

**Universidad
Oriente**



**Santiago de
Cuba**

Universidad de Oriente
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática

Trabajo de Diploma

Tema:

Estrategia de Control para el proceso de Enfriamiento–
Isoterma–Enfriamiento de la planta de grasas de la UEBP
de lubricantes CUBALUB

Autor: David Polo Clavería

Tutores: Msc. Nardy Bernal Rubio

Ing. Miguel A. Rodríguez Laterrade

Santiago de Cuba, Mayo 2016

“Año 58 de la Revolución”

PENSAMIENTO

*El conocimiento es experiencia, todo lo
demás, es información*

Albert Einstein

DEDICATORIA

A mis padres, Lourdes Clavería Pérez y Nolberto Polo Vega, quienes han sido siempre mi inspiración y ejemplo a seguir en todo objetivo que me he trazado en la vida, por haberme educado lo mejor posible dentro de sus posibilidades y apoyarme incondicionalmente sin preguntas ni frenos. Es por eso que cada línea de este trabajo así como cada uno de los logros que he tenido y tendré, se los dedico eternamente dedicado a ellos.

A mis familiares, amigos, compañeros, profesores y toda aquella persona que haya contribuido de una u otra forma en mi formación personal y profesional.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, quienes han sido siempre mi apoyo y mano derecha principalmente en estos momentos tan decisivos de mi carrera y de mi vida.

A mis amigos y compañeros que siempre han ayudado y han estado al tanto de mí, dándome siempre el empujón que hace falta para llegar a la meta.

A todos y cada uno de los profesores que formaron parte de mi formación académica pues cada uno de ellos condicional o incondicionalmente aportaron un valor, una picardía, una enseñanza. Muchos me motivaron, otros me enseñaron a esforzarme, otros sacaron lo mejor de mí, en fin a todos.

A los ingenieros Manuel Martínez Domínguez, Yoel Dany y Ernesto Estremera, ya que sin su apoyo incondicional no hubiese sido posible la realización de este trabajo.

A mis tutores Msc. Nardy Bernal Rubio e Ing. Miguel A. Rodríguez Laterrade, que más que profesores fueron mis guías en esta gran travesía.

A mi novia Dayris Izaac Alonso y a su madre, quienes también han sido testigos de cada uno de mis avances y tropiezos en esta aventura.

A todos los trabajadores de la empresa CUBALUB, quienes me atendieron de la mejor forma posible y colaboraron con la investigación.

RESUMEN

En este trabajo se analiza y caracteriza la planta productora de grasas “Lisan” de la UEBP de lubricantes (CUBALUB) de Santiago de Cuba, haciendo un estudio de los equipos fundamentales (Reactor Químico Encamisado y Enfriador Raspador) que intervienen el proceso de Enfriamiento-Isoterma-Enfriamiento. Se estudian los fundamentos teóricos e históricos de la identificación de sistemas y teorías de control en Sistemas de Enfriamiento así como el de la Automatización Industrial. Posteriormente se realiza la identificación experimental del Reactor Químico Encamisado así como del Enfriador-Raspador que intervienen en el proceso y el diseño de la Estrategia de Control PI teniendo en cuenta las características del modelo del sistema obtenido, utilizando como herramienta de software el Matlab. Proponiendo también los instrumentos y componentes para la implementación del sistema de control.

ABSTRACT

The present paper is aim at analyzing and characterizing the Grease Producing Plant "Lisan" which belongs to the Basic Management Unit Production of Lubricating Oil (CUBALUB) of Santiago de Cuba. Besides, It is developed a study of the essential equipments (Jacketed Chemical Reactors and Scratcher Cooler) which intervine in the Cooling - Isotherm – Cooling process. It is studied the theoretical and historical basis of the identification of theories and systems of control in Chemical Reactors as well as in Industrial Automation. Subsequently It is carried on the experimental identification of reactor and cooler that intervine in the process and design of PI Control Strategy. It is taken into account the characteristics of the model system obtained through the implementation of the software tool Matlab. It is also proposed the use of instruments and components to implement the system of control

NOTACIONES GENERALES

UEBP	Unidad Empresarial Básica de Producción
CUBALUB	Cuba-Lubricantes
BOT	Mezcla de Difenilo
SISO	Simple Input-Simple Output (Entrada Simple – Salida Simple)
MIMO	Multiple Input-Multiple Output (Entrada Múltiple – Salida múltiple)
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo.
PLC	Programable LogicvController (Controlador Lógico Programable)
DCS	Distributed Control Systems (Sistema de Control de Distribución)
PC	Personal Computer (Computadora Personal)
ET	Estación de Trabajo
ASI	Actuador Sensor-Interface
EMC	Compatibilidad electromagnética
FT	Función de Transferencia
ARX	Auto Regressive Xogen
RQE	Reactor Químico Encamisado
OE	Output Error (Error de Salida)
SBA	Secuencias Binarias Aleatorias
SBPA	Secuencias Binarias Pseudoaleatorias
ITAE	Integral del Tiempo por Error Absoluto.
IMC	Control por Modelo Interno
IAE	Integral Absoluta del Error.

ÍNDICE

Introducción.....	1
Capítulo I:	5
FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL	5
1.1 Flujo de producción de grasas de Base Litio “Lisan”	5
1.1.1 Etapas del Proceso Productivo.....	6
1.1.2 Reacciones Químicas.....	10
1.1.3 Reactor Químico Encamisado, componentes:.....	11
1.1.4 Enfriador-Raspador, componentes:.....	11
1.2 Identificación de Sistemas.....	12
1.2.1 Antecedentes de la Identificación de Sistemas	13
1.2.2 Técnicas de Identificación	14
1.2.3 Proceso de Identificación Experimental.....	15
1.2.4 Métodos de Identificación	17
1.2.5 Técnicas de Identificación Paramétrica	18
1.2.6 Señales de entrada utilizadas para la Identificación de Sistemas	20
1.3 Configuraciones de Control.....	21
1.3.1 Otras Configuraciones de Control	22
1.3.2 Estrategias de Control	25
1.3.2.1 Clasificación de las Estrategias de Control	25
1.3.3 Métodos de Ajuste del controlador	25
1.3.3.1 Métodos basados en la Respuesta Transitoria	25
1.4 Automatización Industrial	28
1.4.1 Estado del arte internacional de la automatización industrial	29

1.4.2 Breve análisis de la tecnología PLC	31
1.4.2.2 Ventajas e inconvenientes en la utilización de PLC	32
1.5 Aspectos necesarios para un Sistema Automatizado	33
1.5.1 Buses de Campo. Antecedentes	33
1.5.1.1 Ventajas de los Buses de Campo	36
1.5.1.2 Algunos Buses de Campo.....	36
1.5.2 Redes Eléctricas (RS485)	37
1.5.2.1 Características de las Redes Eléctricas (RS485).....	37
1.5.2.2 Beneficios de las Redes Eléctricas (RS485)	38
1.5.2.3 Construcción de las Redes Eléctricas (RS485).....	38
1.6 Conclusiones Parciales del Capítulo	39
Capítulo II:	40
PROCESO DE IDENTIFICACION Y RESULTADO DE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL EN EL RQE Y EL ENFRIADOR	40
2.1 Identificación experimental del Reactor K-212.	40
2.2 Identificación experimental del Enfriador E-210.	42
2.3 Diseño del Sistema de Control.....	44
2.3.1 Configuración y Estrategia de Control.	44
2.3.2 Métodos de Ajuste	45
2.3.2.1 Cálculo de los parámetros del controlador para K-212	45
2.3.2.2 Cálculo de los parámetros del controlador para E-210	46
2.3.3 Respuesta del sistema ante la acción del controlador.....	47
2.4 Selección de componentes para poner en práctica el Sistema de Control propuesto.	48
2.4.1 PROFIBUS DP	49
2.4.2 Estación de periferia descentralizada SIMATIC ET 200-S [17]	50

2.4.3 Módulo Electrónico 6ES7134-4NB00-0AB0	52
2.4.4 CPU 6ES7151-0AB0 7AA11.....	52
2.4.5 Módulo de interfaz para la conexión a bus: IM 151-1.	52
2.4.6 Módulo de interfaz IM 151-7 CPU.	53
2.4.7 Sensores e Indicadores	54
2.4.7.1 Medición de temperatura con Termopar WIKA TC10	54
2.4.7.2 Transmisor T53	54
2.4.7.3 Medición de nivel con Interruptor de Nivel Magnético RSB.....	55
2.4.7.4 Termómetro Bimetálico Modelo 52 (indicador).....	55
2.5 Atenuación a interferencias y cálculo del tiempo de conversión.	56
2.6 Cálculo de los tiempos del ciclo PROFIBUS.	57
2.7 Programación del PLC para cumplir con la Estrategia de Control	58
2.8 Valoración Económica.....	61
2.9 Valoración Económica.....	62
2.10 Conclusiones Parciales del Capítulo	63
Conclusiones Generales:	64
Al término de este trabajo se arriban a las siguientes conclusiones:	64
Recomendaciones:.....	65
Bibliografía:	66
Anexos:	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Flujo tecnológico de la planta	5
Figura 1.1.2 Gráfica de Isoterma.....	10
Figura 1.1.3: Componentes de un RQE	11
Figura 1.1.4 Componentes de un Enfriador	12
Figura 1.2.3: Esquema del proceso de identificación experimental.....	17
Figura 1.2.5: Diagrama en bloques de las estructuras de modelos paramétricos.	19
Figura 1.3 a: Configuraciones para el control de temperatura en el proceso.	21
Figura 1.3 b: Configuraciones para el control de flujo y nivel en RQE y Enfriador	22
Figura 1.3.1 a Lazo de control anticipatorio	23
Figura 1.3.1 b Lazo de control de relación	23
Figura 1.3.1 c Lazo de control de protección.....	23
Figura 1.3.1 d Lazo de control subastador	24
Figura 1.3.1 e Lazo de control inferencial	24
Figura 1.4.1: Pirámide de Automatización.....	30
Figura 1.5.2.3: Cables de PROFIBUS.....	39
Figura 2.1 a: Visualización del procesamiento de datos para K-212.....	41
Figura 2.1 b: Ajustes obtenidos para del procesamiento de datos para K-212	41
Figura 2.2 a: Visualización del procesamiento de datos para E-210.....	42
Figura 2.2 b: Ajustes obtenidos para del procesamiento de datos para K-212	43
Figura 2.3.1 a: Diagrama en bloques para K-212 y E-210	44
Figura 2.3.1 b: Diagrama en bloques con perturbaciones para K-212 y E-210.....	45
Figura 2.2.3 a: Simulación del sistema con la acción del controlador PI en K-212 ...	47
Figura 2.2.3 b: Simulación del sistema con la acción del controlador PI en E-210 ...	48
Figura 2.4.2: SIMATIC ET 200S.....	50
Figura 2.4.5: Módulo de interfaz para la conexión a bus IM 151-1.....	53
Figura 2.4.6: Módulos de interfaz IM 151-7 CPU	54
Figura 2.4.7.1: Termopar Modelo TC10 Marca WIKA	54
Figura 2.3.7.2: Transmisor Modelo T53 Marca WIKA	55
Figura 2.3.7.3: Interruptor de nivel magnético RSB Marca WIKA.....	55
Figura 2.3.7.4: Termómetro bimetalico modelo 52 de WIKA.....	56
Figura 2.7: Diagrama general funcional del PLC.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.3.3.1 a: Fórmulas y coeficientes para calcular el ajuste del controlador continuo para cambios en la perturbación.....	27
Tabla 1.3.3.1 b: Fórmulas y coeficientes para calcular el ajuste del controlador continuo para cambios en el punto de control.	27
Tabla 1.5.2.1: Distancias basadas en la velocidad de transmisión.	38
Tabla 2. 6: Relación de parámetros para el cálculo de los tiempos de ciclo de PROFIBUS.	57
Tabla 2.8a: Salarios de Especialistas de la Empresa TECNOMÁTICA.....	61
Tabla 2.8b: Costo de la instrumentación	62

INTRODUCCIÓN

La grasa es un producto semisólido cuya función es disminuir la fricción y el desgaste entre las superficies en rozamiento.

Las grasas de base Litio están diseñadas para la utilización en diferentes mecanismos de fricción tanto automotor, de construcción, como industriales en condiciones de trabajo adversas, estas se obtienen a partir de la reacción de saponificación del ácido 12-hidroxiesteárico y el Hidróxido de Litio en aceites básicos refinados de alta calidad y adición de aditivo antioxidante di-fenilamina; a las grasas oscuras se les incorpora bisulfuro de molibdeno (MoS_2) lo que les proporciona la formación de una película de mayor adherencia a las superficies metálicas y mayor capacidad de soportar altas cargas.

La planta de grasa de la UEBP de Lubricantes (CUBALUB) de Santiago de Cuba produce las grasa de usos múltiples y el viscopren. De manera más específica se puede argumentar que las grasas que se producen son las de base litio “Lisan” que son utilizadas en todas las industrias donde existen mecanismos sometidos a altas temperaturas, presión y fricción. La producción de grasas “Lisan”, comprende los surtidos de:

Grasas Claras: “Lisan – 0”, “Lisan – 2” y “Lisan – 3”

Grasas Oscuras: “Lisan – 2M” y “Lisan – 3M”

Esta planta es la encargada de la elaboración de este producto para todo el país ya que es la única de su tipo en el territorio nacional. Dicha planta tiene una capacidad de diseño de 5000 toneladas. Es de tecnología soviética del año 82 y en la actualidad se explota a un 42% de su capacidad debido a la obsolescencia tecnológica.

En este trabajo se hará un estudio del subproceso compuesto por un reactor químico, un enfriador -raspador y dos bombas de tres husillos para el trasiego del

producto. En dicho subproceso, como en la planta completa, no existe control automático alguno y la instrumentación que se encuentra implementada para la medición tiene un período grande de explotación, provocando en algunos casos que parte del equipamiento se encuentre de baja técnica y otra no trabaje correctamente, lo que conlleva a que la medición, regulación y supervisión del subproceso que se lleva a cabo no sea eficiente.

Esta situación conduce a plantear como **problema de la investigación** *la inestabilidad en la calidad del producto debido a la obsolescencia tecnológica en el actual control del subproceso*, en el cual ocurren las reacciones químicas más importantes para la elaboración de las grasas Lisan, reacciones que dependen de las altas temperaturas y su mantención en valores determinados por periodos de tiempo según el tipo de producto requerido. Habiéndose definido el problema de la investigación y la causa que lo condiciona, queda claro que el **objeto** *será la identificación experimental de sistemas, la teoría de control y automatización de procesos*. Teniendo como **objetivo** *proponer una Estrategia de Control que optimice la eficiencia y la calidad del producto del subproceso perteneciente a la planta de grasa de la UEBP de Lubricantes (CUBALUB) de Santiago de Cuba*. El **campo de acción** *estará delimitado por el control automático del reactor químico encamisado, el enfriador-raspador y otros elementos que conforman el subproceso de Enfriamiento-Isoterma-Enfriamiento de la planta de grasas de la UEBP de Lubricantes (CUBALUB) de Santiago de Cuba*. Por lo citado anteriormente puede plantearse como **hipótesis**: *presentar una Estrategia de Control adecuada que posibilite alcanzar una mejor calidad en el producto y eficiencia del proceso; así como de la productividad general de la empresa*.

Para cumplir el objetivo propuesto se han asumido las siguientes **tareas de investigación**:

- Analizar y caracterizar la producción de grasas Lisan así como la importancia de su uso.
- Examinar los dispositivos y equipos auxiliares indispensables para el funcionamiento del subproceso, haciendo énfasis en los Sistemas de Enfriamiento.
- Identificar el Reactor Químico Encamisado así como el Enfriador-Raspador.
- Aplicación de las teorías de control en Reactores Químicos y Enfriadores para obtener una Estrategia de Control.
- Caracterizar el Sistema de Medición y Control actual para realizar la nueva propuesta del Sistema de Control.

Las tareas de investigación anteriormente mencionadas han sido desarrolladas utilizando como base las siguientes **técnicas y métodos**:

- Observación.
- Método histórico – lógico
- Análisis de documentos.
- Método de análisis – síntesis.
- Técnicas empíricas.

El **Aporte de la investigación** será una Estrategia de Control en función de mejorar la productividad, eficiencia, calidad de la planta y del producto final. Con una **significación** eminentemente **práctica**, pues toma como punto de partida una instalación real, que se encuentra en funcionamiento y perfecciona la medición y control de la temperatura entre otras variables.

Estructura del Trabajo:

La presente investigación se encuentra organizada en dos capítulos que constan de introducciones parciales para la mejor comprensión de los objetivos de los mismos, donde estos, a su vez, se encuentran organizados por epígrafes, de manera que resulte más fácil su revisión por parte del lector. En el Capítulo I se analizan los fundamentos teóricos que rigen el proceso en los Reactores Químicos Encamisados y Enfriadores-Raspadores. Se analizan las técnicas de identificación

experimental, las teorías de control y se presenta un breve estudio de los fundamentos teóricos de la automatización industrial. En el Capítulo II, se identifica experimentalmente el sistema, aplicando las configuraciones y estrategias de control, mostrando las simulaciones en Matlab de cada una de ellas para elegir cual es la más apropiada. También se seleccionan los sensores y acondicionadores a utilizar para el diseño del hardware y el firmware necesario para desempeñar las funciones de medición y control requeridas. Al final de este capítulo se muestran las conclusiones generales, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

CAPÍTULO I:

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

1.1 Flujo de producción de grasas de Base Litio “Lisan”

En el proceso productivo de la grasa Lisan se utiliza un reactor con dispositivo de agitación de turbina (K – 211) de $V = 5\text{m}^3$ de capacidad para la carga del proceso productivo; un reactor con dispositivo de agitación de paletas raspadoras con doble dispositivo de agitación que giran en sentido contrario, con variador de velocidad (K-212) de $V = 5\text{m}^3$ de capacidad en cual se añade el bisulfuro de molibdeno (MoS_2) para las grasas oscuras; un enfriador raspador (E – 201) para el enfriamiento de la grasa con agua a contracorriente; bombas de tres husillos para el trasiego del producto a través de los equipos; un homogeneizador de válvulas y pistones (K – 230); depósitos de productos terminado (5 para las grasas claras), (2 para las grasas oscuras) de $6,3\text{m}^3$ de capacidad como se muestra a continuación en la figura 1.1.

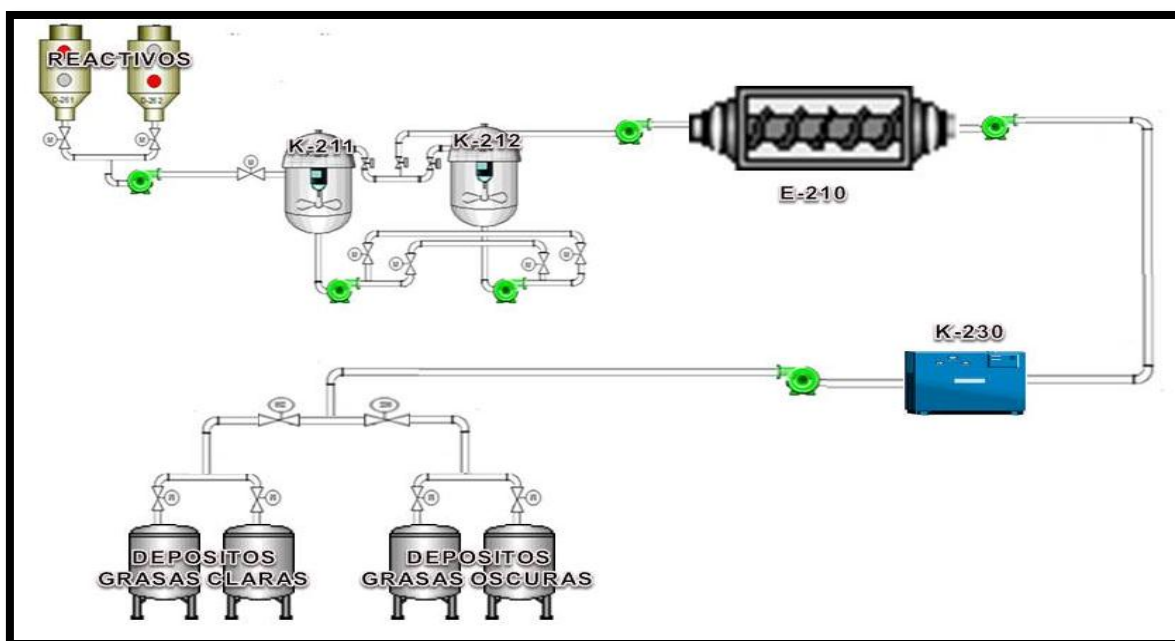


Figura 1.1 Flujo tecnológico de la planta

1.1.1 Etapas del Proceso Productivo

1. Carga de la materia prima
2. Adición de Aditivo
3. Saponificación
4. Adición de Aditivo
5. Evaporación
6. Elevación de Temperatura y Tratamiento Térmico
7. **Enfriamiento**
8. **Isoterma**
9. **Enfriamiento**
10. Filtración, Desaireación, Homogenización
11. Control de Calidad
12. Adición de Bisulfuro de Molibdeno (MoS₂)
13. Homogenización, Filtración, Desaireación
14. *Control de la calidad*
15. Envasado

Preparación de la Planta:

- El J' de Brigada o el operador del área alinea el sistema de calentamiento en el terreno (sistema BOT, Edificio Tecnológico) y el controlador conecta la bomba P-274 desde la Sala de Control.
- Seguidamente se conectan los electro-calentadores desde la Sala de Control. Una vez alcanzados los 200 °C en el sistema de calentamiento se procede a la carga de la materia prima

1. Carga de la Materia Prima:

Se realiza en el reactor K-211. El operador del área alinea el sistema en el terreno y el controlador setea en el contador volumétrico de la Sala de Control la cantidad requerida y conecta la bomba P-261 o P-262 según tipo de aceite. Al concluir el bombeo por la señalización en la Sala de Control el controlador informa al

operador del área que ha terminado el bombeo de los aceites y el mismo procede al cierre de la válvula de entrada al reactor.

El operador del área conecta el dispositivo de agitación y abre el calentamiento al reactor.

2. Adición de Aditivo.

Logrado un aumento representativo de la temperatura el controlador comunica al operador del área que puede añadir el aditivo el cual debe tener ya pesado.

A la temperatura ($70 \geq 80^{\circ}\text{C}$) procede a la carga del LiOH manualmente a través de la escotilla del reactor y conecta la bomba P-209 para comenzar la recirculación.

A temperatura menor de 90°C adiciona el agua manualmente a través de la escotilla del reactor.

A la temperatura ($80 \geq 90^{\circ}\text{C}$) procede a la carga del ácido 12-hidroxiesteárico manualmente a través de la escotilla del reactor, alcanzados los 90°C aproximadamente cierra el calentamiento.

3. Saponificación.

En la mezcladora K-211 el operador del área en coordinación con el controlador en la Sala de Control mantiene la temperatura de ($90 - 98^{\circ}\text{C}$) con agitación y recirculación continua y el calentamiento cerrado a la mezcladora (reactor) 30 minutos.

4. Evaporación.

Terminada la saponificación el controlador coordina con el operador del área para comenzar la evaporación, este último abre el calentamiento al reactor K-211 para elevar la temperatura hasta los 150°C y está pendiente al nivel de la mezcladora hasta alcanzarse los 120°C ya que en cualquier momento puede ocurrir un derrame de la mezcla reactiva. Durante toda la etapa mantiene la recirculación.

5. Elevación de Temperatura y Tratamiento Térmico (K-212):

Alcanzados los 150 ° C, el controlador avisa al operador del área que puede alinear el sistema y trasegar la mezcla reactiva a K-212 mediante P-224, antes de comenzar el bombeo abre el calentamiento en K-212 y conecta el dispositivo de agitación del mismo, y a su vez cierra calentamiento en K-211, terminado el bombeo el operador del área desconecta el dispositivo de agitación de K-211 y avisa al controlador que ha culminado la operación, comenzando así la elevación de temperatura hasta 175 ° C, a esta temperatura el operador del área toma muestra a través de la escotilla del reactor para análisis del contenido de álcalis libre, durante la toma de muestra se desconecta el dispositivo de agitación. A continuación sigue elevando la temperatura hasta 185°C y de la misma forma anterior se toma muestra para alcalinidad la que no debe ser >0.1 % NaOH, se continúa la elevación de temperatura hasta fusión completa $T \cong 210-215$ ° C (según Lisan-2 o Lisan-3) lo cual se observa visualmente, en este momento el operador del área cierra el calentamiento a K-212 y lo abre en K-211 para proceder a una nueva carga o a alguna evaporación. Se mantiene la mezcla reactiva durante 10min. a esta temperatura (tratamiento térmico).

6. Enfriamiento

Mientras ocurre el tratamiento térmico el operador del área en el terreno alinea el sistema y mediante la bomba P-261 suministra aceite a la mezcladora desde los tambores (D-261 ó D-262) ó (D-265 ó D-266) según tipo de aceite y abre válvula de entrada de aceite a la misma para realizar un enfriamiento a razón de cambio de 1– 2 °C / min., el controlador desde la Sala de Control setea en el contador volumétrico la cantidad a dosificar y arranca la bomba, al concluir el bombeo éste avisa al operador del área que ha concluido la operación para que cierre la válvula de entrada a la mezcladora; con la adición de aceite se logra una temperatura $\cong$ (175 – 185 ° C).

7. Isoterma

Para realizar la Isoterma a la temperatura se mantiene por 30min. a esta temperatura (175 – 185 ° C) manteniendo el mezclado.

8. *Enfriamiento*

Al concluir la Isoterma el controlador avisa al operador del área para continuar con la etapa de enfriamiento completo hasta $T \leq 100^{\circ} \text{C}$, según los siguientes esquemas:

K-212 → P-210 → E-211 → K-212

K-212 → P-210 → E-211 → K-202

K-202 → P-203 → E-211 → K-202

para lo cual abre entrada de agua al enfriador, conecta la bomba P-210 y conecta el enfriador.

9. *Filtración, Desaereación, Homogenización*

El operador del área de proceso en coordinación con el operador del área de los homogeneizadores alinean el sistema desde la mezcladora hasta el tambor de grasa terminada para comenzar la operación.

El operador del área de proceso alinea la bomba P-210 así como válvulas en la recirculación interna de la mezcladora, descarga de la bomba y Bay-Pass del enfriador, y el operador del área de homogenización alinea filtro y bomba M-6 de K-214, homogeneizador (K-230 o K-230 A), válvulas del tambor de grasa terminada y válvulas del sistema, por último el operador del área de proceso avisa al operador del área de homogenización que va a comenzar el bombeo, durante la operación se mantiene la recirculación del producto a la mezcladora a través de la línea de retorno de los tambores de grasa terminada, durante esta etapa ocurre:

Homogenización:

K-212 → P-210 → Filtro (K-204 o K-214) → M-6 (K-204 o K-214) → (K-230 o K-230A) → tambor de grasa terminada

Recirculación:

K-212 → P-210 → Válvula 101 → Línea retorno a K-212

Terminada la homogenización, el operador del área de proceso desconecta la bomba y cierra las válvulas que anteriormente había abierto y el operador del área

de homogenización desconecta K-204 o K-214 (filtro, M-6) y el K-230 o K-230A y luego procede a cerrar las válvulas del tambor de grasa terminada así como las válvulas del sistema de recirculación informando al controlador que ha concluido la operación. Durante la homogenización el operador debe de estar muy atento al nivel en la tolva de K-204 o K-214 para evitar derrame así como al buen funcionamiento de K-230 o K-230A.

Luego de conocer el flujo productivo de la planta se puede decir que los componentes más importantes del sistema son el reactor K-212 y el enfriador E-210 en los cuales ocurren las etapas del proceso fundamentales para la formación de la grasa, las cuales dependen mucho (como casi todo el proceso) de manejar y/o mantener la temperatura en valores requeridos y en ocasiones muy específicos así como el tiempo en que deben mantenerse.

1.1.2 Reacciones Químicas

Si determinadas sustancias, sometidas a condiciones específicas, se transforman en otras diferentes como consecuencia de la distribución de sus átomos, se dice que se ha efectuado una reacción química.

Isoterma: como se representa en la figura 1.1.2 la isoterma resulta ser el cambio de temperatura reversible en un sistema termodinámico, siendo el cambio constante para todo el sistema. Es un elemento y una herramienta que resulta fundamental a la hora de medir la temperatura de una zona determinada.

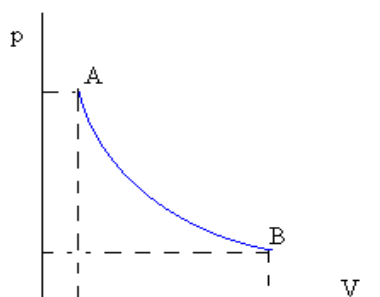


Figura 1.1.2 Gráfica de Isoterma

1.1.3 Reactor Químico Encamisado, componentes:

El reactor químico encamisado, constituye un equipo cuya finalidad es transformar un producto (reactivo) A en otro B. Esta transformación es generalmente exotérmica y debe realizarse a temperatura constante. Para conseguir que la reacción se desarrolle a temperatura constante, se dota al reactor de una camisa que está en contacto con las paredes del tanque, a través de la cual se hace pasar un líquido refrigerante o calefactor. Para un mejor entendimiento se muestra en la figura 1.1.4 los componentes de un RQE.

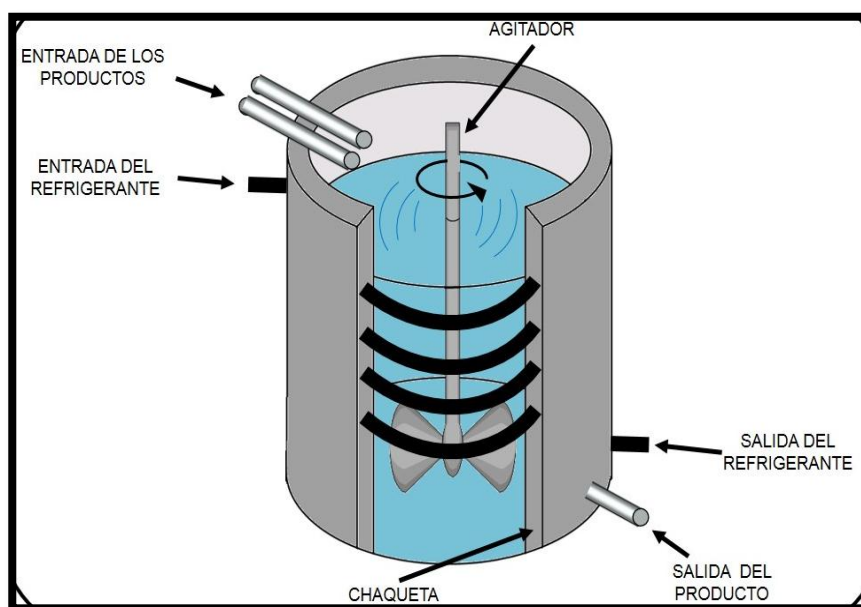


Figura 1.1.3: Componentes de un RQE

1.1.4 Enfriador-Raspador, componentes:

El enfriador-raspador está diseñado para disminuir la temperatura de un producto, que es transportado por un tornillo sin fin de un extremo al otro del enfriador, mientras esto ocurre, en la camisa recircula constantemente el refrigerante, en este caso agua a temperatura ambiente. En la figura 1.1.4 se muestran los componentes de un enfriador.

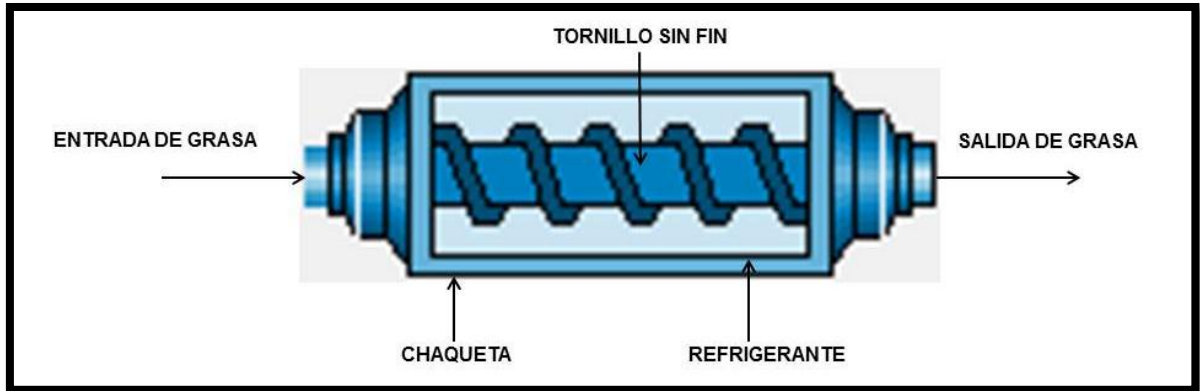


Figura 1.1.4 Componentes de un Enfriador

1.2 Identificación de Sistemas

El funcionamiento de los procesos industriales ha cambiado drásticamente en las últimas décadas. Este cambio es debido principalmente a la evolución de la tecnología del ordenador. La automatización de los procesos ha aportado un aumento de la productividad de algunos sectores industriales, obligando a la industria a adaptarse a las demandas de mercado y aumentar su competitividad. Para aumentar dicha competitividad ha sido necesario desarrollar nuevas técnicas: métodos y herramientas que permitan maximizar la eficiencia de los procesos, desarrollando controladores de gran cualidad, y maximizar la flexibilidad de los procesos con el menor ajuste de la máquina.

Para diseñar sistemas de control es preciso obtener un modelo matemático del proceso a controlar, lo que supone en la mayoría de los casos la obtención de la estructura y parámetros de dicho modelo, generalmente dinámico, que reproduce con suficiente exactitud, para los fines deseados, el comportamiento del sistema [14].

El término Identificación de sistemas fue acuñado por Lofti Zadeh [17] en 1962, como: "Identificación es la determinación, en base a la entrada y la salida, de un sistema, dentro de una clase de sistemas especificada, al cual el sistema probado es equivalente".

Se puede definir de manera más sencilla que la *identificación* "consiste en expresar, mediante un modelo matemático, el comportamiento de un proceso" o

como “la técnica de construir un modelo a partir de las variables medidas del proceso: entradas, salidas y, posiblemente, perturbaciones”.

1.2.1 Antecedentes de la Identificación de Sistemas

La identificación de sistemas quedó establecida como un campo de investigación reconocido dentro del área de control automático a mediados de los sesenta: en el tercer congreso de la IFAC en Londres, 1966 en el que fue presentado un artículo de visión general sobre identificación de sistemas [7]. Un año después fue organizado el primer Symposium IFAC sobre identificación de sistemas en Praga. En la actualidad es el Symposium con la serie más larga de la IFAC.

Al final de los sesenta y comienzo de los setenta se desarrollaron los métodos de identificación de sistemas por mínimos cuadrados y de máxima verosimilitud, este último fue desarrollado por Fisher en 1912 y aplicado en sistemas industriales por Åström y Bohlin en 1965.

A partir de la década de los 80, se hizo énfasis en la identificación de sistemas de múltiples entradas y salidas (MIMO), y en los 90, en la identificación con fines de control de procesos industriales [18], donde se abrieron nuevas áreas de interés tales como: diseño del experimento, identificación a lazo cerrado, identificación en el dominio de la frecuencia, y análisis y diseño de control robusto basado en datos experimentales [16]. Dentro de la identificación, una de las ramas más activas durante los últimos años, ha sido la utilización de modelos paramétricos. De la misma forma, la obtención de modelos directamente en el espacio de estado, ha obtenido un considerable desarrollo teórico. [18]

La identificación de sistemas se ha extendido en la actualidad al análisis de dinámicas más complejas, a través de la utilización de técnicas novedosas. Dentro de las técnicas más investigadas recientemente se encuentran las basadas en los sistemas biológicos y la inteligencia humana, que agrupan las redes neuronales artificiales, la lógica difusa y los algoritmos evolutivos [7].

1.2.2 Técnicas de Identificación

Un gran número de los métodos de diseño de sistemas de control se basan en el conocimiento del modelo del sistema a controlar. Aunque los modelos obtenidos representan una aproximación del sistema real, resultan suficientes para tomar las decisiones necesarias en el control.

La utilización de una u otra metodología para la construcción de modelos responde a las necesidades concretas, siempre teniendo en cuenta que, un modelo [16]:

- ✓ Es desarrollado siempre a partir de una serie de aproximaciones e hipótesis y, por ende, es una representación parcial de la realidad.
- ✓ Es construido para una finalidad específica y debe ser formulado para que sea útil a dicho fin.
- ✓ Tiene que ser un compromiso, por necesidad, entre la simplicidad y la necesidad de recoger los aspectos esenciales del sistema en estudio.

Teniendo en cuenta los objetivos que se persiguen con el modelo, el procedimiento de identificación posee dos vertientes fundamentales, éstas son:

1. **Identificación analítica:** consiste en desarrollar un modelo a partir del conocimiento de las relaciones físico-químicas que describen el comportamiento del proceso a identificar, planteando ecuaciones de balance de masa, energía, u otras. Es importante considerar la complejidad que este método presenta a la hora de considerar todas las leyes físicas que intervienen en un proceso. Esta técnica de identificación obvia las tolerancias de los elementos, desgastes, fuentes de ruido no consideradas, entre otras, hacen que el comportamiento real nunca sea el previsto [2].
2. **Identificación experimental:** en la cual se considera el sistema como una “caja negra” con determinadas entradas y salidas. En este caso se realiza un conjunto de experimentos que proporcionan pares de medidas de las entradas y salidas durante la evolución del sistema hacia el estado

estacionario, a partir de los cuales se trataría de determinar el modelo del sistema [2].

El modelado por vía analítica presenta un restringido campo de aplicación a procesos muy sencillos de modelar, o a aplicaciones en que no se requiera gran exactitud en el modelo obtenido. Además, en muchos de los casos, la estructura del modelo obtenido a partir del conocimiento físico de la planta posee un conjunto de parámetros desconocidos y que sólo se pueden determinar experimentando sobre el sistema real. De ahí la necesidad de recurrir a los métodos de identificación por vía experimental [16].

Sin embargo, los modelos obtenidos mediante técnicas de identificación, presentan las siguientes desventajas:

1. Suele ser limitado su rango de validez (sólo son aplicables a un determinado punto de trabajo, un determinado tipo de entrada o un proceso concreto).
2. Los parámetros identificados no tienen relación directa con ninguna magnitud física, por tanto, en muchos casos es difícil dar significado físico al modelo obtenido [16]. Utilizándose sólo estos parámetros para dar una descripción aceptable del comportamiento conjunto del sistema.

En la práctica, lo ideal es recurrir a una mezcla de ambos métodos de modelado para obtener el modelo final. El uso de datos reales para identificar los parámetros del modelo provee a este de mayor exactitud, pero el proceso de identificación se ve tanto más facilitado cuanto mayor sea el conocimiento sobre las leyes físicas que rigen el proceso [9].

1.2.3 Proceso de Identificación Experimental

En términos generales, el proceso de identificación comprende los siguientes pasos:

1. Obtención de datos de entrada - salida. Para ello se debe excitar el sistema mediante la aplicación de una señal de entrada y registrar la evolución de sus entradas y salidas durante un intervalo de tiempo.
2. Tratamiento previo de los datos registrados. Los datos registrados están generalmente acompañados de ruidos indeseados u otro tipo de imperfecciones que puede ser necesario corregir antes de iniciar la identificación del modelo. Se trata, por tanto, de preparar los datos para facilitar y mejorar el proceso de identificación.
3. Elección de la estructura del modelo. Si el modelo que se desea obtener es un modelo paramétrico, el primer paso es determinar la estructura deseada para dicho modelo. Este punto se facilita en gran medida si se tiene un cierto conocimiento sobre las leyes físicas que rigen el proceso.
4. Obtención de los parámetros del modelo. A continuación se procede a la estimación de los parámetros de la estructura que **mejor ajustan la respuesta del modelo** a los datos de entrada-salida obtenidos experimentalmente.
5. Validación del modelo. El último paso consiste en determinar si el modelo obtenido satisface el grado de exactitud requerido para la aplicación en cuestión. Si se llega a la conclusión de que el modelo no es válido, se deben revisar los siguientes aspectos como posibles causas:
 - a) El conjunto de datos de entrada-salida no proporciona suficiente información sobre la dinámica del sistema.
 - b) La estructura escogida no es capaz de proporcionar una buena descripción del proceso.
 - c) El criterio de ajuste de parámetros seleccionado no es el más adecuado.

Dependiendo de la causa estimada, deberá repetirse el proceso de identificación desde el paso correspondiente. El proceso de identificación es un proceso iterativo, en la figura 1.2 se describe la metodología a emplear para la realización de la identificación y obtención de un modelo valido de cualquier sistema por la vía experimental, descrita anteriormente.

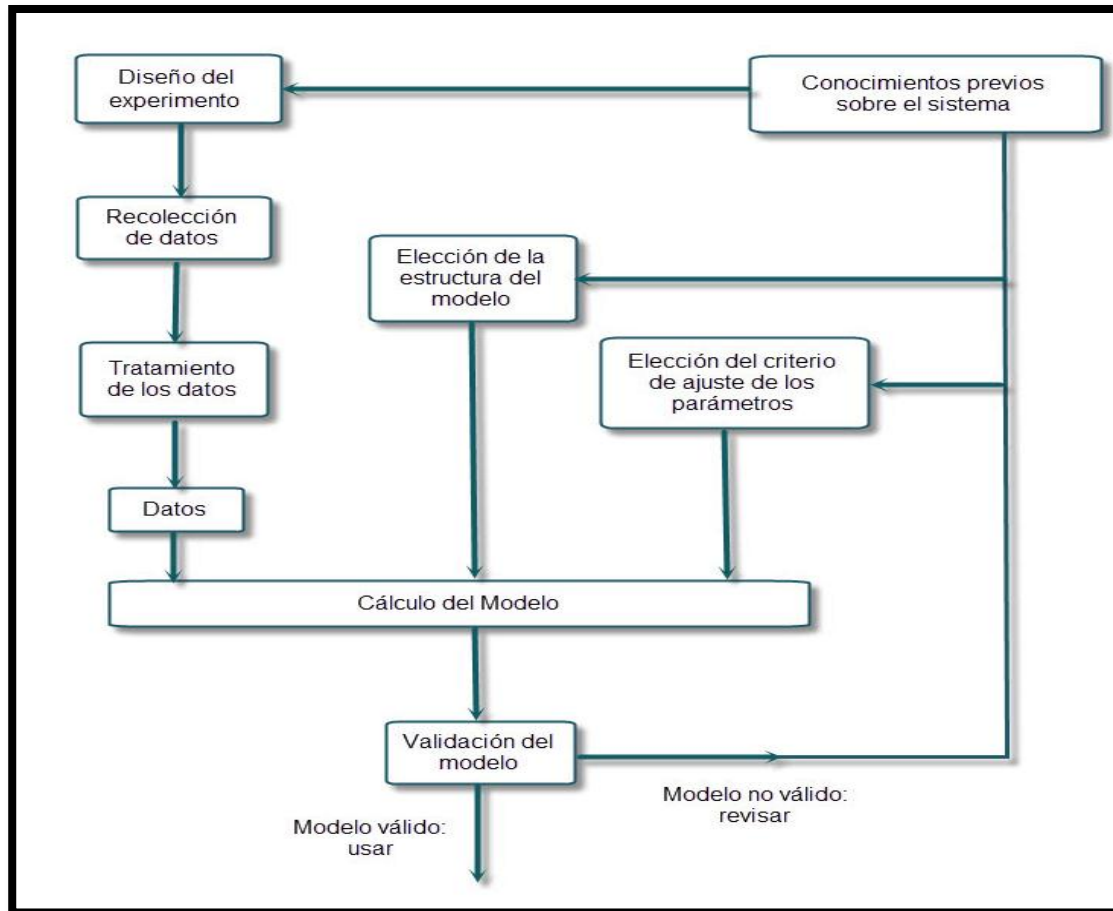


Figura 1.2.3: Esquema del proceso de identificación experimental.

1.2.4 Métodos de Identificación

Existen diversos métodos de identificación, que pueden clasificarse según distintos criterios [8]:

✓ Dependiendo de la aplicación:

- Métodos de identificación off-line (a posteriori), utilizados en aquellas aplicaciones en que no se requiera un ajuste continuo del modelo. En estos casos, se realiza la identificación previa de la planta, considerándose que la validez de los parámetros obtenidos no se verá alterada con el paso del tiempo.
- Métodos de identificación on-line (identificación recursiva), en los que los parámetros se van actualizando continuamente a partir de los nuevos datos

de entrada-salida obtenidos durante la evolución del proceso. Estos métodos son muy utilizados en sistemas de control adaptativo.

✓ Dependiendo del tipo de modelo obtenido:

- a) Métodos no paramétricos, permiten obtener modelos no paramétricos del sistema bajo estudio. Algunos de estos métodos son: análisis de la respuesta transitoria, análisis de la respuesta en frecuencia, análisis de la correlación, análisis espectral, análisis de Fourier, etc.
- b) Métodos paramétricos, permiten obtener modelos paramétricos. Estos métodos requieren la elección de una posible estructura del modelo, de un criterio de ajuste de parámetros, y por último de la estimación de los parámetros que mejor ajustan el modelo a los datos experimentales.

✓ Dependiendo del criterio de ajuste de los parámetros:

Existen diversos métodos matemáticos para ajustar los parámetros de una estructura a un conjunto de datos de entrada-salida. Algunos de los más utilizados en el campo de la identificación son el método de Mínimos Cuadrados y el método de las Variables Instrumentales [8].

1.2.5 Técnicas de Identificación Paramétrica

En la actualidad el desarrollo de las ciencias en el marco de la computación, ha permitido crear herramientas de software para la identificación de sistemas, entre estas se encuentra el MATLAB, con esta herramienta es posible procesar modelos no paramétricos y paramétricos como ARX (Auto-Regressive Xogen), ARMAX (Auto Regressive Moving Averagee Xogen), Modelo OE (Output-Error), Análisis de Correlación, Estimación Directa de Respuesta a Impulso entre otros.

En la figura 1.2.5 se muestra el diagrama en bloques equivalente para cada uno de los modelos anteriores.

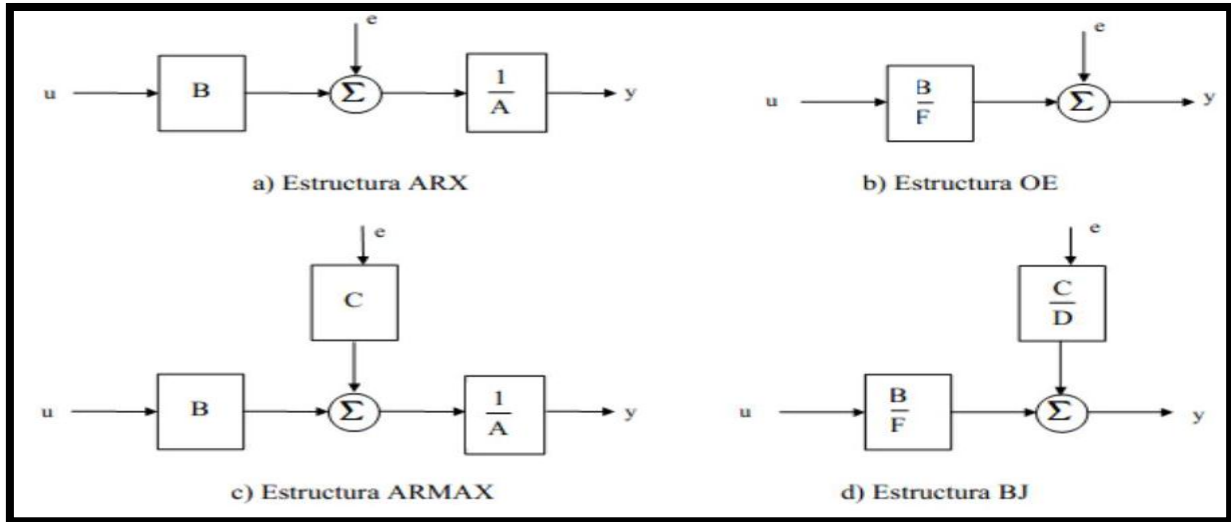


Figura 1.2.5: Diagrama en bloques de las estructuras de modelos paramétricos.

La anulación de alguno de los polinomios, resultando en estructuras simplificadas, facilita el proceso de ajuste de parámetros. Cada una de las estructuras (ARX, ARMAX, OE o BJ) tiene sus propias características y debe ser elegida fundamentalmente en función del punto en el que se prevé que se añade el ruido en el sistema. En cualquier caso, puede ser necesario ensayar con varias estructuras y con varios órdenes dentro de una misma estructura hasta encontrar un modelo satisfactorio [16].

Una vez elegida la estructura del modelo, tanto el tipo (ARX, ARMAX, OE, BJ,...) como los órdenes de cada polinomio, es necesario determinar el valor de los parámetros del mismo que ajustan la respuesta del modelo a los datos de entrada - salida experimentales [16]. El software profesional MATLAB posee un "Toolbox" para la Identificación de sistemas, el cual constituye una poderosa herramienta para esta etapa del proceso de identificación, proporcionando diferentes algoritmos para el ajuste de parámetros. Uno de los métodos o criterios para realizar este ajuste de parámetros, es el método de mínimos cuadrados.

La identificación con el MATLAB se puede realizar de varias formas, una de ellas es a través de la interfaz gráfica Ident, la cual facilita construir los modelos. Otra forma es mediante la creación de programas de identificación a partir de ficheros con extensión ".m", utilizando los comandos de este "Toolbox". Esta herramienta

posee la ventaja de proveer varios métodos y estructuras para obtener un modelo que se aproxime al sistema real. Además nos permite analizar y validar los modelos utilizando respuestas frecuenciales y temporales, así como el análisis de los residuos.

1.2.6 Señales de entrada utilizadas para la Identificación de Sistemas

Algunas de las señales de entrada usadas con más frecuencia son:

- Ruido Blanco Gaussiano Filtrado (de banda limitada).
- Secuencias Binarias Aleatorias (SBA o por sus siglas en inglés RBS).
- Secuencias Binarias Pseudo Aleatorias (SBPA o por sus siglas en inglés PRBS).
- Suma de sinusoides.
- Escalón.

En la práctica es difícil transmitir una señal modulada en amplitud sin que se distorsione, por lo tanto, en este aspecto el formato binario ofrece una obvia ventaja, además es simple de generar. Como es conocido, el ruido blanco es una señal hipotética que no puede ser físicamente realizada, puesto que su espectro de frecuencias es infinito. No obstante, si se genera una señal de ruido cuyo ancho de banda es bastante mayor que el del sistema a identificar, a los efectos prácticos dicha señal se comporta como el ruido blanco y puede utilizarse para la identificación con un error despreciable.

Hablando en términos del dominio tiempo, eso significa que la señal de autocorrelación de la señal aleatoria o ruido debe aproximarse suficientemente a la Delta de Dirac [1].

Existen al menos 2 tipos de señales que poseen esa propiedad:

1. Ruido analógico con un espectro de frecuencia mucho mayor que el ancho de banda del sistema.
2. Secuencias Binarias Pseudo Aleatorias (SBSA).

Las señales aleatorias poseen con respecto a otras, como el escalón, la ventaja de que su amplitud puede ser muy pequeña, reduciéndose por tanto el grado de

perturbación que se introduce en la planta objeto de identificación. Por otra parte, estas señales pueden superponerse a los valores normales de la variable de entrada, independientemente de las variaciones de esta, sin que se afecte, al menos teóricamente, el proceso de identificación. Las SBSA son secuencias periódicas que se codifican mediante ceros y unos, y que tienen un período igual a: $N = 2^m - 1$, donde m es el orden de secuencia.

1.3 Configuraciones de Control

Según las condiciones de trabajo es necesario comentar que si la temperatura de la grasa no sube o baja en el tiempo deseado esta tiende a oscurecerse porque se queman las partículas al mantenerse mucho tiempo en una temperatura que no sea la necesaria para la reacción. Esta situación impone que el control de la temperatura en el proceso es de suma importancia para lograr la calidad adecuada del producto final así como la eficiencia del proceso. Por tales razones se hace referencia a los distintos lazos de control de temperatura en reactores químicos [5] y enfriadores mostrado en la figura 1.3 a.

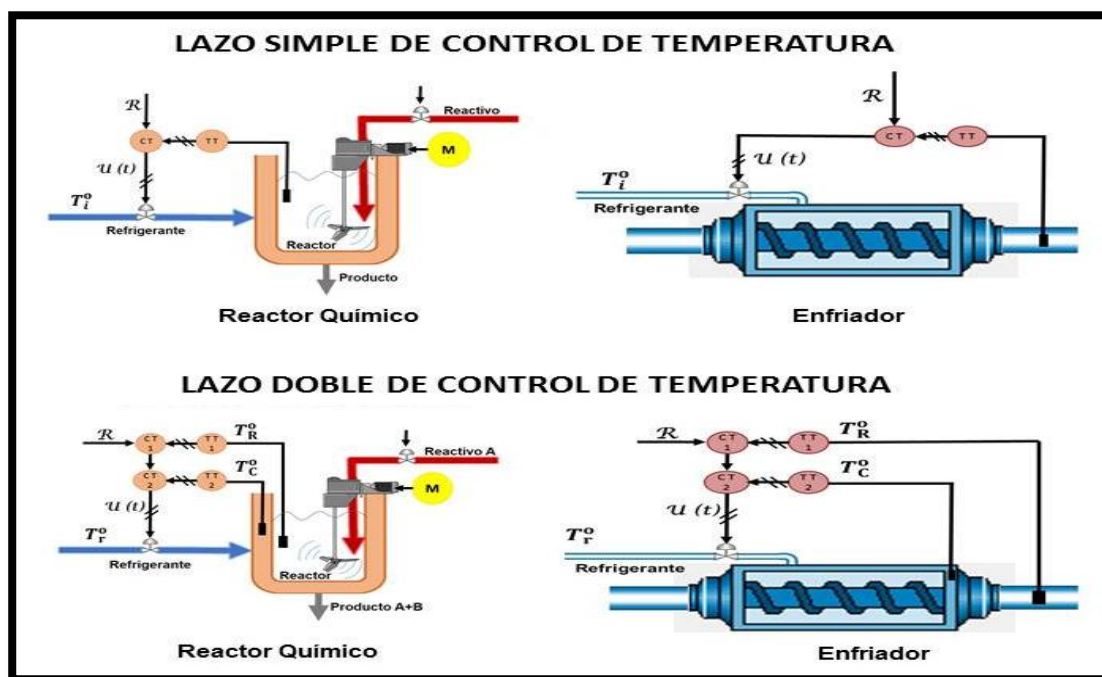


Figura 1.3 a: Configuraciones para el control de temperatura en el proceso.

Por lo explicado acerca de la complejidad de este proceso, para su control es necesario abordar sobre los posibles lazos de control de otras variables no menos importantes, es decir, lazos de control de nivel, flujo, concentración, entre otras variables necesarias de conocer y controlar para lograr una mejor calidad en el producto terminado. En la figura 1.3 b se muestran algunas de las distintas configuraciones de control para dichas variables.

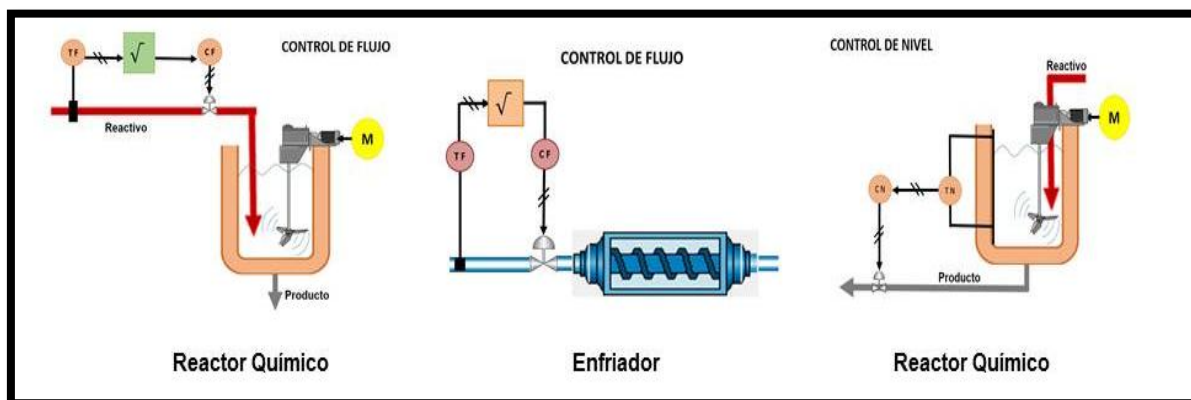


Figura 1.3 b: Configuraciones para el control de flujo y nivel en RQE y Enfriador

1.3.1 Otras Configuraciones de Control

Hasta el momento se ha hablado en su mayoría de las configuraciones de control que responden al tipo *control realimentado* pero existen otros tipos de configuraciones como por ejemplo:

1. Control Anticipatorio. El sistema de control anticipatorio, se basa en la medición de la perturbación antes de entrar al proceso y en la comparación entre ésta y el valor deseado de la variable controlada. Este sistema, (mostrado en la figura 1.3.1) “modifica el valor de la variable manipulada antes que la variable controlada sea afectada por la acción de la perturbación”, es decir, la medición de la perturbación produce una acción correctiva que se inicia de inmediato con el objetivo de cancelar o reducir su efecto en la variable controlada.

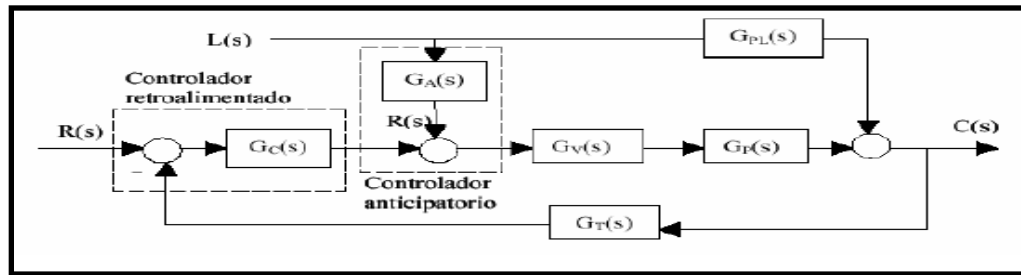


Figura 1.3.1 a Lazo de control anticipatorio

El control de relación, como se puede observar en la figura 1.3.1 b es una configuración anticipatoria retroalimentada para mantener constante la relación entre dos variables medidas, mediante la regulación de una de ellas denominada variable secundaria como una función de la otra, variable primaria.

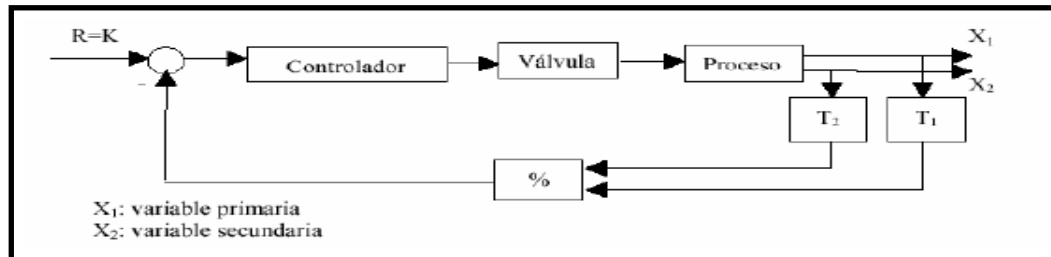


Figura 1.3.1 b Lazo de control de relación

2. Control selectivo. Configuración que emplea dos o más variables medidas (controladas) y una sola variable manipulada.

- Control de Protección: Se implementa en el control con lazo retroalimentado de una variable pero tomando en cuenta que otra variable del proceso no exceda un valor límite máximo o mínimo, así se refleja en la figura 1.3.1 c.

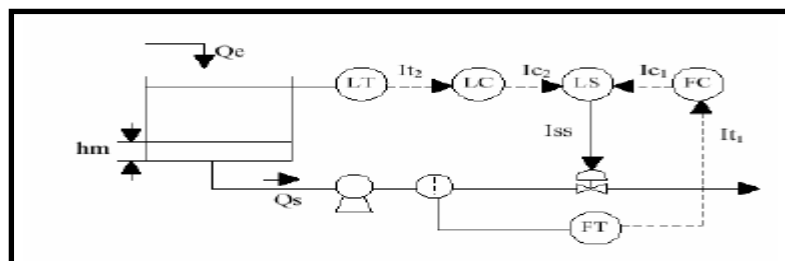


Figura 1.3.1 c Lazo de control de protección

- **Control Subastador:** Esta configuración (figura 1.3.1 d) se emplea para seleccionar de un conjunto de variables medidas de igual naturaleza, aquella con el mayor o menor valor y alimentada al único controlador existente.

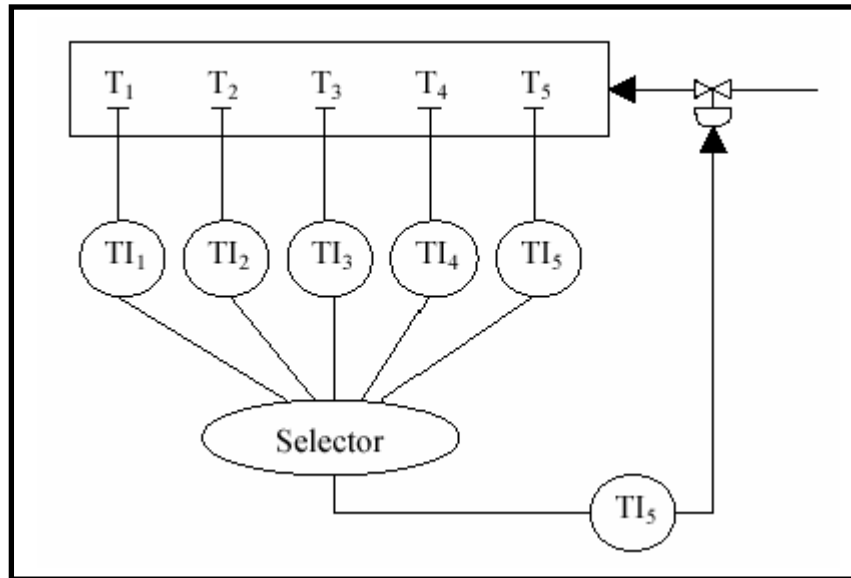


Figura 1.3.1 d Lazo de control subastador

3. **Control inferencial.** Esta configuración, mostrada en la figura 1.3.1 e, se emplea para controlar una variable que no se mide, que es afectada por una perturbación que tampoco se mide y por una variable manipulada que se mide.

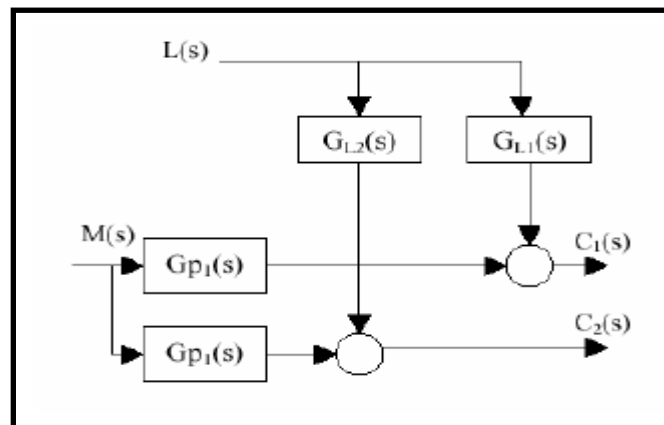


Figura 1.3.1 e Lazo de control inferencial

1.3.2 Estrategias de Control

Las perturbaciones causan que la variable controlada se desvíe del valor deseado, por tanto la acción de control tiene que ser cambiada para mantener la variable de salida a régimen estacionario en el referido valor. Lo anterior se puede lograr mediante varias vías o estrategias de control.

La estrategia de control es un conjunto de ecuaciones, reglas (algoritmos) con las cuales se determinan las acciones de control necesarias que especifican un comportamiento dado en la variable controlada.

1.3.2.1 Clasificación de las Estrategias de Control

Basado en modelo

- PID (Analógico y Digital)
- IMC (Analógico y Digital)
- Deadbeat (Digital)
- Dahlin (Digital)
- Predictor de Smith (Digital)

Basado en conocimiento

- Sistemas Expertos
- Lógica Borrosa
- Redes Neuronales

1.3.3 Métodos de Ajuste del controlador

Es el procedimiento mediante el cual se acomodan los parámetros de controladores por retroalimentación para obtener una respuesta específica del lazo cerrado de un proceso con características dinámicas específicas.

1.3.3.1 Métodos basados en la Respuesta Transitoria

Son métodos que emplean la respuesta transitoria a lazo abierto del proceso representado por un modelo de primer orden con tiempo muerto para obtener la

respuesta del proceso a lazo cerrado con relación de caída $\frac{1}{4}$ o con mínima integral del error. Estructura del modelo del proceso a lazo abierto:

$$G(s) = \frac{K\varepsilon^{\theta s}}{Ts+1} \text{ donde:}$$

- $G(s) = Gv(s) * Gp(s) * Gt(s)$
- K: ganancia adimensional

Métodos para la mínima integral del error

- IAE
- ISE
- ITAE

Puesto que la función de transferencia del proceso es diferente para cada perturbación y la señal de salida del controlador, los parámetros óptimos de ajuste dependen de la velocidad relativa de la respuesta de la variable controlada a la perturbación, mientras más lenta sea la respuesta a la perturbación, con más rigor se puede ajustar el controlador y su ganancia puede ser más alta; en el otro extremo, si la variable controlada responde instantáneamente a la perturbación, el ajuste del controlador será lo menos riguroso posible, lo cual equivale al ajuste para cambios en el punto de control [14]. A continuación se muestran las tablas para los ajustes de los parámetros del controlador según los métodos de la mínima-integral del error en cada una de las variables explicadas anteriormente.

Acción de control	Criterios. Valores de sus parámetros		
	ISE	IAE	ITAE
P $K_C = \frac{a}{K} \alpha^b$	$a = 1,411$ $b = -0,917$	$0,902$ $-0,985$	$0,490$ $-1,084$
PI $K_C = \frac{a_1}{K} \alpha^{b_1}$ $t_i = \frac{T}{a_2} \alpha^{b_2}$	$a_1 = 1,305$ $b_1 = -0,959$ $a_2 = 0,492$ $b_2 = 0,739$	$0,984$ $-0,986$ $0,608$ $0,707$	$0,859$ $-0,977$ $0,674$ $0,680$
PID $K_C = \frac{a_1}{K} \alpha^{b_1}$ $t_i = \frac{T}{a_2} \alpha^{b_2}$ $t_d = a_3 T \alpha^{b_3}$	$a_1 = 1,495$ $b_1 = -0,945$ $a_2 = 1,101$ $b_2 = 0,771$ $a_3 = 0,560$ $b_3 = 1,006$	$1,435$ $-0,921$ $0,878$ $0,749$ $0,482$ $1,137$	$1,357$ $-0,947$ $0,842$ $0,738$ $0,381$ $0,995$

Tabla 1.3.3.1 a: Fórmulas y coeficientes para calcular el ajuste del controlador continuo para cambios en la perturbación.

Acción de control	Criterios. Valores de sus parámetros	
	IAE	ITAE
PI $K_C = \frac{a_1}{K} \alpha^{b_1}$ $t_i = \frac{T}{a_2 + b_2 \alpha}$	$a_1 = 0,758$ $b_1 = -0,861$ $a_2 = 1,02$ $b_2 = -0,323$	$0,586$ $-0,916$ $1,03$ $-0,165$
PID $K_C = \frac{a_1}{K} \alpha^{b_1}$ $t_i = \frac{T}{a_2 + b_2 \alpha}$ $t_d = a_3 T \alpha^{b_3}$	$a_1 = 1,086$ $b_1 = -0,869$ $a_2 = 0,740$ $b_2 = -0,130$ $a_3 = 0,348$ $b_3 = 0,914$	$0,965$ $-0,855$ $0,796$ $-0,147$ $0,308$ $0,9292$

Tabla 1.3.3.1 b: Fórmulas y coeficientes para calcular el ajuste del controlador continuo para cambios en el punto de control.

1.3.3.2 Métodos basados en la Respuesta Frecuencial

Métodos que emplean la respuesta frecuencial a lazo abierto del proceso representado por modelos de diferente orden y respuesta específica del proceso a lazo cerrado:

- Método de Ziegler-Nichols de las oscilaciones continuas
- Método del Margen de Ganancia
- Método del Margen de Fase

1.4 Automatización Industrial

Partiendo de que el **objetivo** de esta **investigación** es proponer una estrategia de control adecuada (*automatización a los niveles de campo y control*) que permita mejorar la eficiencia y la calidad del producto del subproceso perteneciente a la planta de grasa de la UEBP de Lubricantes (CUBALUB) se hace el estudio siguiente.

La automatización es un sistema donde se transfieren tareas de producción, realizadas habitualmente por operadores humanos, a un conjunto de elementos tecnológicos. No es más que el funcionamiento de un conjunto de máquinas encaminado a un fin único, permitiendo realizar con poca o ninguna intervención del hombre una serie de trabajos industriales. En la esfera internacional la automatización ha alcanzado un gran desarrollo. Desde que la actividad artesanal comenzó a ser sustituida por la industrial, las empresas han procurado la obtención del máximo rendimiento del trabajo mediante la acción combinada de herramientas, máquinas y organización. Además en el orden económico, social y tecnológico se ha demostrado que la automatización de un proceso frente al control manual del mismo proceso, brinda ciertas ventajas y beneficios [11], pudiéndose resaltar las siguientes:

- Se obtiene una reducción de costos, puesto que se racionaliza el trabajo, se reduce el tiempo y dinero dedicado al mantenimiento.
- Existe una reducción en los tiempos de procesamiento de información.
- Flexibilidad para adaptarse a nuevos productos (fabricación flexible y multi-fabricación).

- Se obtiene un conocimiento más detallado del proceso, mediante la recopilación de información y datos estadísticos del proceso.
- Se obtiene un mejor conocimiento del funcionamiento de los equipos y máquinas que intervienen en el proceso.
- Factibilidad técnica en procesos y en operación de equipos.
- Factibilidad para la implementación de funciones de análisis, optimización y autodiagnóstico.
- Aumento en el rendimiento de los equipos y facilidad para incorporar nuevos equipos y sistemas de información.
- Disminución de la contaminación y daño ambiental.
- Racionalización y uso eficiente de la energía y la materia prima.

1.4.1 Estado del arte internacional de la automatización industrial

La automatización moderna ha evolucionado a la integración de diferentes tecnologías en redes de automatización industrial, donde coexisten equipamientos de diferentes fabricantes. Esto sólo ha sido posible con la aparición de los denominados “sistemas abiertos” (Open Systems). Con el surgimiento del transistor la automatización actual migró a la utilización de la lógica transistorizada y los microprocesadores, siendo los PLC (Programmable Logic Controller) y los DCS (Distributed Control Systems) las tecnologías de automatización más aceptadas en la industria, además de la explosión de las PCs (Personal Computers), estas últimas ampliamente utilizadas en los conocidos sistemas SCADA [13]. En la jerarquía de comunicaciones es útil considerar que la red de una planta es estructurada y el desarrollo de sus actividades está valorado por varios niveles. Estos niveles están reflejados en la figura 1.4.1 por la denominada pirámide de automatización, la cual en este caso solo percibe cuatro niveles: el campo, el mando o control, operaciones y empresa [3].

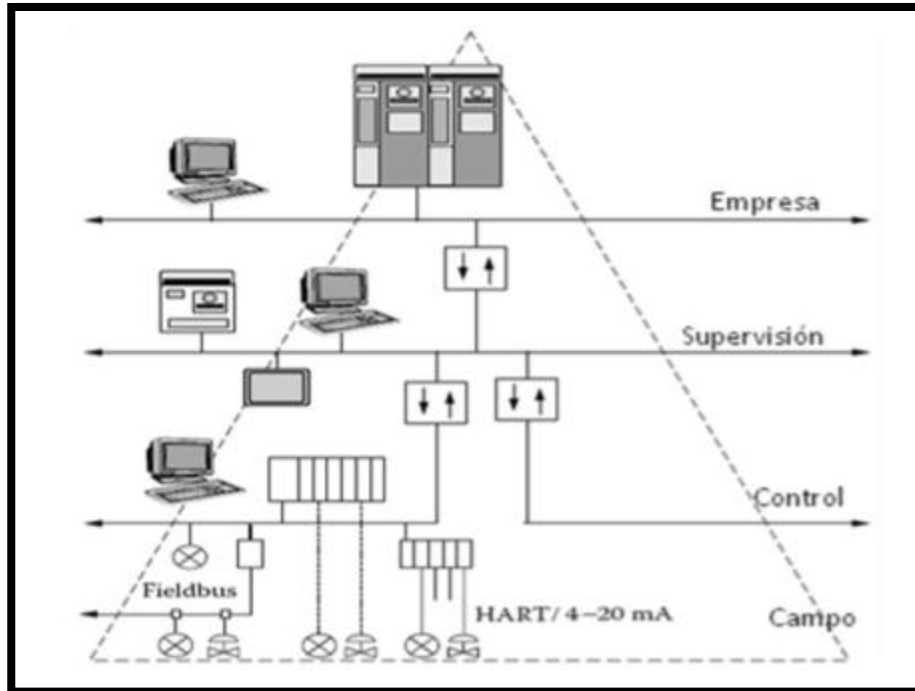


Figura 1.4.1: Pirámide de Automatización.

Nivel de campo: El nivel de campo comprende los sensores y actuadores que son requeridos para la interacción con el proceso de la planta. Los sensores miden las variables del proceso como: temperatura, presión, nivel, flujo, etc., y transmiten la señal al próximo nivel, el control. Existen dos tipos básicos de señales de campo:

- *Digitales:* informan si una variable del proceso que se está supervisando está dentro o fuera de límites, o si existió algún cambio de estado. En la actualidad las señales convencionales requieren de tarjetas de entrada/salida (en los PLC modulares) apropiadas en el sistema de control.
- *Continuas:* Es una señal proporcional (generalmente) a una variable del proceso. En la actualidad existen varios estándares para las señales analógicas (4 a 20 mA, 0 a 100 mV, ± 5 V, 0.2 a 1.0 kgf/cm², entre otros).

Los actuadores reciben la señal(es) del controlador(es), lo cual permite que estos realicen su función, por ejemplo, la activación de una bomba cuando la señal cambie de estado o cerrar una válvula en la proporción a la magnitud de la señal de control.

Nivel de control: Al nivel de control llegan las señales provenientes de los sensores ubicados en el campo, las cuales son procesadas para posteriormente generar comandos a los actuadores. Los agentes usuales en este nivel son: PLC y DCS.

- Un PLC puede usar la lógica de escalera simple y proporcionar el control en tiempo real (real-time) de una actividad. Este ejecuta sus tareas en una secuencia estricta mediante la exploración de sus entradas analógicas y/o discretas, generando a su salida comandos apropiados conforme a la situación.
- El control de proceso de sistemas modernos está basado en inteligencia distribuida. Aquí el control de varias partes de la planta está en manos de varios controladores o sistemas de control. Donde cada uno es responsable de su parte en la planta y trabajan autónomamente. Cada reporte retorna a la estación central ubicada en el cuarto de control. Dependiendo de la estructura de la red los controladores se pueden comunicar con la red del nivel de control superior o conectarse directamente con el nivel de dirección de la planta por distintas vías, por ejemplo Ethernet.

1.4.2 Breve análisis de la tecnología PLC

El autómatas programable (PLC). Un autómatas programable es un dispositivo de automatización industrial que dispone de n entradas y m salidas que lo comunican con el proceso a controlar u otros dispositivos, en el cual la relación funcional entre las entradas y salidas se establece a través de un programa que está cargado internamente en él. Puede considerarse como una microcomputadora de propósito específico [4].

1.4.2.1 Funciones principales que pueden realizar los PLC

1. Gobierno de sistemas de medición para valores límites de variables del proceso, finales de carrera, detectores de proximidad u otros sensores binarios.
2. Gobierno de sistemas de señalización y protecciones automáticas de distintos

tipos.

3. Control secuencial y de trabajo de distintos procesos.
4. Control de regímenes de arranque y parada del proceso y funcionamiento en condiciones de alarma o avería.
5. Sistemas de autodiagnóstico, autoprotección y determinación de fallas dentro y fuera del equipo.
6. Medición, conversión, filtraje y validación de señales analógicas del proceso para indicación, registro y/o control.
7. Control de señales analógicas (reguladores ON - OFF, PID).
8. Facilidades de modificación y perfeccionamiento del sistema de automatización del proceso.
9. Facilidades para el funcionamiento como maestros o esclavos de redes de automatización.
10. Control económico y optimización del proceso

1.4.2.2 Ventajas e inconvenientes en la utilización de PLC

Ventajas:

- Menor tiempo de elaboración de proyectos.
- Posibilidad de añadir modificaciones sin costo añadido en otros componentes.
- Menor costo de mano de obra.
- Mantenimiento económico.
- Posibilidad de gobernar varias máquinas con el mismo autómata.
- Menor tiempo de puesta en funcionamiento.
- Si el autómata queda pequeño para el proceso industrial puede seguir siendo de utilidad en otras máquinas o sistemas de producción.

Inconvenientes:

- Adiestramiento de técnicos.
- Costo elevado.

1.5 Aspectos necesarios para un Sistema Automatizado

En el mundo industrial, ocurre con frecuencia que el PLC para el control está colocado a una distancia tal que, el llevar todos los cables de las entradas y salidas hasta los distintas partes del sistema, exigirían un mazo de cables de grandes proporciones, con los consiguientes problemas de tendido de los mismos, espacio, pérdidas de señal, costo económico de material y colocación. Para evitar estos problemas lo mejor es la utilización de un bus de campo, el cual con sólo dos o cuatro hilos (según el tipo de bus), transmite la información de forma rápida y eficaz.

Teniendo en cuenta que el siguiente trabajo tiene como objetivo control automático de las distintas variables que intervienen en el proceso en una zona de la planta (por el momento) dadas algunas especificaciones para cada una de ellas como es atenuar la interferencia de tipo común y normal así como tener en cuenta los tiempos de cada zona para asegurar la rapidez de respuesta del sistema, se realiza un estudio detallado de los buses de campo.

1.5.1 Buses de Campo. Antecedentes

En el año 1987 las firmas alemanas Bosch, Klöckner Möller y Siemens iniciaron un proyecto de desarrollo de una arquitectura de comunicaciones industriales que permitiera la interconexión de equipos de distintos fabricantes. Esta fue la base de un grupo de trabajo al que se integraron otras grandes empresas tales como ABB, AEG, Landis & Gyr; algunas universidades y organizaciones técnicas estatales, entre ellas la propia VDE y el Ministerio Federal de Investigación Alemán.

Se formaron varios grupos de trabajo en distintas áreas, cuya tarea esencial fue la de desarrollar un sistema abierto de comunicaciones apto para integrar desde los sencillos transductores y elementos de campo, pasando por los autómatas y controles numéricos hasta llegar al nivel de los miniordenadores para diseño y gestión de la producción.

El primer objetivo fue sólo el diseño de un bus de campo con una estructura abierta y un protocolo compatible que permitiera enlazar con una red adoptada

como base en los niveles superiores (MAP), con lo que resultó el proyecto de normas y protocolos. A partir del año 1990 se abrió la posibilidad para cualquier usuario o empresa de integrarse en un consorcio denominado PROFIBUS Nutzer Organisation, que a través de diversos comités sigue desarrollando y dando soporte al nivel de aplicación y certificación de productos.

Para el análisis del trabajo con los buses de campo vale aclarar que nos centraremos en el estudio de los buses de campo serie ya que los buses de campo paralelo quedan descartados rápidamente por las especificaciones de distancia del trabajo. Para un mejor entendimiento de este trabajo es necesario tener en cuenta los siguientes conceptos:

BUS: Es el medio que permite conectar diferentes equipos de modo tal que se pueden transmitir varias señales en la misma línea, todos los dispositivos pueden intercambiar datos entre sí, y en cualquier momento se puede realizar una ampliación. Desde el punto de vista puramente económico puede ocurrir que el sistema de bus sea más costoso, pero por otra parte permite llevar a cabo una instalación más simplificada y rápida, igual que la puesta en funcionamiento.

Físicamente podemos considerar a un bus como un conjunto de conductores conectando conjuntamente a circuitos para permitir el intercambio de datos. Lo que es contrario a una conexión punto a punto, donde solo dos dispositivos intercambian información, un bus consta normalmente de un número de usuarios superior, además que generalmente un bus transmite datos en modo serie, a excepción de algún protocolo de bus particular como SCSI, o IEEE-488 utilizado para interconexión de instrumentos de medición, que no es el caso de los buses tratados como buses de campo.

Protocolo de Comunicación: Para una transmisión serie es suficiente un número de cables muy limitado, generalmente son suficientes dos o tres conductores y la debida protección contra las perturbaciones externas para permitir el tendido de distancias en ambientes de ruido industrial. El acceso a este medio de transmisión

común de datos exige reglas de convivencia muy severas, el conjunto de estas reglas se denomina protocolo.

Islas Automatizadas: células de trabajo sin comunicación entre sí.

La integración de las mencionadas islas automatizadas suele hacerse dividiendo las tareas entre grupos de procesadores jerárquicamente anidados. Esto da lugar a una estructura de redes Industriales, las cuales es posible agrupar en tres categorías:

- Buses de campo
- Redes LAN
- Redes LAN-WAN

BUS de campo: Los buses de datos que permiten la integración de equipos para la medición y control de variables de procesos, reciben la denominación genérica de buses de campo.

Un bus de campo es un sistema de transmisión de información (datos) que simplifica enormemente la instalación y operación de máquinas y equipamientos industriales utilizados en procesos de producción.

El objetivo de un bus de campo es sustituir las conexiones punto a punto entre los elementos de campo y el equipo de control a través del tradicional lazo de corriente de 4 -20mA o 0 a 10V DC, según corresponda. Generalmente son redes digitales, bidireccionales, multipunto, montadas sobre un bus serie, que conectan dispositivos de campo como PLCs, transductores, actuadores, sensores y equipos de supervisión.

Varios grupos han intentado generar e imponer una norma que permita la integración de equipos de distintos proveedores. Sin embargo, hasta la fecha no existe un bus de campo universal.

Los buses de campo con mayor presencia en el área de control y automatización de procesos son:

- HART.

- PROFIBUS.
- FIELBUS FOUNDATION.

1.5.1.1 Ventajas de los Buses de Campo

- aumento de precisión
- ahorro
- facilita el diseño
- mantenimiento

Además, los buses de campo permiten a los operadores monitorizar todos los dispositivos que integran el sistema e interpretar fácilmente las interacciones entre ellos. De esta forma, la detección de las fuentes de problemas en la planta y su corrección resulta mucho más sencilla, reduciendo los costos de mantenimiento y el tiempo de parada de la planta.

1.5.1.2 Algunos Buses de Campo

Existe una gran variedad de buses de campo en y muchos son altamente dependientes de las aplicaciones. A continuación se mencionaran y se comentará sobre algunos de ellos.

CAN es un bus de campo diseñado originalmente para su aplicación en vehículos.

SDS ("Smart Distributed System") es uno de los buses de campo basados en CAN más extendidos. Fue desarrollado por el fabricante de sensores industriales Honeywell en 1989. Se ha utilizado sobre todo en aplicaciones de sistemas de almacenamiento, empaquetado y clasificación automática.

ASI (Actuador Sensor Interface) es un bus de campo desarrollado inicialmente por Siemens, para la interconexión de actuadores y sensores binarios. Actualmente está recogido por el estándar IEC TG 17B.

Device Net es un bus basado en CAN. Es posible la conexión de hasta 64 nodos con velocidades de 125 Kbps a 500 Kbps en distancias de 100 a 500 m.

HART es un protocolo para bus de campo soportado por la HART Communication Foundation y la FIELDBUS Foundation. Su campo de aplicación básico es la

comunicación digital sobre las líneas analógicas clásicas de los sistemas de instrumentación, manteniendo éstas en servicio. Sus prestaciones como bus de campo son reducidas.

PROFIBUS se desarrolló bajo un proyecto financiado por el gobierno alemán. Las distancias potenciales de bus van de 100 m a 24 Km (con repetidores y fibra óptica). La velocidad de comunicación puede ir de 9600 bps a 12 Mbps. Utiliza mensajes de hasta 244 bytes de datos.

FIELD BUS FOUNDATION es un bus orientado sobre todo a la interconexión de dispositivos en industrias de proceso continuo. Presta especial atención a las versiones que cumplen normas de seguridad intrínseca para industrias de proceso en ambientes combustibles o explosivos.

Es evidente que el círculo del presente análisis sólo encierra a los buses de campo FIELD BUS Y PROFIBUS por las razones siguientes:

- Los buses CAN, SDS, ASI y Device Net no se pueden utilizar para este proyecto debido a que están diseñados fundamentalmente para integrar dispositivos simples como finales de carrera, fotocélulas, relés y actuadores simples, funcionando en aplicaciones de tiempo real, y agrupados en una pequeña zona de la planta, típicamente una máquina.
- El bus HART no se puede utilizar para este proyecto debido a que sus prestaciones como bus de campo son reducidas, además de que es lento.

1.5.2 Redes Eléctricas (RS485)

Es la transmisión más frecuentemente utilizada por PROFIBUS. Esta tecnología de transmisión es conocida como H2. Su área de aplicación incluye todas las áreas en las que se requieren alta velocidad de transmisión y una instalación sencilla. Tiene la ventaja de que posibles ampliaciones no influyen en las estaciones que se encuentran ya en operación.

1.5.2.1 Características de las Redes Eléctricas (RS485)

- Velocidad de transmisión de 9.6 Kbit/s a 12 Mbit/s. Se seleccionará una para todos los dispositivos.

- La estructura de la red es linear, con par trenzado.
- Conexión máxima de 32 estaciones sin repetidor (127 con repetidor).
- Longitud máxima del cable dependiente de la velocidad de transmisión, como se muestra en la figura 1.5.2.1.

<i>V.Baudios(kbit/sec)</i>	9.6	19.2	93.75	187.5	500	1500	2000
<i>Distancia</i>	1200m	1200m	1200m	1000m	400m	200m	100m

Tabla 1.5.2.1: Distancias basadas en la velocidad de transmisión.

En la conexión, es conveniente tener en cuenta algunas precauciones, de las que son destacables:

- Asegurarse de no torcer las líneas de datos.
- Se recomienda el uso de líneas de datos escudadas para mejorar la compatibilidad electromagnética (EMC).
- Mantener las líneas de datos separadas de los cables de alto voltaje.

1.5.2.2 Beneficios de las Redes Eléctricas (RS485)

- Versátiles posibilidades de aplicación gracias a toda una gama de cables de bus especiales.
- Red inmune a interferencias gracias a cables con pantalla doble y posibilidad de puesta a tierra de extremo a extremo. Ver figura 1.6.
- Ahorro de tiempo gracias al montaje de conectores rápido y simple con cables Fast Connect.
- Un sólo cable (ECOFAS^T Hybrid Cable) compartido para la transferencia de datos y la alimentación de tensión.

1.5.2.3 Construcción de las Redes Eléctricas (RS485)

Cable bifilar apantallado y trenzado con sección circular .Para todos los cables de bus para PROFIBUS es aplicable:

- Gracias al doble apantallado, particularmente aptos para tendido en entornos industriales con interferencias electromagnéticas como se muestra en la figura 1.5.2.3.
- Concepto de puesta a tierra homogéneo, realizable a través de la pantalla exterior del cable de bus y los bornes de puesta a tierra de los terminales del bus
- Marcas impresas cada metro.

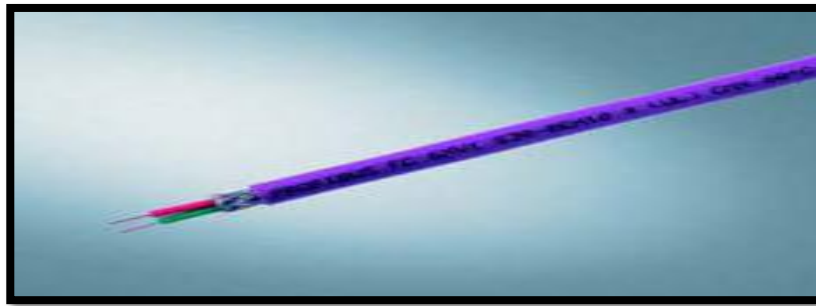


Figura 1.5.2.3: Cables de PROFIBUS.

1.6 Conclusiones Parciales del Capítulo

Luego del desarrollo el capítulo se puede concluir que:

- Se caracterizó el flujo productivo de la planta y de los reactores químicos como los elementos más importantes que intervienen en el proceso.
- Se profundizó en los fundamentos teóricos de la identificación de sistema y de las teorías de control, haciendo énfasis en las configuraciones de control en reactores químicos y métodos de ajuste de los controladores para las estrategias de control basados en modelo.
- Se confeccionó un estado del arte de la evolución de la automatización industrial, plasmando las ventajas que esta brinda, así como el estudio de los elementos necesarios para un sistema automatizado.

CAPÍTULO II:

PROCESO DE IDENTIFICACION Y RESULTADO DE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL EN EL RQE Y EL ENFRIADOR

En este capítulo se hace la identificación de la planta en estudio. Luego de obtener un modelo lo más cercano posible al comportamiento dinámico del subproceso en cuestión se procederá a la propuesta de los lazos de control para dar solución al problema planteado así como las estrategias para el control y la aplicación del método de ajuste de los parámetros del controlador. También se hará la propuesta de la instrumentación necesaria para poner en práctica el control planteado, es decir, se montará un sistema de medición y control que responda a las especificaciones requeridas.

2.1 Identificación experimental del Reactor K-212.

El proceso de identificación del reactor se desarrolló de manera experimental, adquiriendo las mediciones de forma manual debido a la no existencia en la planta de un sistema SCADA que proporcione los datos; tomando como variable de entrada la temperatura del líquido calefactor (Bot o mezcla de difenilo) que entra a la chaqueta del reactor y como variable de salida la temperatura en el interior de los reactores. Dichos datos se muestran en la *tabla del anexo 1*. El período de muestreo de los datos en K-212 fue de 1min teniendo en cuenta que desde el punto de vista práctico las etapas del proceso productivo que se llevan a cabo en K-212 son de larga duración. El procesamiento de los datos se hizo utilizando el toolbox System Identification Tool del Matlab 2012.

Para obtener un modelo apropiado se hicieron varios tratamientos previos a los datos como: Remover el valor medio; Filtrado; Remover tendencia y Seleccionar rango para tener un rango para estimación y otro para validación como se muestra en la parte izquierda de la figura 2.1.a.

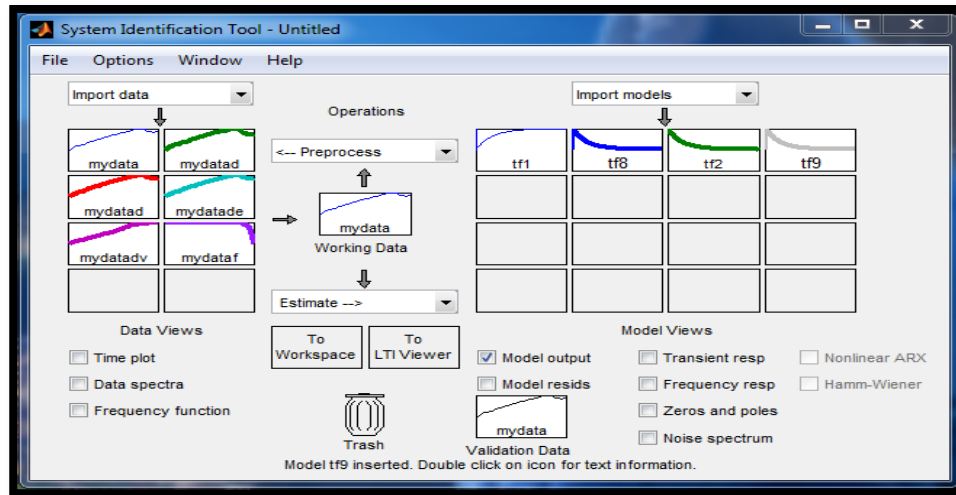


Figura 2.1 a: Visualización del procesamiento de datos para K-212

Los modelos obtenidos para este tratamiento realizado a los datos no proporcionan un ajuste satisfactorio como se muestra por lo que se procedió a trabajar con los datos tomados del experimento, asumiendo que los datos registrados no tienen imperfecciones, o sea, que están limpios de ruidos indeseados. Haciendo varias pruebas para obtener modelos de: primer orden con retraso 0.5; primer orden con retraso 0.1; segundo orden con retraso 0.5 (ajuste muy malo); segundo orden con retraso 0.1 y 1(cualquier valor de retraso); segundo orden con retraso 0.5 y cero; tercer orden con retraso 0.5 como se muestra en la figura 2.1.b.

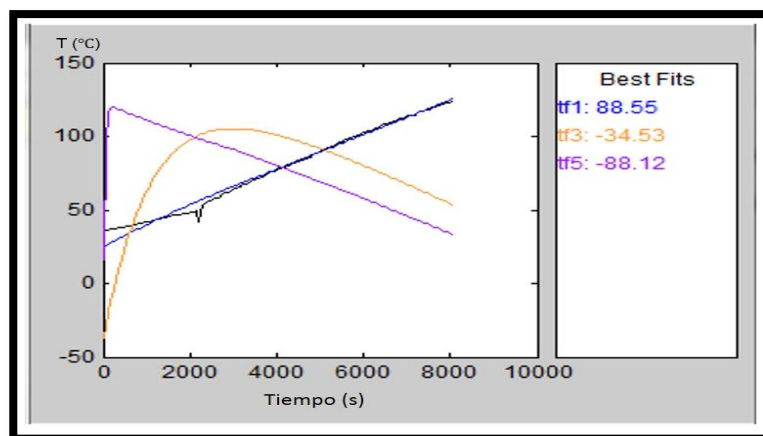


Figura 2.1 b: Ajustes obtenidos para del procesamiento de datos para K-212

Como se puede observar en la figura 2.1.2b se obtiene un valor de ajuste bastante bueno para un modelo que responde a un sistema de primer orden con retraso de 0.5 expresado de la manera siguiente:

$$H(s) = \frac{6.8029 \times 10^{-5} e^{-0.5s}}{s + 1.2186 \times 10^{-5}}$$

2.2 Identificación experimental del Enfriador E-210.

De igual forma que para el reactor el proceso de identificación se desarrolló de manera experimental, tomando como variable de entrada la temperatura a la entrada del enfriador y como variable de salida la temperatura a la salida del mismo. El muestreo de los datos en E-211 se realizó en tres ciclos diferentes de aproximadamente 1 hora con un período 30 segundos y el procesamiento de los datos se hizo utilizando el toolbox System Identification Tool del Matlab 2008, dicho procesamiento se puede observar en la figuras 2.2 a y 2.2 b.

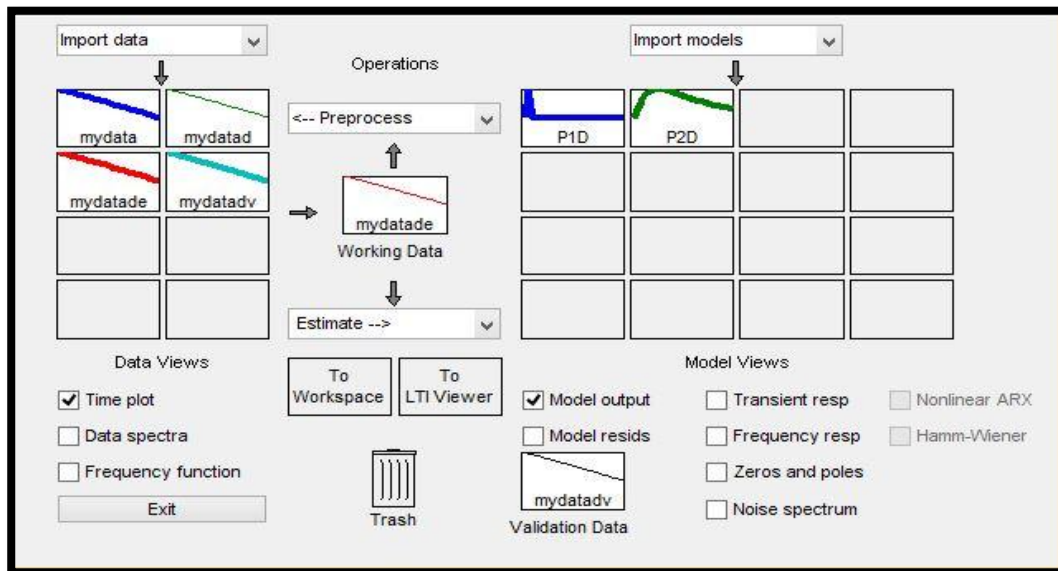


Figura 2.2 a: Visualización del procesamiento de datos para E-210

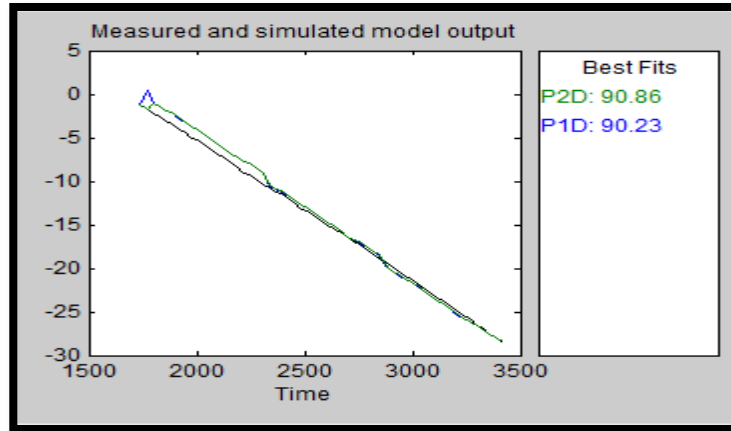


Figura 2.2 b: Ajustes obtenidos para del procesamiento de datos para K-212

Luego del tratamiento realizado por ciclos se escoge trabajar con los datos del tercer ciclo, pues como muestra la figura 2.1 b se alcanza un ajuste del 90,86 % sin retraso para un modelo de segundo orden expresado de la manera siguiente:

$$G(s) = \frac{0,95}{(2,4s + 1)(2,4s + 1)}$$

Posteriormente se procede a llevar este sistema de segundo orden a primer orden con retraso, para ello se efectúan los siguientes cálculos:

$$K_p = 0,95 \quad T_1 = 2,4 \quad T_2 = 2,4$$

$$\frac{T}{T_1} = 0,828 + 0,812 \frac{T_2}{T_1} + 0,172 e^{-6,9 T_2 / T_1}$$

$$T = 1,61 * T_1 = 2,78$$

$$\frac{\theta}{T_1} = \frac{1,116 T_2}{20 + 1,208 T_1} = \frac{2,68}{22,9} = 0,12$$

$$\theta = 0,12 * T_1 = 0,28 \text{ s}$$

Quedando expresado este modelo de primer orden con retraso de la siguiente forma:

$$G(s) = \frac{0,95e^{-0,28s}}{(2,78s + 1)}$$

2.3 Diseño del Sistema de Control

Una vez obtenido el modelo matemático que describe la dinámica de cada proceso se procede (según los pasos fundamentales para el diseño de un sistema de control) a escoger la configuración y estrategia de control basándose en las teorías de control y la experiencia en planta.

2.3.1 Configuración y Estrategia de Control.

La configuración de control escogida en ambos casos es la misma, la cual responde a un simple lazo realimentado de temperatura, ya que dicha configuración responde a los objetivos de control. Para la simulación de estas configuraciones de control se utiliza el toolbox Simulink del Matlab. Se utiliza como estrategia de control basado en modelo un PI con el objetivo de analizar y comparar su capacidad para seguir cambios de referencia y rechazo a las perturbaciones. Estos modelos están representados en las figuras 2.3.1a y 2.3.1b.

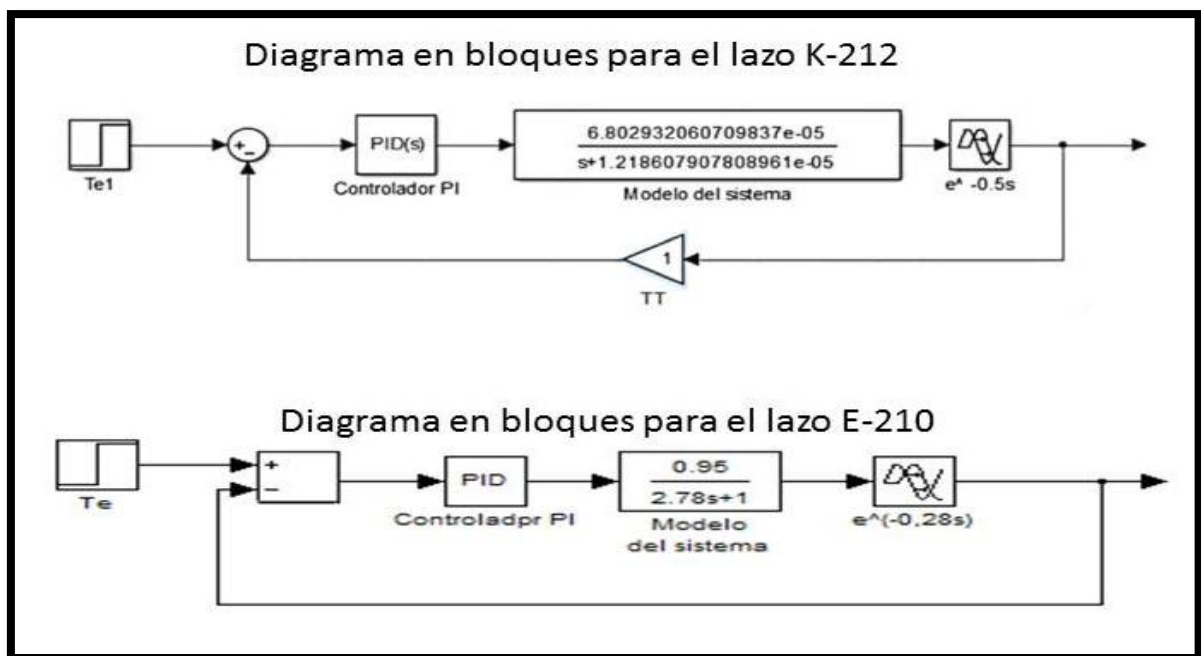


Figura 2.3.1 a: Diagrama en bloques para K-212 y E-210

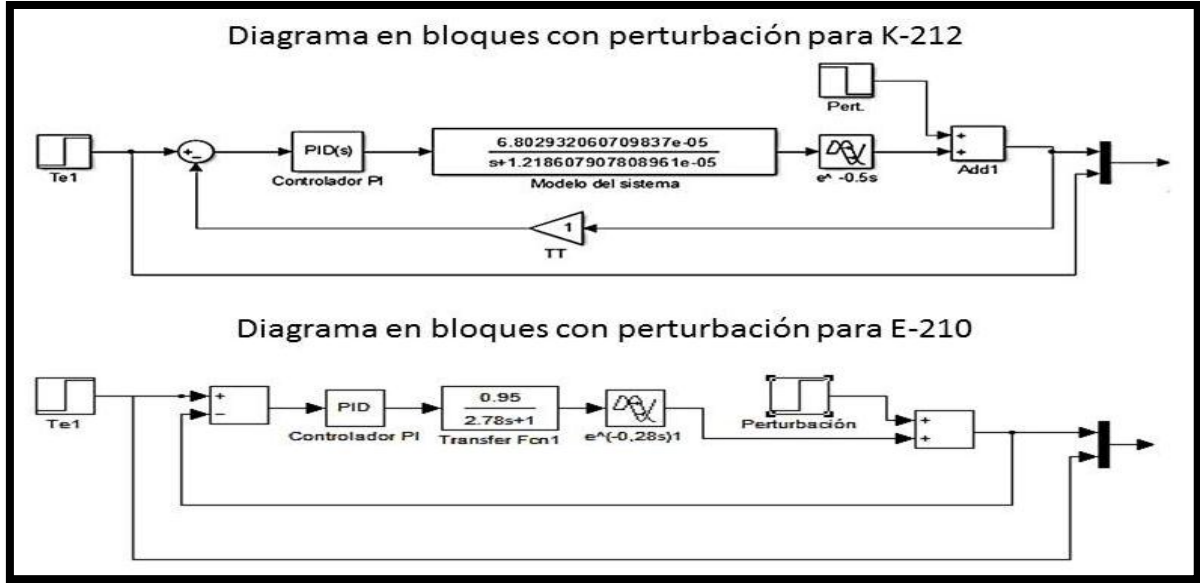


Figura 2.3.1 b: Diagrama en bloques con perturbaciones para K-212 y E-210

2.3.2 Métodos de Ajuste

Para ajustar los parámetros del controlador PI se utilizaron algunos de los métodos basados en respuesta transitoria explicados en el epígrafe 1.3.3.1: el método de *ITAE para cambios en el punto de control y en la perturbación*.

2.3.2.1 Cálculo de los parámetros del controlador para K-212

Método de ITAE para cambios en el punto de control

Se lleva la función $H(s)$ obtenida a la forma $H(s) = \frac{Ke^{\theta s}}{Ts+1}$ de donde se obtiene la siguiente expresión: $H(s) = \frac{5.5826e^{-0.5s}}{82061.38s+1}$ con una razón de controlabilidad $\alpha = \frac{\theta}{T} = 0.000006$ y utilizando las fórmulas correspondientes queda:

$$K_c = \frac{a_1}{K} \alpha^{b_1} = \frac{0.586}{5.5826} 0.000006^{-0.916} = 6371.98$$

$$t_i = \frac{T}{a_2 + b_2 \alpha} = \frac{82061.38}{1.03 + (-0.165)(0.000006)} = 79671.32$$

$$I = \frac{K_c}{T_i} = 0.08$$

Método de ITAE para cambios en la perturbación

$$K_c = \frac{a_1}{K} \alpha^{b_1} = \frac{0.859}{5.5826} 0.000006^{-0.977} = 19449.25$$

$$t_i = \frac{T}{a_2} \alpha^{b_2} = \frac{82061.38}{0.674} 0.000006^{0.680} = 34.247$$

$$I = 567.91$$

2.3.2.2 Cálculo de los parámetros del controlador para E-210

Método de ITAE para cambios en el punto de control

Luego de llevar la función $G(s)$ obtenida a la forma $G(s) = \frac{Ke^{\theta s}}{Ts+1}$ de donde se obtiene la siguiente expresión: $G(s) = \frac{0.97e^{-0.1s}}{9200s+1}$ Posteriormente se calcula la razón de controlabilidad $\alpha = \frac{\theta}{T} = 0,1$. Entonces utilizando las fórmulas correspondientes queda:

$$K_c = \frac{a_1}{K} \alpha^{b_1} = \frac{0.586}{0.95} 0.1^{-0.916} = 5$$

$$t_i = \frac{T}{a_2 + b_2 \alpha} = \frac{2,78}{1.03 + (-0.165s)(0.1)} = 2,74$$

$$I = \frac{K_c}{T_i} = 1,82$$

Método de ITAE para cambios en la perturbación

$$K_c = \frac{a_1}{K} \alpha^{b_1} = \frac{0.859}{0.95} 0.1^{-0.977} = 8,58$$

$$t_i = \frac{T}{a_2} \alpha^{b_2} = \frac{2,78}{0.674} 0.1^{0.680} = 0.862$$

$$I = \frac{K_c}{T_i} = 9.95$$

2.3.3 Respuesta del sistema ante la acción del controlador

En los *anexos 2 y 3* se muestran las respuestas luego de implementar la estrategia de control PI según los parámetros calculados anteriormente para el ajuste. Como se podrá ver esta estrategia con esos valores de ajuste es insuficiente para seguir los cambios de referencia establecidos y el rechazo a perturbaciones por lo que se procede a implementar la estrategia de control PI para los controladores asociados a K-2112 y E-210 respectivamente tomando como apoyo para el ajuste de dichos parámetros los toolbox *PID Tuner* del Matlab 2012 para K-212 y SISO tool del Matlab 2008 para E-210. Luego de analizar las respuestas se concluye que con esta estrategia se logra seguir cambios de referencia establecidos y el rechazo a perturbaciones como se muestra en las figuras 2.3.3a y 2.3.3b.

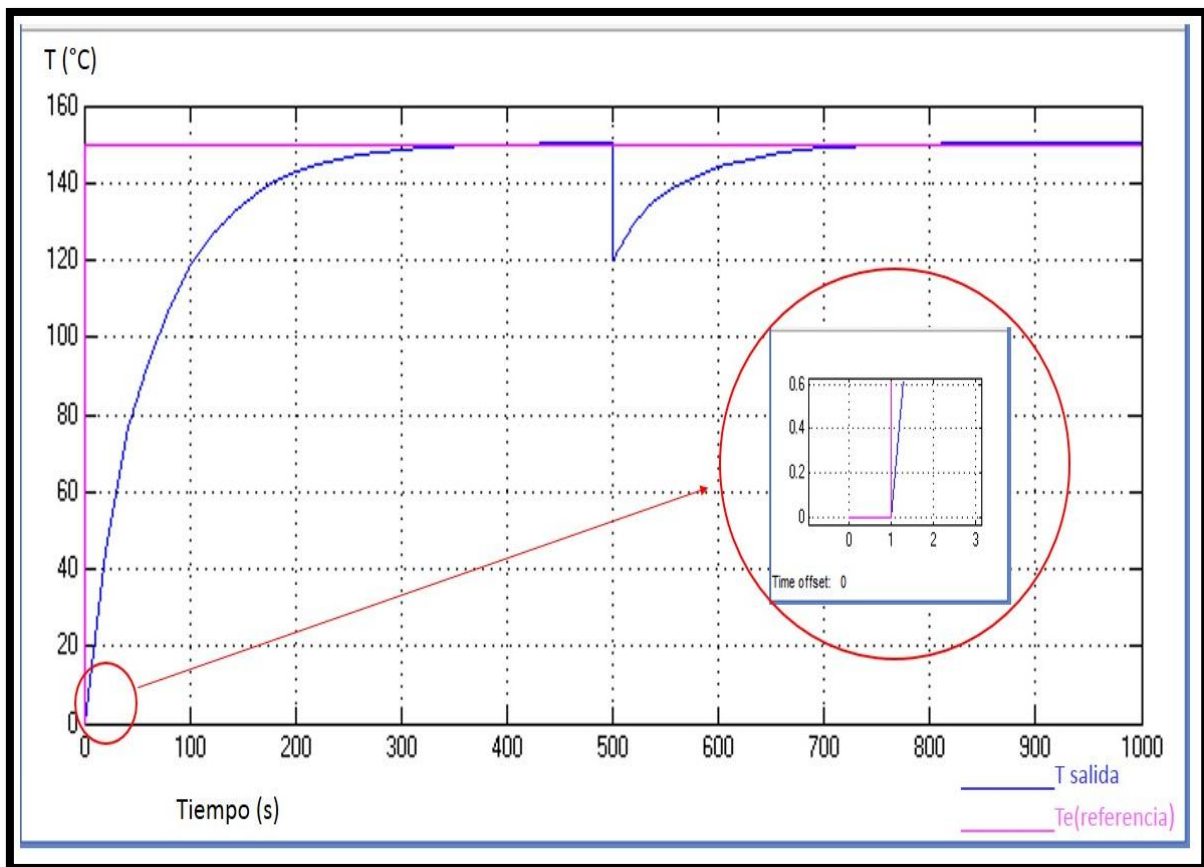


Figura 2.2.3 a: Simulación del sistema con la acción del controlador PI en K-212



Figura 2.2.3 b: Simulación del sistema con la acción del controlador PI en E-210

2.4 Selección de componentes para poner en práctica el Sistema de Control propuesto.

El sistema de medición y control automático de la planta de grasa de la UEBP de Lubricantes (CUBALUB) debe tener una alta disponibilidad para trabajar durante las 24 horas de los 365 días del año de forma ininterrumpida, por lo que la arquitectura de control debe presentar características tales como:

- Escalabilidad, que implica la posibilidad de ampliarlo sin dificultades sin que esto signifique algún perjuicio para la estructura preinstalada.
- Apertura: Software y hardware que permitan interconexiones de distintos proveedores.
- Concurrencia: básicamente que se pueda realizar rutinas de control simultáneamente en toda la planta.

- Tolerancia a fallos, con la inclusión de redundancia de comunicación y operativa, de modo que ni el control ni la comunicación entre equipos fallen o reduciendo al mínimo esta posibilidad.

El equipamiento que forma el sistema de medición y control de una planta de producción de grasa o cualquier producto inflamable, debe cumplir con las normas de la Comisión Electrónica Internacional (IEC) reconocidas por ATmospheres EXplosibles (ATEX, siglas en inglés) [15], ya que en el proceso está presente un líquido inflamable que permite la creación de atmósferas explosivas, debido a evaporación y derrames del mismo por averías o mala operación. En las normas ATEX se establece la clasificación de áreas por la existencia de gases, vapores y polvos. Además, teniendo en cuenta la probabilidad de que existan y la duración de las atmósferas explosivas, las áreas son subdivididas en zonas y, a su vez, se dividen en grupos asignando un gas representativo que caracteriza a cada grupo. También se hace otra clasificación, en la cual se marcan los límites de la máxima temperatura superficial que pueden alcanzar los aparatos instalados en un área determinada y se establece el código de "Seguridad Intrínseca EExi", método de protección más utilizado para los instrumentos instalados en zonas clasificadas. Para el diseño de nuestro sistema de instrumentación se utilizará el sistema PROFIBUS-DP como bus de campo y en particular la estación ET 200S. También serán utilizados módulos de interfaz IM 151-1 para la conexión entre el bus y la estación y un módulo de interfaz IM 151-7 CPU.

2.4.1 PROFIBUS DP

PROFIBUS DP (Decentralized Periphery): Orientado a sensores/actuadores enlazados a procesadores (PLCs) o terminales. Este bus está diseñado para la comunicación de datos a alta velocidad a nivel de dispositivo. Los controladores centrales (PLCs/PCs) se comunican con los dispositivos de campo distribuidos por medio de un enlace serie de alta velocidad. Es utilizado en medio físico RS – 485 (H2) o fibra óptica. Requiere menos de 2 ms para transmitir 1 Kbyte de entrada y

salida y es muy usado en controles con tiempo crítico [16]. Unas de sus ventajas que da la posibilidad de conexiones sencillas y baratas.

2.4.2 Estación de periferia descentralizada SIMATIC ET 200-S [17]

Es el sistema de periferia multifuncional y modular al bit en grado de protección IP20 que es exactamente adaptable a la tarea de automatización. Gracias a su robusto diseño puede aplicarse también en presencia de esfuerzos mecánicos elevados (ver figura 2.4.2)

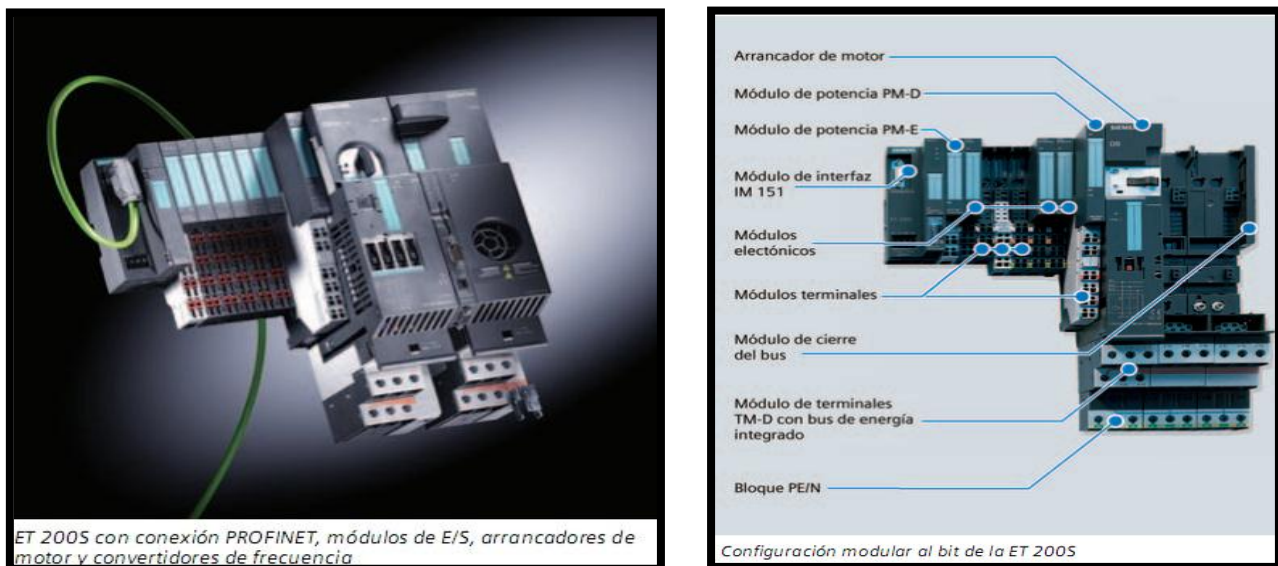


Figura 2.4.2: SIMATIC ET 200S

La conexión a los sistemas de bus PROFIBUS y/o PROFINET se realiza a través de módulos de interfaz al efecto. Los módulos de interfaz con CPU integrada trasladan la potencia de cálculo de una CPU S7-300 directamente a la estación de E/S distribuidas. Con ello se descarga al PLC central y son posibles reacciones más rápidas a señales de tiempo crítico. Las soluciones de automatización descentralizadas no sólo comprenden con frecuencia señales digitales y analógicas sino también funciones tecnológicas, arrancadores de motor, convertidores de frecuencia o elementos neumáticos.

Características de la SIMATIC ET 200S

La gama ET 200S ofrece una amplia gama de módulos para resolver los problemas planteados:

- Módulos tecnológicos para ejercer tareas de montaje y posicionamiento, control por levas o tareas de regulación.
- Arrancadores de motor para conectar y desconectar motores trifásicos de hasta 7,5 kW. La gama incluye varias versiones de arrancadores de motor, entre otros, modelos de seguridad positiva.
- Convertidores de frecuencia (también con funciones de seguridad integradas) permiten variar la velocidad de motores asíncronos de hasta 4 kW.
- Conexión a elementos neumáticos utilizando módulos de la empresa Bürkert.
- Módulos de E/S de seguridad permiten la integración en instalaciones de seguridad con SIMATIC Safety Integrated.

Motivos para escoger la SIMATIC ET 200S

- El bus de fondo se auto instala al enchufar los módulos.
- Todos los bornes de conexión tienen carácter de bornes en serie, lo que permite conectar directamente al SIMATIC. ET 200S los cables de señal y al motor sin necesidad de bornes intermedios.
- Las funciones de seguridad están integradas y forman parte del sistema; es decir, puede prescindirse de un bus de seguridad dedicado.
- Módulos de reserva permiten reservar slots para futuros módulos.
- Cableado independiente.
- Cableado transversal sensiblemente reducido gracias a las barras de energía que van auto instalándose, lo que reduce las necesidades de prueba y posibles fuentes de error.

Beneficios de la SIMATIC ET 200S

SIMATIC ET-200S es la estación que garantiza la distribución de E/S, así como los ahorros duraderos en costos de ciclo vital con la más alta flexibilidad. Además de beneficios duraderos tales como:

- Grandes ahorros principalmente en cableado (hasta un 80%), gracias a la tecnología integrada.

- Ahorros de importantes espacios en el cuarto o cabina de control (hasta un 50%) gracias a los diseños compactos (circuitos integrados).
- Grandes aumentos en la disponibilidad, atribuible al cableado "Fijo".
- Diseño Bit-Modular: hasta 64 módulos por estación.
- Tenemos que este sistema nos da la oportunidad de conectar a un mismo chasis, diferentes módulos para medir diversas magnitudes, además de incluir acondicionadores de señales, conversión de señales analógicas a digitales y viceversa, también brinda la posibilidad de conectar los chasis a una computadora y a otros chasis para la transferencia de información.

2.4.3 Módulo Electrónico 6ES7134-4NB00-0AB0

Se propone para la medición con termopares el módulo 6ES7134-4NB00-0AB0 (Anexo-4) de 2 entradas analógicas de grandes ventajas, con un tiempo máximo de conversión 80ms por canal, resolución 5bit+signo, con un error +/-0.1%, y compensación integrada de la temperatura.

2.4.4 CPU 6ES7151-0AB0 7AA11

La CPU utilizada de la estación PROFIBUS ET-200S es 6ES7151-0AB0 7AA11-la cual requiere de una tarjeta de memoria para el micro: 6ES7953 de 64kb-4Mb. Esta permite la interfaz con la CPU IM 151-7, además posee una memoria de trabajo 64kB, tiene 244 bytes de entradas y 244 bytes de salidas, se le puede conectar 63 módulos electrónicos, además es compatible con PROFIBUS-DP

2.4.5 Módulo de interfaz para la conexión a bus: IM 151-1.

El módulo de interfaz (figura 2.4.5) sirve para conectar la ET 200S al sistema de bus, bien al probado bus de campo PROFIBUS o a PROFINET, estándar abierto Industrial Ethernet (ver anexo 3). Se encarga por completo del intercambio de datos con el maestro PROFIBUS DP.



Figura 2.4.5: Módulo de interfaz para la conexión a bus IM 151-1

Cuenta con 3 variantes:

- IM 151 Standard (RS 485 y FO)
- IM 151 High Feature (RS 485)
- IM 151 BASIC (RS 485)

2.4.6 Módulo de interfaz IM 151-7 CPU.

El IM 151-7 CPU (figura 2.4.6) puede utilizarse tanto aislado como para soluciones de automatización distribuidas con programas de tamaño medio (ver anexo 6). Equivale a una CPU 314 y permite pre procesar localmente los datos de fabricación, también en la versión de seguridad. La interfaz combinada MPI/esclavo PROFIBUS DP permite la comunicación con el PLC superior

De ello resultan las ventajas siguientes:

- Descarga del PLC superior
- Reducción de los tiempos de reacción a señales críticas locales
- Programas más claros y cortos
- Búsqueda de fallos simplificada
- Alivio del sistema de bus
- Modularización de la instalación y posibilidad de puesta en marcha de antemano, también en diferentes lugares.



Figura 2.4.6: Módulos de interfaz IM 151-7 CPU

2.4.7 Sensores e Indicadores

2.4.7.1 Medición de temperatura con Termopar WIKA TC10

En la figura 2.4.7.1 se ilustra el termopar TC10 empleado en la medición de temperatura en el interior de los reactores así como en los calentadores del BOT. El mismo está diseñado para uso industrial el cual posee Sensor: Modelos K, J, E, N o T; Rango de medida: -200 a 300; Punto de medición: aislado o no aislado; Certificación: CSA, FM, ATEX/IEC, NAMUR; Hoja técnica: TE 65.01



Figura 2.4.7.1: Termopar ModeloTC10 Marca WIKA

2.4.7.2 Transmisor T53

Este dispositivo (mostrado en la figura 2.4.7.2) es empleado para la conexión del termopar al bus de campo PROFIBUS. Está diseñado para bus de campo FOUNDATION y PROFIBUS; tiene entrada Pt100 o termopares; precisión <

Estrategia de Control para el Proceso de Enfriamiento-Isoterma Enfriamiento de la planta de grasas de la UEBP de lubricantes CUBALUB.

0.10%; salida: bus de campo FOUNDATION, PROFIBUS y configuración en ordenador. Hoja técnica TE 53.01.



Figura 2.3.7.2: Transmisor Modelo T53 Marca WIKA

2.4.7.3 Medición de nivel con Interruptor de Nivel Magnético RSB

Diseñado para montaje lateral como se muestra en figura 2.4.7.3 con cámara de referencia: aluminio, fundición roja, acero inoxidable; conexión: Racor en acero cincado GE 10-LR, brinda según DN o ANSI, conexión soldada; presión: máximo 40 bar (en cámara de referencia) y temperatura soportada en un rango de: -30°C a $+300^{\circ}\text{C}$. Hoja técnica LM 30.03.



Figura 2.3.7.3: Interruptor de nivel magnético RSB Marca WIKA

2.4.7.4 Termómetro Bimetálico Modelo 52 (indicador)

Este instrumento es propuesto con el fin de garantizar que los operarios de la planta tengan conocimiento del comportamiento de la variable en caso de ocurrir un fallo en el sistema automatizado y así no haya necesidad de detener el

proceso. Brinda ejecución industrial, axial y radial con rango de indicación de -30°C a 50°C y 0°C a 500°C ; presión de servicio máximo admisible en vaina/bult: 25bar; piezas en contacto con el medio: Acero inoxidable 1.4571. Hoja técnica: TM 52.01. (ver figura 2.4.7.4).



Figura 2.4.7.4: Termómetro bimetalico modelo 52 de WIKA

2.5 Atenuación a interferencias y cálculo del tiempo de conversión.

En los sistemas de mediciones están presentes dos tipos de interferencia que además de falsear los resultados de las mediciones causan grandes problemas en el hardware del sistema. Estos tipos de interferencia son:

Interferencia de tipo normal: es aquella que está presente a la entrada del instrumento (porque la interferencia de tipo común no se logra eliminar), de ahí que los módulos tengan filtros que con el convenio atenuación-tiempo de respuesta logran eliminarla. En este tipo de sistema los módulos ya mencionados, son capaces de atenuar hasta 90db por lo que los módulos empleados atenúan este tipo de interferencia.

Interferencia de tipo común: es aquella que está presente a lo largo del circuito de ahí que los módulos tengan entrada diferencial o separación galvánica para luchar contra esto. Estos módulos son capaces de atenuar hasta 90dB (depende del tipo de módulo) por lo que los módulos empleados atenúan este tipo de interferencia.

El tiempo de comunicación teniendo en cuenta los siguientes aspectos tales como: la cantidad de mediciones a realizar lo que influye en la cantidad de módulos a emplear, el tiempo de conversión por canal de los módulos electrónicos y el tiempo máximo de procesamiento de la información el cual lo asumimos de $20\ \mu\text{s}$ por módulo electrónico.

Debido a la cantidad de mediciones a registrar se emplearon 2 módulos, de la serie 6ES7134-4NB00-0AB0 para los 3 termopares, esta serie tiene un tiempo de conversión máximo de 80ms por canal, es decir 160ms por módulo Pero como el tiempo de conversión de cada módulo es independientemente de la cantidad que sea, para el cálculo final solo tuvimos en cuenta el tiempo de conversión de uno de los módulos Tomando $20\mu s$ como el tiempo de ejecución por módulos electrónicos de la estación ET-200S, tenemos que: $T_x = (T_{cm\acute{a}x}) + (T_m * \# \text{ de M\acute{o}dulos})$ donde: $(T_{cm\acute{a}x})$ es el tiempo de conversión máximo de entre todos los módulos utilizados y (T_m) el tiempo de ejecución por módulos electrónicos de la estación ET-200S.

$$T_A = 160 * 10^{-3}s + (20 * 10^{-6}s * 2) = 16002 * 10^{-3}s$$

$$T_A \approx 0.16s$$

2.6 Cálculo de los tiempos del ciclo PROFIBUS.

Tiempo de ciclo PROFIBUS DP (DPT)

$$DPT = NbDP [OvPB + BitDP * (NbE + NbA)] / BdsDP$$

Analizando la tabla que sigue a continuación y apoyándonos en la ecuación definida por la directiva de instalación PROFIBUS 2.262:

Denominación		PROFIBUS DP
N° de esclavos		NbDP
Parte común en telegrama PROFIBUS		OvPB – 317 bits
Formato de datos		BitDP – 11 bits/byte
N° de bytes	típico	
	Entrada	NbE – máx. 244 bytes
	Salida	NbA – máx. 244 bytes
Velocidad de transferencia		BdsDP – 12 Mbits/s

Tabla 2. 6: Relación de parámetros para el cálculo de los tiempos de ciclo de PROFIBUS.

Para esta propuesta se utiliza solo un esclavo

$$DPt = 1 * [317 \text{bits} + 11 \text{bits/bytes} * (244 \text{bytes} + 244 \text{bytes})] / 500 \text{kbits/s}$$

$$DPt = 11.37 \text{ms}$$

2.7 Programación del PLC para cumplir con la Estrategia de Control

La programación del Autómata debe ser implementada en el software correspondiente al PLC que determine adquirir la empresa según la relación costo-prestaciones y debe contener varias secciones de trabajo de la forma siguiente:

- Principal: describe todas las acciones que se deben realizar ante una parada de emergencia, por ejemplo, apagar todas las bombas en funcionamiento, cerrar las válvulas de seguridad instaladas y que las válvulas de regulación vayan a la posición de seguridad (normalmente cerrada)
- Fallo: se indica la ocurrencia de un fallo de comunicación entre cada canal de los módulos de entradas y salidas analógicas y los dispositivos de campo asociados, encuestando un bit con dirección %Ix.xx.xxERR para cada canal.
- Alarma: se indica las alarmas comparando las mediciones tomadas del proceso con los umbrales de alarmas fijados en el SCADA.
- Conversión: se toman y convierten todos los valores numéricos de lectura de los módulos de entrada analógica a valores reales y luego a unidades ingenieriles (UI)
- Control Automático: describe el funcionamiento (como se muestra en el diagrama funcional del Anexo 7) de los lazos de control de temperatura utilizando controladores PI. A estos controladores se les introducen el valor de referencia, la variable controlada y estructuras de datos que incluyen la modalidad de servicio (manual o automático) y los parámetros de control.

En este trabajo se muestra la lógica a seguir por el programador para dar cumplimiento al Control Automático según el modo de operación de la planta (figura 2.7), teniendo en cuenta tanto los lazos de control de temperatura como el accionamiento de las bombas y agitadores que intervienen en el proceso, dejando a consideración del programador el modo en que realizará las otras partes del programa mencionadas anteriormente como son las alarmas y fallos.

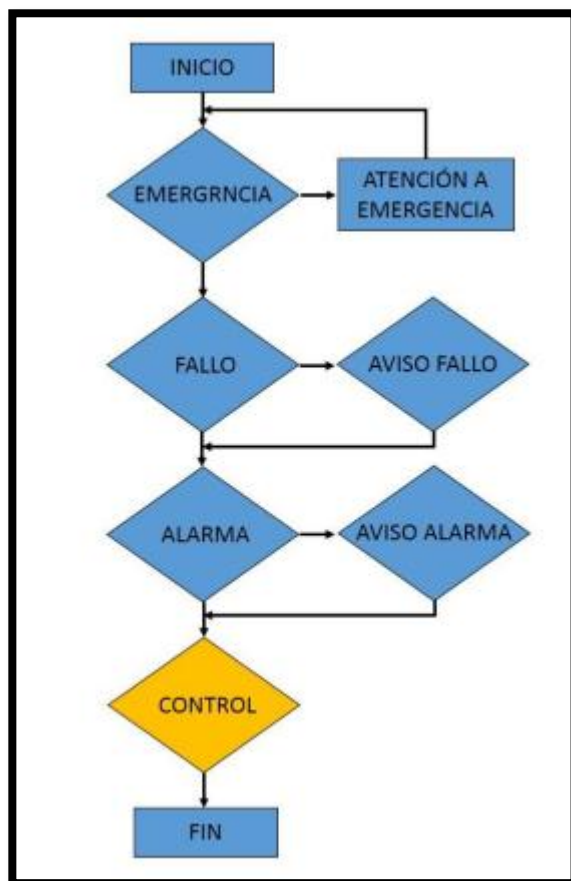


Figura 2.7: Diagrama general funcional del PLC

Explicación del diagrama funcional para programación de control del
autómata:

Como se puede observar en el anexo 5 inicialmente lo primero es comprobar que los actuadores estén apagados. Luego se pregunta si (SNB) está activado o desactivado para saber si hay producto en el reactor K-212 debido a una parada de emergencia o falla en el fluido eléctrico en el proceso de vaciado del mismo, si

este está en uno significa que el reactor se contiene mezcla por lo que se activa una alarma indicando la presencia de producto en este reactor, los operadores decidirán entonces que hacer. De estar en cero significa entonces que el reactor está vacío y se puede continuar con el proceso. El Próximo paso es abrir (VAL-1) y encender (P-210) y (AG-1) de este, manteniéndose así hasta tanto ocurra un cambio de cero a uno en (SNM), lo que significaría que el reactor está completamente lleno y que por tanto se debe cerrar (VAL-1) y apagar (P-210) dejando encendido el agitador para continuar con el mezclado y abriendo a su vez (VAL-2). Posteriormente se chequea la temperatura fijada con una referencia = 180 °C ya que lo que se desea es mantenerla en un rango de 175 a 185°C. Una vez que la temperatura esté en este rango se activa (TEMPO) el cual va a garantizar que se mantenga el mezclado en este rango de temperatura por 30 minutos. Una vez transcurrido este tiempo se cierra (VAL-2) y se abren (VAL-3) de (VAL-4), al mismo tiempo se encienden P-203 y (MOT). Por último al ocurrir un cambio de uno a cero en (SNB), lo que indica que ya no hay producto y se procede a cerrar (VAL-3) y apagar (P-203).

Las variables usadas para el pseudocódigo anteriormente explicado son:

Actuadores

- VAL-1: válvula de entrada al reactor K-212.
- VAL-2: válvula de entrada de líquido a la camisa del reactor K-212.
- VAL-3: válvula de entrada al enfriador E-210
- VAL-4: válvula de entrada de agua a la camisa del enfriador E-210..
- P-210: bomba de entrada al reactor K-212.
- P-203: bomba de entrada al enfriador E-210.
- MOT: motor del sinfín del enfriador E-210.

Sensores

- SNB: sensor de nivel bajo en el reactor K-212.
- SNM: sensor de nivel alto en el reactor K-212.

2.8 Valoración Económica

La valoración económica de este proyecto se basa en el considerable ahorro que representa la realización del mismo en caso de que esta acción se llevaran a cabo por la empresa TECNOMÁTICA, la cual en estos momentos está llevando a cabo la identificación de la planta pero solo para la automatización de la variable temperatura ya que representa una enorme inversión.

A continuación la Tabla 2.8a muestra la cantidad de especialistas necesarios para la realización de este proyecto así como sus respectivos salarios.

Cargo del trabajador	Salario diario	Tarifa x hora	Días de trabajo	Costo x trabajador
Responsable del proyecto	\$190.00	\$23.75	45	\$8 850.00
Especialista en proyecto	\$144.00	\$18.00	90	\$12 960.00
Especialista en Calidad	\$144.00	\$18.00	20	\$2 880.00
Especialista Comercial	\$144.00	418.00	6	\$864.00
Total	-	-	116	\$25 245.00

Tabla 2.8a: Salarios de Especialistas de la Empresa TECNOMÁTICA

Teniendo en cuenta que ya el proyecto se ha realizado siguiendo las normas de calidad requeridas para la implementación del mismo solo sería necesario la contratación de un especialista comercial por término de seis (6) días y de un especialista en proyecto por término quince (15) días, lo que representa un ahorro de \$ 22230.

- Especialista Comercial: 6 días x \$144.00 = \$864.00
- Especialista en proyecto: 15 días x \$144.00 = \$2 160.00
- Costo total del proyecto: \$ 25 245.00 - \$ 3 024.00 = **\$ 22 230.00**

Luego del diseño, estudios de campo, factibilidad, programación y otras acciones a llevar a cabo por los técnicos y especialistas, la implementación de este proyecto, para un tiempo de siete días hábiles, incluyendo alimentación,

transportación, salarios y cualquier otra necesidad, dígame de avituallamiento o logístico se estima un total de **1 250 MN y 2 500 CUC**.

Teniendo en cuenta el análisis anterior y el precio de los instrumentos reflejado en la tabla 2.8b es totalmente factible la implementación de este proyecto ya que actualmente la planta está a un 42% de explotación, lo que se refleja en una producción de 1 200 toneladas de grasa de 5 000 al año, generando un importe de \$ 2 764 800. Se espera que con la implementación de esta estrategia de control así como de otra presentada el año pasado para el proceso Saponificación-Evaporación –Térmico la planta pueda explotarse al menos a un 85%, que sería equivalente a 4 250 toneladas de grasa al año, o sea, \$ 9 792 000, aumentando los ingresos de la empresa en \$ 7 027 200 al año.

Denominación	Cantidad	Precio (USD)	Total (USD)
Termopar WIKA TC10	4	20.75	83.00
Transmisor WIKA T53	4	22.50	90.00
Interruptor de Nivel Magnético RSB	4	52.50	210.00
Termómetro Bimetálico WIKA M- 52	3	43.00	129.00
SIMATIC ET-200S (Siemens)	1	1 250.00	1 250.00
PLC (Schneider)	1	4 127.00	4 127.00
Cable Robusto PROFIBUS FC	300m	3.00	900.00
TOTAL			6 789.00

Tabla 2.8b: Costo de la instrumentación

2.9 Valoración Económica

Al no ser automatizado el proceso los operarios están en contacto directo con la planta, revisando el nivel de los rectores, y accionando válvulas e interruptores por lo que el daño a su salud es inminente ya que están aspirando constantemente los químicos con que se producen las grasas y operando con altos voltajes. La implementación de este proyecto tiene como ventaja que dichos obreros tengan que exponerse lo menos posible a los peligros planteados anteriormente. Al brindar la implementación de este trabajo una mejor

eficiencia en la producción será notable una reducción de emisión de gases a la atmósfera.

2.10 Conclusiones Parciales del Capítulo

- Se realizó la identificación experimental de reactor K-212 y el enfriador E-210 obteniendo modelos de primer orden con retraso en ambos casos lo que responde al comportamiento habitual de los sistemas de temperatura.
- Se propuso la configuración de control que responde a un lazo simple de temperatura, utilizando como estrategia un PI calculando los parámetros de ajuste por lo métodos clásicos y con los Toolbox del Matlab, PID Tuner y SISI tool, simulando la respuesta del sistema para cada uno de ellos y comparando los resultados.
- Se concibió la propuesta de los instrumentos necesarios para la implementación de la estrategia de control.

CONCLUSIONES GENERALES:

Al término de este trabajo se arriban a las siguientes conclusiones:

- Se realizó la identificación del RQE y el Enfriador para el conocimiento de su dinámica y así poder diseñar la estrategia de control.
- Se propuso una estrategia de control capaz de seguir cambios de referencia establecidos y el rechazo a perturbaciones.
- Se presentó un nuevo equipamiento (debido a la obsolescencia tecnológica del existente) acorde a las exigencias de la planta con el fin de mejorar la eficiencia productiva de la misma.

RECOMENDACIONES:

- Realizar el montaje de la nueva instrumentación para hacer posible la implementación de la estrategia de control prevista y así aumentar la productividad y eficiencia de la planta.
- Realizar una nueva identificación de estos componentes del proceso una vez montada la instrumentación, así sería posible la obtención de un modelo matemático más cercano a la realidad y la posible implementación de la configuración de control en cascada lo que brindaría un mejor control del sistema.

BIBLIOGRAFÍA:

1. Aguado, A. Temas de Identificación y Control Adaptable. Instituto de Cibernética, Matemática y Física, La Habana, Cuba, 2000.
2. Arafet, P. y otros.: Monografía sobre identificación de sistemas. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba, 2004.
3. Belák G, Lipták. "Instruments engineer's handbook". Volumen II "Process Control and Optimization". Cuarta edición, 2006.
4. Benítez Pina, Israel y Villafruela Loperena, Luisa. "Monografía sobre Sistemas para redes locales de automatización industrial". Año 2001.
5. Bychkó B, Tur J, Selva A, Acosta J: Procesos Químicos y Termoenergéticos Dinámica y Control Tomo II. Departamento de Control Automático, Facultad Ingeniería Eléctrica, ISPJAM, Santiago de Cuba, 1988.
6. Camacho, Alfonso. Máster ISA de instrumentación y control, módulo A9 "Instalación de instrumentos y áreas clasificadas". Mayo, 2006.
7. Eykhoff, P. System Identification. Parameter and state estimation. London: John Wiley, 1974.
8. Irizar, M.: "La inteligencia computacional en la identificación de sistemas" Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones. Vol. XXVI, No. 1, p. 35-41. Departamento de Automática y Computación, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Cuba. 2005.
9. Jordán, M.: Modelación e Identificación de Sistemas Dinámicos: *Teoría y Herramientas*. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, 1996.
10. Ljung, L.: System Identification: Theory for the User. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1987.
11. MATLAB, R 2008 b, MATLAB Help. 2008.
12. Ogata, K. Ingeniería de control moderna. Tercera Edición.

13. Sistema de Automatización. Disponible en: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/.../automatizacion.htm/>. Consultado el 20/02/2016.
14. Smith, C. y Corripio, A. Control Automático de Procesos Teoría y Práctica. Primera Edición 1991.
15. Smith, C. y Corripio, A. Principles and Practice of Automatic Process Control. Second Edition, 1997.
16. Söderstrom, T. and Stoica, P.: System Identification. Prentice-Hall International, Hemel Hempstead, Hertfordshire, 1989. 2
17. Stephanopoulos.G. Chemical Process Control. Segunda Parte. Prentice Hall, 1983.
18. Urbino Jardinez, Ernesto M.: "Identificación Experimental de una Torre de Destilación Binaria" Trabajo de Diploma. Departamento de Control Automático. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba. Cuba. 2013.
19. Zadeh, L.: From circuit theory to system theory. In Proc. IRE 50, 1962. 3.
20. Zhu, Y. —Multivariable process identification for MPC: the asymptotic method Journal of Process Control. Vol. 8, No.2, p. 101-115. and its applications. Elsevier Science. Gran Bretaña. 1998.

ANEXOS:

Anexo1: Registro de variable de entrada y salida para procesos de identificación.

Datos para K -212

Datos para E-210

t (1min)	t(°C) en K-212	t(°C) en BOT	t(min)	t(°C) en la entrada	t(°C) en la salida
1	36	228	0	179.67	93.82
2	36	227,6	0.5	179.15	93.35
3	36,3	227,2	1	178.7	92.79
4	36,7	227	1.5	178.23	92.26
5	37	226,2	2	177.81	91.76
6	37,2	225,5	2.5	177.3	91.23
7	37,8	224,7	3	176.77	90.73
8	38	224	3.5	176.25	90.26
9	38,5	223	4	175.83	89.68
10	39	222,25	4.5	175.31	89.15
11	39,2	221,4	5	174.79	88.63
12	39,5	220,6	5.5	174.23	88.19
13	40	220	6	173.82	87.63
14	40,2	219,5	6.5	173.35	87.07
15	40,9	218,75	7	172.82	86.56
16	41,2	218	7.5	172.27	86.1
17	41,85	217	8	171.75	85.62
18	42	216,25	8.5	171.32	85.13
19	42	215,3	9	170.87	84.59
20	42,8	214,2	9.5	170.27	84
21	43	213	10	169.73	83.47
22	43,6	212,3	10.5	169.28	82.92
23	44	211,4	11	168.84	82.54
			11.5	168.32	82.05

Anexo 2: Módulo electrónico del termopar 6ES7134-4NB00-0AB0. Datos Técnicos

Temperature compensation		Operational limit in overall temperature range	
internal temperature compensation	Yes; possible with TM-E15S24-AT, TM-E15C24-AT	Voltage, relative to input area	+/- 0,1 %; +/-1.5 K for thermocouples, +/-7 K for thermocouples type C, +/-2.5 K with static thermal state (ambient temperature change < 0.3 K/min)
external temperature compensation with compensations socket	Yes; one external compensating box per channel		
Analog value creation		Basic error limit (operational limit at 25 °C)	
Measurement principle	integrating	Voltage, relative to input area	+/- 0,05 %; +/-1 K with thermocouples, +/-5 K with thermocouples type C, +/-1.5 K with static thermal state (ambient temperature change < 0.3 K/min)
Integration and conversion time/resolution per channel		Interference voltage suppression for $f = n \times (f_l \pm 1 \%)$, f_l = interference frequency	
Resolution with overload area (bit including sign), max.	16 bit; 15 bit + sign	Series mode interference (peak value of interference < rated value of input range), min.	70 dB
Integration time, parameterizable	Yes	common mode voltage (USS < 2.5 V), min.	90 dB
Integration time, ms	16.7 / 20 ms	Parameter	
Interference voltage suppression for interference frequency f_l in Hz	60 / 50 Hz	Remark	4 bytes
Conversion time (per channel)	66 ms; 66 / 80 ms; additional conversion time for diagnostic wire break test	Diagnosis: wire break	Disable/enable
Smoothing of measured values		Measurement type/range	Deactivated/ +/- 80 mV TC-EL Type T (Cu-CuNi)/ TC-EL Type K (NiCr-Ni)/ TC-EL Type B (PtRh-PtRh)/ TC-EL Type c (Wer-Wer) TC-EL Type N (NiCrSi-NiSi)/ TC-EL Type E (NiCr-CuNi)/ TC-EL Type R (PtRh-Pt)/ TC-EL Type S (PtRh-Pt)/ TC-EL Type J (Fe-Cu-Ni)/ TC
parameterizable	Yes; in four stages by means of digital filtering	Collective diagnostics	Disable/enable
Level: none	Yes; 1 x cycle time	Overflow/underflow	Disable/enable
Level: weak	Yes; 4 x cycle time	Comparison point	none / yes, internal
Level: middle	Yes; 32 x cycle time	Unit	Celsius / Fahrenheit
Level: strong	Yes; 64 x cycle time	Isolation	
Encoder		Isolation, analog inputs	
Connection of signal encoders		between the channels	No
for voltage measurement	Yes	between the channels and the backplane bus	Yes
Errors/accuracies		between the channels and the load voltage L+	Yes
Linearity error (relative to input area)	+/- 0,01 %	Permissible potential difference	
Temperature error (relative to input areas)	+/- 0,005 %/K	between inputs and MANA (UCM)	140 V DC/100 V AC
Crosstalk between the inputs, min.	-50 dB	between MANA and M internally (UISO)	75 V DC / 60 V AC
Repeat accuracy in settled status at 25 °C (relative to input area)	+/- 0,05 %	Dimensions	
Status information/alarms/diagnostics		Dimensions	
Diagnoses		Width	15 mm
Diagnostic functions	Yes	Height	81 mm
Wire break	Yes	Depth	52 mm
Group error	Yes	Weights	
Overflow/underflow	Yes	Weight, approx.	40 g
Diagnostics indication LED		Status	05/21/2009
Collective error SF (red)	Yes		
Isolation			
Isolation checked with	500 VDC		

SIMATIC DP, ELECTRONIC MODULE F. ET200S, 2 AI TC HIGH FEATURE 15 MM WIDE, 15 BIT + SIGN WITH INTERNAL TEMPERATURE COMPENSATION PLEASE NOTE! AVAILABLE AS A SPARE PART ONLY. REPLACEMENT TYPE: 6ES7134-4NB01-0AB0		Input ranges (rated values), voltages	
		-80 mV to +80 mV	Yes
		Input resistance (-80 mV to +80 mV)	1 MΩ
Supply voltages		Input ranges (rated values), thermoelements	
Load voltage L+		Type B	Yes
Rated value (DC)	24 V; From power module	Input resistance (Type B)	1 MΩ
reverse polarity protection	Yes	Type C	Yes
Current consumption		Input resistance (Type C)	1 MΩ
from load voltage L+ (without load), max.	30 mA	Type E	Yes
from backplane bus 3.3 V DC, max.	10 mA	Input resistance (Type E)	1 MΩ
Current consumption/power loss		Type J	Yes
Power loss, typ.	0.6 W	Input resistance (type J)	1 MΩ
Address area		Type K	Yes
Address space per module		Input resistance (Type K)	1 MΩ
Address space per module, max.	4 byte	Type L	Yes
Isochronous mode		Input resistance (Type L)	1 MΩ
Isochronous mode	No	Type N	Yes
Analog inputs		Input resistance (Type N)	1 MΩ
Number of analog inputs	2	Type R	Yes
cable length, shielded, max.	50 m	Input resistance (Type R)	1 MΩ
Cycle time (all channels), max.	Number of active channels per module x basic conversion time	Type S	Yes
technical unit for temperature measurement, adjustable	Yes	Input resistance (Type S)	1 MΩ
Voltage	Yes	Type T	Yes
thermocouple	Yes	Input resistance (Type T)	1 MΩ
Input ranges (rated values), voltages		[nicht versorgt: TAK_ABP365_001_000]	
-80 mV to +80 mV	Yes	permissible input frequency for voltage input (destruction limit), max.	20 V; +/-20 V, continuous
Input resistance (-80 mV to +80 mV)	1 MΩ	Characteristic curve linearization	
		programmable	Yes
		for thermoelements	Type B, C, E, J, K, L, N, R, S, T to IEC 584

Anexo 3: Módulo de interfaz para la conexión a bus IM-151-1. Datos Técnicos

	IM 151-1 BASIC	IM 151-1 COMPACT	IM 151-1 Standard/ Standard FO	IM 151-1 HF	IM 151-3 PN	IM 151-7 CPU/CPU FO	IM 151-7 CPU F
PROFIBUS	cobre	cobre	cobre/FO ¹⁾	cobre	—	cobre/FO ¹⁾	cobre
PROFINET	—	—	—	—	■	—	—
Nº de módulos	12	12	63	63	63	63	63
Ancho estación	2m	2m	2m	2m	2m	1m	1m
Diagnóstico	por módulo	por módulo	por canal	por canal	por canal	por canal	por canal
Funcionalidad integrada de CPU	—	—	—	—	—	CPU 314	CPU 314
Seguridad	—	—	—	—	—	—	■
Modo isócrono	—	—	—	■	—	—	—
Datos de identificación ²⁾	—	—	■	en prep.	en prep.	—	—
Actualización firmware	—	—	Bus	en prep.	Bus/Micro-MemoryCard	Micro Memory Card	Micro Memory Card
Referencia base 6ES7 151-	1CA.	1...	1AA. / 1AB.	1BA.	3AA	7AA. / 7AB.	7FA.

Datos técnicos		Datos técnicos	
MLFB	6ES7 151-7AA10-.....	MLFB	6ES7 151-7AA10-.....
Paquete de programación asociado	STEP 7 V 5.1 + SP 6 ó superior opcional: • S7-SCL • S7-GRAPH • STEP7 V5.2 + SP1 ó superior • funcionalidad de maestro (con interface maestra 6ES7 13B-4HA00-0AB0)	Temporizadores IEC • tipo • cantidad	si SFB ilimitada (sólo limitada por la memoria central)
Memoria		Áreas de datos y su remanencia	
Memoria central • integrada • ampliable	48 kbytes no	Área de datos remanente total (incl. marcas; temp.; contadores)	todos
Memoria de carga	enchufable via MMC (máx. 8 Mbytes)	Marcas • remanencia • remanencia preajustada	256 bytes si MB0 a MB15
Respaldo	garantizado por la MMC (libre de mantenimiento)	Marcas de ciclo	8 (1 byte de marcas)
Tiempos de ejecución		Bloques de datos • cantidad • tamaño	511 16 kbytes
Tiempos de ejecución para • operación al bit, mín. • operación de palabra, mín. • aritmética coma fija, mín. • aritmética coma flotante, mín.	0,1 µs 0,2 µs 2 µs 6 µs	Datos locales por clase de prioridad, máx.	510 bytes
Temporizadores/contadores y su remanencia		Bloques	
Contadores S7 • remanencia • preajustados • rango de conteo	256 ajustable de Z 0 a Z 7 0 a 999	Totales	1024 (DBs, FCs, FBs)
Contadores IEC • tipo • cantidad	si SFB ilimitada (sólo limitada por la memoria central)	OBs • tamaño	ver lista de operaciones 16 kbytes
Temporizadores S7 • remanencia • preajustada • rango de tiempo	256 ajustable sin remanencia 10 ms a 9990 s	Profundidad de anidamiento • según clase de prioridad • adicional dentro de un OB de tratamiento de errores	8 4
		FBs • cantidad • tamaño	ver lista de operaciones 512 16 kbytes
		FCs • cantidad • tamaño	ver lista de operaciones 512 16 kbytes
		Áreas de direcciones (entradas/salidas)	
		Área de direcciones E/S totales, máx.	2048 bytes

Estrategia de Control para el Proceso de Enfriamiento-Isoterma Enfriamiento de la planta de grasas de la UEBP de lubricantes CUBALUB.

Datos técnicos (continuación)			
	STANDARD	HIGH-FEATURE	BASIC
Parámetros ¹⁾	27 bytes	27 (56 ²⁾ bytes	19 bytes
Modo DP V1	-	<u>bloquear/liberar</u>	-
• Servicio en caso de configuración real diferente a la teórica	<u>bloquear/liberar</u>	<u>bloquear/liberar</u>	<u>bloquear/liberar</u>
• Alarma de diagnóstico ²⁾	-	<u>bloquear/liberar</u>	-
• Alarma de proceso ²⁾	-	<u>bloquear/liberar</u>	-
• Alarma desenchufe/enchufe ¹⁾	-	<u>bloquear/liberar</u>	-
• Diagnóstico por identificadores	-	<u>bloquear/liberar</u>	<u>bloquear/liberar</u>
• Estado del módulo	-	<u>bloquear/liberar</u>	<u>bloquear/liberar</u>
• Diagnóstico por canal	-	<u>bloquear/liberar</u>	<u>bloquear/liberar</u>
• Formato de valores analógicos	<u>SIMATIC S7/SIMATIC S5</u>	<u>SIMATIC S7/SIMATIC S5</u>	<u>SIMATIC S7/SIMATIC S5</u>
• Supresión de frecuencias perturbadoras	<u>50 Hz/60 Hz</u>	<u>50 Hz/60 Hz</u>	<u>50 Hz/60 Hz</u>
• Slot unión fría	<u>ninguno/2 a 63</u>	<u>ninguno/2 a 63</u>	<u>ninguno/2 a 12</u>
• Entrada para unión fría	RTD a canal Q/RTD a canal 1	RTD a canal Q/RTD a canal 1	-
• Longitud de bus	≤ 1m/> 1m	-	-
• Manejo de opciones en general	<u>bloquear/liberar</u>	-	-
• Manejo de opciones, slot 2 a 63	<u>bloquear/liberar</u>	-	-
Grado de protección	IP20		
Temperatura ambiente			
• Servicio	0 a 60 °C		
• Almacenamiento	-40 a +70 °C		
Dimensiones (A x A x P) en mm	45 x 119,5 x 75 (en caso de montaje sobre perfil DIN de 7,5 mm)		
1) Valores por defecto subrayados, en PROFIBUS DP máx. 244 bytes por estación.			
2) con modo isócrono activado.			
IM 151; High Feature		Rango de valores	
Sincronizar esclavo al ciclo DP ¹⁾	<u>bloquear/liberar</u>		
Tiempo T _i (leer valores de proceso)	(valores especificados por STEP 7)		
Tiempo T _o (sacar valores de proceso)	(valores especificados por STEP 7)		
1) Valores por defecto subrayados.			

Anexo 4: Módulos de interfaz IM 151-7 CPU. Datos técnicos

Datos técnicos (continuación)	
MLFB	6ES7 151-7AA10-.....
Imagen de proceso de E/S	128 bytes/128 bytes
Número de canales digitales, E/S máx.	16136 bits
De ellos, centrales, E/S máx.	248 bytes
Número de canales analógicos (descentrales + centrales)	1024 (palabras)
De ellos, centrales, E/S máx.	124 palabras
Reglas de configuración	- máx. 63 módulos periféricos por estación - ancho de la estación < 1 m ó < 2 m - máx. 10 A por grupo de carga (módulo de potencia) - módulo de interfaz maestro a la derecha junto a IM 151 CPU (puerto X2)
Hora	
Reloj	si (reloj HW)
• respaldo	si
• autonomía	tip. 6 semanas (con 40 °C de temperatura ambiente)
• precisión	desviación diaria: < 10 s
Contador de horas de funcionamiento	1
• cantidad	0
• rango de valores	2 31 horas (si se utiliza el SFC 101)
• granularidad	1 hora
• remanencia	si; debe iniciarse con cada arranque en frío
Sincronización horaria	si
• en PLC central	no
• en MPI	maestro/esclavo
Funciones de notificación S7	
Número de estaciones posibles para funciones de notificación (p. ej. OS)	12 (depende de los enlaces configurados para comunicación PG/OP y comunicación base S7)
Mensajes de diagnóstico al proceso	si
• bloques de alarma S activos simultáneamente, máx.	40
Funciones de test y puesta en servicio	
Estado/forzado de variables	si
• variables	entradas, salidas, marcas, DB, temporizadores, contadores
• número de variables	30
- de ellas, estado de variables	30
- de ellas, forzado de variables	14
Forzado permanente	si
• variables	entradas/salidas
• número de variables, máx.	10
Estado de bloque	si
Paso individual	si
Punto de parada	2
Búfer de diagnóstico	si
• número de entradas (no ajustable), máx.	100
Funciones de comunicación	
Comunicación PG/OP	si
MLFB	6ES7 151-7AA10-.....
Comunicación global por datos	si
• número de paquetes GD, máx.	4
- emisores, máx.	4
- receptores, máx.	4
• tamaño de paquetes GD, máx.	22 bytes
- de ellos, coherentes	22 bytes
Comunicación base S7	si
• datos útiles por petición, máx.	76 bytes
- de ellos, coherentes	76 bytes (con X_SEND o X_RCV) 64 bytes (con X_PUT o X_GET con servidor)
Comunicación S7	si
• como servidor	si
• como cliente	no
• datos útiles por petición, máx.	180 bytes
- de ellos, coherentes	64 bytes
Comunicación compatible S5	no
Comunicación estándar	no
Número de enlaces aplicables para	12
• comunicación PG	
- reservados (por defecto)	1
- ajustables	1 a 11
• comunicación OP	
- reservados (por defecto)	1
- ajustables	1 a 11
• comunicación base S7	
- reservados (por defecto)	0
- ajustables	0 a 10
Puertos	
1er puerto (integrado)	
Tipo	puerto RS 485 integrado y coexistente
Norma	RS 485
Aislamiento galvánico	si
Alimentación en puerto (15 a 30 V DC), máx.	80 mA
Funcionalidad	
• MPI	si
• PROFIBUS DP	si, esclavo DP (activo/pasivo)
• acoplamiento punto a punto	no
Operación con MPI	
Número de enlaces (también con módulo maestro DP enchufado)	12 (por CPU)
Servicios	
• comunicación PG/OP	si
• routing	si (con módulo maestro)
• comunicación por datos globales	si
• comunicación base S7	si
• comunicación S7	si
- como servidor	si
- como cliente	no
• velocidades de transmisión	máx. 12 Mbits/s
Operación como esclavo DP	
Número de enlaces	12 (por CPU)

Anexo 5: Diagrama funcional para programación de control del autómeta.

