control sea interesante es que todos los sistemas de la vida real se ven afectados por el ruido y las perturbaciones externas. Estos factores pueden tener un impacto significativo

en el rendimiento del sistema. Como un ejemplo simple, los aviones están sujetos a perturbaciones en forma de ráfagas de viento, y los controladores de crucero en los automóviles tienen que hacer frente a diferentes pendientes de la carretera y diferentes cargas de automóviles. Sin embargo, se descubre que, mediante el diseño apropiado del sistema de control, se puede lograr una notable insensibilidad a las perturbaciones externas.

Otro tema relacionado es el de la incertidumbre del modelo. Todos los sistemas del mundo real tienen modelos muy complejos, pero una propiedad importante del control de retroalimentación es que a menudo se puede lograr el nivel deseado de rendimiento mediante el uso de modelos relativamente simples. Por supuesto, corresponde a los diseñadores apreciar el efecto de la incertidumbre del modelo en el rendimiento del control y decidir si la atención a un mejor modelado permitiría lograr un mejor rendimiento.

Ambas cuestiones planteadas anteriormente se abordan, en parte, por las notables propiedades de la retroalimentación.

2.6. Revisión de los principios de retroalimentación.

Esta sección delinea el camino que se ha elegido para nuestro viaje de ingeniería de control. En particular, esta sección contiene:

- un ejemplo de motivación industrial
- un estado de la naturaleza fundamental del problema de control,
- la idea de la inversión como ingrediente central para resolver problemas de control, y
- evolución de la inversión de bucle abierto a las soluciones de retroalimentación de bucle cerrado.

2.7. El objetivo principal del control

Abundan los ejemplos de sistemas dinámicos con controladores automáticos: los controladores de procesos avanzados operan prácticamente en todos los dominios industriales; los microcontroladores impregnan una inmensa variedad de productos electrónicos domésticos y entretenimiento;

Los termostatos regulan las temperaturas en hornos de tamaño doméstico a industrial, y los pilotos de control automático de aeronaves.

El diseño de cualquiera de estos sistemas requiere la estrecha cooperación de expertos de diversas disciplinas. Para particularizar el objetivo principal de la ingeniería de control dentro de este esfuerzo de equipo, es útil distinguir entre la realización tangible de un sistema y su comportamiento. La realización física del avión, por ejemplo, incluye fuselaje, alas y alerones. Su comportamiento, por otro lado, se refiere a la respuesta dinámica de la aeronave a un cambio en la posición del acelerador, alerón o aleta.

Para controlar un sistema de este tipo automáticamente, es necesario interconectar el sistema con un controlador, que también tendrá una realización y un comportamiento físico. Dependiendo de la aplicación, el controlador puede realizarse en un chip, electrónica analógica, un PLC o una computadora. También debe existir un canal por el cual el controlador y el sistema puedan interactuar a través de sensores y actuadores: sensores para informar el estado del sistema, actuadores como un medio para que el controlador actúe en el sistema.

Con este proceso y la infraestructura de control en su lugar, la pregunta clave restante se refiere al comportamiento del controlador. En la aplicación de la aeronave, por ejemplo, si el controlador (aquí llamado piloto automático) detecta una desviación en la velocidad, altura o rumbo a través de los sensores, ¿cómo debería ordenarle al acelerador y a los alerones que vuelvan al objetivo?

Esta es la principal preocupación del ingeniero de control o, en términos generales, el objetivo fundamental de la ingeniería de control es encontrar formas factibles técnica, ambiental y económicamente de actuar en los sistemas para controlar sus salidas a los valores deseados, asegurando así un nivel deseado de actuación. Como se discutió anteriormente, encontrar una buena solución a esta pregunta con frecuencia requiere una participación en

el diseño del proceso, la selección del actuador y el sensor, el análisis matemático y el modelado.

La perspectiva del ingeniero de control sobre el ejemplo de navegación de la aeronave descrito anteriormente incluye una dependencia cíclica: los comandos del piloto automático afectan a la aeronave, cuya velocidad, altura y rumbo cambiados a su vez afectan las acciones posteriores del piloto automático. Tal interacción cíclicamente dependiente entre los comportamientos del sistema se llama retroalimentación.

Los fenómenos de retroalimentación existen tanto en la naturaleza como en la tecnología. El crecimiento periódico de la población y la reducción en las famosas interacciones depredador y presa son un ejemplo de retroalimentación que ocurre en la naturaleza. El silbido agudo que se produce como resultado de la interacción entre micrófonos y altavoces en una sala de conciertos es un ejemplo técnico de retroalimentación.

En ambos casos, ninguno de los dos sistemas que interactúan puede designarse claramente como controlador o proceso; son simplemente dos sistemas que interactúan en retroalimentación. Sin embargo, se considera que la interacción de retroalimentación tiene un profundo impacto en el comportamiento de los sistemas comprometidos. Este efecto de retroalimentación que altera el comportamiento es un mecanismo clave que los ingenieros de control explotan deliberadamente para lograr el objetivo de actuar en un sistema para garantizar que se logren las especificaciones de rendimiento deseadas.

2.8. Motivador ejemplo industrial.

Para hacer la discusión general anterior más concreta, a continuación, se presenta un ejemplo simplificado, pero esencialmente auténtico, de un problema de control industrial. El ejemplo, tomado de la industria del acero, es de una naturaleza particular; sin embargo, los elementos principales para especificar un comportamiento deseado, el modelado y la necesidad de decisiones de compensación son genéricos. Es posible que algunos detalles

del ejemplo no estén del todo claros en esta etapa inicial, pero establecerán el escenario para el trabajo futuro.

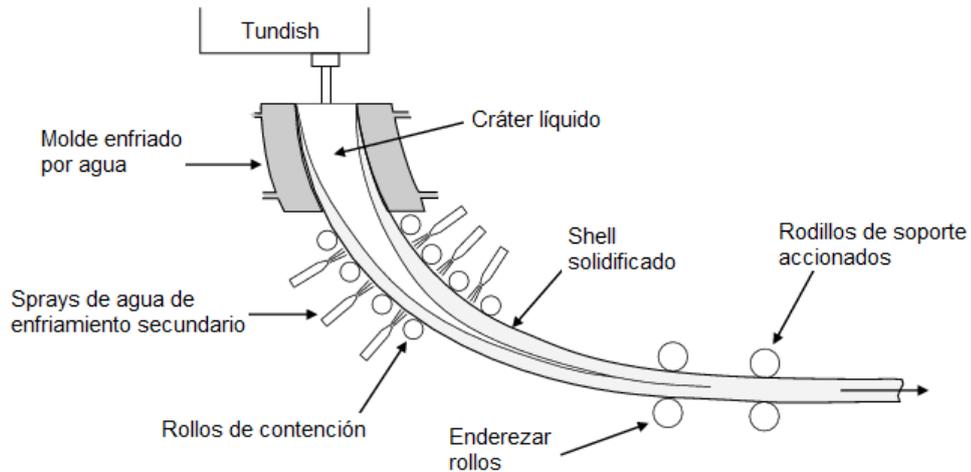


Figura 2. 4: Esquema de proceso de una ruedecilla industrial
Fuente: (Buschow, 2001)

Uno de los productos de la industria del acero es la llamada floración, que es una losa rectangular de acero. Las floraciones se producen en un proceso llamado lanzador continuo. La figura 2.4 muestra el diagrama de un lanzador de floración industrial. Los componentes principales de dicho sistema relevantes aquí se muestran en la figura 2.5. Puede encontrar una fotografía de un lanzador de flores en la página web.

La artesa puede considerarse como un contenedor grande que actúa como un depósito para el acero fundido. Una válvula de control regula la velocidad de flujo del acero que ingresa al molde montado debajo de la artesa. El molde, cuya área de sección transversal es igual al área de sección transversal de la floración deseada, está abierto desde arriba y desde abajo. Por enfriamiento intenso, el acero en el molde se enfría a un estado semisólido. En este estado, es lo suficientemente firme como para que la hebra pueda retirarse continuamente del molde mediante rodillos. El hilo continuo resultante se somete a un enfriamiento adicional y finalmente se corta en floraciones.

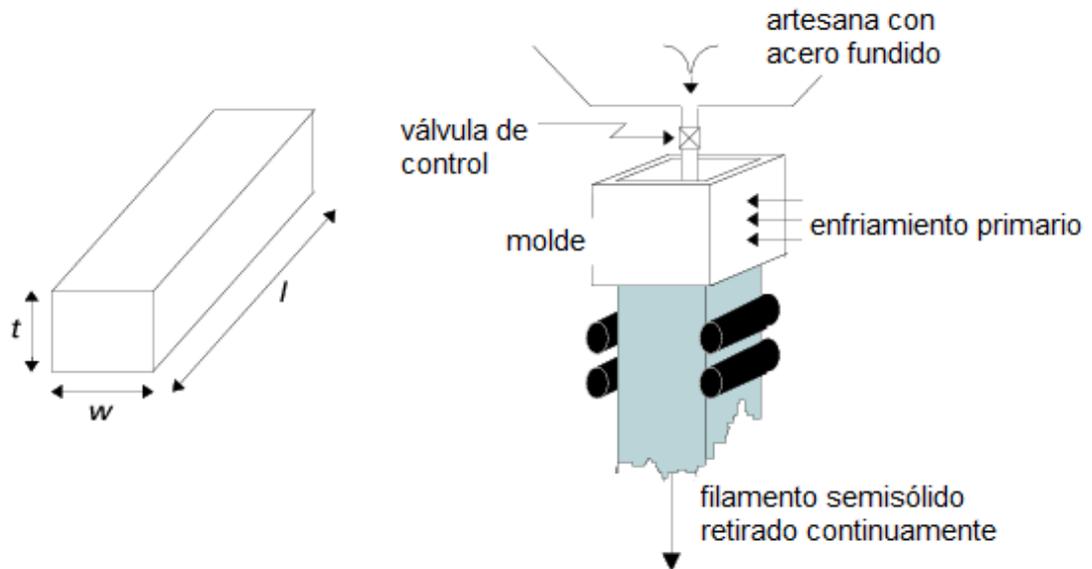


Figura 2. 5: Lanzador continuo: floración típica (izquierda) y diagrama simplificado (derecha)

Fuente: (Buschow, 2001)

2.8.1. Especificaciones de rendimiento

Hay dos especificaciones fundamentales para el rendimiento: seguridad y rentabilidad. Estos requisitos finales pueden desglosarse aún más para derivar una especificación del sistema de control que cuantifique el objetivo que debe cumplir el diseño del controlador.

- Seguridad: en este ejemplo, el requisito de seguridad se traduce de manera bastante directa en una restricción del nivel de acero fundido en el molde (denominado nivel de molde). Claramente, el nivel del molde nunca debe estar en peligro de desbordarse o vaciarse, ya que cualquiera de los casos provocaría derrames de metal fundido, con consecuencias desastrosas.
- Rentabilidad: Obviamente, el sistema necesita ser operado de manera rentable. Los aspectos que contribuyen a este requisito incluyen los siguientes:
 - Calidad del producto: Resulta que los cambios de alta frecuencia en el nivel del molde reducen la calidad de floración, porque el metal fundido tiene una viscosidad similar a la del agua, y la turbulencia mezcla impurezas en el acero. Además, debido al enfriamiento aplicado al molde, un nivel de molde oscilante da

como resultado un enfriamiento desigual del acero, lo que también reduce su calidad. Por lo tanto, la calidad del producto exige un control constante del nivel del molde.

- Mantenimiento: a través de una reacción oxidante, la boquilla a través de la cual el metal fluye hacia el molde está sujeta a un desgaste intenso a nivel del molde. Por lo tanto, la vida útil de la boquilla se maximiza si se controla el nivel del molde de manera que se desplace lentamente a través de la banda de desgaste de la boquilla. Los costos de mantenimiento se reducen aún más si la vida útil de la válvula de control se maximiza al tener acciones de control relativamente no agresivas. Por lo tanto, mantener el costo de mantenimiento bajo requiere una regulación constante en torno a un punto de ajuste que atraviesa lentamente la banda de desgaste de la boquilla y evita movimientos agresivos de la válvula.
- Rendimiento: el rendimiento es una función directa de la velocidad de lanzamiento. Sin embargo, la velocidad de fundición también es una función de numerosos factores del proceso aguas arriba (disponibilidad de los grados necesarios de materia prima, capacidad del horno, etc.), así como de factores aguas abajo (demanda del producto, capacidad de envío, etc.). Por lo tanto, el sistema de control de nivel de molde debe mantener el rendimiento a todas las velocidades de fundición para evitar ser un factor limitante en la operación general del proceso.

2.8.2. Modelado de sistemas de control.

Para avanzar en el problema de diseño del sistema de control como se establece anteriormente, primero es necesario comprender cómo funciona el proceso. Esta comprensión generalmente se expresa en la forma de un modelo matemático que describe el estado estable y el comportamiento dinámico del proceso. Para construir dicho modelo, primero se definen las variables de proceso relevantes, las cuales son:

h^* : Nivel ordenado de acero en molde

$h(t)$: Nivel real de acero en molde

$v(t)$: Velocidad de fundición

$q_{in}(t)$: Entrada de materia al molde

$q_{out}(t)$: Salida de materia del molde.

La física sugiere que el nivel del molde será proporcional a la integral de la diferencia entre la entrada y la salida sea:

$$h(t) = \int_{-\infty}^t (q_{in}(\tau) - q_{out}(\tau)) d\tau$$

Donde se asume una sección transversal de la unidad del molde por simplicidad. También se asume, nuevamente por simplicidad, que las mediciones de la posición de la válvula, $v(t)$ y la velocidad de lanzamiento $\sigma(t)$, están calibrados de modo que realmente indiquen las entradas y salidas correspondientes:

$$v(t) = q_{in}(t)$$

$$\sigma(t) = q_{out}(t)$$

Por lo tanto, el modelo de proceso se convierte en

$$h(t) = \int_{-\infty}^t (v(\tau) - \sigma(\tau)) d\tau$$

La velocidad de fundición se puede medir con bastante precisión, pero los sensores de nivel de molde suelen ser propensos al ruido de medición de alta frecuencia, que se debe tener en cuenta al introducir una señal espuria aditiva $n(t)$:

$$h_m(t) = h(t) + n(t)$$

Donde $h_m(t)$ es la medida de $h(t)$ corrompida por el ruido. En la figura 2.6 se muestra un diagrama de bloques del modelo de proceso general y las mediciones. Esta muestra un modelo muy simple, pero captura la esencia del problema.

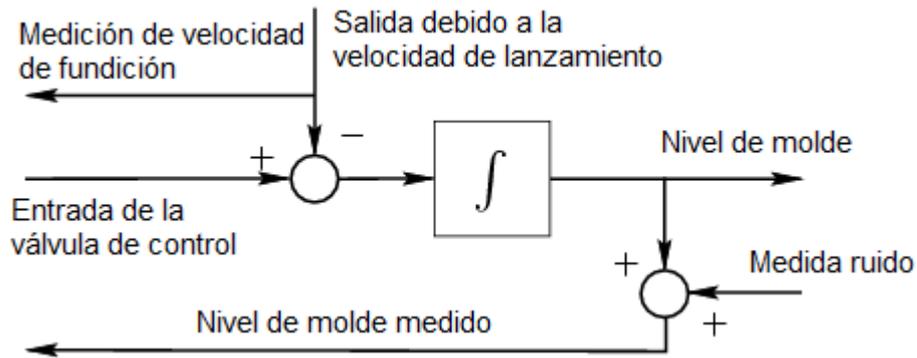


Figura 2. 6: Diagrama de bloques de la dinámica simplificada de nivel de molde, sensores y actuador
Elaborado por: Autor.

2.8.3. Control de retroalimentación y preventiva.

Más adelante se encuentra que la idea central en el control es la de la inversión. Además, la inversión se puede lograr convenientemente mediante el uso de dos mecanismos clave (a saber, retroalimentación y preventivo). Estas herramientas ofrecen una solución elegante y robusta a muchos problemas de diseño de control. En el contexto del control de nivel de molde, el controlador de retroalimentación más simple es una ganancia constante, K impulsando la válvula proporcionalmente al error entre el nivel de molde ordenado, h^* , y la medición del nivel de molde real $h_m(t)$:

$$v(t) = K(h^* - h_m(t))$$

Para anticipar cómo podría funcionar un controlador de esta forma, se observa que primero debe producirse una desviación entre el punto de ajuste y la medición antes de que el controlador pueda reaccionar. Sin embargo, se sabe que un cambio en la velocidad de fundición requiere un punto de operación modificado para la válvula. Por lo tanto, en lugar de permitir que ocurra un cambio en la velocidad de fundición, lo que conduce a un error en el nivel de molde al que reacciona el controlador de retroalimentación, para lo cual se puede mejorar la estrategia cambiando la posición de la válvula de manera proactiva. Esto se llama feedforward (preventivo). Esto lleva a un controlador final de la forma:

$$v(t) = K \left([h^* - h_m(t)] + \left[\frac{1}{K} \sigma(t) \right] \right)$$

Tenga en cuenta que este controlador presenta retroalimentación conjunta y una acción preventiva (feedforward). En particular, el segundo término proporciona la acción predecible necesaria para compensar los cambios en la velocidad de lanzamiento, mientras que el primer término reacciona al error restante. La figura 2.7 muestra el diagrama de bloques para el sistema de control final.

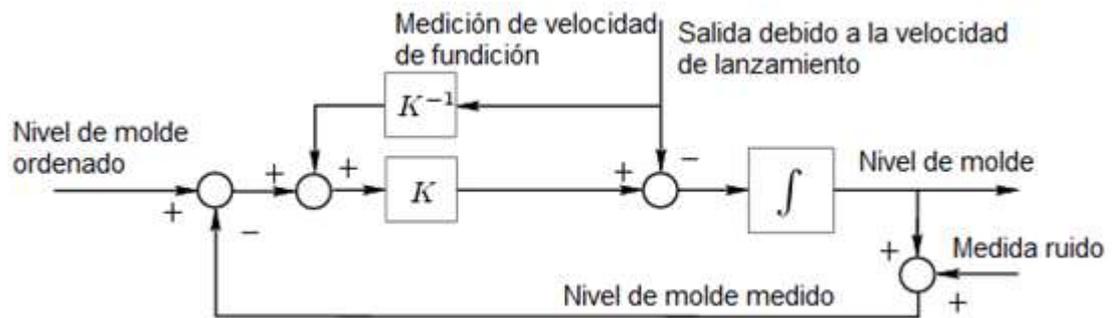


Figura 2. 7: Modelo del control de nivel de molde simplificado con compensación de avance para la velocidad de fundición
Elaborado por: Autor.

2.8.4. Indicador de compensaciones

Al simular el rendimiento del bucle de control anterior para $K=1$ (véase la figura 2.8), se encuentra que la ganancia más pequeña del controlador ($K=1$) resulta en una respuesta más lenta a un cambio en el punto de ajuste del nivel de molde. Por otro lado, la mayor ganancia del controlador ($K=5$) da como resultado una respuesta más rápida, pero también aumenta los efectos del ruido como se ve por el control de nivel menos constante y por los movimientos de la válvula significativamente más agresivos.

Por lo tanto, los requisitos de rendimiento derivados parecen estar en conflicto entre sí, al menos en cierto grado. En este punto, un ingeniero de control que no tenga una formación sistemática en el diseño del sistema de control tendría dificultades para evaluar si este conflicto es simplemente una consecuencia de tener un controlador tan simple o si es fundamental. ¿Cuánto esfuerzo se debe gastar en encontrar un buen valor para K ? ¿Se debe elegir un controlador más complejo? ¿Debería gastarse más esfuerzo en modelar el proceso a nivel de molde?

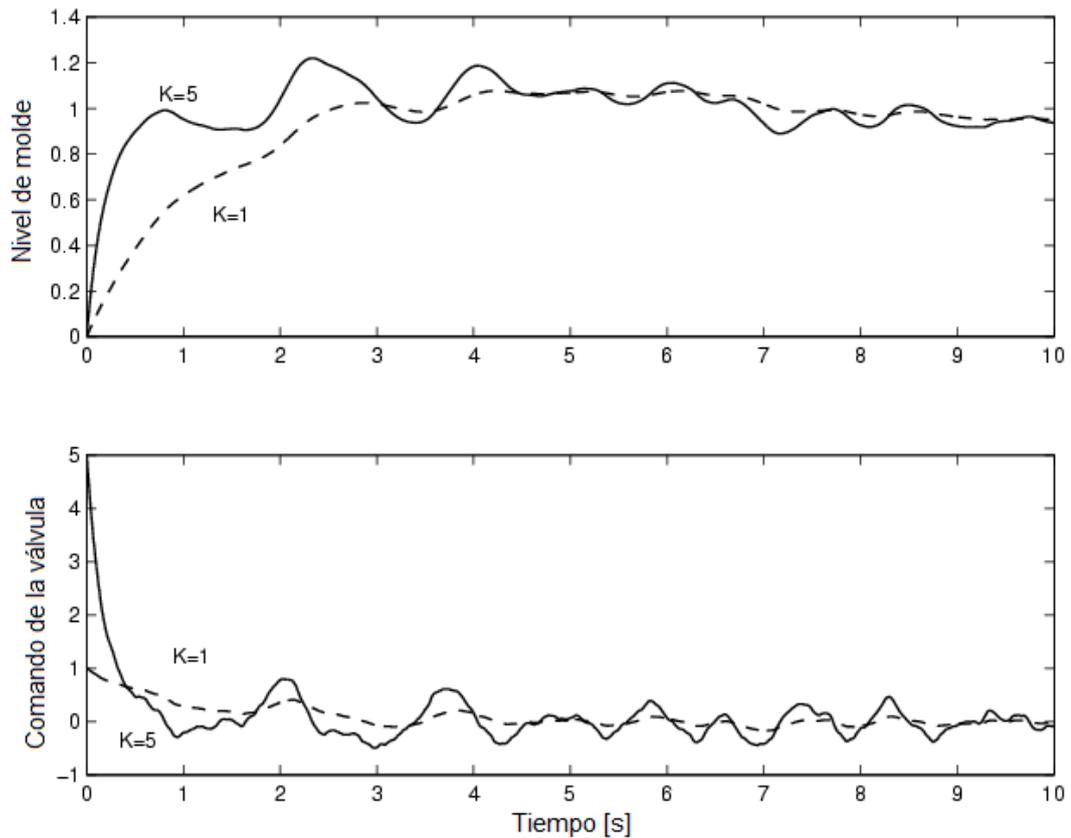


Figura 2. 8: Indicador de compensaciones: mayor capacidad de respuesta a los cambios del punto de ajuste también aumenta la sensibilidad al ruido de medición y al desgaste del actuador.

Elaborado por: Autor.

2.9. El problema fundamental del control.

El problema central en el control es encontrar una manera técnicamente factible de actuar en un proceso dado para que el proceso se adhiera, lo más cerca posible a algún comportamiento deseado. Además, este comportamiento aproximado debe lograrse ante la incertidumbre del proceso y ante la presencia de perturbaciones externas incontrolables que actúan sobre el proceso. La definición anterior introduce varias ideas:

- **Comportamiento deseado:** esto debe especificarse como parte del problema de diseño.
- **Factibilidad:** esto significa que la solución debe satisfacer varias limitaciones, que pueden ser de naturaleza técnica, ambiental, económica u otra.
- **Incetidumbre:** el conocimiento disponible sobre un sistema generalmente será limitado y de precisión limitada.

- **Acción:** la solución requiere que la acción se aplique de alguna manera al proceso, generalmente a través de una o más variables manipuladas que controlan los actuadores.
- **Disturbios:** el proceso que se controlará generalmente tendrá entradas distintas de las que manipula el controlador. Estas otras entradas se llaman perturbaciones.
- **Comportamiento aproximado:** una solución factible rara vez será perfecta. Habrá invariablemente un grado de aproximación para lograr el objetivo especificado.
- **Mediciones:** estos son cruciales para que el controlador sepa qué está haciendo realmente el sistema y cómo lo afectan las perturbaciones inevitables.

2.10. Solución prototipo al problema de control a través de Inversión

Una manera particularmente simple, pero perspicaz de pensar sobre los problemas de control es a través de la inversión. Para describir esta idea, se argumenta lo siguiente:

- Asumir que se conoce qué efecto produce una acción en la entrada de un sistema en la salida, y
- Asumir que se tiene un comportamiento deseado para la salida del sistema; entonces uno simplemente necesita invertir la relación entre entrada y salida para determinar qué acción de entrada es necesaria para lograr el comportamiento de salida deseado.

A pesar de la aparente ingenuidad de este argumento, sus ramificaciones embellecidas juegan un papel profundo en el diseño del sistema de control. En particular, la mayoría de las dificultades del control en el mundo real se relacionan con la búsqueda de una estrategia que capture la intención de la idea de inversión anterior, al tiempo que respeta una miríada de otras consideraciones, como la insensibilidad a los errores del modelo, las perturbaciones y el ruido de medición.

Para ser más específicos, suponer que el comportamiento requerido está especificado por una señal objetivo escalar o referencia $r(t)$, que tiene una perturbación aditiva $d(t)$. También, se tiene disponible una sola variable manipulada $u(t)$. Se denota por $y(t)$ como una función de tiempo: $y = \{y(t): t \in \mathbb{R}\}$.

Al describir la solución prototipo para el problema de control a continuación, se hará un desarrollo bastante general que, en principio, puede aplicarse a los sistemas dinámicos no lineales generales. En particular, se usa una función, $f(\cdot)$ para denotar un operador que asigna un espacio de función a otro. Para permitir esta interpretación general, se presenta la siguiente notación:

El símbolo y (sin corchetes) denotará un elemento de un espacio de funciones:

$y \triangleq \{y(t): \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}\}$. Un operador, $f(\cdot)$ representará una asignación de un espacio de funciones, es decir, x , en x .

Lo que se sugiere es que simplemente se interprete a “ f ” como una ganancia lineal estática que vincula un número real, la entrada “ u ” con otro número real, la salida “ y ”. En una lectura posterior, se puede utilizar la interpretación más general, utilizando operadores dinámicos no lineales. También, se supone (por razones de argumento) que la salida está relacionada con la entrada por una relación funcional conocida de la forma:

$$y = f(u) + d$$

Donde “ f ” es una transformación o mapeo (posiblemente dinámico) que describe las relaciones de entrada-salida en la planta 1. El problema de control requiere que se encuentre una forma de generar $y = r$. En el espíritu de inversión, un enfoque directo, aunque algo ingenuo, para obtener una solución sería establecer

$$y = r = f(u) + d$$

De donde se podría derivar una ley de control, que es:

$$u = f^{-1}(r - d)$$

Esta idea se ilustra en la figura 2.9.

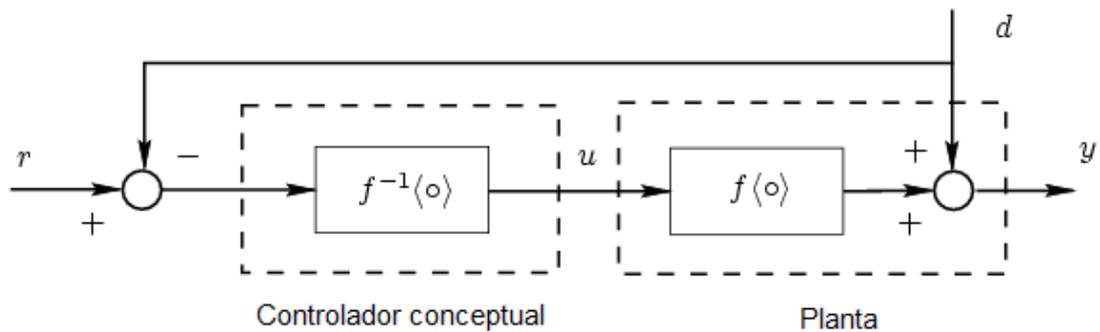


Figura 2. 9: Controlador conceptual
Elaborado por: Autor.

Esta es una solución conceptual al problema. Sin embargo, un poco de reflexión indica que la respuesta dada presupone ciertos requisitos estrictos para su éxito. Por ejemplo, la inspección de las ecuaciones de esta subsección sugiere los siguientes requisitos:

R1, la transformación f claramente necesita describir la planta.

R2, la transformación f debe estar bien formulada en el sentido de que se produce una salida limitada cuando “ u ” está limitada; entonces se dice que la transformación es estable.

R3, el inverso f^{-1} también debe estar bien formulado en el sentido utilizado en R2.

R4, la perturbación debe ser medible, para que sea computable.

R5, la acción resultante “ u ” debe ser realizable y no debe violar ninguna restricción.

Por supuesto, estos son requisitos muy exigentes. Por lo tanto, una parte importante de la teoría del control automático trata el tema de cómo cambiar la arquitectura de control para que se logre la inversión, pero de una manera más sólida y para que los estrictos requisitos establecidos anteriormente se puedan relajar.

2.11. Retroalimentación e inversión de alta ganancia.

Los modelos típicos utilizados para describir plantas reales no pueden invertirse exactamente. Sin embargo, a continuación, se muestra que existe una propiedad bastante intrigante de la retroalimentación que genera implícitamente un inverso aproximado de las transformaciones dinámicas, sin que las inversiones tengan que realizarse explícitamente. (Smith & Corripio, 2006)

Para desarrollar esta idea, se reemplaza el controlador conceptual que se muestra en la figura 2.10 por la realización que se muestra en la figura 2.11. Como antes, f representa el modelo de proceso. La transformación h se describirá más adelante.

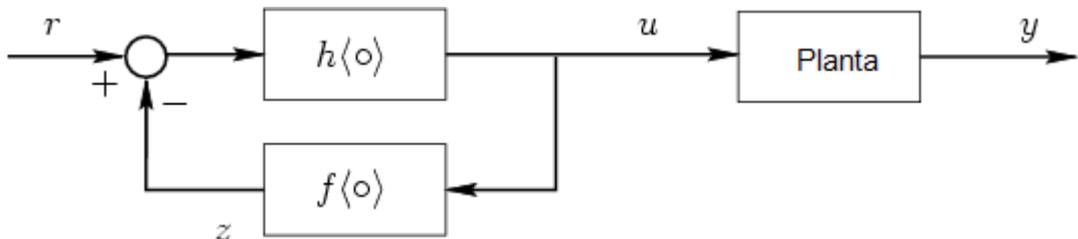


Figura 2. 10: Realización del controlador conceptual.

Fuente: (FIUBA, 2007)

r, u, y pueden interpretarse como números reales, y $h(\circ), f(\circ)$ son ganancias lineales escalares, en una primera lectura. En una segunda lectura, se les puede dar la interpretación general no lineal. De la figura 2.11, se tiene que:

$$u = h(r - z) = h(u)$$

Así,

$$h^{-1}(u) = r - f(u)$$

De donde finalmente se obtiene:

$$u = f^{-1}(r - h^{-1}(u))$$

La ecuación anterior sugiere que el bucle en la figura 2.10 implementa un inverso aproximado de $f(\circ)$, es decir, $u = f(r)$ si

$$r - h^{-1}(u) \approx r$$

Se observa que esto se logra si h^{-1} es pequeño, es decir, si h es una transformación de alta ganancia. Por lo tanto, si f caracteriza nuestro conocimiento de la planta y si h es una transformación de alta ganancia, entonces la arquitectura ilustrada en la figura 2.10 construye efectivamente un inverso aproximado para el modelo de la planta sin requerir que el modelo de la planta, f se invierta explícitamente. A continuación, se ilustra esta idea con un ejemplo, suponga que el modelo puede describir una planta

$$\frac{dy(t)}{dt} + 2\sqrt{y(t)} = u(t)$$

Y que se requiere una ley de control para garantizar que $y(t)$ siga una referencia que varía lentamente.

Una forma de resolver este problema es construir un inverso para el modelo que sea válido en la región de baja frecuencia. Usando la arquitectura en la figura 2.10, se obtiene un inverso aproximado, siempre que $h(\omega)$ tiene gran ganancia en la región de baja frecuencia. Una solución simple es elegir $h(\omega)$ para ser un integrador que tiene ganancia infinita a frecuencia cero. La salida del controlador se alimenta a la planta. El resultado se ilustra en la figura 2.11, que muestra la referencia y los resultados de la planta.

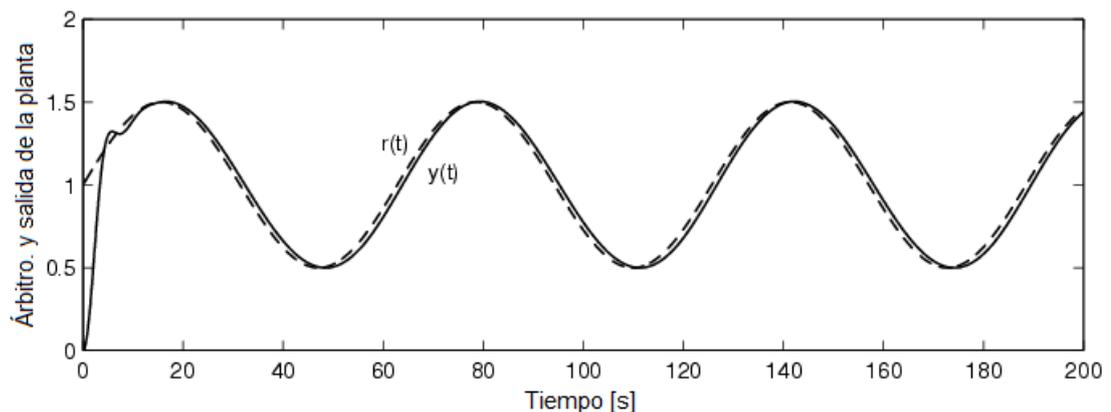


Figura 2. 11: Control de nivel de tanque mediante inversión aproximada

Fuente: (FIUBA, 2007)

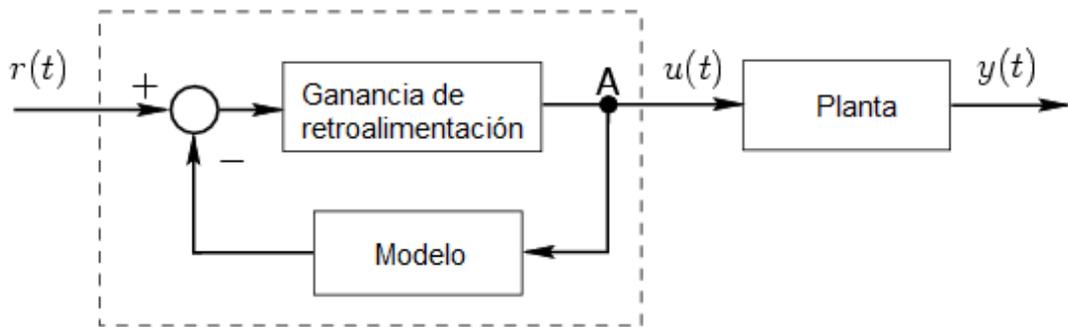
2.12. Arquitecturas de circuito abierto a circuito cerrado.

Se ha sugerido un esquema particular en la figura 2.12 para realizar un inverso aproximado de un modelo de planta. Aunque el controlador en este esquema se implementa como un sistema de retroalimentación, el control se

aplica realmente a la planta en circuito abierto. En particular, se observa que la señal de control $u(t)$ es independiente de lo que realmente está sucediendo en la planta. Este es un inconveniente grave, porque la metodología no conducirá a una solución satisfactoria al problema de control a menos que

- el modelo en el que se ha basado el diseño del controlador es una muy buena representación de la planta.
- el modelo y su inverso son estables, y
- las perturbaciones y las condiciones iniciales son insignificantes.

Por lo tanto, se está motivado para encontrar una solución alternativa al problema, una que conserve las características claves pero que no sufra el inconveniente anterior. De hecho, esto es posible cambiando ligeramente el esquema para que la retroalimentación se coloque alrededor de la planta en lugar de alrededor del modelo. Para desarrollar esta idea, se inicia con la estructura básica de retroalimentación tal como se ilustra en la figura 2.12.



Controlador de circuito abierto

Figura 2. 12: Control de bucle abierto con inverso incorporado
Fuente: (FIUBA, 2007)

Por el momento, el modelo de la figura 2.12 es perfecto, entonces se puede reorganizar el diagrama para obtener el esquema alternativo que se muestra en la figura 2.13.

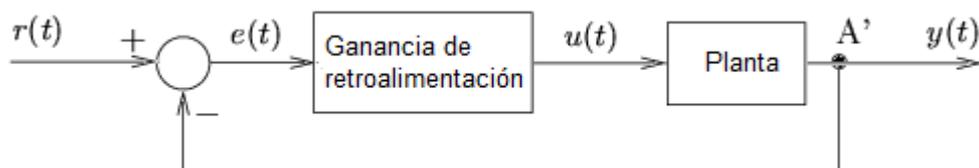


Figura 2. 13: Control de circuito cerrado
Fuente: (FIUBA, 2007)

Este esquema, que se ha derivado de una arquitectura de bucle abierto, es la base del control de retroalimentación. La característica clave de este esquema es que la salida del controlador depende no solo de los datos a priori proporcionados por el modelo, sino también de lo que realmente sucede en la salida de la planta en cada instante. Tiene otras características interesantes, que se analizan en detalle a continuación. Sin embargo, en este punto, valdrá la pena llevar a cabo una discusión inicial de las similitudes y diferencias entre las arquitecturas de bucle abierto y cerrado de los tipos que se mostraron en las figuras 2.12 y 2.13.

- Lo primero que hay que tener en cuenta es que, siempre que el modelo represente la planta y que todas las señales estén limitadas (es decir, el bucle es estable), los esquemas son equivalentes con respecto a la relación entre $r(t)$ e $y(t)$. Las diferencias clave se deben a perturbaciones y diferentes condiciones iniciales.
- En el esquema de control de lazo abierto, el controlador incorpora retroalimentación internamente: una señal en el punto A se retroalimenta. En el control de circuito cerrado, la señal en A se retroalimenta. La diferencia fundamental es que, en el primer caso, todo sucede dentro del controlador, ya sea en una computadora o en alguna conexión de hardware externo. En el segundo caso, la señal de retroalimentación es una variable de proceso: los dispositivos de medición se utilizan para determinar lo que realmente está sucediendo.

2.13. Compromisos involucrados en la elección de la ganancia de retroalimentación

Las ideas preliminares de las dos secciones anteriores parecen implicar que todo lo que se necesita para generar un controlador es colocar comentarios de alta ganancia en la planta. Esto es cierto hasta ahora. Sin embargo, nada en la vida es gratuito, y esto también se aplica al uso de comentarios de alta ganancia. Por ejemplo, si una perturbación de la planta conduce a un error distinto de cero, $e(t)$, en la figura 2.13, entonces la retroalimentación de alta ganancia dará como resultado una acción de control muy grande, $u(t)$. Esto podría estar fuera del rango de entrada disponible y, por lo tanto, invalidar la solución.

Otro problema potencial con la retroalimentación de alta ganancia es que a menudo se acompaña del riesgo muy sustancial de inestabilidad. La inestabilidad se caracteriza por oscilaciones auto sostenibles (o crecientes). A modo de ilustración, probablemente habrá presenciado el silbido de tono agudo que se escucha cuando un altavoz se coloca demasiado cerca de un micrófono. Esta es una manifestación de inestabilidad como resultado de una ganancia de retroalimentación excesiva. Las trágicas manifestaciones de inestabilidad incluyen los accidentes aéreos y el desastre Chernobyl, en el que ocurrió una condición desbocada.

Otra desventaja potencial de alta ganancia de bucle es que al aumentar la ganancia del controlador conduce a una mayor sensibilidad al ruido de medición. En resumen, la ganancia de bucle alta es deseable desde muchas perspectivas, pero no es deseable cuando se ve desde otras perspectivas. Por lo tanto, al elegir la ganancia de retroalimentación, uno debe hacer una compensación consciente entre los temas en competencia. La discusión previa se puede resumir en la siguiente declaración. La alta ganancia de bucle da una inversión aproximada, que es la esencia del control. Sin embargo, en la práctica, la elección de la ganancia de retroalimentación es parte de una compleja red de compensaciones de diseño. Comprender y equilibrar estas compensaciones es la esencia del diseño del sistema de control.

2.14. Mediciones

Se ha visto que uno de los problemas clave en el control de retroalimentación es que deben existir mediciones adecuadas para retroalimentar. De hecho, si uno puede medir una variable, entonces hay una buena posibilidad de que pueda diseñar un controlador para llevarlo al valor de referencia deseado.

En la figura 2.14 se muestra una descripción más precisa del circuito de control de retroalimentación, incluidos los sensores. De esta figura, se puede ver que lo que realmente se controla es el valor medido en lugar de la salida real. Estos pueden ser muy diferentes.

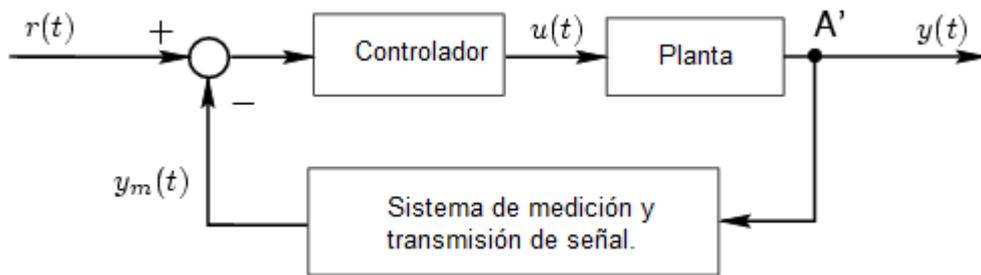


Figura 2. 14: Control de circuito cerrado con sensores.
Fuente: (FIUBA, 2007)

Por lo tanto, el sistema de medición idealmente debería satisfacer requisitos como los siguientes:

- Confiabilidad. Debe funcionar dentro del rango necesario.
- Exactitud. Para una variable con un valor constante, la medición debe establecerse en el valor correcto.
- Sensibilidad. Si la variable cambia, la medición debería poder seguir los cambios. Las mediciones de respuesta lenta no solo pueden afectar la calidad del control, sino que también pueden hacer que el ciclo de retroalimentación sea inestable. La inestabilidad del bucle puede surgir, aunque el bucle haya sido diseñado para ser estable para la medición exacta de la variable del proceso.
- Inmunidad al ruido. El sistema de medición, incluida la ruta de transmisión, no debe verse afectado significativamente por señales exógenas, como el ruido de medición.
- Linealidad. Si el sistema de medición no es lineal, se debe conocer al menos la no linealidad, de modo que pueda compensarse.
- Medida no intrusiva. El dispositivo de medición no debe afectar significativamente el comportamiento de la planta.

En la mayoría de las secuelas, se asume que el sistema de medición es lo suficientemente bueno, de modo que solo se debe tener en cuenta el ruido de medición. Este bucle de medición ideal se conocerá como un bucle de retroalimentación de unidad.

2.15. Resumen

- El control se preocupa por encontrar formas factibles desde el punto de vista técnico, ambiental y comercial de un sistema tecnológico para controlar sus resultados a los valores deseados mientras se garantiza un nivel de rendimiento deseado.
- Fundamental para la ingeniería de control es el concepto de inversión.
- La inversión se puede lograr mediante una arquitectura de retroalimentación.
- La retroalimentación se refiere a un ciclo iterativo de
 - cuantificar el comportamiento deseado,
 - medir los valores reales de las variables relevantes del sistema por sensores,
 - deduciendo el estado real del sistema a partir de las mediciones,
 - comparando el estado inferido con el estado deseado,
 - calcular una acción correctiva para llevar el sistema real al estado deseado,
 - aplicando la acción correctiva al sistema a través de actuadores, y luego
 - repitiendo los pasos anteriores.
- Los componentes principales en un ciclo de retroalimentación se muestran en la figura 2.15.
- El rendimiento deseado generalmente se cuantifica en las siguientes bases:
 - precisión con la que las salidas deberían alcanzar los valores deseados;
 - nivel de tolerancia requerido a supuestos inexactos, perturbaciones y cambios en la planta;
 - especificación de transitorios;
 - limitaciones en la aceleración, sobre impulso, consumo de energía, etc.

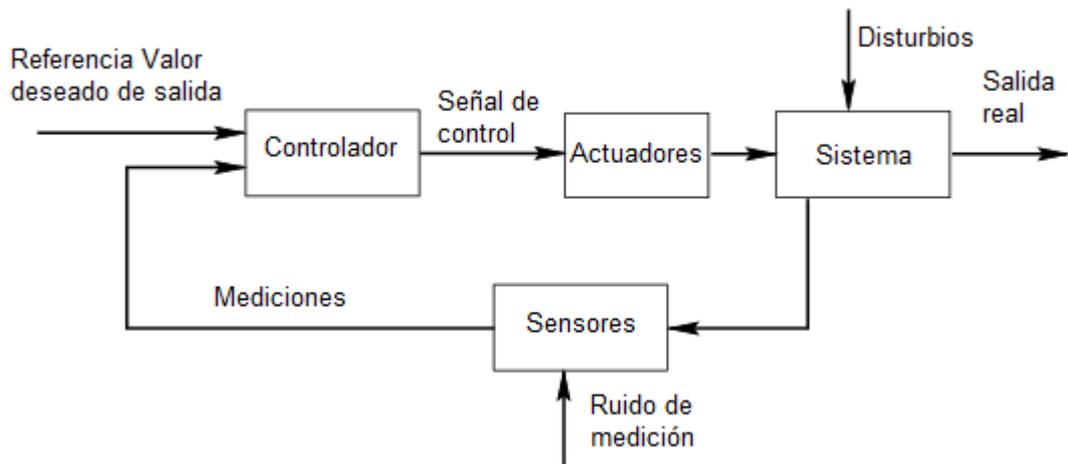


Figura 2. 15: Bucle de retroalimentación típico
Fuente: (FIUBA, 2007)

- Los objetivos del sistema de control generalmente incluyen lo siguiente:
 - Maximización del rendimiento, velocidad, seguridad de rendimiento y más;
 - maximización del rendimiento, velocidad, seguridad de rendimiento y más;
 - disminuyendo el impacto de las perturbaciones, la incertidumbre del ruido, las variaciones de tiempo, etc.
- El capítulo da una primera indicación de que los objetivos de rendimiento deseados generalmente están en conflicto entre sí y, por lo tanto, forman una red de compensaciones.
- Por diseño del sistema de control se entiende el proceso de:
 - comprender la red de compensación,
 - tomar decisiones deliberadas de diseño consistentes con estas compensaciones, y
 - ser capaz de traducir sistemáticamente el objetivo elegido en un controlador.

Capítulo 3: Desarrollo de la propuesta.

El presente capítulo utiliza la herramienta de simulación LabView y la tarjeta DAQ (para adquisición de datos).

3.1. Explicación de la aportación del trabajo de titulación.

En las siguientes secciones se desarrollan dos aplicaciones prácticas para sistemas de control de supervisión, control, y adquisición de datos (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA) para controles eléctricos utilizando la herramienta de simulación LabView y del equipo de adquisición de datos DAQ de National Instrument.

La primera aplicación práctica, consiste en realizar el control eléctrico de un banco de pruebas a escala (diseño realizado para pruebas del sistema SCADA) utilizando la plataforma de simulación LabView y del dispositivo de adquisición de datos. La segunda aplicación práctica, consiste en realizar un tipo de arranque estrella-delta mediante el mismo banco de pruebas, pero para ver el comportamiento de la etapa de transición.

3.2. Diseño de aplicación 1: control eléctrico mediante instrumentos virtuales (LabView) y tarjeta de adquisición de datos DAQ 6009.

Esta sección describe la parte práctica del uso de la plataforma de simulación LabView y del equipo de adquisición de datos (DAQ) ambos de National Instruments (NI). A continuación, se describen los procesos a seguir:

3.2.1. Objetivos de la práctica de aplicación 1:

Objetivo General:

Realizar la adquisición de datos entre la DAQ 6009 y Labview

Objetivo Específico:

- Realizar la configuración de las I/O para su uso en circuitos de control
- Establecer comunicación entre la PC y DAQ 6009
- Crear una interfaz gráfica para control y monitoreo de I/O

3.2.2. Recursos:

- Módulo de adquisición de datos DAQ 6009
- Banco de Pruebas para sistemas de control Industrial
- Computadora
- Cable USB
- Software Labview 2017
- Módulo Relé de 4 canales

3.2.3. Tiempo estimado:

La práctica tiene un tiempo de resolución de 2 horas

3.2.4. Procedimiento:

Paso 1:

El NI-DAQmx es una herramienta de LabView la cual ayuda a la adquisición de señales o datos del equipo DAQ 6008 (véase la figura 3.1) mediante las tarjetas de control utilizando puertos digitales y analógicos.



Figura 3. 1: Dispositivo de adquisición de datos de National Instrument.
Elaborado por: Autor

Paso 2:

En el software LabView se pueden crear instrumentos virtuales (Virtual Instrument, VI), y también para la configuración de la interfaz de visualización de datos o panel frontal y los diagramas de bloques para la adquisición de datos, tal como se muestra en la figura 3.2.

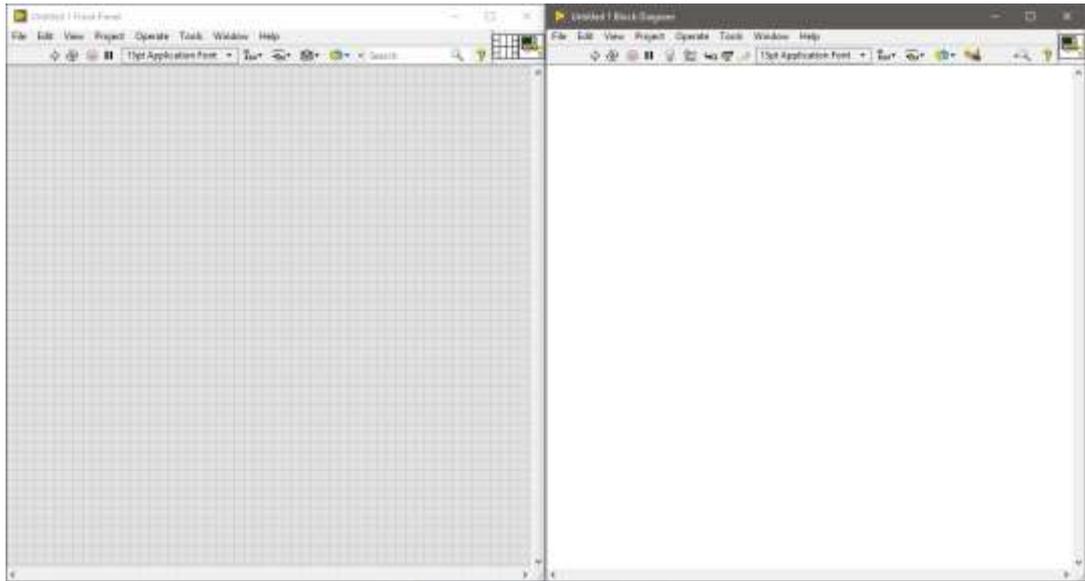


Figura 3. 2: Creación de nuevo VI en blanco para la primera aplicación práctica.
Elaborado por: Autor

Paso 3:

Al conectar el dispositivo NI usb 6009 se configura automáticamente los drivers, tal como se muestra en la figura 3.3. Se recomienda la revisión del estado del cable USB en caso de presentar alguna falla en la comunicación.



Figura 3. 3: Detección del controlador NI USB 6009.
Elaborado por: Autor

Paso 4:

Configurar el puerto de enlace que se genera desde LabView mediante el instrumento virtual DAQmx programada en el diagrama de bloques en

Measurements lo >> DAQmx - Data Acquisition, tal como se muestra en la figura 3.4.

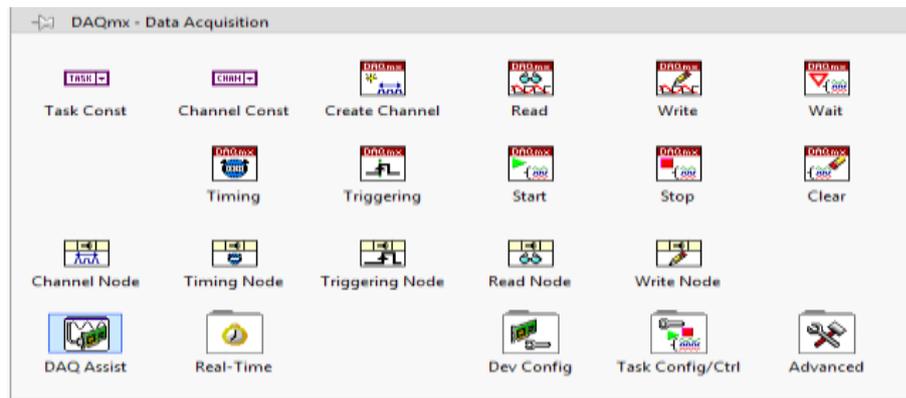


Figura 3. 4: DAQmx- Data Acquisition
Elaborado por: Autor

Paso 5:

Crear un canal virtual de enlace con la tarjeta y configurar como salida digital con su respectivo control para seleccionar el puerto de conexión.



Figura 3. 5: DAQmx- Data Acquisition
Elaborado por: Autor

Paso 6:

Se crea un espacio de memoria en el computador para almacenar el vector donde se accederá a la salida del puerto digital.

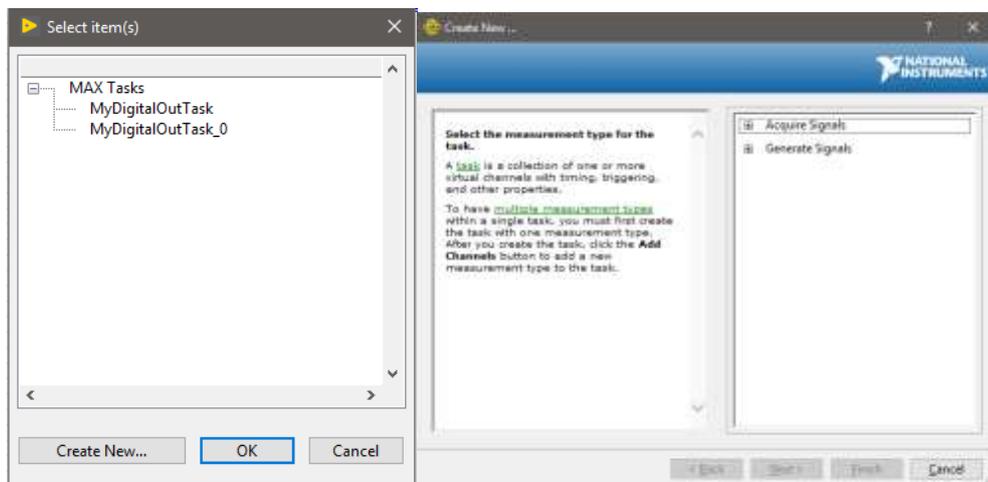


Figura 3. 6: Creación del enlace para la salida digital
Elaborado por: Autor

Paso 7:

En esta parte se configuran 2 salidas digitales para cada contactor y se agrega su respectiva configuración de inicialización.

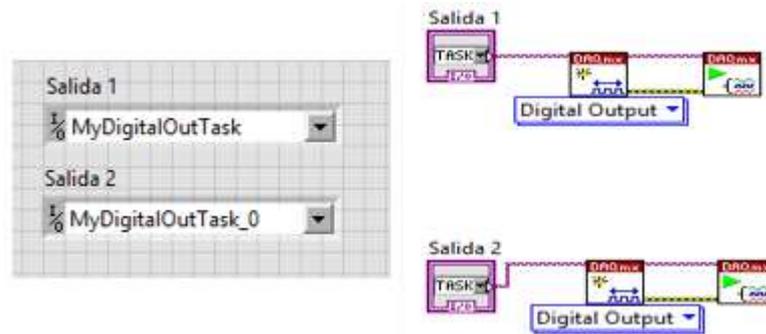


Figura 3. 7: Creación de las 2 salidas y la inicialización.
Elaborado por: Autor

Paso 8:

En esta parte se procede a agregar un lazo de repetición WHILE LOOP, este permite configurar el bloque para la escritura del bit en estado alto (1 lógico) y bajo (0 lógico) para cada salida digital dentro del programa. También, se utiliza un botón de STOP para detener el lazo, y los botones CONTACTOR 1 y CONTACTOR 2 son consideradas como entradas Booleanas para activar y desactivar las salidas digitales, tales como SALIDA 1 y SALIDA 2 de tipo String, tal como se muestra en la figura 3.8.

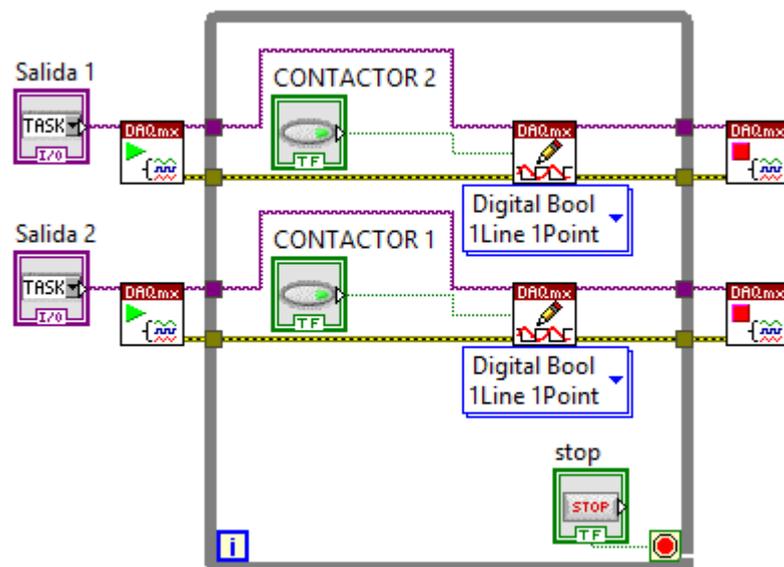


Figura 3. 8: Creación del control para escritura de las salidas.
Elaborado por: Autor

Paso 9:

En la figura 3.9 se muestra el banco de pruebas diseñado para el presente trabajo de titulación. Además, en la figura 3.10 se presenta el diagrama de bloques de las conexiones entre el software y los dispositivos periféricos de control eléctrico.

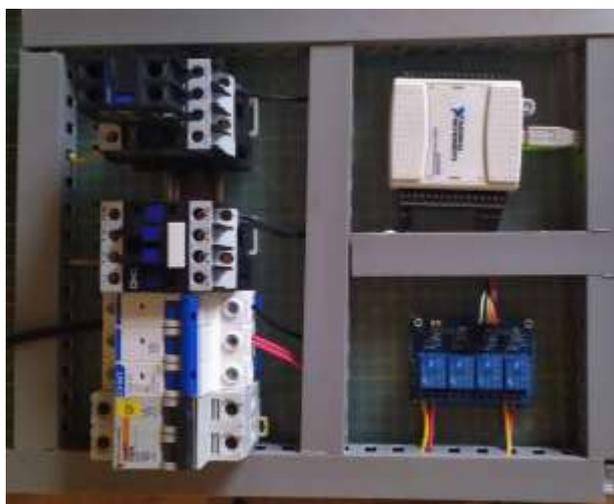


Figura 3. 9: Diagramas de control de la aplicación práctica 1.
Elaborado por: Autor



Figura 3. 10: Diagramas de bloques del control eléctrico de la aplicación práctica 1.
Elaborado por: Autor

Paso 10:

En la figura 3.11 se muestra el diagrama eléctrico de la aplicación prácticas 1. Se tiene un circuito con alimentación a 110 V, y se observa que se utilizan los contactos normalmente abiertos del módulo relé de 4 canales (A1, A2), los mismos que irán conectados en serie a los puertos de energización de los contactores **KM1** y **KM2**, respectivamente. Las figuras 3.12 y 3.13 muestran los diagramas de fuerza eléctrica de la aplicación práctica 1.

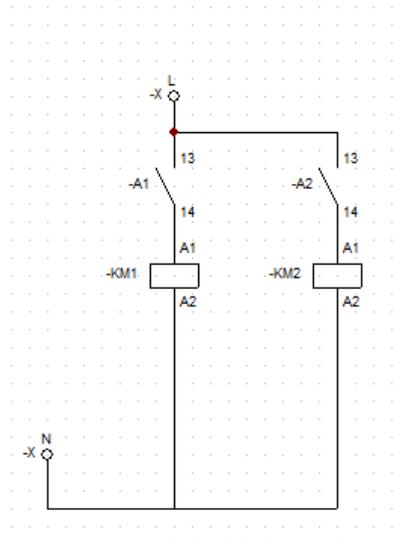


Figura 3. 11: Diagrama eléctrico de la aplicación práctica 1.
Elaborado por: Autor

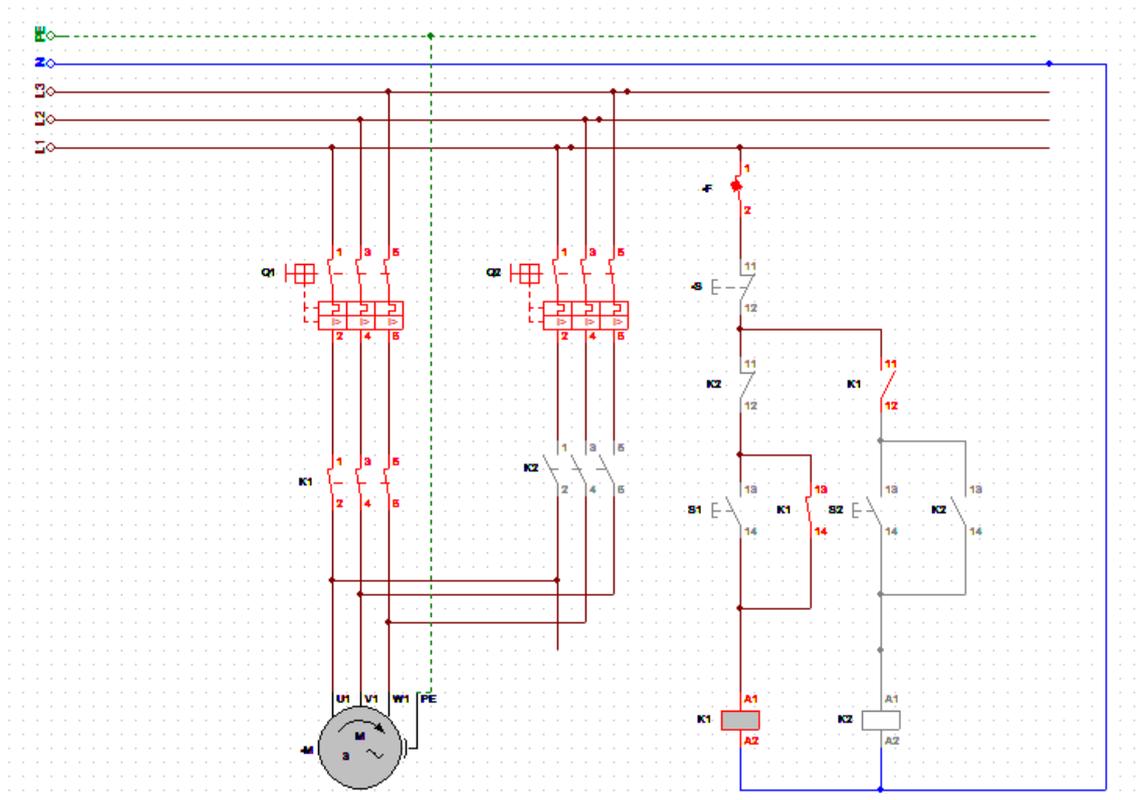


Figura 3. 12: Diagrama eléctrico de fuerza para giro a la derecha.
Elaborado por: Autor

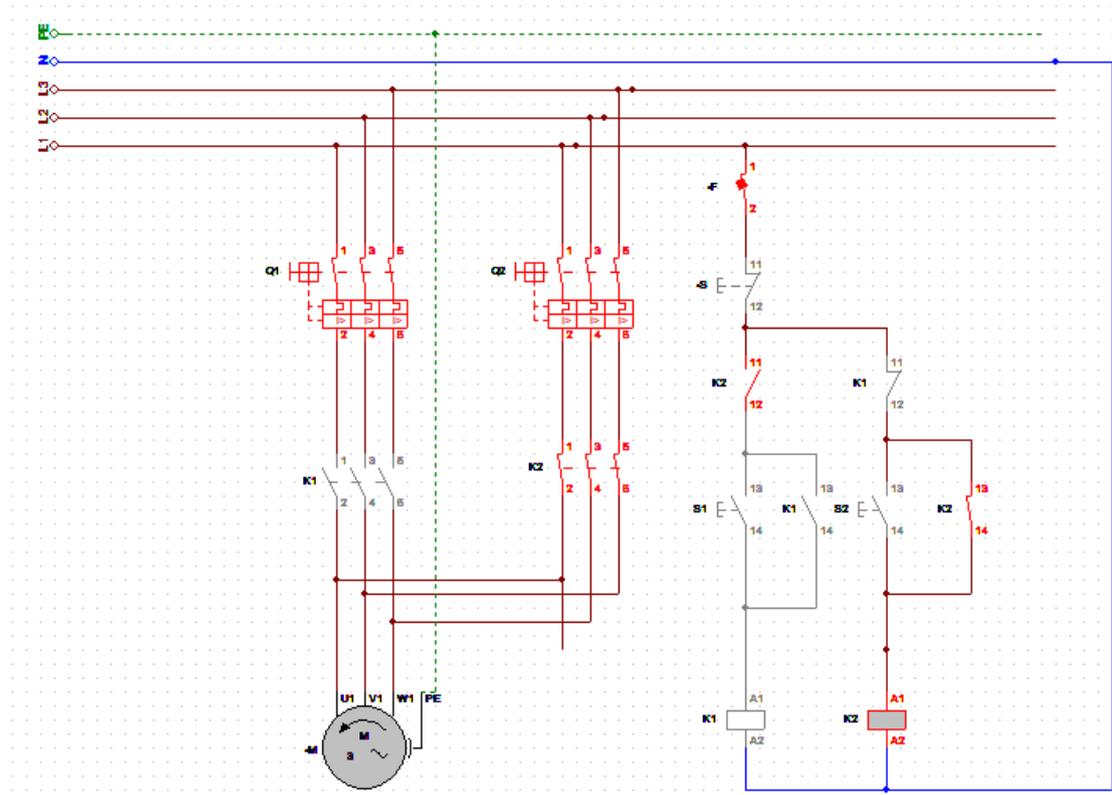


Figura 3. 13: Diagrama eléctrico de fuerza para giro a la izquierda.
Elaborado por: Autor

3.3. Diseño de aplicación 2: Tipo de arranque en estrella-delta mediante instrumentos virtuales (LabView) y tarjeta de adquisición de datos DAQ 6009.

Esta sección describe la parte práctica del uso de la plataforma de simulación LabView y del equipo de adquisición de datos (DAQ) ambos de National Instruments (NI). A continuación, se describen los procesos a seguir para el desarrollo práctico

3.3.1. Objetivos de la práctica de aplicación 1:

Objetivo General:

Utilizar las entradas y salidas Digitales de la DAQ 6009 para arranque de motor trifásico

Objetivo Específico:

- Realizar un programa en Labview para control del Motor trifásico
- Establecer comunicación entre la PC y DAQ 6009
- Aprender uso de arreglos y compuertas lógicas en Labview

3.3.2. Recursos:

- Módulo de adquisición de datos DAQ 6009
- Banco de Pruebas para sistemas de control Industrial
- Computadora
- Cable USB
- Software Labview 2017
- Módulo Relé de 4 canales

3.3.3. Tiempo estimado:

La práctica tiene un tiempo de resolución de 2 horas

3.3.4. Procedimiento

Paso 1:

El NI-DAQmx es una herramienta de LabView para la adquisición de datos realizada por el dispositivo electrónico DAQ 6009 (véase la figura 3.14). La adquisición de datos se realiza mediante las tarjetas de control utilizando puertos digitales y analógicos.



Figura 3. 14: Dispositivo DAQ 6009 de National Instrument.
Elaborado por: Autor

Paso 2:

En el software LabView se procede a la creación de un instrumento virtual (VI) para configurar la interfaz gráfica de usuario (GUIDE) y de los diagramas de control para que el equipo DAQ 6009 permita la adquisición de datos. La figura 3.15 muestra la ventana del software LabView para la creación de un nuevo VI.

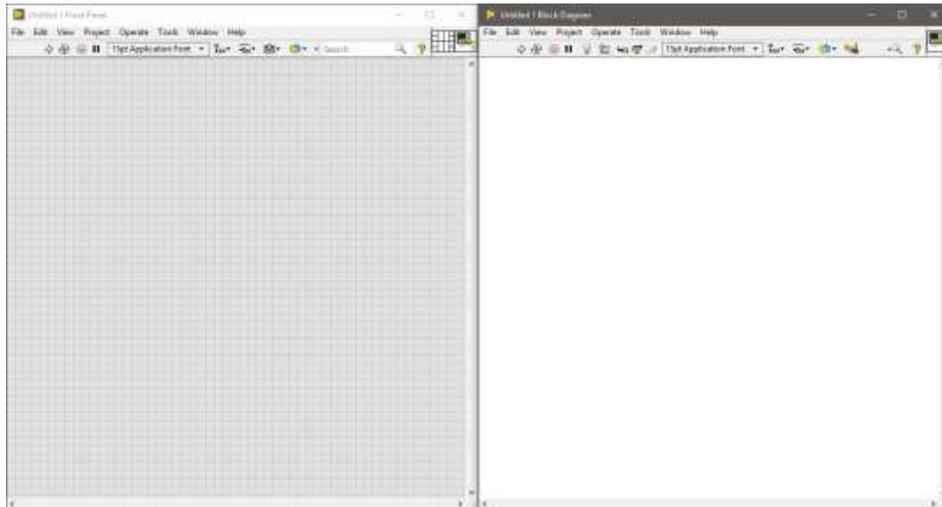


Figura 3. 15: Creación de nuevo VI en blanco para la segunda aplicación práctica.
Elaborado por: Autor

Paso 3:

Al conectar el dispositivo NI usb 6009 se configura automáticamente los drivers, tal como se muestra en la figura 3.16.



Figura 3. 16: Ventana de configuración para dispositivos NI USB-6009
Elaborado por: Autor

Paso 4:

Se realiza la configuración del puerto de enlace que se genera desde la plataforma LabView a través del dispositivo virtual DAQmx programada en el diagrama de bloques del Measurements lo >> DAQmx- Data Acquisition, tal como se muestra en la figura 3.17.



Figura 3. 17: Ventana para configuración de adquisición de datos usando DAQmx.
Elaborado por: Autor

Paso 5:

Posterior, se crea un canal virtual de enlace con la tarjeta y se procede a configurar como salida digital con su respectivo control para seleccionar el puerto de conexión.

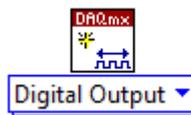


Figura 3. 18: Configuración como puerto de salida digital para la adquisición de datos mediante DAQmx.
Elaborado por: Autor

Paso 6:

Se crea un espacio de memoria en el computador para almacenar el vector donde se accederá a la salida del puerto digital.

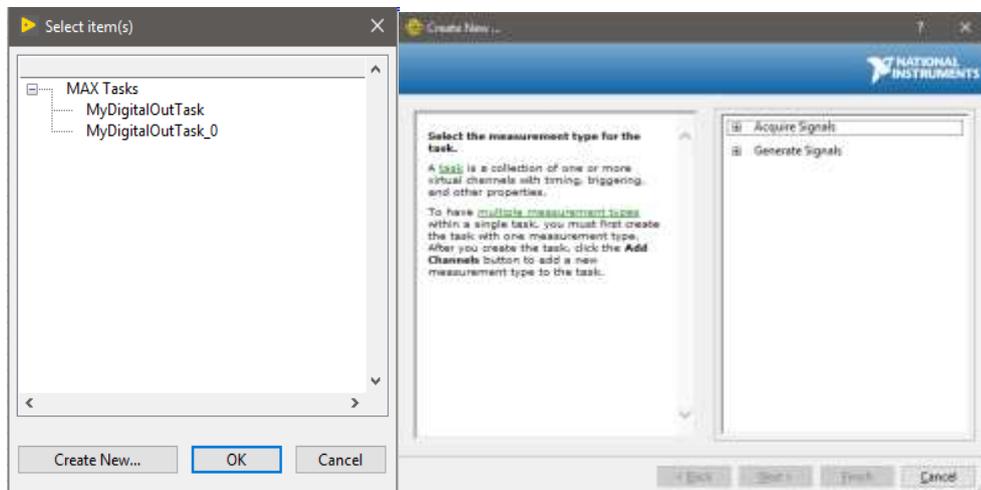


Figura 3. 19: Creación del enlace para la salida digital
Elaborado por: Autor

Paso 7:

Crear bloque de control select case donde se consulta el estado de cada botón por separado y ejecutara la activación de arranque de estrella o delta, tal como se muestra en la figura 3.20.

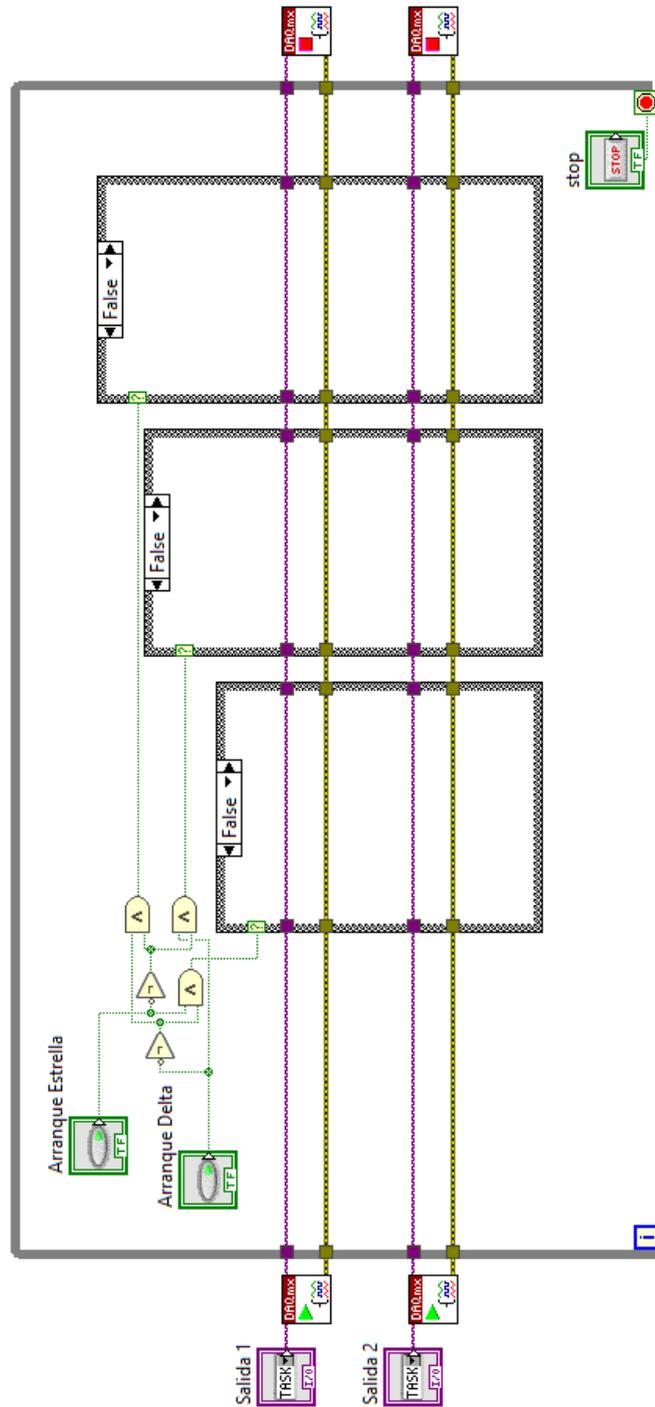


Figura 3. 20: Creación Bloque de control Select Case
Elaborado por: Autor

Como seguro entre cada arranque se realizará un protector mediante código de bloques el cual cumplirá la función de enviar solo un dato a la vez si ambos selectores están activos enviará solo el que recibió el comando primero esperando a una desactivación y esperando un nuevo comando, tal como se muestra en la figura 3.21.

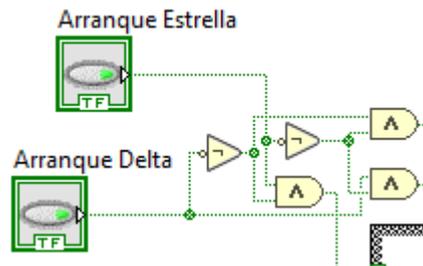


Figura 3. 21: Creación protector mediante código de Bloques
Elaborado por: Autor

Al configurar cada modo se tiene que enviar un dato booleano para la activación en estrella enviar un alto en salida 1 y un bajo en salida 2, tal como se ilustra en la figura 3.22.

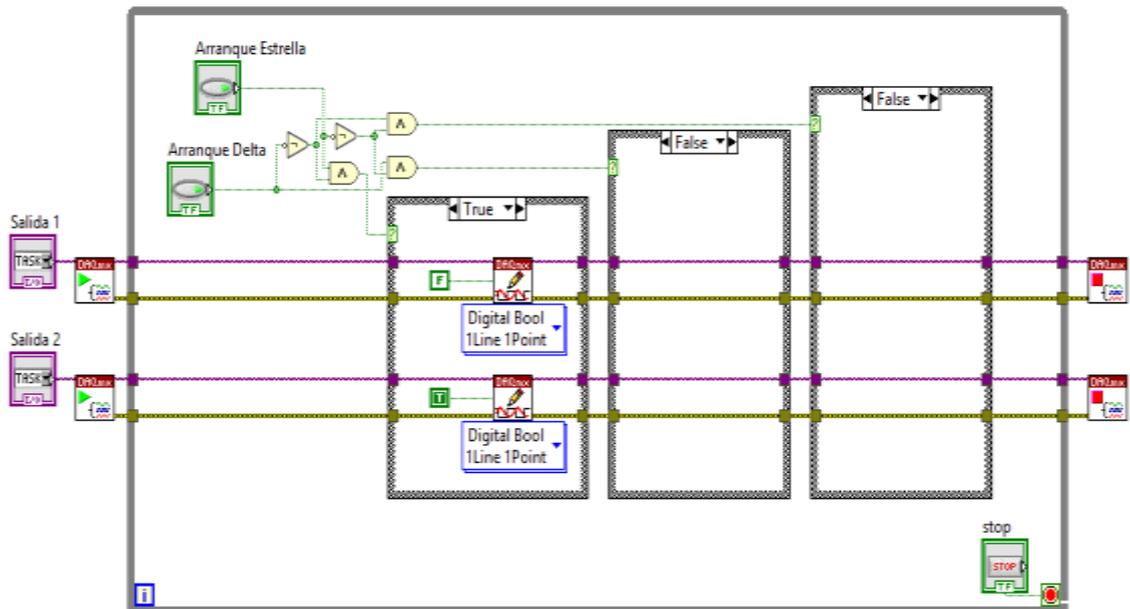


Figura 3. 22: Diagrama de bloques del programa.
Elaborado por: Autor

El diagrama de control es el que muestra en la figura 3.23.

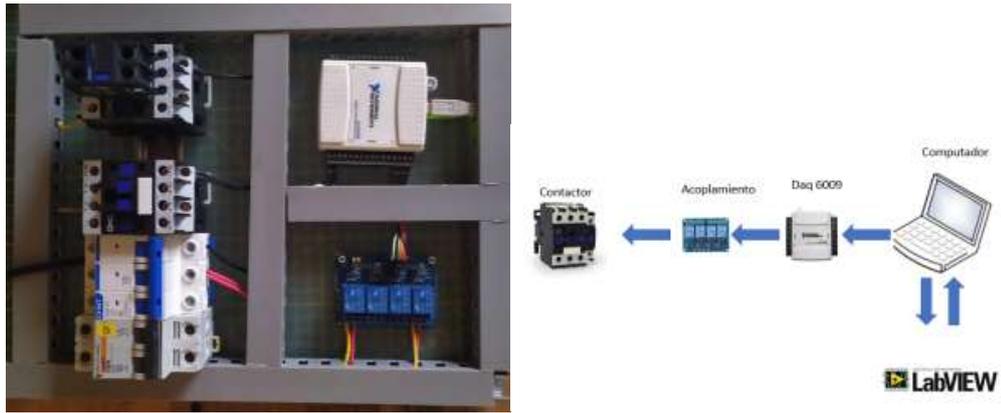


Figura 3. 23: Diagramas de control
Elaborado por: Autor

Los diagramas de control (1) y fuerza (2) representados en la figura 3.24. Se observa que se tiene la misma configuración de control que en la práctica 1, con la variante de un diagrama de fuerza para conectar un motor trifásico.

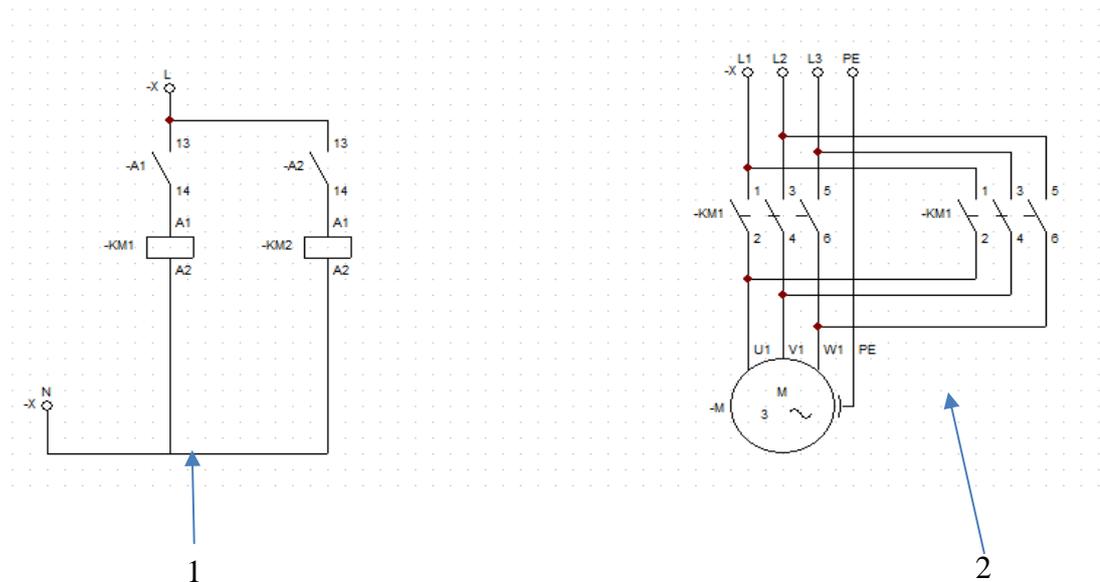


Figura 3. 24: Diagramas de control y fuerza de la aplicación práctica 2.
Elaborado por: Autor

Las figuras 3.5 a 3.27 muestran los diagramas de fuerza delta-estrella para de motores trifásicos

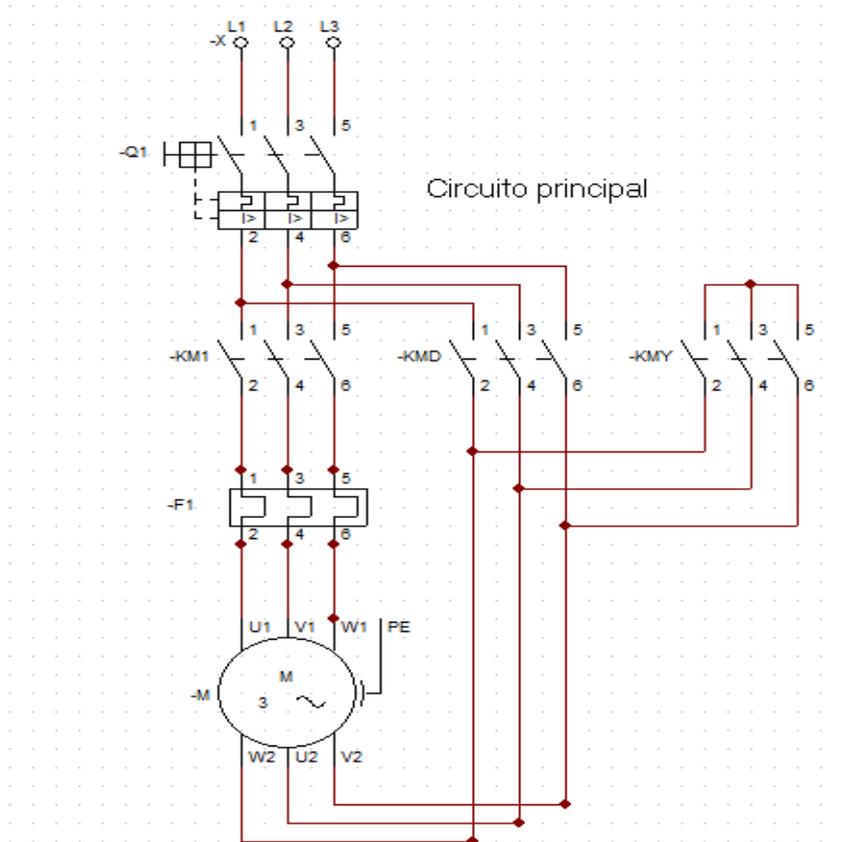


Figura 3. 25: Diagramas de control y fuerza de la aplicación práctica 2.
Elaborado por: Autor

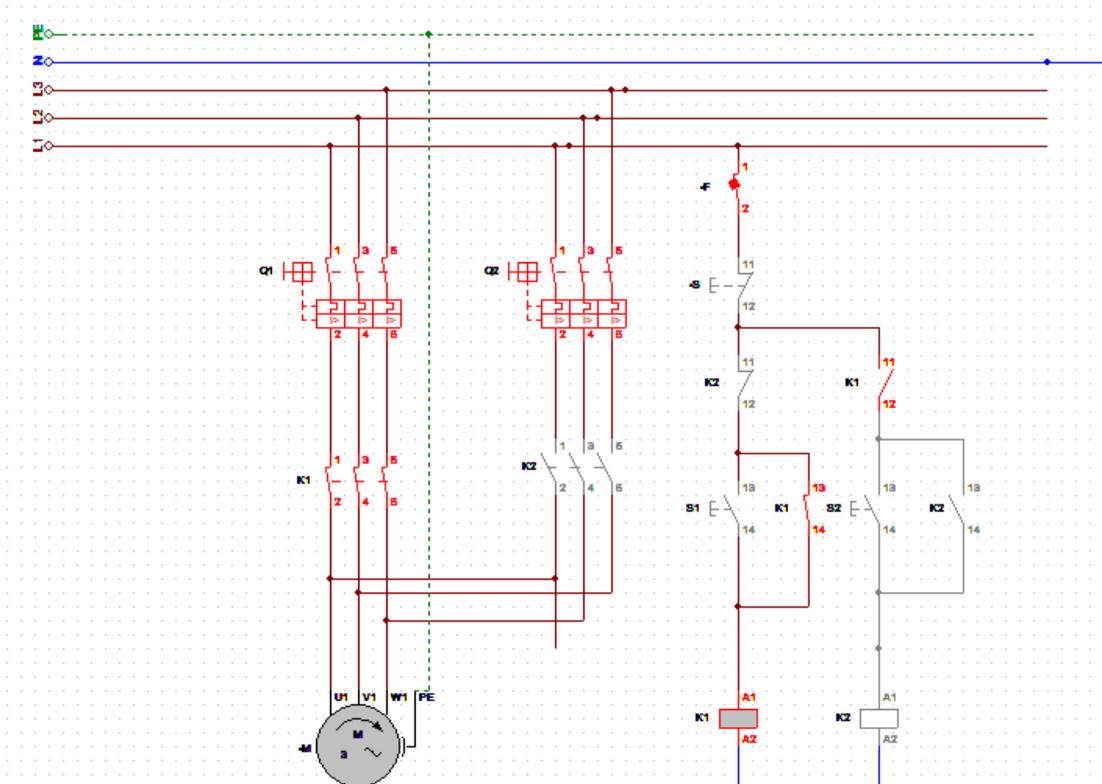


Figura 3. 26: Diagrama eléctrico de fuerza para giro a la derecha de la aplicación 2.
Elaborado por: Autor

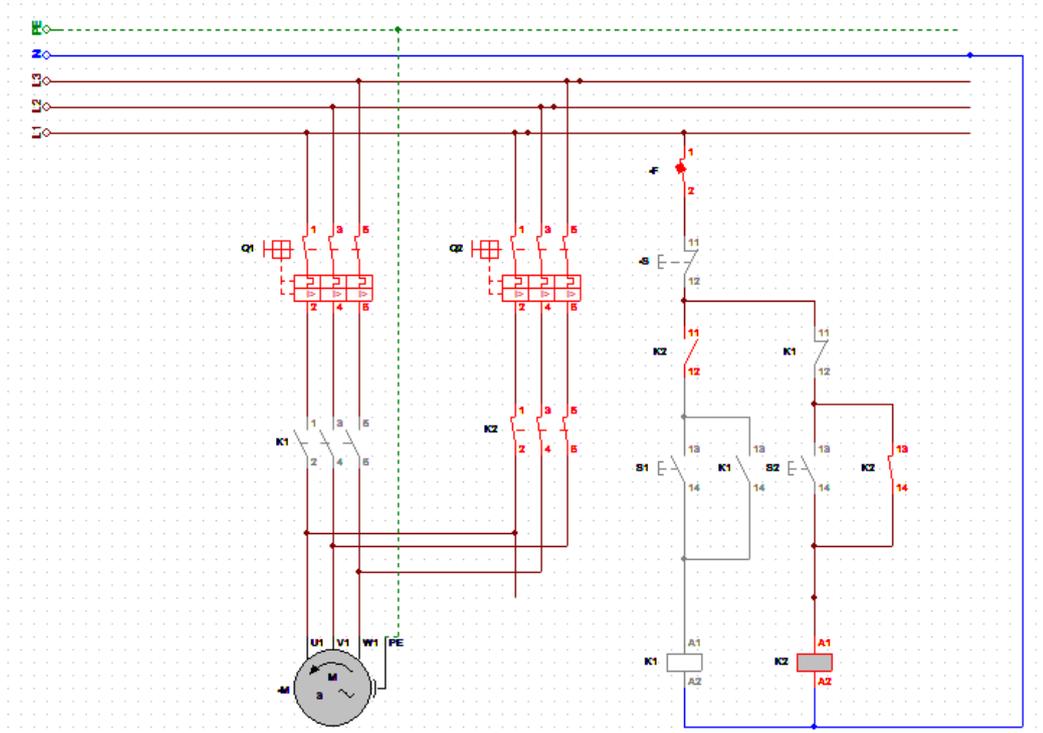


Figura 3. 27: Diagrama eléctrico de fuerza para giro a la derecha de la aplicación 2.
Elaborado por: Autor

3.4. Resultados obtenidos de las aplicaciones prácticas.

3.4.1. Resultados de la aplicación práctica 1.

Al momento de simular la practica 1 se obtiene un cambio de estado en el registro de la tarjeta de adquisición al momento de presionar el botón seleccionado de la tarjeta, tal como se muestra en la figura 3.28.

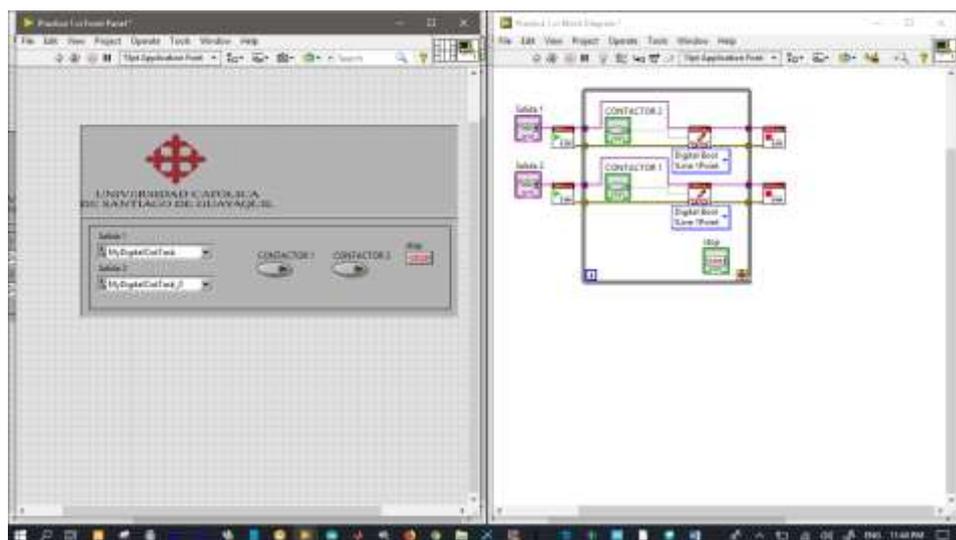


Figura 3. 28: Resultados obtenidos de aplicación práctica 1.
Elaborado por: Autor

La figura 3.29 muestra el caso 1, que al momento de seleccionar el botón del contactor 1 se encenderá el relé.

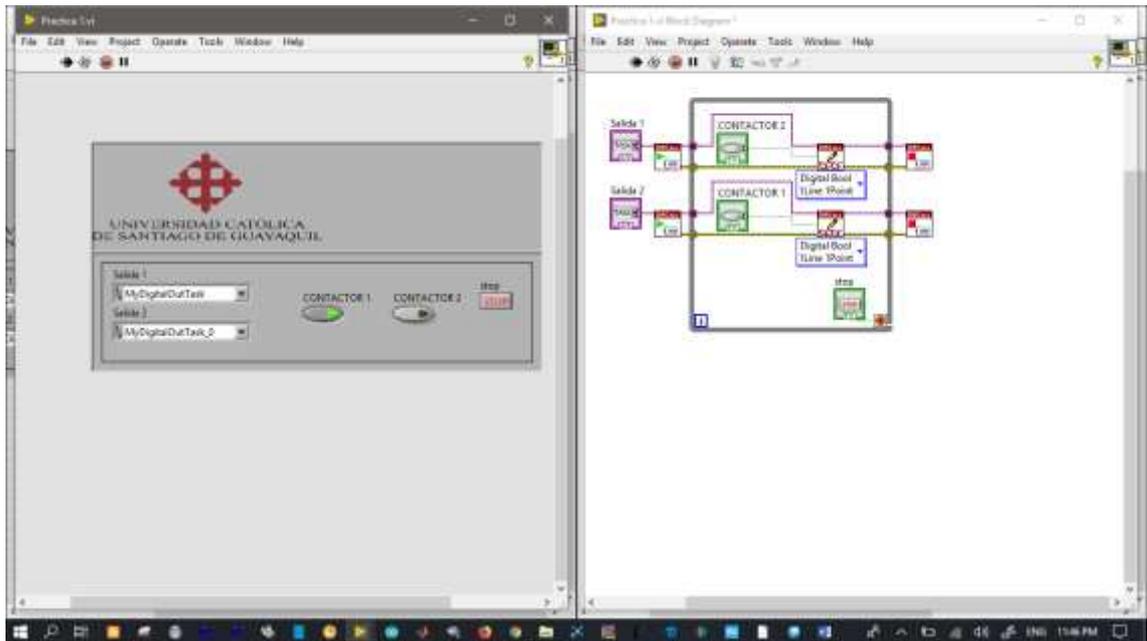


Figura 3. 29: Resultados obtenidos de aplicación práctica 1 – caso 1.
Elaborado por: Autor

La figura 3.30 se observa el cambio o excitación de la bobina del contactor permitiendo el paso de la corriente.

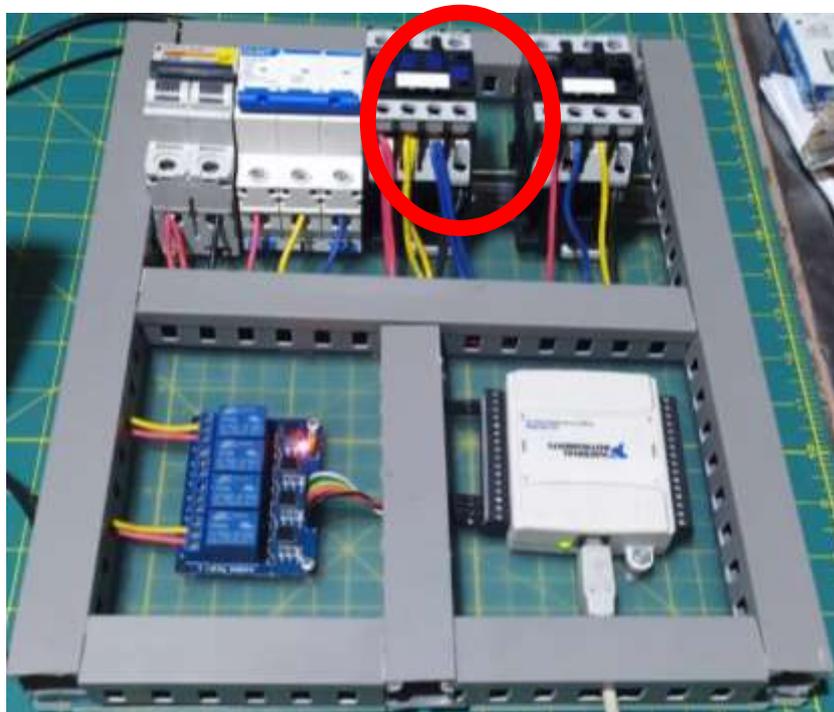


Figura 3. 30: Vista del banco de pruebas de la aplicación práctica 1 – caso 1.
Elaborado por: Autor

La figura 3.31 muestra el segundo caso de la primera aplicación práctica, que se enciende o activa el segundo contactor en la GUI desarrollada en LabView.

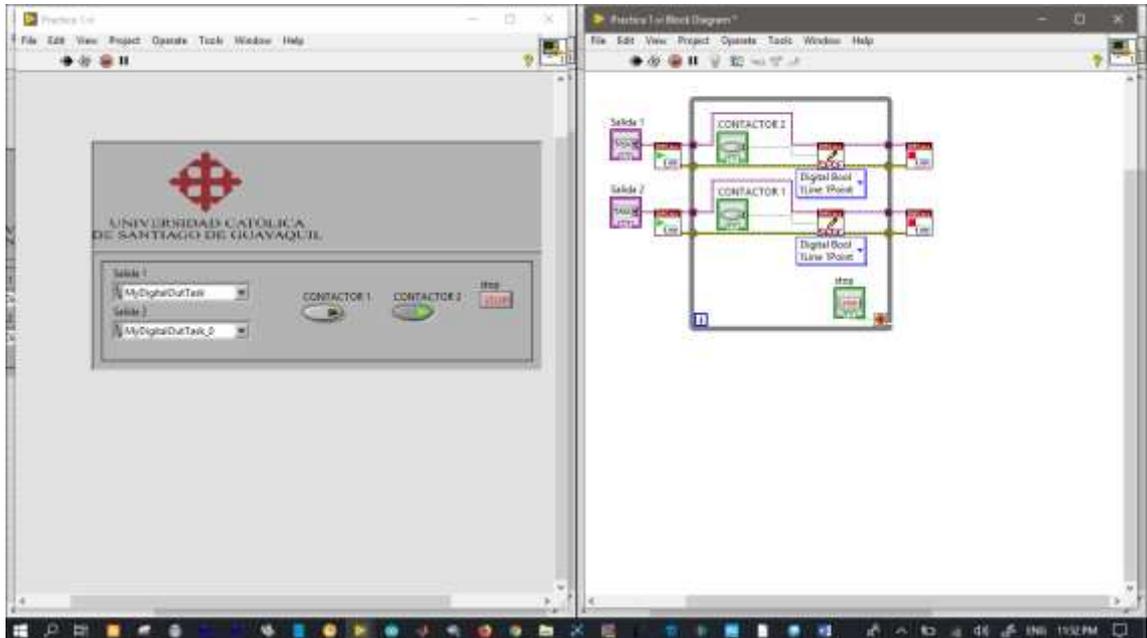


Figura 3. 31: Resultados obtenidos de aplicación práctica 1 – caso 2.
Elaborado por: Autor

Se muestra el cambio de estado del contactor

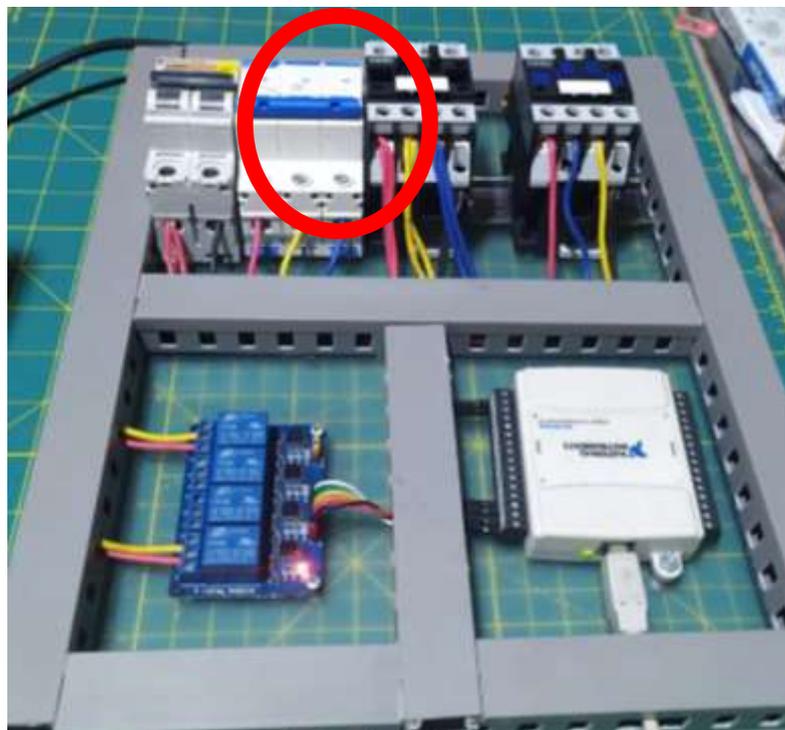


Figura 3. 32: Vista del banco de pruebas de la aplicación práctica 1 – caso 2.
Elaborado por: Autor

3.4.2. Resultados de la aplicación práctica 2.

Al momento de ejecutar el GUI desarrollado a través de instrumentos virtuales (VI) en LabView (véase la figura 3.33), aquí se procederá a seleccionar el tipo de arranque, ya sea del tipo estrella o delta.

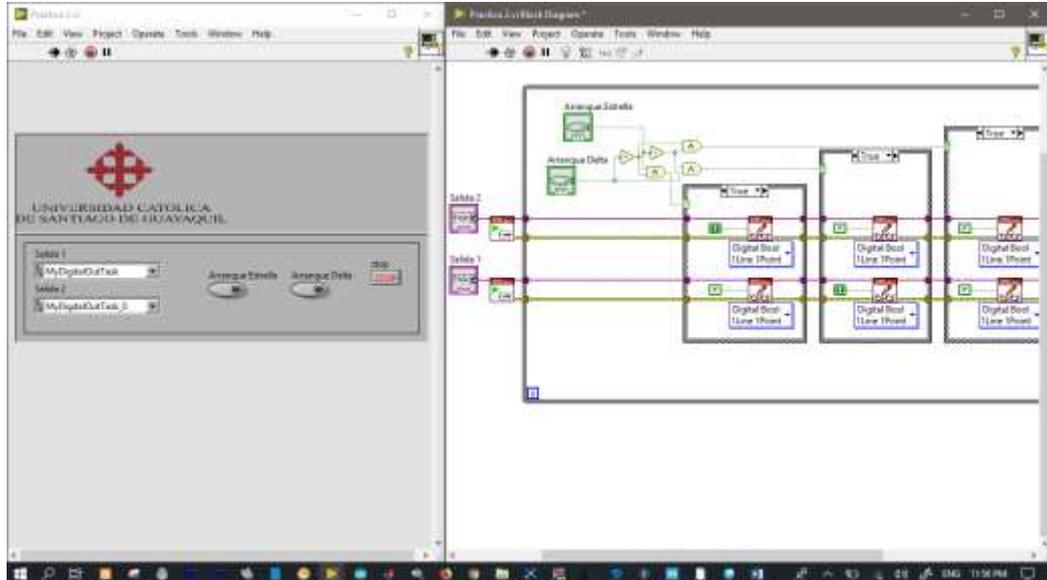


Figura 3. 33: Representación gráfica del GUI para la aplicación práctica 2.
Elaborado por: Autor

Al ejecutar el arranque en estrella (véase la figura 3.34) se procederá a excitar el contactor mediante la activación del relé permitiendo el paso de la corriente. La figura 3.35 muestra el resultado en el banco de pruebas que se ha implementado.

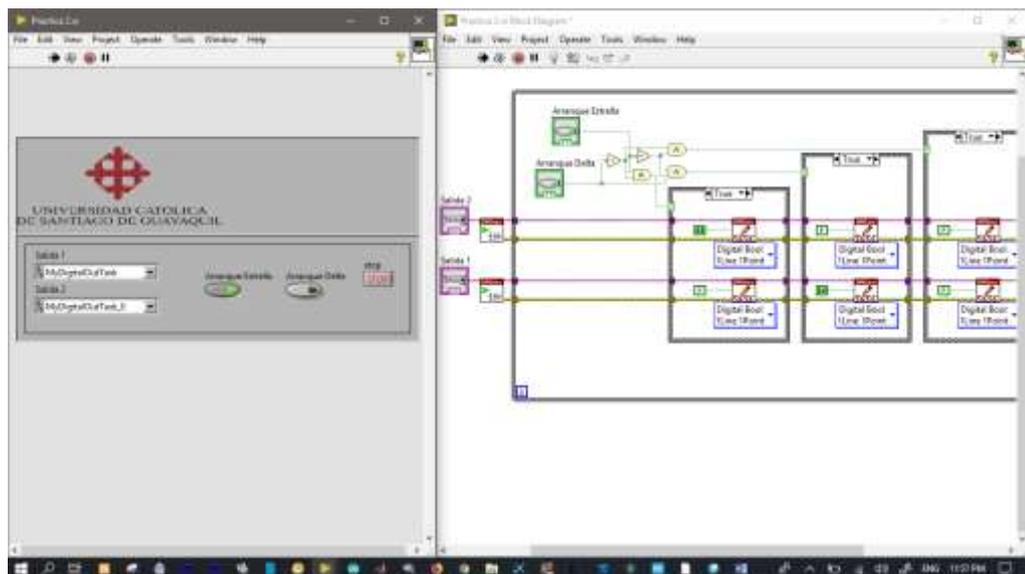


Figura 3. 34: Resultados obtenidos de aplicación práctica 2 – tipo de arranque estrella.
Elaborado por: Autor.

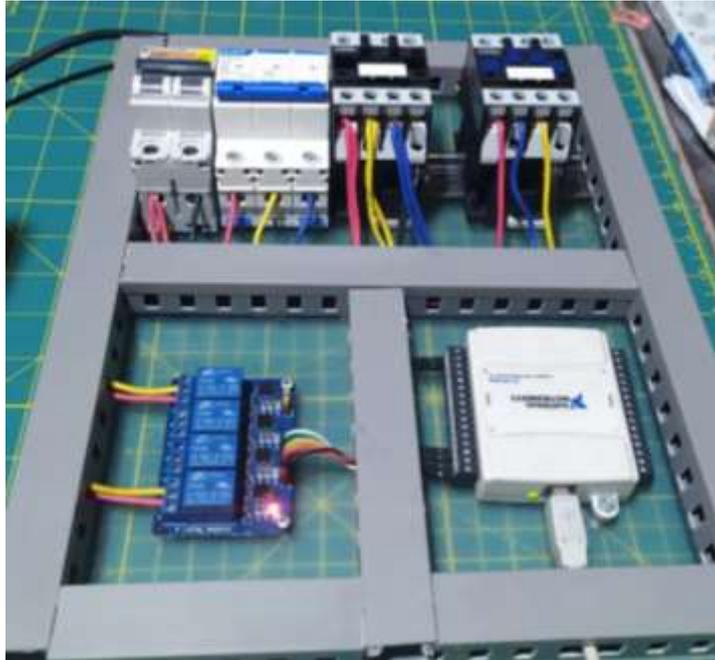


Figura 3. 35: Vista del banco de pruebas de la aplicación práctica 2 – tipo estrella.
Elaborado por: Autor

Al ejecutar el arranque en delta (véase la figura 3.36) se procederá a excitar el contactor mediante la activación del relé permitiendo el paso de la corriente. La figura 3.37 muestra el resultado en el banco de pruebas que se ha implementado.

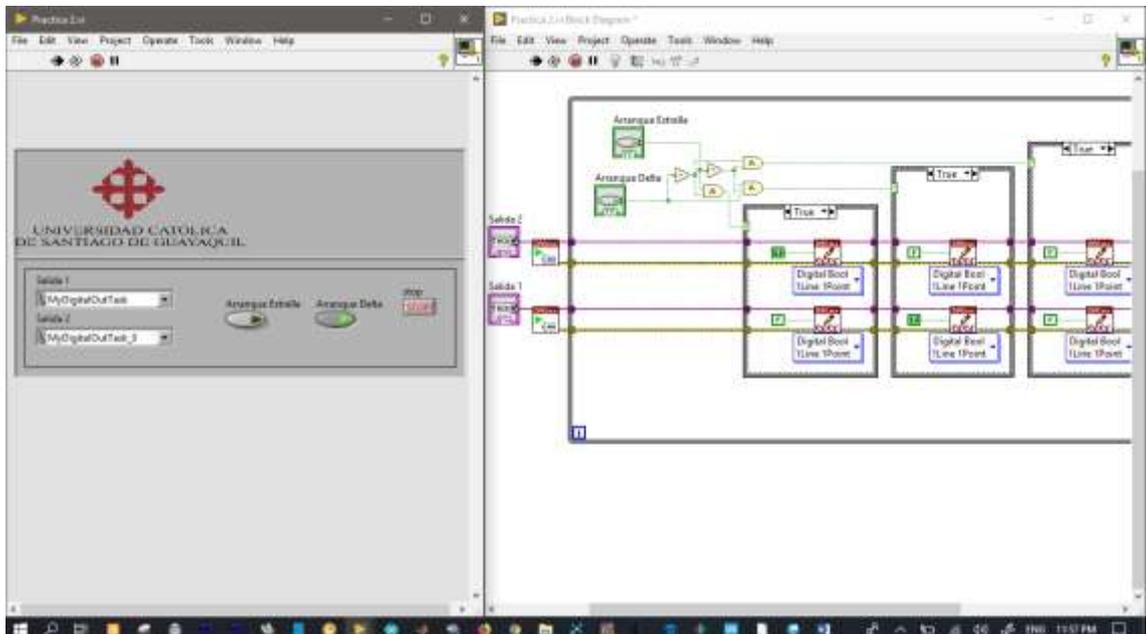


Figura 3. 36: Vista del banco de pruebas de la aplicación práctica 2 – tipo de arranque delta.
Elaborado por: Autor

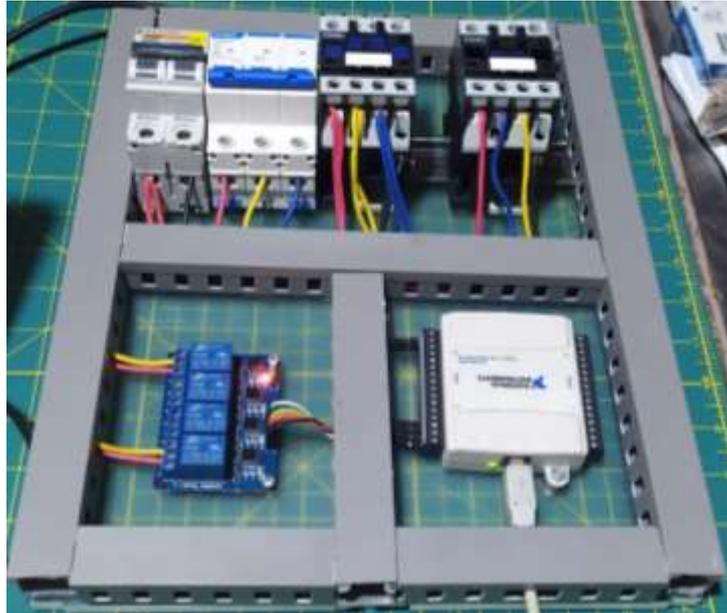


Figura 3. 37: Vista del banco de pruebas de la aplicación práctica 2 – tipo delta.
Elaborado por: Autor

Conclusiones

1. Este documento enfatizó el aspecto teórico de los sistemas de controles modernos que son muy utilizados en el ámbito eléctrico y electrónico, y en esta parte fue importante para trabajar con bucles cerrados y abiertos con retroalimentación.
2. Este documento enfatizó el aspecto de adquisición de datos de bajo costo, control de supervisión y registro de datos de un proceso de control eléctrico. La interfaz gráfica de usuario (GUI) está hecha en el dominio de instrumentación virtual LabView y permite la comunicación entre la planta y el dispositivo de adquisición de datos (DAQ-6009).
3. El SCADA propuesto ha sido probado usando el software LabVIEW también se ha aplicado en tiempo real y mostró muy buenos resultados en las dos aplicaciones desarrolladas.

Recomendaciones

1. Realizar el diseño de un sistema SCADA en tiempo real utilizando microcontroladores PIC y LabView.
2. Realizar la implementación de un sistema de medición inalámbrico multipunto con interfaz LabVIEW.

Bibliografía

- Allwood, J. M., Duncan, S. R., Cao, J., Groche, P., Hirt, G., Kinsey, B., ... Tekkaya, A. E. (2016). Closed-loop control of product properties in metal forming. *CIRP Annals*, 65(2), 573–596. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.002>
- Buschow, K. H. J. (Ed.). (2001). *Encyclopedia of materials: Science and technology*. Amsterdam; New York: Elsevier.
- Cohen Tenoudji, F. (2016). Optimal Filtering: Wiener and Kalman Filters. En F. Cohen Tenoudji, *Analog and Digital Signal Analysis* (pp. 543–562). https://doi.org/10.1007/978-3-319-42382-1_27
- Creus Solé, A. (2011). *Instrumentación Industrial*. Barcelona: Marcombo S.A.
- FIUBA. (2007). Principios de realimentación. Recuperado el 4 de julio de 2019, de Instrumentación y control de procesos website: <http://materias.fi.uba.ar/6653/material/04PrincipiodeRealimentacion.pdf>
- Lawson, B. (2019). What's Flyball Cenrifugal Governor. Recuperado el 3 de julio de 2019, de Electropaedia website: https://www.mpoweruk.com/figs/watt_flyball_governor.htm
- Molina M., J. C. (2007). *Diseño y construcción de un galpón de ambiente controlado para cerdos, usando tecnología opto 22 como una nueva alternativa de control*. (Proyecto de Grado, Escuela Politécnica del Ejército). Recuperado de <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/4059>
- Pattabathula, V., & Richardson, J. (2016). Introduction to Ammonia Production. *CEP Magazine an Aiche Publication*. Recuperado de </resources/publications/cep/2016/september/introduction-ammonia-production>

Richards, K. L. (2014). *Design engineer's reference guide mathematics, mechanics, and thermodynamics*. Boca Raton, FL: CRC Press.

Smith, C. A., & Corripio, A. B. (2006). *Principles and practice of automatic process control* (3rd ed). Hoboken, NJ: Wiley.



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



SENESCYT

Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Siguenza Riofrio, José Ricardo** con C.C: # 070589297-4 autor del trabajo de titulación: Diseño e implementación de aplicación práctica de un control SCADA para controles eléctricos usando LabView y DAQ, previo a la obtención del título de **INGENIERO EN ELECTRICO-MECANICA** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 13 de septiembre del 2019

f. _____

Nombre: **Siguenza Riofrio, José Ricardo**

C.C: 070589297-4

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA		
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN		
TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Diseño e implementación de aplicación práctica de un control SCADA para controles eléctricos usando LabView y DAQ.	
AUTOR(ES)	Siguenza Riofrio, José Ricardo	
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando	
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil	
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo	
PROGRAMA:	Ingeniería en Eléctrico-Mecánica	
TITULO OBTENIDO:	Ingeniero en Eléctrico-Mecánica	
FECHA DE PUBLICACIÓN:	13 de septiembre del 2019	No. DE PÁGINAS: 78
ÁREAS TEMÁTICAS:	Controles Eléctricos, Controles Electrónicos, Máquinas Eléctricas	
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	CONTROL, ELÉCTRICO, SENSORES, ADQUISICIÓN, SUPERVISIÓN, SCADA.	
RESUMEN/ABSTRACT:	<p>El desarrollo del trabajo de titulación se basa en el estudio de la ingeniería de control ya que está presente en prácticamente todos los sistemas de ingeniería modernos. En la actualidad el control es a menudo la tecnología oculta, ya que su éxito lo elimina de la vista. El control es una tecnología habilitadora clave con respecto a calidad de producto mejorada, minimización de residuos y emisiones, protección del medio ambiente, mayor rendimiento para una capacidad instalada dada, mayor rendimiento, actualizaciones de plantas, y mayores márgenes de seguridad. Los ejemplos de sistemas controlados incluyen sensores, actuadores, interconexión, entre otros dispositivos, estos fueron discutidos en el capítulo 2. El proyecto de titulación desarrollado en el capítulo 3, consiste en implementar dos aplicaciones prácticas de controles eléctricos mediante un tablero de pruebas a escala, que permita la supervisión, control y adquisición de datos (conocido como SCADA), mediante el equipo de adquisición DAQ 6009 y el desarrollo de una interfaz gráfica de usuario utilizando el software LabView.</p>	
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593961679038	E-mail: siguenzajose10@gmail.com
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Philco Asqui, Luis Orlando	
	Teléfono: +593-9-80960875	
	E-mail: luis.philco@cu.ucsg.edu.ec	
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA		
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):		
Nº. DE CLASIFICACIÓN:		
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):		