

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica



**“Diseño e Implementación de un Sistema de Control para
un Reactor Químico”**

TESIS

Para optar el grado de Maestro en Ciencias
Mención: Automática e Instrumentación

Presentada por:

Vicky Salazar Revatta

LIMA - PERÚ

2006

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
“Diseño e Implementación de un Sistema de Control para un Reactor
Químico”

TESIS

Para optar el grado de Maestro en Ciencias
Mención: Automática e Instrumentación

Presentada por:

Vicky Salazar Revatta

Lima – Perú

Extracto

El presente trabajo consiste en diseñar e implementar un sistema de control para un reactor químico, en el cual la parametrización, registro y monitoreo del sistema se realiza mediante una computadora haciendo uso de un Sistema de Control y Adquisición de Datos denominado SCADA y el control propiamente dicho está a cargo de un microcontrolador de alta performance. Este sistema es capaz de controlar diferentes procesos (“recetas”) para la fabricación de diversos productos químicos. En la presente tesis centramos el estudio en el proceso de fabricación de la resina fenólica tipo novolaca, la misma que se utiliza en grandes cantidades en la industria química peruana, la cual se debe importar, ya que en el Perú todavía no se fabrica.

La tesis incluye la fabricación de un reactor químico, modelo experimental, cuya capacidad es de 4 galones, el cual debe ser automatizado para implementar el sistema de control. El reactor fabricado consta de un recipiente de acero inoxidable donde se realizarán las reacciones químicas, sistemas de calentamiento y enfriamiento y está constituido por: condensadores, paletas de agitación, bombas de agua y

succión, además posee sensores de temperatura y actuadores - motores, bombas y electroválvulas - los cuales sirven para automatizar el mismo, cumpliendo los requerimientos necesarios para poder realizar la fabricación de resinas fenólicas.

Durante la ejecución del trabajo se diseñó y elaboró también, tarjetas electrónicas acondicionadoras de señal y de control para poder comunicar el microcontrolador con los sensores y actuadores.

El reactor químico automatizado con el sistema de control, podrá ser utilizado como un reactor de investigación en las entidades educativas o en los laboratorios de la industria, ya que tiene una gran flexibilidad en la ejecución de los diferentes procesos.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

“Desing and Implementation of a Control System for a Chemical Reactor”

THESIS

Requirement for the Master in Science Degree
Field: Automatic and Instrumentation

by:

Vicky Salazar Revatta

Lima – Perú

Abstract

The actual job consists in design and implementation of control system for a chemical reactor, where the register and overview of the systems are made with the computer using an acquisition and data control System named SCADA and the control depend directly from a microcontroller with high performance.

This system is able to make different processes ("prescriptions") for diverse the chemical products manufacture. In the present thesis we centered the study in the process of manufacture of the phenolic resin novolaca type, which is used in great amounts in the Peruvian Chemical Industry, resin must be imported, because Peru still does not make it.

The thesis includes the manufacture of a chemical reactor, experimental model, whose capacity is 4 gallons, and must be automated to implement its control system. The manufactured reactor has a stainless steel container where the chemical reactions will be made, heating and cooling systems and are constituted by: condensators, agitation trowels, water and suction pumps, in addition it has sensors of temperature and actuators - engines, pumps and electroválvulas - which is used to automate the same one, becoming the requirements necessary to be able to make the phenolic resin manufacture.

During the work it also has been designed and made up electronic cards of signal and control to be able to communicate the microcontroller with the sensors and actuators.

The automated chemical reactor with the control system, could be used as a research reactor by educational organizations or industry laboratories, since it has great flexibility for the execution of many processes.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1	
Introducción	1
1.1 Objetivos de la Tesis	2
1.2 Organización de la Tesis	3
Capítulo 2	
Control De Procesos	5
2.1 Definición de un Proceso	5
2.1.1 Procesos "Batch"	6
2.1.2 Proceso Continuo	8
2.1.3 Proceso Semicontinuo	8
2.2 Conceptos Básicos del Control de Procesos	9
2.3 Estrategias Tradicionales de Control de Procesos	12
2.3.1 Lazo de Control de un Proceso	12
2.3.2 Elementos de Control	13
2.3.3 Lazo Abierto y Lazo Cerrado	14
2.3.4 Algoritmos de Control	18
2.3.4.1 Control ON – OFF	19
2.3.4.2 Control Proporcional	19
2.3.4.3 Control Integral	20
2.3.4.4 Control Derivativo	20
2.3.4.5 Comparación de las combinaciones de los modos de control	22
2.4 Reglas de Sintonía de Controladores PID	24
2.4.1 Nuevo método de Sintonización para controladores PID	28
Capítulo 3	
Reactores Químicos	31
3.1 Descripción de un Reactor Químico	31
3.1.1 Clasificación de los reactores	32
3.1.2 Reactores discontinuos	37
Capítulo 4	
Automatización Industrial Moderna	41
4.1 Sistemas de Control	41
4.1.1 Control mediante una computadora personal – PC	42
4.1.2 Control mediante Microcontroladores	43
4.2 Sistemas SCADA (Software de control, supervisión y adquisición de datos)	45

Capítulo 5	
Resinas Fenólicas	56
5.1 Resinas Tipo Novolacas	57
5.2 Proceso de Fabricación de Resinas Novolacas	60
Capítulo 6	
Implementación De Un Sistema De Control Para Un Reactor Químico	66
6.1 Reactor Químico	66
6.2 Software de Control	74
6.3 Software de Control y Adquisición de Datos	85
Capítulo 7	
Instrumentación	91
7.1 Sensores de temperatura	91
7.2 Electroválvulas	93
7.3 Resistencias Térmicas	94
7.4 Motor de Corriente Continua	95
7.5 Bomba de Succión y Bomba de Agua	97
7.6 Fuentes de Alimentación	98
7.7 Microcontrolador	99
7.8 Computadora	103
Capítulo 8	
Pruebas y Puesta en Marcha	104
8.1 Hardware	104
8.2 Software	108
Capítulo 9	
Conclusiones y Recomendaciones	133
Apéndice A	
A.1 Programa del Microcontrolador	136
A.2 Programa del Software EXSCADA	149
Bibliografía	171

TABLAS

Tabla 01	28
Tabla 02	29
Tabla 03	102

FIGURAS

Figura 01	13
Figura 02	13
Figura 03	16
Figura 04	30
Figura 05	34
Figura 06	35
Figura 07	36
Figura 08	38
Figura 09	39
Figura 10	39
Figura 11	40
Figura 12	64
Figura 13	65
Figura 14	67
Figura 15	69
Figura 16	69
Figura 17	70
Figura 18	71
Figura 19	71
Figura 20	72
Figura 21	73
Figura 22	75
Figura 23	76
Figura 24	77
Figura 25	77
Figura 26	78
Figura 27	79
Figura 28	80
Figura 29	81
Figura 30	82
Figura 31	84
Figura 32	86
Figura 33	86
Figura 34	89
Figura 35	92
Figura 36	92
Figura 37	93
Figura 38	94
Figura 39	95
Figura 40	95
Figura 41	96
Figura 42	97
Figura 43	98

Figura 44	99
Figura 45	101
Figura 46	102
Figura 47	108
Figura 48	110
Figura 49	111
Figura 50	112
Figura 51	113
Figura 52	113
Figura 53	114
Figura 54	115
Figura 55	116
Figura 56	117
Figura 57	117
Figura 58	118
Figura 59	119
Figura 60	120
Figura 61	121
Figura 62	122
Figura 63	123
Figura 64	124
Figura 65	125
Figura 66	126
Figura 67	127
Figura 68	128
Figura 69	129
Figura 70	130
Figura 71	131
Figura 72	132

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Hoy en día el Control de Procesos ha tomado gran importancia en la Automatización Industrial, debido a que los parámetros a controlar interactúan entre sí y deben mantenerse con una exactitud elevada y con una rápida velocidad de respuesta. Por otro lado en muchos casos los parámetros deben ser controlados siguiendo una trayectoria determinada.

A muchas secuencias de control de procesos se les asigna la denominada “Receta”, la cual debe ser la estrategia óptima para el control de dicho proceso.

A través del tiempo, el Control de Procesos ha ido adquiriendo mayor importancia, de manera que se han ido desarrollando diferentes algoritmos de control cada vez más sofisticados, los cuales deben ser empleados según la aplicación a controlar.

El presente trabajo de Tesis consiste en el “Diseño e Implementación de un Sistema de Control para un Reactor Químico”, en el cual la parametrización, registro y monitoreo del sistema se realizará mediante una computadora y el control propiamente dicho lo realizará un microcontrolador de alta performance. Este sistema deberá ser capaz de realizar diferentes “recetas” para la fabricación de diversos productos químicos. Este documento se centrará en el estudio del proceso de fabricación de Resinas Fenólicas, ya que este producto es bastante utilizado en la industria química peruana debiendo ser importado. Si se

lograra producir en forma óptima este producto, nos permitiría bajar los precios del mismo y reducir su importación.

A la vez este reactor automatizado, por su gran flexibilidad en la definición de las recetas y su control, podrá ser utilizado como un reactor de investigación en las entidades educativas y/o en los laboratorios de la industria.

1.1 OBJETIVOS DE LA TESIS

Los objetivos principales del presente trabajo de tesis son: diseñar e implementar un sistema de control para un reactor químico y la fabricación de resinas fenólicas haciendo uso de este sistema de control y del reactor químico implementado. Para lograr ambos propósitos, en el desarrollo de la presente tesis se plantearon los siguientes objetivos específicos:

1. Construcción e implementación de un reactor químico.
2. Descripción y definición del proceso (“receta”) de fabricación de resinas fenólicas.
3. Definición de los algoritmos más adecuados para el control de los procesos implicados en la fabricación de las resinas fenólicas.
4. Implementación de la estrategia de control en el microcontrolador.
5. Desarrollo del software SCADA (Software de Control y Adquisición de Datos) en la computadora para la parametrización, control y supervisión del sistema de control del reactor químico.

1.2 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

En los primeros capítulos se hace referencia a todos los temas relacionados con el diseño e implementación del sistema de control de un reactor químico, para dar al lector un enfoque global de los temas investigados para la ejecución del presente trabajo.

En el capítulo 2 se explica la teoría sobre el Control de Procesos. El reactor automatizado será capaz de fabricar diversos productos químicos, dependerá del usuario la formulación de la receta indicada para el producto determinado, por lo que hablar sobre el control de procesos es interesante para introducir al lector en el tema. Además se hace una explicación sobre los tipos de control y algoritmos implementados.

En el capítulo 3 se desarrolla todo lo referente a los reactores químicos, generalidades, características, tipos de reactores, clasificación, etc.

El capítulo 4 trata sobre los Sistemas de Control existentes, sistemas de control mediante computadoras, haciendo uso de tarjetas de adquisición de datos, y/o mediante microcontroladores. Este capítulo también describe que es un Sistema SCADA, sus características y ventajas, haciendo mención a los más conocidos y al implementado en el desarrollo del presente trabajo.

En el capítulo 5 se explica lo que es una resina fenólica, su utilidad y su proceso de fabricación.

El capítulo 6 describe el reactor químico implementado para el desarrollo de la presente tesis, explicando asimismo toda la parte mecánica, eléctrica y electrónica, así como la integración entre las

mismas. También se describe el programa realizado en el microcontrolador y finalmente el Software SCADA desarrollado para que el usuario pueda manejar el sistema de control del reactor químico de una manera sencilla, esto a través de sus respectivos diagramas de flujo.

En el capítulo 7 se describe toda la instrumentación utilizada en el desarrollo de la tesis, sensores, actuadores y sus respectivas interfaces, tarjetas acondicionadores de señal y el microcontrolador utilizado.

En el capítulo 8 se describe las pruebas realizadas durante la implementación del sistema de control así como la puesta en marcha del mismo.

En el capítulo 9 se da a conocer las conclusiones obtenidas luego de realizar el presente trabajo y menciona las recomendaciones necesarias, así como las mejoras que se pueden realizar.

Al final del trabajo se anexan los programas del microcontrolador y del Software SCADA.

Capítulo 2

CONTROL DE PROCESOS

2.1 DEFINICIÓN DE UN PROCESO

Proceso es una palabra, que tiene diferentes significados de acuerdo al área de trabajo en la que se le aplique. En la industria o la tecnología, un proceso es un método o procedimiento seguido para obtener un resultado, el tipo de resultado esperado ayuda a definir el tipo de proceso a considerar.

Un proceso puede ser el conjunto de pasos que gobiernan una transformación química o la combinación de sustancias para obtener nuevos productos, también puede ser, el conjunto de reglas que define una conversión física, mezcla o separación de diversas sustancias bajo efectos de calor o presión. Por ejemplo la conversión de madera a papel blanco se obtiene a través de una serie de procesos químicos haciendo uso de sustancias químicas bajo presión y a una temperatura relativamente alta.

Para un ingeniero que desea construir una planta para producir productos químicos con fines comerciales, un proceso viene a ser una secuencia de pasos a seguir para la preparación del producto o la colección de equipos, reactores, tuberías, tanques, columnas de destilación, condensadores, etc., en donde los fenómenos químicos o físicos ocurrirán para la preparación del producto final. Por lo tanto el término “proceso”, para efectos de la presente tesis, se refiere a la “receta” a seguir y a los “utensilios” a utilizar para obtener un nuevo producto.

Un proceso puede ser relativamente simple como en una olla donde se calienta agua hasta obtener vapor, o complejo como una planta petroquímica, la clave principal para obtener un producto con las especificaciones deseadas es poseer una adecuada “receta” y disponer de un buen sistema de control.

El tipo de proceso elegido para un producto en particular dependerá de los requerimientos de producción y de las cantidades a producir. Para algunos productos los procesos tipo “batch” son ideales, para otros productos, los procesos continuos son económicamente factibles.

2.1.1 Procesos “Batch”

Los procesos batch son aquellos en donde se realizan sucesivas operaciones físicas o químicas dentro de un mismo reactor o tanque. Un proceso batch se opera de acuerdo a una receta, se mezclan ingredientes dentro de un reactor hasta obtener un producto con las características deseadas.

Los procesos batch se utilizan mayormente para los siguientes productos:

- a) Productos que son producidos bajo diferentes formulaciones pero en cantidades pequeñas, como por ejemplo productos farmacéuticos, perfumes, detergentes, etc.
- b) Productos costosos con mercados limitados o tiempo de vida cortos, como perfumes.
- c) Productos que requieren de una larga fermentación o tiempo de maduración en condiciones sin disturbios, como el vino, la cerveza, el whisky, etc.

Además, muchos procesos químicos se inician en un proceso tipo batch hasta que la demanda del producto crezca y se justifique la obtención de equipos únicamente dedicados a la fabricación del mismo.

Un proceso tipo batch tiene como mínimo dos formas de preparar un producto: la receta batch y la secuencia batch.

Una receta batch consiste en una lista de parámetros como la temperatura de reacción, las cantidades de productos químicos, el tiempo y la presión de reacción y un perfil de condiciones de operación relacionadas con el tiempo.

La secuencia batch define todos los estados necesarios del proceso y el orden en el cual los estados deben proseguir.

Existen tres modos básicos de operación de un proceso batch: manual, semiautomática y automática. En el modo manual, la secuencia es dada por el operador a través de comandos o manipulando equipos desde una consola de operación, presionando botones de arranque o parada para las diversas operaciones. En el modo semiautomático, cada secuencia es iniciada por el operador de modo separado, pero luego el proceso continúa de forma automática siguiendo varios pasos, haciendo uso de controladores como por ejemplo los Controladores de Lógica Programable - "PLC". En el modo automático, cada una de las secuencias es inicializada, o se puede repetir sin intervención del operador, todo dependerá de los parámetros, es decir de la "receta" programada al inicio del proceso.

La ventaja principal de un proceso tipo batch es que el mismo equipo puede ser usado para producir diferentes productos sucesivamente una vez que el recipiente sea limpiado para la siguiente

receta. La desventaja es que no se puede producir en grandes cantidades por limitaciones de espacio y que es necesario la limpieza frecuente de los equipos para la preparación del siguiente producto.

2.1.2 Proceso Continuo

En un proceso continuo un producto es fabricado continuamente día tras día sin interrupciones, excepto por reparaciones de emergencias o por mantenimientos programados periódicamente. Las materias primas ingresan al proceso de manera constante y pasan por una serie de transformaciones sucesivas hasta que el producto queda terminado.

El tipo de control requerido es diferente que en un proceso tipo batch. Los controladores deben asegurar que el proceso de operación se mantenga sin perturbaciones durante todo el tiempo que dure el mismo. Mayormente la temperatura, presión, flujo, etc. se mantienen constantes o con variaciones controladas a lo largo del proceso.

2.1.3 Proceso Semicontinuo

Este tipo de proceso es el menos utilizado. Es usualmente requerido para aplicaciones específicas y repetitivas. Como su nombre lo dice, este proceso comparte características de los dos anteriores tipos de proceso, batch y continuo, y requiere dispositivos de control así como temporizadores y controladores programables.

Algunos tipos de procesos (como limpieza de gas, filtros líquidos o centrífugas, tratamiento de agua, etc.) son semicontinuos o cíclicos porque sus tareas son repetitivas por naturaleza. La función de este tipo de proceso es en su mayoría separar componentes del agua, aire, etc.

2.2 CONCEPTOS BÁSICOS DEL CONTROL DE PROCESOS

Un proceso requiere de un número de eventos, para tomar lugar en una secuencia en particular, de la manera más eficiente y económica. Estos eventos serán eficientes sólo si los resultados de un evento precedente son siempre predecibles y repetitivos, de tal modo debe requerirse de un mínimo esfuerzo para pasar al siguiente paso de una manera óptima.

En un proceso ideal, todas las entradas son constantes en calidad (composición, temperatura, presión, etc) y en cantidad. Cada paso del proceso tiene parámetros fijos y constantes, como porcentaje de calentamiento, características de fluido constante, etc. El proceso funciona correctamente y produce siempre productos de calidad. En la realidad los procesos nunca son ideales y nunca funcionan en un estado constante durante largos períodos de tiempo. Existe toda clase de perturbaciones en las condiciones de operación del proceso, alimentación de la materia prima, proporciones de flujo, condiciones climáticas, y así sucesivamente; debido a estas variaciones dinámicas, las propiedades deseadas del producto final varían.

Las variaciones pueden ocurrir de manera brusca, por ejemplo cuando la materia prima de una composición es sustituida de repente por otra en un proceso, o de manera lenta cuando poco a poco se va reemplazando las proporciones de la materia prima hasta quedarse con la deseada. Algunas variaciones son dadas por la naturaleza, como por ejemplo la temperatura del ambiente durante el día o durante el año. Otras variaciones son instantáneas y ocurren solo por tiempos muy cortos. Las variaciones en el producto son causadas no solo por fuerzas externas sino también por deterioración de la maquinaria que fabrica el producto como bombas, tanques, intercambiadores de calor, etc. Si un

proceso se deja que funcione por si mismo sin una supervisión y sin una manipulación de sus variables, puede que sea afectado de tal manera que se deba parar la producción lo que originaría pérdidas en la planta, por lo que se debe tomar acciones preventivas.

Hoy en día los procesos industriales no son capaces de funcionar sin el uso de sistemas automáticos de control los cuales monitorean las variaciones que se manifiestan y reaccionan cambiando los parámetros que deben controlar. Los procesos deben ser controlados por varias razones:

1. Para eliminar o reducir el error humano mientras se opera una planta, por consiguiente se da mayor seguridad a los operarios y calidad al producto final.
2. Para reducir la cantidad de trabajo y los costos de mano de obra, los cuales incrementan el costo del producto.
3. Para minimizar el consumo de energía.
4. Para mejorar la calidad del producto.
5. Para reducir el tamaño de la planta y la capacidad de los almacenes.
6. Para disminuir los niveles de contaminación en el proceso de producción.

Los sistemas automáticos de control permiten al operador liberarse de las tareas tediosas y repetitivas de monitoreo y ajuste manual de los parámetros del proceso y le permite tener más tiempo para supervisar las condiciones de operación de las máquinas, realizar tareas de mantenimiento y trabajar en la optimización de las operaciones de la planta.

El diseño de un proceso siempre se inicia asumiendo que el proceso operará bajo condiciones balanceadas, es decir que funcionará siempre bajo las condiciones diseñadas. Un proceso se dice que se encuentra en condiciones balanceadas cuando la suma de todos los fluidos entrantes es igual a la suma de todos los fluidos salientes. Lo mismo se aplica para la energía entrante y saliente. Cualquier cambio en las condiciones de una de las entradas sea de material o de energía y que no este acompañado de una variación apropiada a la salida, desbalanceará el proceso.

Un desequilibrio del proceso se manifestará de varias maneras, podría ser en el cambio del nivel de un tanque, en la variación de una temperatura, etc. Algunos procesos tienen una capacidad inherente para limitar los efectos de las variaciones externas, es decir que en caso el proceso se desequilibre, los parámetros se configuran automáticamente para balancear el mismo. La habilidad inherente de auto balancear el proceso con certeza, es llamada "auto regulación"

La mayoría de procesos no son totalmente inmunes a las perturbaciones externas a pesar de ser autorregulables. Incluso en los mejores diseños y en los procesos relativamente nuevos no se puede mantener el modo de operación deseado indefinidamente. Es por consiguiente necesario asegurar que el balance de materiales y de energía entre las entradas y las salidas permanezcan bajo control siempre. Un control automático puede ser definido como un mecanismo que monitorea los valores de las variables de un proceso y opera para mantener a esta variable lo más similar a la predefinida. Así. La función principal de un control de procesos automático es manipular la relación de material o energía para mantener las variables del proceso sin desviaciones considerables.

Finalmente se puede concluir, que el objetivo del sistema de control automático de un proceso es utilizar la variable manipulada para mantener la variable controlada en el setpoint a pesar de las perturbaciones.

2.3 ESTRATEGIAS TRADICIONALES DE CONTROL DE PROCESOS

2.3.1 Lazo de Control de un Proceso

En la figura 01 se ilustra un tanque de agua caliente que recibe agua con una temperatura variable, probablemente dependiendo de la estación del año o de otro factor, la temperatura no es constante. El tanque sin embargo tiene como salida agua caliente a una temperatura fija, la cual se mantiene constante debido al ingreso de vapor caliente por las tuberías del tanque. La cantidad de vapor inyectado dependerá de la diferencia entre la temperatura leída y la temperatura deseada (setpoint) ingresada al inicio del proceso. Un sensor de temperatura ubicado en el interior del tanque permite a un controlador obtener la temperatura del tanque y ordenar la apertura o cierre de la válvula de vapor con la finalidad de mantener la temperatura constante. La combinación de funciones como medición de temperatura, transmisión de la medición, la comparación entre la medición y el setpoint, la decisión de la acción correctiva para otras variables y la implementación actual de la acción correctiva a través de la válvula de control son conocidos como "lazo de control". En otras palabras al conjunto de elementos que contribuyen al control automático de la temperatura de salida se le conoce como "lazo de control".

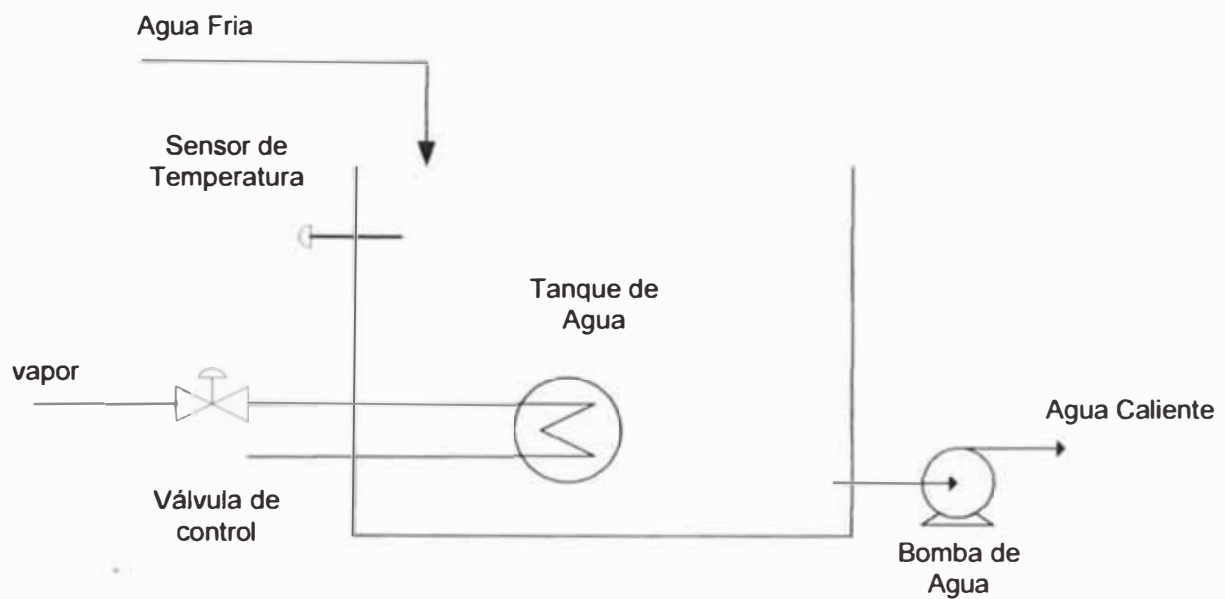


Figura 01: Tanque de agua y Lazo de control de temperatura

La figura 02 presenta mediante un diagrama de bloques la relación entre las diversas señales.

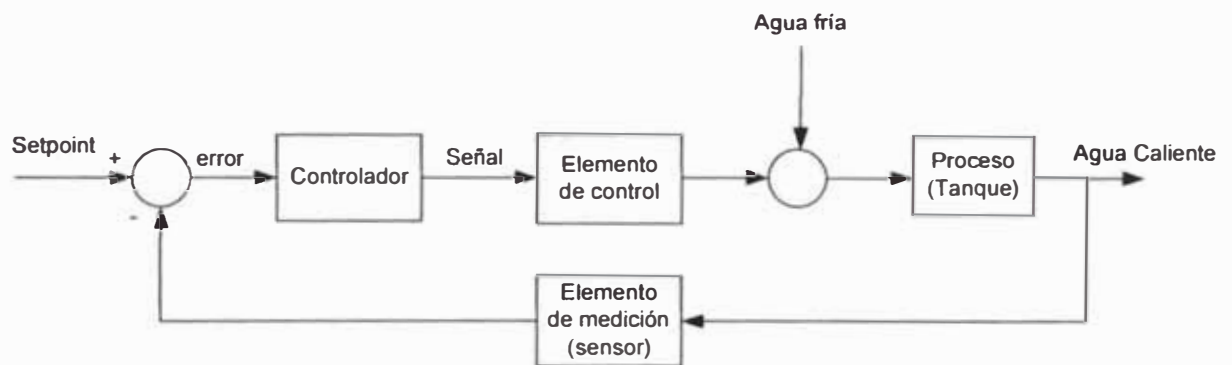


Figura 02. Diagrama de bloques del lazo de control de un tanque de agua

2.3.2 Elementos de Control

Cada lazo de control consiste de por lo menos 4 elementos fundamentales, los cuales trabajan juntos para controlar variables deseadas.

1. Un sensor
2. Un elemento de transmisión
3. Un controlador
4. Un elemento de control final (Actuador)

El sensor es la unidad que detecta el cambio en el proceso realizando la medición. En el ejemplo anterior es el sensor de temperatura.

Un elemento de transmisión recibe la señal del sensor y la convierte en una señal diferente la cual puede ser transmitida hacia el controlador, también se conocen como circuitos acondicionadores de señal.

La señal recibida del elemento de transmisión es comparada con un valor predeterminado (setpoint) dentro de un controlador, el cual a través de funciones programadas envía señales hacia el elemento de control final para realizar cambios en el proceso.

El elemento de control final puede ser una unidad modulada, la cual cambiará proporcionalmente de acuerdo a la señal recibida del controlador (señal analógica) o también puede ser un elemento de dos posiciones on/off. El lazo de control finaliza en el elemento de control final.

2.3.3 Lazo Abierto y Lazo Cerrado

Los sistemas de control se clasifican en sistemas de lazo abierto y de lazo cerrado. La distinción la determina la acción de control, que es la que activa al sistema para producir la salida.

Un sistema de control de lazo abierto es aquel en el cual la acción de control es independiente de la salida. Un sistema de control de lazo cerrado es aquel en el que la acción de control es en cierto modo dependiente de la salida.

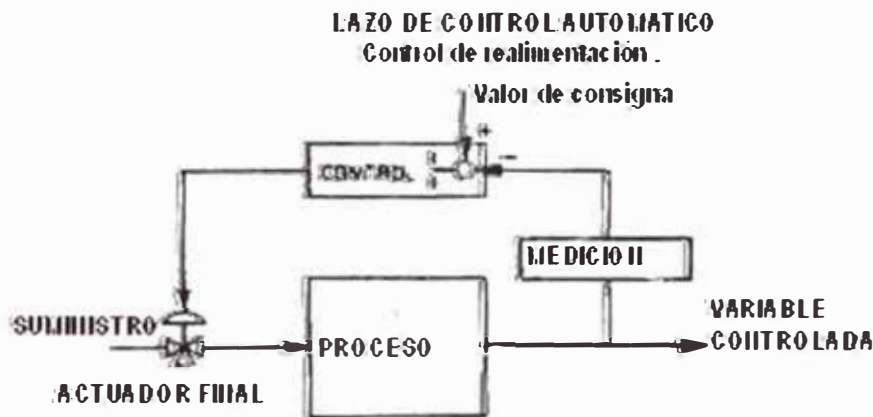
Los sistemas de control de lazo abierto tienen rasgos sobresalientes. La habilidad que éstos tienen para ejecutar una acción con exactitud está determinada por su calibración. Calibrar significa establecer o restablecer una relación entre la entrada y la salida con el fin de obtener del sistema la exactitud deseada. Estos sistemas no tienen el problema de la inestabilidad, que presentan los de lazo cerrado.

Los sistemas de control de lazo cerrado se llaman comúnmente sistemas de control por realimentación.

Por ejemplo, un tostador automático es un sistema de control de lazo abierto, que está controlado por un regulador de tiempo. El tiempo requerido para hacer tostadas, debe ser anticipado por el usuario, quien no forma parte del sistema. El control sobre la calidad de la tostada (salida) es interrumpido una vez que se ha terminado el tiempo, el que constituye tanto la entrada como la acción de control.

Otro ejemplo sería, el de un mecanismo de piloto automático y el avión que controla, los cuales forman un sistema de control de lazo cerrado (por realimentación). Su objetivo es mantener una dirección específica del avión, a pesar de los cambios atmosféricos. El sistema ejecutará su tarea midiendo continuamente la dirección instantánea del avión y ajustando automáticamente las superficies de dirección del mismo (timón, aletas, etc.) de modo que la dirección instantánea coincida con la especificada. El piloto u operador, quien fija con anterioridad el piloto automático, no forma parte del sistema de control.

El lazo de control realimentado simple sirve para ilustrar los cuatro elementos principales de cualquier lazo de control explicados en el ítem anterior. Ver figura 03.



La medición debe ser hecha para indicar el valor actual de la variable controlada por el lazo.

La realimentación es la propiedad de un sistema de lazo cerrado que permite que la salida (o cualquier otra variable controlada del sistema) sea comparada con la entrada al sistema (o con una entrada a cualquier componente interno del mismo con un subsistema) de manera tal que se pueda establecer una acción de control apropiada como función de la diferencia entre la entrada y la salida.

Generalmente se dice que existe realimentación en un sistema cuando existe una secuencia cerrada de relaciones de causa y efecto entre las variables del sistema. El concepto de realimentación está claramente ilustrado en el mecanismo del piloto automático del ejemplo dado. La entrada es la dirección especificada, que se fija en el tablero de control del avión y la salida es la dirección instantánea determinada por los instrumentos de navegación automática. Un dispositivo de

comparación explora continuamente la entrada y la salida. Cuando los dos coinciden, no se requiere acción de control. Cuando existe una diferencia entre ambas, el dispositivo de comparación suministra una señal de acción de control al controlador, o sea al mecanismo de piloto automático. El controlador suministra las señales apropiadas a las superficies de control del avión, con el fin de reducir la diferencia entre la entrada y la salida. La realimentación se puede efectuar por medio de una conexión eléctrica o mecánica que vaya desde los instrumentos de navegación que miden la dirección hasta el dispositivo de comparación.

Una ventaja del sistema de control de lazo cerrado es que el uso de la retroalimentación hace que la respuesta del sistema sea relativamente insensible a perturbaciones externas y variaciones internas de parámetros del sistema. De este modo, es posible utilizar componentes relativamente imprecisos y económicos, y lograr la exactitud de control requerida en determinada planta, cosa que sería imposible en un control de lazo abierto

Desde el punto de vista de la estabilidad, en el sistema de control de lazo abierto, ésta es más fácil de lograr, ya que en él, la estabilidad no constituye un problema importante. En cambio, en los sistemas de lazo cerrado, la estabilidad sí es un problema importante, por su tendencia a sobre corregir errores que pueden producir oscilaciones de amplitud constante o variable.

Los rasgos más importantes que la presencia de un control de lazo cerrado imparte a un sistema son:

- a) Aumento de la exactitud, la habilidad para reproducir la entrada fielmente.

- b) Reducción de la sensibilidad de la salida, correspondiente a una determinada entrada, ante variaciones en las características del sistema.
- c) Efectos reducidos de la no linealidad y de la distorsión.
- d) Aumento del intervalo de frecuencias (de la entrada) en el cual el sistema responde satisfactoriamente.
- e) Tendencia a la oscilación o a la inestabilidad.

2.3.4 Algoritmos de Control

El hardware dentro de un elemento de control puede ser construido o configurado de muchas maneras para obtener diferentes relaciones entre la respuesta del controlador y el error detectado en el proceso. La relación entre el error y la salida del controlador es llamada "acción" o "modo". A esta relación también se le puede determinar "algoritmo de control". Dependerá del algoritmo programado o elegido para obtener una mejor respuesta ante una señal errada.

Los modernos controladores industriales están diseñados para producir uno o la combinación de los siguientes modos de control:

1. Control On – off (dos posiciones)
2. Control Proporcional
3. Control Derivativo
4. Control Integral

En la industria se utilizan mayormente combinaciones de estos modos de control como, proporcional integral, o proporcional integral derivativo.

Un algoritmo de control reconoce la existencia, el tamaño, dirección y la velocidad de la señal de error y actúa para determinar el cambio en la salida del controlador para minimizar el error.

2.3.4.1 Control ON-OFF

El control ON-OFF es el más simple y el más económico modo de control de lazo cerrado. Los controladores ON-OFF comparan la señal medida con la dada en el setpoint y dan la orden al actuador para moverse de una posición determinada a otra posición determinada. Las posiciones del actuador, como una válvula en una línea de vapor de un tanque de calor, son totalmente abierto o totalmente cerrado. Un controlador ON-OFF no puede hacer correcciones precisas y no se logra llevar al proceso a un estado estable.

Por ejemplo en un control de temperatura de un refrigerador, si la temperatura medida es mayor a la temperatura de setpoint entonces se apagará el compresor, y en caso que la temperatura real sea menor que la temperatura de setpoint entonces el compresor se encenderá.

2.3.4.2 Control Proporcional

Este tipo de control es el más simple. La señal de salida del controlador (la acción correctiva) es igual a una constante multiplicada por la diferencia entre la señal medida de la variable a controlar y el setpoint deseado, a lo cual se añade un valor constante. La siguiente ecuación representa el modo de control proporcional:

$$\text{Salida} = K_p e + p_o \dots\dots\dots (2.1)$$

Donde:

K_p = la constante de proporcionalidad o la ganancia proporcional

e = el error o diferencia entre el setpoint y el valor de la variable medida

p_0 = la salida del controlador cuando no existe diferencia entre el setpoint y la variable medida.

Sin importar el mecanismo en sí ni la potencia que lo alimenta, el controlador proporcional es esencialmente un amplificador con ganancia ajustable.

2.3.4.3 Control Integral

En un controlador con acción de control integral, el valor de la salida del controlador varía en razón proporcional a la señal de error, es decir:

$$\text{Salida} = K_i \int e dt \dots\dots\dots (2.2)$$

donde K_i es una constante ajustable. Mientras que el error sea positivo, la señal de salida del controlador se incrementará. Cuando el error empiece a disminuir y se vuelva negativo, el valor de la integral del error se reducirá y la señal de salida del controlador decrecerá. Ante un error igual a cero, el valor de la salida permanece constante. En ocasiones la acción de control integral recibe el nombre de control de restablecimiento (reset).

2.3.4.4 Control Derivativo

La acción del control derivativo es proveer una salida para el controlador, la cual sea proporcional al porcentaje de cambio del error para el setpoint. La salida del controlador es gobernada por la ecuación:

$$\text{Salida} = K_d \frac{d}{dt} e \dots\dots\dots (2.3)$$

La acción derivativa por si sola, no es capaz de controlar un proceso porque no reconoce un error constante para el setpoint, es decir la derivada de una constante es igual a cero, lo que ocasionaría un cambio repentino en la variable de control la cual sería una señal de salida "infinita" para el controlador y causaría que el elemento de control final adopte una señal totalmente abierta o totalmente cerrada.

Podemos resumir lo anteriormente explicado mencionando que un control proporcional reducirá el tiempo de elevación hacia el setpoint indicado minimizando pero no eliminando el error en estado estacionario. El control integral, tendrá el efecto de eliminar el error en estado estacionario pero puede empeorar la respuesta transitoria. Un control derivativo incrementa la estabilidad del sistema, reduciendo el sobrepico y mejorando la respuesta transitoria. Los efectos de cada uno de los controladores PID en un sistema de lazo cerrado se pueden resumir de la siguiente manera:

	Tiempo de Subida	Sobrepico	Tiempo de establecimiento	Error
K_p	Baja	Sube	Poco Cambio	Baja
K_i	Baja	Sube	Sube	Elimina
K_d	Poco Cambio	Baja	Baja	Poco cambio

2.3.4.5 Comparación de las combinaciones de los modos de control

Los modos de control de forma individual no se usan separadamente, cada modo de control tiene propiedades independientes que se complementan cuando se combinan. Ocasionalmente, el modo de control proporcional se puede usar aisladamente.

Control Proporcional.- Este tipo de control, descrito anteriormente, es el modo de respuesta más básico de los controladores automáticos. Tiene la respuesta en el tiempo más rápida a los cambios en el setpoint y responde inmediatamente ante cambios en las condiciones de operación. Sin embargo, este tipo de control es adecuado sólo para sistemas que tiene poca capacidad y donde un offset no es crítico.

Control Proporcional Integral.- El control integral se usa rara vez individualmente, ya que tiene una velocidad de respuesta muy lenta ante los cambios. Sin embargo es frecuente combinarlo con un control proporcional donde la respuesta se hace más rápida. La salida del controlador es definida por la siguiente ecuación:

$$\text{Salida} = K_p e + K_i \int e dt + p_o \dots\dots\dots (2.4)$$

Donde $K_i = \frac{K_p}{T_i}$, K_p es la ganancia proporcional y T_i es el tiempo integral.

Ambos valores K_p y T_i son ajustables. El tiempo integral regula la acción de control integral, mientras que una modificación en K_p afecta tanto a la parte integral como a la proporcional de la acción de control.

El efecto de la combinación de la acción proporcional y la acción integral asegura una respuesta inmediata a la salida ante un cambio y la eliminación del offset debido a la acción integral, haciendo que el error sea cero.

Control Proporcional Derivativo.- La acción de control proporcional derivativo se define por la siguiente ecuación:

$$\text{Salida} = K_p e + K_d \frac{de}{dt} \dots\dots\dots (2.5)$$

Donde $K_d = K_p T_d$, K_p es la ganancia proporcional y T_d es una constante denominada tiempo derivativo o tiempo de adelanto. Ambos parámetros son regulables. La acción de control derivativa, a veces llamada control de velocidad, se presenta cuando el valor de salida del controlador es proporcional a la velocidad de variación de la señal de error. El tiempo derivativo T_d es el intervalo de tiempo en el que la acción de derivación se adelanta al efecto de la acción proporcional. La acción derivativa tiene una característica anticipatoria, sin embargo es obvio que no se puede anticipar a algo que aún no acontece. Ya que la acción derivativa se anticipa tiene la ventaja de anticiparse al error, sus desventajas son que amplifica las señales de ruido y produce un efecto de saturación en el actuador. Como se explicó anteriormente, nunca se usará un control derivativo individualmente, ya que este control sólo es efectivo durante períodos transitorios.

Control Proporcional, Integral y Derivativo.- La combinación de los efectos de acción proporcional, integral y derivativa, se denomina acción de control proporcional-integral-derivativa (PID). Esta combinación tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de control con esta acción de control es:

$$\text{Salida} = K_p e + \frac{K_p}{T_i} \int e dt + K_p T_d \frac{de}{dt} \dots\dots\dots (2.6)$$

Donde K_p es la ganancia proporcional, T_i es el tiempo integral y T_d es el tiempo derivativo.

2.4 REGLAS DE SINTONÍA DE CONTROLADORES PID

Es interesante mencionar que más de la mitad de los controladores industriales utilizados en el control de procesos utilizan un esquema de control PID o PID modificado.

Si se puede obtener un modelo matemático de la planta a controlar, es posible aplicar diversas técnicas de diseño, con el fin de determinar los parámetros del controlador que cumpla las especificaciones del transitorio y del estado estacionario del sistema en lazo cerrado. Sin embargo si la planta es tan complicada que no es fácil obtener su modelo matemático, tampoco es posible un método analítico para el diseño de un controlador PID. En este caso se debe recurrir a procedimientos experimentales para la sintonía de los controladores PID.

El proceso de seleccionar los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones de comportamiento dadas se conoce como sintonía del controlador. La sintonía de un algoritmo de control consiste en seleccionar valores adecuados para sus parámetros. Por tanto, para el caso del controlador PID se trata de calcular los valores idóneos de sus parámetros (K_p , T_i , T_d) de forma que se asegure que el sistema completo se comporta siguiendo unas especificaciones previamente definidas.

En las primeras aplicaciones de control PID el ajuste se basaba únicamente en la propia experiencia del operario o simplemente se utilizaban los ajustes del fabricante. En 1942, Ziegler y Nichols propusieron técnicas empíricas que tuvieron una buena aceptación y que han servido de base a métodos más recientes.

Los métodos empíricos o experimentales de ajuste de parámetros están especialmente orientados al mundo industrial, donde existen grandes dificultades para obtener una descripción analítica de los procesos. Constan fundamentalmente de tres pasos:

- Paso 1: Estimación de ciertas características de la dinámica del proceso a controlar. La estimación se puede efectuar en lazo abierto o en lazo cerrado.
- Paso 2: Cálculo de los parámetros del controlador. Para ello se aplican las fórmulas de sintonía, que son relaciones empíricas entre los parámetros del controlador elegido, las características del proceso estimadas en el paso anterior y la respuesta deseada del sistema.
- Paso 3: Dado que los métodos permiten estimar valores aproximados para los parámetros del controlador, normalmente será necesario un tercer paso (ajuste fino de los parámetros), mediante observación de la respuesta del sistema en lazo cerrado.

Las diferencias entre los distintos métodos empíricos citados radican básicamente en la forma de combinar la técnica de estimación y las características de la respuesta que se desea obtener.

A continuación se verá una técnica de sintonía muy conocida como son las *fórmulas de Ziegler y Nichols*.

Estas fueron las fórmulas pioneras y formaron parte de un completo procedimiento heurístico de ajuste de controladores PID, en los años (1942 y 1943) en los que los usuarios de los primeros reguladores industriales de Taylor Instrument necesitaban de alguna metodología para sacarles el máximo rendimiento a los equipos que estaban instalando. Ziegler y Nichols presentaron sus tan conocidas fórmulas de sintonía, recogidas en la tabla 01, para controladores P, PI y PID. Las fórmulas de Ziegler y Nichols contienen las siguientes reglas heurísticas:

1. Las constantes de tiempo integral y derivativo se fijan únicamente en función del período de la oscilación mantenida o del retardo observado en el proceso.
2. La ganancia proporcional se fija en función únicamente de la ganancia crítica o normalizada a la ganancia del proceso en función de la razón T_p/T_o .
3. Cuando el controlador es PID siempre se emplea una constante de tiempo derivativa igual a un cuarto de la constante de tiempo integral, con independencia de las características que tenga el proceso.

Existen varios métodos para hallar los parámetros básicos con los cuales luego haciendo uso de la tabla 01 se pueden hallar los parámetros PID.

Los métodos más conocidos son el método de la oscilación mantenida y el método del relé.

El método de la oscilación mantenida, propuesto por Ziegler y Nichols en 1942, consiste en:

- Cerrar el lazo de control con el controlador en modo proporcional únicamente.
- Con la ganancia proporcional K_p a un valor arbitrario, provocar pequeños cambios bruscos en el punto de consigna y observar la respuesta del sistema.
- Aumentar o disminuir K_p hasta conseguir en el paso anterior que el sistema oscile con una amplitud constante. Anotar el valor de la ganancia proporcional en ese instante como k_c , y medir el período de la oscilación mantenida t_c .

El método del relé, propuesto por Aström y Hägglund en 1984, es una forma indirecta de automatizar el método de la oscilación mantenida, consiste en provocar un ciclo límite mediante la inclusión en el lazo de control de un elemento no lineal como es el relé, este ciclo límite tendrá aproximadamente el mismo período t_c que la oscilación mantenida. Para conseguirlo es conveniente utilizar un relé con histéresis, cuyas características serán la amplitud d y la anchura e de la histéresis. Los pasos para operar son los siguientes:

- Llevar al proceso a un estado estacionario ya sea en modo manual o en modo automático con el controlador PID (aunque no se disponga todavía de un buen ajuste para el controlador). Anotar los valores de la señal de control y de la salida del proceso en esta situación.
- Cerrar el lazo de control utilizando como controlador al relé y como consigna el valor del estado estacionario observado en la salida del proceso, pero sumando en todo momento la acción de control (que genera el relé) con la señal de control que se utilizó para llevar al proceso a un estado estacionario.
- Observar la respuesta del proceso y parar la experiencia cuando se haya alcanzado el ciclo límite. Se puede considerar que éste se ha

alcanzado si el máximo de la salida repite el mismo valor en al menos dos ciclos seguidos.

- Anotar la amplitud (de pico a pico) del ciclo límite como a, y medir el período del ciclo límite (t_c).
- Determinar la ganancia crítica del proceso mediante la expresión:

$$k_{cr} = \frac{4.5a}{\pi \sqrt{a^2 - t_c^2}} \dots\dots\dots (2.7)$$

Controlador	Parámetros	Lazo cerrado	Lazo abierto
P	K_p	$0.5 k_c$	$\frac{T_o}{K T_c}$
PI	K_p	$0.45 k_c$	$0.9 \frac{T_o}{K T_c}$
	T_i	$\frac{t_c}{1.2}$	$\frac{T_o}{0.3}$
PID	K_p	$0.6 k_c$	$1.2 \frac{T_o}{K T_c}$
	T_i	$\frac{t_c}{2}$	$2 T_o$
	T_d	$\frac{t_c}{8}$	$0.3 T_o$

Tabla 01: Fórmulas de sintonía de Ziegler y Nichols

2.4.1 Nuevo método de Sintonización para controladores PID

Tal como se puede observar los métodos mencionados para obtener los parámetros PID de un controlador son tediosos y muchas veces originan pérdidas de tiempo y dinero, actualmente los investigadores de la empresa alemana PMA Prozeß- und Maschinen-Automation GmbH, han desarrollado un nuevo método de sintonización

(con la finalidad de hallar automáticamente los parámetros de control PID), denominado PMA Tune. Este método de autosintonía garantiza a un usuario sin experiencia obtener rápidamente óptimos parámetros de control para iniciar su proceso.

En la implementación de la presente tesis se utiliza este método de autosintonía para encontrar automáticamente los parámetros PID del controlador, para los diversos productos y cantidades que se deseen fabricar.

Para este método de autosintonización, se debe graficar la curva de respuesta (0 a 100%), lo que es casi imposible por motivos de tiempo y dinero, sin embargo analizando la figura 04, se observa que podemos hallar los parámetros ya sea utilizando X_{max} y T_g (curva total) ó Δt y Δx (curva parcial), de ambas formas se determina V_{max} .

V_{max} , es la pendiente de la curva y se halla de la siguiente manera:

$$V_{max} = X_{max} / T_g = \Delta x / \Delta t \dots\dots\dots (2.8)$$

Los parámetros de control se determinarán, a partir de V_{max} , hallado a través de la curva anterior, el tiempo de retardo T_u y la constante K , de acuerdo a las fórmulas dadas en la tabla 02.

$$K = V_{max} * T_u$$

Controlador	Pb	Td	ti
PID	1,7 * K	2 * Tu	2 * Tu
PD	0,5 * K	Tu	OFF
PI	2,6 * K	OFF	6 * Tu
P	K	OFF	OFF

Tabla 02: Fórmulas de la empresa alemana PMA

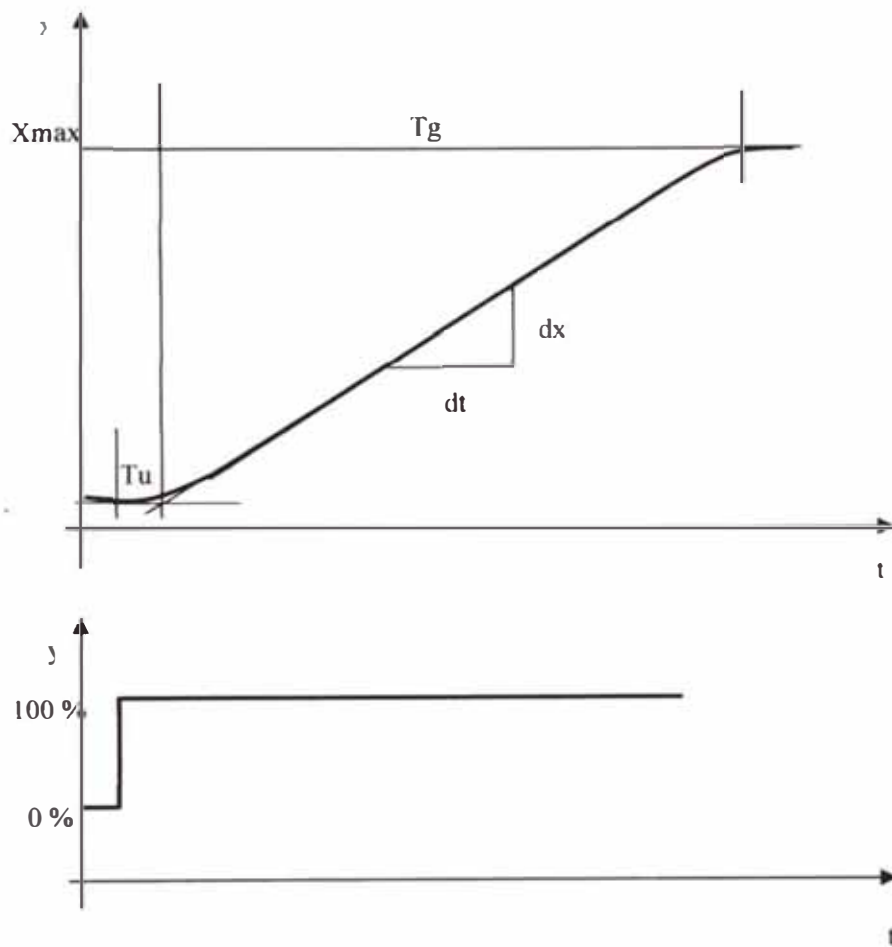


Figura 04. Curva de Respuesta

Capítulo 3

REACTORES QUÍMICOS

3.1 DESCRIPCIÓN DE UN REACTOR QUÍMICO

Los procesos químicos realizan, en forma separada o simultánea, transformaciones físicas y químicas. Una transformación química – reacción química - está definida como una transformación en la que tiene lugar una redistribución electrónica de los elementos que intervienen.

El reactor químico es el corazón, la pieza central de un proceso químico, donde ocurren las transformaciones químicas que pueden ser muy variadas; es un equipo donde ocurre una reacción química, es decir, donde determinadas especies moleculares son transformadas en otras diferentes. Dentro del reactor, los compuestos reactivos pueden ser calentados o enfriados y también pueden intercambiar masa y/o calor.

En la preparación de los reactivos, antes de la entrada al reactor, así como en los productos obtenidos, ocurren numerosos cambios físicos y químicos.

Para la fabricación de un reactor químico, se debe escoger el tipo de reactor, el modo y las condiciones operacionales, funcionamiento y dimensión del mismo, de manera que se pueda obtener un máximo de ganancia económica dentro de las restricciones impuestas por la naturaleza de las materias primas, por los costos de los productos, del capital, de la mano de obra, de las necesidades de seguridad, del control de contaminación, de economía, de energía etc.

3.1.1 Clasificación de los reactores

Se tienen principalmente tres tipos de reactores químicos:

De laboratorio: Donde se realizan los estudios necesarios para determinar el proceso de fabricación de un producto a pequeña escala, y en óptimas condiciones de higiene. La capacidad de este tipo de reactor es de 1 hasta 5 galones. Se utiliza para realizar investigaciones.

Piloto: Donde se efectúa la validación en condiciones "reales" para asegurar la proporción exacta necesaria en la fabricación, preparación de productos para pruebas comerciales, optimización del proceso, etc. La capacidad de este reactor es de 20 hasta 150 galones.

Industrial: En este nivel la experimentación es muy difícil, pues sería muy tediosa y no se debe perturbar la producción. Este reactor sirve para fabricar de manera industrial, es decir, en grandes cantidades los productos deseados. La capacidad es de 1 hasta 10 TM.

El reactor químico constituye la parte principal de las unidades de fabricación de productos químicos, encontrándose en refinerías, complejos metalúrgicos o en las más variadas fábricas de productos químicos. En estas unidades industriales, el reactor está generalmente rodeado de otros equipos destinados a tratamientos físicos de las materias primas y de los productos de la reacción.

Por tanto refiriéndonos a las características principales de una reacción química debemos ser capaces de definir un cierto número de criterios que sirvan de base para otra clasificación.

Dentro de las diversas características de una transformación química, usaremos como base en nuestra clasificación, la más evidente, la escala macroscópica.

De este modo la clasificación será:

- Sistemas monofásicos u homogéneos.- El medio reactivo es constituido por una única fase, gaseosa o líquida.
- Sistemas polifásicos o heterogéneos.- En este caso se pueden considerar innumerables condiciones: gas + líquido; líquido + líquido; gas + sólido; gas + líquido + sólido o de una forma más general: fluidos + sólidos

Las reacciones pueden ser simples o múltiples, siendo estas últimas las que pueden ser realizadas en *reacciones en serie* o en *reacciones en paralelo*. La clave para la fabricación óptima de un reactor está en realizar una mezcla satisfactoria de los reactivos y en el sistema de dosificación de los mismos en el interior del reactor.

La forma de mezclar los reactivos puede ser seleccionada según, la entrada, si es rápida o lenta de acuerdo al tipo de dosificación elegido. Así podemos mencionar otro criterio de clasificación con respecto al modo de realizar un proceso químico.

En cuanto a este criterio los reactores pueden ser básicamente de tres tipos.

Reactor discontinuo (tipo batch)

Reactor continuo

Reactor semi-discontinuo o semi-continuo

Al trabajar con un reactor discontinuo (figura 05) se realiza una operación en estado estacionario, cuya composición varía con el tiempo, pero en un instante dado la composición de toda la mezcla es la misma. Un reactor discontinuo se caracteriza porque los reactivos se dosifican antes de la realización de un proceso, posteriormente la transformación química se desarrollará a lo largo del tiempo.

En el reactor discontinuo, los agentes que entran en el reactor son mezclados y permanecen dentro durante un cierto periodo de tiempo, en el cual ocurre la reacción. La mezcla resultante es el producto final, la cual es descargada para dar paso a un nuevo proceso.

Carga de reactivos

Descarga de producto

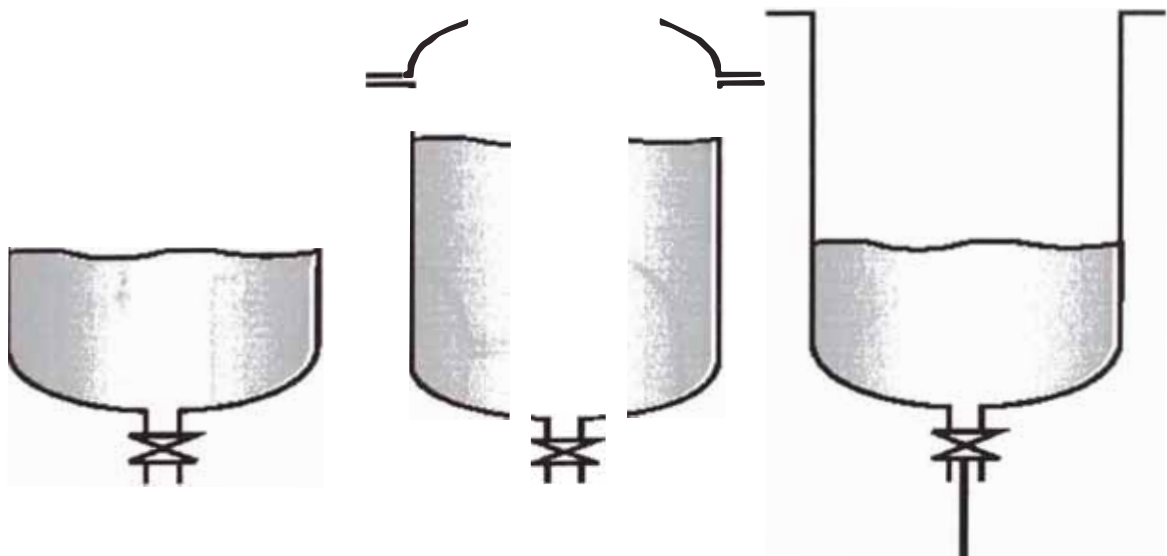


Figura 05: Operación discontinua – esquema de diversas fases

En los reactores hay diferentes tipos de agitación, pudiendo ser del tipo hélice ó de turbina. En el reactor ideal la agitación es perfecta, y la concentración en la entrada es diferente de la concentración en el reactor.

Los reactores con tanques discontinuos son usados en la industria química para la producción de cantidades limitadas de material principal en los casos en que los costos de mano de obra representan una fracción mínima del costo final. Son así productos caros como los utilizados en la industria farmacéutica, cosmética, etc.

Se realiza una variante del sistema discontinuo cuando parte de los reactivos se introducen a lo largo del proceso, pero la descarga de los productos se hace apenas se termina la reacción. Este modo de operación es clasificado como semi-continuo.

Se encuentran también casos en que los agentes son cargados al inicio de la operación habiendo una purga continua de uno ó más productos de la reacción. (figura 06).

Dosificación Reacción con posibilidad Descarga de producto
de ingreso de agentes

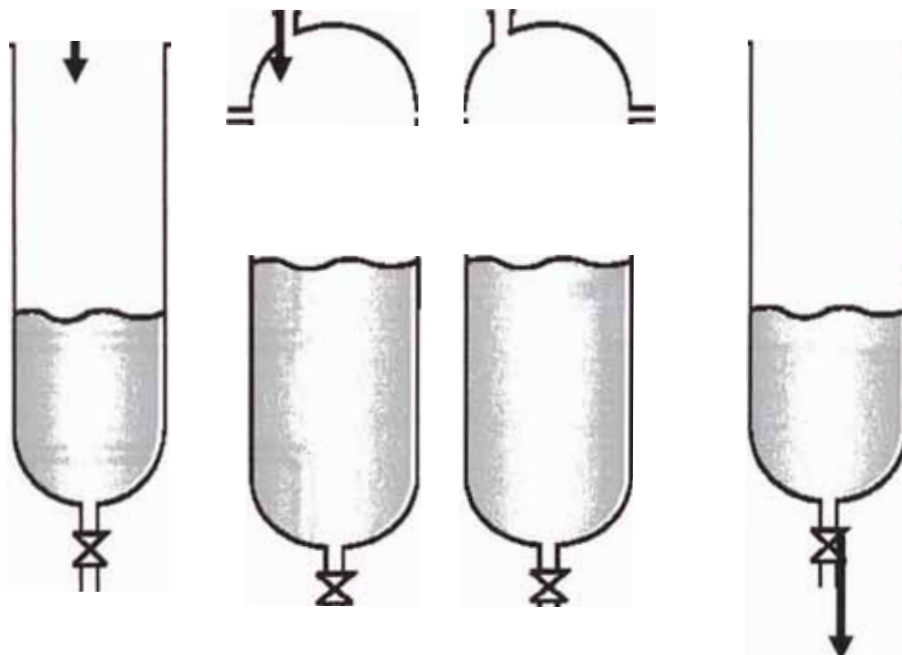


Figura 06: Operación semicontinua

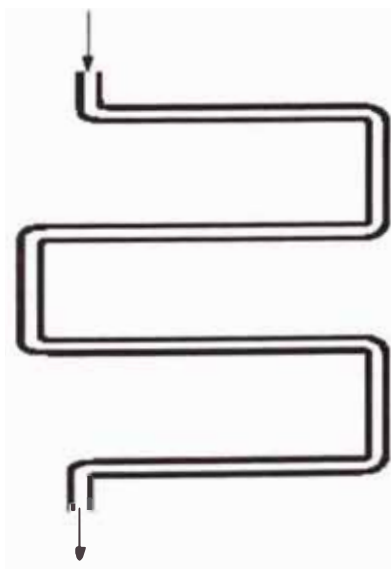
Los sistemas continuos, llamados sistemas abiertos, están provistos de una o varias entradas para introducir los reactivos y de una o varias salidas para la evacuación de los productos resultados de la reacción.

En una operación continua, hay que considerar en el interior del reactor un arreglo para las diversas fases desde sus puntos de entrada hasta los puntos de salida. Este arreglo interno puede tener varias formas dependiendo de la estructura del equipo. Existen dos tipos de arreglos para modelos ideales:

El tipo pistón o reactor tubular (plug flow), en donde se hace circular a gran velocidad un fluido poco viscoso en un tubo; sin retorno y sin mezcla (unmixed flow reactor)

El reactor perfectamente agitado o reactor de mezcla (CSTR-constant flow stirred tank reactor), en donde todo el contenido es agitado manteniéndose constante la composición en todo el recipiente.

Tipo Pistón – Reactor tubular



Reactor perfectamente agitado

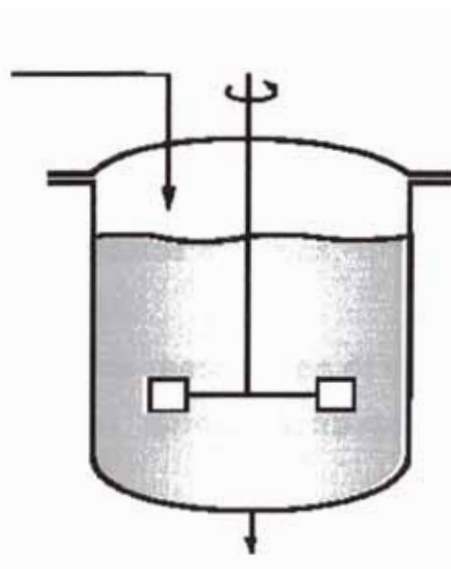


Figura 07: Operación continua

Otra característica de la reacción, que tiene muchas veces una influencia decisiva sobre la estructura del reactor y sobre su aspecto exterior, es el efecto térmico inevitablemente ligado a cualquier transformación química. Gran número de reacciones practicadas industrialmente tienen temperaturas de reacción considerables, ya sea que se trate de *reacciones exotérmicas o endotérmicas*. Para estos casos, el reactor debe ser provisto de superficies de intercambio térmico, capaces de transferir el calor correspondiente en el sentido conveniente.

En el presente trabajo de tesis, se ha hecho uso de un reactor del tipo discontinuo, por lo que profundizaremos las características de este tipo de reactor.

3.1.2 Reactores discontinuos

Consiste, como ya se mencionó, de un recipiente en el cual los agentes son introducidos al inicio de la operación: tomando en cuenta las condiciones de temperatura y presión.

Un esquema de un reactor discontinuo se encuentra en la figura 08.

Los elementos principales del reactor discontinuo son:

Un recipiente capaz de contener compuestos reactivos.

Una superficie para el intercambio térmico.

Un sistema de agitación para mezclar los reactivos en el inicio de la operación y facilitar la transferencia térmica a través de la superficie de intercambio.

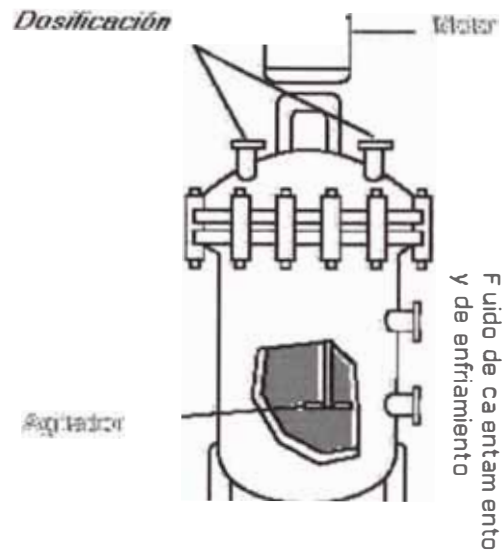


Figura 08: Representación esquemática de un Reactor discontinuo

De esta manera, este reactor resulta ideal para realizar una reacción en fase líquida, no se aplica en el caso de una reacción en fase gaseosa.

Tipos de Reactores discontinuos frecuentemente utilizados

Algunos de los sistemas frecuentemente utilizados en la práctica se presentan en las siguientes figuras:

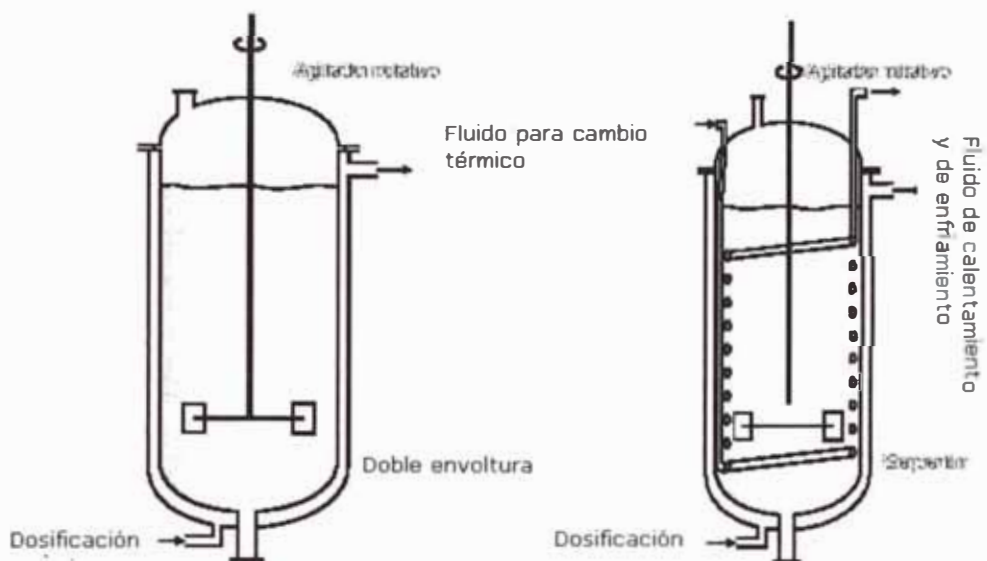


Figura 09: Reactor discontinuo con doble envoltura. Reactor discontinuo con doble envoltura y serpentín interno.

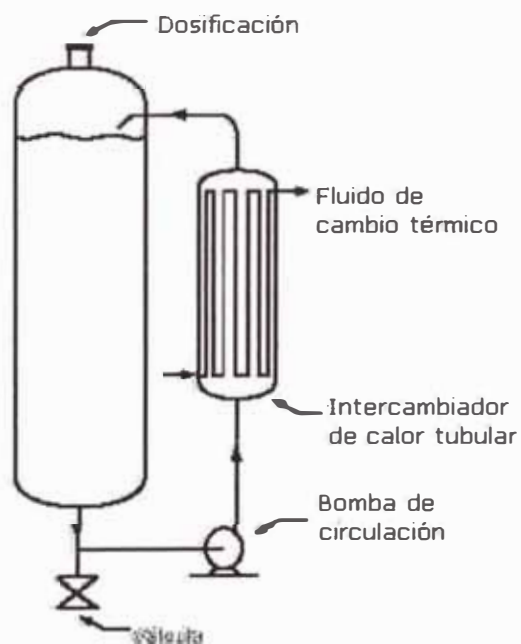


Figura 10: Reactor discontinuo con un intercambiador externo para la circulación del producto del reactor.

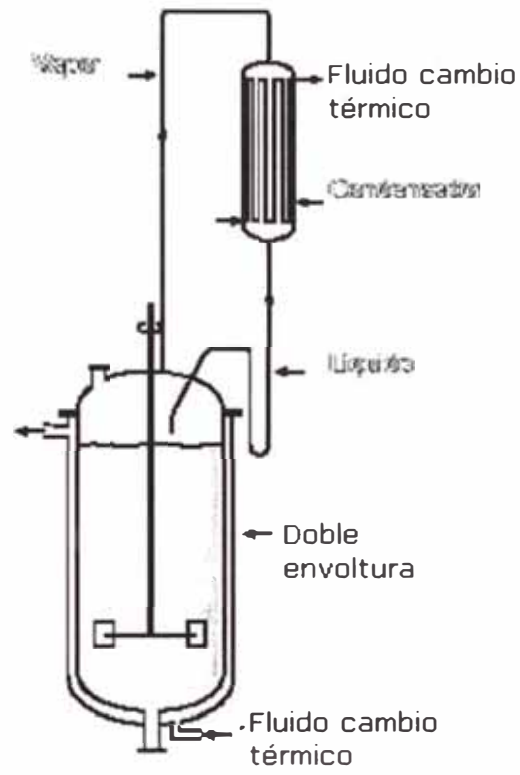


Figura 11: Reactor discontinuo con enfriamiento.

Capítulo 4

AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL MODERNA

El control automático desempeña un papel vital en el avance de la ciencia y la ingeniería y se ha convertido en una parte importante e integral de los procesos modernos industriales y de fabricación.

Por ejemplo, en un horno eléctrico, el control de temperatura se realiza de la siguiente manera: La temperatura del horno se mide mediante un termómetro, que es un dispositivo analógico. La temperatura analógica se convierte a una temperatura digital mediante un convertidor A/D. La temperatura digital se introduce en un controlador mediante una interfaz. Esta temperatura digital se compara con la temperatura de entrada programada, y si hay diferencia (error), el controlador envía una señal al calefactor, a través de una interfaz, amplificador y relé, para hacer que la temperatura del horno adquiera el valor deseado.

Del ejemplo del sistema de control anterior, podemos observar que para que un sistema de control funcione el elemento más importante es el controlador, ya que es el que recibe la señal de los sensores, a través de interfaces, y realiza la comparación con la señal de entrada, y a su vez ordena a los actuadores realizar algún cambio para hacer que el error sea siempre el mínimo.

4.1 SISTEMAS DE CONTROL

Actualmente se pueden clasificar los sistemas de control de dos maneras:

- **Control mediante una computadora personal - PC**
- Control mediante Microcontrolador

4.1.1 Control mediante una computadora personal - PC

En los últimos años, la PC se ha establecido en un gran número de campos, es por esto que la industria quiera tomar provecho de este hecho para reducir costos e incrementar la productividad. Ciertas tareas industriales están actualmente en manos de las computadoras desde hace tiempo, pero mayormente como un sistema de control y supervisión de datos. Sin embargo, no hay que sorprenderse si los especialistas en automatización deseamos transferir otras tareas hacia la PC para poder llegar a un mayor ahorro.

Es por esto que se debe explicar cómo es que se puede utilizar a la PC como un controlador para aplicaciones sencillas o complejas.

La PC cuenta para comunicarse con sus periféricos, incluso en su versión más básica, con diversos dispositivos de entrada como: puerto paralelo y puerto serial, puerto USB, joystick, micrófono, etc. También cuenta con varios dispositivos de salida: puerto paralelo y serie, USB, sonido, video, etc. Además, es posible agregarle tarjetas especializadas que añaden otras muy diversas clases de entradas y salidas.

Por otra parte, son muchos los lenguajes de programación utilizables en la PC que permiten leer las entradas y modificar las salidas: BASIC, LOGO, Pascal, C, Ensamblador, etc.

Para aplicaciones sencillas se puede utilizar el puerto paralelo de la PC para controlar diversos equipos, colocando una tarjeta de interface

tanto para las entradas como para las salidas del puerto en mención. Sin embargo para aplicaciones complejas donde no sólo se utiliza entradas y salidas digitales, sino que se requiere de entradas y salidas análogas el puerto paralelo no es suficiente. Es por esto que se deben de utilizar Tarjetas de Adquisición de Datos, las cuales se colocan dentro de la PC a través del puerto ISA o son externas y se comunican con la PC por medio del puerto USB,

Las tarjetas más frecuentemente utilizadas en la actualidad son las que se conectan al puerto ISA. Estas tarjetas de adquisición tienen diversas características de acuerdo al fabricante y al modelo que se elija. Existe una gran variedad de modelos y fabricantes. En la mayoría de los casos, estas tarjetas vienen con un software de programación o con librerías para poder acceder a los puertos de entrada y salida tanto analógicos como digitales de una manera rápida y sencilla.

4.1.2 Control mediante Microcontroladores

Otro tipo de controlador utilizado para realizar sistemas de control son los microcontroladores.

Un microcontrolador es un circuito integrado que incorpora la mayor parte de los elementos que configuran un controlador.

Un microcontrolador dispone normalmente de los siguientes componentes:

- Procesador o UCP (Unidad Central de Proceso).
- Memoria RAM para Contener los datos.
- Memoria para el programa tipo ROM/PROM/EPROM.

- Líneas de E/S para comunicarse con el exterior.
- Diversos módulos para el control de periféricos (temporizadores, Puertas Serie y Paralelo, CAD: Conversores Analógico/Digital, CDA: Conversores Digital/Analógico, etc.).
- Generador de impulsos de reloj que sincronizan el funcionamiento de todo el sistema.

Los productos que para su regulación incorporan un microcontrolador disponen de las siguientes ventajas:

- Aumento de prestaciones: un mayor control sobre un determinado elemento representa una mejora considerable en el mismo.
- Aumento de la fiabilidad: al reemplazar un elevado número de elementos por el microcontrolador disminuye el riesgo de averías y se precisan menos ajustes.
- Reducción del tamaño en el producto acabado: La integración del microcontrolador en un chip disminuye el volumen, la mano de obra y los stocks.
- Mayor flexibilidad: las características de control están programadas por lo que su modificación sólo necesita cambios en el programa de instrucciones.

El microcontrolador es en definitiva un circuito integrado que incluye todos los componentes de un computador. Debido a su reducido tamaño es posible montar el controlador en el propio dispositivo al que gobierna. En este caso el controlador recibe el nombre de controlador incorporado (embedded controller).

En el desarrollo de la presente tesis se ha utilizado un microcontrolador de alta performance denominado C-Control II de la

marca Conrad. En el capítulo 7, denominado Instrumentación se explicarán las características del controlador.

4.2 SISTEMAS SCADA (Software de control, supervisión y adquisición de datos)

Tanto un control mediante PC o un control mediante Microcontrolador debe poseer un Software a través del cual el usuario pueda comunicarse con el sistema de control. A este tipo de Software se le denomina SCADA.

SCADA viene de las siglas de "Supervisory Control And Data Acquisition", que significa: adquisición de datos y control de supervisión. Se trata de una aplicación software especialmente diseñada para funcionar sobre computadoras en el control de producción, proporcionando comunicación con los dispositivos de campo (controladores autónomos, autómatas programables, etc.) y controlando el proceso de forma automática desde la pantalla de la computadora. Además, provee toda la información que se genera en el proceso productivo a diversos usuarios, tanto del mismo nivel como de otros supervisores dentro de la empresa: control de calidad, supervisión, mantenimiento, etc.

En este tipo de sistemas se utiliza una computadora, que efectúa tareas de supervisión y gestión de alarmas, así como tratamiento de datos y control de procesos. La comunicación se realiza mediante buses especiales o redes LAN. Todo esto se ejecuta normalmente en tiempo real, y están diseñados para dar al operador de planta la posibilidad de supervisar y controlar dichos procesos.

Los programas necesarios, y en su caso el hardware adicional que se necesite, se denomina en general sistema SCADA.

Un paquete SCADA debe estar en disposición de ofrecer las siguientes prestaciones:

- Posibilidad de crear paneles de alarma, que exigen la presencia del operador para reconocer una parada o situación de alarma, con registro de incidencias.
- Generación de históricos de señal de planta, que pueden ser volcados para su proceso sobre una hoja de cálculo.
- Ejecución de programas, que modifican la ley de control, o incluso anular o modificar las tareas asociadas al controlador, bajo ciertas condiciones.
- Posibilidad de programación numérica, que permite realizar cálculos aritméticos de elevada resolución.

Con estas prestaciones, se pueden desarrollar aplicaciones con captura de datos, análisis de señales, presentaciones en pantalla, envío de resultados a disco e impresora, etc.

Además, todas estas acciones se llevan a cabo mediante un paquete de funciones que incluye zonas de programación en un lenguaje de uso general (como C, Pascal, o Basic), lo cual confiere una potencia muy elevada y una gran versatilidad. Algunos SCADA ofrecen librerías de funciones para lenguajes de uso general que permiten personalizar de manera muy amplia la aplicación que desee realizarse con dicho SCADA.

Un sistema SCADA debe cumplir varios objetivos para que su instalación sea eficientemente aprovechada:

- Deben ser sistemas de arquitectura abierta, capaces de crecer o adaptarse según las necesidades cambiantes de la empresa.
- Deben comunicarse con total facilidad y de forma transparente al usuario con el equipo de planta y con el resto de la empresa (redes locales y de gestión)
- Deben ser programas sencillos de instalar, sin excesivas exigencias de hardware, y fáciles de utilizar, con interfaces amigables con el usuario.

Los módulos que permiten las actividades de adquisición, supervisión y control son los siguientes:

- Configuración: Permite al usuario definir el entorno de trabajo de su SCADA, adaptándolo a la aplicación particular que desee desarrollar.
- Interfaz gráfico del operador: Proporciona al operador las funciones de control y supervisión de la planta. El proceso se representa mediante gráficos almacenados en el controlador y generados desde el editor incorporado en el SCADA o importados desde otra aplicación durante la configuración del paquete.
- Módulo de proceso: Ejecuta las acciones de mando preprogramadas a partir de los valores actuales de variables leídas.
- Gestión y archivo de datos: Se encarga de almacenar y procesar ordenadamente los datos, de forma que otra aplicación o dispositivo pueda tener acceso a ellos.
- Comunicaciones: Se encarga de la transferencia de información entre la planta y la arquitectura hardware que soporta el SCADA, y entre ésta y el resto de elementos informáticos de gestión.

A continuación se presentan algunos sistemas SCADA conocidos y utilizados actualmente:

PROVEEDOR: USDATA

Producto: Factory Link 7

Esta solución SCADA para recolectar información crítica de los procesos de la planta fue diseñada específicamente para MS Windows 2000 bajo la plataforma multicapa de DNA. Utiliza la tecnología estándar de objetos para la importación de datos externos, con lo que se reduce el costo de propiedad de los sistemas.

Muchas de las funcionalidades típicas en un ambiente de manufactura ya se encuentran preconstruidas y almacenadas en una biblioteca para que el usuario desarrolle aplicaciones en tiempo récord. La recolección y distribución de datos se realiza mediante la tecnología OPC de cliente y servidor, por lo que se le considera como uno de los sistemas de automatización en tiempo real con mayor apertura (sistemas abiertos). Es el sistema que distribuye la firma Schneider como producto para sus controladores.

PROVEEDOR: Advantech

Producto: Paradym-31

Provee un ambiente gráfico de programación compatible con MS Windows, que permite construir programas de control en tiempo real, tales como los tradicionales Controladores Lógicos Programables (PLCs). Utilizado en conjunto con el módulo de control ADAM-5510, este software es capaz de brindar una solución completa de automatización. El costo de programación y entrenamiento no es muy elevado, por lo que el usuario,

de una manera sencilla, puede construir sus propias funciones lógicas y generar reportes automatizados especiales.

PROVEEDOR: AlterSys Inc.

Producto: Virgo 2000

Software de control modular, robusto y flexible que se puede ejecutar en una PC para generar un PLC virtual. Como una PC es mucho más potente que un simple PLC, es posible generar varios controladores virtuales en una misma computadora. El producto se beneficia de las funciones provistas por el sistema operativo QNX y de Windows NT (el primero para operaciones de tiempo real y el segundo para desarrollo e interfase de usuario).

Provee funciones libres de fallas que se necesitan en sistemas de control para misiones críticas. En su funcionamiento se integran opciones que normalmente se encuentran en sistemas PLC, control supervisión y adquisición de datos (SCADA) y sistemas de control distribuido (DCS).

PROVEEDOR: eMation

Producto: WizFactory

Solución completa para información y automatización, combina el control discreto y el continuo con SCADA e Internet. Entre sus componentes se encuentra Wizcon para Windows e Internet, que es una herramienta poderosa para canalizar información en tiempo real e histórica de la planta. Provee funciones completas de SCADA y HMI, las cuales se pueden también visualizar a través de la red de redes mediante un navegador convencional. Otro componente es WizPLC, solución que permite emular en cualquier PC el comportamiento lógico de un PLC. Por su parte, WizDCS emula el comportamiento de un DCS en una PC.

Finalmente, WizReport facilita la generación de reportes basados en los datos producidos por todas las aplicaciones anteriores.

PROVEEDOR: Iconics

Producto: Genesis32

Desde un inicio se diseñó para beneficiarse de las nuevas tecnologías orientadas a objetos, tales como la arquitectura DNA de Microsoft 95/98/2000, que incluye VBA, COM, DCOM, ActiveX, etcétera. Al mismo tiempo, en el corazón del producto se encuentra ubicada la tecnología moderna de OPC. Es un producto de rendimiento óptimo cuando se utiliza para construir aplicaciones de control y automatización que requieran visualización, control, supervisión, adquisición de datos, sistemas avanzados de alarmas, SPC/SQC (control estadístico de procesos y calidad), sistemas de reportes y administración de recetas en procesos de bache. Las aplicaciones desarrolladas con este producto se integran fácilmente con otros sistemas de nivel superior, tales como MES (sistemas de ejecución para manufactura) y MRP (planeación de materiales). Asimismo, gracias a OPC, es muy sencillo establecer interfases con aplicaciones de escritorio y de bases de datos, como MS Office, MS SQL, Oracle, MS Access, MS Excel e internet.

PROVEEDOR: Intellution

Producto: Intellution Dynamics

Es una familia de software para automatización que constituye una de las soluciones más potentes disponibles en la industria. Cuenta con diversos componentes de software de alto desempeño que proveen soluciones de automatización para HMI, SCADA, procesos de bache, PLCs virtuales y aplicaciones de Internet. IFIX es un sistema de MMI y SCADA que brinda completa visualización, almacenamiento y

administración de datos del proceso y control de supervisión. IBatch consiste en una solución orientada a procesos batch muy típicos de la industria química, farmacéutica, de bebidas y alimentos. IWebServer es una solución que habilita la visualización remota de los procesos mediante Internet.

PROVEEDOR: National Instruments

Producto: LabView

Ofrece un ambiente de desarrollo gráfico con una metodología muy fácil de dominar por ingenieros y científicos. Con esta herramienta se pueden crear fácilmente interfases de usuario para la instrumentación virtual sin necesidad de elaborar código de programación. Para especificar las funciones sólo se requiere construir diagramas de bloque. Se tiene acceso a una paleta de controles de la cual se pueden escoger desplegados numéricos, medidores, termómetros, tanques, gráficas, etc., e incluirlas en cualquiera de los proyectos de control que se estén diseñando. Se basa en un modelo de programación de flujo de datos denominado G, que libera a los programadores de la rigidez de las arquitecturas basadas en texto. Es también, a decir de National Instruments, el único sistema de programación gráfica que tiene un compilador que genera código optimizado, cuya velocidad de ejecución es comparable al lenguaje C. Los desarrollos construidos son plenamente compatibles con las normas VISA, GPIB, VXI y la alianza de sistemas VXI Plug & Play. Para facilitar aún más la operación de este producto se cuenta con la inclusión de una herramienta asistente capaz de detectar automáticamente cualquier instrumento conectado a la computadora, instalando los drivers apropiados y facilitando la comunicación con el instrumento al instante. Aunque en un principio fue creado para construir instrumentación virtual – osciloscopios, generadores de función, voltímetros, etc. –, gracias a la amplia disponibilidad de tarjetas de

adquisición de datos y a la facilidad de construir aplicaciones en un ambiente gráfico, las últimas versiones se han utilizado ampliamente para desarrollar aplicaciones en el control de procesos. Recientemente, NI introdujo la versión de LabView 6i, que es la combinación de las funciones tradicionales del producto combinadas con algunas herramientas para el ambiente de Internet. Es el caso del LabView Player, un agregado que facilita ejecutar las aplicaciones por la red sin necesidad de contar con el producto LabView completo.

PROVEEDOR: Siemens

Producto: HYBEX (Hybrid Expert System)

Herramienta de simulación que permite realizar cambios virtuales en la planta y observar sus resultados sin ningún riesgo. Está específicamente orientada a procesos de laminado en plantas siderúrgicas y se puede utilizar en cualquiera de las etapas del ciclo de vida de la planta, desde construcciones nuevas hasta plantas en procesos de optimización y modernización.

Producto: WinCC HMI Ver. 5.0

Para integrar software en la manufactura se requiere usar normas abiertas que puedan enlazar fuertemente la información del piso de la planta y el sistema de negocios a través de ella. WinCC HMI, software de 32 bits integrado completamente con Microsoft Windows NT, combina las características estándar (gráficos, alarmas, administración de recetas, etcétera) con otras avanzadas (reportes, referencias entre proyectos, diagnóstico de proceso, soporte multilingüe y redundancia completa). Además, mejora su funcionalidad mediante la integración de bases de datos con MES/ERP, internet y tecnologías de cliente servidor.

Producto: Web Control Center (webCC)

Permite que una gran variedad de información desde varias áreas de la planta se despliegue simultáneamente en una sola interfase de usuario. Así, se facilita el control corporativo y la operación y monitoreo de las instalaciones de proceso y plantas de producción. Mediante un navegador de internet basado en Java se tiene acceso simultáneo a diversos sistemas de control central, tales como SiiX-IS, WinCC, Sicalis PMC y Simatic PCS 7. Bases de datos y videos se integran desde la red y pueden enviarse correos electrónicos en cualquier momento. Los datos maestros de sistemas SAP y otros pueden consultarse desde cualquier parte del mundo haciendo realidad el concepto de compañía virtual.

Producto: SIMATIC WinAC ODK (Open Developer Kit)

Herramienta de software para extender las funciones de WinAC que ofrece una serie de interfases abiertas de alta velocidad para integrar datos de procesos en tiempo real con otras aplicaciones de software. Estas interfases, tales como ActiveX y OPC, están diseñadas para proveer a las aplicaciones del usuario una manera asíncrona de acceder a los datos del proceso. Permite que el código escrito por el usuario (C, C++, Visual Basic, Java) o aplicaciones de terceros se ejecuten como parte del ciclo de barrido del software WinAC.

Producto: SIMATIC WinAC (Windows Automation Center)

Mediante esta solución integrada para control, HMI, redes y procesamiento de datos – todos en la misma plataforma – es posible emular el funcionamiento de un PLC en una PC (la parte de control permite que se utilice una PC para emular a un PLC). Esta solución se configura, programa y mantiene con Simatic Step 7, el ambiente estándar

de desarrollo para los PLCs de Siemens. Las funciones de computación y visualización proveen todas las interfases que se necesitan para ver el proceso y modificarlo mediante aplicaciones estándar, tales como Microsoft Excel, Visual Basic o cualquier otro paquete estándar HMI.

Producto: SIMATIC PLCSim

Herramienta de software que permite ejecutar programas de Simatic Step 7 en una PC. Así, se pueden depurar con mayor facilidad los programas antes de ingresarlos a los PLCs, facilitando el proceso de liberación de los sistemas de automatización. También funciona con sistemas Simatic WinCC, lo que permite verificar previamente los programas HMI.

Producto: SIMATIC Protool

Herramienta de software que permite a los operadores visualizar e interactuar con los equipos a través de MMI. Comparte un ambiente de configuración común que permite el transporte de aplicaciones entre un amplio rango de plataformas de hardware, incluyendo Windows CE, Windows 95/98 y NT, así como con la línea de consolas de operador de SIMATIC.

Todos estos sistemas SCADA requieren licencia de funcionamiento, y sus costos son elevados, sin embargo existe en el mercado un nuevo sistema SCADA, el cual es más económico que los anteriormente descritos, denominado EXSCADA porque se trabaja utilizando el Software Microsoft Excel.

Producto: EXSCADA

Este sistema SCADA se programa en Visual Basic, utilizando las macros de Microsoft Excel por lo que no requiere una licencia adicional, sólo requiere de una interface (driver) para la comunicación con los controladores de la planta. EXSCADA es capaz de dar al usuario las herramientas necesarias para poder controlar y supervisar la planta, se puede programar fácilmente y utilizar todas las funciones brindadas por Microsoft Excel, como por ejemplo funciones de gráficos, estadísticas, ecuaciones, etc.

En el desarrollo del presente trabajo, se hace uso de un sistema EXSCADA para realizar el software de parametrización, control y monitoreo del sistema de control implementado. En los capítulos 6 y 8, se explica la implementación del sistema SCADA en la tesis desarrollada.

Capítulo 5

RESINAS FENÓLICAS

Bajo el nombre de resinas fenólicas se conoce a una gran variedad de productos obtenidos por la reacción de policondensación de fenoles con aldehídos, estas son las resinas sintéticas más antiguas, sin embargo tienen una gran importancia en la industria moderna.

Las resinas fenólicas se pueden utilizar, entre otras cosas, para la obtención de:

- lacas, pintura
- masas de prensado y masas de inyección con diferentes materiales de relleno
- como ligante para la fabricación de materiales abrasivos (esmeril, pastillas de freno, etc.)
- como base en diferentes síntesis de resinas modificadas para recubrimientos
- en la fabricación de papeles de autocopias
- en la fabricación de tarjetas impresas

Las resinas fenólicas pertenecen a la clase de compuestos macromoleculares obtenidos por reacciones de policondensación. Para la formación de estos productos, la condición básica es que los fenoles y los aldehídos que participan en la reacción, tengan dos o más posiciones reactivas.

Tanto el fenol como el formaldehído son moléculas relativamente pequeñas y la policondensación conduce a una estructura densa, que le

da a la resina endurecida un bajo grado de flexibilidad, buena resistencia a temperaturas altas y estabilidad dimensional excelente.

Para utilizar completamente las ventajas que da la reacción de reticulación - formación de enlaces químicos según las diferentes direcciones del espacio a lo largo de una policondensación y que origina una red sólida - esta debe ser dirigida adecuadamente en el proceso tecnológico.

En la serie de resinas fenólicas, el aldehído que más se utiliza industrialmente es el formaldehído por lo que implementaremos resinas tipo fenol-formaldehidos.

Las variables de reacción que dividen las resinas fenólicas en dos grandes grupos son: el pH del medio de reacción y la razón molar entre el fenol y el formaldehído. En función de estos parámetros, las resinas se clasifican en:

- Resinas tipo Novolacas (medio ácido)
- Resinas tipo Resólicas (medio básico)

En el presente trabajo se desarrolla el proceso de fabricación de las resinas tipo novolacas.

5.1 RESINAS TIPO NOVOLACAS

Los parámetros principales que determinan la cinética del proceso y también las características de la resina obtenida son:

- a) El pH del medio de reacción
- b) Tipo de catalizador

- c) La razón entre los componentes (fenol, formol)
- d) El tiempo de condensación
- e) La temperatura

A continuación daremos una breve explicación sobre cada parámetro.

El pH del medio de reacción.- Las resinas del tipo novolacas son productos fenol-formaldehidos lineales, obtenidos en medio ácido. Los estudios experimentales han demostrado que la velocidad del proceso es fuertemente influenciada por el pH del medio de reacción, respectivamente de la concentración de los iones de hidrógeno. Al agregar catalizadores ácidos se tiene que asegurar un pH de 0.5 – 1.5, condición en la cual la reacción de condensación se realiza con gran velocidad.

El resultado de la reacción con catalizadores ácidos a razones molares mayores que la unidad o que tienden a la unidad es una resina tipo Novolaca.

Tipo de catalizador.- El tipo de catalizador utilizado tiene influencia no sólo sobre la velocidad de reacción, sino también sobre algunas características técnicas de la resina.

Los catalizadores más utilizados para la obtención de las resinas tipo novolacas son los ácidos: oxálico, clorhídrico, sulfúrico y fosfórico.

El ácido que se utiliza en el desarrollo de la presente tesis es el ácido clorhídrico.

El ácido clorhídrico se utiliza en concentraciones de 0.1 a 0.3% con respecto al fenol, además presenta la ventaja que se puede eliminar durante la operación de deshidratación, junto con los vapores de agua.

Razón entre componentes.- Las resinas fenólicas no reticuladas son compuestos con masa molecular pequeña, variando entre 200 y 1000 mol, valor que influencia mucho las condiciones de procesamiento de la resina.

Las masas moleculares de la resina novolaca, son influenciadas por la razón entre el formaldehído y el fenol, cuando la razón es mayor, la masa molecular de la resina aumenta.

Tiempo de condensación.- Como el proceso de policondensación de los fenoles con el formaldehído es un proceso en etapas, es lógico que el tiempo de condensación tenga influencia sobre las propiedades de la resina obtenida. Cuanto mayor es el tiempo de condensación, mayor es la masa molecular media de la novolaca.

Temperatura de reacción.- Aunque la temperatura tiene una influencia favorable sobre la reacción de policondensación del fenol con el formaldehído, las consideraciones tecnológicas exigen un cierto régimen térmico.

Sabiendo que la reacción tiene que realizarse en medio acuoso (por la utilización del fenol), temperaturas de reacción mayores a 100°C necesitan que el proceso se realice bajo presión. También, temperaturas más altas conllevan a pérdidas de formaldehído que crea un desequilibrio con respecto a las condiciones iniciales impuestas. Teniendo en cuenta que la reacción de condensación del fenol con el formaldehído es exotérmica a velocidades de reacción mayores (altas temperaturas) la

cantidad de calor eliminada en la unidad de tiempo es muy grande, y ella no podría ser compensada por el sistema de enfriamiento del reactor y como consecuencia existe peligro de sobrecalentamiento que puede llevar a una explosión.

Por eso, en las condiciones del proceso inicial de condensación (en medio acuoso) se trabaja a temperaturas moderadas, entre 60°C y 90°C que aseguran el enlace fenol – formaldehído.

Para llegar a los valores máximos de los índices físicos – mecánicos de la resina, es necesario el aumento a continuación de la masa molecular del producto. Este aumento se realiza por intermedio de un tratamiento térmico de la resina deshidratada. Cuanto mayor es la temperatura del tratamiento térmico final, mayor es la masa molecular de la resina.

5.2 PROCESO DE FABRICACIÓN DE RESINAS NOVOLACAS

La fabricación de resinas fenólicas se puede realizar en procesos discontinuos o en procesos continuos. En el presente trabajo se realiza de manera discontinua por lo que se construye un reactor del tipo discontinuo.

Este proceso tiene las siguientes fases:

- a) Dosificación de las materias primas.
- b) Condensación.
- c) Deshidratación.
- d) Tratamiento térmico final.

Dosificación de las materias primas.- En la fabricación de las resinas fenólicas, la calidad y homogeneidad de las materias primas son de gran importancia.

Considerando un proceso tecnológico que utiliza fenol, formol y ácido clorhídrico para la obtención de resinas novolacas, se requiere de recipientes provistos de agitadores y sistema de calentamiento – enfriamiento. El reactor químico construido cumple con los requerimientos para la fabricación de este producto.

Las materias primas, fenol y formol, se dosifican actualmente en el recipiente del reactor de manera manual y se mantienen bajo agitación hasta obtener una mezcla homogénea y después se agrega el catalizador. El sistema a implementar podrá recibir esta dosificación de manera automática, siempre y cuando se disponga de recipientes dosificadores provistos de sensores y actuadores necesarios conectados al reactor químico.

Condensación.- Es la operación principal para la obtención de resinas fenólicas, de esta manera los volátiles regresan al proceso de reacción. La condensación se realiza en reactores provistos de agitadores, chaqueta de calentamiento – enfriamiento y condensador de reflujo. El reactor químico construido cumple con estos requisitos.

La condensación del fenol con formaldehído se realiza en un medio con un pH entre 1,6 a 2,3 obtenido por la introducción del catalizador y a una temperatura de 60° - 90° C en función de:

- la velocidad de reacción
- las características del producto final

Si es que el pH no se controla o se controla en forma inadecuada, se generan compuestos reticulares, los cuales son infusibles, lo que quiere decir que el producto se ha dañado y queda inutilizable.

De igual manera se debe controlar eficientemente la temperatura, ya que si la temperatura es menor a la requerida, entonces el proceso se llevará a cabo en un tiempo mayor, y si la temperatura es mayor será más difícil de controlar la reacción.

Deshidratación.- El condensado fenólico, al final de la operación de condensación, se separa del estrato acuoso como un producto aceitoso. La deshidratación puede realizarse en el mismo reactor de condensación o en otro idéntico, para lo cual el condensador se conecta a una bomba de vacío y se interrumpe el reflujo. En nuestro caso, todas las etapas del proceso se realiza en un solo reactor.

La cantidad de agua que se tiene que eliminar es muy grande y para que la resina no sea sobresolicitada térmicamente, la deshidratación se realiza al vacío a una temperatura de 80°C aproximadamente.

Tratamiento térmico final.- Los restos de agua de la resina se eliminan en la fase de tratamiento térmico final. En esta fase la temperatura puede elevarse hasta 160°C bajo un vacío de 25-27 mm-Hg.

Si no se realiza el vacío, el producto no sería un producto limpio, ya que en toda reacción se generan reacciones secundarias, las cuales permanecen dentro del reactor como volátiles. Realizando el vacío nos aseguramos que todos estos elementos sean eliminados de la reacción.

La duración y la temperatura del tratamiento térmico se determina experimentalmente, con lo cual se establece el punto de fusión de la

resina, y/o la viscosidad de la solución alcohólica. Es importante la duración y la temperatura del tratamiento térmico, ya que lo que se va a producir es una resina semi – terminada, que sirve como materia prima para realizar diferentes productos. La resina producida concluirá su proceso cuando se encuentre como parte de otro producto final.

Determinación de la receta para la fabricación de Resinas Fenólicas

Considerando un proceso discontinuo y con un solo reactor, las fases de producción son las siguientes:

1. Alimentación de las materias primas (AB)
2. Calentamiento de la mezcla (BC)
3. Calentamiento por propia exotermicidad de la reacción (CD)
4. Condensación a temperatura constante (DE)
5. Enfriamiento para la deshidratación (EF)
6. Deshidratación en vacío (FG)
7. Calentamiento en vacío hasta la temperatura final (GH)
8. Tratamiento térmico final (HI)
9. Evacuación de la resina del reactor (IJ)

La figura 12 muestra gráficamente la variación de la temperatura en el proceso de fabricación de las resinas fenólicas.

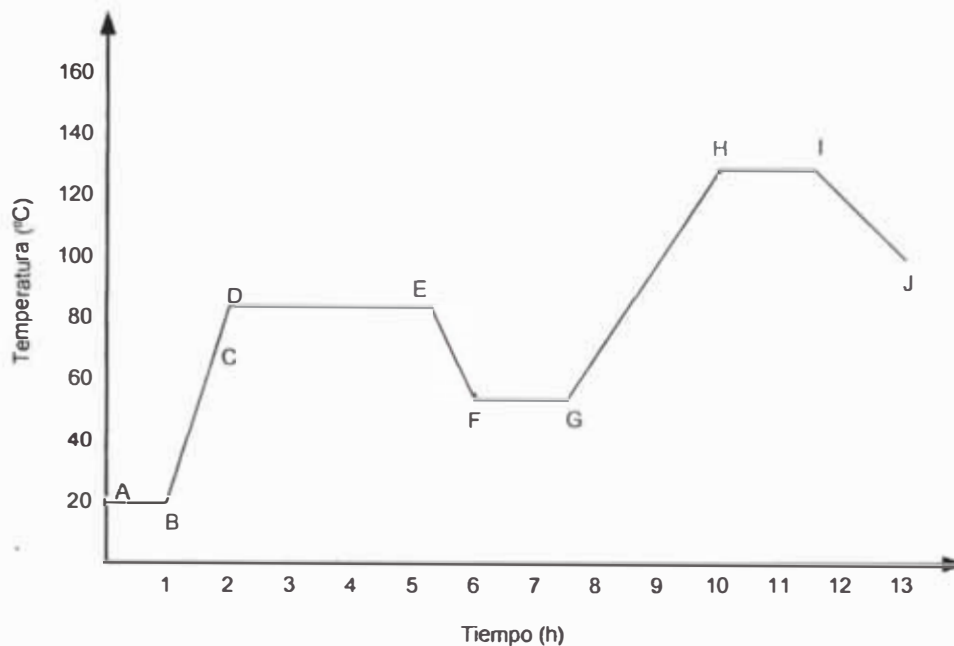


Figura 12: Diagrama de temperatura vs tiempo para el control del proceso de obtención de resinas fenólicas.

El proceso de fabricación es el siguiente: (ver figura 13)

Se alimenta al reactor (1) con fenol y formol (2) y (3). Se agrega el catalizador y se crean las condiciones para la reacción de condensación por calentamiento exterior, encendido de resistencias eléctricas (4). Durante la condensación, el reactor está conectado con el condensador de reflujo (5) para no dejar escapar los gases ni perder proporciones en las materias primas. En la fase de deshidratación se interrumpe la conexión con el reflujo y se conecta el reactor con una bomba de vacío (6). El líquido condensado se colecta en la trampa de condensación (7). Al final del proceso la resina se desocupa del reactor.

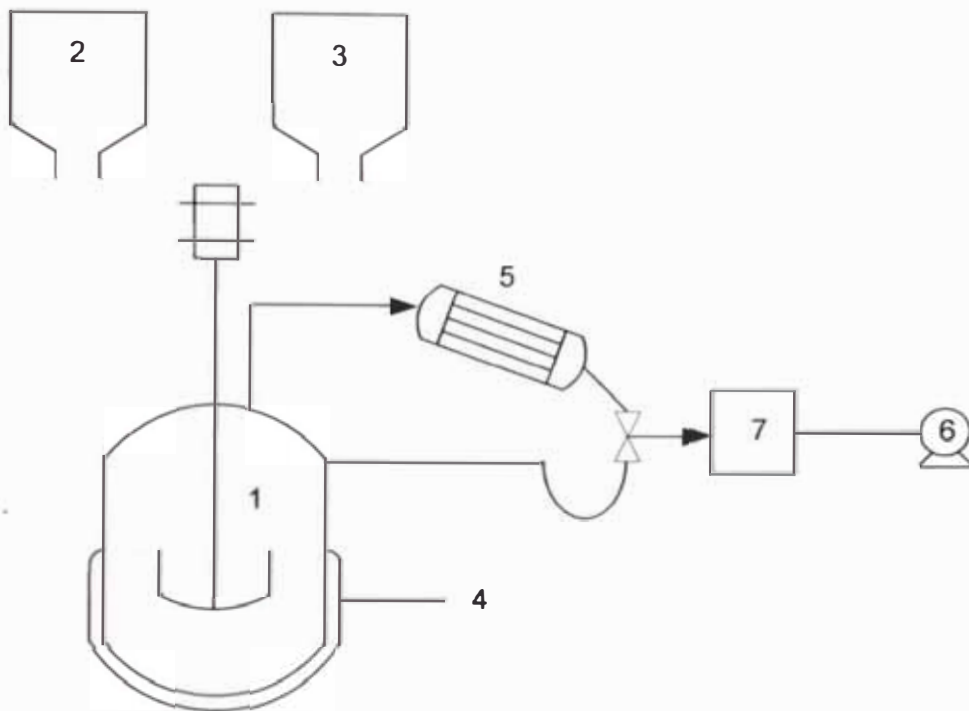


Figura 13: Diagrama de flujo para la obtención de resinas fenólicas por el método discontinuo

Capítulo 6

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UN REACTOR QUÍMICO

En este capítulo se describe la construcción del reactor químico, así como la implementación del sistema de control, los programas de control y el software SCADA.

6.1 REACTOR QUÍMICO

El reactor químico implementado es del tipo discontinuo - en el capítulo 3 se hace referencia a este tipo de reactores - el cual consta de los siguientes dispositivos, necesarios para la fabricación de resinas fenólicas:

- 01 Recipiente de 4 gl. de capacidad, aproximadamente.
- 02 Resistencias Térmicas para el intercambio de calor de 1.5 KW (Sistema de calentamiento).
- 01 Serpentin en el interior del recipiente (Sistema de enfriamiento).
- 02 Condensadores.
- 01 Trampa de Succión.
- 01 Trampa de Condensado.
- 01 Paleta de Mezcla.
- 01 Bomba de Succión.
- 01 Bomba de Agua para el sistema de enfriamiento y condensadores.
- 01 Tanque de Agua para el sistema de enfriamiento y condensadores.

La ventaja de utilizar un reactor discontinuo, es que no sólo servirá para la producción de resinas fenólicas, sino que puede utilizarse también para la fabricación de diversos productos químicos. Si se utilizaría un reactor continuo, este sólo podría producir un determinado producto. Todo el reactor se ha fabricado en acero inoxidable 316 para evitar la corrosión.

La figura 14 muestra el recipiente del reactor, de aproximadamente 4 galones de capacidad, también se aprecian las resistencias eléctricas instaladas alrededor del recipiente, estas se encuentran cubiertas de fibra de vidrio para aislar el calor que se produce luego de encender las mismas, en esta figura también se aprecia el cabezal del sensor de temperatura PT100 instalado para sensar la temperatura al interior del recipiente. En el interior del recipiente se encuentra un serpentín, por donde se deja correr agua fría cuando se desea encender el sistema de enfriamiento, bajando la temperatura al interior del mismo.



Figura 14: Recipiente y Resistencias Térmicas

La figura 15 muestra la parte superior del reactor construido, se aprecian los condensadores, el horizontal y el de reflujo, el motor de las

paletas de agitación y las electroválvulas. El condensador de reflujo tiene por finalidad condensar los gases que escapen del recipiente y retomarlos al mismo, para evitar perder la proporción de la materia prima ingresada para la reacción. El condensador horizontal se utiliza para condensar los gases que se desean eliminar, sin embargo se condensan para evitar salgan al medio ambiente en estado gaseoso y contaminarlo, por lo que se condensa y se receptiona en la trampa de condensado. El motor que se observa en la figura es el que mueve las paletas de agitación ubicadas en el interior del recipiente. En la figura también se puede observar tres electroválvulas, las cuales se encuentran conectadas a través de tuberías (de acero inoxidable de $\frac{1}{4}$ ") a la bomba de agua, una es para el condensador de reflujo, la otra para el condensador horizontal y la tercera para el serpentín de enfriamiento del interior del recipiente, es decir cuando se enciende la bomba de agua, dependerá de que electroválvula se encuentra abierta para dejar pasar el agua fría y activar los condensadores o el serpentín, según sea necesario y programado en la receta.

En la figura 16 se observan las trampas de condensado y las trampas de succión, además de dos electroválvulas, una que sirve para eliminar lo que se recolecte en la trampa de condensado y la otra que se abre cuando se prende la bomba de succión. Cuando esta bomba se enciende, el líquido sobrante se almacena en la trampa de succión.

En la figura 17 se observan, la bomba y el tanque de agua, que sirve para el sistema de enfriamiento y para activar los condensadores, también se observa la bomba de succión. En la parte inferior se puede apreciar las fuentes de alimentación y el estabilizador utilizados para el funcionamiento del sistema de control.

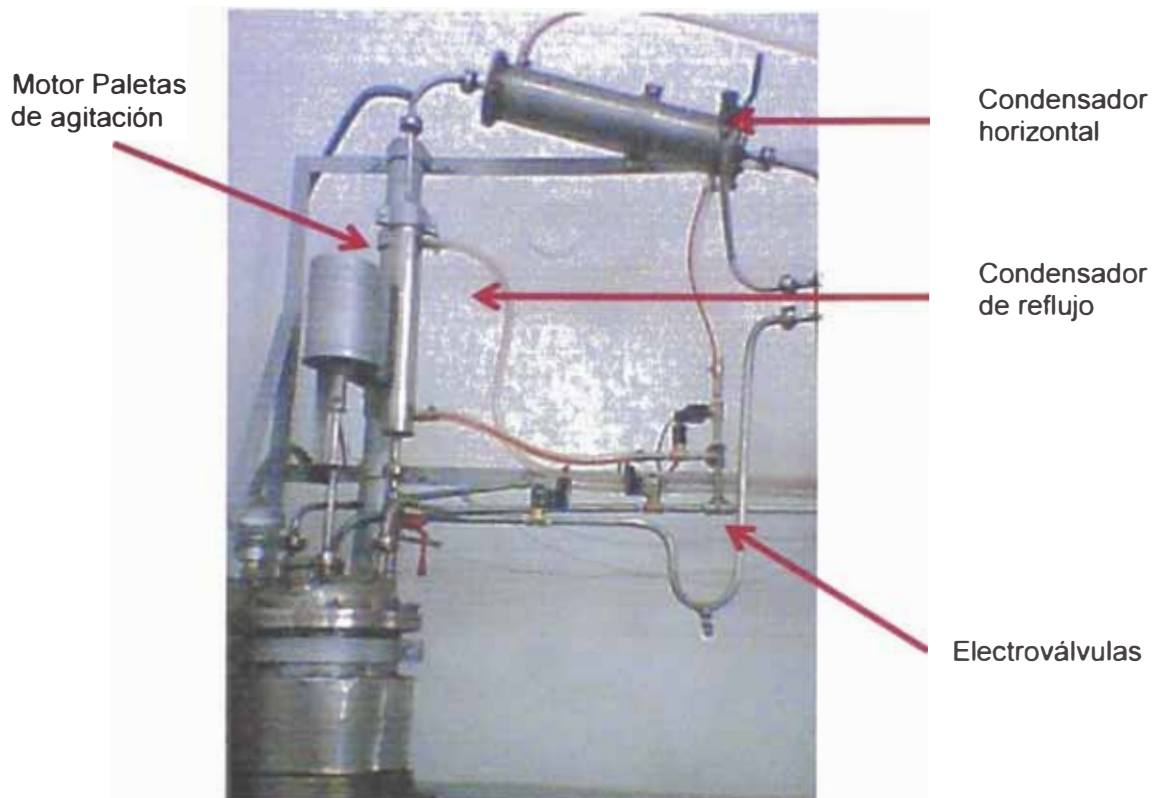


Figura 15: Condensadores, Motor de Paletas de Agitación y Electroválvulas

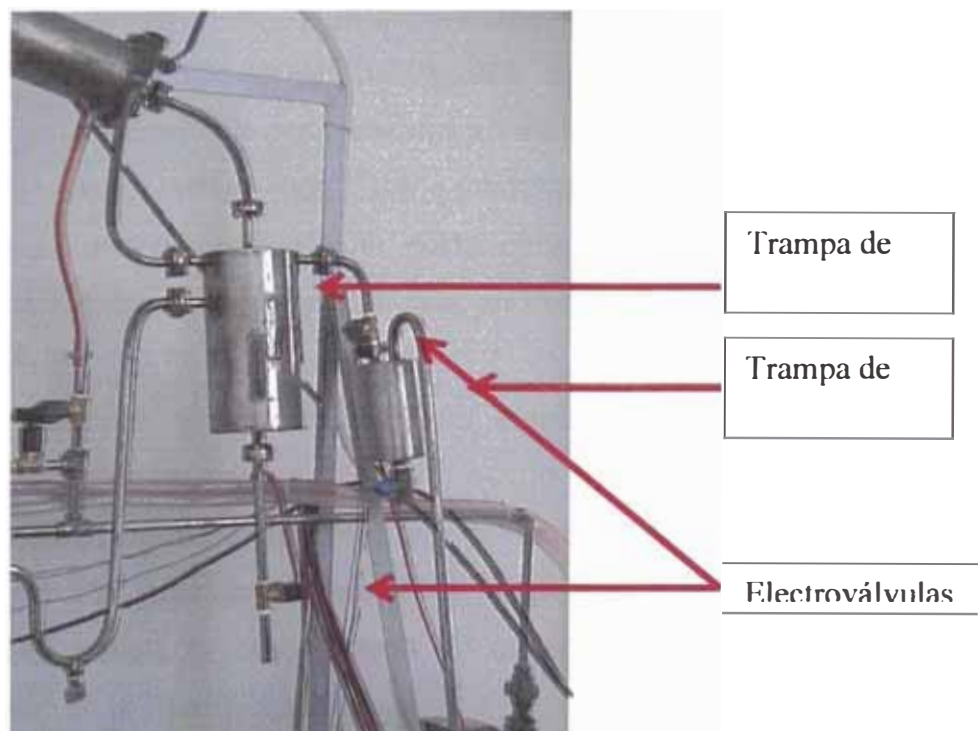


Figura 16: Trampas de Succión, de Condensado y electroválvulas

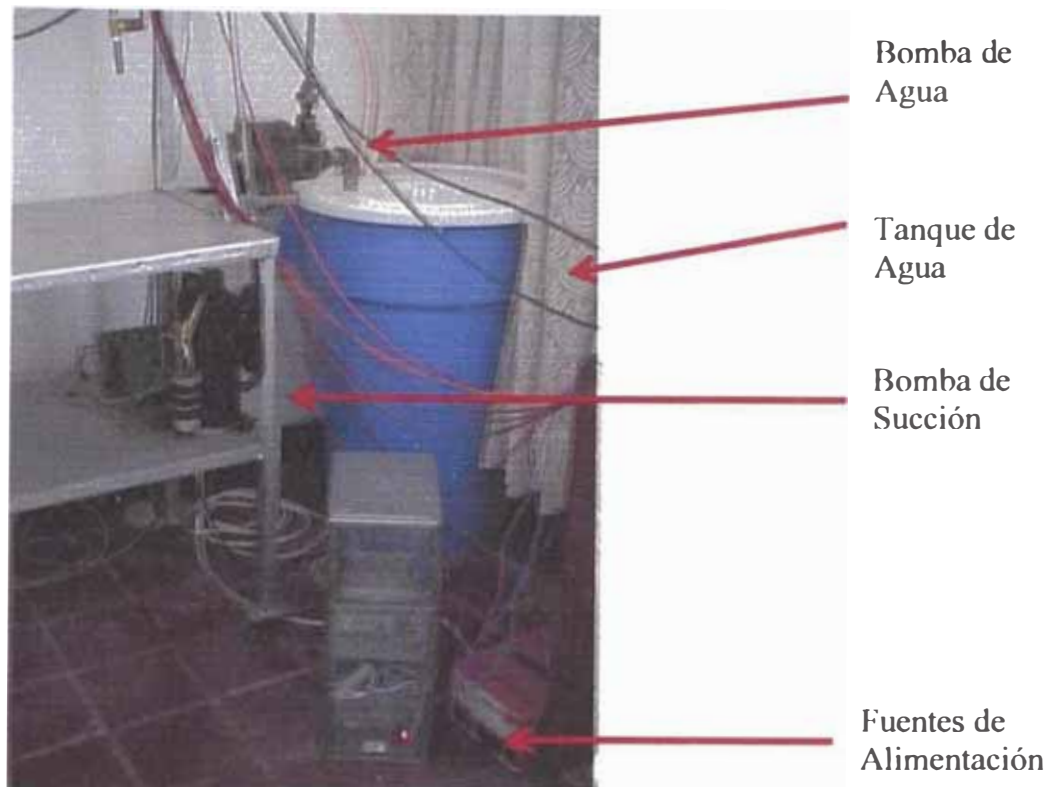


Figura 17: Bomba de Agua y Succión, Fuentes de Alimentación

La figura 18 muestra las tarjetas electrónicas diseñadas e implementadas para la automatización del reactor químico, lo que se observa son las tarjetas cuando la tesis estaba en desarrollo, por lo que se ubican sobre una mesa con las medidas de seguridad correspondientes para no originar ningún corto circuito, al finalizar el trabajo, las tarjetas se ubican dentro de una caja, en forma ordenada.

Tal como se mencionó al inicio del capítulo, el reactor químico tiene 2 resistencias térmicas, cada una de 1500 W, por lo cual, se tuvo que realizar una instalación eléctrica adicional en el laboratorio donde se realizó la implementación. Se instaló una llave térmica directamente al tablero principal para satisfacer la demanda de corriente. La figura 19 muestra la instalación de la llave térmica.

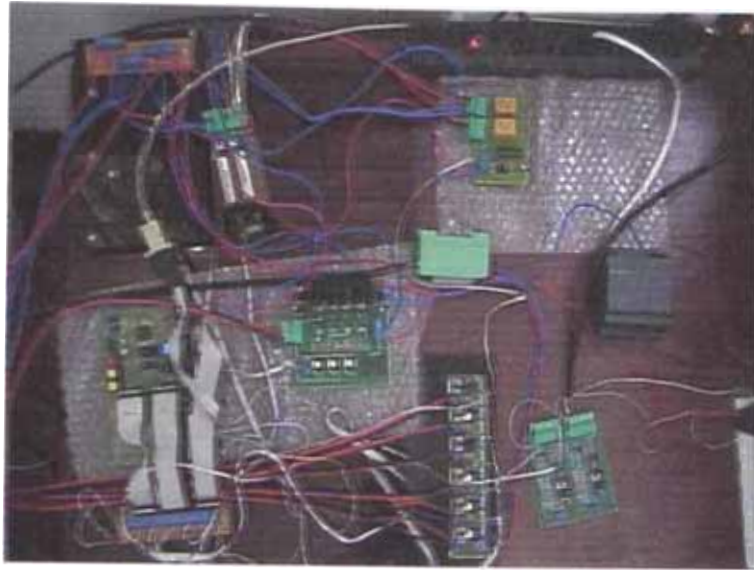


Figura 18: Tarjetas Electrónicas



Figura 19: Llave Térmica

La instalación de las resistencias térmicas se efectuó cuidadosamente, ya que al trabajar con líquidos se corre el riesgo de

generar un corto circuito, además de aislarlas debidamente al contacto del usuario para evitar choques eléctricos.

La figura 20 muestra la instalación de las resistencias térmicas en el reactor construido.

Como se puede observar, las conexiones se realizaron de tal manera que el usuario no tenga contacto con ellas y se colocó un vidrio protector para evitar posibles daños al usuario.

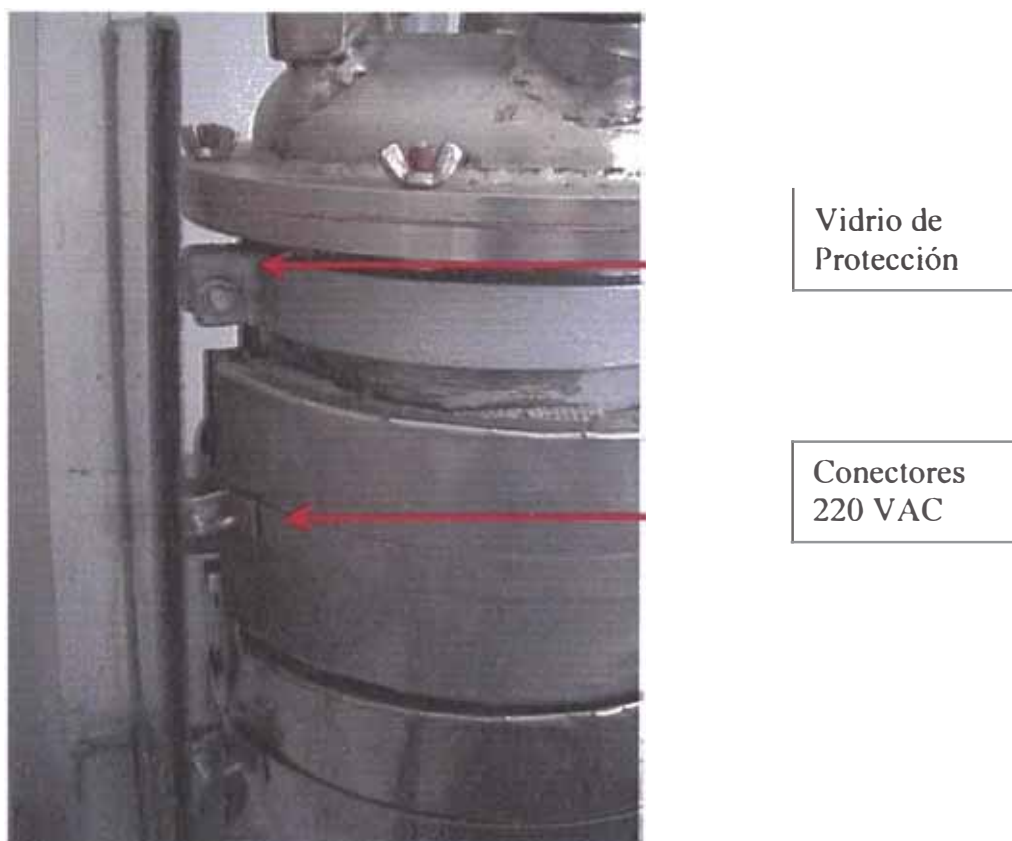


Figura 20: Instalación de Resistencias Térmicas

El reactor químico al ser automatizado, posee sensores, actuadores y tarjetas electrónicas de acondicionamiento, que permiten la interconexión a través de un microcontrolador con la computadora. Anteriormente se ha explicado la ubicación de los actuadores (bombas y

electroválvulas), la figura 21 muestra la ubicación de los dos sensores de temperatura que sirven para monitorear la misma desde la computadora, con este dato es que se realiza el control de temperatura en el microcontrolador. Ambos sensores son del tipo PT100, lo que se explicará en el capítulo 7, el sensor de temperatura de la izquierda, es del tipo bulbo con cabezal y se encuentra ubicado en el recipiente del reactor. El bulbo es de 40 cm. de largo aproximadamente, el cual ingresa hasta el interior del recipiente para monitorear la temperatura. El sensor de la derecha se encuentra en la parte superior del condensador de reflujo y nos permite conocer la temperatura de los gases que se disipan durante la reacción.

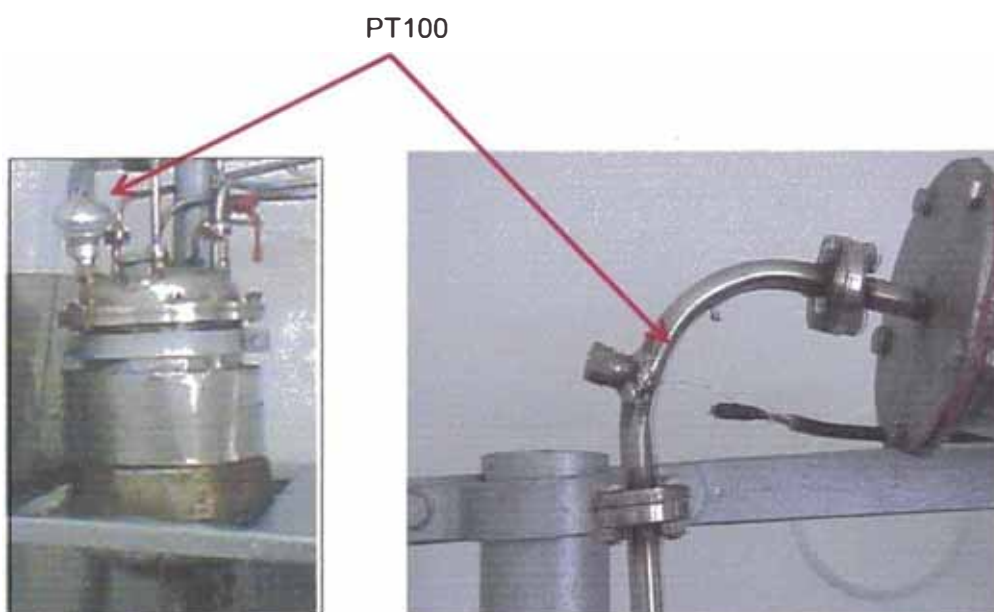


Figura 21: Ubicación de Sensores de Temperatura PT100

El capítulo 7, explica el funcionamiento de cada dispositivo (sensores y actuadores) ubicados en el reactor, así como las tarjetas acondicionadoras de señal y las tarjetas electrónicas diseñadas para activar los actuadores del sistema desde la PC.

6.2 SOFTWARE DE CONTROL

El software que permite la automatización del reactor químico y realiza la implementación de los algoritmos de control emplea el lenguaje de programación C2 y se programa en el microcontrolador C-Control II comercializado por la empresa alemana CONRAD, del cual se encontrará información en el siguiente capítulo. La siguiente figura muestra el diagrama de flujo principal para la programación del microcontrolador.

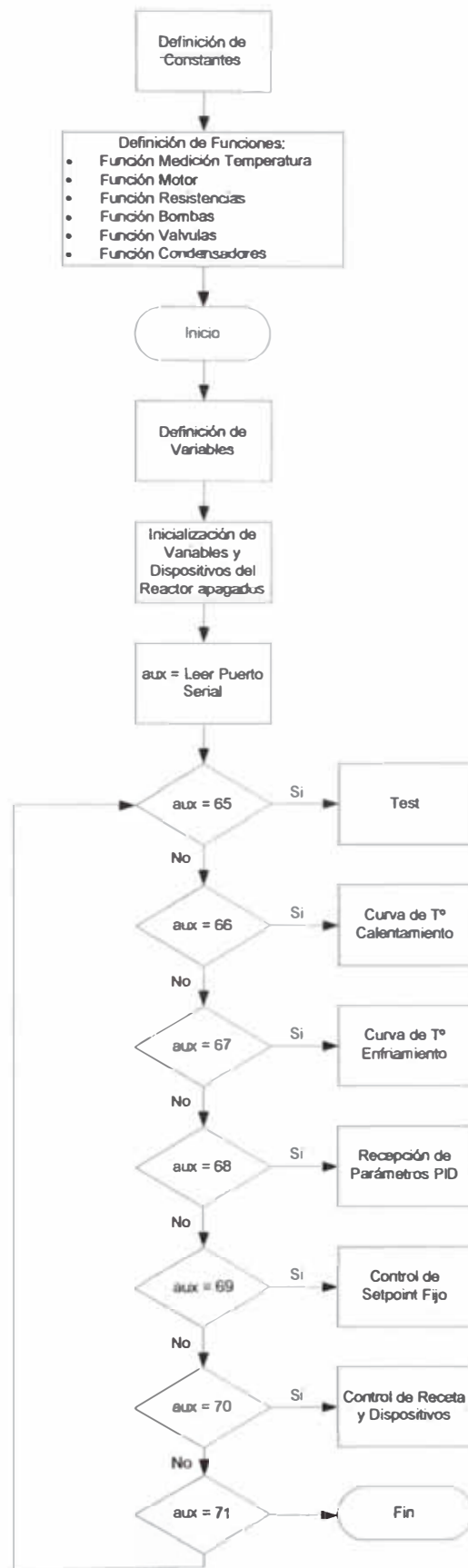


Figura 22: Diagrama de Flujo Programa Principal

A continuación se mostrarán los diagramas de flujo de cada función y proceso:

Función Medición de Temperatura.- La temperatura se mide a través de los puertos análogos del microcontrolador, la función realizada elige leer el puerto 0 (temperatura dentro del recipiente) ó el puerto 1 (temperatura antes del condensador) dependiendo de la orden enviada por la PC.

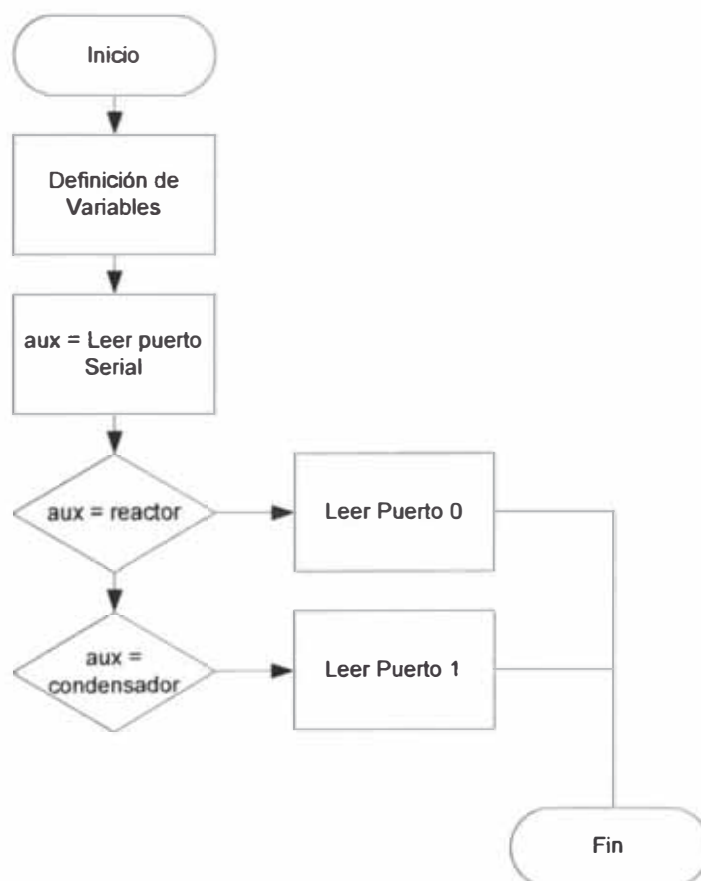


Figura 23: Diagrama de Flujo Función Medición de Temperatura

Función Motor.- Con esta función se controla el encendido y apagado, así como el cambio de giro (horario y antihorario) del motor que gobierna las paletas de mezcla. Para esta función así como para las posteriores se utilizan los puertos digitales del microcontrolador.

Función Resistencias.- A través de esta función se controla el encendido y apagado de las resistencias que sirven para elevar la temperatura en el interior del recipiente.

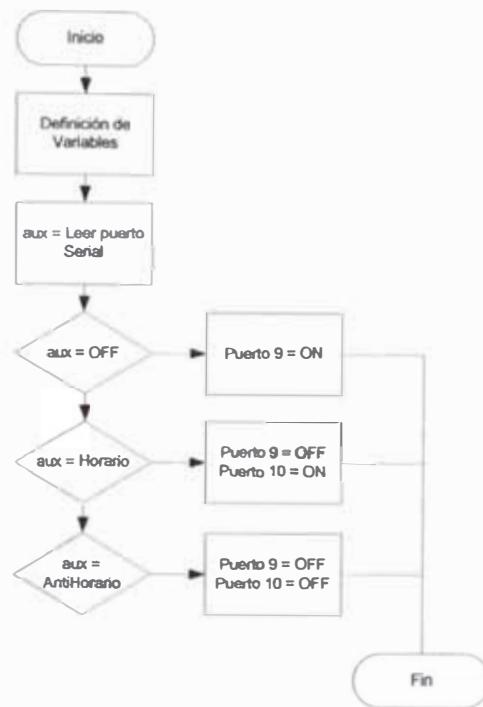


Figura 24: Diagrama de Flujo Función Motor

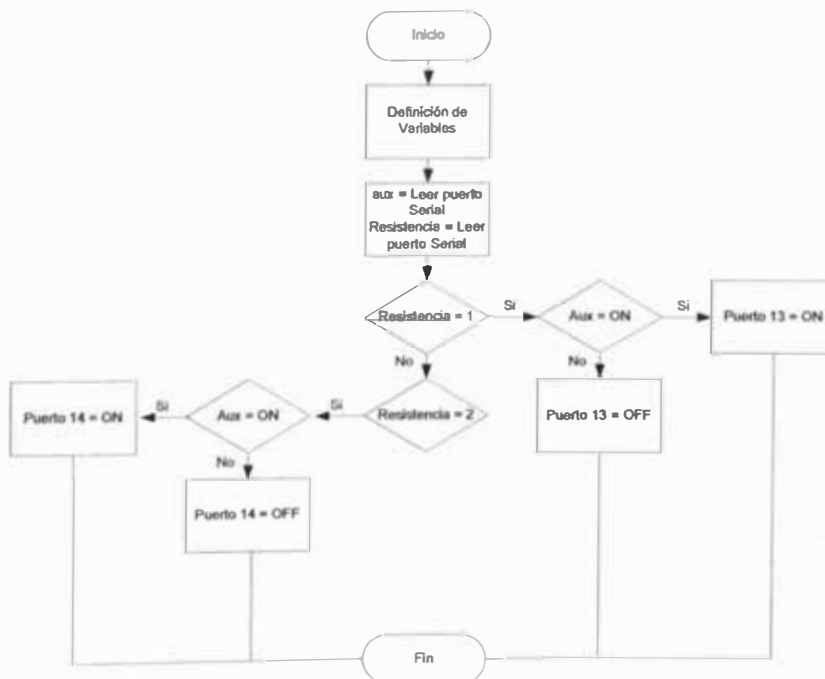


Figura 25: Diagrama de Flujo Función Resistencias

Función Bombas.- Con esta función se controla el encendido de las bombas, de agua y de succión.

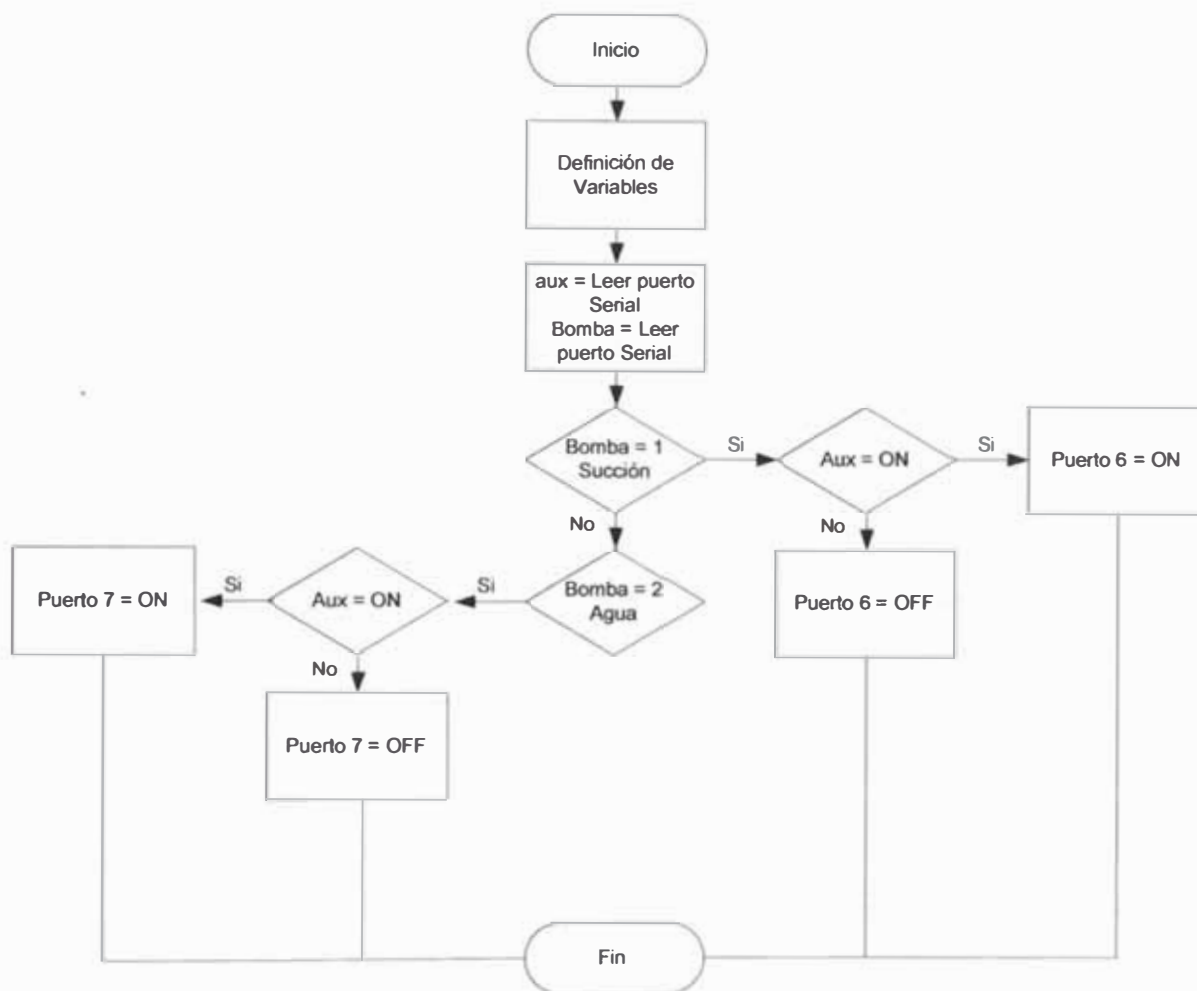


Figura 26: Diagrama de Flujo Función Bombas

Función Electroválvulas.- Con esta función se controla el encendido y apagado de las 6 electroválvulas instaladas en el reactor.

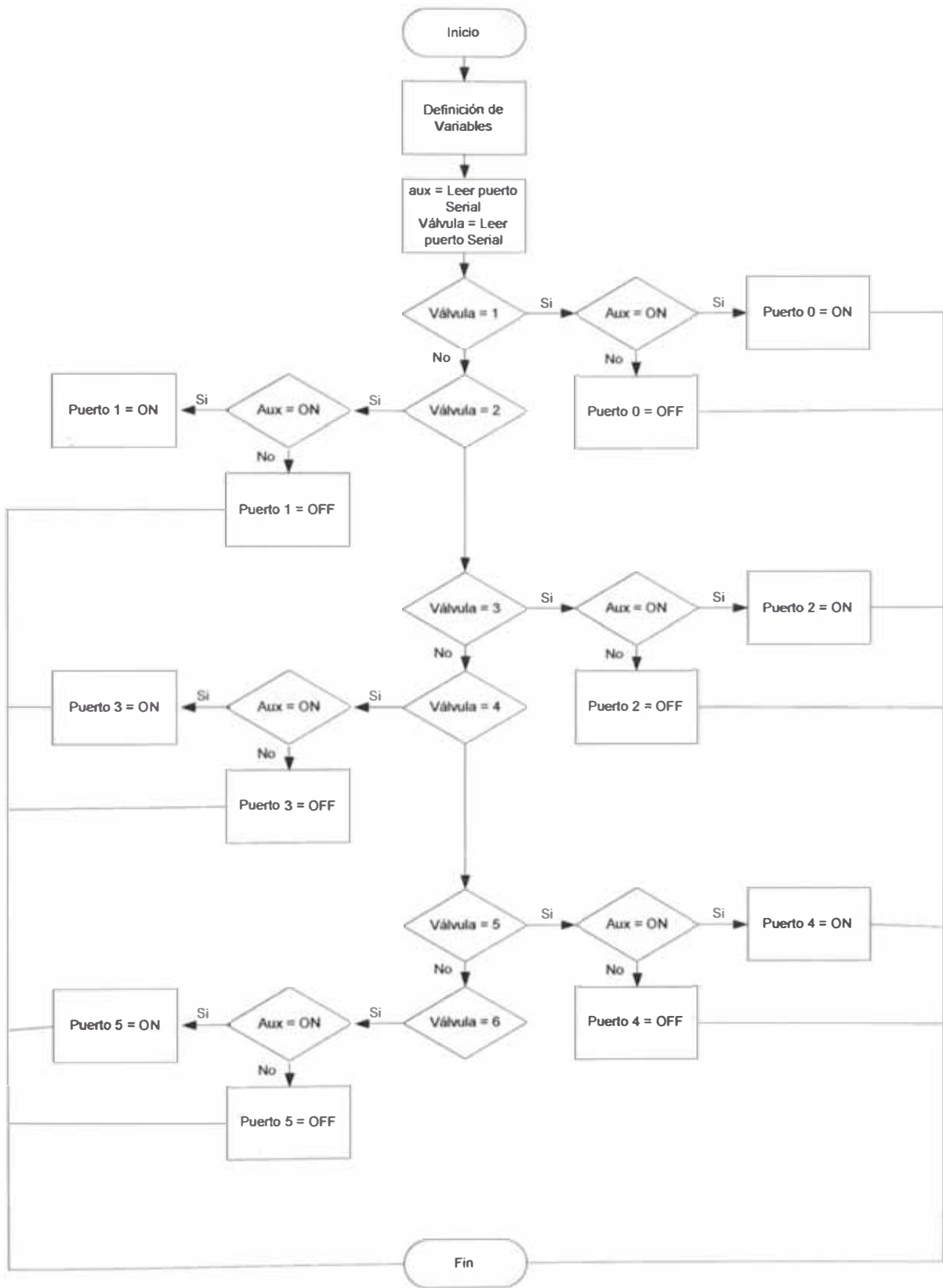


Figura 27: Diagrama de Flujo Función Electroválvulas

Función Condensador de Reflujo.- Con esta función se enciende la bomba de agua y la electroválvula correspondiente al condensador de reflujo.

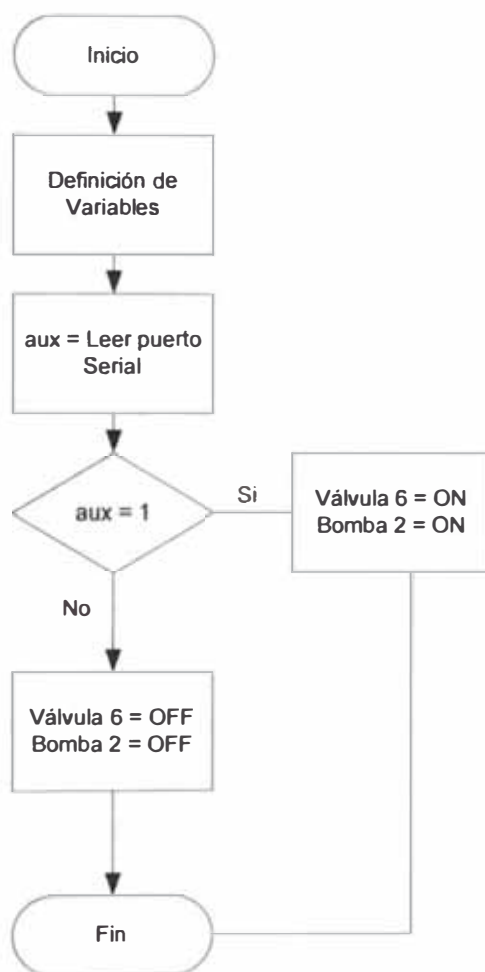


Figura 28: Diagrama de Flujo Función Condensador de Reflujo

Función Condensador Horizontal.- Con esta función se enciende la bomba de agua y la electroválvula correspondiente al condensador horizontal.

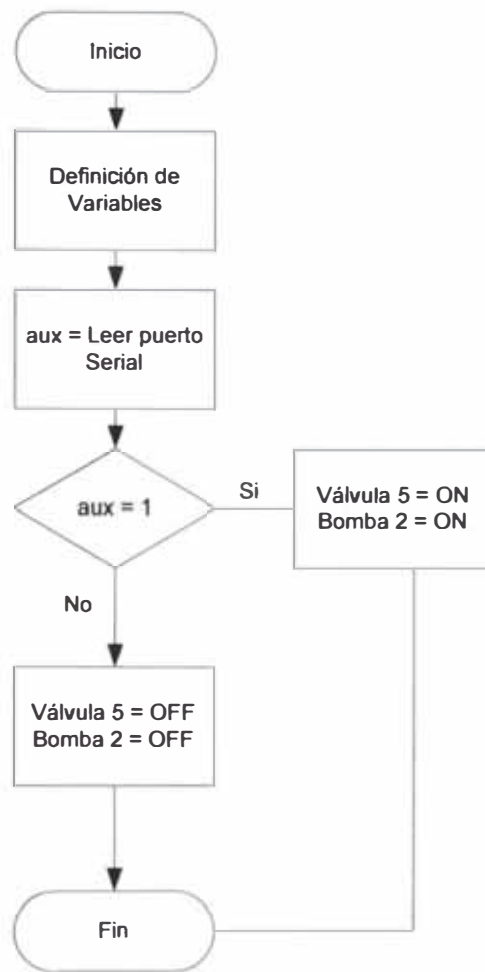


Figura 29: Diagrama de Flujo Función Condensador Horizontal

Función Bomba de Succión.- Con esta función se enciende la bomba de succión y la electroválvula correspondiente.

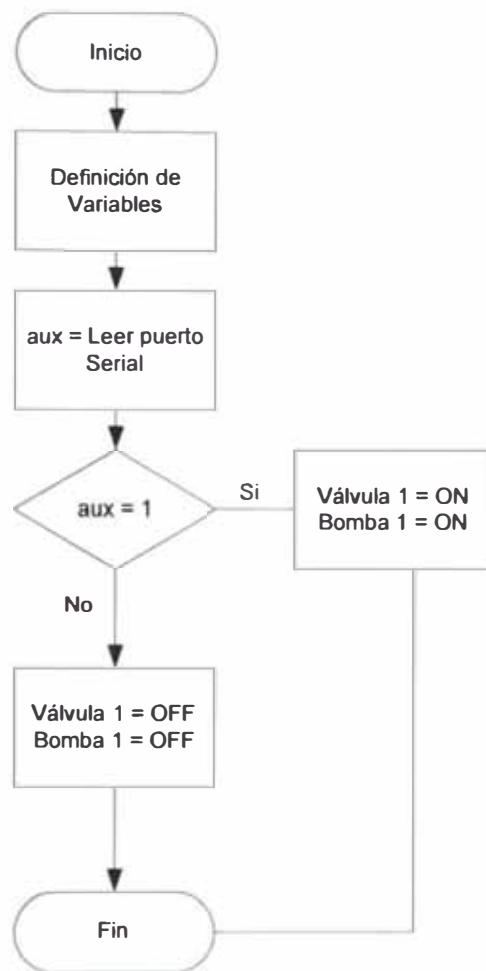


Figura 30: Diagrama de Flujo Función Bomba de Succión

En el diagrama de flujo principal se tienen 6 procesos, los cuales se explicarán a continuación:

Test.- El microcontrolador se encuentra a la espera de una orden de la PC, a través del puerto serial para poner en funcionamiento cualquier dispositivo del reactor químico (bombas, electroválvulas, resistencias, medición de temperatura, etc); haciendo uso de las funciones explicadas anteriormente.

Curva de Temperatura Calentamiento.- El microcontrolador ordena encender la resistencia 1 y envía a través del puerto serial cada segundo

la temperatura sensada en el interior del recipiente, con la finalidad que el Sistema SCADA grafique la curva de temperatura.

Curva de Temperatura Enfriamiento.- Del mismo modo que el proceso anterior, el microcontrolador enciende la bomba de agua y la válvula correspondiente para iniciar el proceso de enfriamiento del recipiente, cada segundo lee la temperatura y lo envía por el puerto serial, el sistema SCADA recibe los datos y los grafica.

Recepción de Parámetros PID.- El microcontrolador recibe los parámetros PID, para calentamiento y enfriamiento, por medio del puerto serial, los cuales servirán para el control de temperatura, ya sea a una temperatura fija o variable.

Control Setpoint Fijo (Control a una temperatura fija).- En la figura 31 se observa el diagrama de flujo que explica la programación de este proceso.

Control Receta y Dispositivos.- Este proceso es muy parecido al anterior, la gran diferencia es que el setpoint ahora no es fijo, por lo que en cada lazo, se debe leer el setpoint enviado por la PC a través del puerto serial y de igual manera se controla la temperatura, en caso la receta tenga una pendiente negativa, se utilizará otros parámetros PID en la ecuación, estos parámetros fueron recibidos por el controlador en el proceso de Recepción de parámetros PID. Además en este proceso, se trabaja mucho con los tiempos, ya que el usuario puede programar el encendido y apagado de los dispositivos adicionales del reactor durante la ejecución de la receta.

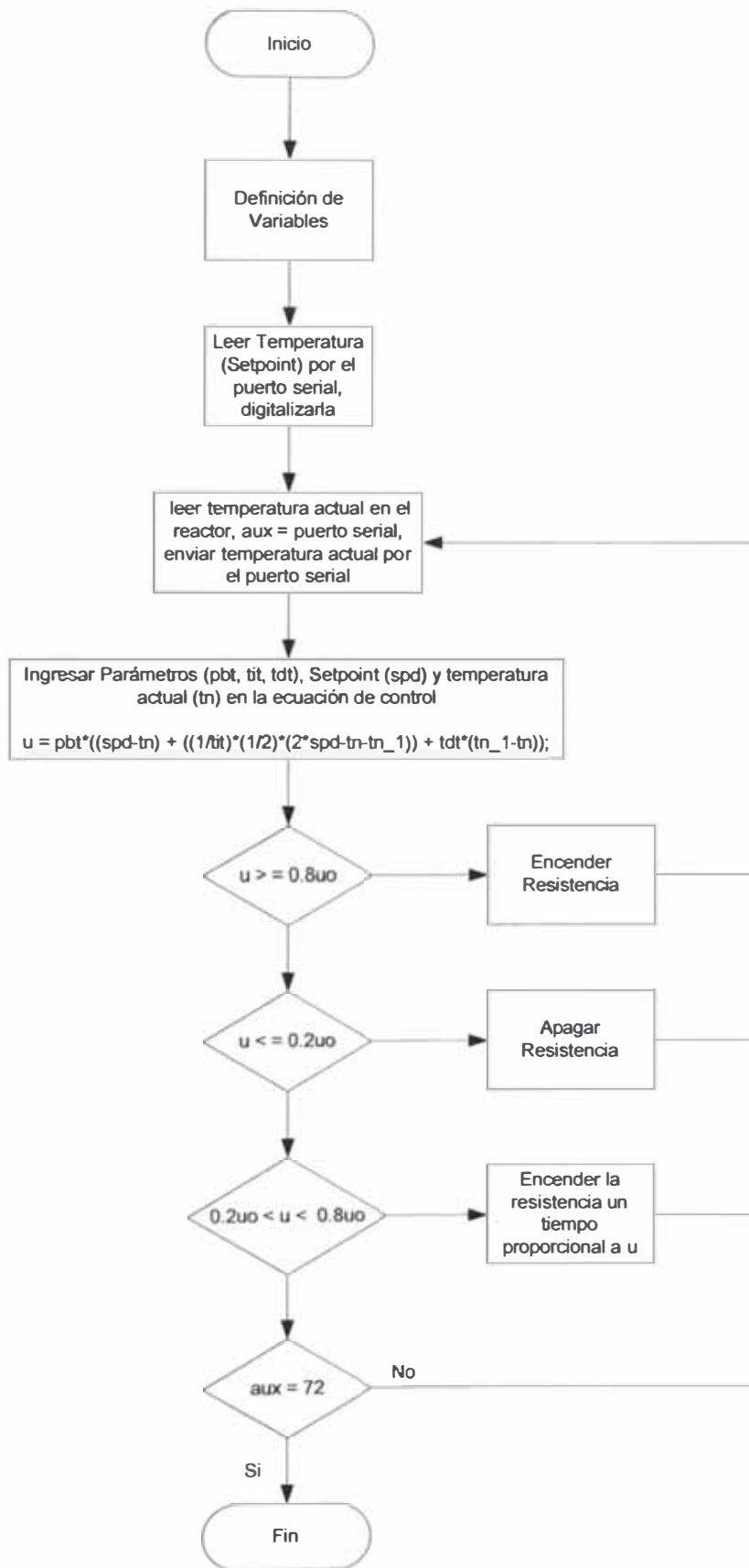


Figura 31: Diagrama de Flujo Control Temperatura constante

6.3 SOFTWARE DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS

El Software de Control y Adquisición de Datos denominado SCADA que se utiliza en el presente trabajo de tesis, es el EXSCADA, de las siglas EX de Microsoft Excel y SCADA, y se realizó programando las macros del Software Microsoft Excel en el lenguaje Visual Basic.

Las pantallas diseñadas tienen un entorno amigable y son fáciles de utilizar para el usuario.

En la figura 32 se muestra la pantalla principal del Software, donde se observa una foto real del reactor químico implementado y 3 botones de acceso al sistema. El botón **Test** muestra una pantalla con la cual se puede interactuar con los sensores y actuadores del reactor químico a manera de prueba. El botón **Control** permite al usuario ingresar al menú de control, obtener las curvas de calentamiento y enfriamiento con la finalidad de hallar los parámetros dependiendo del control a utilizar, enviar los parámetros al microcontrolador, realizar un control de temperatura con setpoint fijo y programar la receta que se quiera implementar (temperatura y dispositivos) y dar inicio al sistema de control del reactor químico. Pulsando botón **Salir**, se abandona el Sistema.

Mediante esta pantalla, el usuario puede interactuar con los sensores y actuadores del reactor químico. Sirve para verificar el buen funcionamiento de los mismos y darle al usuario una idea del funcionamiento de los dispositivos de control y monitoreo implementados en el sistema.

La ventana esta dividida en partes, cada una corresponde a cada grupo de dispositivos implementados.

En la parte superior tenemos un sub menú denominado Paletas de Mezcla, con este menú podemos ingresar la velocidad, en Revoluciones por Minuto (RPM), que deseamos giren las paletas de mezcla y además darle sentido horario ó antihorario. De esta manera no sólo probamos el funcionamiento del motor que da el movimiento a las paletas, sino también la tarjeta electrónica que permite el cambio de giro del motor.

Luego se encuentra el sub menú de electroválvulas, por medio de estos botones podemos abrir o cerrar las electroválvulas implementadas en el reactor químico, de igual manera probamos el funcionamiento de las electroválvulas y de la tarjeta electrónica que permite interactuar con ellas.

Con el sub menú de Bombas y Resistencias se realiza el encendido de las mismas y con el sub menú de Temperatura, monitoreamos la temperatura en el interior del reactor químico y en la parte superior del condensador de reflujo. De esta manera probamos la tarjeta acondicionadora de señal diseñada para los sensores de temperatura PT100.

Con este menú también se efectúa el funcionamiento del sistema de enfriamiento y de los condensadores, aperturando la electroválvula indicada y la bomba de agua.

Así tenemos que, por medio de este menú se prueba la parte mecánica, eléctrica y electrónica de todo el sistema implementado en el presente trabajo.

Menú Control

La figura 34 muestra el menú de Control, por medio de esta pantalla, el usuario tiene la opción de hallar las curvas de temperatura, los parámetros PID para el controlador de temperatura, programar recetas y dar inicio al sistema de control.

Este menú, al igual que el anterior, está dividido en cuatro sub menús:

- Autosintonía
- Tipos de Control
- Control
- Receta

En Autosintonía el usuario puede determinar las curvas de control de calentamiento y enfriamiento necesarias para luego hallar los parámetros auxiliares de control PID.

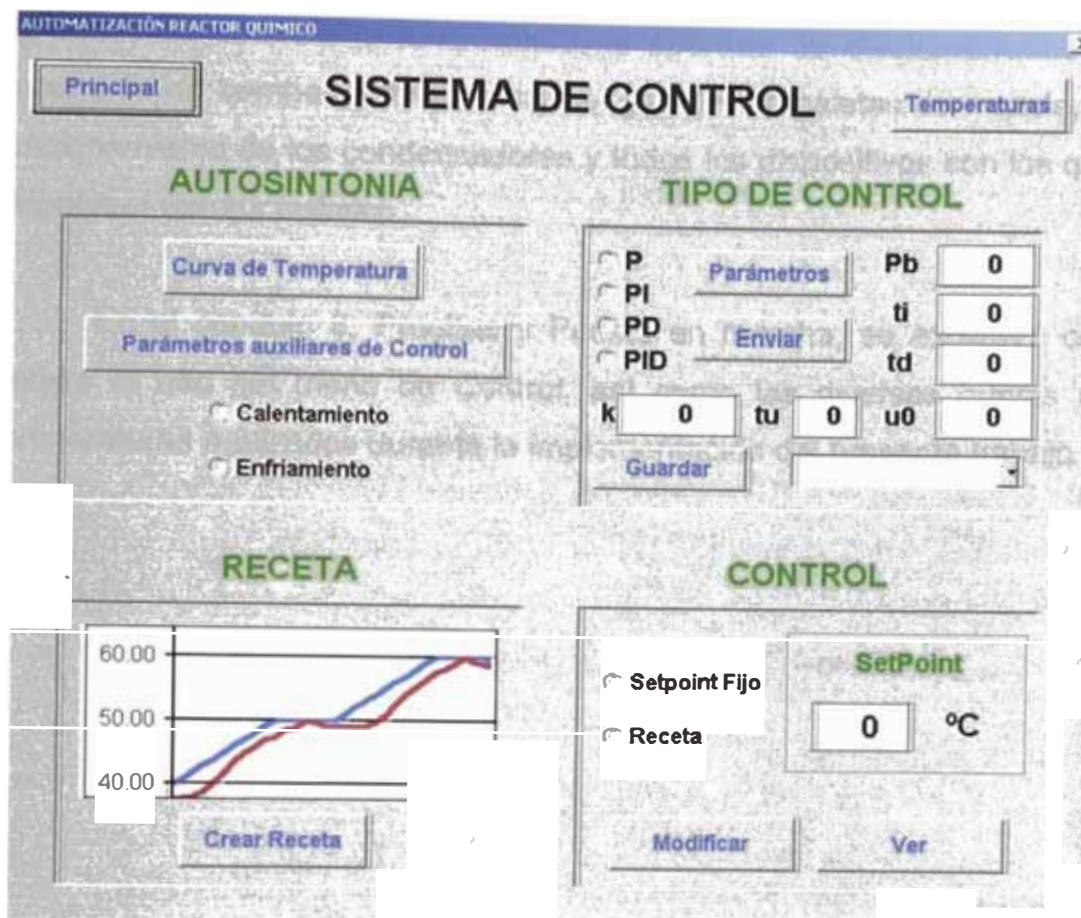


Figura 34: Menú Sistema de Control

En el sub menú Tipos de Control, ubicado en la parte superior derecha, el usuario debe indicar que tipo de control desea realizar y luego, al presionar el botón **Parámetros** obtendrá las constantes necesarias para el tipo de control seleccionado, luego presionando **Enviar** el sistema se comunica con el Microcontrolador transfiriendo los parámetros PID necesarios para el control, además el usuario puede guardar los parámetros encontrados dentro de una base de datos del mismo programa. En caso el usuario ya conozca el producto a realizar, simplemente obtiene los parámetros almacenados y los envía al microcontrolador, sin necesidad de nuevamente hallar los parámetros.

En la ventana Control, el usuario debe indicar si el control a realizar será sólo a temperatura constante o si se procederá a crear una Receta,

en donde se controla la temperatura, la apertura de electroválvulas, el encendido de bombas y resistencias, el giro de las paletas de mezcla, el funcionamiento de los condensadores y todos los dispositivos con los que dispone el reactor químico.

En el capítulo 8, Pruebas y Puesta en marcha, se explicará con detalle el uso del menú de Control, así como las diversas curvas de temperaturas realizadas durante la implementación del presente trabajo.

Capítulo 7

INSTRUMENTACIÓN

En este capítulo se explica el funcionamiento de los sensores y actuadores instalados en el reactor químico, así como el desarrollo de las tarjetas acondicionadoras de señal y las tarjetas electrónicas diseñadas y fabricadas como interfaces entre el microcontrolador y los dispositivos. También se describe las características del microcontrolador y de la computadora utilizados para la implementación del Sistema.

7.1 SENSORES DE TEMPERATURA

Existen diferentes tipos de sensores de temperatura, en el presente trabajo se ha utilizado los tipo PT-100. Este tipo de sensor, es una resistencia cuyo valor resistivo varía linealmente en función de la temperatura a la que esta expuesta la misma y se caracteriza por su uso en entornos industriales. El hecho de que parte del material con el que está fabricado sea platino y de que aparte, ofrezca un valor resistivo de 100 ohmios expuesto a una temperatura de 0 °C, hace que este sensor reciba el nombre de PT-100.

La resistencia se mide mediante la ley de Ohm, haciendo circular una corriente constante y midiendo la caída de tensión sobre la resistencia del sensor. Para esto, se cuenta con diferentes métodos. El método empleado en el presente trabajo es el de tres hilos, es decir, se ha diseñado un acondicionador de señal, donde ingresa la señal proporcionada por el sensor PT100 y la salida generada es de 0 á 4

voltios, que es la señal requerida por el microcontrolador para poder leer la temperatura correctamente.

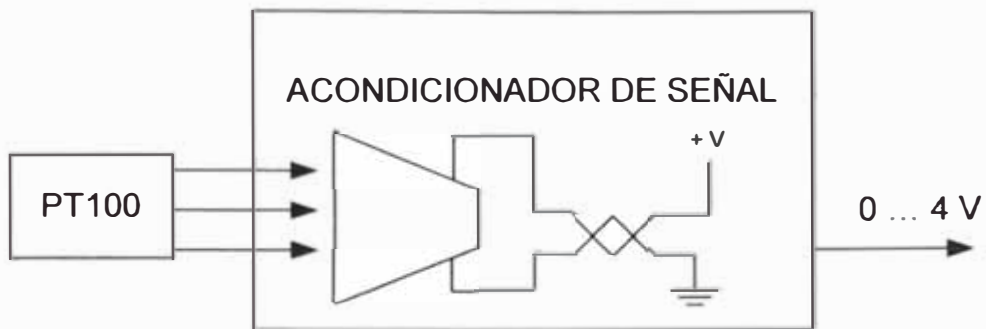


Figura 35: Acondicionador de Señal

La figura 36 muestra la tarjeta diseñada y fabricada como acondicionador de señal para PT-100:



Figura 36: Tarjeta Acondicionadora de Señal para PT100

7.2 ELECTROVÁLVULAS

El reactor posee 6 electroválvulas, 3 de ellas permiten el paso de agua por las tuberías para el sistema de enfriamiento y el funcionamiento de los condensadores, y las otras 3 son para controlar el paso de gases o líquidos que se generan durante la reacción. Todas las electroválvulas funcionan con 24 VDC.

Para controlar la apertura y cierre de estas electroválvulas, se diseñó un circuito electrónico, el cual, haciendo uso de un optoacoplador, permite activar la electroválvula (24VDC) con la señal de 5 VDC dada por el microcontrolador.

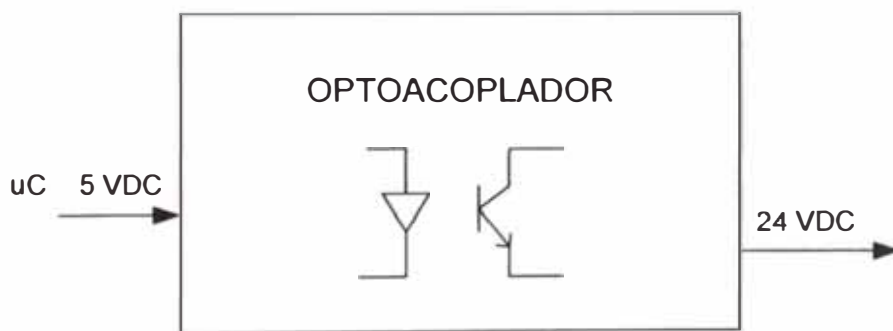


Figura 37: Diagrama Optoacoplador Electroválvulas

La figura 38 muestra la tarjeta diseñada y construida para el control de las 6 electroválvulas desde la PC.



Figura 38: Tarjeta Electroválvulas

7.3 RESISTENCIAS TÉRMICAS

El reactor implementado cuenta con dos resistencias térmicas de 1500 W cada una, que son las que se encargan de generar calor en el interior del recipiente, ambas resistencias funcionan con 220 V.A.C. por lo que su instalación, tal como se mencionó, fue realizada cuidando que el usuario no sufra algún daño durante el proceso.

Se diseñó una tarjeta de control, la cual haciendo uso de Triacs, se encarga del encendido de las resistencias térmicas.

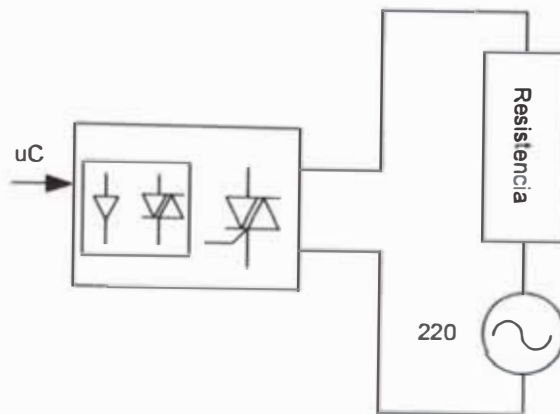


Figura 39: Diagrama Resistencias con Triacs

La figura 40 muestra la tarjeta fabricada para el control de las resistencias térmicas.

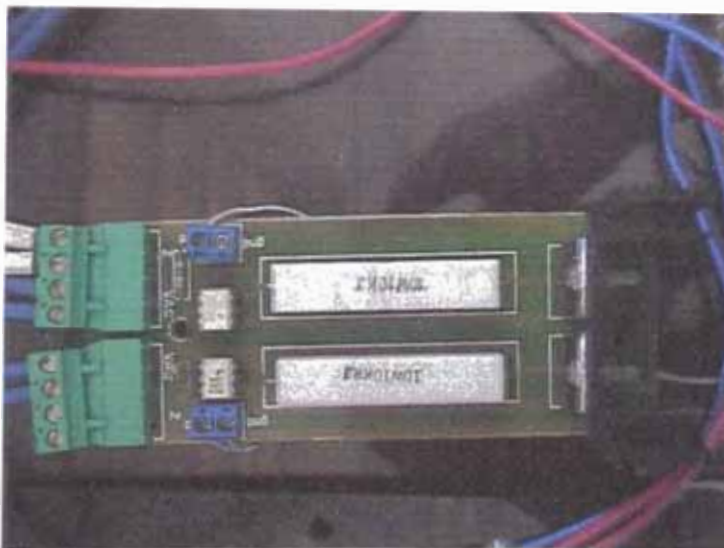


Figura 40: Tarjeta Resistencias Térmicas

7.4 MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA

El motor de corriente continua instalado, sirve para realizar el movimiento de las paletas de agitación del reactor. Es un motor de 8 A de corriente y se encuentra acoplado con las paletas de agitación. Según las especificaciones del sistema, es necesario controlar la velocidad de las

paletas de agitación, así como el sentido de giro de las mismas. Para tal fin, se diseñó e implementó una tarjeta electrónica, la cual realiza estas funciones. La tarjeta posee un Puente H para controlar la inversión de giro y recibe una señal PWM (Modulación por Ancho de Pulso) para controlar la velocidad. Además a la entrada de la tarjeta se ha colocado optoacopladores para separar las fuentes del microcontrolador y del motor, de esta manera protegemos al microcontrolador.

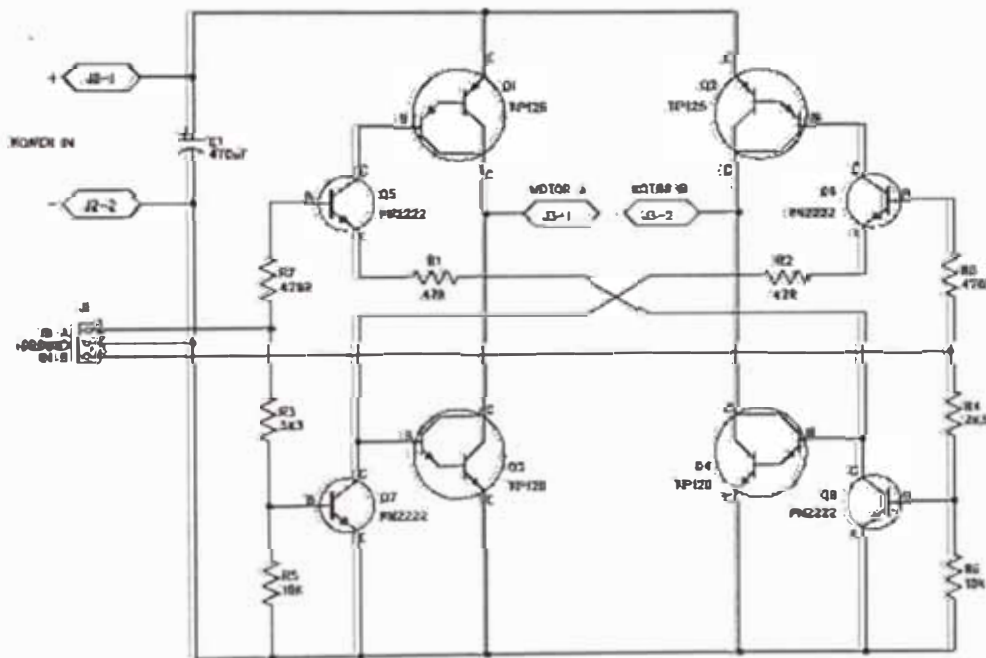


Figura 41: Esquemático del Puente H

La tarjeta de Puente H utiliza 2 señales digitales y 1 PWM, para el funcionamiento del motor. La PWM sirve para controlar la velocidad, una señal digital controla la inversión de giro del motor (1 – horario, 0 – anti horario) y la otra permite el funcionamiento de la tarjeta.

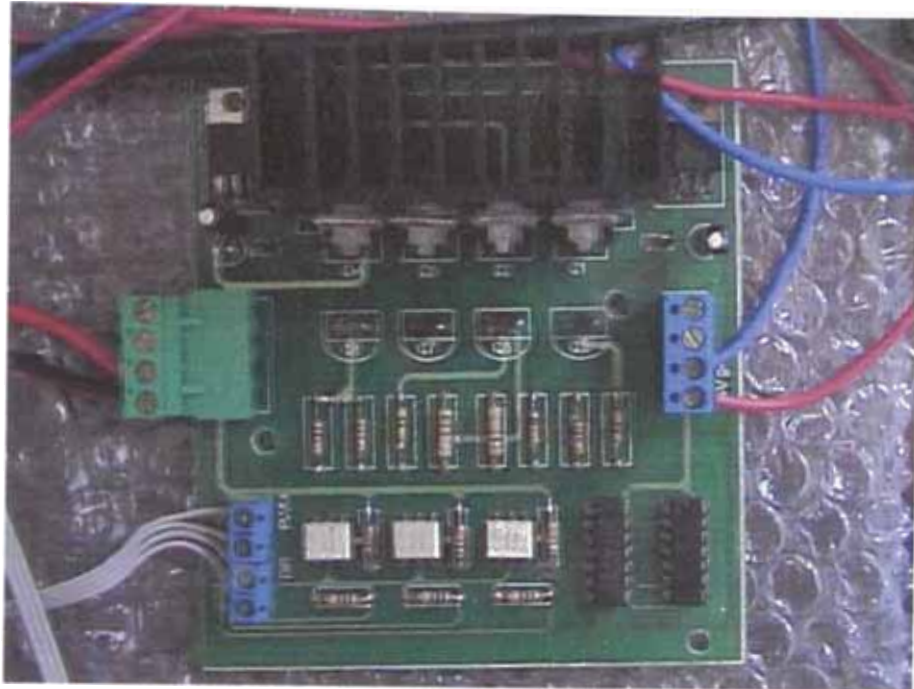


Figura 42: Tarjeta Puente H Motor DC

7.5 BOMBA DE SUCCIÓN Y BOMBA DE AGUA

La bomba de succión sirve para generar un vacío en el reactor químico, necesario en la fabricación de resinas fenólicas y/o en otros productos químicos.

La bomba de agua sirve para alimentar al sistema de enfriamiento y para el funcionamiento de los condensadores del reactor químico, esta bomba se conecta a un tanque de 150 lt. de capacidad, el cual se encuentra lleno de agua. El agua recircula por el sistema de enfriamiento y por los condensadores cuando el sistema abre las electroválvulas indicadas para el paso de agua y enciende la bomba.

Ambas bombas, de succión y de agua, se activan a través de relés de 12 V.D.C.



Figura 43: Tarjeta de Relés

7.6 FUENTES DE ALIMENTACIÓN

Para evitar perturbaciones en el sistema y proteger al microcontrolador se utiliza dos fuentes de tensión, ambas de 24 VDC, una para el microcontrolador y la otra para el control del motor de las paletas de agitación y las electroválvulas. Ambos circuitos diseñados hacen uso de optoacopladores para separar las fuentes.

La figura 44 muestra la instalación de las fuentes que alimentan al sistema:



Figura 44: Fuentes de Alimentación y Estabilizador del Sistema

7.7 MICROCONTROLADOR

El microcontrolador utilizado es el C164CI de la familia C166 de Infineon Technologies (antes SIEMENS), se le denomina C-Control II Unit, posee 80 pines, los cuales tienen interesantes recursos de Hardware, como:

- 8 Puertos Análogo-Digital de 10 bits.
- 1 Bus CAN
- 1 Puerto Serial
- Timer

El microcontrolador tiene una memoria FLASH-EEPROM de 512 kB (8 segmentos) y 64 de SRAM (1 segmento). Posee un Reloj externo de 5 Mhz y uno interno de 20 MHz

El microcontrolador C164CI tiene dos puertos seriales, el primero es el estándar RS232 (hardware) y el segundo se emula a través de puertos digitales (software). El sistema debe programarse en formato 8-N-

1, es decir cada Byte debe ir con 8 bits de datos, uno bit de paridad y un bit de parada. Otro tipo de formato no será reconocido por el microcontrolador.

El microcontrolador cuenta con un puerto para impresora, es decir se puede conectar una impresora y enviar la impresión directamente desde el mismo controlador. El formato de impresión es el clásico modo ASC-II. Se puede conectar sin problemas impresoras de inyección de tinta o láser.

El C-Control II Unit, cuenta con 16 puertos digitales. Estos puertos digitales pueden utilizarse de entrada o de salida, es decir los puertos pueden recibir la señal de sensores o pulsadores trabajando como puertos de entrada, también pueden activar relés o triacs y ser usados como puertos de salida. Los puertos se pueden utilizar independientemente, agruparlos de 4 en 4 (Nibble), en bytes (8 puertos) o en un sólo grupo de 16 puertos.

El microcontrolador posee 8 puertos analógicos, con un convertidor análogo digital de 10 bits de resolución. También posee 3 puertos PLM, modulación por ancho de pulso, los cuales sirven para controlar por ejemplo un servo motor, puede ser utilizado también para dar tonos en diferentes frecuencias (conectado con un parlante). En el presente trabajo se ha utilizado un puerto de este tipo para controlar la velocidad del motor de giro de las paletas de mezcla, utilizando la modulación por ancho de pulso.

El C164CI, tiene la interfase para el Bus CAN y para el Bus 2W. La máxima distancia que soporta el bus CAN es de 1200 m.

El microcontrolador se alimenta con una fuente de tensión de 8 a 24 VDC y tiene un consumo de 90 mA de corriente, sus medidas son 82 x 60 mm y una altura máxima de 18 mm.

La figura 45 muestra el microcontrolador utilizado.



Figura 45: Microcontrolador

Este microcontrolador, se coloca en una tarjeta de aplicación, la cual nos permite acceder a los dispositivos del microcontrolador, como entradas/salidas, tanto analógicas como digitales, PWM, y todo lo necesario para desarrollar el sistema de control del reactor químico.

La figura 46, muestra la tarjeta de aplicación utilizada, donde se coloca el microcontrolador. Además podemos observar los conectores que salen de esta tarjeta hacia una tarjeta de interfase, la cual, sirve para

comunicarnos con las demás tarjetas acondicionadoras y de control de una manera sencilla.

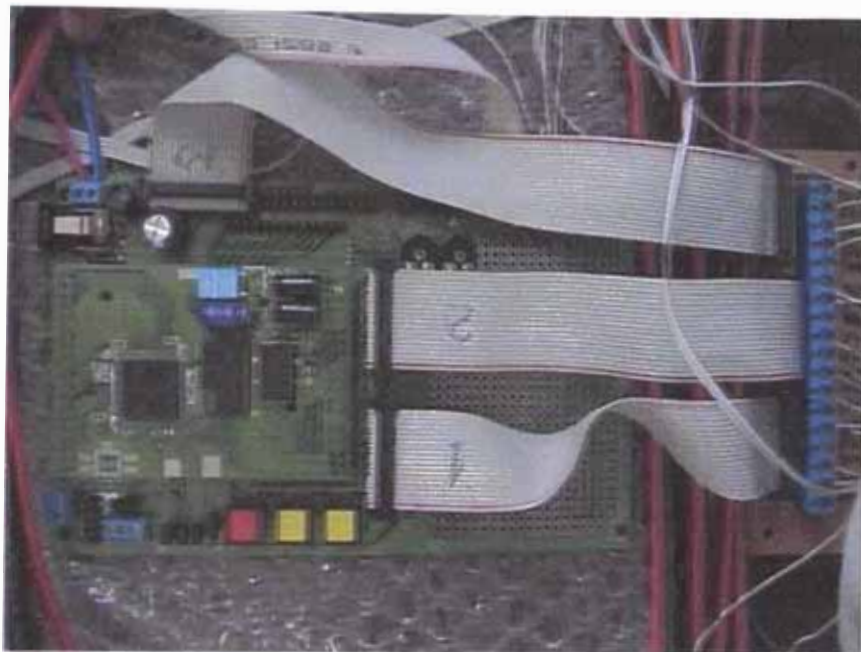


Figura 46: Tarjeta de Aplicación Microcontrolador

En la siguiente tabla se observa las entradas y salidas del microcontrolador utilizadas por el sistema.

Puerto	Función
02 Entradas Analógicas	Sensores de Temperatura
06 Salidas Digitales	Electroválvulas
02 Salidas Digitales	Resistencias Térmicas
02 Salidas Digitales	Inversión de Giro de paletas de agitación
01 PWM	Velocidad para las paletas de agitación
02 Salidas Digitales	Bomba de Agua y de Succión

7.8 COMPUTADORA

La computadora utilizada para el desarrollo del presente trabajo es una Pentium IV con 256 MB de Memoria RAM y una tarjeta de video de 64 MB, la computadora debe de tener la librería RSAPI.DLL instalada en el Sistema Operativo, que en este caso es Windows 2000, para el buen funcionamiento del Software EXSCADA y sobretodo para la comunicación por el puerto serial entre el Software Microsoft Excel y el microcontrolador.

Capítulo 8

PRUEBAS Y PUESTA EN MARCHA

En el presente capítulo se describe los problemas y soluciones, encontrados y aplicados durante el desarrollo y la implementación de la presente tesis, finalmente la puesta en marcha del sistema.

El desarrollo de la presente tesis en sus inicios se dividió en dos grandes áreas, desarrollo de Hardware y desarrollo de Software. Dentro de estas dos áreas se hizo una subdivisión la cual se explica a continuación.

Por Hardware se entiende el desarrollo (construcción) mecánica, eléctrica y electrónica del reactor químico y por Software a los programas desarrollados para la implementación del Sistema de control (en el microcontrolador y en la computadora - EXSCADA). A continuación describiremos los problemas encontrados en cada área durante el desarrollo de la presente tesis.

8.1 HARDWARE

El principal problema que se tuvo durante la realización de la tesis fue el costo que implica implementar un Reactor Químico de las características descritas en capítulos anteriores. En primer lugar se tuvo que decidir de qué capacidad debía ser el recipiente donde se realizará la fabricación de resinas fenólicas ya que cada prueba de fabricación del producto implica un gasto en insumos (componentes químicos), por lo que se decidió construir un reactor químico del tipo laboratorio, esta decisión no sólo fue por el lado económico sino también porque será un reactor de

investigación que ayudará a la industria química a realizar investigaciones en nuevos productos químicos.

En un primer momento se decidió que las tuberías (en acero inoxidable) del reactor químico fueran de $\frac{1}{2}$ ", sin embargo al averiguar el costo de las electroválvulas para ese tamaño resultaba demasiado elevado por lo que se cambió las tuberías a $\frac{1}{4}$ ", de esta manera se pudo adquirir las electroválvulas y colocarlas en el reactor químico. Ya que se decidió colocar electroválvulas de 24VDC (protección para el usuario), se debía diseñar un circuito que controle la apertura o cierre de las mismas desde el microcontrolador. El microcontrolador posee puertos digitales (0 – 5 VDC) por lo que se decidió colocar optoacopladores que sean activados por la señal digital y que entreguen un voltaje de 24 VDC (de otra fuente de voltaje para evitar interferencias en el programa de control) para controlar la posición de las electroválvulas. (Abierto/Cerrado)

Luego se debía adquirir los sensores de temperatura del tipo PT100, pero debíamos diseñar los acondicionadores de señal para que podamos leer la señal dada por el sensor (mili ohmios) y entregarla al microcontrolador en un tipo de señal con la que el pueda trabajar (voltios). Para realizar este acondicionador de señal se trabajó con el circuito integrado XTR105 de la marca Texas Instrument que es un transmisor de corriente de 4 a 20 mA. Este circuito integrado no se vende en el Perú por lo que se tuvo que importar. Se hicieron pruebas en laboratorio con el integrado, hasta diseñar un circuito óptimo que transforme la señal de ohmios, recibida por el sensor, en señal de voltaje. El circuito electrónico desarrollado posee etapas de protección contra sobrevoltaje ya que el integrado se puede dañar si recibe un voltaje elevado, también tiene un circuito que lo protege de sobrecorrientes o voltajes negativos. Una vez finalizada las pruebas de laboratorio se procedió a instalar el sensor PT100 en el acondicionador de señal y colocándolo a diferentes

temperaturas para observar el comportamiento del acondicionador, a través de un multímetro medimos el voltaje de salida del acondicionador, el cual fue diseñado de 0 a 4 VDC que es la señal que admite el microcontrolador, a pesar que el funcionamiento fue bueno, se colocó un circuito adicional que proteja al microcontrolador, es decir el acondicionador no entregará nunca un voltaje mayor a 4 VDC (haciendo uso de Diodos Zener) ni un voltaje negativo, ya que el puerto analógico del microcontrolador y por ende el mismo se dañaría.

El reactor posee unas paletas de agitación, las cuales son accionadas por un motor de corriente continua. En el desarrollo de la tarjeta para controlar el giro de este motor, se tuvo algunos inconvenientes por la cantidad de corriente que requería el motor, sin embargo haciendo modificaciones al circuito inicial se logró superarlos. Las modificaciones consistieron en hallar valores óptimos en las resistencias utilizadas. Ya que el usuario requiere controlar la velocidad de las paletas de agitación se debía controlar la PWM (Modulación por Ancho de Pulso) que alimente al motor, por lo que al diseño del Puente H que sirve para la inversión de giro, se le añadió esta señal. Finalmente se diseñó un circuito lógico con la finalidad de controlar la inversión de giro del motor y la velocidad del mismo a través de 2 señales digitales y 1 PWM. La PWM sirve para controlar la velocidad, una señal digital controla la inversión de giro del motor (1 – horario, 0 – anti horario) y la otra permite el funcionamiento de la tarjeta.

En el diseño de la tarjeta para controlar las resistencias térmicas se tuvo mucho cuidado en el cálculo de la corriente ya que de no tomar esas precauciones, la tarjeta diseñada podría dañarse (levantamiento de pistas por sobrecalentamiento debido al exceso de corriente), esta tarjeta fue diseñada haciendo uso de TRIACs ya que las resistencias se alimentan con 220 VAC. La misma precaución se debió tomar para el diseño de la

tarjeta que controlaría las bombas de agua y succión, la cual fue desarrollada haciendo uso de Relés.

Finalmente todas las tarjetas fueron instaladas debidamente dentro de una caja cuidando que no se topen entre sí ya que podría ocasionar un corto circuito y dañar todo el sistema. La caja donde se ubican las tarjetas se comunica con el sistema de control programado en la computadora a través de un puerto serial y con los sensores y actuadores del reactor químico a través de conectores instalados en las paredes de la caja, con la finalidad de tener una fácil instalación de todo el sistema de control. Así mismo si se decide mover el reactor químico o instalarlo en otra ubicación, solo se debe desconectar los sensores y actuadores de la caja de control y el cable de comunicación de la computadora y el sistema queda totalmente aislado. Con la misma finalidad la alimentación de todo el sistema se realiza por medio de conectores. Es importante mencionar que la instalación de los conectores (hembras y machos) se realizó tomando en cuenta que los pines que queden expuestos no tengan voltaje alguno, para de esta manera proteger al usuario.

Un detalle importante de mencionar es que el lugar donde se instale el reactor químico debe tener una llave térmica de 15 A instalada especialmente para el uso del mismo ya que las resistencias térmicas consumen una corriente elevada y no pueden trabajar directamente en un tomacorriente convencional. En el laboratorio donde se realizó toda la investigación se instaló una llave térmica directamente de la llave principal, y así no correr riesgos de sobrecalentamiento del cableado del local.

La figura 47 muestra la instalación final de las tarjetas electrónicas y el microcontrolador, además se puede apreciar la llave térmica de protección instalada para las conexiones a 220 VAC. Se aprecia también

los conectores instalados para la comunicación tanto con la computadora, como con los dispositivos instalados en el reactor químico (sensores y actuadores).



Figura 47: Instalación Final Tarjetas Electrónicas y Microcontrolador

8.2 SOFTWARE

En esta parte se describirán los programas realizados en el microcontrolador y en la computadora (Software EXSCADA).

En el capítulo 6, se mostró los diversos diagramas de flujo donde se explican las funciones programadas en el microcontrolador para el funcionamiento de los dispositivos (sensores y actuadores) del reactor químico. En este capítulo se pondrá énfasis a la programación del control de temperatura con setpoint fijo y variable, la programación de la receta por parte del usuario y además cómo se implementó la etapa de autosintonía para determinar los parámetros PID del controlador. Asimismo, se explica la forma de utilizar el programa EXSCADA.

Tal como se describió en el capítulo anterior, el Software EXSCADA está dividido en dos partes, el Test del Sistema y el Control propiamente dicho. La finalidad de realizar un programa denominado Test es la de, como su nombre lo indica, testear el buen funcionamiento de todos los dispositivos del sistema y además hacer pruebas para que cuando se realice el programa de control no hayan inconvenientes. La figura 48 muestra el uso del software EXSCADA en el Menú Test, en este caso el usuario desea aperturar la electroválvula correspondiente al sistema de enfriamiento (parte interna del reactor) para enfriar al sistema por lo que también ha presionado el botón **Encender** correspondiente a la bomba de Agua. Además el usuario puede disponer que las paletas de agitación se muevan en sentido horario o antihorario, fijando la velocidad a la que se debe mover el motor, en este caso ingresa 300 RPM y presiona sentido horario. Adicionalmente el usuario desea monitorear la temperatura en el interior del reactor y en la parte superior del condensador de reflujo por lo que presiona el botón **Medir** de la sección Temperaturas.

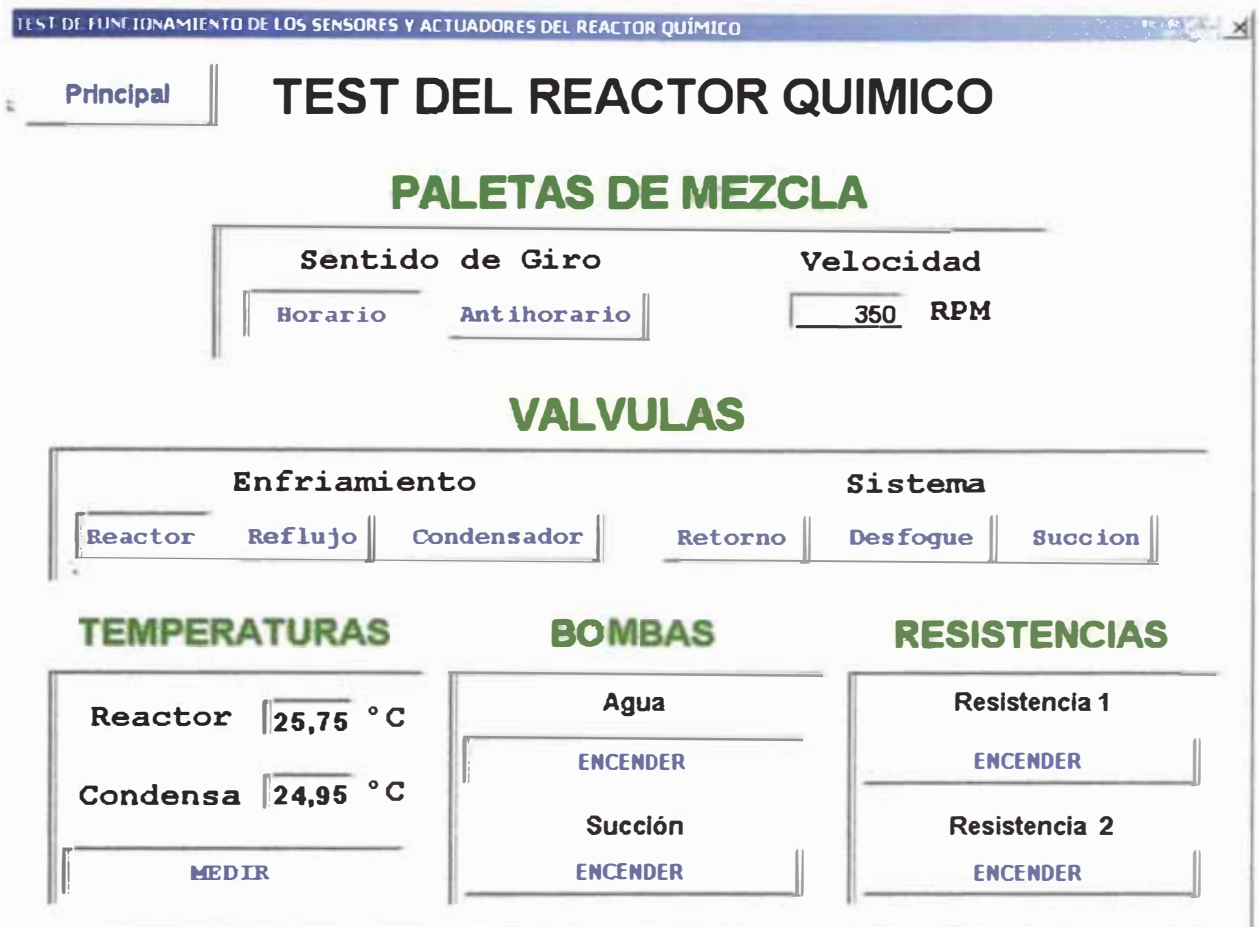


Figura 48: Uso del Menú Test Software SCADA

Luego de explicar el uso del Menú Test, se explicará ahora con detalle el uso del Menú Control del Software EXSCADA, así como la comunicación con el programa del Microcontrolador.

El Menú Control, está dividido en 4 partes, las cuales se explican a continuación:

Autosintonía.- En el capítulo 2 se explicó un nuevo método desarrollado por los investigadores de la empresa alemana PMA Prozeß- und Maschinen-Automation GmbH para obtener de una manera sencilla y rápida los parámetros PID a través del método PMA Tune. Aquí es donde se implementa el algoritmo para obtener los parámetros PID dependiendo del producto introducido en el reactor. Para esto, se debe colocar el

producto en el interior del recipiente y luego realizar dos curvas de temperatura, una de calentamiento y otra de enfriamiento. Con estas curvas se obtendrán los valores de T_u (tiempo de retardo) y de V_{max} (pendiente), con los cuales se podrán determinar los parámetros requeridos de acuerdo al tipo de control a implementar. A continuación se mostrarán figuras que describen el uso del Software EXSCADA para encontrar los parámetros requeridos para el control determinado.

La figura 49 muestra la pantalla del Menú Control:

The screenshot shows the 'SISTEMA DE CONTROL' interface. At the top, there's a title bar 'AUTOMATIZACIÓN REACTOR QUIMICO' and a navigation bar with 'Principal' and 'Temperaturas' buttons. The main content is organized into four quadrants:

- AUTOSINTONIA:** Contains a 'Curva de Temperatura' button, 'Parámetros auxiliares de Control', and radio buttons for 'Calentamiento' and 'Enfriamiento'.
- TIPO DE CONTROL:** Features radio buttons for 'P', 'PI', 'PD', and 'PID'. Below them are input fields for 'k' (0), 'tu' (0), 'u0' (0), 'Pb' (0), 'ti' (0), and 'td' (0). There are also 'Parámetros' and 'Enviar' buttons, and a 'Guardar' button at the bottom.
- RECETA:** Displays a line graph with a y-axis from 40.00 to 60.00. Two curves (one blue, one red) show temperature profiles. A 'Crear Receta' button is located below the graph.
- CONTROL:** Includes radio buttons for 'Setpoint Fijo' and 'Receta'. A 'SetPoint' input field is set to '0 °C'. 'Modificar' and 'Ver' buttons are at the bottom.

Figura 49: Menú Sistema de Control

Una vez introducido el material en el interior del reactor, el usuario debe seleccionar “Calentamiento” o “Enfriamiento” de acuerdo a la curva que desea graficar, y luego presionar el botón **Curva de Temperatura**. Una vez que el usuario ha presionado este botón aparece la siguiente pantalla:

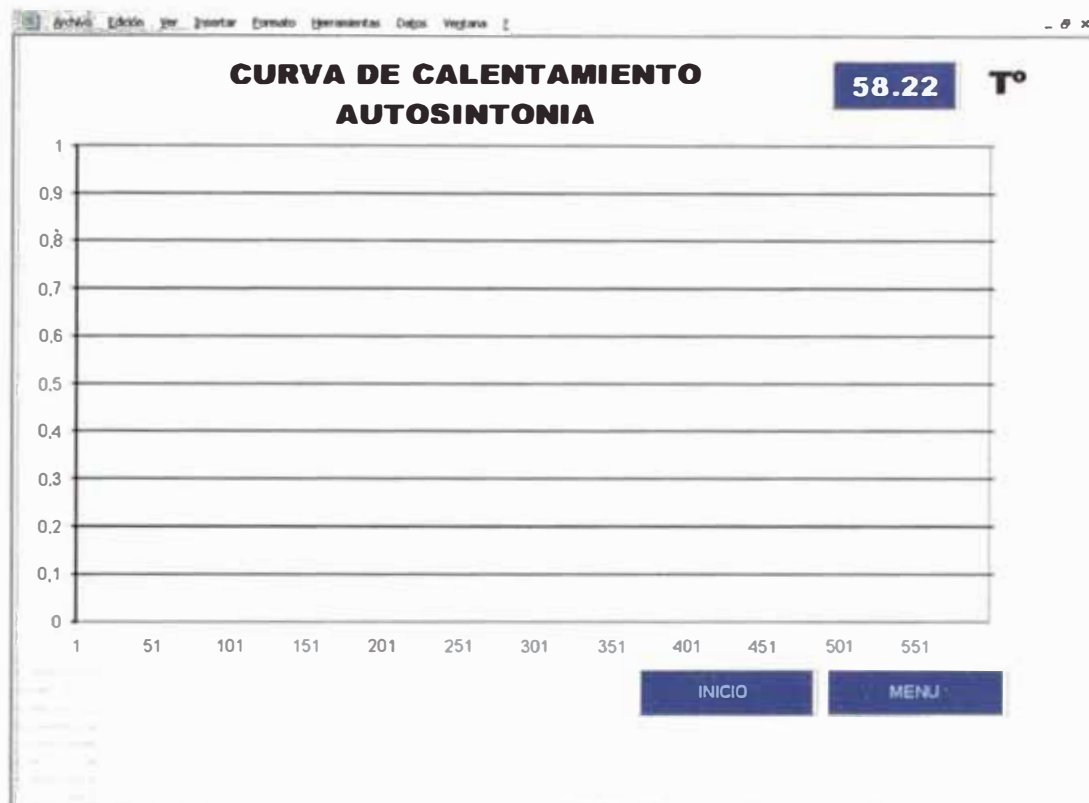


Figura 50: Curva de Temperatura

Al presionar el botón **Inicio**, el Software se comunica con el Microcontrolador, quien luego de encender la resistencia (en caso sea una curva de calentamiento) o de activar la bomba de agua con la electroválvula correspondiente (curva de enfriamiento), envía cada segundo la temperatura sensada en el interior del recipiente, el Software recibe esta información y la almacena en celdas en el software Excel y grafica estos datos, formando las curvas de temperatura. Las figuras 51 y 52 muestran las curvas obtenidas haciendo uso de los programas luego de introducir 1 galón de agua en el recipiente.

Luego de obtener las curvas de temperatura se procede a calcular el T_u y la pendiente de la curva para ambos casos, de esta manera podemos hallar el parámetro K con el cual haciendo uso de las ecuaciones dadas por PMA hallaremos los parámetros dependiendo del control a implementar.

$$K = V_{\max} * T_u$$

Controlador	Pb	Td	ti
PID	$1,7 * K$	$2 * T_u$	$2 * T_u$
PD	$0,5 * K$	T_u	OFF
PI	$2,6 * K$	OFF	$6 * T_u$
P	K	OFF	OFF

La figura 53 muestra la curva de temperatura y los valores que debemos determinar para hallar K .

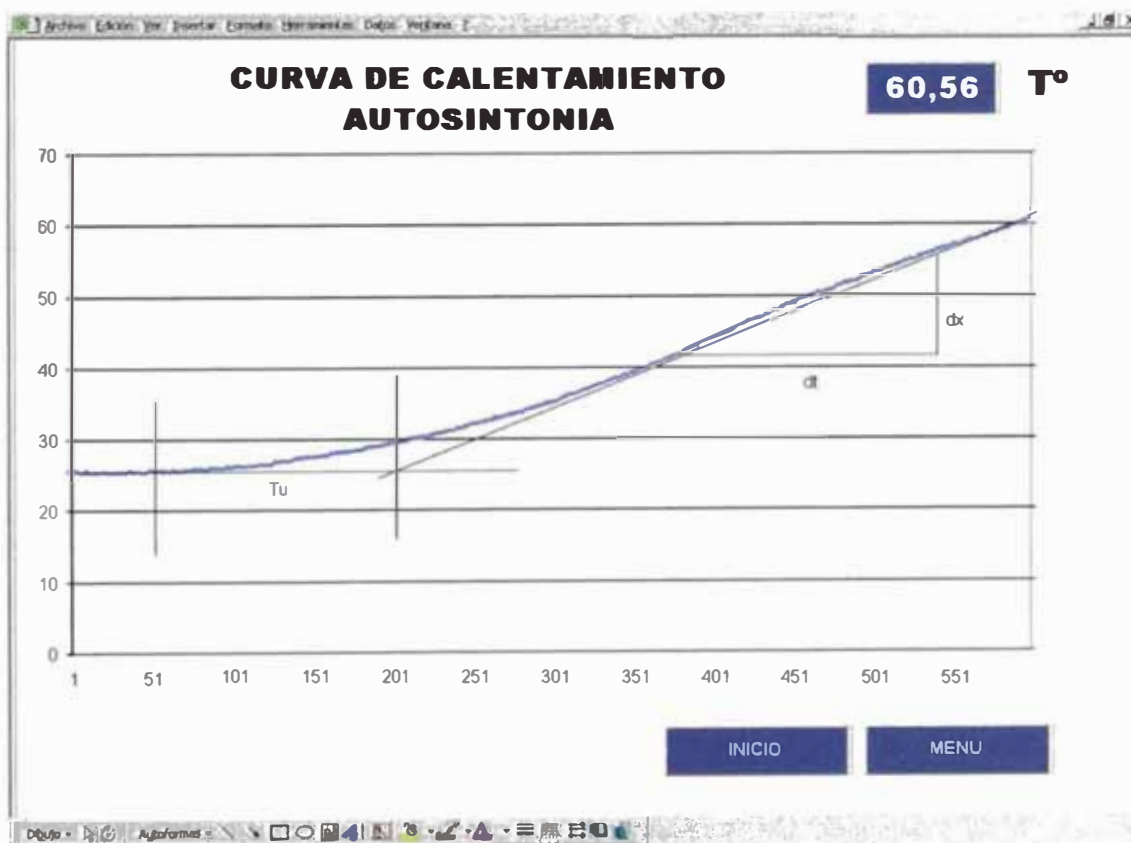


Figura 53: Curva de Temperatura Calentamiento $T_u - dx/dt$

Una vez que obtenemos las curvas debemos regresar al Menu de Control presionando el botón **Menú**.

Luego se debe presionar el botón **Parámetros auxiliares de Control**, para obtener K y Tu.



Figura 54: Parámetros auxiliares k – Tu (1 galón de agua) Calentamiento



Figura 55: Parámetros auxiliares $k - T_u$ (1 galón de agua) Enfriamiento

Después que se obtiene estos parámetros se selecciona el control a implementar (en este caso seleccionamos Control PID) y presionamos el botón **Parámetros** para obtener los Parámetros para el Controlador. Luego se deben enviar estos parámetros al microcontrolador por lo que el usuario debe presionar el botón **Enviar**. Las siguientes figuras muestran los parámetros obtenidos para ambos casos (calentamiento y enfriamiento).

Adicionalmente el usuario puede grabar los parámetros encontrados y a la vez seleccionarlos de la lista cuando desee cambiar de parámetros en el controlador. La figura 58 muestra la lista de los parámetros grabados.



Figura 58: Lista de parámetros almacenados en el Software

Hasta ahora se ha descrito el uso del Software para la obtención de parámetros auxiliares, los mismos que sirven para obtener los parámetros PID de acuerdo al control a implementar. A continuación se explica el funcionamiento del Software para el control de temperatura propiamente dicho y la programación de la receta por el usuario.

El usuario puede definir entre realizar un control de temperatura con setpoint fijo sin controlar el funcionamiento de los dispositivos del

reactor (electroválvulas, condensadores, bombas, paletas de agitación), o realizar una programación completa de temperatura y dispositivos, donde él mismo puede configurar una "Receta".

Si el usuario desea controlar solo a una temperatura determinada, debe seleccionar "Setpoint Fijo", presionar el botón **Modificar** y colocar la temperatura a la que se desea controlar en el Menú Control del EXSCADA. En la figura 59 se ingresa un valor de temperatura de 85°C como ejemplo.

The screenshot displays the 'SISTEMA DE CONTROL' interface for a chemical reactor. The window title is 'AUTOMATIZACIÓN REACTOR QUIMICO'. The interface is divided into four main sections:

- AUTOSINTONIA:** Contains a 'Curva de Temperatura' button and 'Parámetros auxillares de Control' with radio buttons for 'Calentamiento' and 'Enfriamiento'.
- TIPO DE CONTROL:** Shows control type selection (P, PI, PD, PID) with 'Parámetros' and 'Enviar' buttons. It includes input fields for Pb (0), ti (0), td (0), k (0), tu (0), and u0 (0), along with a 'Guardar' button.
- RECETA:** Features a line graph showing temperature profiles over time with a 'Crear Receta' button.
- CONTROL:** Shows 'Setpoint Fijo' selected with a 'SetPoint' input field containing '85 °C' and buttons for 'Modificar' and 'Ver'.

Figura 59: Ingreso de Temperatura para Control a Setpoint Fijo

Luego de ingresar la temperatura deseada, el usuario debe presionar el botón **Ver** y aparecerá la siguiente pantalla:

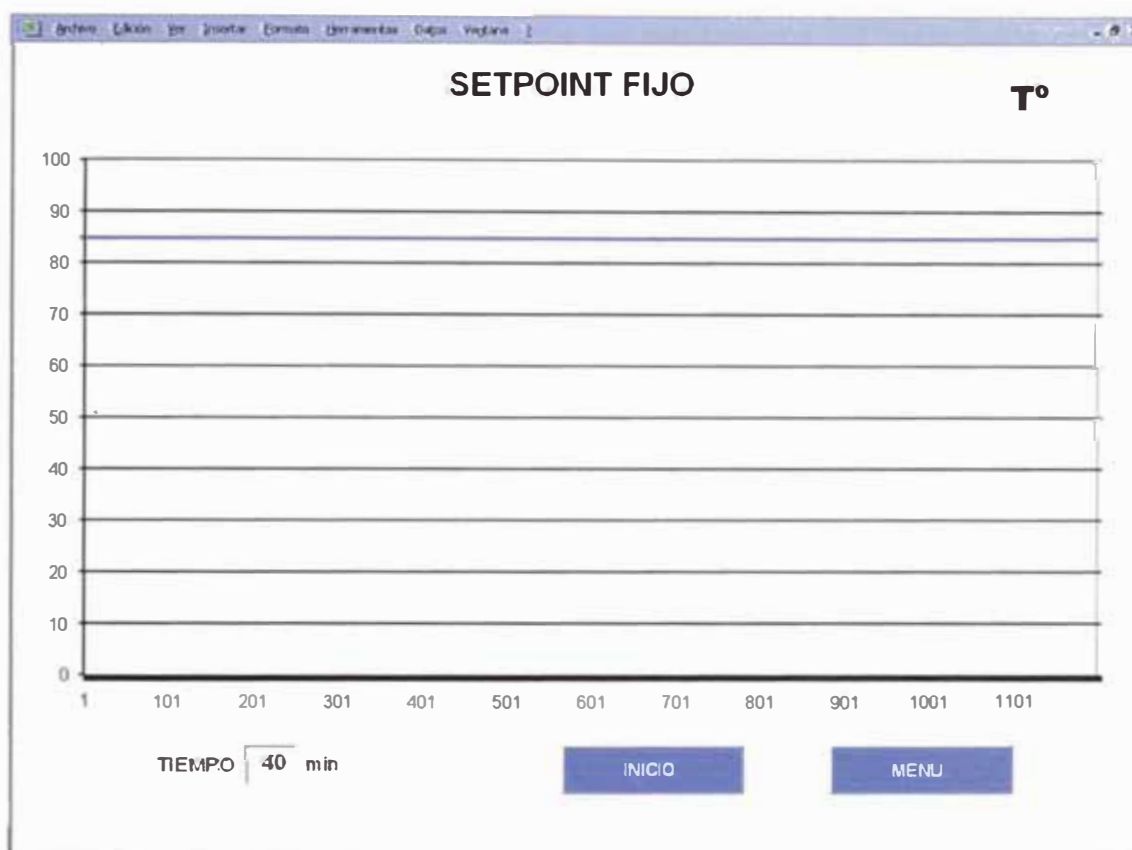


Figura 60: Control de Temperatura Setpoint Fijo

Para iniciar el control, el usuario presiona el botón **Inicio** y el sistema se comunica a través del puerto serial con el microcontrolador y a la vez con el reactor químico, encendiendo las resistencias y realizando el control PID de temperatura durante el tiempo que el usuario desee. El tiempo lo ingresa en el cuadro de texto Tiempo ubicado en la parte inferior izquierda de la pantalla anteriormente mostrada.

Durante la ejecución de la presente tesis, se han realizado diversas pruebas para comprobar el buen funcionamiento del control de temperatura con setpoint fijo, es decir, verificar si los parámetros PID hallados por el método PMA Tune son válidos para realizar un buen control. En la figura 61 se observa un control de temperatura con un

setpoint de 85° C durante un lapso de 40 minutos, la línea azul es la temperatura deseada y la línea roja es la temperatura sensada en el interior del reactor. En esta experiencia colocamos 2 galones de agua para lo cual enviamos al controlador los parámetros PID obtenidos con la curva de temperatura correspondiente.

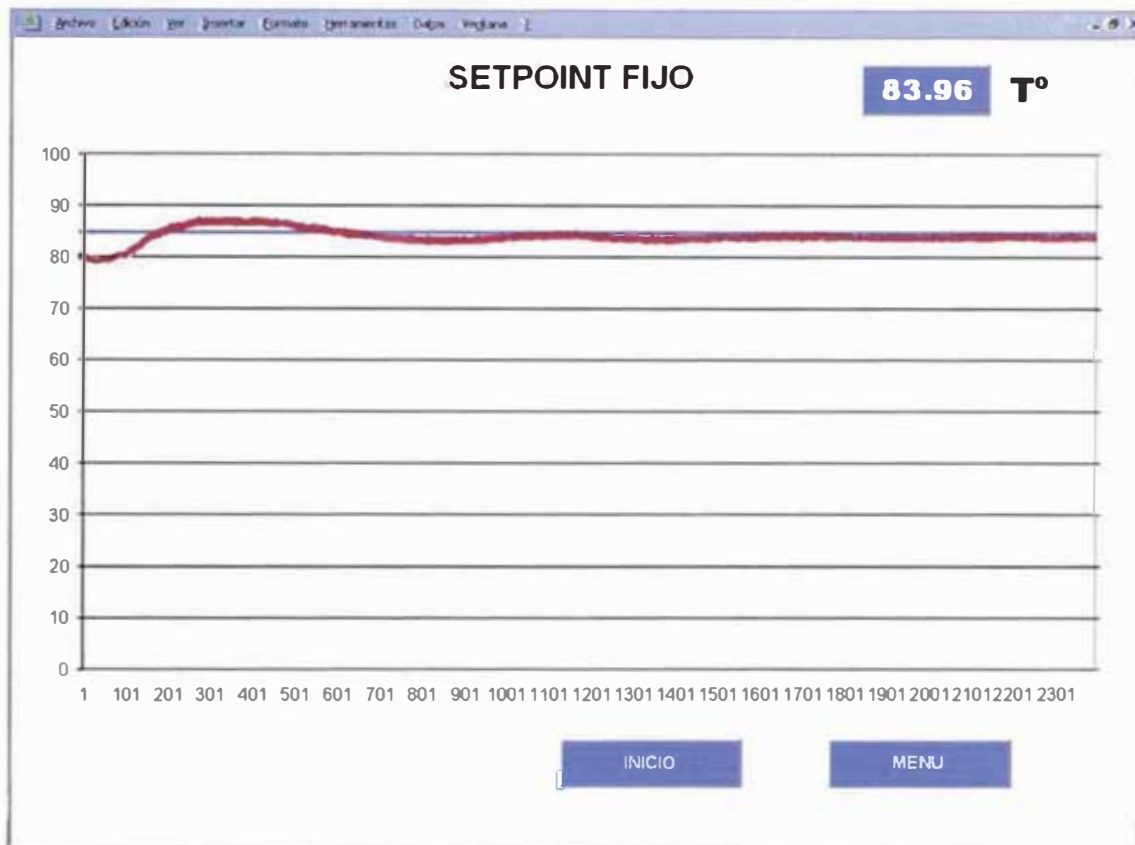


Figura 61: Control de Temperatura Setpoint Fijo 85° C

Si el usuario desea realizar un control completo, tanto de temperatura variable como de encendido y apagado de dispositivos adicionales del reactor químico, en la pantalla presentada en la figura 59 debe seleccionar Receta, presionar el botón **Modificar** y presionar el botón **Crear Receta**. Una vez presionado este botón, el sistema mostrará la pantalla como se observa en la figura 62.

Se puede observar en esta pantalla que el usuario tiene la opción de ingresar hasta 16 rangos de temperatura diferentes, ingresando la temperatura inicial, final y el tiempo de duración de la misma, creando curvas con pendiente positiva, negativa o dejando la temperatura constante el tiempo deseado. Adicionalmente en esta pantalla el usuario tiene la opción de encender y apagar cualquier dispositivo hasta 8 veces, para ello debe ingresar el minuto en el que desea que se encienda algún dispositivo (paletas de agitación, condensador de reflujo, condensador o la bomba de succión). El sistema se comunica con el microcontrolador enviando todos los datos necesarios, tiempos de encendido y apagado de los dispositivos y luego ingresa a un lazo donde el control, propiamente dicho de temperatura, se realiza cada segundo, sin embargo, el envío de la temperatura deseada y la gráfica de la temperatura obtenida se realiza cada minuto.



Figura 62: Pantalla para la creación de la "Receta"

En la figura 63 se observa la pantalla de creación de Receta con una receta diseñada en una de las experiencias realizadas durante el trabajo. En el interior del recipiente colocamos 1 galón de agua y controlamos la temperatura y dispositivos de la siguiente manera:



Figura 63: Creación de "Receta" Prueba

Se observa en la figura que el motor de las paletas de agitación se encenderá en el minuto 10, en el minuto 20 y en el minuto 30, por un tiempo de 5 minutos. El condensador de reflujo estará encendido los 10 primeros minutos y el condensador horizontal estará funcionando 40 minutos a partir del minuto 26. La bomba de succión se activará por 3 minutos cuando se inicie el proceso y también los últimos 5 minutos.

Una vez que el usuario haya definido la “receta”, debe presionar el botón **Gráfica** para visualizar la curva de temperatura que ha programado. La figura 64 muestra la gráfica.



Figura 64: Curva de Temperatura creada por la “Receta”

Una vez que el usuario verifica que la curva de temperatura es la deseada y decide comenzar el proceso, debe presionar el botón **Inicio**, de esta manera el control de temperatura se inicia, abriendo o cerrando, encendiendo ó apagando los dispositivos adicionales en los tiempos programados.

Al finalizar el tiempo de producción, la curva obtenida por el controlador es la que se observa en la figura 65 en color rojo, se puede notar que el algoritmo desarrollado logra controlar la temperatura satisfactoriamente.



Figura 65: Control de Temperatura - "Receta"

Uno de los objetivos de la tesis también fue el de producir resina fenólica en el reactor automatizado, por lo que en la figura 66 se presenta la receta realizada para la producción de esta resina. En el capítulo 5 del presente trabajo se explica como se produce este tipo de resina y se da las pautas para su producción.

Como se observa en la figura, el proceso dura 90 minutos para 1 galón de producto. En los 10 primeros minutos la temperatura se mantiene constante ya que se van ingresando las materias primas al reactor, (fenol, formol y ácido clorhídrico), y se pone en movimiento las paletas de agitación, luego se cierra el recipiente y se inicia la siguiente etapa, la de calentamiento de la mezcla, aquí es cuando se debe de encender el condensador de reflujo para mantener la proporción de la mezcla, ya que cuando calienta algunos gases de la reacción (los más volátiles) se van escapando del recipiente. Luego se procede a la etapa

de condensación a temperatura constante, la mezcla se debe mantener a 80° C de temperatura por un lapso de 35 minutos con el condensador horizontal encendido, aquí ya los gases más volátiles se pueden escapar, finalmente iniciamos la etapa de enfriamiento para la deshidratación, bajamos la temperatura del recipiente a 60° C a través del sistema de enfriamiento para luego mantenerla constante por un lapso de 20 minutos donde se enciende la bomba de vacío y se termina el proceso deshidratando el producto.

Si comparamos esta receta con la explicada en el capítulo 5, vemos que faltaría terminar el producto elevando la temperatura y realizando un tratamiento térmico final, sin embargo por recomendación del especialista en el área química, se debe culminar el producto en la etapa de deshidratación ya que esta resina luego servirá de materia prima para otros productos y es ahí donde recién culminará su proceso de fabricación.

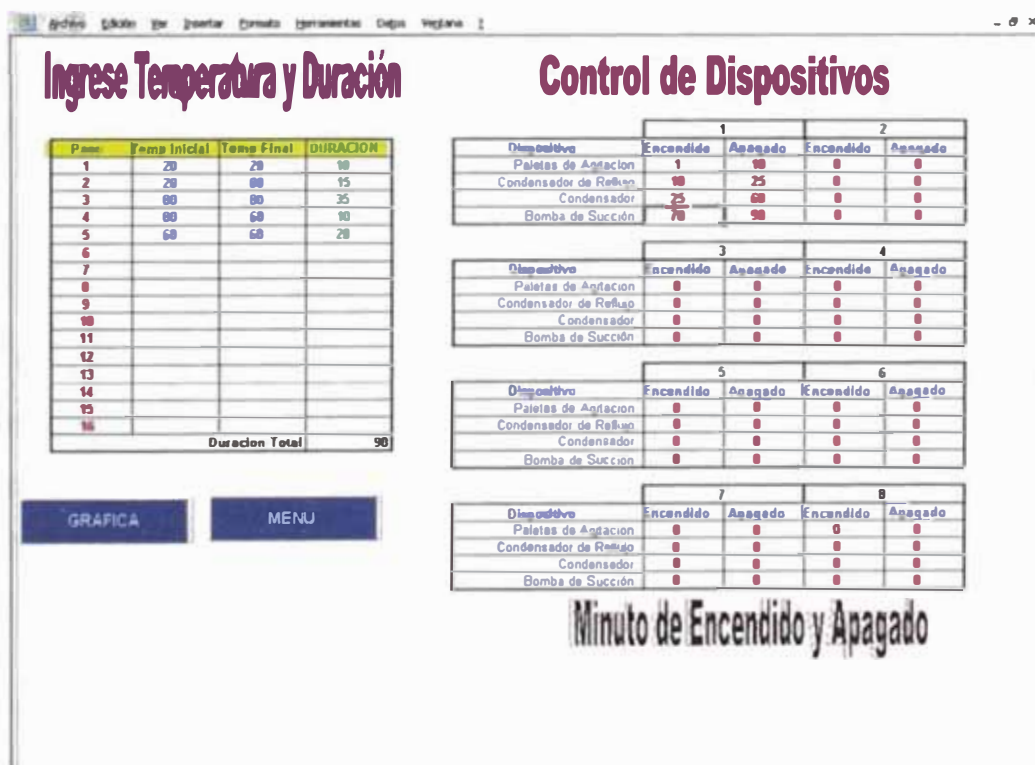


Figura 66: Receta Resina Fenólica

La figura 67 muestra la curva de temperatura y como se comportó el controlador durante el proceso. Cabe mencionar que para la realización de este proceso, antes se realizaron las curvas de temperatura, de calentamiento y enfriamiento, para calcular los parámetros PID que el controlador debió utilizar para controlar satisfactoriamente.



Figura 67: Control Temperatura Receta Resina Fenólica

Durante el tiempo de trabajo, se realizaron diferentes pruebas y gráficas para observar como respondía el controlador. A continuación se presentan algunos gráficos y diversas curvas de temperatura obtenidas cuando el trabajo se encontraba en desarrollo.

Luego de ingresar al controlador la ecuación correspondiente al control PID y llevarlo a la práctica, se decidió en primer lugar realizar solo un control de temperatura con un Setpoint fijo por lo que debíamos

ingresar parámetros de control, para esto fue que se desarrolló la autosintonía. Se realizaron varias curvas de temperatura hasta obtener las ya mostradas anteriormente, sin embargo la figura 68 muestra una curva donde se decidió encender la resistencia por 5 minutos, apagarla y luego encender el sistema de enfriamiento por el mismo tiempo.

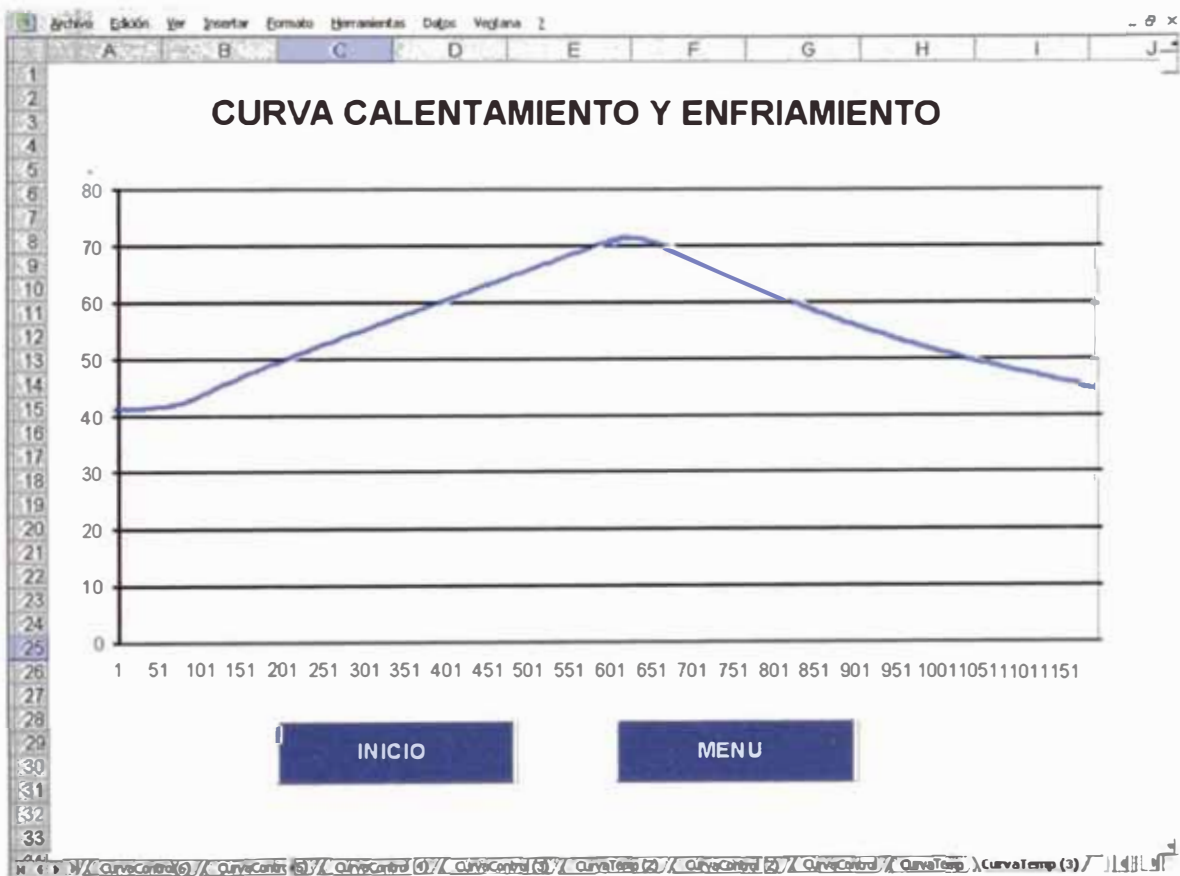


Figura 68: Curva de Calentamiento - Enfriamiento

Con esta curva obtenida hallamos los parámetros y los enviamos al controlador, luego decidimos colocar el setpoint a una temperatura de 50° C y se obtuvo lo siguiente:



Figura 69: Control Temperatura Setpoint Fijo

Con el resultado obtenido, se decidió investigar más sobre el método de autosintonía, realizar más curvas de temperatura para hallar parámetros que controlen de una mejor manera la temperatura en el interior del reactor. Luego de cambiar los parámetros se obtuvo la siguiente curva:



Figura 70: Control Temperatura Setpoint Fijo

Se observa que el control mejoró en el tiempo de respuesta pero todavía presenta algunas deficiencias. Luego de investigar sobre los parámetros de autosintonía se implementó el ya explicado en el capítulo 2 encontrando parámetros adecuados para un buen control. En la figura 61 se mostraron los resultados obtenidos con los nuevos parámetros.

Luego de obtener los parámetros adecuados y verificar el funcionamiento del algoritmo de control implementado, se decidió no ingresar una temperatura deseada fija (setpoint fijo), sino que sea variable, es decir se inició el desarrollo del algoritmo para obtener una curva de temperatura con setpoint variable, lo que anteriormente se denominó "Receta".

En el algoritmo la variación que se hizo fue que se debía enviar desde el sistema SCADA cada cierto tiempo la temperatura deseada al

microcontrolador para que este realice el proceso de control, se hicieron varias pruebas obteniendo algunos resultados como el que se observa en la figura 71.



Figura 71: Control Temperatura Setpoint Variable

Posteriormente se decidió realizar el control de temperatura cada segundo, sin embargo enviar la temperatura deseada de la PC al microcontrolador cada minuto, de igual manera recibir la temperatura sensada y graficarla en el mismo tiempo, obteniendo los resultados que se indican en la figura 72.



Figura 72: Control Temperatura Setpoint Variable

De esta manera se consiguieron resultados satisfactorios, por lo que con este algoritmo implementado se obtuvieron las gráficas 65 y 67.

Finalmente luego de verificar el buen funcionamiento del algoritmo programado, así como de los parámetros hallados e ingresados en la ecuación del controlador, se empezó a probar el sistema, tanto Hardware como Software; se hicieron algunas modificaciones para que el manejo del sistema sea sencillo a todos los usuarios, se realizaron algunos cambios en las pantallas del sistema EXSCADA y se agregaron nuevas funciones con la finalidad de dar al usuario un entorno amigable y sencillo durante el manejo del sistema.

Capítulo 9

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Tal como se menciona en los indicadores, se ha logrado cumplir cada uno de los objetivos específicos planteados al comenzar el proyecto y por lo tanto se ha cumplido también el objetivo general, el cual era diseñar e implementar un sistema de control para un reactor químico. Otro objetivo era la fabricación de resinas fenólicas haciendo uso de este sistema de control y del reactor químico, lo cual con el asesoramiento de un químico especialista en fabricación de resinas, se ha conseguido.

Se ha logrado construir un equipo con la mayor eficiencia y precisión posibles, ajustándose a las limitaciones económicas y técnicas propias de los componentes y partes utilizadas.

El reactor implementado, por su gran flexibilidad en la definición de las recetas y en su control, puede ser utilizado como un reactor de investigación en las entidades educativas y/o en los laboratorios de la industria.

En las entidades educativas, alumnos de ingeniería electrónica pueden desarrollar nuevos algoritmos de control e implementarlos en el mismo, de esta manera su trabajo no quedará en simulaciones sino que pueden poner en práctica lo aprendido. Alumnos de ingeniería química, pueden utilizar ya los programas implementados y definir nuevas recetas; y así probablemente, obtener productos químicos a bajo costo y porque no, nuevos productos.

En los laboratorios de la industria, el reactor sirve para investigar sobre nuevos productos o nuevas recetas con la finalidad de bajar costos y elevar la producción.

Por lo tanto se puede decir que el trabajo realizado ayudará en sobremanera tanto a la educación como a la industria nacional.

Finalmente, se concluye que el Perú se encuentra en condiciones de fabricar equipos automatizados, siguiendo estándares de calidad para la fabricación de productos que requieran un control óptimo, tanto en la industria química como en cualquiera que sea necesario un buen control.

Adicionalmente se puede mencionar, que la realización de este proyecto me ha dotado del conocimiento y del criterio necesario para poder realizar proyectos más complejos siguiendo los conceptos modernos de la automatización, como es el uso de una computadora personal apoyada por microcontroladores.

Propuestas para mejorar el reactor químico

Una forma de mejorar el reactor químico es la de cambiar el diámetro de todas las tuberías a $\frac{1}{2}$ ", de esta manera el sistema de enfriamiento sería más rápido por lo que se tendría un mejor control, además los condensadores trabajarían de una mejor manera y no se perdería proporción en la materia prima ingresada para alguna reacción. Al realizar este cambio, se debe obtener igualmente electroválvulas de $\frac{1}{2}$ " de diámetro.

Otra mejora es colocar una bomba de agua de mayor potencia para evitar que la misma se recaliente con el uso prolongado.

Adicionalmente a lo ya instalado en el reactor, se podría desarrollar e implementar dos sensores adicionales, un sensor de PH y un conductímetro, ambos útiles en el sector químico ya que haciendo uso de estos dos elementos adicionales, se puede monitorear el nivel de conductancia y el PH de la reacción producida, además se podría realizar un control de PH, utilizando ácidos y bases en recipientes con electroválvulas adicionales.

BIBLIOGRAFÍA

1. Strohrmann, Günther
Automatisierung verfahrenstechnischer Prozesse: Eine Einführung für Techniker und Ingenieure.
Oldenbourg – Industrieverlag, 2002, Deutschland
2. Schuler, Hans
Prozessführung.
Oldenbourg, 1999, Deutschland
3. Smith Carlos A. Y Armando B. Corripio
Principles and practice automatic process control. 2nd edition.
Jhon Wiley & Sons Inc., 1997, USA
4. Vargas, Mihaela
Resinas de policondensación – Compuestos Macromoleculares.
1989, Lima – Perú.
5. Ogata, K
Sistemas de Control en Tiempo Discreto
Prentice - Hall Hispanoamericana, 1996
6. Maia Seco, Ana Maria y Jacinto Nobre Urbano
Reactores Químicos I
Departamento de Engenharia Química
Instituto Superior de Engenharia de Lisboa