

**Universidad del Valle
de Guatemala**

Facultad de Ingeniería



**DISEÑO DE LA AUTOMATIZACIÓN DE UN REACTOR
SEMICONTINUO PARA LA PRODUCCIÓN
DE RESINAS DE BASE ALQUÍDICA**

Trabajo de graduación presentado por
Ana Cristina Guirola
para obtener el grado académico de
Licenciada en Ingeniería Química

Guatemala
2010

**DISEÑO DE LA AUTOMATIZACIÓN DE UN REACTOR
SEMICONTINUO PARA LA PRODUCCIÓN
DE RESINAS DE BASE ALQUÍDICA**

**Universidad del Valle
de Guatemala**

Facultad de Ingeniería

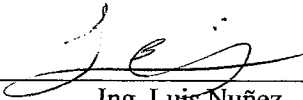


**DISEÑO DE LA AUTOMATIZACIÓN DE UN REACTOR
SEMICONTINUO PARA LA PRODUCCIÓN
DE RESINAS DE BASE ALQUÍDICA**

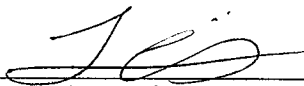
Trabajo de graduación presentado por
Ana Cristina Guirola
para obtener el grado académico de
Licenciada en Ingeniería Química

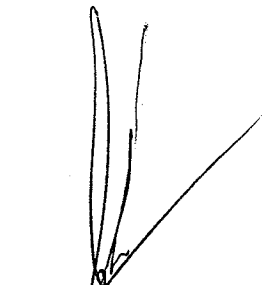
Guatemala
2010

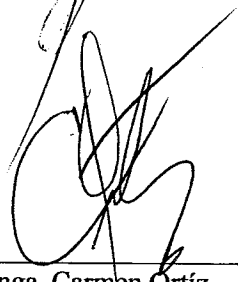
Vo. Bo.:

(f) 
Ing. Luis Nuñez

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Luis Nuñez

(f) 
Ing. Gamal El Zambrano

(f) 
Inga. Carmen Ortiz

Fecha de aprobación: Guatemala, 20 de enero de 2010

ÍNDICE

Lista de figuras	v
Lista de diagramas	vii
Lista de tablas	vii
Resumen	x
Abstract	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	3
A. Polímeros	3
1. Definición	3
2. Poliéster	4
3. Resina alquídica	5
4. Proceso de una resina alquídica	9
5. Aplicación de resina alquídica en pinturas sintéticas	11
B. Reactores	12
1. Balance de moles	12
2. Tipos y propiedades fundamentales de reactores	13
3. Transferencia de calor en reactores	21
C. Automatización	25
1. Medidores de flujo	25
2. Medidores de temperatura	31
3. Medidores de presión	39
4. Controlador lógico programable	41
III. JUSTIFICACIÓN	44
IV. OBJETIVOS	45
A. Generales	45
B. Específicos	45
V. PROBLEMA A RESOLVER	46
VI. METODOLOGÍA	47
VII. CRONOGRAMA	48
VII. RESULTADOS	49
VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	65
IX. CONCLUSIONES	69
X. RECOMENDACIONES	71
XI. BIBLIOGRAFÍA	72
XII. ANEXOS	74
A. Datos originales	74
B. Cálculos de muestra	76
C. Datos calculados	81

LISTA DE FIGURAS

1. Polimerización de estireno para formar poliestireno	3
2. Gráfico de predicción de enfriamiento	10
3. Diagrama de flujo para la producción de resinas alquídicas	11
4. CSTR con chaqueta	14
5. Reactores por lotes para reacciones en fase gaseosa	17
6. Reactor tubular adiabático	19
7. Enfriamiento con chaqueta	22
8. Enfriamiento con chaqueta a altas temperaturas	23
9. Intercambiador de calor externo	24
10. Intercambiador de calor externo con control de mezcla y cascada	24
11. Medidor de doble rango de Taylor Instruments Company	25
12. Esquema de conductividad de Republic Flow Meters Company	26
13. Medidor de reten de Foxboro Company	27
14. Medidor de disco oscilante	28
15. Medidor de pistón oscilante	28
16. Medidor de pistón alternativo	29
17. Medidor bi-rotor	30
18. Medidor oval	30
19. Dilatación de una barra	32
20. Efecto de dilatación por diferencia de coeficiente de dilatación	33
21. Termómetro bimetalico	34
22. Termo resistencias con elementos de inmersión	37
23. Termo resistencias tipo “Spring Loaded”	37
24. Termopozo recto	38
25. Termopozo cónico	38
26. Termopozo con reducción interna y/o externa	38
27. Esquematación de un PLC	43

28. Transmisor de temperatura 0-100°C marca DWYER	84
29. Transmisor de temperatura 0-400°C marca DWYER	84
30. Transmisor de temperatura 0-200°C marca DWYER	85
31. Transmisor de temperatura 0-850°C marca Laureate	85
32. Transmisor de humedad de 0-100% marca DWYER	86
33. Transductor de corriente de ± 90 A marca Honeywell	86
34. Sensor de nivel marca Rosemount	86
35. Switch de nivel marca Rosemount	87
36. Medidor de flujo volumétrico marca Krohne	87
37. Medidor de presión marca Rosemount	87
38. Switch de presión de 1.5-15 PSI marca ASHCROFT	88
39. Válvula de control de bola serie K marca Spirax Sarco	88
40. Válvula de control de bola serie Triad marca Flowtek	88
41. Válvula posición modulada serie K marca Spirax Sarco	89
42. Válvula de control de bola serie Triad marca Flowtek	89
43. Válvula posición modulada serie L marca Spirax Sarco	89
44. Válvula de control de bola serie Triad marca Flowtek	90
45. Válvula posición modulada serie K marca Spirax Sacro	90
46. Válvula de control de compuerta marca ESASEMACA	90
47. Módulo de salida análoga 16 canales marca Productivity 300	91
48. Módulo de entrada análoga 16 canales marca Productivity 300	91
49. Módulo de entrada digital 64 canales marca Productivity 300	91
50. Módulo de salida digital 16 canales marca Productivity 300	92
51. Controlador 50MB marca Productivity 300	92
52. Fuente de Poder 24-48 VDC marca Productivity 300	92
53. Base Módulos 11 modelos marca Productivity 300	93
54. Instrumentos de presión y campo de aplicación	102

LISTA DE DIAGRAMAS

1. Balance de masa y energía del sistema completo	50
2. Diagrama de bloque de caldera de aceite térmico	54
3. Diagrama de bloque de torre de enfriamiento	54
4. Diagrama de bloque de condensador	55
5. Diagrama de bloque de decantador	55
6. Diagrama de bloque de lavador de gases	56
7. Diagrama de bloque de tanque de dilución	56
8. Diagrama de bloque de funcionamiento de reactor	57
9. Diagrama de bloque de producto resina en reactor	57
10. Diagrama de flujo de proceso para la elaboración de resina de base alquídica	60
11. Diagrama de condiciones de operación y flujos de caldera	60
12. Diagrama de condiciones de operación y flujos de torre de enfriamiento	61
13. Diagrama de condiciones de operación y flujos de condensador	61
14. Diagrama de condiciones de operación y flujos de decantador	61
15. Diagrama de condiciones de operación y flujos de tanque de dilución	62
16. Diagrama de condiciones de operación y flujos de reactor resina	62
17. Diagrama de condiciones de operación y flujos de funcionamiento de reactor	63

LISTA DE TABLAS

1. Fluidos para termómetros de vidrio	32
2. Rangos de temperatura de sistemas más comunes	35
3. Ventajas y desventajas de termo resistencias	37
4. Tipos de manómetros y rangos de operación	40
5. Metodología	47
6. Cronograma de actividades	48

7.	Ruta de colores respecto a cada equipo	49
8.	Elenco de señales para equipos, instrumentos y válvulas utilizadas para el diseño de la automatización del reactor semicontínuo 1/3	50
9.	Elenco de señales para equipos, instrumentos y válvulas utilizadas para el diseño de la automatización del reactor semicontínuo 2/3	50
10.	Elenco de señales para equipos, instrumentos y válvulas utilizadas para el diseño de la automatización del reactor semicontínuo 3/3	51
11.	Lazos de control establecidos para el sistema automatizado.	51
12.	Kbytes estimados para el CPU del PLC en relación a las entradas y salidas análogas y digitales y los lazos de control.	52
13.	Entradas y salidas análogas y digitales disponibles para expansión	52
14.	Costo estimado para la automatización del reactor semicontínuo 1/2	52
15.	Costo estimado para la automatización del reactor semicontínuo 2/2	53
16.	Distribución porcentual de costos estimados para la automatización Del reactor semicontínuo.	53
17.	Cálculo de equipo y actuadores necesarios para llevar a cabo el proceso de una manera automática. Instrumentación.	63
18.	Cálculo de equipo y actuadores necesarios para llevar a cabo el proceso de una manera automática. válvulas	64
19.	Cálculo de equipo y actuadores necesarios para llevar a cabo el proceso de una manera automática. PLC	64
20.	Datos teóricos caldera de aceite térmico	74
21.	Datos estimados caldera de aceite térmico	74
22.	Datos teóricos torre de enfriamiento	74
23.	Datos estimados torre de enfriamiento	74
24.	Datos estimados condensador	75
25.	Datos estimados decantador	75
26.	Datos teóricos y datos estimados tanque de dilución	75
27.	Datos teóricos reactor	76
28.	Datos estimados reactor	76

29.	Datos calculados para condiciones de operación de caldera de aceite térmico	81
30.	Datos calculados para condiciones de operación de torre de enfriamiento	81
31.	Listado completo de equipo en el sistema del diseño para la automatización del reactor para la producción de resina de base alquídica. 1/2	82
32.	Listado completo de equipo en el sistema del diseño para la automatización del reactor para la producción de resina de base alquídica. 2/2	83
33.	Composición, rango de temperaturas, diámetros de alambre apropiado y fuerzas electromotrices (FEM) correspondientes a distintas termocuplas.	93
34.	Tolerancias de calibración para termocuplas estándar (referencia junta fría a 0°C) según IEC 584.	93
35.	Limitaciones ambientales de termocuplas (sin vainas o tubos protectores)	94
36.	Características de las termocuplas no estándar	94
37.	Costos de los materiales de vainas relativos al acero al carbono	95
38.	Límites de velocidad para vainas rectas y cónicas (vainas de diámetro interior de 1/4 pulgada y diámetro exterior de 3/4 pulgadas)	95
39.	Guía para la selección de tubos o vainas de protección parte 1	96
40.	Guía para la selección de tubos o vainas de protección parte 2	97
41.	Sensibilidades relativas de termistores, termorresistencias y termocuplas	98
42.	Características de los elementos mecánicos de presión	98
43.	Características de los transductores electromecánicos de presión	99

RESUMEN

Este Trabajo de investigación tiene por objetivo obtener el diseño de la automatización de un reactor de tipo Semibatch para la producción de resina Alquídica. Por lo tanto, se elaboró un diseño de arquitectura básica para poder cambiar el proceso por medio de un controlador programable.

El diseño de automatización constó de tres fases principales: se comenzó elaborando el balance de masa y energía del sistema involucrado en la producción de la resina Alquídica. Luego, se realizó una estimación de equipos y señales necesarias para la automatización. Finalmente, se determinó el costo total estimado para la automatización del Reactor Semibatch.

El diseño de automatización involucró la selección de Instrumentos de medición, válvulas automatizadas de control y el equipo necesario que incluye un controlador programable. Se seleccionaron instrumentos necesarios para la operación del reactor tales como medidores de flujo volumétrico y medidores de nivel. También se detectaron instrumentos auxiliares para determinar las condiciones óptimas de operación y para obtener el balance de masa y energía, tales como medidores de temperatura y humedad. Finalmente se delimitaron las señales necesarias de los instrumentos, válvulas y equipos en donde se obtuvieron 51 señales análogas, 60 señales digitales y 7 lazos de control.

Dado que no se puede obtener una curva teórica de las condiciones internas del reactor, tales como la curva de temperatura y viscosidad, se recomienda hacer un estudio de la cinética del reactor y de las constantes fisicoquímicas para saber detalladamente el avance en la eficiencia de la reacción.

ABSTRACT

The purpose of the following investigation is to obtain the design of the automatization of a Semibatch type reactor for the production of Alkyd resins. Therefore, a design of the basic architecture was developed to control the process through a programmable control.

The design of automatization consisted in three main phases: it started with the development of the mass and energy balance of the system involved in the production of Alkyd resins. Then, an estimate was made of the equipment and the necessary signals for the automatization. Finally, the total cost estimated for the automatization of the Semibatch Reactor was made.

The design of automatization involved the selection of instruments for measurement, automated control valves and the necessary equipment that includes the programmable control. The instruments that are necessary for the operation of the reactor were determined, such as volumetric flow and level meters. Also, the auxiliary instruments for calculating the optimal conditions and to obtain the mass and energy balance, such as temperature and humidity meters, were determined. Finally, the necessary signals from the instruments, valves and equipment where it garnered 51 analog signals, 60 digital signals and 7 control loops, were obtained.

Given that the theoretical curve of the internal conditions of the reactor, such as the temperature and viscosity curve, weren't obtained, it is recommended that a study of reactor kinetics and physicochemical constants is done to know in detail the progress in the efficiency of the reaction.

I. INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo, las industrias han ido avanzando no solo en productividad sino también en tecnología que permite que se tenga un mejor control en el proceso de producción. En la elaboración de pinturas, una de las materias principales utilizadas es la resina de base Alquídica. Ésta es producida por medio de un Reactor Semicontínuo. Los avances también permiten obtener una mayor exactitud en el proceso de producción, así como también, una mejor calidad del producto final.

Por medio de la automatización, se pueden obtener estudios importantes en cuanto a la productividad del proceso ya que el sistema puede mantener un control de cada lote de producción que se haga en el reactor, tomando en cuenta sus parámetros tales como viscosidad, temperatura y pH, haciendo una comparación con el parámetro estándar de la reacción.

Este trabajo de investigación tiene por objetivo obtener el diseño de la automatización de un reactor de tipo Semicontínuo para la producción de resina Alquídica. Por lo tanto, se elaboró un diseño de arquitectura básica para poder controlar el proceso por medio de un controlador programable.

La función principal de un controlador programable es reunir la información suficiente para poder tomar decisiones en cuanto al proceso de producción y para obtener la mayor eficiencia y productividad en el proceso. Para obtener esa información, se requiere en el diseño, conocer el proceso de producción, conocer el equipo involucrado en el proceso y conocer las condiciones y flujos de operación que se deseen obtener.

A continuación, presenta el diseño de la automatización de un Reactor Semicontínuo donde se produce resina Alquídica. Se comienza realizando un diagrama de bloques y un diagrama de flujo del proceso global. Luego se hacen los cálculos necesarios para obtener los flujos y las condiciones en las cuales se va a operar. Con ello, se obtiene entonces, el balance de masa y energía del reactor y de los equipos involucrados en el proceso.

Al ya tener el balance de masa y energía, se prosigue a realizar la estimación de equipos y de las señales a utilizar. Para ello, se llevan a cabo los cálculos de los equipos de detección y de los actuadores necesarios para llevar a cabo el proceso de una manera automática. Ya teniendo los cálculos necesarios, se diseña de la arquitectura básica de control para que el proceso pueda ser controlado por un PLC.

Finalmente, se realiza una estimación del costo de automatización para el sistema diseñado previamente. Para ello, se determinan las especificaciones de cada instrumento, válvula y equipo de controlador que se utilice y luego se obtiene el mejor precio a nivel Nacional e Internacional.

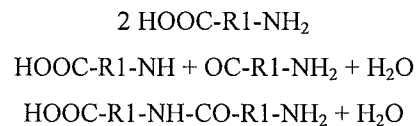
II. ANTECEDENTES

A. Polímeros

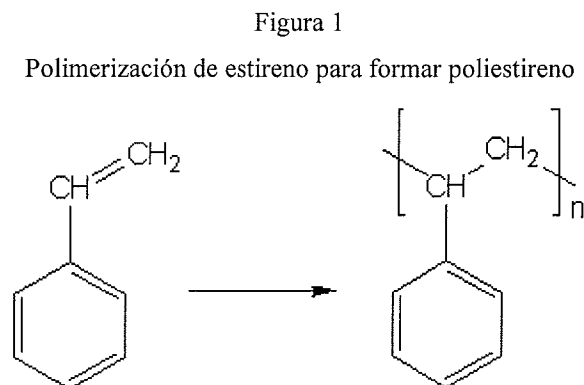
1. Definición de polímeros. Los polímeros se llegan a formar por la unión de moléculas pequeñas que se denominan monómeros las cuales llegan a formar una macromolécula. Por lo general, las macromoléculas son orgánicas. Cuando se sintetiza un polímero a partir de monómeros, la reacción se le llama polimerización. Hay dos clasificaciones de polimerización que son polimerización por pasos o polimerización en cadena, esto es dependiendo del mecanismo en la que se produzca la reacción. La temperatura o el tiempo de reacción, son parámetros que influyen en el tamaño de la cadena del polímero y en la masa molecular de la misma. (Young, 1991, Capítulo 1)

Cuando se da la polimerización en etapas, en otras palabras una condensación, se necesitan monómeros bifuncionales. Un ejemplo de una polimerización es polimerizar estireno para dar un poliestireno:

Al reaccionar HOOC-R1-NH_2 con si mismo se obtiene:



De aquí se obtiene la siguiente polimerización del estireno para dar un poliestireno donde n es el grado de polimerización. (Young, 1991, Capítulo 1)



Cuando los polímeros están formados por una única cadena de monómeros, se le denominan polímeros lineales. Pueden presentar ramificaciones de menor o mayor tamaño. Pueden haber entrecruzamientos que son provocados por enlaces entre átomos de distintas cadenas. Cada polímero presenta diferentes características que los diferencian. Estas características pueden ser la naturaleza química de los monómeros, la masa molecular y la estructura que presentan. Por lo tanto, cuando un polímero presenta encrustamiento, el material va a ser más difícil de fundir. (Young: 1991, Capítulo 1)

Dependiendo también del orden estereoquímica, un polímero puede variar en su tacticidad así como también, las propiedades de un polímero pueden verse modificadas severamente. Hay tres conformaciones de tacticidad que son el atáctico que no tiene un orden determinado, el isotáctico que tiene el mismo orden y, por último, el sidiotáctico que es de orden alternante. (Young, 1991, Capítulo 1)

Cuando el polímero proviene de un tipo único de monómero se le llama homopolímero. Cuando el polímero proviene de varios tipos de monómeros se le llama copolímero (heteropolímero). La polimerización mostrada en la Figura 7 de estireno es un ejemplo de homopolímero ya que proviene de un único tipo de monómero. (Young, 1991, Capítulo 1)

1. Poliéster. El poliéster es un polímero que tiene el grupo funcional éster en su cadena principal y que se obtiene por condensación de diácidos orgánicos con polialcoholes. Por lo general, un poliéster se refiere a poliésteres sintéticos o plásticos que provienen de fracciones pesadas de petróleo. (Young, 1991:18)

Los poliéster se utilizan en la industria de los plásticos par fabricar pinturas, barnices, fibras textiles y, armado con fibra de vidrio, en la obtención de materiales plásticas aptas para la construcción de carrocerías de automóviles y cascos de embarcaciones. La resina termoestable que la resina de poliéster son usadas para construcción de equipos, tuberías anticorrosivos y en la fabricación de pinturas. Se utiliza un catalizador sin purificar para endurecer y reforzarla. (Young, 1991:18)

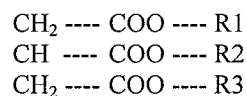
La esterificación de polialcoholes con diácidos orgánicos permite obtener poliésteres con eliminación de agua. Los productos que se utilizan son muy variados. Estos son los siguientes: ácidos saturados como el adípico, no saturados con el maleico o el fumárico, aromáticos como el ftálico, y alcoholes como el etilenglicol o la glicerina. Se comienza efectuando la condensación y posteriormente la adición, formándose largas cadenas tridimensionales hasta que la propia viscosidad del polímero obtenido impide la eliminación del agua, con lo que se paraliza la reacción. (Young, 1991:18)

Estas cadenas tridimensionales dan unas resinas muy empleadas como barnices por su gran adherencia y resistencia al agua. Admiten también como relleno materiales inertes como el caolín, el talco o la fibra de vidrio, con lo que se obtienen resinas de elevada resistencia mecánica y química, y que además son muy buenos aislantes eléctricos. Entre la reacción entre el etilenglicol y el ácido tereftálico se obtiene una fibra poliéster de propiedades muy parecidas a las de nailon y que se conoce como terylene, terlenka o tergal. (Young, 1991:18)

2. Resina alquídica. Las resinas alquídicas son poliésteres plastificados obtenidos por reacción de policondensación (esterificación) de ácidos polifuncionales (poliácidos) con alcoholes polihídricos (polioles), los cuales se modifican con monoácidos de cadena larga (C_8-C_{24}), normalmente del tipo de ácidos grasos que tienen por objeto impartir a la resina flexibilidad, solubilidad, en disolventes alifáticos, aromáticos y secamiento por oxidación. (Paton, 1962: 20-72)

Los cuatro grupos básicos e materias primas para las resinas alquídicas son:

a. Aceites y ácidos grasos: Los aceites usados en resinas alquídicas son materiales vegetales o de origen marino, químicamente son triglicéridos o sea compuestos de una molécula de glicerina y tres moléculas de ácidos grasos de larga cadena reemplazando los OH de la glicerina. Las grasas también son triglicéridos pero se diferencian de los aceites en que ellas son sólidas y los aceites son líquidos a temperatura ambiente. La estructura típica de la fórmula de un aceite puede ser la siguiente:



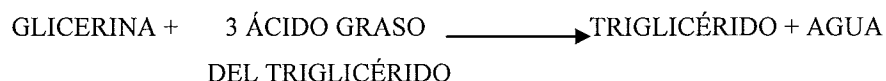
Donde R1, R2 y R3 son radicales que presentan ácidos grasos. (Paton, 1962: 20-72)

Los aceites se clasifican como secantes y no secantes. Esto se refiere a su habilidad para secar cuando se extiende en películas delgadas y expuestas a condiciones atmosféricas. El secamiento o cambio de líquido a una película sólida es debido a la reacción de oxidación por parte del oxígeno del aire. Esto trae como consecuencia la unión entre dos o más moléculas y produciendo estructuras poliméricas más complejas. (Paton, 1962: 20-72)

El grado de secado se relaciona con el tipo y cantidad de insaturación en las moléculas del aceite y representado por el índice del yodo, propiedad determinante en el momento de seleccionar el aceite para una resina adecuada al uso. Por otro lado, se utiliza el doble enlace si es conjugado o no. Por ejemplo, al

tener un aceite que tenga moléculas con dobles enlaces conjugados, secará 50% más rápido que uno que tenga el mismo grado de insaturación pero con dobles enlaces no conjugados. (Paton, 1962: 20-72)

El aceite es una mezcla de triglicéridos y estos triglicéridos son una molécula de glicerina con tres moléculas de ácido graso de cadena larga. La formación de un triglicérido se puede representar en la forma general como sigue:



En los triglicéridos así formados, los radicales R1, R2 y R3 son las cadenas de ácidos grasos que hacen diferente un aceite de otro y que lo caracterizan como secante o no secante. (Paton, 1962: 20-72)

Los aceites comerciales importantes se dividen en dos grupos que son:

- Aceites normales:
 - Aceite de linaza
 - Aceite de soya
 - Aceite de algodón
 - Aceite de coco
 - Aceite de cártamo

- Aceites especiales:
 - Aceite de tung
 - Aceite de oiticica
 - Aceite de castor
 - Aceite de castor deshidratado: DCO
 - Aceite de pesado

Los dos aceites importantes que se utilizan en la industria guatemalteca en la elaboración de pinturas son aceite de soya y aceite de TOFA. El aceite de soya se obtiene por los procesos convencionales de presión y extracción de solvente de la semilla de la glicina o soya hispida. Esta semilla contiene de 12% a 25% de aceite y según su composición e índice de insaturación. Se puede clasificar el aceite de soya como semisecante por lo que lo hace ser no recomendable usarlo solo sino en presencia de otros aceites secantes o resinas duras que permitan la formación de películas endurecibles. Tiene buena retención del

color, buena elasticidad y no amarilla además de ser usado en la industria de resinas es muy usado como producto alimenticio. (Paton, 1962: 20-72)

Otro aceite importante es el aceite de ácidos grasos (Ácidos Grasos Tall Oil TOFA) que es obtenido de árboles de pino; la madera de pino en forma de astillas es pasada por digestión con hidróxido de sodio y sulfito de sodio para separar fibras celulósicas por filtración y dando licor negro, de este licor negro por destilación se separa los ácidos y los ácidos grasos de Tall Oil. La composición del aceite es de 40 a 50% de ácido oleico, 40 a 45% de ácido linoleico y 5 a 10% de ácidos saturados. La composición hace que este aceite sea un producto secante útil en la fabricación de resinas alquídicas, ésteres epóxicos de secado al aire o al horno, aglomerante de tintas de imprenta, resinas uretano y resinas poliamida. (Paton, 1962: 20-72)

b. Polialcoholes: El punto esencial de los polialcoholes lo constituye el número de grupos hidrófilos potencialmente reactivos de su molécula o sea su funcionalidad, puesto que a mayor funcionalidad mayor viscosidad en las resinas, pero menos solubles, más duras, menos flexibles, menos compatibles con otros formadores de película pero de mayor secamiento. Los glicoles por ejemplo con dos funcionalidades producen polímeros lineales, no estructurales dando resinas blandas y flexibles para fines plastificantes. Se aumenta la reticulación de las macromoléculas por utilización de polialcoholes de mayor funcionalidad. (Paton, 1962: 20-72)

c. Poliácidos: Son fundamentales en la fabricación de resinas y derivan su nombre y grado de reactividad del número de grupos -COOH que conforman su estructura molecular. El más destacado de todos es anhídrido ftálico, material básico en la manufactura de resinas alquídicas. Algunas veces se incorpora alguna cantidad de anhídrido maléico para aumentar viscosidad y dureza. También se utilizan el ácido isoftálico, tereftálico, ácido fumárico, anhídrido trimetílico, etc. (Paton, 1962: 20-72)

d. Otros materiales modificantes: Dentro de éstos materiales están incluidos la colofonia, estireno, metil estireno, vinil tolueno, derivados fenólicos, ésteres acrílicos, silicones, epoxis, etc. (Paton, 1962: 20-72)

e. Solventes: Los disolventes se pueden definir como fluidos volátiles o mezclas de los mismos capaces de disolver o dispersar otras sustancias. Los disolventes no juegan un papel importante o determinante en una resina alquídica, su función está orientada a la pintura en sí, ya que proporciona a estas propiedades esenciales, como la viscosidad la cual tiene un punto crítico no solo para cada tipo de pintura sino para cada método de aplicación y dicha viscosidad depende del grado de solubilidad de las resinas en

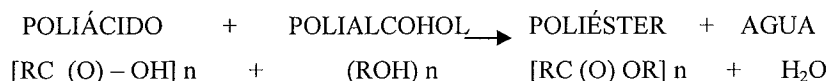
determinados disolventes. Además de la viscosidad otras propiedades controlables por los disolventes son: contenido de sólidos, peso específico, fluidez. También regula el secamiento, la nivelación, el brillo, la adherencia, continuidad y la resistencia química. Los disolventes se pueden clasificar desde muchos puntos de vista como son: su composición química, propiedades físicas, comportamiento, obtención, etc. (Paton, 1962: 20-72)

Hay cinco maneras de clasificar a las resinas alquídicas. (Paton, 1962: 20-72)

- Por composición
 - Alquid puro: Polímero formado únicamente por la combinación del anhídrido ftálico como diácido, glicerina o pentaeritritol como polioles y ácidos grasos saturados o insaturado como modificantes primarios. (Paton, 1962: 20-72)
 - Alquid modificado: Resina en la que su composición intervienen compuestos diferentes a los que participan en alquídicas puras, como ejemplo se tienen polioles y poliácidos especiales, monoácidos, compuestos fenólicos, epoxídicos, acrílicos, vinílicos, silicónicos, etc. (Paton, 1962: 20-72)
- Por la forma en que se presentan los ácidos grasos
 - Proceso vía ácido graso o aceite: el aporte de ácidos grasos, modificantes de la cadena poliéster puede provenir de aceites naturales, en este caso también se incorpora glicerina como componente del triglicérido o bien puede resultar del uso de ácidos grasos, como tales, naturales o sintéticos. En este proceso, se presentan dos tipos de subprocesos:
 - Proceso directo: Se utilizan ácidos grasos por lo que hace que la síntesis sea más sencilla y se realiza en una única etapa ya que no es necesario desdoblar el aceite. Por lo tanto, es una polimerización directa. (Paton, 1962: 20-72)
 - Proceso vía alcoholisis: Para este proceso se utilizan aceites naturales y es necesario para incorporarlo, transformarlo en un material capaz de intervenir en las reacciones de polimerización. (Paton, 1962: 20-72)
 - Procesos por tipo de aceite: Determinado por la composición en ácidos grasos de triglicéridos, en un proceso vía aceite o por el tipo de ácido graso, en un proceso vía ácido graso. Los ácidos grasos y aceites se clasifican en secantes, semisecantes y no secantes. (Paton, 1962: 20-72)
- Según tipo de aceite
 - Secantes: alto o medio porcentaje de insaturación.
 - No secantes: muy bajo o nulo porcentaje de insaturación.
 - Largo en aceite: es el tenor sobre resina sólida de poliglicérido (aceite) o del glicérido reconstituido (vía ácido graso).

- Contenido de diácido: es el contenido porcentual de diácido expresado sobre no los volátiles del sistema.
- Tipo de materias primas empeladas. (Paton, 1962: 20-72)
- Según cantidad de aceite en la resina:
 - Corta: 30 a 45% de aceite.
 - Media: 45 a 60%
 - Larga: 60 a 85% de aceite.
- De acuerdo a su proceso de producción empleado en su manufactura.
 - Proceso por Fusión: Las materias primas se procesan a altas temperaturas en estado de fusión que se da por calentamiento directo.
 - Proceso por Solventes: La reacción es producida por la presencia de solventes que actúan promoviendo las reacciones de polimerización y regulando la viscosidad del medio.

Las resinas alquídicas químicamente se rigen por las reacciones de policondensación de los poliésteres, o sea una condensación de grupos carboxílicos con grupos hidroxílicos con desprendimiento de agua y formación de un éster. (Paton, 1962: 20-72)



Sin embargo, los ésteres que sirven para la constitución de las resinas alquídicas, son más complejos ya que se utilizan poliácidos de alta funcionalidad, anhídrido ftálico, y sobre todo, polialcoholes, glicerina, pentaritról además de las modificaciones con aceites y/o ácidos grasos. (Paton, 1962: 20-72)

La estructura química de estas resinas es diferente si se usa aceite o ácido graso. Al utilizar aceite es necesario una etapa inicial de alcoholisis en la cual el aceite reacciona con la glicerina dando un monoglicérido apto para una esterificación con el anhídrido ftálico, mientras que con el ácido graso se fabrican por esterificación directa. (Paton, 1962: 20-72)

3. Proceso de una resina alquídica. Las resinas alquídicas se procesan en recipientes de acero inoxidable, de capacidad entre 2000 a 15000 kilos, calentados con aceite puesto que de esta manera se logra un mejor control de la temperatura, debe procesarse a una razón predeterminada y cuidadosamente controlada para evitar sobre-polimerizaciones. La agitación debe ser buena y turbulenta para mezclar los materiales que entran en la reacción. Para proteger el color de la resina se inyecta CO₂ o gas inerte para

promover la salida del agua de reacción. Las tandas hechas puede duplicarse si se hace uso de tanques diluidotes provistos de agitador. (Paton, 1962: 20-72)

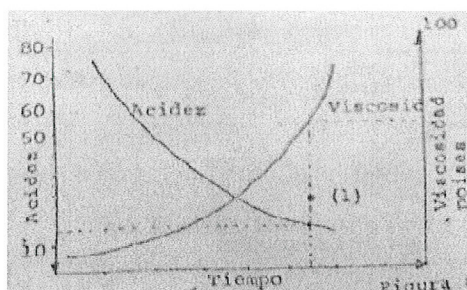
Dentro del proceso de resina alquídica, se deben considerar dos procesos importantes que son los siguientes:

a. Proceso de Monoglicérido-Esterificación: Es necesario que cuando se trabaje con un aceite sea convertido en un monoglicérido, con grupos OH que reaccionan con los ácidos del anhídrido. Se carga el aceite con el polialcohol y se calienta a temperatura de 230 a 260°C. En presencia de un catalizador básico como litargilio, hidróxido de litio, colocando enfriamiento en el condensador vertical para evitar pérdida de materiales. El punto final de alcoholisis se chequea mediante solubilidad de la mezcla con metanol. Cuando la alcoholisis es positiva entonces se enfría la mezcla monoglicérida a temperaturas entre 106 a 180°C y se agrega la otra parte de materiales como alcohol faltante y anhídrido ftálico, calentándose nuevamente a temperaturas de 240 a 260°C para eterificar. En esta etapa se quita el enfriamiento del condensador vertical y se coloca en el condensador horizontal donde se condensa el agua y el solvente de reflujo. Éstos reciben en el separador donde se separa el solvente de reflujo que va a pasar por la línea de retorno de solvente al reactor para ayudar a remover el agua el cual se descarta por la zona de descarga de agua. (Paton, 1962: 20-72)

El punto final de la resina se determina mediante chequeos de viscosidad y acidez los cuales graficados en papel semi-logarítmico ayudan a predecir cuando es necesario enfriar la resina. La siguiente Figura muestra la gráfica utilizada para la predicción de enfriamiento de la resina. (Paton, 1962: 20-72)

Figura 2

Predicción de enfriamiento



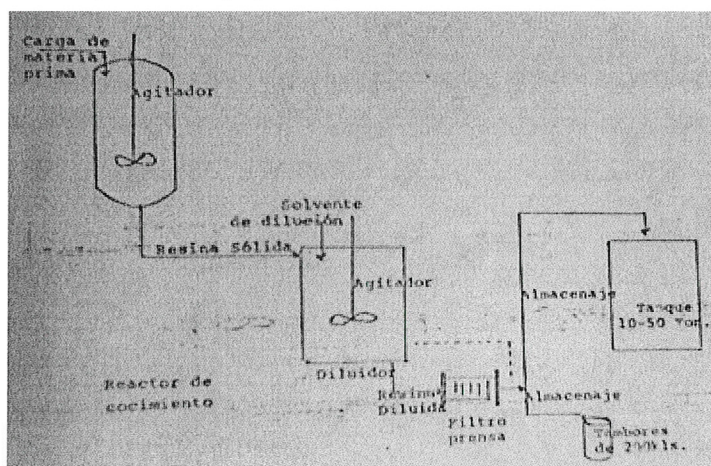
Fuente: (Paton, 1962: 20-72)

Generalmente se busca el punto ideal en el punto 1 en el cual la acidez y viscosidad entren a las propiedades especificadas. Cuando se utiliza ácidos grasos simplemente se cargan todos los materiales desde el principio, se calienta a temperaturas de 240 a 260°C para esterificar. (Paton, 1962: 20-72)

b. Dilución, filtrado y almacenaje: Cuando la resina ha alcanzado los valores de proceso adecuado se pasa a un diluidor donde la resina se ajusta a las especificaciones de sólidos y viscosidad estándar. Después de esto es necesario hacer un filtrado en filtro prensa para quitar las impurezas y por último almacenaje en tambores de 200 kilos o en tanques para ventas a granel. (Paton, 1962: 20-72)

Figura 3

Diagrama de flujo para la producción de resinas alquídicas



Fuente: (Paton, 1962: 20-72)

5. Aplicación de resina alquídica en pinturas sintéticas. Las resinas alquídicas modificadas son las más utilizadas en la fabricación de pinturas de acabados. Prácticamente, su difusión data de principios de los años cincuenta. Constituyen el ligante de la mayor parte de las pinturas de fondo y de los esmaltes de horno mezclados, por sistemas físicos o químicos, con pequeños porcentajes de resinas melamínicas o ureicas con objeto de mejorar algunas características. Se puede definir como resina alquídica modificada, el producto de la reacción de policondensación de un polialcohol con un poliácido y un ácido graso (agente modificador). El tipo más empleado es a base de una resina gliceroftálica, obtenida a partir de la condensación de la glicerina con el ácido ftálico y un ácido graso generalmente insaturado derivado de un aceite natural secante (ricino, linaza, etc.). El ácido facilita la solubilidad de la resina obtenida, con objeto de lograr pinturas más fluidas para su aplicación. Las resinas gliceroftálicas puras dan en fase de preparación macromoléculas tridimensionales bastante ramificadas y, por tanto, poco accesibles a los disolventes; en una resina en la que se ha realizado una esterificación de la función alcohólica de la

glicerina de un ácido graso, se interrumpe la cadena macromolecular dando moléculas más pequeñas, dispersables en el disolvente. (Blanco, 1966: 94-98)

El endurecimiento de las pinturas alquídicas modificadas, una vez aplicadas, se produce por un proceso químico, mediante la formación de macromoléculas de estructura modificada, producto de la condensación de las funciones alcohólicas y ácidas que han permanecido libres al término de la preparación de la resina, y que permite la unión de cada molécula de los dobles enlaces del ácido graso en el caso de que sean insaturados (como en los aceites secantes). Mientras que las uniones del oxígeno del aire con las moléculas empiezan a formarse durante el presecado posterior a la pintura aplicada a la temperatura ambiente, la policondensación entre las funciones ácidas libres del ácido ftálico y la función alcohólica de la glicerina tiene lugar generalmente a temperaturas más altas, por lo normal en un horno. Naturalmente, si el ácido graso empleado fuese saturado, el endurecimiento se produciría sólo por condensación. Las otras resinas que suelen acompañar en pequeña proporción al ligante gliceroftálico de una pintura de secado al horno (melamínica, ureica, etc.) se endurecen también por reacciones de polimerización y policondensación autónomas, o bien con los grupos reactivos residuales de las resinas alquídicas, confiriendo a la película seca diversas características, como brillo, dureza, elasticidad, resistencia, etc. (Blanco, 1966: 94-98)

En la industria automovilística, las pinturas con ligante de naturaleza alquídica suelen secarse a unos 130 °C. (Blanco, 1966: 94-98)

B. Reactores

1. Balance de Moles

a. Ecuación general de balance de moles. Antes de comenzar a hacer un balance de moles, se debe comenzar especificando las fronteras del sistema a considerar. El volumen del sistema es el volumen encerrado por esas fronteras. Suponiendo que se tiene un sistema de especie j en un volumen del sistema, se puede comenzar haciendo un balance de moles sabiendo que j será la especie de interés. (Fogler, 2001: 2-18)

El balance de moles para la especie j para un instante t es la siguiente:

$$\left[\begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{flujo de } j \text{ hacia} \\ \text{el sistema} \\ \text{(moles/tiempo)} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{generación de } j \\ \text{por reacción} \\ \text{química dentro} \\ \text{del sistema} \\ \text{(moles/tiempo)} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{flujo de } j \text{ desde} \\ \text{el sistema} \\ \text{(moles/tiempo)} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{velocidad de} \\ \text{acumulación} \\ \text{de } j \text{ dentro} \\ \text{del sistema} \\ \text{(moles/tiempo)} \end{array} \right]$$

Entrada + generación + salida = acumulación

$$F_{j0} + G_j - F_j = \frac{dN_j}{dt} \quad \text{Ecuación 1}$$

N_j es el número de moles de la especie j en tiempo t . En caso que todas las variables del sistema como temperatura, concentración de la especie química y actividad catalítica sean uniformes dentro del sistema, la velocidad de generación G_j será la siguiente:

$$G_j = r_j \times V \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde G_j se expresará en moles/tiempo, r_j es la velocidad de formación (moles/tiempo) y V es el volumen de reacción. (Fogler, 2001, 2-18)

2. Tipos y propiedades fundamentales de reactores

Se pueden agrupar a los tipos clásicos de reactores como los siguientes:

- Reactor de tanque con agitación continua (CSTR)
- Reactor por lotes
- Reactor tubular

Estos reactores son idealizaciones de reactores reales en la industria. La mezcla perfecta es asumida en un reactor por lotes clásico y en un reactor de mezcla continua pero la mezcla no es perfecta en un tanque agitado, no importa que tan intenso sea el mezclado. Por otro lado, idealizaciones clásicas son, por lo general, cercanas a la realidad para que puedan ser utilizadas en un diseño de estado estable y en el control dinámico de reactores químicos. (Luyben, 2007: 2-38)

a. Reactor de tanque con agitación continua (CSTR): Uno de los reactores más comunes en procesos industriales es un tanque con agitación que opera de manera continua. Otro nombre que se le puede llamar a CSTR es reactor de retomezcla. Generalmente, el CSTR opera en estado estacionario y que esté bien mezclado, por ello, el reactor se modela sin variaciones espaciales en concentración, temperatura o velocidad de reacción en todos los puntos del tanque. Ya que la concentración y la temperatura serán iguales en todo el interior donde se de la reacción, serán las mismas en el punto de salida. Por lo tanto, la concentración y la temperatura en el flujo de la salida se modelan iguales a las que se someten en el interior del reactor. Cuando el mezclado se aleja de lo ideal, no es apropiado utilizar un

Esta característica en este tipo de reactor es una desventaja ya que la concentración del reactivo en el tanque es la misma que la concentración del reactivo en el producto. La concentración del reactivo es inversamente relacionada a la conversión. (Luyben, 2007: 2-38)

La conversión fraccional χ es definida como

$$\chi = \frac{C_{A0} - C_A}{C_{A0}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Si se desea una conversión alta, la concentración del reactivo debe ser pequeña. Pero la razón de la reacción depende directamente en la concentración del reactivo. También depende del volumen del reactor. Por lo tanto, si se desea una conversión alta, el reactor debe ser grande para compensar las concentraciones pequeñas del reactivo. No es común que se utilice un solo reactor CSTR, cuando se desean conversiones altas. Generalmente, se utiliza varios reactores CSTR en serie para reducir el total del volumen del reactor ya que solamente el último tanque tendrá la concentración pequeña del reactivo. (Luyben, 2007: 2-38)

Algunas de las características importantes en un reactor CSTR son las siguientes:

- Una variedad de métodos y configuraciones pueden ser utilizadas para la transferencia de calor. Dado que la transferencia de calor es un elemento importante en el control de un reactor, CSTR es, por lo general, controlado con mayor facilidad que un reactor tubular. Físicamente, se presentan dificultades al ajustar la eliminación de calor en un tramo de un reactor tubular. (Luyben, 2007: 2-38)
- La temperatura de flujo de entrada tiene un efecto en el control, pero es de menor importancia en un reactor CSTR que en un reactor tubular. Si el calor es eliminado del reactor, un flujo de entrada que está a una menor temperatura que la temperatura dentro del reactor va a reducir los requerimientos de transferencia de calor. (Luyben, 2007: 2-38)
- La conversión es una fracción del reactivo que está siendo alimentado al reactor que reacciona dentro del reactor. El nivel de conversión en un reactor CSTR tiene un impacto significativo en la estabilidad y el control. Una conversión alta significa una concentración pequeña del reactivo en el tanque del reactor, entonces hay poco “combustible” disponible para permitir el arranque del reactor. Por otro lado, una conversión pequeña significa que va a haber reactivo disponible para reaccionar. Si la reacción es exotérmica e irreversible, la temperatura del reactor puede darse con facilidad en un reactor CSTR operando con baja reactivo conversión que en uno operando con un nivel alto de reactivo de la conversión. El diseño de la

conversión también afecta el tamaño del reactor. A bajas conversiones, más pequeño será el reactor el cual presenta menor área de transferencia de calor si un chaqueta externo o una bobina interna es utilizado, el cual tiene un impacto negativo en el control. (Luyben, 2007: 2-38)

b. Reactor por lotes: El reactor por lotes clásico es un tanque perfectamente mezclado en el cual los reactivos son convertidos a productos durante el curso del ciclo del lote. Todas las variables cambian dinámicamente con el tiempo. Los reactivos son cargados dentro del tanque. Calor y/o un catalítico es adicionado para inicial la reacción. Las concentraciones del reactivo se reducen y las concentraciones del producto incrementa con el tiempo. La temperatura o la presión es controlada de acuerdo a un trayecto deseado de tiempo. El tiempo del lote también es una variable de diseño y operación., el cual tiene un fuerte impacto en la productividad. (Luyben, 2007: 2-38)

Las temperaturas son establecidas de tal manera que la conversión y los objetivos son logrados mientras que no se exceda las limitaciones de la capacidad de transferencia de calor. Estas temperaturas óptimas dependen de la química. Por ejemplo, si la reacción es reversible y exotérmica, la temperatura puede tender a temperaturas altas para lograr conseguir que la reacción se de a cabo y luego, bajar con el tiempo para impedir una disminución en el equilibrio químico constante a altas temperaturas. Si la reacción es reversible y endotérmica, la temperatura puede incrementar al nivel más alto tan rápido como se pueda ya que el equilibrio químico incrementa con la temperatura. (Luyben, 2007: 2-38)

Si todos los reactivo son cargados al reactor, las concentraciones del reactivo son inicialmente grandes, el cual significa que la razón de la reacción es alta y que la cantidad de transferencia de calor es alta al principio del ciclo del lote a menos que la temperatura se mantenga baja. El problema dado por concentración alta inicial del reactivo puede ser evitado utilizando un reactor batch. Material es inicialmente cargado al reactor, pero la mayor parte del reactivo es alimentado durante el transcurso del ciclo por lotes. Esto causa que el volumen del líquido en el reactor incremente con el tiempo, entonces el volumen así como también las composiciones y temperaturas varían con el tiempo. (Luyben, 2007: 2-38)

Algunas de las características importantes en un reactor por lotes son las siguientes:

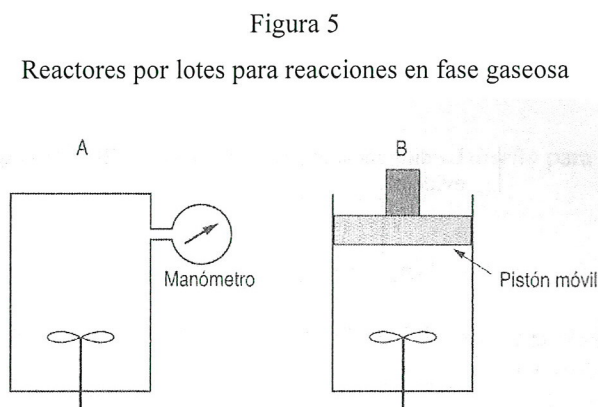
- El proceso puede variar con respecto al tiempo. No hay un estado estacionario. Esto causa que los parámetros del proceso cambien con el tiempo, el cual significa que los parámetros de control puedan cambiar con respecto al tiempo. Estrategias de control tal como programación por ganancia son requeridas con frecuencia en el control de un reactor por lotes. (Luyben, 2007: 2-38)

- Modelos no lineales deben ser utilizados para analizar los reactores por lotes por los parámetros que cambian en el proceso. Los reactores continuos operan alrededor de un nivel de estado estable, por lo tanto, los modelos lineales son en algunos casos adecuados para establecer constantes de control. (Luyben, 2007: 2-38)
- Seleccionando los mejores tiempos y temperaturas es un problema dinámico en optimización. Hay programación no lineal para estos tipos de problemas, pero hay otros métodos más simples y prácticos que pueden ser implementados. (Luyben, 2007: 2-38)
- Todas las configuraciones de transferencia de calor utilizadas en un reactor de mezcla continuo puede ser aplicados a los reactores por lotes. (Luyben, 2007: 2-38)

Mientras la reacción se está efectuando en un reactor por lotes, no hay entrada de reactivo ni salida de productos de reactivos. Por lo tanto F_{j0} y F_j serán igual a cero. Si se toma que la reacción es homogénea, no va a haber variación en la rapidez de la reacción en todo el reactor, por lo tanto se puede definir el balance de moles de un reactor por lotes de la siguiente manera:

$$\frac{dN_j}{dt} = r_j V \quad \text{Ecuación 6}$$

En reactores utilizados para fase gaseosa, se tienen dos tipos principales mostrados en la siguiente Figura:



Fuente: (Fogler, 2001: 2-18)

El primer reactor mantiene un volumen constante la cual solamente la presión varía. El segundo reactor trabaja inversamente que el primero, por lo tanto, la presión es constante y el volumen varía. Los reactivos se van a inyectar en el tiempo inicial $t = 0$ y al inyectarse comienza la reacción química. (Fogler, 2001: 2-18)

c. Reactor Tubular de Flujo Taponado (PFR). El reactor tubular consiste en un tubo cilíndrico y se opera normalmente en estado estacionario. Se le llama de flujo taponado ya que no hay variación radial en la concentración dado que el flujo es altamente turbulento. En este reactor, los reactivos se consumen de manera continua a medida que vayan fluyendo a lo largo del reactor. Se puede suponer que la velocidad de reacción varía axialmente dado que es una función de la concentración para todas las reacciones y, en este caso, la concentración varía de manera continua en dirección axial a lo largo del reactor. (Luyben, 2007: 2-38)

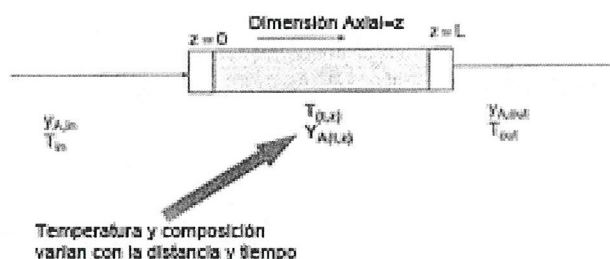
Cuando se considera un reactor tubular con área de sección transversal variable y constante se puede obtener la siguiente ecuación de diseño:

$$\frac{dF_j}{dV} = r_j \quad \text{Ecuación 7}$$

De esta ecuación se puede partir a la conclusión que el grado de reacción que llega a alcanzar un reactor tubular no va a depender de su forma, sino que de su volumen total. (Fogler, 2001: 2-18)

La siguiente figura da un ejemplo de un típico reactor tubular adiabático. La característica central que distingue a los reactores tubulares es su parámetro de distribución, esto es, variables que cambian con dimensiones físicas así como con el tiempo. El reactor PFR asume que el tanque del reactor es cilíndrico, que el fluido fluye a lo largo del reactor con una velocidad determinada, que no ocurre una mezcla axial y que no existe un gradiente radial en temperatura y composición. (Luyben, 2007: 2-38)

Figura 6
Reactor tubular adiabático



(Luyben, 2007: 2-38)

El reactor tubular puede ser un tanque vacío si no se utiliza un catalizador. Si un catalizador sólido es requerido, el tanque es empacado con un catalizador, ya sea en una cama o en el interior de los tubos. El comportamiento dinámico del reactivo puede ser afectado por la presencia de un catalizador en el reactor ya que la capacitancia termal del catalizador es usualmente mayor que el del fluido del proceso, especialmente si el sistema está en fase gaseosa. Las temperaturas del fluido del proceso y del catalizador cambian con el tiempo. Por supuesto, bajo condiciones de estado estacionario, ambas temperaturas son iguales en cualquier posición axial. (Luyben, 2007: 2-38)

Algunos modos de operación de un reactor tubular son los siguientes:

- Adiabático: No hay ninguna transferencia de calor desde o hacia el reactor. La temperatura y composición cambian con distancia. Ya que no hay transferencia de calor, no hay gradientes radiales en la temperatura. El cambio de la temperatura adiabática depende de la conversión por etapa en el reactor, en la cantidad de material alimentada al reactor y su capacidad de calor. El cambio en la temperatura adiabática es baja si la conversión es baja. Si la alimentación contiene materiales que no reaccionan, este material puede servir como un disipador de calor para reducir el cambio en la temperatura adiabática. El calor sensible del material puede sobrepasar calor de la reacción. Éste material no reactivo generalmente se recupera y se recicla, por lo tanto, este modo de operación incrementa el capital y los costos de energía de la sección de separación de la planta. (Luyben, 2007: 2-38)
- Con transferencia de calor: el reactor tubular es construido en una manera similar como el intercambiador de calor de concha y tubos. El fluido del proceso fluye adentro de los tubos y es enfriado o calentado por la transferencia de calor en la concha. Los gradientes radial de temperatura son inherentes en los reactores tubulares con transferencia de calor, por lo que la suposición del flujo taponado es menos precisa. Estos gradientes radiales depende en el

diámetro de la tubería, en las propiedades del fluido y en las velocidades del fluido. Mientras más larga sea la tubería, mayor será el gradiente radial de temperatura. (Luyben, 2007: 2-38)

- Adiabático con Transferencia de Calor Intermediaria: hay varios sistemas de reactores tubulares que utilizan series de reactores adiabáticos con sistema de calentamiento o enfriamiento entre tanques de reactores. (Luyben, 2007: 2-38)
- Adiabático con enfriamiento: Algunas reacciones exotérmicas son conducidas en tanques con camas múltiples de catalizadores, el cual operan adiabáticamente (la temperatura incrementa a lo largo del cama). A la salida de cada cama, un flujo frío es mezclado con un flujo caliente dejando la cama para traer la temperatura hacia abajo nuevamente a la temperatura deseada para el flujo de entrada de la cama. Normalmente, este flujo frío viene del flujo alimentado que llega al margen del sistema de precalentamiento del reactor. (Luyben, 2007: 2-38)

El control de los reactores tubulares es probablemente el más difícil de todos los sistemas de reactores. Las razones para esta dificultad y las características especiales de los reactores tubulares son las siguientes:

- La naturaleza distribuida del proceso lleva a respuestas dinámicas complejas en el cual cambios axiales en las variables pueden resultar en un comportamiento contra-intuitivo. Un ejemplo puede ser la respuesta “inverso” que ocurre in algunos reactores que son camas empacadas tubularer adiabáticas. Una disminución en la temperatura de entrada del reactor va a resultar una temperatura en la salida mas baja en el reactor. Pero puede haber un incremento transitorio en la temperatura de salida. Esto es dado a que la alimentación que esta a una temperatura más baja, disminuye la temperatura en la parte delantera del reactor. La razón baja de reacción consume menos reactivo, por lo que la concentración del reactivo incrementa en las partes mas bajas del reactor. El catalizador sólido aún está caliente por su capacitancia termal. Por lo que la combinación de una concentración alta de reactivo y una temperatura alta causa una reacción rápida a lo largo del reactor, el cual incrementa la temperatura a niveles más altos que el valor normal de estado estacionario que eventualmente se establece. (Luyben, 2007: 2-38)
- Las temperaturas y composiciones transitorias se mueven de manera ondular a lo largo del reactor, y esto lleva a limitar ciclos cuando el reactor es parte de una planta completa con alimentación precalentada y flujos reciclados. (Luyben, 2007: 2-38)
- Reactores tubulares tienden a tener limitaciones de temperaturas altas ya que ocurren reacciones indeseables, degradación del catalizador, o en materiales de construcción. Estos significa que la temperatura máxima en cualquier parte del reactor no puede exceder ese límite. Una reacción exotérmica en un reactor adiabático produce una temperatura máxima en la salida bajo

condiciones de estado estacionario. Una reacción exotérmica en un reactor enfriado puede tener una temperatura máxima en una posición axial intermedia o al final. La magnitud y la parte del pico de temperatura varían con el diseño del sistema y edad del catalizador. También varían con la operación del sistema ya que pueden ocurrir disturbios. Controlando el pico de temperatura requiere que se hagan varias mediciones de temperaturas a lo largo del reactor para detectarlas. (Luyben, 2007: 2-38)

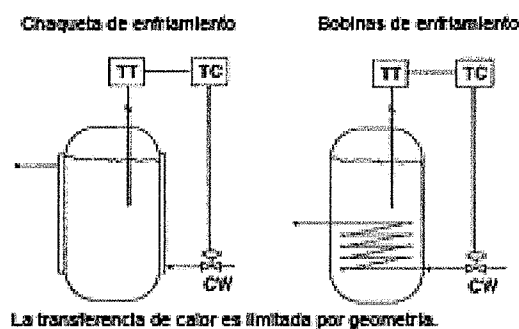
- La temperatura de alimentación es un parámetro de diseño muy importante en un reactor tubular. Una baja temperatura de alimentación lleva a bajas razones de reacción. A estas bajas temperaturas se necesitan un reactor mas largo para lograr el nivel deseado de conversión. Una temperatura alta de alimentación da una temperatura de salida alta. Si la reacción es exotérmica y hay un limitación máxima de temperatura, la conversión por etapa puede que tenga que ser reducida o adicionar mas material disipador de calor se deba alimentar para disminuir el incremento de la temperatura. Generalmente esto significa razones de flujo mas altas de reciclaje con un incremento en el costo y energía del sistema de separación. (Luyben, 2007: 2-38)
- En reactores tubulares de calentamiento o enfriamiento las opciones de transferencia de calor son limitadas. Es muy difícil mecánicamente cambiar la temperatura de calentamiento o enfriamiento mediana con una posición axial. La configuración usual es a una temperatura constante de la transferencia de calor a lo largo del reactor. En sistemas que requieren enfriamiento para temperaturas altas, vapor es generado en el lado de la concha del reactor para remover calor. La temperatura de vapor es la misma en cualquier posición axial. En sistemas requiriendo calentamiento, combustible quemado o vapor condensado a alta presión es utilizado a temperaturas constantes en cualquier posición axial. Si la transferencia de calor es utilizada, si cambia la temperatura a lo largo del reactor, los parámetros de diseño disponibles son la dirección de flujo, la temperatura de entrada de la transferencia de calor y su flujo. Todos los parámetros deben ser balanceados para que las temperaturas deseadas y las conversiones puedan ser alcanzadas. En sistemas requiriendo enfriamiento a temperaturas muy altas, sales quemadas son a veces utilizadas para eliminar calor. (Luyben, 2007: 2-38)

3. Transferencia de calor en reactores. Reactores por lotes y CSTR pueden ser enfriados o calentados en una variedad de maneras, ya que se debe a su control superior comparado con los reactores tubulares. A continuación se muestran todas estas alternativas. (Luyben, 2007: 2-38)

El uso de chaqueta que rodee el tanque del reactor es probablemente el método más común para proveer transferencia de calor ya que es de bajo costo en términos de equipo. Si se requiere calentamiento, vapor es condensado en la chaqueta o un fluido caliente de transferencia de calor es alimentado a la

chaqueta. Si se requiere enfriamiento, se puede utilizar agua de enfriamiento a 30°C para temperaturas moderadas en el reactor (entre 50 y 80°C). Para reactores a temperaturas más bajas, un flujo de refrigerante es utilizado, tal como salmuera. (Luyben, 2007: 2-38)

Figura 7
Enfriamiento con chaqueta

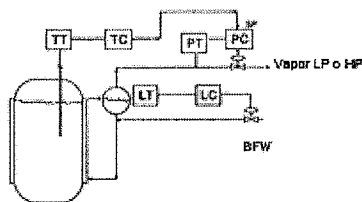


Fuente: (Luyben, 2007: 2-38)

Para temperaturas en el reactor entre 80 y 130°C se utiliza agua templada o aceite refrigerante. Agua enfriada simple no debe ser utilizada por la gran diferencia de temperaturas entre el reactor y el sistema de enfriamiento tiene a ocasionar problemas de control dinámicos. Esto ocurre ya que la diferencia de temperatura puede ser cambiada por solamente una pequeña cantidad, el cual significa que la eliminación de calor no puede ser cambiado. Por lo que la magnitud en la dinámica es muy limitada. (Luyben, 2007: 2-38)

Para temperaturas en el reactor arriba de 130°C, el flujo puede ser generado en la chaqueta a una presión adecuada (para proveer un diferencial de temperatura de 30-50°C entre el vapor y el reactor se puede utilizar el sistema en la siguiente Figura). Reactores operando a temperaturas muy altas usualmente utilizan sales quemadas para eliminar calor. (Luyben, 2007: 2-38)

Figura 8
Enfriamiento con chaqueta a altas temperaturas



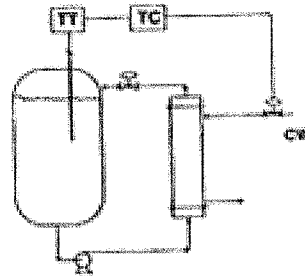
Fuente: (Luyben, 2007: 2-38)

En vez de utilizar un sistema de un solo paso de refrigerante a través de la chaqueta, se puede utilizar sistemas de agua de enfriamiento como se muestra en la siguiente Figura. La razón de circulación es grande, entonces todo el refrigerante en la chaqueta es esencialmente a la misma temperatura. El flujo es fijo, entonces los coeficientes de transferencia de calor no cambian con el flujo del agua, tal como es el caso de un sistema de un solo paso. Esto resulta en controles de temperatura de reactor más ajustados. (Luyben, 2007: 2-38)

Estos sistemas de refrigerante circulando vienen en dos maneras. Como se muestran en la imagen superior de la Figura anterior, el agua fría puede ser añadida directamente al ciclo circulando como se necesite para controlar la temperatura del agua circulando. El agua caliente es eliminado para mantener el inventario constante en el ciclo circulando. Como se muestra en la imagen inferior de la Figura 4, un intercambiador externo que es enfriado para un refrigerante puede ser utilizado en el ciclo circulante para proveer enfriamiento. El material en el ciclo circulante puede ser agua templada o aceite si la temperatura del reactor es muy alta para agua refrigerante. La mezcla flujo caliente y frío dan un control de temperatura del fluido circulante. (Luyben, 2007: 2-38)

Otra alternativa es circular el líquido de reacción por medio de un intercambiador de calor externo como se muestra en la siguientes Figura.

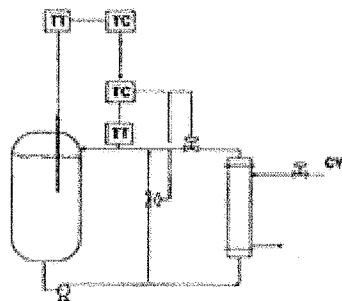
Figura 9
Intercambiador de calor externo



Fuente: (Luyben, 2007: 2-38)

Este sistema tiene la ventaja de proveer cualquier calor transferido que se desee. Con sistemas de chaqueta o bobina, el área de transferencia de calor es limitada por una dimensión física del tanque del reactor. Con el intercambiador de calor externo, el área de transferencia de calor puede ser establecido a cualquier nivel deseado. Esto impide que se den algunos problemas en el escalonamiento del reactor. Por supuesto, el esquema requiere que el líquido sea bombeado al reactor, el cual puede ser indeseable cuando se trabaja en procesos con materiales tóxicos (materiales que pueden ocasionar derrames en los sellos de la bomba), o con materiales que son sensibles a rajaduras (algunos sistemas biológicos) o pueden obstruir la tubería pequeña en el intercambiador de calor externo. (Luyben, 2007: 2-38)

Figura 10
Intercambiador de calor externo con control de mezcla y cascada



Fuente: (Luyben, 2007: 2-38)

El último esquema se denomina auto refrigeración o enfriamiento evaporado. La presión en el reactor es ajustado de tal manera que el líquido puede llegar a su punto de ebullición si la temperatura

incrementa. El calor latente de vaporización en este cambio de fase elimina el calor del reactor. El vapor fluye hacia un condensador, y el líquido condensado es regresado al reactor. El sistema tiene unas características deseables. La ebullición facilita la mezcla del líquido y previene zonas calientes. El área de transferencia de calor puede ser del tamaño que uno desee, por lo cual los problemas por escalonamiento son reducidos. (Luyben, 2007: 2-38)

Sin embargo, este método también presenta características indeseables. En la configuración usual, la gravedad con un sello en U es utilizado para hacer que el líquido fluya del condensador de regreso al reactor, el cual está a una presión mayor (provee la fuerza motriz para que el vapor fluya del reactor al condensador). La hidráulica de estos sistemas de flujo gravitacional pueden llevar a problemas de control severo. Los sistemas de auto refrigeración deben ser diseñados para caídas de presión bajas y una diferencia de elevación suficiente entre el reactor y el condensador para proveer una altura del líquido que pueda manejar las peores situaciones que se puedan dar. (Luyben, 2007: 2-38)

La otra desventaja de este tipo de sistema es que la temperatura en el condensador es mas baja que la del reactor dado por las presiones bajas y los componentes más volátiles que están en la fase de vapor. Esto significa que un refrigerante de baja temperatura debe ser utilizado en el condensador comparado a lo que podría ser utilizado en sistemas que utilizan chaqueta o bobina. (Luyben, 2007: 2-38)

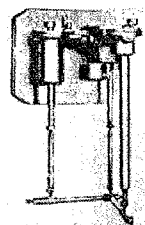
C. Automatización

1. Medidores de flujo. A continuación se encuentran ocho tipos fundamentales de medidores de flujo. Estos son los siguientes:

a. Medidor de flujo de doble rango: Consiste en un captador de caudal conectado a dos tubos de rango. La función del medidor es contrarrestar la poca sensibilidad que presenta un captador de presión diferencial, en la parte baja de la escala de caudal. Para ello se dispone sobre el mismo captador dos cámaras de rango o escala. (Geankoplis, 1998: 15-64)

Figura 11

Medidor de doble rango de Taylor Instruments Company



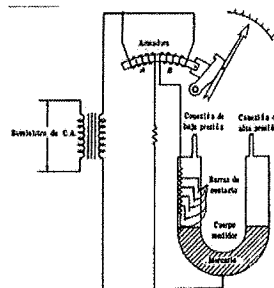
Fuente: (Geankoplis, 1998: 15-64)

b. Medidores mecánicos: Transmite el desplazamiento del flotador o la inclinación de la balanza teórica, por medio de juegos de palancas, levas, u otro dispositivo mecánico, a un eje que gira arrastrando la pluma del registrador. Este eje ha de salir al exterior atravesando la pared de la cámara del flotador, que esta bajo presión. Esto se consigue por medio de una chumacera o cojinete estanco que, para no falsear la medida ha de producir el mínimo rozamiento posible sobre el eje. (Geankoplis, 1998: 15-64)

c. Medidores eléctricos: Se utilizan frecuentemente sistemas de medida de caudal con transmisión eléctrica, cuando el instrumento de medida o registro se localiza lejos del elemento primario. Se disponen de varios métodos para ello. Se puede mencionar primero el método de conductividad donde se utiliza la elevación del nivel del mercurio en la rama de baja presión de un tubo U para variar la resistencia de un circuito eléctrico. La corriente eléctrica que fluye por este circuito será, por tanto, función de la presión diferencial aplicada al cuerpo mediador y en consecuencia función de la velocidad del fluido que atraviesa el elemento primario. (Geankoplis, 1998: 15-64)

Figura 12

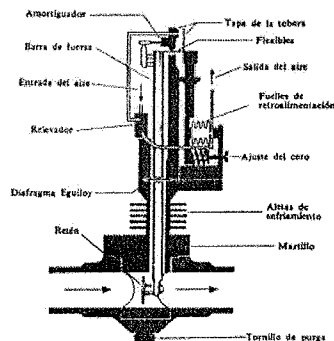
Esquema de Conductividad de Republic Flow Meters Company



Fuente: (Geankoplis, 1998: 15-64)

d. Medidores de flujo de tipo reten: Los captadores de caudal de este tipo utilizan un reten en lugar de la placa con orificio u otra resistencia del flujo. Miden la fuerza con que la corriente fluida choca contra una superficie interpuesta en su camino. El reten de forma circular y bordes afilados, apropiado para el margen de caudal a medir, se fija al extremo bajo de la barra de fuerza y queda exactamente centrado con la tubería. El empuje que el fluido ejerce sobre el reten tiende por medio de la barra de fuerza, a variar la distancia entre la tapa o paleta y la tobera, lo que provoca la variación de la presión de aire en el revelador, en los fuelles de retroalimentación y en la salida de señal hacia el receptor. (Geankoplis, 1998: 15-64)

Figura 13
Medidor de Reten de Foxboro Company



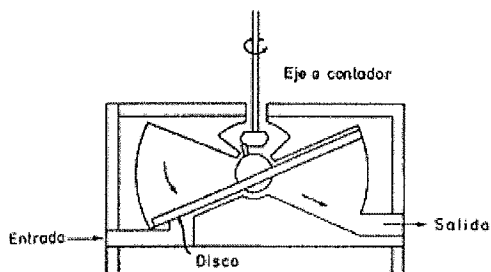
Fuente: (Geankoplis, 1998: 15-64)

e. Medidores de flujo de desplazamiento positivo: Son esencialmente instrumentos de cantidad de flujo. Se utilizan frecuentemente para medida de líquidos en procesos discontinuos. Para procesos continuos se prefieren los instrumentos de caudal. Este instrumento toma una cantidad o porción definida del flujo, y la conduce a través de un medidor, luego produce con la siguiente torsión y así sucesivamente. Contando las porciones pasadas por el medidor se obtiene la cantidad total pasada por este. La exactitud de los medidores de desplazamiento positivo es alta y está entre 0.1 y 1%. (Ordóñez, 2005, 19)

Los medidores de este tipo, toman el caudal del fluido, contando o integrando volúmenes separados del mismo. La parte mecánica del instrumento se mueve aprovechando la energía del fluido, dando como resultado una gran pérdida de presión en la línea. El error de medición de estos elementos dependerá de la holgura que existan entre las partes fijas y móviles, por lo cual su uso queda generalmente limitado a líquidos. Hay tres tipos básicos de medidores de desplazamiento positivo:

- Medidor de disco oscilante: Este medidor dispone de una cámara circular con un disco plano móvil dotado con una ranura en la que se encuentra intercalada una placa fija. Esa placa, separa la entrada y la salida e impide el giro del disco durante el paso del fluido. El movimiento del disco será similar al de una moneda a punto de cesar su giro en el piso o en una mesa. De esta forma, en cada vuelta, se desplazara un volumen conocido del fluido en cuestión. (Ordóñez, 2005:19)

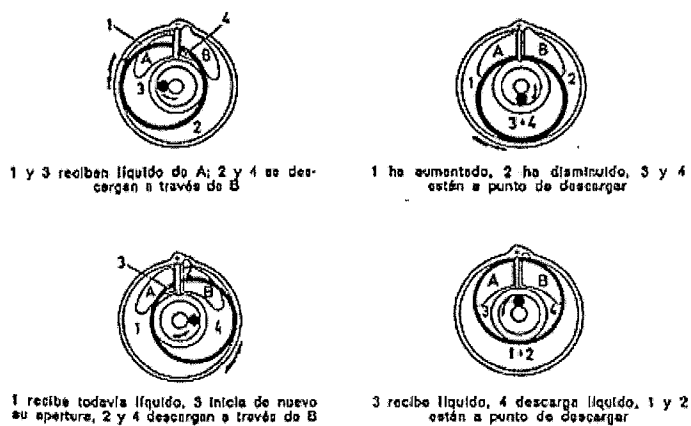
Figura 14
Medidor de disco oscilante



Fuente: (Ordóñez, 2005: 19)

- Medidor de pistón oscilante: Consiste en una cámara cilíndrica con una salida y una placa divisoria que separa esta salida en dos. En la siguiente Figura, se muestra el funcionamiento de las diferentes fases del ciclo. (Ordóñez, 2005:19)

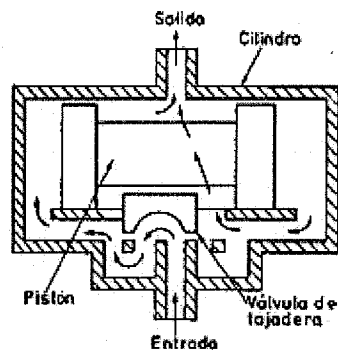
Figura 15
Medidor de pistón oscilante



Fuente: (Ordóñez, 2005: 19)

- Medidor de pistón alternativo: Es uno de los primeros elementos de medición de caudal por desplazamiento positivo. En la Figura siguiente, se describe el funcionamiento de las fases del ciclo. (Ordóñez, 2005: 19)

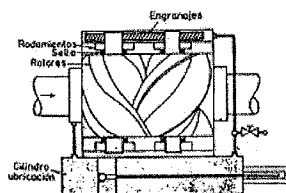
Figura 16
Medidor de pistón alternativo



Fuente: (Ordóñez, 2005: 19)

- Medidores rotativos: son los más utilizados en la actualidad y hay de varios tipos. Su funcionamiento es sencillo y su mantenimiento es bajo. Puede manejar crudos pesado algo viscoso en una gran gama de caudales. Hay dos principales sistemas para los medidores rotativos que son los siguientes:
 - Bi-Rotor: está diseñado para medir el flujo total de productos líquidos que pasa a través del mismo por medio de una unidad de medición que separa el flujo en segmentos separándolo momentáneamente del caudal que pasa a través del medidor. Los segmentos son contados y los resultados son transferidos al contador o cualquier otro sistema totalizador a través del tren de engranajes. Son fabricados con cuerpo de acero en casco unitario o doble teniendo la unidad de medición removible como una unidad separada del cuerpo. Son diseñados para que los efectos adversos de líneas fuera de alineación no puedan ser transmitidas a la unidad de medición. Una ventaja adicional de la fabricación de doble casco es que la presión de operación, cualquiera que sea, es constante dentro y alrededor de la unidad de medición. Por lo tanto no hay cambio en la precisión de una presión de operación a otra. (Ordóñez, 2005, 19)

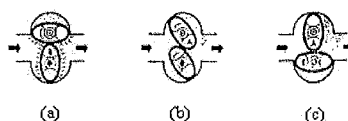
Figura 17
Medidor Bi-Rotor



Fuente: (Ordóñez, 2005: 19)

- Ovales: Este medidor hace la medición del producto más difícil un asunto sencillo y sin comprometer la precisión. Un diseño simple - los dos engranajes ovales de precisión - son las únicas piezas móviles, proveen repetitibilidad y larga vida con muy poca pérdida de presión en el proceso. Mide en forma precisa el flujo de líquido utilizando el diferencial de presión para hacer rotar un par de engranajes que sellan el flujo de salida, desarrollando el diferencial de presión. El engranaje B (a) está hidráulicamente desbalanceado. Por lo que el engranaje A (b) impulsa el engranaje B hasta el engranaje A vuelva a estar balanceado hidráulicamente. En este punto, el engranaje A (c) crea una acción de impulso que altera el cual provee una rotación suave a un torque casi constante sin puntos muertos. Al rotar los engranajes atrapan cantidades precisas de líquido en los espacios vacíos de la cámara de medición de medición, y la tasa de flujo es proporcional a la velocidad rotacional de los engranajes. Ya que el deslice entre los engranajes ovales y la pared de la cámara es mínimo, el medidor no es afectado por cambios en la viscosidad y lubricación de los líquidos medidos. Un eje de salida, que rota en proporción directa a los engranajes ovales por medio de un acople magnético potente, impulsa un tren de engranajes que proveen el registro del medidor en unidades de galones, litros, libras. (Ordóñez, 2005, 19)

Figura 18
Medidor oval



Fuente: (Ordóñez, 2005: 19)

f. Medidores de corrientes de fluido: Tienen una hélice u otro elemento giratorio, que es accionado por la corriente de fluido y transmite su movimiento, por engranajes, al contador. Miden la velocidad del fluido y la corriente en medidas de flujo. Una de las ventajas de estos aparatos es la pequeña caída de presión que provocan; por ejemplo, en líneas de tubería de 20,3 cm o más, la pérdida es generalmente menor que 7.6 cm de columna de agua, a velocidades normales. Generalmente el propulsor ocupa aproximadamente ocho décimas partes del diámetro de la tubería y se disponen de estas paletas rectas con el fin de reducir la tubería y asegurar un flujo suave a través del propulsor. (Geankoplis, 1998: 15-64)

g. Medidores de flujo ultrasónicos: Responde a la deflexión de las ondas ultrasónicas transmitidas a través de una corriente fluida. Un transmisor que genera sonido ultrasónico, se monta en el exterior de una tubería colocando a distancias determinadas, aguas arriba y abajo, sendos receptores de ultrasonidos opuestos al emisor. En condiciones de no-flujo, ambos receptores reciben igual cantidad de energía ultrasónica y generan tensiones iguales. En condiciones de flujo (en cualquier sentido) las ondas ultrasónicas se deflectan y como resultado los receptores generan voltajes distintos. Comparando ambos voltajes, se tiene indicación del sentido y la magnitud del flujo. (Geankoplis, 1998: 15-64)

h. Medidores de masa de flujo: Los medidores de masa de flujo diferentes de los demás en que miden directamente el peso del flujo y no su volumen. Miden flujos gaseosos o líquidos, por ejemplo, expresándolos directamente en libras y, por tanto no le afectan las variaciones de presión, temperatura ni densidad del fluido. La unidad completa incluye cuatro componentes básicos: el elemento sensible a la velocidad del flujo, el mecanismo del giroscopio integrador, el registrador ciclométrico y el accionador de contactos. (Geankoplis, 1998: 15-64)

2. Medidores de temperatura. Los diferentes tipos de instrumentos que son utilizados para la medición de la temperatura son los siguientes:

a. Termómetro de vidrio: Este tipo de instrumento consta de un tubo de vidrio hueco, con un depósito lleno de un fluido muy sensible volumetricamente a los cambios de temperatura. Dependiendo del fluido usado, se tienen diferentes rangos de temperatura para este instrumento, los cuales, vendrán limitados por los puntos de solidificación y de ebullición de los fluidos. A continuación se presenta una Tabla con los puntos de solidificación y de ebullición de algunos de los fluidos:

Tabla 1
Fluidos para termómetros de vidrio

Fluido	P de solidificación	P de ebullición
Mercurio	-35	280
Mercurio (tubo de gas)	-35	450
Pentano	-200	20
Alcohol	-110	50
Tolueno	-70	100

Fuente: (Ojeda, 2007: 1-12)

Los termómetros de vidrio son frágiles y requieren de una posición específica para funcionar, además de tener un rango muy limitado de la variable. (Ojeda, 2007: 1-12)

b. Termómetro bimetalico: Todos los instrumentos de medición de temperatura utilizan algún cambio en un material para indicar la temperatura. Algunos de los efectos que se utilizan para indicar la temperatura son los cambios en las características físicas y variación en las dimensiones físicas. Una de las características físicas más importantes usadas en instrumentos de medida de temperatura es el cambio en la longitud de un material en la forma de expansión y contracción. (Ojeda, 2007: 1-12)

Se puede considerar la barra homogénea uniforme ilustrada en la Figura adjunta. Si la barra tiene una longitud dada (L_0) a una cierta temperatura y es calentada, se expandirá (L_f). La cantidad de expansión o dilatación ΔL es una función de la longitud original y del aumento de temperatura. La cantidad que un material cambia en longitud con la temperatura se llama coeficiente de expansión lineal (también: coeficiente de expansión térmica, coeficiente de dilatación lineal, etc.). (Ojeda, 2007: 1-12)



Fuente: (Ojeda, 2007: 1-12)

Al igual que el termómetro de vidrio, utilizan el fenómeno de cambios volumétricos, para su funcionamiento. El termómetro bimetálico, consta, como su nombre lo dice, de dos barras metálicas de diferentes metales unidas rígidamente, al ser estos materiales diferentes, tendrán necesariamente, que tener diferentes coeficientes de dilatación lineal. (Ojeda, 2007: 1-12)

Si se tienen dos materiales con diferentes coeficientes de dilatación lineales y se colocan juntos, a medida que se producen cambios de temperatura, sus índices de expansión serán diferentes. Esto hará que el conjunto se doble en un arco como se muestra en la Figura adjunta. Mediante este método, funcionan la gran mayoría de los termostatos (interruptores de temperatura) y algunos termómetros indicadores locales. La siguiente Figura muestra el efecto de una dilatación diferente en una barra compuesta por dos metales superpuestos, de diferente coeficiente de dilatación (bimetálico). Esta diferencia produce una curvatura de la barra conjunta y se debe a que un material se elongará más que el otro. (Ojeda, 2007: 1-12)

Figura 20

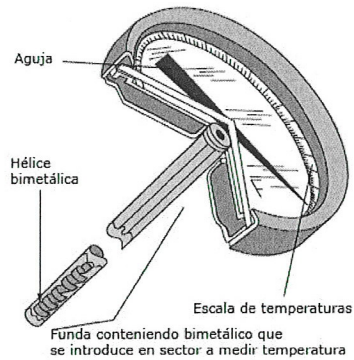
Efecto de dilatación por diferencia de coeficiente de dilatación.



Fuente: (Ojeda, 2007: 1-12)

La Figura 21 muestra un termómetro bimetálico. En ella, una tira bimetálica se bobina en forma de hélice larga. Un extremo de la hélice se mantiene rígido y mientras que la temperatura varía, la hélice intenta enrollarse o desenrollarse. Esto hace al extremo libre girar, el cual está conectado con una aguja indicadora la cual indica realmente la rotación angular de la hélice; sin embargo, puesto que la rotación es lineal y es función de la temperatura, la escala se marca en unidades de temperatura. (Ojeda, 2007: 1-12)

Figura 21
Termómetro bimetalíco.



(Ojeda, 2007: 1-12)

c. Termopares: El termopar se basa en el principio, del efecto que fuera descubierto en 1821 por Seebeck, que establece que cuando la unión de dos materiales diferentes se encuentra a una temperatura diferente que la del medio ambiente, a través de esos materiales circulará una corriente. El uso de termopares en la industria se ha popularizado, ya que son altamente precisos y muchos más económicos que las termoresistencias. (Ojeda, 2007: 1-12)

Existen muchos métodos para realizar mediciones prácticas de temperatura. De todos ellos, unos fueron desarrollados para aplicaciones particulares mientras que otros han ido cayendo en desuso. Las termocupulas constituyen hoy en día el sistema de medición de temperatura más usado y de mejor acceso. Esta forma de medición abarca el rango de temperaturas requerido para la mayoría de las mediciones exigidas. Termocupulas de diferentes tipos pueden cubrir un rango de 250°C hasta 2.000°C y más si fuera necesario. (Ojeda, 2007: 1-12)

A fin de seleccionar el mejor sensor para una aplicación dada, se deben considerar varios factores, como son los rangos de temperatura, exactitud, velocidad de respuesta, costo y requerimientos de mantenimiento. En la siguiente Tabla se listan los rangos de temperatura medidos normalmente mediante sensores estándar. Estos rangos no representan los extremos alcanzables, sino los límites que pueden medirse con los dispositivos disponibles por lo general en el mercado y que son suministrados por la mayoría de los fabricantes. Se pueden medir mayores y menores temperaturas, pero generalmente con una menor exactitud y a un mayor costo. (Ojeda, 2007: 1-12)

Tabla 2
Rangos de temperatura de sistemas más comunes.

Sistema	Rango (°C)	
	min	max
Termocuplas	-200	2800
Sistemas de dilatación	-195	760
Termorresistencias	-250	850
Termistores	-195	450
Pirómetros de radiación	-40	4000

Fuente: (Ojeda, 2007: 1-12)

d. Termocuplas: Hay siete tipos de termocuplas que tienen designaciones con letras elaboradas por el Instrument Society of America (ISA). El U.S. National Bureau of Standardg (NBS), por su parte, ha preparado Tablas de correlación temperatura fem para estas termocuplas, las que han sido publicadas por el American National Standards Institute (ANSI) y el American Society for Testing and Materials (ASTM). (Ojeda, 2007: 1-12)

Durante el año 1986. se ha procedido a uniformar las normas europeas DIN (alemanas), BS (inglesas), NF (francesas) y las antedichas ANSI (norteamericanas) en cuanto a la correlación de temperaturas y fem, así como en lo que hace a las tolerancias de estas fem en las distintas aleaciones. Esto ha quedado homologado en la norma IEC 584 (International Electrotechnical Commission). (Ojeda, 2007: 1-12)

Estas siete termocuplas se enumeran en la Tabla 33 en la sección del Apéndice. Los alcances de temperatura indicados son aquellos cuyos valores de fem se encuentran publicados. Asimismo se Indican la composición de termocuplas y los diámetros de alambre apropiado. En la Tabla 34 se detallan las tolerancias de calibración estándar según IEC 584 Parte 1 actualmente en vigencia. En la Tabla 39 se comparan las capacidades de las termocuplas para enfrentarse a distintas condiciones ambientales. (Ojeda, 2007: 1-12)

Para aplicaciones especiales donde se requiere una respuesta rápida, es aconsejable ocasionalmente, que la termocupula sea fabricada con su unión expuesta o en algunos casos aterrada; siempre y cuando el resto del sistema lo permita. (Ojeda, 2007: 1-12)

Las termocúpulas están frecuentemente acabadas con una conexión o un terminal que permite su unión con resto del circuito termoeléctrico. Alternativamente, un conector especial puede ser incluido; En estos dispositivos, las patas conectoras están construidas de materiales o aleaciones adecuadas para no alterar la FEM generada en la unión de medición, permitiendo así la rápida conexión o desacople del sensor a utilizar sin afectar de forma alguna la uniformidad del termoelemento. (Ojeda, 2007: 1-12)

En los termopares, existen dos puntos importantes: las juntas caliente (en el proceso) y la junta fría (en el medio ambiente). Los materiales que serán usados ya están estandarizados y tienen unas Tablas de comportamiento, que suponen, que la junta fría se encuentra a cero (0) grados centígrados. Esto es con el fin, de tener un valor de patrón de comparación que parta de cero, ya que de no ser así, la junta fría actuaría como un segundo termopar en serie con el primero sumando así a la f.e.m. de la junta caliente. (Ojeda, 2007: 1-12)

En la práctica industrial, lo frecuente, es tener la junta fría a temperatura ambiente, lo que hace necesario compensar el valor de la lectura de mV, restando los mV que generaría ese termopar a la temperatura ambiente. (Ojeda, 2007: 1-12)

e. Termorresistencia (RTD): La termorresistencia trabaja según el principio de que en la medida que varía la temperatura, su resistencia se modifica, y la magnitud de esta modificación puede relacionarse con la variación de temperatura, (Ojeda, 2007: 1-12)

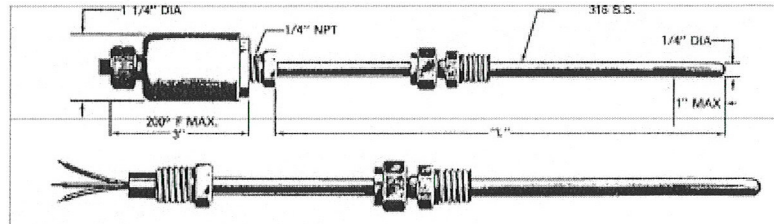
Las termorresistencias de uso más común se fabrican de alambres finos soportados por un material aislante y luego encapsulados. El elemento encapsulado se inserta luego dentro de una vaina o tubo metálico cerrado en un extremo que se llena con un polvo aislante y se sella con cemento para impedir que absorba humedad. (Ojeda, 2007: 1-12)

Esta disposición se puede usar con o sin termopozos en una infinidad de procesos que incluyen tanques, hornos, estufas, tuberías, ductos, sistemas de incubación, fermentación, refrigeración. Los tubos protectores se hacen del largo, diámetro y material requerido por el cliente; este tipo de sensores posee además opciones de respuesta rápida o con camisa para medición de gases secos. (Ojeda, 2007: 1-12)

Las termoresistencias con elementos de inmersión variable poseen un conector ajustable que permite variar el largo de inmersión del elemento. (Ojeda, 2007: 1-12)

Figura 22

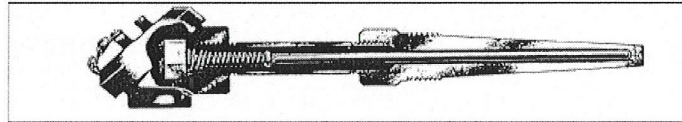
Termorresistencias con elementos de inmersión.



Las termorresistencias tipo “Spring Loaded” permiten que el elemento y el termopozo estén en contacto firme durante su operación. Esto permite controlar la variación o golpeteo dentro del termopozo, aumenta la velocidad de respuesta y facilita la instalación del sensor. (Ojeda, 2007: 1-12)

Figura 23

Termorresistencias tipo “Spring Loaded”.



Fuente: (Ojeda, 2007: 1-12)

Las ventajas de las Termorresistencias se muestran en la siguiente Tabla:

Tabla 3

Ventajas y desventajas de termorresistencias

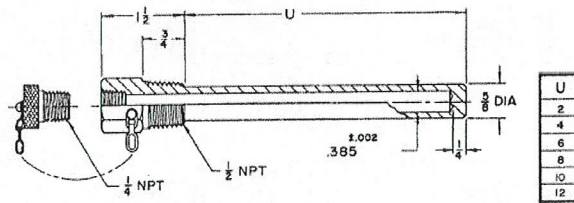
Ventajas	Desventajas
Alta precisión	El límite de temperatura máxima es el mas bajo
Mejor linealidad	El tiempo de respuesta sin el termopozo es bajo
Mejor estabilidad	
No requiere compensación por junta fría	

Fuente: (Ojeda, 2007: 1-12)

f. Termopozos: Es un elemento de conexión a proceso tal que, protegerá al elemento primario de temperatura, de los agentes corrosivos, abrasivos que este elemento no podría resistir por sí mismo. El

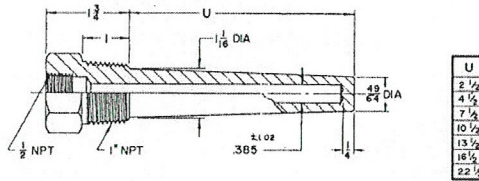
termopozo puede adoptar varias configuraciones para su montaje, las cuales pueden ser en forma recta, cónica, reducción, con brida soldada y espacios reducidos. Hay varios tipos de termopozos los cuales a continuación se muestran algunos:

Figura 24
Termopozo recto.



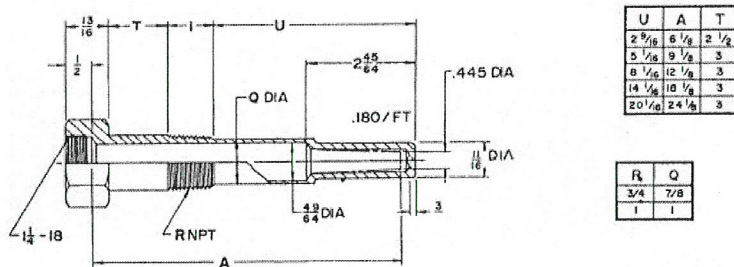
Fuente: (Ojeda, 2007: 1-12)

Figura 25.
Termopozo cónico.



Fuente: (Ojeda, 2007: 1-12)

Figura 26
Termopozo con reducción interna y/o externa



Fuente: (Ojeda, 2007: 1-12)

En la sección de Apéndice se encuentra una guía para la selección de tubos o vainas de protección.

g. Pirometro de radiación: Existen casos donde no es posible tomar, por contacto directo con el proceso, la temperatura que sea necesaria para evaluar un proceso. Uno de los instrumentos de no contacto más común, es el pirometro de radiación. Se fundamenta en el principio que dice que la intensidad de la energía radiante emitida por la superficie de un cuerpo, aumenta proporcionalmente a la cuarta potencia de la temperatura del cuerpo. Los pirómetros ópticos son un juego de lentes de diferentes colores de acuerdo a las tonalidades que toma determinado material a diferentes rangos de temperatura. (Ojeda, 2007: 1-12)

El pirómetro de radiación consta de una serie de termocuplas en serie con un lente que hace convergir el haz de radiación hacia esas termocuplas. De esta forma, la radiación captada a cierta distancia del medio, es amplificada y calculada con bastante precisión. La medición de temperatura sin contacto es altamente necesaria cuando estamos hablando de procesos donde las temperaturas son tan elevadas que el elemento primario podría hundirse o no trabajar ($t > 1500$ grados centígrados), como por ejemplo: fundiciones, estudios científicos, reactores nucleares, etc. (Ojeda, 2007: 1-12)

3. Medidores de presión. El control de la presión en los procesos industriales da condiciones de operación seguras. Cualquier recipiente o tubería posee cierta presión máxima de operación y de seguridad variando este, de acuerdo con el material y la construcción. Las presiones excesivas no solo pueden provocar la destrucción del equipo, si no también puede provocar la destrucción del equipo adyacente y ponen al personal en situaciones peligrosas, particularmente cuando están implícitas, fluidos inflamables o corrosivos. Para tales aplicaciones, las lecturas absolutas de gran precisión con frecuencia son tan importantes como lo es la seguridad extrema. (Nunez, 2001: 1-28)

Por otro lado, la presión puede llegar a tener efectos directos o indirectos en el valor de las variables del proceso (como la composición de una mezcla en el proceso de destilación). En tales casos, su valor absoluto medio o controlado con precisión de gran importancia ya que afectaría la pureza de los productos poniéndolos fuera de especificación. (Nunez, 2001: 1-28)

Los instrumentos para medición de presión pueden ser indicadores, registradores, transmisores y controladores, y pueden clasificarse de acuerdo a la siguiente Tabla:

Tabla 4

Tipos de manómetros y rangos de operación

Tipo de manómetro	Rango de operación
Manómetro de ionización	0.0001 a 1×10^{-3} mmHg ABS
Manómetro de termopar	1×10^{-3} a 0.05 mmHg
Manómetro de resistencia	1×10^{-3} a 1 mmHg
Manómetro de Mc. Clau	1×10^{-4} a 10 mmHg
Manómetro de campana invertida	0 a 7.6 mmH ₂ O
Manómetro de fuelle abierto	13 a 230 cmH ₂ O
Manómetro de cápsula	2.5 a 250 mmH ₂ O
Manómetro de campana de mercurio	(LEDOUX) 0 a 5 mts H ₂ O
Manómetro en "U"	0 a 2 Kg/cm ²
Manómetro de fuelle cerrado	0 a 3 Kg/cm ²
Manómetro de espiral	0 a 300 Kg/cm ²
Manómetro de bourdon tipo "C"	0 a 1,500 Kg/cm ²
Manómetro de medidor de esfuerzos (stren geigs)	7 a 3,500 Kg/cm ²
Manómetro de helicoidal	0 a 10,000 Kg/cm ²

Fuente: (Nunez, 2001: 1-28)

Los instrumentos de presión se clasifican en tres grupos:

- Elementos mecánicos: Los elementos mecánicos se dividen en elementos primarios de medida directa que miden la presión comparándola con la ejercida por un líquido de densidad y altura conocidas tales como: barómetro de cubeta, manómetro de tubo en U, manómetro de tubo inclinado, manómetro de toro pendular y manómetro de campana. Luego se divide en los elementos primarios elásticos que se deforman por la presión interna del fluido que contienen. Los elementos primarios elásticos que son más empleados son los siguientes: tubo Bourdon, Elemento en espiral, el diafragma y el fuelle. Las características de los elementos mecánicos se muestran en la Tabla 15 en la sección del Apéndice. (Nunez, 2001: 1-28)
- Elementos neumáticos: Se pueden considerar los transmisores neumáticos que se basan en el sistema tobera-obturador que convierte el movimiento del elemento de medición en una señal neumática. (Nunez, 2001: 1-28)
- Elementos electromecánicos y Electrónicos: utilizan un elemento mecánico elástico combinado con un transductor eléctrico que genera la señal eléctrica correspondiente. El

elemento mecánico consiste en un tubo Bourdon, espiral, hélice, diafragma, fuelle o una combinación de los mismos que, a través de un sistema de palancas convierte la presión en una fuerza o en un desplazamiento mecánico. (Nunez, 2001: 1-28). Los elementos Electromecánicos de presión se clasifican según el principio de funcionamiento que son Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas, Resistivos, Magnéticos, Capacitativos, Extensométricos y Pizoeléctricos. (Nunez, 2001: 1-28). Las características de los elementos Electromecánicos se describen en la Tabla 16 en la sección del Apéndice.

4. Controladores Lógicos Programables (PLC). Los Controladores Lógicos Programables o PLC (Programmable Actuator Controller en sus siglas en inglés) son dispositivos electrónicos muy usados en Automatización Industrial.

Su historia se remonta a finales de la década de 1960, cuando la industria buscó en las nuevas tecnologías electrónicas una solución más eficiente para reemplazar los sistemas de control basados en circuitos eléctricos con relés, interruptores y otros componentes comúnmente utilizados para el control de los sistemas de lógica combinacional. (Pérez, 2004: 1-8)

Hoy en día, los PLC no sólo controlan la lógica de funcionamiento de máquinas, plantas y procesos industriales, sino que también pueden realizar operaciones aritméticas, manejar señales analógicas para realizar estrategias de control, tales como controladores proporcional integral derivativo (PID). Los PLC actuales pueden comunicarse con otros controladores y computadoras en redes de área local, y son una parte fundamental de los modernos sistemas de control distribuido. (Pérez, 2004: 1-8)

Existen varios lenguajes de programación, tradicionalmente los más utilizados son el diagrama de escalera LADDER, lista de instrucciones y programación por estados, aunque se han incorporado lenguajes más intuitivos que permiten implementar algoritmos complejos mediante simples diagramas de flujo más fáciles de interpretar y mantener. En la programación se pueden incluir diferentes tipos de operandos, desde los más simples como lógica booleana, contadores, temporizadores, contactos, bobinas y operadores matemáticos, hasta operaciones más complejas como manejo de tablas (recetas), apuntadores, algoritmos PID y funciones de comunicación mutiprotocolos que le permitirían interconectarse con otros dispositivos. (Pérez, 2004: 1-8)

Los PLCs están bien adaptados para un amplio rango de tareas de automatización. Estos son típicamente procesos industriales en la manufactura donde el costo de desarrollo y mantenimiento de un sistema de automatización es relativamente alto contra el costo de la automatización, y donde existirán

cambios al sistema durante toda su vida operacional. Los PLCs contienen todo lo necesario para manejar altas cargas de potencia; se requiere poco diseño eléctrico y el problema de diseño se centra en expresar las operaciones y secuencias en la lógica de escalera (o diagramas de funciones). Las aplicaciones de PLC son típicamente sistemas a la medida, por lo que el costo del PLC es bajo comparado con el costo de la contratación del diseñador para un diseño específico de una sola vez. Por otro lado, en caso de productos de alta producción, los sistemas de control a la medida rápidamente se pagan por si solos debido a los ahorros en los componentes, lo cual puede ser elegido de manera óptima en vez de una solución “genérica”. Sin embargo, debe ser notado que algunos PLCs ya no tienen un precio alto. Los PLCs actuales tienen capacidades completas por algunos cientos de dólares. (Pérez, 2004: 1-8)

Para un alto volumen o una simple tarea de automatización, diferentes técnicas son utilizadas. Por ejemplo, una lavadora de trastes de uso doméstico puede ser controlada por un temporizador CAM electromecánico costando algunos cuantos dólares en cantidades de producción. (Pérez, 2004: 1-8)

Un diseño basado en un microcontrolador puede ser apropiado donde cientos o miles de unidades pueden ser producidas y entonces el costo de desarrollo (diseño de fuentes de poder y equipo de entradas y salidas) puede ser dividido sobre muchas ventas, donde el usuario final no tiene necesidad de alterar el control. Aplicaciones automotrices son un ejemplo, millones de unidades son vendidas cada año, y pocos usuarios finales alteran la programación de estos controladores. (Sin embargo, algunos vehículos especiales como son camiones de pasajeros para tránsito urbano utilizan PLCs en vez de controladores de diseño propio, debido a que los volúmenes son bajo y el desarrollo no sería económico. (Pérez, 2004: 1-8)

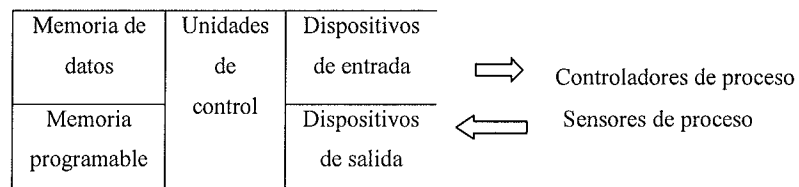
Algunos procesos de control complejos, como los que son utilizados en la industria química, pueden requerir algoritmos y desempeño más allá de la capacidad de PLCs de alto desempeño. Controladores de alta velocidad también requieren de soluciones a la medida; por ejemplo, controles para vuelo de aviones. (Pérez, 2004: 1-8)

Los PLCs tienen cuatro unidades principales:

- La memoria Programable: Las instrucciones para la secuencia de control lógico están acomodadas aquí. (Pérez, 2004: 1-8)
- La memoria de datos: Las condiciones de los cambios, interbloqueo, valores pesados de datos y otros datos. (Pérez, 2004: 1-8)
- Los dispositivos de salida: Estos son los controladores de hardware/software para los procesos industriales como motores y válvulas. (Pérez, 2004: 1-8)

- Los dispositivos de salida: Estos son los controladores de hardware/software para los sensores de los procesos industriales como sensores de cambio de estado, detectores de proximidad, ajuste de interbloqueo y más. (Pérez, 2004: 1-8)

Figura 27
Esquematización de un PLC



Módulo de programación o PC

(Pérez, 2004: 1-8)

III. JUSTIFICACIÓN

La automatización de un Reactor Semicontínuo es de gran importancia ya que su finalidad es obtener el diseño de un sistema totalmente automatizado el cual permite controlar todos los sistemas que se utilizan para el funcionamiento del reactor. En cuanto a los sistemas de control, se puede hacer énfasis a la eficiencia de la reacción química que se da en el reactor a igual que la productividad en cuanto a la exactitud y precisión de tiempo de producción de la resina. En el proceso, se trabaja con sustancias tóxicas que hacen que la operación del proceso sea un tanto peligrosa para el personal. Por lo tanto, otro factor importante a considerar, es la seguridad industrial en la cual se obtiene un trabajo más seguro en la parte del personal al igual que en la parte del cuidado del equipo. Por último, se puede hacer ver que, por medio de la automatización, se pueden obtener estudios importantes en cuanto a la productividad del proceso ya que el sistema puede mantener un control de cada lote de producción que se haga en el reactor, tomando en cuenta sus parámetros tales como viscosidad, temperatura y pH, haciendo una comparación con el parámetro estándar de la reacción.

III. OBJETIVOS

A. Generales:

- Determinar un balance de masa y energía de un Reactor Semicontínuo empleado para la producción de resinas Alquídicas.
- Realizar una estimación de equipos y señales a utilizar.
- Determinar el costo estimado para la automatización del Reactor Semicontínuo.

B. Específicos:

- Realizar un diagrama de bloques del proceso para la elaboración de resina de base alquídica.
- Realizar un diagrama de flujo de proceso para la elaboración de resina de base alquídica.
- Obtener el cálculo de flujos y condiciones de operación.
- Obtener el cálculo de equipos de detección y de los actuadores necesarios para llevar a cabo el proceso de una manera automática.
- Realizar el diseño de la arquitectura básica de control para que el proceso pueda ser controlado por un PLC.

V. PROBLEMA A RESOLVER

La producción de resina Alquídicá en un Reactor Semicontínuo es un proceso el cual, en la actualidad, tiene un tiempo de producción de 35 horas aproximadamente tendiendo así un rendimiento promedio de 10,000 galones de resina. El tiempo que se tarda para el calentamiento del reactor es aproximadamente 11.75 horas y luego, para que se llegue a la reacción, es un tiempo de 20.25 horas adicionales.

El reactor funciona de una manera totalmente manual el cual implica un sistema de adiciones, un sistema de descarga y carga de materiales y un sistema de control subjetivo y cambiante. Cuando se produce resina, en este caso resina alquídicá, si se cambia ligeramente el procedimiento, las características o propiedades de la resina tienden hacia un punto diferente. Tiene riesgos de seguridad para las personas y el equipo, al igual que tiene riesgos de calidad de la resina y, dado que la resina se utiliza como materia prima para la producción de pinturas, también puede afectar las propiedades finales de la pintura. Al tener una gran variación de los tiempos de producción, el costo siempre será distinto.

VI. METODOLOGÍA

A continuación, se presenta la metodología del estudio y el orden de las fases establecidas para la elaboración del diseño.

Tabla 5
Metodología

Fase	Detalle
1 Elaboración del protocolo	La elaboración del protocolo consiste en dos etapas. La primera etapa se comienza con la selección del tema de trabajo y luego se prosigue con la elaboración del protocolo el cual incluye un descripción del tema, la justificación del tema, cual es el problema a resolver, los objetivos del trabajo y la determinación del porque se realizará el tema. Se muestra la metodología a tomar y la calendarización de la misma. Luego se procede a la revisión del protocolo y, por último, la entrega del protocolo final ya tomando los arreglos finales de la revisión.
2 Balance de masa y energía	Para la elaboración del balance de masa y energía se comenzó realizando el diagrama de bloques del proceso tomando en cuenta de lo que se quiere obtener finalmente. Luego se hizo un diagrama de flujo de proceso tomando el sistema global. Finalmente se calcularon los flujos y se obtuvo las condiciones de operación.
3 Estimación de equipos y señales	La estimación de equipos y señales consta de dos partes. Se comienza realizando los cálculos de equipos de detección y la cantidad de actuadores necesarios para finalmente tener un sistema automatizado. Luego se prosigue a realizar el diseño de la arquitectura básica de control.
4 Costo estimado para automatización	Para obtener los costos del sistema automatizado, se realizan cotizaciones con proveedores nacionales e internacionales para obtener la mejor opción de equipo y la mejor calidad. Se determinan especificaciones de cada equipo y actuador en el diseño.

VII. CRONOGRAMA

A continuación, se presenta el cronograma de actividades que describe la planificación semanal para la elaboración del diseño.

Tabla 6.
Cronograma de actividades

Cronograma	JUNIO				JULIO					AGOSTO				SEPTIEMBRE				OCTUBRE					NOVIEMBRE				DICIEMBRE							
	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Elaboración de protocolo	■																																	
Revisión	■																																	
Arreglo final y entrega	■																																	
Balance de masa y energía					■	■	■	■	■																									
Diagrama de bloques del proceso					■	■	■	■	■																									
Diagrama de flujo de proceso					■	■	■	■	■																									
Cálculo de flujos y condiciones de operación										■	■	■	■																					
Estimación de equipos y señales														■	■	■	■																	
Cálculo de equipos de detección y actuadores														■	■	■	■																	
Diseño de arquitectura básica de control														■	■	■	■																	
Costos del sistema automatizado																		■	■	■	■													
Elaboración el trabajo final																											■	■	■	■				
Primera propuesta																											■	■	■	■				
Primera revisión																											■	■	■	■				
Segunda revisión																											■	■	■	■				

VIII. RESULTADOS

A continuación, se muestra el balance de masa y energía del sistema completo para la producción de resina alquídica.

En el diagrama, se muestran valores indicados en color verde que son datos obtenidos por medio instrumental y los datos indicados en color gris son datos calculados a partir de datos teóricos mostrados en blanco y los datos obtenidos por instrumentación.

La siguiente Tabla muestra el color de las rutas en relación con el equipo en el sistema.

Tabla 7
Elenco de señales para equipos, instrumentos y válvulas
utilizadas para el diseño de la automatización del reactor semicontínuo. 1/3

NO.	1	2	3	4	DIVISIÓN	EQUIPO	CAPACIDAD	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	SERIAL	TAG	DI	DO	AI	AO
1	E	1	C	01	Caldera	Caldera de Aceite Térmico	21E-06	l/h	Habitado		E-20	X			
									Encendido			X			
									Fuego Alto			X			
									Fuego Bajo			X			
2	I	1	T	02	Caldera	Temperatura Aceite Térmico Frío	0-100	°C	Temperatura		TT1-23			X	
3	I	2	T	03	Caldera	Temperatura Aceite Térmico Caliente	0-100	°C	Temperatura		TT1-22			X	
4	I	3	T	04	Caldera	Temperatura Gases de Chimenea	0-950	°C	Temperatura		TT1-21			X	
5	I	4	T	05	Caldera	Temperatura Aire Entrada Caldera	0-100	°C	Temperatura		TT1-26			X	
6	I	5	T	06	Caldera	Temperatura Combustible Diesel Fuel Oil 2	0-100	°C	Temperatura		TT1-25			X	
7	B	1	B	07	Caldera	Bomba Recirculación Aceite Térmico	12.5	HP	Listo		E-21	X			
									Arrancado			X			
									Arranque/paro				X		
									Ajuste Velocidad					X	
8	B	2	B	08	Caldera	Bomba de Combustible	1	HP	Listo		E-18	X			
									Arrancado			X			
									Arranque/paro				X		
									Ajuste Velocidad					X	
9	B	3	B	09	Caldera	Ventilador Centrifugo de Caldera	10	HP	Listo		E-19	X			
									Arrancado			X			
									Arranque/paro				X		
10	E	2	TE	01	Torre de Enfriamiento	Torre de Enfriamiento Agua	200E-06	l/h	Listo		E-16	X			
									Arrancado			X			
									Arranque/paro				X		
11	I	7	T	02	Torre de Enfriamiento	Temperatura Agua Fría	0-100	°C	Temperatura		TT1-13			X	
12	I	4	FV	03	Torre de Enfriamiento	Transmisor Flujo Volumétrico Agua Fría	0-0.04	m ³ /s	Flujo		FT1-28			X	
				05					Totalizador			X			
13	I	1	N	04	Torre de Enfriamiento	Switch Nivel Torre de Enfriamiento			Lleno		LT1-24	X			
14	I	1	H	05	Torre de Enfriamiento	Medidor Humedad Aire Entrada Torre	0-100	%	Humedad		HT1-31			X	
15	I	2	H	06	Torre de Enfriamiento	Medidor Humedad Aire Húmedo Salida Torre	0-100	%	Humedad		HT1-32			X	
16	B	1	B	07	Torre de Enfriamiento	Bomba de Agua Torre de Enfriamiento	20	HP	Listo		E-22	X			
									Arrancado			X			
									Arranque/paro				X		
17	Y	1	S	08	Torre de Enfriamiento	Válvula O1 Agua Fría Cerpenón Peavator			Cerrada		V-27	X			
									Ajuste Apertura					X	
18	V	2	S	09	Torre de Enfriamiento	Válvula O1 Agua Fría Eje Cerpenón Peavator			Cerrada		V-18	X			
									Ajuste Apertura					X	
19	Y	3	S	10	Torre de Enfriamiento	Válvula O1 Agua Fría Condensador			Cerrada		V-26	X			
									Ajuste Apertura					X	
20	I	17	T	11	Torre de Enfriamiento	Temperatura Aire Entrada Torre	0-100	°C	Temperatura		TT1-29			X	
21	I	18	T	12	Torre de Enfriamiento	Temperatura Aire Húmedo Salida Torre	0-100	°C	Temperatura		TT1-30			X	
22	I	8	T	01	Condensador	Temperatura Flujos Condensados	0-100	°C	Temperatura		TT1-18			X	
23	I	9	T	02	Condensador	Temperatura Vapores Peavator	0-200	°C	Temperatura		TT1-16			X	

Tabla 8.

Ruta de colores respecto a cada equipo.

Color	Equipo
Rojo	Caldera
Azul	Torre de enfriamiento
Café	Reactor
Amarillo	Condensador
Verde	Decantados
Anaranjado	Lavado de gases
Morado	Tanque de dilusión

Tabla 9.

Elenco de señales para equipos, instrumentos y válvulas utilizadas para el diseño de la automatización del Reactor Semicontínuo. 2/3

NO.	1	2	3	4	DIVISIÓN	EQUIPO	CAPACIDAD	UNIDAD	DESCRIPCIÓN SEÑAL	TAG	DI	DO	AI	AO
24	I	10	T	03	Condensador	Temperatura Agua Caliente	0-100	C	Temperatura	TT1-17			X	
25	I	16	T	04	Condensador	Temperatura Agua Fría Torre Enfriamiento	0-100	C	Temperatura	TT1-19			X	
26	I	11	T	01	Decantador	Temperatura Agua Residual	0-100	C	Temperatura	TT1-33			X	
27	I	5	FV	02	Decantador	Transmisor Flujo Volumétrico Agua Residual	0-0.001	m ³ /s	Flujo	FT1-34			X	
									Totalizador		X			
28	I	2	N	03	Decantador	Sensor Nivel Decantador			Lleno	LS1-20			X	
									Arrancado		X			
									Arranque/paro			X		
29	I	3	N	01	Tanque de Dilusión	Switch Nivel Tanque de Dilusión			Lleno	LTI-6	X			
30	B	5	B	02	Tanque de Dilusión	Bomba Desplazamiento Positivo Descarga Tanque Dilusión	15	HP	Listo	E-4	X			
									Arrancado		X			
									Arranque/paro			X		
31	V	1	MD	03	Tanque de Dilusión	Válvula Posición Solvente Mineral			Cerrada	V-23	X			
									Ajuste Apertura					X
32	I	6	FV	04	Tanque de Dilusión	Transmisor Flujo Volumétrico Solvente Mineral	0-0.005	m ³ /s	Flujo	FT1-42			X	
									Totalizador		X			
33	E	3	R	01	Reactor Resina	Reactor	11.36	m ³	Listo	E-1	X			
							15	HP	Arrancado		X			
							100	RPM	Arranque/paro			X		
34	I	12	T	02	Reactor Resina	Temperatura Resina Reactor (100°C)	0-400	C	Temperatura	TT1-2			X	
35	I	7	FV	03	Reactor Resina	Transmisor Flujo Volumétrico Xileno	0-0.005	m ³ /s	Flujo	FT1-37			X	
									Totalizador		X			
36	I	8	FV	04	Reactor Resina	Transmisor Flujo Volumétrico Aceite	0-0.005	m ³ /s	Flujo	FT1-39			X	
									Totalizador		X			
37	I	9	FV	05	Reactor Resina	Transmisor Flujo Volumétrico Glicerina	0-0.005	m ³ /s	Flujo	FT1-41			X	
									Totalizador		X			
38	B	6	B	06	Reactor Resina	Bomba Desplazamiento Positivo Descarga Tanque Dilusión	15	HP	Listo	E-15	X			
									Arrancado		X			
									Arranque/paro			X		
39	V	1	M	07	Reactor Resina	Válvula O1 Resina Alquílica a Tanque Dilusión			Cerrada	V-6	X			
									Ajuste Apertura					X
40	V	4	S	08	Reactor Resina	Válvula O1 Solvente Mineral Reactor Resina			Cerrada	V-31	X			
									Ajuste Apertura					X
41	V	2	MD	09	Reactor Resina	Válvula Posición Solvente Mineral Reactor Resina			Cerrada	V-24	X			
									Ajuste Apertura					X
42	V	5	S	10	Reactor Resina	Válvula O1 Aceite Reactor Resina			Cerrada	V-28	X			
									Ajuste Apertura					X
43	V	3	MD	11	Reactor Resina	Válvula Posición Aceite Reactor Resina			Cerrada	V-19	X			
									Ajuste Apertura					X
44	V	6	S	12	Reactor Resina	Válvula O1 Glicerina Reactor Resina			Cerrada	V-30	X			
									Ajuste Apertura					X

Tabla 10.

Elenco de señales para equipos, instrumentos y válvulas utilizadas para el diseño de la automatización del Reactor Semicontínuo. 3/3

NO.	1	2	3	4	DIVISIÓN	EQUIPO	CAPACIDAD	UNIDAD	DESCRIPCIÓN SEÑAL	TAG	DI	DO	AI	AO
45	V	4	MD	13	Reactor Resina	Válvula Posición Glicerina Reactor Resina			Cerrada	V-21	X			X
									Ajuste Apertura					
46	V	7	S	14	Reactor Resina	Válvula O1 Xileno Reactor Resina			Cerrada	V-23	X			
									Ajuste Apertura					X
47	V	5	MD	15	Reactor Resina	Válvula Posición Xileno Reactor Resina			Cerrada	V-20	X			
									Ajuste Apertura					X
48	V	8	S	16	Reactor Resina	Válvula O1 Anilídido Flúido/Penta Reactor Resina			Cerrada	V-3	X			
									Ajuste Apertura					X
49	I	12	T	17	Reactor Resina	Temperatura Reactor	0-400	C	Temperatura	TT I-2			X	
50	E	4	VP	01	Lavador de Gases	Ventilador para Polvos	3	HP	Listo	E-6	X			
									Arrancado		X			
									Arranque/paro			X		
51	V	9	S	02	Lavador de Gases	Válvula O1 Lavador de Gases			Cerrada	V-4	X			
									Ajuste Apertura					X
52	I	14	T	01	Reactor	Temperatura Aceite Térmico Frío	0-400	C	Temperatura	TT I-9			X	
53	I	15	T	02	Reactor	Temperatura Aceite Térmico Caliente	0-400	C	Temperatura	TT I-8			X	
54	I	10	FV	03	Reactor	Transmisor Flujo Volumétrico Nitrógeno	0-0.005	m ³ /s	Flujo	FT I-8			X	
									Totalizador		X			
55	I	1	P	04	Reactor	Switch Presión Diferencial Agua Enfriamiento			Presión	DPS I-10			X	
56	I	2	P	05	Reactor	Switch Presión Diferencial Aceite Térmico Caliente			Presión	DPS I-7			X	
57	V	6	MD	06	Reactor	Válvula Posición Nitrógeno Reactor			Cerrada	V-22	X			
									Ajuste Apertura					X
58	V	2	M	07	Reactor	Válvula O1 Aceite Térmico Caliente Reactor			Cerrada	V-25	X			
									Ajuste Apertura					X
59	I	4	N	08	Reactor	Switch Nivel Reactor			Lleno	LS I-3	X			
60	I	1	A	09	Reactor	Amperaje Reactor	50	AMP	Amperaje	IT I-5			X	
61	I	11	FV	10	Reactor	Transmisor Flujo Volumétrico Aceite Térmico	0-0.005	m ³ /s	Flujo	FT I-4			X	
62	I	3	P	11	Reactor	Presión Reactor	±103.42	KPa	Presión	PT I-4			X	
TOTAL DE SEÑALES:											50	10	32	19

Tabla 11.

Lazos de control establecidos para el sistema automatizado.

LAZOS DE CONTROL				
		RELACIÓN		DESCRIPCIÓN DEL FLUJO DE:
CONTROLADOR DE TAREAS	1	V-25	TT I-2	aceite térmico en relación al calentamiento de reactor
	2	V-27	TT I-2	agua fría en relación al enfriamiento de reactor
	3	V-26	TI-18	agua fría en relación con flujos condensados
	4	V-26	TT I-19	agua fría entrada de condensador
	5	V-26	TT I-16	agua fría en relación con temperatura vapores de reactor
IMPUESTO DE TRANSPORTE	1	V-6	LT I-6	resina (100%) en relación con nivel Tanque de dilución
	2	FT I-42	LT I-6	solvente mineral en relación con nivel Tanque de dilución

Tabla 12.

Kilobytes estimados para el CPU del PLC
en relación a las entradas y salidas análogas y digitales, y los lazos de control.

	CANTIDAD	VALOR (bytes)	TOTAL (bytes)
CONTROLADOR DE TAREAS	5	4,000	20,000
ANALOGO I/O	51	2,600	132,600
DIGITAL I/O	60	400	24,000
IMPUESTO DE TRANSPORTE	2	800	1,600
TOTAL KILOBYTES			178.20
KILOBYTES (10%)			196.02

Tabla 13.

Entradas y salidas análogas y digitales disponibles para expansión.

TIPO	CANTIDAD	PUNTOS / UNIDAD	TOTAL	UTILIZADOS	DISPONIBLES
ENTRADA ANÁLOGA	2	16	32	32	0
SALIDA ANÁLOGA	2	16	32	19	13
ENTRADA DIGITAL	1	64	64	50	14
SALIDA DIGITAL	1	16	16	10	6

Tabla 14.

Costo estimado para la automatización del reactor semicontínuo. 1/2

P	CAPACIDAD/TIPO	UNIDAD	T. CONEXIÓN	T. VALVULA	T. LINEA	CLASE V.	CANTIDAD	P. UNITARIO	IMPORTE
A. INSTRUMENTACIÓN									
1.- Medidores de Temperatura									
1.1	0-100	°C	1.5"				9	Q 1,206.00	Q 10,854.00
1.2	0-200	°C	1.5"				1	Q 1,206.00	Q 1,206.00
1.3	0-400	°C	1.5"				6	Q 1,206.00	Q 7,236.00
1.4	0-850	°C	1.5"				1	Q 1,880.00	Q 1,880.00
2.- Medidor de Amperaje									
2.1	50	AMP	1.5"				1	Q 173.20	Q 173.20
3.- Medidor de Flujo Volumétrico									
3.1	0-0.001	m ³ /s	1.5"				1	Q 9,800.00	Q 9,800.00
3.2	0-0.005	m ³ /s	1.5"				6	Q 9,800.00	Q 58,800.00
3.3	0.04	m ³ /s	1.5"				1	Q 9,800.00	Q 9,800.00
4.- Medidor de Humedad									
4.1	0-100	%	1.5"				2	Q 1,118.80	Q 2,237.60
5.- Medidor de Nivel									
5.1	Switch		1.5"				3	Q 1,616.00	Q 4,848.00
5.2	Sensor		1.5"				1	Q 18,896.00	Q 18,896.00
6.- Medidor de Presión									
6.1	Switch		2"				2	Q 1,468.00	Q 2,936.00
6.1	±15	PSI	2"				1	Q 13,616.00	Q 13,616.00

Tabla 15

Costo estimado para la automatización del reactor semicontínuo. 2/2

P	CAPACIDAD/TIPO	UNIDAD	T. CONEXIÓN	T.VÁLVULA	T. LÍNEA	CLASE V.	CANTIDAD	P. UNITARIO	IMPORTE
B. VÁLVULAS									
1.- Válvula O-I de Bola de Control									
1.1	Resina Alquídica			Bola	3"	Control con Posiciones	1	Q 38,200.00	Q 38,200.00
1.2	Solvente Mineral			Bola	3"	Control con Posiciones	1	Q 9,600.00	Q 9,600.00
1.3	Aceite			Bola	3"	Control con Posiciones	1	Q 9,600.00	Q 9,600.00
1.4	Glicerina			Bola	3"	Control con Posiciones	1	Q 9,600.00	Q 9,600.00
1.5	Xileno			Bola	3"	Control con Posiciones	1	Q 9,600.00	Q 9,600.00
1.6	Aceite Térmico			Bola	3"	Control con Posiciones	1	Q 38,200.00	Q 38,200.00
1.7	Agua Fria			Bola	3"	Control con Posiciones	3	Q 3,000.00	Q 9,000.00
2.- Válvula O-I de Compuerta									
2.1	Anhídrido Ftálico/Penta			Compuerta	3"	Control con Posiciones	1	Q 12,440.00	Q 12,440.00
2.2	Lavador Gases			Compuerta	3"	Control con Posiciones	1	Q 12,440.00	Q 12,440.00
3.- Válvula Posición Modulada									
3.1	Solvente Mineral			Modulada	3"	Control con Posiciones	1	Q 33,200.00	Q 33,200.00
3.2	Aceite			Modulada	3"	Control con Posiciones	1	Q 41,880.00	Q 41,880.00
3.3	Glicerina			Modulada	3"	Control con Posiciones	1	Q 33,200.00	Q 33,200.00
3.4	Xileno			Modulada	3"	Control con Posiciones	1	Q 33,200.00	Q 33,200.00
3.5	Nitrógeno			Modulada	3"	Control con Posiciones	1	Q 25,200.00	Q 25,200.00
C. PLC									
4.1	Salida Análoga		16 CH				2	Q 6,208.00	Q 12,416.00
4.2	Entrada Análoga		16 CH				2	Q 3,536.00	Q 7,072.00
4.3	Salida Digital		16 POINT				1	Q 944.00	Q 944.00
4.4	Entrada Digital		64 POINT				1	Q 1,520.00	Q 1,520.00
4.5	Controlador		266 MHZ				2	Q 4,792.00	Q 9,584.00
4.6	Fuente de Poder		VDC				2	Q 1,584.00	Q 3,168.00
4.7	Base Módulos		11 MODULOS				1	Q 2,232.00	Q 2,232.00
4.8	Ingeniería								Q 22,161.60
TOTAL									Q 516,740.40

Tabla 16

Distribución porcentual de costos estimados para la automatización del reactor semicontínuo.

	COSTO	PORCENTAJE
Instrumentación	Q 142,282.80	27.53%
Válvulas	Q 315,360.00	61.03%
PLC	Q 59,097.60	11.44%
Total	Q 516,740.40	100.00%

A continuación se muestran los diagramas de bloques para cada equipo en el sistema.

Diagrama 2

Diagrama de bloque de caldera de aceite térmico

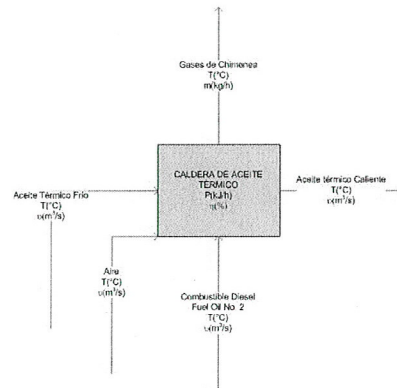


Diagrama 3.

Diagrama de bloque de torre de enfriamiento

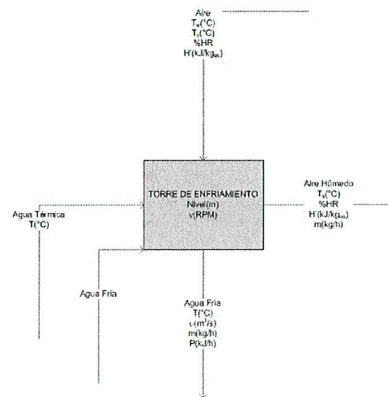


Diagrama 4
Diagrama de bloque de condensador

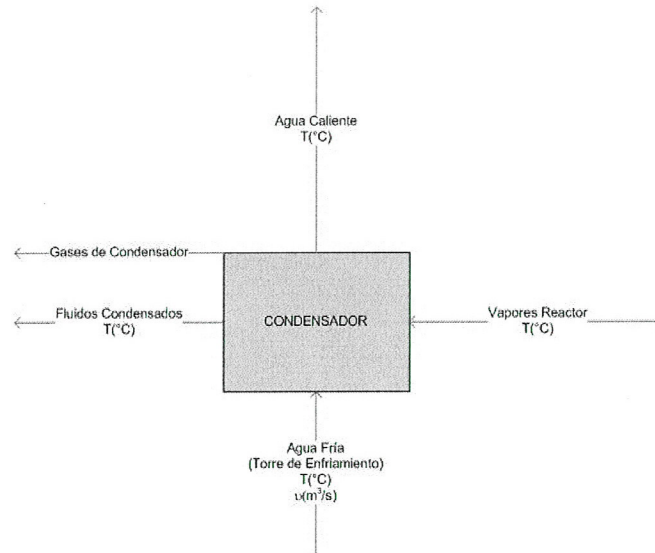


Diagrama 5
Diagrama de bloque de decantador

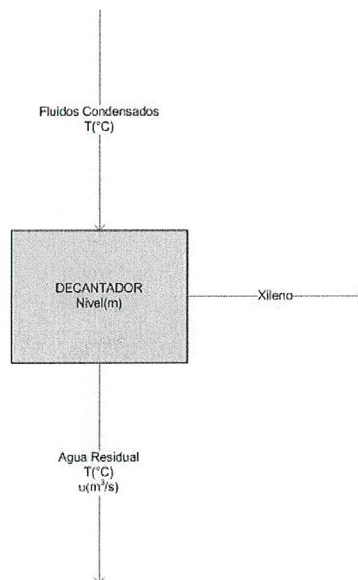


Diagrama 6
Diagrama de bloque de lavador de gases



Diagrama 7
Diagrama de bloque de tanque de dilución

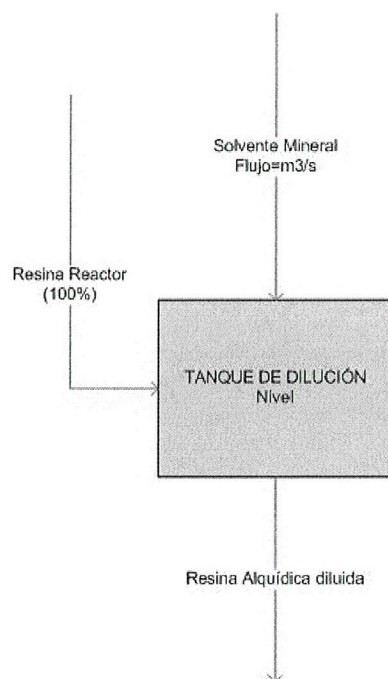


Diagrama 8
Diagrama de bloque de funcionamiento de reactor

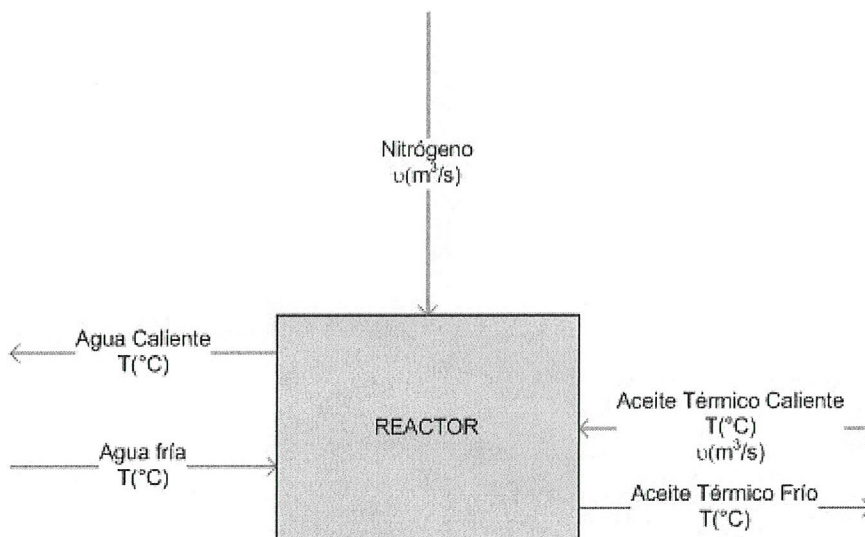
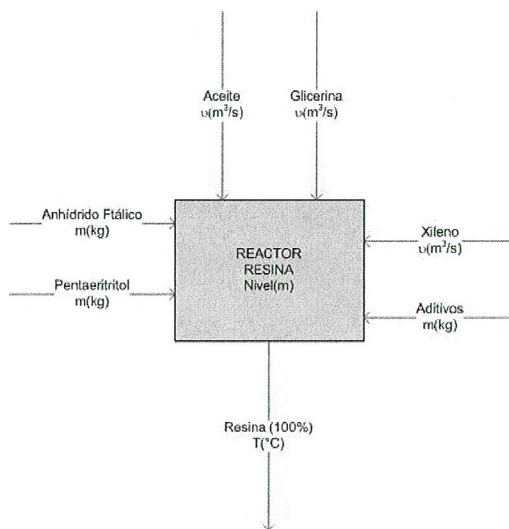
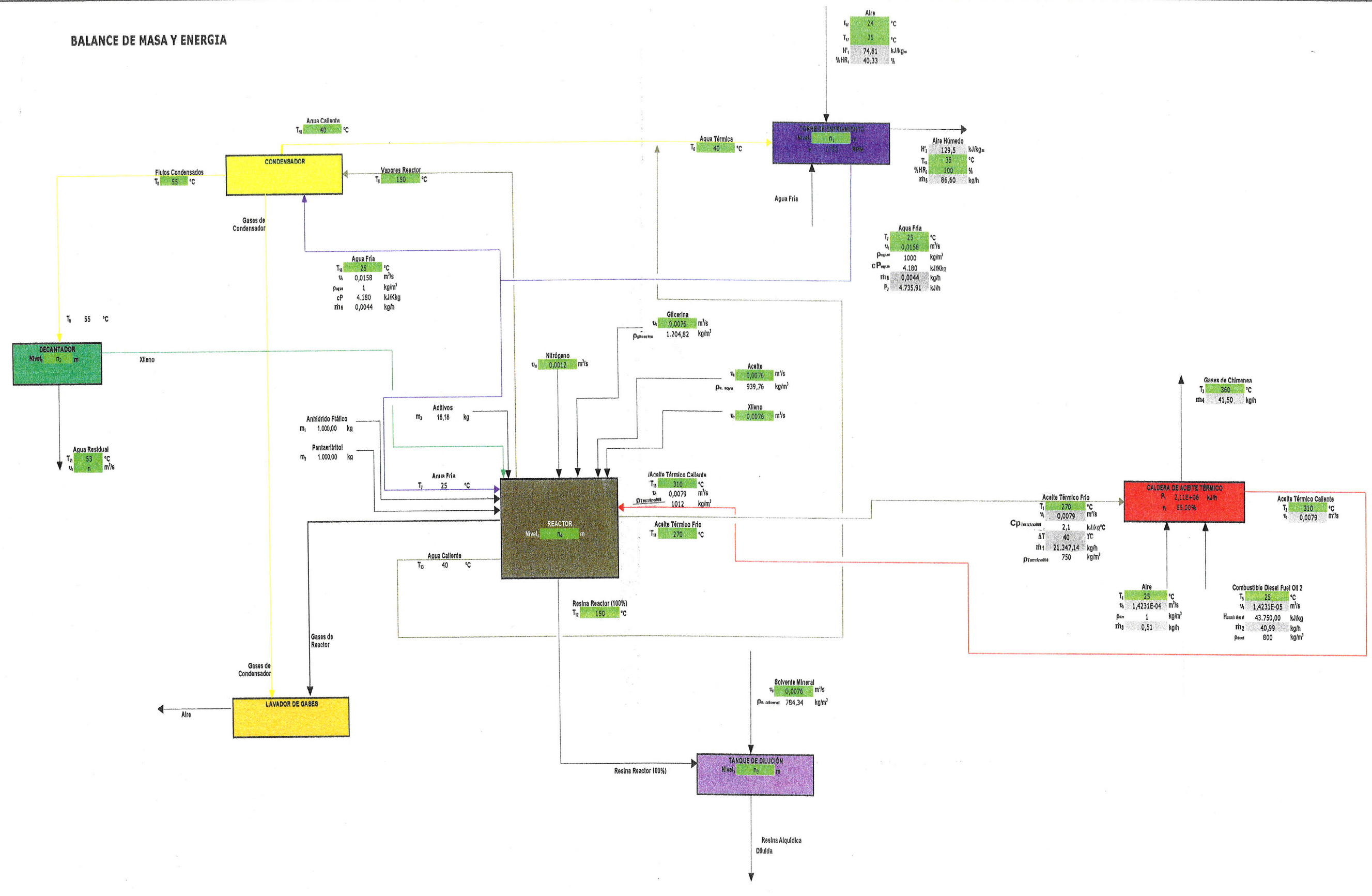


Diagrama 9
Diagrama de bloque de producto resina en reactor

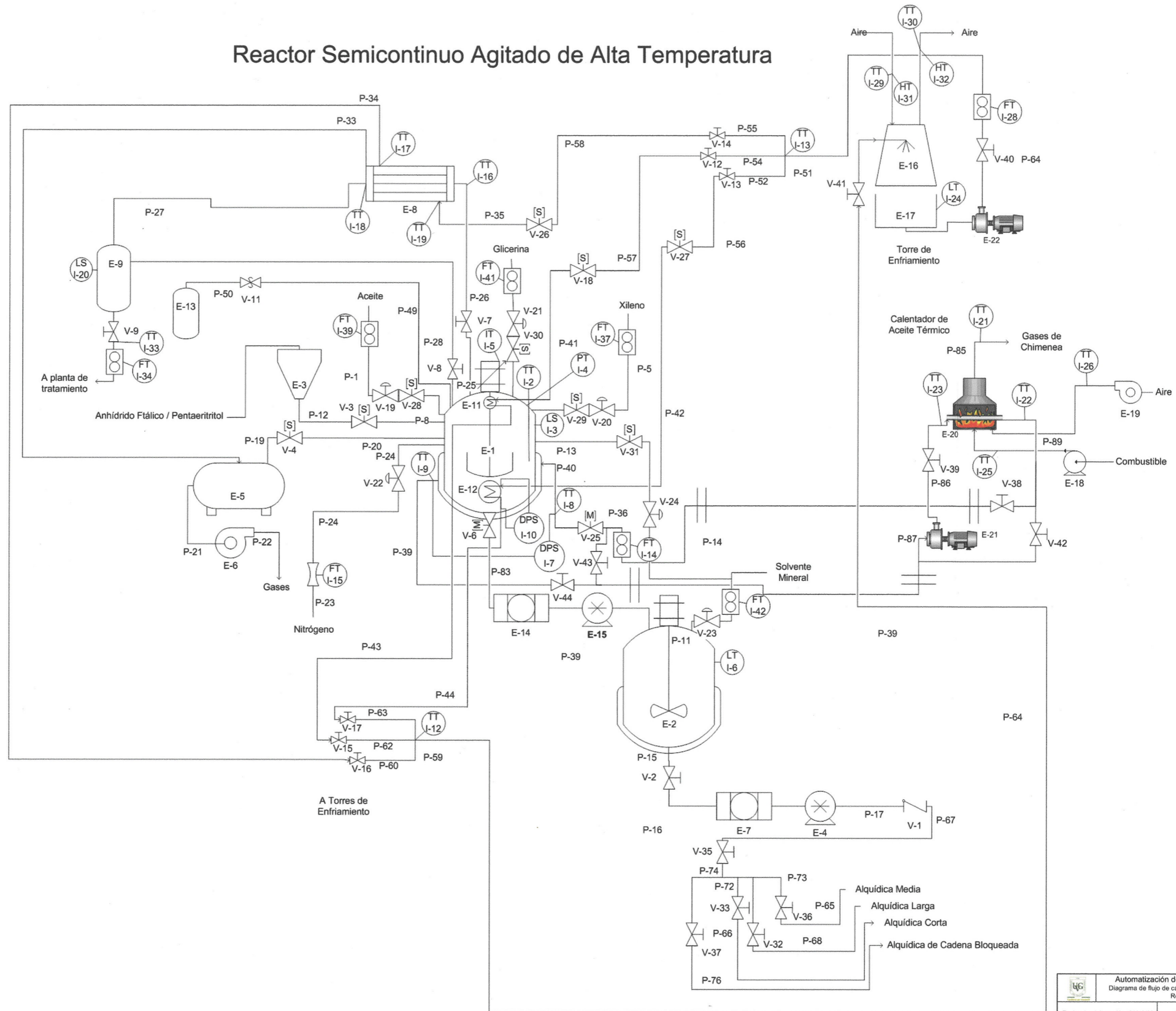



A continuación, se muestra el diagrama de flujo del proceso para la elaboración de resina de base Alquídic.

BALANCE DE MASA Y ENERGIA



Reactor Semicontinuo Agitado de Alta Temperatura



 Automatización de Reactor Semibatch Diagrama de flujo de carga, descarga y control del Reactor	
Fecha de elaboración: 21/10/09	Fecha de revisión: 5/11/09
Elaborado por: Ana Cristina Guirola	
Revisado por: Ing. Luis Nuñez	

A continuación se muestran los flujos y las condiciones de operación de cada equipo.

Diagrama 11

Diagrama de condiciones de operación y flujos de caldera

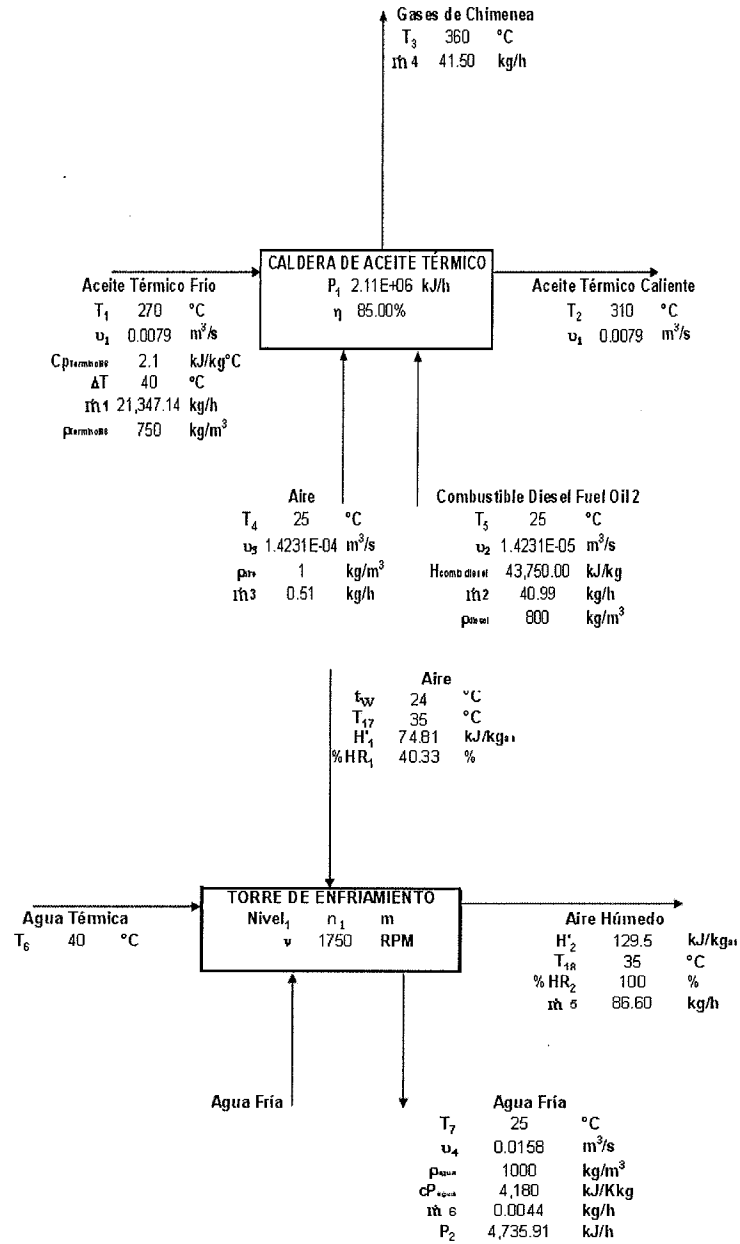


Diagrama 13.

Diagrama de condiciones de operación y flujos de condensador

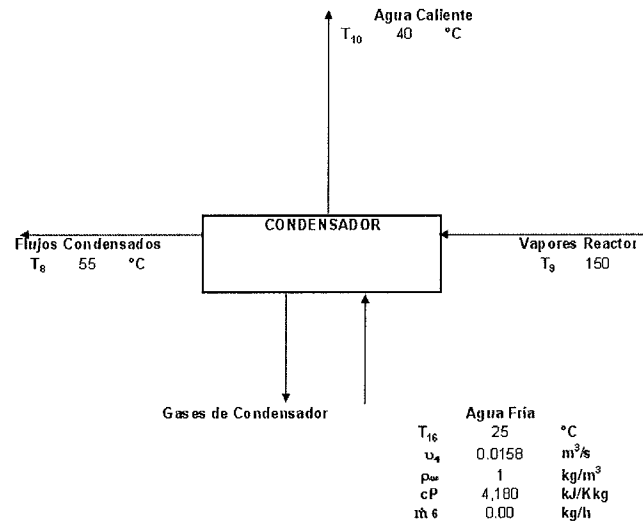


Diagrama 14.

Diagrama de condiciones de operación y flujos de decantador

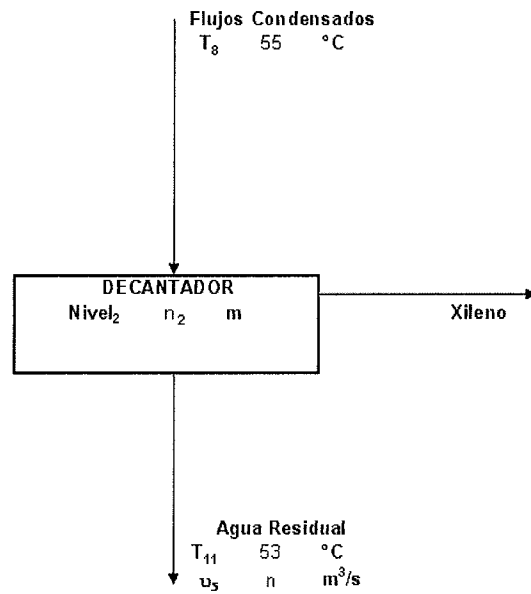


Diagrama 15

Diagrama de condiciones de operación y flujos de tanque de dilución

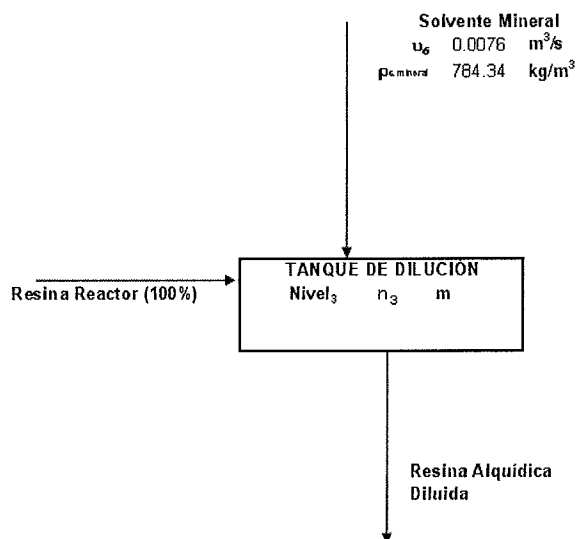


Diagrama 16

Diagrama de condiciones de operación y flujos de reactor resina

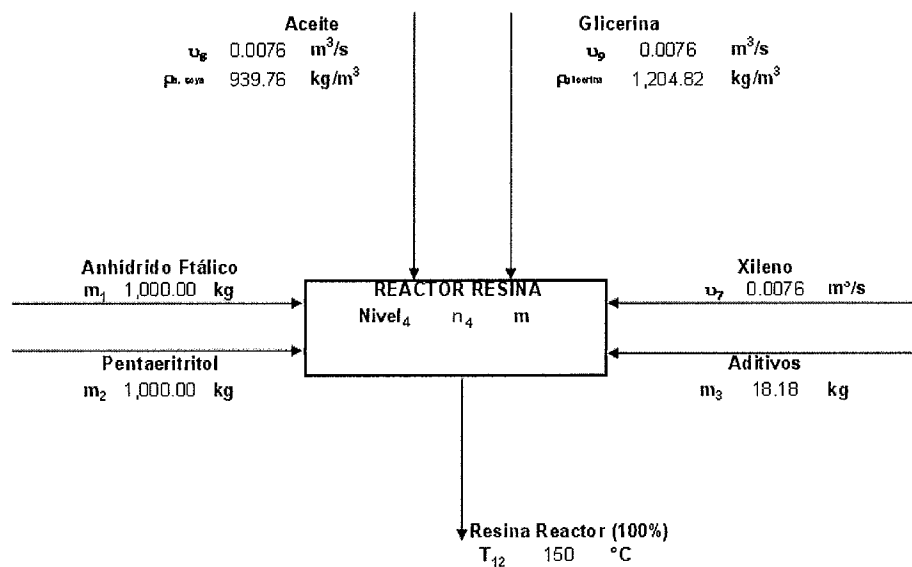


Diagrama 17.

Diagrama de condiciones de operación y flujos de funcionamiento de reactor

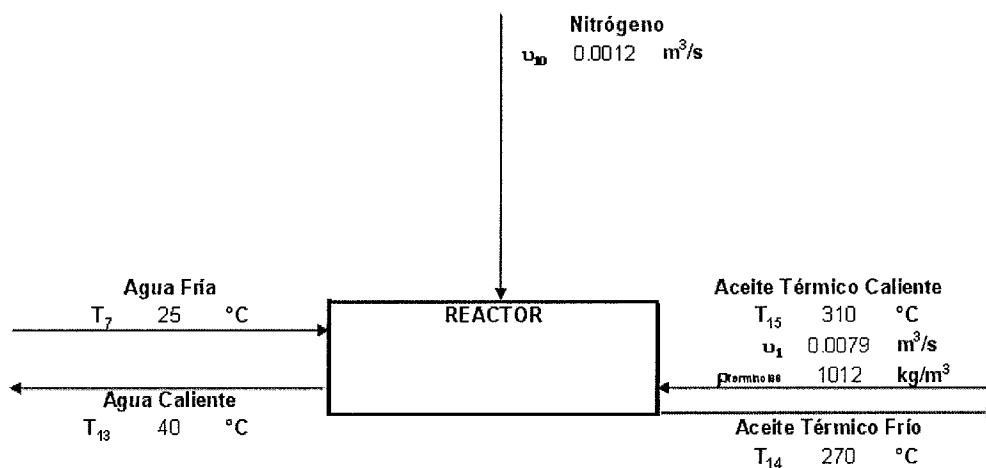


Tabla 17

Cálculo de equipos y actuadores necesarios

para llevar a cabo el proceso de una manera automática. Instrumentación

P	CAPACIDAD/TIPO	UNIDAD	T. CONEXIÓN	CANTIDAD	TOTAL
INSTRUMENTACIÓN					
1.- Medidores de Temperatura					17
1.1	0-100	°C	1.5"	9	
1.2	0-200	°C	1.5"	1	
1.3	0-400	°C	1.5"	6	
1.4	0-850	°C	1.5"	1	
2.- Medidor de Amperaje					1
2.1	50	AMP	1.5"	1	
3.- Medidor de Flujo Volumétrico					8
3.1	0-0.001	m³/s	1.5"	1	
3.2	0-0.005	m³/s	1.5"	6	
3.3	0.04	m³/s	1.5"	1	
4.- Medidor de Humedad					2
4.1	0-100	%	1.5"	2	
5.- Medidor de Nivel					4
5.1	Switch		1.5"	3	
5.2	Sensor		1.5"	1	
6.- Medidor de Presión					3
6.1	Switch		2"	2	
6.1	±15	PSI	2"	1	

Tabla 18

Cálculo de equipos y actuadores necesarios para llevar a cabo el proceso de una manera automática.

Válvulas

P	DETALLE	T.VÁLVULA	T. LÍNEA	CLASE V.	CANTIDAD	TOTAL
VÁLVULAS						
1.- Válvula O-I de Bola de Control						9
1.1	Resina Alquídica	Bola	3"	Control con Posiciones	1	
1.2	Solvente Mineral	Bola	3"	Control con Posiciones	1	
1.3	Aceite	Bola	3"	Control con Posiciones	1	
1.4	Glicerina	Bola	3"	Control con Posiciones	1	
1.5	Xileno	Bola	3"	Control con Posiciones	1	
1.6	Aceite Térmico	Bola	3"	Control con Posiciones	1	
1.7	Agua Fría	Bola	3"	Control con Posiciones	3	
2.- Válvula O-I de Compuerta						2
2.1	Anhídrido Ftálico/Penta	Compuerta	3"	Control con Posiciones	1	
2.2	Lavador Gases	Compuerta	3"	Control con Posiciones	1	
3.- Válvula Posición Modulada						5
3.1	Solvente Mineral	Modulada	3"	Control con Posiciones	1	
3.2	Aceite	Modulada	3"	Control con Posiciones	1	
3.3	Glicerina	Modulada	3"	Control con Posiciones	1	
3.4	Xileno	Modulada	3"	Control con Posiciones	1	
3.5	Nitrógeno	Modulada	3"	Control con Posiciones	1	

Tabla 19.

Cálculo de equipos y actuadores necesarios para llevar a cabo el proceso de una manera automática. PLC

P	CAPACIDAD/TIPO	T. CONEXIÓN	CANTIDAD
PLC			
4.1	Salida Análoga	16 CH	2
4.2	Entrada Análoga	16 CH	2
4.3	Salida Digital	16 POINT	1
4.4	Entrada Digital	64 POINT	1
4.5	Controlador	266 MHZ	2
4.6	Fuente de Poder	VDC	2
4.7	Base Módulos	11 MODULOS	1

IX. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Este trabajo de investigación tiene por objetivo obtener el diseño de la automatización de un reactor de tipo Semicontínuo para la producción de resina alquídica. Por lo tanto, se elaboró un diseño de arquitectura básica para poder controlar el proceso por medio de un controlador programable.

La primera parte del diseño consistió en la elaboración del balance de masa y energía de cada equipo que forma parte en el proceso de producción de resina alquídica. Para ello, se comenzó elaborando los diagramas de bloques de cada equipo donde indican las entradas, salidas y las mediciones que se obtienen ya sea por medio instrumental automatizado o calculado. Luego se prosiguió a elaborar el diagrama de flujo del proceso, donde se muestra el equipo, los instrumentos y válvulas ya instaladas y las seleccionadas para el diseño de automatización. Por medio del balance de masa y energía, se pueden obtener los cálculos de los flujos y las condiciones de operación ideales para el sistema. Dado que es un diseño de automatización, los datos mostrados en el balance de masa y energía son estimados y muestran un sistema ideal del proceso. Se debe implementar éste diseño de automatización para poder obtener los valores reales, tales como temperaturas y flujos volumétricos, siempre y cuando se mantengan las condiciones de operación establecidas para obtener un proceso de producción eficiente.

Para la elaboración del diseño de automatización, se dividió el sistema en cinco fases principales. La primera fase consistió en obtener un control del calentamiento del reactor. Para el calentamiento, se utiliza el Aceite Terminol 66 que está denominado en el proceso como el aceite térmico. Éste es calentado en la caldera Ciclonik que ya está implementada en el proceso. Se seleccionaron válvulas y medidores de flujo que están relacionados al medidor de temperatura interna del reactor. Para ello se creó un lazo de control que manda la señal a un controlador programable y se mantiene un control del calentamiento ideal del reactor. El paso del aceite térmico caliente de la caldera a la chaqueta del reactor, está controlado por un medidor de flujo y un medidor de temperatura lo cual permite conocer la eficiencia térmica de la caldera. El regreso del aceite térmico frío de la chaqueta del reactor a la caldera está controlado por medio de un medidor de temperatura que muestra la eficiencia de calentamiento del reactor dado por una transferencia de calor que ocurre del aceite térmico al reactor. Adicionalmente, la caldera lleva un control de la temperatura del combustible Diesel Fuel Oil 2, el aire y los gases de chimenea para poder calcular la eficiencia de combustión de la caldera. El flujo másico del combustible es calculado por medio de la relación entre la potencia y la eficiencia de la caldera y la entalpía de combustión del diesel. Teniendo el flujo másico y la densidad del combustible, se obtiene el flujo volumétrico del combustible de $1.42 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

La segunda fase se trata del enfriamiento del reactor. Dado que la reacción de la producción de resina alquídica es una reacción endotérmica, es importante tener un control en la temperatura interna del reactor. Por lo tanto, el reactor contiene un serpentín interno el cual pasa agua fría para variar la temperatura de acuerdo al proceso. El agua fría proviene de la torre de enfriamiento que ya este implementada y distribuye agua al serpentín del reactor, al eje del reactor y al condensador. Para llevar un control del consumo de agua fría, se utilizan medidores de temperatura, humedad y medidores de flujo volumétrico. Los medidores de temperatura y de humedad proveen información tal como el flujo másico de aire húmedo que se obtiene por la diferencia de entalpías de aire seco que se calculan por medio de las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo. De esta manera se puede llevar un control de la eficiencia de la torre de enfriamiento. El tanque de la torre de enfriamiento tiene un transmisor de nivel el cual mide el nivel del agua enfriada que es bombeada a los tres puntos de distribución. El proceso de enfriamiento es un proceso continuo y la relación de agua fría distribuida se controla por medio de un medidor de flujo y un medidor de temperatura.

La tercera fase consiste en el control de la adición de materiales al reactor. Hay tres tipos de control en la adición de materiales. En el primer tipo que aplica para la adición de la Glicerina, el Xileno y el Aceite de Soya, se tiene un control por medio de medidores de flujo y válvulas automatizadas que permiten el paso por control de posición. Las válvulas utilizadas son una válvula modulada y una válvula de bola. Se arregla de esta manera para proteger la válvula modulada dado que la tubería de descarga está conectada directamente al reactor. El anhídrido Ftálico y el Pentaeritritol son pasados directamente por una tolva y el flujo de material es controlado por una válvula modulada. El nitrógeno agregado es controlado por un medidor de flujo y una válvula de control.

La cuarta fase es el control de las condiciones internas del reactor la cual consiste en: la reacción que se lleva a cabo dentro del reactor, la condensación de vapores de la reacción y la decantación. Una de las mediciones internas del reactor es la temperatura. Es importante llevar el control de la temperatura interna por varias razones. La temperatura es el parámetro que indica si la reacción se está llevando adecuadamente. También indica si ya se llegó a la energía de activación para que la reacción se dé satisfactoriamente. Por ello, se relaciona la temperatura interna del reactor con el calentamiento dado por el aceite térmico o el enfriamiento dado por el agua fría en el serpentín. Otra medición es la presión interna del reactor que es controlada principalmente para la prevención de accidentes. El nivel del reactor es controlado por un switch de nivel como una medición de seguridad para no sobre cargar el reactor. El agua extraída en forma de vapores, son llevados al condensador que tiene un sistema de enfriamiento con agua proveniente de la torre de enfriamiento. En el condensador se tienen tres lazos de control con el propósito de tener controlado el flujo de agua fría respecto a la temperatura del agua de enfriamiento, la temperatura

de los vapores del reactor y finalmente la temperatura de los flujos condensados. De esta manera se obtiene un control para optimizar la separación de Xileno y de agua que se da en el decantador. El decantador tiene un Switch de nivel el cual indica por diferencia de densidades, la separación del Xileno y del agua. Esto permite tener la seguridad que el agua no regresará al reactor y solamente se recircule el Xileno para volverlo a utilizar en el proceso de extracción de agua. El agua obtenida del decantador tiene un control de temperatura y un medidor de flujo que muestra el avance de la reacción de resina. En caso que el flujo de agua sea mínimo, no se está obteniendo la eficiencia deseada y el tiempo de proceso de extracción de agua aumentará. El agua finalmente es dirigida a la planta de tratamiento.

Finalmente, al ya obtener aprobados los parámetros de calidad, se comienza a bombear la resina al tanque de dilución la cual pasa previamente por un filtro de canasta ya implementado. El proceso de lavado del reactor consiste en adicionar solvente mineral con calentamiento. De la misma manera se lavan las tuberías de transporte de resina a los tanques de almacenamiento así como la tubería al tanque de dilución. Dependiendo de la resina que se desee, será la cantidad de solvente mineral adicionado a la resina. El flujo de solvente mineral es controlado por un medidor de flujo y una válvula modulada. El control del tanque de dilución involucra dos lazos de control. Estos consisten en el control del flujo de resina que entra al tanque y el nivel transmitido, luego se relaciona el flujo de solvente mineral y el nivel del tanque de dilución. Al ya obtener la resina alquídica, se bombea la resina a los tanques de almacenamiento de resina alquídica. La distribución de la resina está controlada por válvulas manuales que están controladas por el operador.

Al ya tener establecidos los instrumentos y válvulas que se utilizarán para la automatización del sistema para la producción de resina alquídica, se procedió a realizar el cálculo de los equipos de detección y de los actuadores necesarios. Finalmente se obtuvo una cantidad de 17 medidores de temperatura que difieren en cuanto a la capacidad de cada uno, se obtuvo 1 medidor de amperaje de aproximadamente de 50 amperios para el eje del reactor, 8 medidores de flujo volumétrico de diversas capacidades, 2 medidores de humedad de 0-100%, 4 medidores de nivel ya sean de switch o sensores y 3 medidores de presión ya sean en switch para el agua de enfriamiento y el aceite térmico o de ± 15 PSI para la medición de presión interna del reactor. Las válvulas seleccionadas para la automatización son de tres tipos principales, 9 válvulas O-I de Bola de Control con Posiciones, 2 válvulas O-I de Compuerta y control con Posiciones y 5 válvulas de Posición Modulada con control con Posiciones.

Al tener los instrumentos y las válvulas, se prosiguió a establecer el tipo de señal utilizada para cada instrumento y válvula. Se obtuvo entonces una cantidad de 50 señales de entrada digital, 10 señales de salida digital, dando un total de 60 señales digitales. Para señales análogas se obtuvo una cantidad de 32 señales de entrada análoga y 19 señales de salida análoga, dando un total de 51 señales análogas. Al

obtener la cantidad de señales y la cantidad de lazos de control, se prosiguió a calcular la cantidad de memoria necesaria para el controlador a seleccionar. Se obtuvo un total de 196.02 kilobytes y, dado por la expansión que se tomará en cuenta y por la automatización futura, no solo del reactor, sino de los equipos involucrados en la producción de resina alquídica, se seleccionó un controlador de 50 MB. Por la cantidad de entradas análogas se seleccionaron dos módulos de 16 canales. Para la cantidad de señales de salida análoga, se seleccionaron dos módulos de 16 canales dejando disponibles 13 canales para futuro uso. En las señales de entrada digital, se seleccionó un módulo de 64 canales dejando disponibles 14 canales. Y para las señales de salida digital, se seleccionó un módulo de 16 canales dejando disponibles 6 canales. Dado que los módulos seleccionados son de corriente directa, se seleccionó una fuente de poder con una corriente de 24-48 VDC. Finalmente se seleccionó una base con una capacidad de 11 módulos teniendo en cuenta la expansión y el incremento de señales por la automatización del sistema completo.

Dentro de la cotización de los instrumentos utilizados, las válvulas seleccionadas y el equipo para el controlador programable, se realizaron cotizaciones con proveedores Internacionales y Nacionales. El costo final estimado para la automatización del reactor Semicontínuo para la producción de resina de base alquídica fue de \$64,592.55 tomando en cuenta el costo de la ingeniería del controlador que se estimó con un aproximado del 60% del costo del equipo que involucra el controlador programable.

X. CONCLUSIONES

- El sistema de calentamiento del aceite térmico dado por la caldera, tiene como instrumentos críticos que son indispensables para el control de seguridad del sistema, los medidores de temperatura en la entrada y salida del reactor.
- Los instrumentos auxiliares en el sistema de calentamiento dado por la caldera que sirven para determinar las condiciones óptimas de operación y para obtener el balance de masa y energía son los medidores de temperatura del aceite térmico frío y caliente en la caldera y el medidor de flujo de aceite térmico caliente en la entrada al reactor.
- Los instrumentos necesarios para determinar eficiencia de combustión en la caldera son los medidores de temperatura del aire de entrada a la caldera, temperatura del Combustible y temperatura de Gases de Chimenea.
- El sistema de enfriamiento del reactor dado por el agua fría proveniente de la torre de enfriamiento, tiene como instrumentos auxiliares los medidores de temperatura y humedad del aire y aire húmedo y los medidores de temperatura y flujo volumétrico del agua fría.
- Los instrumentos que sirven para determinar la eficiencia de enfriamiento y la relación de agua fría distribuida son el medidor de temperatura de agua térmica en la entrada de la torre y el medidor de nivel del tanque de la torre de enfriamiento.
- Los instrumentos necesarios para la descarga de materiales al reactor son medidores de flujo volumétrico del Nitrógeno, Glicerina, Aceite de Soya y Xileno y el medidor de nivel del reactor que funciona principalmente para la seguridad de no sobrecargar el reactor.
- Los instrumentos auxiliares para el control de condiciones internas del reactor son medidores de temperatura de los vapores de reactor, flujos condensados y agua residual en la salida del decantador. Así como el medidor de flujo volumétrico de agua residual.
- Los medidores para controlar la seguridad del sistema de condiciones internas del reactor son medidores de nivel del reactor y del decantador y el medidor de amperaje del eje del reactor.

- Los instrumentos necesarios para determinar eficiencia de calentamiento del reactor son los medidores de temperatura del aceite térmico caliente y del aceite térmico frío.
- El tanque de dilución tiene como instrumento auxiliar el medidor de temperatura de la resina 100%, medidor de flujo volumétrico del solvente mineral y el medidor de nivel del tanque de dilución.
- El costo estimado de los instrumentos utilizados para la automatización del reactor es de \$17,785.35 siendo el 27.53% del costo total.
- Las válvulas utilizadas para la automatización del reactor son 9 válvulas O-I de bola de control, 2 válvulas O-I de Compuerta y 5 válvulas de posición modulada dando un costo de \$39,420.00 siendo el 61.03% del costo total.
- Se tiene un total de 51 señales análogas, 60 señales digitales y 7 lazos de control, dando así un controlador de 196.02 kilobytes.
- El costo estimado para el sistema completo del controlador programable PLC para la automatización del reactor es de \$7,387.20 siendo el 11.44% del costo total.
- El costo total estimado para la automatización del Reactor Semicontínuo es de \$64,592.55.

XI. RECOMENDACIONES

- Dado a que el diseño de este trabajo está enfocado principalmente en la automatización del reactor, se recomienda, para obtener un sistema completamente eficiente y productivo, realizar la automatización de todos los equipos involucrados en el proceso.
- Se debe considerar la expansión y el incremento en equipos y actuadores necesarios para la automatización del sistema completo de producción, para el cual se recomienda utilizar un controlador de mayor capacidad para soportar la carga de señales y lazos de control adicionales.
- En la implementación del diseño de automatización, se recomienda hacer una medición de la potencia de cada equipo para saber cuál es el consumo total de energía.
- Dado que no se puede obtener una curva teórica de las condiciones internas del reactor tales como la curva temperatura y viscosidades, se recomienda hacer un estudio de la cinética del reactor y de las constantes fisicoquímicas para saber detalladamente el avance en la eficiencia de la reacción.
- El proceso de producción de resinas está catalogado como una zona peligrosa en una planta de producción. Por lo tanto, se recomienda tener el área automatizada alejada de la planta central de producción y tener las precauciones necesarias en cuanto a seguridad industrial, para el personal operativo.

XII. BIBLIOGRAFÍA

Blanco, A. y Villegas, L. V. 1966. *Tecnología de Pinturas y Recubrimientos Orgánicos*. Editorial Química. México. 94-98.

Blas, L. 1962. *Disolventes y Plastificantes*. Segunda Edición. Madrid.

Fogler, H. S. 2001. *Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas*. Tercera Edición. Pearson Education. México. Pag 2-18.

Geankoplis, C. 1998. *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. Tercera Edición. Editorial CECSA. México. 15-64.

Luyben. W. 2007. *Chemical Reactor Design and Control*. Hoboken. New Jersey. 2-38

Nicholson, J. W. 2006. *The Chemistry of Polymers*. Third Edition. University of Greenwich. 5-20

Paton, T. C. 1962. *Alkyd Resin Technology Interscience*. New York. 20-72.

Payne, H. F. 1954. *Organic Coating Technology*. First Edition. John Wiley and Sons. New York.

Pérez, M. A. 2004. *Controlador Lógico Programable*. 1-8. <http://www.control-systems-principles.co.uk/whitepapers/spanishwp/14ProgLogicSP.pdf>

Young, R. J. y Novell, P. A. 1991. *Introduction to Polymers*. Second Edition. Chapman and Hall. London. Chapter 1 and 2.

Documentos electrónicos consultados:

Nunez, M. 2001. *Presión*. 1-28. <http://www.monografias.com/trabajos11/presi/presi.shtml>

Ordóñez, J. A. 2005. *Instrumentación Industrial-Medición de Caudal*. 19. <http://www.sapiens.itgo.com/documents/doc19.htm>

Ojeda, M. y Rodríguez, G. 2007. *Montaje de Termocuplas*. 1-12.

http://www.sapiensman.com/medicion_de_temperatura/termocuplas3.htm

Universal Industrial Gases, Inc. 2009. *Psychrometric Calculator Properties of Air*.

<http://www.uigi.com/WebPsych.html>

XIII. ANEXOS

a. Datos originales

Tabla 20
Datos teóricos caldera de aceite térmico

Datos		
Capacidad calorífica terminol 66	$C_{p\text{Terminol66}}$	2.10 kJ/kg°C
Densidad terminol 66	$\rho_{\text{Terminol66}}$	750.00 kg/m ³
Densidad aire	ρ_{aire}	1.00 kg/m ³
Entalpía de combustión diesel	$H_{\text{comb diesel}}$	43,750.00 kJ/kg
Densidad diesel	ρ_{diesel}	800.00 kg/m ³
Potencia caldera ciclonik	P_1	2.11E+06 kJ/h
Eficiencia caldera ciclonik	η	85.00 %

Tabla 21
Datos estimados caldera de aceite térmico

Datos		
Temperatura aceite térmico frío	T_1	270.00 °C
Temperatura aceite térmico caliente	T_2	310.00 °C
Temperatura gases de chimenea	T_3	360.00 °C
Temperatura aire entrada caldera	T_4	25.00 °C
Temperatura combustible diesel fuel Oil 2	T_5	1.00 °C

Tabla 22
Datos teóricos torre de enfriamiento

Datos		
Capacidad calorífica agua	$C_{p\text{agua}}$	4,180.00 kJ/kgK
Densidad agua fría salida torre	ρ_{agua}	1,000.00 kg/m ³
Frecuencia torre enfriamiento	ν	1,750.00 RPM

Tabla 23
Datos estimados torre de enfriamiento

Datos		
Temperatura agua fría salida torre	T_7	25.00 °C
Flujo volumétrico agua fría salida torre	v_4	0.0158 m ³ /s
Temperatura de bulbo seco aire húmedo	T_{18}	35.00 °C
Porcentaje de humedad relativa aire húmedo	%HR ₂	100.00 %
Temperatura de bulbo húmedo aire entrada torre	T_W	24.00 °C
Temperatura de bulbo seco aire entrada torre	T_{17}	35.00 °C
Temperatura agua térmica	T_6	40.00 °C
Nivel tanque torre de enfriamiento	Nivel ₁	n_1 m

Tabla 24
Datos estimados condensador

Datos		
Temperatura flujos condensados	T_8	55.00 °C
Temperatura vapores reactor	T_9	150.00 °C
Temperatura agua caliente	T_{10}	40.00 °C
Temperatura agua fría torre enfriamiento	T_{16}	25.00 °C

Tabla 25
Datos estimados decantador

Datos		
Temperatura agua residual	T_{11}	53.00 °C
Flujo volumétrico agua residual	v_5	n m ³ /s
Nivel decantador	Nivel ₂	n_2 m

Tabla 26
Datos teóricos y datos estimados tanque de dilución

Datos		
Densidad solvente mineral	$\rho_{s,\text{mineral}}$	784.34 kg/m ³
Flujo volumétrico solvente mineral	v_6	0.0076 m ³ /s
Nivel tanque de dilución	Nivel ₃	n_3 m

Tabla 27
Datos teóricos reactor

Datos		
Densidad glicerina	$\rho_{\text{glicerina}}$	1,204.82 kg/m ³
Densidad aceite de soya	$\rho_{\text{a.soya}}$	939.76 kg/m ³
Densidad terminol 66	$\rho_{\text{Terminol66}}$	1,012.00 kg/m ³

Tabla 28
Datos estimados reactor

Datos		
Flujo volumétrico xileno	v_7	0.0076 m ³ /s
Flujo volumétrico aceite de soya	v_8	0.0076 m ³ /s
Flujo volumétrico glicerina	v_9	0.0076 m ³ /s
Flujo volumétrico nitrógeno	v_{10}	0.0012 m ³ /s
Temperatura resina reactor (100%)	T_{12}	150.00 °C
Temperatura agua caliente reactor	T_{13}	40.00 °C
Temperatura aceite térmico frío	T_{14}	270.00 °C
Temperatura aceite térmico caliente	T_{15}	310.00 °C
Nivel reactor	Nivel ₄	n_4 m
Peso anhídrido fránico	m_1	1000.00 kg
Peso pentaeritritol	m_2	1000.00 kg
Peso aditivos	m_3	18.18 kg

b. Cálculos de muestra

Cálculos de muestra para balance de masa y energía de la caldera

1. Cálculo de flujo másico de Aceite Térmico (\dot{m}_1) que entra a la caldera y proviene del reactor. Donde la capacidad calorífica del Aceite Terminol 66 ($C_{p\text{Terminol66}}$) es de 2.1 kJ/kg°C, la potencia de la Calera Ciclonik es de 2.11×10^6 kJ/h, la eficiencia de la caldera (η) es de 85%, la temperatura del aceite térmico frío (T_1) es de 270°C y el aceite térmico caliente (T_2) es de 310°C.

$$P_1 = m_1 C_{pTerminol66} \Delta T$$

$$m_1 = \frac{P_1}{C_{pTerminol66} \Delta T} \times \eta \quad \text{Ecuación 8}$$

$$m_1 = \frac{2.11 \times 10^6 \text{ kJ/h}}{(2.1 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}) \times (310 - 270)^\circ\text{C}} \times 85\%$$

$$m_1 = 21,347.14 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

2. Cálculo del flujo volumétrico de Aceite Térmico Frío (v_1) en donde el flujo másico (\dot{m}_1) es de 21,347.14 kg/h y la densidad del Aceite Terminol 66 ($\rho_{Terminol66}$) es de 750 kg/m³.

$$v_1 = \frac{m_1}{\rho_{Terminol66}} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$v_1 = \frac{21,347.14 \text{ kg/h}}{750 \text{ kg/m}^3} \times \frac{1 \text{ h}}{3,600 \text{ s}}$$

$$v_1 = 0.0079 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

3. Cálculo del flujo másico de Combustible diesel Fuel Oil 2 (\dot{m}_2) en donde la entalpía de combustión del diesel es de 43,750 kJ/kg, la potencia de la caldera Ciclonik (P_1) es de 2.11x10⁶ kJ/h y la eficiencia de la caldera (η) es de 85%.

$$P_1 = \dot{m}_2 \Delta H_{comb}^{diesel}$$

$$\dot{m}_2 = \frac{P_1}{\Delta H_{comb}^{diesel}} \times \eta \quad \text{Ecuación 10}$$

$$\dot{m}_2 = \frac{2.11 \times 10^6 \text{ kJ/h}}{43,750 \text{ kJ/kg}} \times 85\%$$

$$\dot{m}_2 = 40.99 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

4. Cálculo del flujo volumétrico de Combustible Diesel Fuel Oil 2 (v_2) en donde el flujo másico Combustible Diesel Fuel Oil 2 (\dot{m}_2) es de 40.99 kg/h y la densidad del Combustible Diesel Fuel Oil 2 (ρ_{diesel}) es de 800 kg/m³.

$$\begin{aligned}
 v_2 &= \frac{m_2}{\rho_{diesel}} && \text{Ecuación 11} \\
 v_2 &= \frac{40.99 \text{ kg/h}}{800 \text{ kg/m}^3} \times \frac{1 \text{ h}}{3,600 \text{ s}} \\
 v_2 &= 1.43 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

5. Cálculo de flujo volumétrico de aire de entrada (v_3) a Caldera en donde el flujo volumétrico de Combustible Diesel Fuel Oil 2 (v_2) es de $1.43 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ y teniendo la relación siguiente:

$$\begin{aligned}
 v_3 &= 10v_2 \\
 v_3 &= 10 \times 1.43 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s} \\
 v_3 &= 1.43 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

6. Cálculo de flujo másico de aire de entrada (m_3) a Caldera teniendo un flujo volumétrico de aire de entrada (v_3) de $1.43 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ y la densidad del aire (ρ_{aire}) de 1 kg/m^3 .

$$\begin{aligned}
 m_3 &= v_3 \times \rho_{aire} && \text{Ecuación 13} \\
 m_3 &= 1.43 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s} \times 1 \text{ kg/m}^3 \times \frac{3,600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \\
 m_3 &= 0.51 \frac{\text{kg}}{\text{h}}
 \end{aligned}$$

7. Cálculo de flujo másico de flujo de gases de chimenea (m_4) teniendo un flujo másico de aire de entrada (m_3) de 0.51 kg/h y un flujo másico de Combustible Diesel Fuel Oil 2 (m_2) de 40.99 kg/h .

$$\begin{aligned}
 m_4 &= m_3 + m_2 && \text{Ecuación 14} \\
 m_4 &= (0.51 + 40.99) \frac{\text{kg}}{\text{h}} \\
 m_4 &= 41.50 \frac{\text{kg}}{\text{h}}
 \end{aligned}$$

Cálculos de muestra para balance de masa y energía de la torre de enfriamiento

1. Cálculo de flujo másico de agua fría (\dot{m}_6) que sale de la Torre y es distribuido al Condensador, al Serpentin del Reactor y al Eje Rotatorio del Reactor. Donde el flujo volumétrico del agua fría (v_4) es de $0.0158 \text{ m}^3/\text{s}$ y la densidad del agua (ρ_{agua}) es de 1000 kg/m^3 .

$$\dot{m}_6 = v_4 \times \rho_{\text{agua}} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\dot{m}_6 = 0.0158 \text{ m}^3 / \text{s} \times 1000 \text{ kg} / \text{m}^3 \times \frac{3,600 \text{ s}}{1 \text{ h}}$$

$$\dot{m}_6 = 0.0044 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

2. Cálculo de la potencia de la bomba (P_2) para la salida del agua fría en donde la temperatura del agua térmica de entrada a la torre (T_6) que proviene del Condensador y del Serpentin del Reactor es de 40°C y la temperatura del agua fría que sale de la Torre de Enfriamiento (T_7) es de 25°C , la capacidad calorífica del agua ($C_{p\text{Agua}}$) es de $4,180 \text{ kJ/kgK}$ y el flujo másico de agua fría (\dot{m}_6) es de 0.0044 kg/h .

$$P_2 = \dot{m}_6 C_{p\text{agua}} \Delta T \quad \text{Ecuación 16}$$

$$P_2 = 0.0044 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 4,180 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times [(25 - 40) + 273.15] \text{K}$$

$$P_2 = 4,735.91 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

3. Cálculo de la entalpía del aire húmedo (H'_2) en donde la temperatura de bulbo seco del aire húmedo (T_{18}) es de 35°C y el porcentaje de humedad relativa ($\%HR_2$) es de 100% .

Por medio de la tabla de datos "Psychrometric Calculator Properties of Air" se ingresa la temperatura de bulbo seco (T_{18}) y el porcentaje de humedad relativa ($\%HR_2$) para obtener el dato de la entalpía del aire húmedo (H'_2) e información adicional.

$$T_{18} = 35^\circ\text{C}$$

$$\%HR_2 = 100\%$$

$$H'_2 = 129.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

4. Cálculo de la entalpía de aire de entrada a la Torre de Enfriamiento (H'_1) en donde la temperatura de bulbo húmedo del aire (T_w) es de 24°C y la temperatura de bulbo seco del aire (T_{17}) es de 35°C .

Por medio de la tabla de datos "Psychrometric Calculator Properties of Air" se ingresa la temperatura de bulbo húmedo (T_w) y la temperatura de bulbo seco (T_{17}) para obtener el dato de la entalpía del aire de entrada (H'_1), el porcentaje de humedad relativa ($\%HR_1$) e información adicional.

$$\begin{aligned}T_w &= 24^\circ\text{C} \\T_{17} &= 35^\circ\text{C} \\H'_1 &= 74.81 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ \%HR_1 &= 40.33\%\end{aligned}$$

Cálculo de flujo másico de aire húmedo en donde la potencia de la bomba (P_2) para la salida del agua fría es de $4,735 \text{ kJ/h}$ y la entalpía de aire de entrada a la Torre de Enfriamiento (H'_1) es de 74.81 kJ/kg y la entalpía del aire húmedo (H'_2) es de 129.5 kJ/kg .

$$\begin{aligned}P_2 &= m_5 \Delta H'_{as} && \text{Ecuación 17} \\m_5 &= \frac{P_2}{\Delta H'_{as}} \\m_5 &= \frac{4,734.91 \text{ kJ} / h}{(129.5 - 74.81) \text{ kJ} / \text{kg}} \\m_5 &= 86.60 \frac{\text{kg}}{h}\end{aligned}$$

c. Datos calculados

Tabla 29

Datos calculados para condiciones de operación de caldera de aceite térmico

Datos	
Flujo másico aceite térmico frío	\dot{m}_1 21,347.14 kg/h
Cambio de temperatura de aceite térmico	ΔT 40.00 °C
Flujo volumétrico aceite térmico frío y caliente	v_1 0.0079 m ³ /s
Flujo másico combustible diesel fuel oil 2	\dot{m}_2 40.99 kg/h
Flujo volumétrico combustible diesel fuel oil 2	v_2 1.42x10 ⁻⁵ m ³ /s
Flujo másico aire entrada caldera	\dot{m}_3 0.51 kg/h
Flujo volumétrico aire entrada caldera	v_3 1.42x10 ⁻⁴ m ³ /s
Flujo másico gases de chimenea	\dot{m}_4 41.5 kg/h

Tabla 30

Datos calculados para condiciones de operación de torre de enfriamiento

Datos	
Flujo masico agua fría salida torre	\dot{m}_6 0.0044 kg/h
Potencia bomba agua fría salida torre	P_2 4.74x10 ³ kJ/h
Flujo másico aire húmedo	\dot{m}_5 86.60 kg/h
Entalpía de aire húmedo	H'_2 129.50 kJ/kg _{gas}
Entalpía aire entrada torre	H'_1 74.81 kJ/kg _{gas}
Porcentaje de humedad relativa aire entrada torre	%HR ₁ 40.33 %

Tabla 31

Listado completo de equipo en el sistema del diseño para la automatización del reactor para la producción de resina de base alquídica. 1/2

NO.	EQUIPO	CAPACIDAD	UNIDAD	TAG	NOTAS	T. CONEXIÓN	TIPO V/B	T. LÍNEA	CLASE VÁLVULA	MATERIAL
1	Caldera de Aceite Térmico	2.1E+06	kJ/h	E-20			Caldera Acustubular			Acero Inoxidable
2	Temperatura Aceite Térmico Frío	0-400	°C	TT I-23		1.5"				
3	Temperatura Aceite Térmico Caliente	0-400	°C	TT I-22		1.5"				
4	Temperatura Gases de Chimenea	0-850	°C	TT I-21		1.5"				
5	Temperatura Aire Entrada Caldera	0-100	°C	TT I-26		1.5"				
6	Temperatura Combustible Diesel Fuel Oil 2	0-100	°C	TT I-25		1.5"				
7	Bomba Recirculación Aceite Térmico	12.5	HP	E-21			Centrífuga			Acero Inoxidable
8	Bomba de Combustible	1	HP	E-18			Centrífuga			Acero Inoxidable
9	Ventilador Centrífugo de Caldera	10	HP	E-19			Centrífuga			Acero Inoxidable
10	Válvula O-I Aceite Térmico Reactor Ch. Izquierda			V-42	De Paso		Bola	3"	Manual	
11	Válvula O-I Aceite Térmico Reactor Ch. Derecha			V-38	De Paso		Bola	3"	Manual	
12	Válvula O-I Aceite Térmico Frío			V-39	De Paso		Bola	3"	Manual	
13	Torre de Enfriamiento Agua	2.00E+06	kJ/h	E-16			Torre Enfriamiento			Madera
14	Tanque Agua de Enfriamiento	10000	GAL	E-17			Tanque			Concreto
15	Temperatura Agua Fría	0-100	°C	TT I-13		1.5"				
16	Transmisor Flujo Volumétrico Agua Fría	0-0.05	m ³ /s	FT I-28		1.5"				
17	Switch Nivel Torre de Enfriamiento			LT I-17		1.5"				
18	Medidor Humedad Aire Entrada Torre	0-100	%	HT I-31		1.5"				
19	Medidor Humedad Aire Húmedo Salida Torre	0-100	%	HT I-32		1.5"				
20	Bomba de Agua Torre de Enfriamiento	20	HP	E-22			Centrífuga			Acero Inoxidable
21	Válvula O-I Agua Fría Torre Enfriamiento			V-40	De Paso		Bola	3"	Manual	
22	Válvula O-I Agua Térmica Torre Enfriamiento			V-41	De Paso		Bola	3"	Manual	
23	Válvula O-I Agua Fría Carpentín Reactor			V-13	De Paso		Bola	2"	Manual	
24	Válvula O-I Agua Fría Eje Carpentín Reactor			V-12	De Paso		Bola	1.5"	Manual	
25	Válvula O-I Agua Fría Condensador			V-14	De Paso		Bola	2"	Manual	
26	Válvula O-I Agua Térmica Carpentín Reactor			V-17	De Paso		Bola	2"	Manual	
27	Válvula O-I Agua Térmica Eje Carpentín Reactor			V-15	De Paso		Bola	1.5"	Manual	
28	Válvula O-I Agua Térmica Condensador			V-16	De Paso		Bola	2"	Manual	
29	Válvula O-I Agua Fría Carpentín Reactor			V-27	Control		Bola	3"	Control con Posiciones	
30	Válvula O-I Agua Fría Eje Carpentín Reactor			V-18	Control		Bola	3"	Control con Posiciones	
31	Válvula O-I Agua Fría Condensador			V-26	Control		Bola	3"	Control con Posiciones	
32	Temperatura Aire Entrada Torre	0-100	°C	TT I-29		1.5"				
33	Temperatura Aire Húmedo Salida Torre	0-100	°C	TT I-30		1.5"				
34	Condensador	50	m ²	E-8			Concha y Tubos			Acero Inoxidable
35	Temperatura Flujos Condensados	0-100	°C	TT I-18		1.5"				
36	Temperatura Vapores Reactor	0-200	°C	TT I-16		1.5"				
37	Temperatura Agua Caliente	0-100	°C	TT I-17		1.5"				
38	Temperatura Agua Fría Torre Enfriamiento	0-100	°C	TT I-19		1.5"				
39	Válvula O-I Vapores Reactor			V-7	De Paso		Compuerta	8"		
40	Decantador	1000	L	E-9			Decantador			Acero Inoxidable
41	Temperatura Agua Residual	0-100	°C	TT I-33		1.5"				
42	Transmisor Flujo Volumétrico Agua Residual	0-1	m ³ /s	FT I-34		1.5"				
43	Sensor Nivel Decantador			LS I-20		1.5"				
44	Válvula O-I Agua Residual			V-9	De Paso		Bola	3"	Manual	
45	Válvula O-I Xileno Recirculado Reactor			V-8	De Paso		Bola	3"	Manual	
46	Tanque de Dilución Resina/Solvente Mineral	8000	GAL	E-2			Tanque			Acero Inoxidable

Tabla 32.

Listado completo de equipo en el sistema del diseño para la automatización del reactor para la producción de resina de base alquídica. 2/2

NO.	EQUIPO	CAPACIDAD	UNIDAD	TAG	NOTAS	T. CONEXIÓN	TIPO V/IB	T. LÍNEA	CLASE VÁLVULA	MATERIAL
47	Switch Nivel Tanque de Dilusión			LTI-6		15"				
48	Filtro de Canasta	15	L	E-7			Filtro Canasta			Acero Inoxidable
49	Bomba Desplazamiento Positivo Descarga Tanque Dilusión	15	HP	E-4			Engranajes			Acero Inoxidable
50	Válvula O-I Resina Alquídica			V-2	De Paso		Bola	3"	Manual	
51	Válvula de Retención Resina Alquídica			V-1	Cheque		Cheque	3"	Retención	
52	Válvula O-I Distribución Resina Alquídica			V-35	De Paso		Bola	3"	Manual	
53	Válvula O-I Resina Alquídica Corta			V-33	De Paso		Bola	3"	Manual	
54	Válvula O-I Resina Alquídica Media			V-36	De Paso		Bola	3"	Manual	
55	Válvula O-I Resina Alquídica Larga			V-32	De Paso		Bola	3"	Manual	
56	Válvula O-I Resina Alquídica de Cadena Bloqueada			V-37	De Paso		Bola	3"	Manual	
57	Válvula Posición Solvente Mineral			V-23	Membrana		Modulada	3"		
58	Transmisor Flujo Volumétrico Solvente Mineral	0-0.005	m ³ /s	FTI-6		15"				
59	Reactor	3000	GAL	E-1			Reactor Agitado			Acero Inoxidable
60	Temperatura Resina Reactor (100%)	0-400	°C	TTI-2		15"				
61	Transmisor Flujo Volumétrico Xileno	0-1	m ³ /s	FTI-37		15"				
62	Transmisor Flujo Volumétrico Aceite	0-1	m ³ /s	FTI-39		15"				
63	Transmisor Flujo Volumétrico Glicerina	0-1	m ³ /s	FTI-41		15"				
64	Filtro de Canasta	15	L	E-14			Filtro Canasta			Acero Inoxidable
65	Bomba Desplazamiento Positivo Descarga Tanque Dilusión	15	HP	E-15			Engranajes			Acero Inoxidable
66	Válvula O-I Resina Alquídica a Tanque Dilusión			V-6	Control		Fondo	3"	On/Off	
67	Válvula O-I Solvente Mineral Reactor Resina			V-31	Control		Bola	3"	Control con Posiciones	
68	Válvula Posición Solvente Mineral Reactor Resina			V-24	Membrana		Modulada	3"		
69	Válvula O-I Aceite Reactor Resina			V-28	Control		Bola	3"	Control con Posiciones	
70	Válvula Posición Aceite Reactor Resina			V-19	Membrana		Modulada	3"		
71	Válvula O-I Glicerina Reactor Resina			V-30	Control		Bola	3"	Control con Posiciones	
72	Válvula Posición Glicerina Reactor Resina			V-21	Membrana		Modulada	3"		
73	Válvula O-I Xileno Reactor Resina			V-29	Control		Bola	3"	Control con Posiciones	
74	Válvula Posición Xileno Reactor Resina			V-20	Membrana		Modulada	3"		
75	Válvula O-I Anhidrido Ftálico/Penta Reactor Resina			V-3	Control		Compuerta	3"	Control con Posiciones	
76	Temperatura Reactor	0-400	°C	TTI-2		15"				
77	Lavador de Gases	1000	GAL	E-5			Lavador Gases			Acero Inoxidable
78	Ventilador para Polvos	3	HP	E-6			Ventilador Polvos			Acero al Carbón
79	Válvula O-I Lavador de Gases			V-4	Control		Compuerta	3"	Control con Posiciones	
80	Temperatura Aceite Térmico Frío	0-400	°C	TTI-9		15"				
81	Temperatura Aceite Térmico Caliente	0-400	°C	TTI-8		15"				
82	Transmisor Flujo Volumétrico Nitrógeno	0-1	m ³ /s	FTI-15		15"				
83	Switch Presión Diferencial Agua Enfriamiento			DPSI-10		2"				
84	Switch Presión Diferencial Aceite Térmico Caliente			DPSI-7		2"				
85	Válvula Posición Nitrógeno Reactor			V-22	Membrana		Modulada	3"		
86	Válvula O-I Aceite Térmico Frío Reactor			V-44	De Paso		Bola	3"	Manual	
87	Válvula O-I Aceite Térmico Caliente Rectificado			V-43	De Paso		Bola	3"	Manual	
88	Válvula O-I Aceite Térmico Caliente Reactor			V-25	Control		Bola	3"	Control con Posiciones	
89	Switch Nivel Reactor			LSI-3		15"				
90	Amperaje Reactor	50	AMP	ITI-5		15"				
91	Presión Reactor	±15	PSI	PTI-4		2"				
92	Tanque de Seguridad	3000	GAL	E-13			Tanque			Acero Inoxidable
93	Disco de Ruptura	10	PSI	V-11	Seguridad		Disco de Ruptura	8"		
94	Transmisor Flujo Volumétrico Aceite Térmico	0-0.005	m ³ /s	FTI-14		15"				

A continuación se presenta la información general de los instrumentos utilizados en el diseño de automatización del Reactor Semicontínuo.

Figura 28

Transmisor de temperatura 0-100°C marca DWYER.

Precio Q. 1,206.00

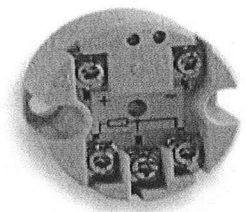
Marca	DWYER	
Modelo	651TC-01	
Rango	0-100°C	
Potencia Requerida	10-32 V DC	
Tiempo de Respuesta	2 mSec	
Uso de Montaje	2 HMV1	
Output	4-20 mA DC	
Precisión Temperatura	±0.1%	
Tipo Termocupla	K	
Conexión Eléctrica	Entrada Enroscada	
Tiempo de Entrega	1-3 días	
Peso Carga	0.06 lbs	
País de Origen	Estados Unidos	
Página Web	www.grainger.com	
Proveedor	www.grainger.com	

Figura 29

Transmisor de temperatura 0-400°C marca DWYER.

Precio Q. 1,206.00

Marca	DWYER	
Modelo	651TC-04	
Rango	0-400°C	
Potencia Requerida	10-32 V DC	
Tiempo de Respuesta	2 mSec	
Uso de Montaje	2 HMV1	
Output	4-20 mA DC	
Precisión Temperatura	±0.1%	
Tipo Termocupla	K	
Conexión Eléctrica	Entrada Enroscada	
Tiempo de Entrega	1-3 días	
Peso Carga	0.07 lbs	
País de Origen	Estados Unidos	
Página Web	www.grainger.com	
Proveedor	www.grainger.com	

Figura 30

Transmisor de temperatura 0-200°C marca DWYER.

Precio 1, 206.00

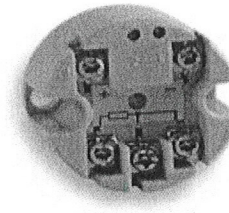
Marca	DWYER	
Modelo	651TC-05	
Rango	0-200°C	
Potencia Requerida	10-32 V DC	
Tiempo de Respuesta	2 mSec	
Uso de Montaje	2 HMV1	
Output	4-20 mA DC	
Precisión	±0.1%	
Temperatura		
Tipo Termocupla	K	
Conexión Eléctrica	Entrada Enroscada	
Tiempo de Entrega	1-3 días	
Peso Carga	0.07 lbs	
País de Origen	Estados Unidos	
Página Web	www.grainger.com	
Proveedor		

Figura 31

Transmisor de temperatura 0-850°C marca Laureate.

Precio Q. 1,880.00


Marca	Laureate	
Modelo	LTA200P385C	
Rango	0-850°C	
RTD Metal	Platinum	
Resistencia a 0°C	100Ω	
Resistencia a 850°C	390.48Ω	
Uso de Montaje	35 mm rail por DIN EN 50022	
Output	4-20 mA RTD	
Precisión	±0.03°C	
Temperatura		
Corriente Excitación	356μA	
Conexión Eléctrica	Plug-in Screw Clamp	
País de Origen	Estados Unidos	
Página Web	http://www.laurels.com/transmitter-4-20-rtd.htm	
Proveedor		

Figura 32.

Transmisor de humedad de 0-100% marca DWYER.

Precio Q. 1,118.80


Marca DWYER Modelo RHU-D Rango 0-100% Potencia Requerida 10-35 V DC Tiempo de Respuesta 15 Sec Uso de Montaje Duct Output 4-20 mA DC Precisión $\pm 2\%$ Temperatura Largo Sensor 9 inch. Conexión Eléctrica Entrada Enroscada Tiempo de Entrega 1-3 días Peso Carga 0.85 lbs País de Origen Estados Unidos Página Web Proveedor www.grainger.com	
--	---

Figura 33

Transductor de corriente de ± 90 A marca Honeywell.

Precio Q. 173.20


Marca Honeywell Modelo CSNP661 Rango ± 90 A Potencia Requerida $\pm 12 - \pm 15$ V DC Tiempo de Respuesta $< 0.5 \mu s$ Uso de Montaje PCB on 3 Pins Output 50 mA DC o AC Precisión $\pm 0.5\%$ Material Glass-filled PBT (UL94-V0) Corriente de Operación 50 A RMS @ 25°C Tiempo de Entrega 1-3 días País de Origen Estados Unidos Página Web Proveedor www.mouser.com	
--	---

Figura 34.

Sensor de nivel marca Rosemount.

Precio 18,896.00

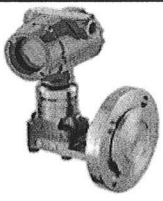
Precio	Q18,896.00	
Marca Rosemount Modelo 2051L Potencia Requerida 1-5 V DC HART Estabilidad 0.1% URL por 2 años Rangeabilidad 100:1 Output 4-20 mA HART Precisión $\pm 0.075\%$ Tiempo de Entrega 2-3 semanas País de Origen Estados Unidos Página Web Proveedor www.instrumart.com		

Figura 35
Switch de nivel marca Rosemount.


Precio	Q 1,616.00	
Marca Rosemount Modelo 2110 Potencia Requerida 18-60 V AC Tiempo de Respuesta 1 Sec dry to wet/wet to dry Presión Máxima 1450 psig Output < 0.5 mA Precisión ±0.05% Material 316L Stainless Steel Tiempo de Entrega 3-5 semanas País de Origen Estados Unidos Página Web Proveedor www.instrumart.com		

Figura 36
Medidor de flujo volumétrico marca Krohne.


Precio	Q 9,800.00	
Marca Krohne Modelo 2000 Medición 3/8" a 24" ASME 150 o 300 lb flange connections Presión Máxima 580 psig Material PP, Polyurethane and Hard Rubber Liner Precisión ±0.05% Tiempo de Entrega 1-2 semanas País de Origen Estados Unidos Página Web Proveedor www.instrumart.com		

Figura 37
Medidor de presión marca Rosemount.

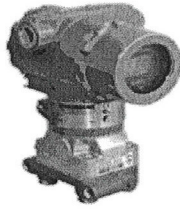

Precio	Q13,616.00	
Marca Rosemount Modelo 3051C Estabilidad 0.125% por 5 años Output 4-20 mA HART Presión Máxima 30 PSIA Precisión ±0.04% Tiempo de Entrega 2-3 semanas País de Origen Estados Unidos Página Web Proveedor www.instrumart.com		

Figura 38.
Switch de presión de 1.5-15 PSI marca ASHCROFT.

Precio		Q 1,468.00
Marca	ASHCROFT	
Modelo	B424VXCYLM15	
Rango Presión	1.5-15 PSI	
Presión de Liberación	500 PSI	
Puertos	1	
Tipo de Puerto	1/4" FNPT	
Tipo Actuador	Diafragma	
Rango Temperatura	20-300 F	
Tiempo de Entrega	1 día	
Peso Carga	1.6 lbs	
País de Origen	Estados Unidos	
Página Web	www.grainger.com	
Proveedor	www.grainger.com	

A continuación se presenta la información general de las válvulas utilizadas en el diseño de automatización del Reactor Semicontínuo.

Figura 39
Válvula de control de bola Serie K marca Spirax Sarco.

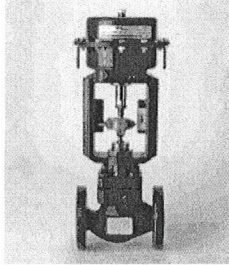
Precio		Q38,200.00
Marca	Spirax Sarco	
Modelo	TI-P305-01	
Serie	K	
Diámetro	3"	
Tipo	Flangeada	
Servicio	Abierto-cerrado (on/off)	
Norma	ANSI 300	
Material Cuerpo	Acero al Carbón	
Material Sellos	Grafito	
Material Asiento	Acero Inoxidable 316	
Temperatura Máxima	350°C	
Especificación	I/P	
Aplicación	Acete Térmico y Resina Alquídica	
País de Origen	Estados Unidos	
Proveedor	Praisa Guatemala	

Figura 40
Válvula de control de bola Serie Triad marca FlowTek.

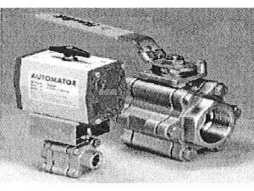
Precio		Q 3,000.00
Marca	FlowTek	
Modelo	Standard Port	
Serie	Triad	
Diámetro	2"	
Servicio	Normalmente Abierta	
Material Cuerpo	Acero Inoxidable	
Material Asiento	RPTFE	
Material bola y vástago	Acero Inoxidable	
Presión Máxima	2,200 psi wog.	
Aplicación	Agua Fría	
País de Origen	Estados Unidos	
Proveedor	Praisa Guatemala	

Figura 41

Válvula posición modulada Serie K marca Spirax Sarco.

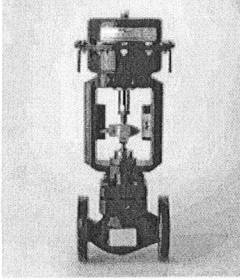
Precio	Q41,880.00	
Marca	Spirax Sarco	
Serie	K	
Diámetro	3"	
Tipo	Flangeada	
Servicio	Abierto-cerrado (on/off)	
Norma	ANSI 300	
Material Cuerpo	Acero al Carbón	
Material Sellos	Grafito	
Material Asiento	Acero Inoxidable 316	
Temperatura Máxima	350°C	
Especificación	Modulación	
Aplicación	Aceite Resina	
País de Origen	Estados Unidos	
Proveedor	Praisa Guatemala	

Figura 42.

Válvula de control de bola Serie Triad marca FlowTek.

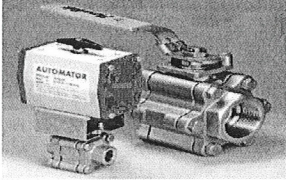
Precio	Q 9,600.00	
Marca	FlowTek	
Modelo	Fullport	
Serie	Triad	
Diámetro	3"	
Servicio	Normalmente cerrada	
Material Cuerpo	Acero Inoxidable	
Material Asiento	RPTFE	
Material bola y vástago	Acero Inoxidable	
Presión Máxima	2,200 psi wog.	
Aplicación	Aceite, Glicerina y Solvente Mineral	
País de Origen	Estados Unidos	
Proveedor	Praisa Guatemala	

Figura 43

Válvula posición modulada Serie L marca Spirax Sarco.

Válvula Posición Modulada	Q33,200.00	
Precio		
Marca	Spirax Sarco	
Serie	L	
Diámetro	3"	
Tipo	Flangeada	
Servicio	Abierto-cerrado (on/off)	
Norma	ANSI 300	
Material Cuerpo	Acero al Carbón	
Material Sellos	Grafito	
Material Asiento	Acero Inoxidable 316	
Temperatura Máxima	350°C	
Especificación	Modulación	
Aplicación	Glicerina, Xileno y Solvente Mineral	
País de Origen	Estados Unidos	
Proveedor	Praisa Guatemala	

Figura 44

Válvula de Control de Bola Serie Triad marca FlowTek.


Precio		Q 9,600.00
Marca	FlowTek	
Serie	Triad	
Diámetro	3"	
Servicio	Normalmente cerrada	
Material Cuerpo	Acero Inoxidable	
Material Asiento	RPTFE	
Material bola y vástago	Acero Inoxidable	
Presión Máxima	2,200 psi wog.	
Aplicación	Xileno	
Acuador Neumático	Modelo 1274	
País de Origen	Estados Unidos	
Proveedor	Praisa Guatemala	

Figura 45.

Válvula posición modulada Serie K marca Spirax Sarco.

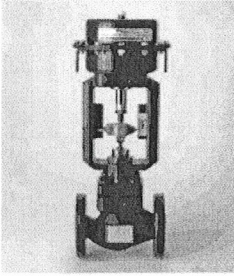

Precio		Q25,200.00
Marca	Spirax Sarco	
Serie	K	
Diámetro	2"	
Tipo	Roscada	
Servicio	Abierto-cerrado (on/off)	
Norma	ANSI 300	
Material Cuerpo	Acero al Carbón	
Material Sellos	PTFE	
Material Asiento	PTFE	
Temperatura Máxima	350°C	
Especificación	Modulación	
Aplicación	Nitrógeno	
País de Origen	Estados Unidos	
Proveedor	Praisa Guatemala	

Tabla 46

Válvula de control de compuerta, Marca ESASEMACA

Precio		Q12,440.00
Marca	EWASEMACA	
Rango	3"	
Sellos	EPDM	
Material	Hierro dúctil y acero inoxidable	
Presión	285 PSI	
ANSI	150	
Tiempo de Entrega	1-2 semanas	
País de Origen	Estados Unidos	
Página Web	www.mercadolibre.com	
Proveedor		

A continuación se presenta la información general de los instrumentos del controlador programable utilizados en el diseño de automatización del reactor semicontínuo.

Figura 47

Módulo de salida analoga 16 canales
marca Productivity 300.


Precio		Q 6,208.00
Marca	Productivity 3000	
Modelo	P3-16DA-2	
Canales	16	
Output	Voltaje	
Resolución	16 bit	
Corriente	±10 VDC	
Corriente Requerida	24 VDC	
Corriente Máxima	10mA	
Precisión	0.1%	
País de Origen	Estados Unidos	
Página Web	www.automationdirect.com	
Proveedor	www.automationdirect.com	

Figura 48

Módulo de entrada analoga 16 canales
marca Productivity 300.


Precio		Q 3,536.00
Marca	Productivity 3000	
Modelo	P3-16AD-2	
Canales	16	
Output	Voltaje	
Resolución	16 bit	
Corriente	0-10 VDC	
Corriente Requerida	24 VDC	
Corriente Máxima	10mA	
Precisión	0.1%	
País de Origen	Estados Unidos	
Página Web	www.automationdirect.com	
Proveedor	www.automationdirect.com	

Figura 49

Módulo de entrada digital 64 canales
marca Productivity 300.


Precio		Q 1,520.00
Marca	Productivity 3000	
Modelo	P3-64ND3	
Canales	64	
Output	Voltaje	
Tipo	Sinking Source	
Corriente	0-10 VDC	
Corriente Requerida	2.7 mA @ 24 VDC	
Corriente Máxima	3.5 mA @ 26.4 VDC	
Tipo Conexión	Two 40-pin ID C	
País de Origen	Estados Unidos	
Página Web	www.automationdirect.com	
Proveedor	www.automationdirect.com	

Figura 50

Módulo de salida digital 16 canales marca Productivity 300.


Precio		Q 944.00
Marca	Productivity 3000	
Modelo	P3-16TD2	
Canales	16	
Output	Voltaje	
Tipo	Sourcing	
Corriente	6.25-25 VDC	
Corriente Mínima	0.5 A/punto	
Corriente Máxima	0.4 mA	
Tipo Terminal	20-position removable terminal block	
País de Origen	Estados Unidos	
Página Web	www.automationdirect.com	
Proveedor		

Figura 51

Controlador 50MB marca Productivity 300.

Controlador		Precio
		Q 4,792.00
Marca	Productivity 3000	
Modelo	P3-550	
Velocidad del		
Procesador	266 MHz	
Memoria	50MB	
Tipo de Memoria	Flash y RAM	
Tiempo de Scan	600 µs	
Pantalla	LCD, 4x10 caracteres, 8 botones de control	
Cantidad de Puertos	7	
Temperatura de Operación	(0 - 60)°C	
País de Origen	Estados Unidos	
Página Web	www.automationdirect.com	
Proveedor		

Figura 52.

Fuente de poder 24-48 VDC marca Productivity 300.


Precio		Q 1,584.00
Marca	Productivity 3000	
Modelo	P3-01DC	
Corriente	24-48 VDC	
Frecuencia	50-60 Hz	
Potencia de Entrada		
Máxima	67W	
Potencia de Salida		
Máxima	57W Combinada	
Tiempo de Operación	10 años en condiciones ambientales de 40°C y 5 años a 60°C	
Temperatura de Operación	(0 - 60)°C	
País de Origen	Estados Unidos	
Página Web	www.automationdirect.com	
Proveedor		

Figura 53
Base Módulos 11 modelos marca Productivity 300.

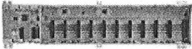
Base Módulos		
Precio Q 2,232.00		
Marca	Productivity 3000	
Modelo	P3-11B	
Modelos	11	
Temperatura de Operación	(0 - 60)YC	
País de Origen	Estados Unidos	
Página Web	www.automationdirect.com	
Proveedor		

Tabla 33
Composición, rango de temperaturas, diámetros de alambre apropiado y fuerzas electromotrices (FEM) correspondientes a distintas termocuplas.

Tipo	Denominación	Composición y símbolo	Rango de temperaturas (1) (en °C)	Diámetro del alambre apropiado (2)	F.e.m.en mV (3)
B	Platino-rodio 30% vs. platino-rodio 6%	PtRh 30% - PtRh 6%	0 ... 1.500 (1.800)	0,35 y 0,5 mm	0...10,094 (13,585)
R	Platino-rodio 13% vs. platino	PtRh 13% - Pt	0...1.400 (1.700)	0,35 y 0,5 mm	0,16,035 (20,215)
S	Platino-rodio 10% vs. platino	PtRh 10% - Pt	0...1300(1.600)	0,35 y 0,5 mm	0...13,155 (15,576)
J	Hierro vs. constántan	Fe - CuNi	-200 ... 700 (900)	3 mm 1mm	-7,89 ... 39,130 (51,075)
			-200 ... 600 (800)		-7,89 ... 33,096 (45,498)
K	Niquel-cromo vs. níquel (Chromel vs. Alumel)	NiCr - Ni	0...1000(1.300)	3 ó 2 mm	0...41,269 (52,358)
			0 ... 900 (1.200)	1,38 mm	0...37,325 (48,828)
T	Cobre vs. constántan	Cu - CuNi	-200 ... 700 (900)	0,5 mm	-5,60 ... 14,86 (20,86)
E	Niquel-cromo vs. constántan (Chromel vs. constántan)	NiCr - CuNi	-200 ... 600 (800)	3 mm	-9,83 ... 53,11 (68,78)
					-0,83 ... 45,08 (61,02)

- (1) Los valores entre paréntesis son los admitidos en intervalos cortos (no permanentes)
- (2) Los diámetros de alambres no son indicativos
- (3) Valores de fem (mV) en función de °C, referencia junta fría 0° C.

Tabla 34
Tolerancias de calibración para termocuplas estándar (referencia junta fría a 0°C) según IEC 584. (Ojeda, 2007: 1-12)

Termocupla	Rango	Clase 1 . Desviación máxima (±) (1)
Cobre vs. Cobre-níquel, Tipo T	-40 a + 350°C	0,5 °C ó 0,004 (t)
Hierro vs. cobre-níquel, Tipo J	-40a+ 750 °C	1,5 °C ó 0,004 (t)
Niquel-cromo vs. níquel, Tipo K	- 40 a 1.000 °C	1,5 °C ó 0,004 (t)
Platino-rodio 13% vs. platino, Tipo R	0 a + 1.600°C	1 °C ó 1 + 0,003 (t - 1. 100)°C
Platino-rodio 10% vs. platino, Tipo S	0 a + 1.600°C	1 °C ó 1 + 0,003 (t - 1.100)°C
Platino-rodio 30% vs. platino-rodio 6%, Tipo B
Termocupla	Rango	Clase 2 . Desviación máxima (±) (1)
Cobre vs. cobre-níquel, Tipo T	-40a+ 350°C	1°C ó 0,0075(t)
Hierro vs. cobre-níquel, Tipo J	-40a+ 750 °C	2,5 °C ó 0,0075 (t)
Niquel-cromo vs. níquel, Tipo K	- 40 a + 1.200°C	2,5 °C ó 0,0075 (t)
Platino-rodio 13% vs. platino, Tipo R	0 a + 1.600 °C	1,5 °C ó 0,0025 (t)
Platino-rodio 10% vs. platino, Tipo S	0 a + 1.600 °C	1,5 °C ó 0,0025 (t)
Platino-rodio 30% vs. platino-rodio 6%, Tipo B	+ 600 a + 1700 °C	1,5 °C ó 0,0025 (t)
Termocupla	Rango	Clase 3(2) . Desviación máxima (±) (1)
Cobre vs. Cobre-níquel, Tipo T	-200 a + 40 °C	1 °C ó 0,015 (t)
Hierro vs. cobre-níquel, Tipo J	-200 a + 40 °C	2,5 °C ó 0,015 (t)
Niquel-cromo vs. níquel, Tipo K	-200 a + 40 °C	2,5 °C ó 0,015 (t)
Platino-rodio 13% vs. platino, Tipo R
Platino-rodio 10% vs. platino, Tipo S
Platino-rodio. 30% vs. platino-rodio 6%, Tipo B	+600 a + 1.700 °C	4 °C ó 0,005 (t)

- (1) La desviación máxima debe ser calculada como el mayor valor de las dos expresiones: el valor en °C o su equivalente calculado reemplazando (t) por la temperatura en cuestión.
- (2) Normalmente, las termocuplas y los cables compensados se suministran con tolerancias especificadas por encima de -40 °C. Para termocuplas utilizadas por debajo de -40 °C, debe entenderse que sus tolerancias son para ese material mayores que las especificadas en Clase 3.

Tabla 35

Limitaciones ambientales de termocuplas (sin vainas o tubos protectores).

Tipo	Atmósfera oxidante	Atmósfera reductora	Atmósfera inerte	Vacío	Atmósfera sulfurosa	Temperaturas subcero	Vapores metálicos
B	SI	NO	SI	SI durante corto tiempo	NO	NO	NO
R	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO
S	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO
J	SI	SI	SI	SI	NO > 500°C	NO	SI
K	SI (1)	NO	SI	NO	NO	SI	SI
T	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI
E	SI	NO	SI	NO	NO	SI (2)	SI

(1) Mejor que las termocuplas E, J o T por encima de 350°C

(2) La más satisfactoria para temperaturas subcero.

Fuente: (Ojeda, 2007: 1-12)

Tabla 36

Características de las termocuplas no estándar.

NiCrSi(1) - NiSi(2) - (níquel - cromo - silicio vs. níquel - silicio)	Calibración desde - 240 a 1.230°C; similar a la termocupla Tipo K, con una mejor estabilidad y mayor vida útil .
Platino - 20% rodio vs. platino - 5% rodio	Mayor vida útil respecto a las termocuplas tipos R, S y B a temperaturas más elevadas .
Platino - 40% rodio vs. platino - 20% rodio	Mayor vida útil respecto a las termocuplas tipos R, S y B a temperaturas más elevadas .
Platino - 13% rodio vs. platino - 1 % rodio	Mayor vida útil respecto a las termocuplas tipos R, S y B a temperaturas más elevadas .
Platino - 15% iridio vs. platino	Mayor fem de salida que otras termocuplas de platino.
Platino - 5% molibdeno vs. platino - 0,1 % molibdeno	Mayor resistencia a la radiación de neutrones en relación a otras termocuplas de platino.
Iridio - 40% rodio vs. iridio	Mayor capacidad de temperatura que las termocuplas de platino - rodio.
Iridio - 50% rodio vs. iridio	Mayor capacidad de temperatura que las termocuplas de platino - rodio.
Rodio - 40% iridio vs. iridio	Mayor capacidad de temperatura que las termocuplas de platino - rodio.
Plantinel I y II (3)	Fem similar a la de las termocuplas Tipo K pero con una mayor estabilidad a la temperatura
Geminol (4)	Mayor resistencia que las termocuplas Tipo K en atmósferas reductoras hasta 1.090°C
Thermo-Kanthal especial (5)	Calibración similar a la de las termocuplas Tipo K, pero con una mejor estabilidad.
Tophel II(4) vs. Nial II (4)	Calibración similar a la de las termocuplas Tipo K, pero con una mayor resistencia .
Chromel (6) (3-G-345) vs. Alumel (6) (3-G-196)	Mayor resistencia que la termocupla Tipo K a la oxidación de cromo en atmósferas oxidantes de bajo tenor .
Tungsteno vs. tungsteno - 26% renio	Capaz de medir temperaturas hasta 2.700 °C
Tungsteno - 3% renio vs. tungsteno - 25% renio	Capaz de medir temperaturas hasta 2.750 °C
Tungsteno - 5% renio vs. tungsteno - 26% renio	Capaz de medir temperaturas hasta 2.700 °C
Aleación - hierro vs. Chromel	Capacidad mejorada respecto a las termocuplas de medición de temperaturas hasta -185 °C

Marcas registradas de :

(1) Amax Speciality Metals Corp.

(2) Amax Speciality Metals Corp.

(3) Engelhard Industries Div. Engelhard Corp.

(4) Driver - Harris Co.

(5) Thermo-Kanthal Co.

(6) Hoskins manufacturing Co.

Fuente: (Ojeda, 2007: 1-12)

Tabla 37

Costos de los materiales de vainas relativos al acero al carbono.

MATERIAL	FACTOR DE COSTO
Acero al carbono	1,0
Aceros inoxidables :	
304	1,6
304, bajo carbono	2,1
309	4,0
310	4,0
316	2,1
316 , bajo carbono	2,3
347	2,1
410	2,1
446	3,5
Aleación 20	3,0
Aluminio	2,0
Bronce	1,2
Cobre	2,5
Hastelloy B(1)	15,0
Hastelloy C 276(1)	12,0
Inconel 600 (2)	6,0
R-Monel 405 (2)	6,5
K-Monel 500(2)	9,0
Níquel 200	5,0
Titanio	12,0
Acero aleación 2 1/4% Cr, 1 % Mo	2,1
Acero aleación 1 1/4% Cr, 1/2 Mo	2,0

Marcas registradas de:

(1) Cabot Corp., High Technology Material Div.

(2) International Nickel Co.

Fuente: (Ojeda, 2007: 1-12)

Tabla 38

Límites de velocidad para vainas rectas y cónicas (vainas de diámetro interior de ¼ pulgada y diámetro exterior de ¾ pulgadas).

Material	Inserción, cm	Límites de Velocidad cm/s	
		Vaina estándar	Vaina cónica
Monel a 4800C	11,4	33,6	46,5
	26,7	6,21	8,52
Acero al carbono a 535 ^a C	11,4	36,9	54,0
	26,7	6,84	9,9
Acero Inoxidable, TIPO 304 ó 316, a 5350C	11,4	38,4	59,1
	26,7	7,08	10,6

Fuente: (Ojeda, 2007: 1-12)

Tabla 39.

Guía para la selección de tubos o vainas de protección parte 1.

INDUSTRIA	APLICACIÓN	TUBO O VAINA
Tratamientos térmicos	Recocido Carburación Templado: < 700° C 700 a 1100° C > 1100° C Nitruración Baños de sales	Inconel o hierro Inconel Hierro forjado Inconel o hierro Cerámico o pirómetro radiación Hierro Inconel, hierro o pirómetro radiación
Hierro y acero	Hornos de soplado Hogar Techo Calderas de recuperación Fosos de recalentamiento < 1100° C > 1100° C Palanquilla, calentamiento de planchas y soldadura a tope < 1100° C > 1100° C Soldadura fuerte Recocido brillante Forjado Galvanización Baños de decapado Estañado	Inconel o hierro o carburo de silicio Inconel o pirómetro de radiación Pirómetro de radiación Inconel o hierro Inconel o hierro Cerámico y carburo de silicio o pirómetro de radiación Inconel o hierro Cerámico y carburo de silicio o pirómetro de radiación Pirómetro de radiación Termopar tipo J sin tubo de protección o pirómetro de radiación Cerámico y carburo de silicio o pirómetro de radiación Acero o carburo de silicio Plomo Acero dulce o hierro
Metales no férricos	Fundición aluminio Tratamiento térmico del aluminio Fundición latón o bronce Recocido Palanquilla Moldeo Plomo Magnesio Estañó Cinc Fundición y calcinación de mineral	Carburo de silicio o hierro Hierro o sin tubo de protección Metal fundido especial Hierro o sin tubo de protección Inconel o hierro Hierro o carburo de silicio Hierro Acero sin soldadura Acero dulce Carburo de silicio o hierro Inconel, hierro, cerámico o carburo de silicio
Cemento	Conductos de salida Horno	Inconel o hierro Pirómetro de radiación

Fuente: (Ojeda, 2007: 1-12)

Tabla 40.

Guía para la selección de tubos o vainas de protección parte 2.

INDUSTRIA	APLICACIÓN	TUBO O VAINA
Cerámica	Hornos Secadores Esmaltado vítreo	Cerámico o pirómetro de radiación Hierro Inconel, hierro o pirómetro de radiación
Química		Acero inoxidable en general. Debido a la gran variedad de aplicaciones químicas es difícil establecer recomendaciones
Alimentación		Acero inoxidable
Gas	Productor de gas Gas de agua sobrecalentado	Inconel o hierro Inconel o hierro
Vidrio	Alimentador Lehr (túnel de recocido) Tanques Conductos de tanques	Platino o pirómetro de radiación Hierro Cerámico o pirómetro de radiación Inconel o hierro
Petroquímica	Desparafinador Columna de fraccionamiento Cámara de reacción Unidades catalíticas Líneas de transferencia Torres Torre llamas	Acero inoxidable » » » » » » » » » » Inconel o hierro
Centrales térmicas	Conducto de gases Precalentadores Líneas de vapor Líneas de agua	Hierro Hierro Acero inoxidable Acero dulce
Varios	Incineradores hasta 1100° C superior a 1000° C	Inconel o hierro Cerámico y carburo de silicio

Fuente: (Ojeda, 2007: 1-12)

Tabla 41

Sensibilidades relativas de termistores, termorresistencias y termocuplas.

Sensor	mV/°C		
	-170°C	10°C	37,0°C
Termistor en circuito puente	4600	72000	3870
Termorresistencia de Pt en circuito puente	18	36	54
Termocuplas:			
Cobre/Constantán	36	40	44
Hierro/Constantán	48	50	52
Chromel/Alumel	38	40	42
Pt/Pt - 10% Rh	6	6	6

Fuente: (Ojeda, 2007: 1-12)

Tabla 42

Características de los elementos mecánicos de presión.

	Campo de medida	Precisión en % de todo la escala	Temperatura máxima de servicio	Presión estática máxima	
Barómetro cubeta	0,1-3 m cda	0,5-1 %	Ambiente	6 bar	
Tubo en U	0,2-1,2 m cda	0,5-1 %	↓ 90° C ↓	10 bar	
Tubo inclinado	0,01-1,2 m cda	↓		↓	↓
Toro pendular	0,5-10 m cda			↓	100-600 bar
Manómetro campana	0,005-1 m cda			↓	Atmosférica
Tubo Bourdon	0,5-6000 bar			↓	6000 bar
Espiral	0,5-2500 bar			↓	2500 bar
Helicoidal	0,5-5000 bar			↓	5000 bar
Diafragma	50 mm cda-2 bar			↓	2 bar
Fuelle	100 mm cda-2 bar			↓	↓
Presión absoluta	6-760 mm Hg abs			1 %	Ambiente
Sello volumétrico	3-600 bar		0,5-1 %	400° C	600 bar

Fuente: (Nunez, 2001: 1-28)

Tabla 43

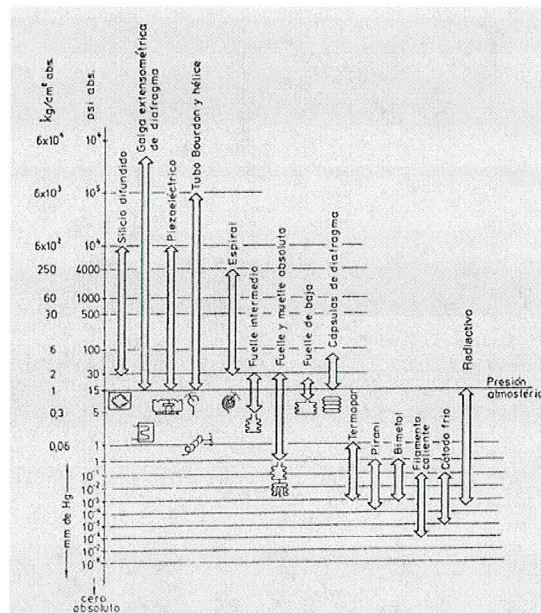
Características de los transductores electromecánicos de presión.

	Margen en bar	Precisión en % de toda la escala	Estabilidad en el tiempo	Sobrecarga	Temp. máx. de servicio °C	Nivel señal salida	Impedancia salida	Error de cero por influencia de la temperatura ambiente	Resolución	Sensibilidad a vibraciones
Equilibrio de fuerzas	2-6000	0,5	Media a mala	150 %	65	10 V	600 Ω	0,9-2,3 %	Continua	Alta
Resistivos	0-0,1 a 0-300	1	Mala	150 %	80	Variac. res.	0-Res. total	0,7-3 %	0,25 %	↓
Magnéticos	↓	Inductancia variable	0,5	Media	150 %	↓	2 kΩ	0,9-2,3 %	Continua	↓
		Reluctancia variable	1	Media	150 %	↓	2 kΩ	0,6-2,4 %	↓	↓
Capacitivos	0,05-5 a 0,05-600	1	Media a buena	150 %	150	↓	5 kΩ	0,5-1,9 %	↓	Media
Galgas extensométricas	Cementadas	0-0,5 a 0-3000	0,5	Mala	↓	120	35 mV	350 Ω	0,5-2,4 %	Alta
	Sin cementar	0-0,01 a 0-600	1	Mala	200 %	↓	↓	350 Ω	↓	↓
	Silicio difundido	0-2 a 0-600	0,3	Muy buena	200 %	107	2-10 V	600 Ω	0,4-1 %	↓
Piezoelectrónicos	0,1-600	1	Mala	↓	90	600 mV/bar	1000 MΩ	1-4,8 %	1/5000	Baja

Fuente: (Nunez, 2001: 1-28)

Figura 54

Instrumentos de presión y campo de aplicación.



Fuente: (Nunez, 2001: 1-28)