

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL PARA LA PRÁCTICA DE BALANCES EN ESTADO NO ESTACIONARIO

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por las Brs. Chano V, Mercedes C.,
Vicente V, Melina
Para optar al Título
de Ingeniero Químico

Caracas, 2007

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL PARA LA PRÁCTICA DE BALANCES EN ESTADO NO ESTACIONARIO

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Johnny Vásquez
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. José Barriola

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por las Brs. Chano V. Mercedes C.,
Vicente V. Melina.
Para optar al Título
de Ingeniero Químico


Caracas, 2007

Caracas, 25 de Junio de 2007


Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por las Bachilleres Melina. Vicente V. y Mercedes C. Chano V., titulado:

“Estudio preliminar para la automatización del Laboratorio de Operaciones Unitarias. Implementación del Sistema de Control para la práctica de balances en estado no estacionario”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.



Prof. José Romero
Jurado



Prof. Simón Morales
Jurado



Prof. Johnny Vásquez
Tutor Académico



Ing. José Barriola
Tutor Industrial



ACTA

MENCIÓN HONORÍFICA

Los abajo firmantes, miembros del Jurado Examinador del Trabajo Especial de Grado: **“ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL PARA LA PRÁCTICA DE BALANCES EN ESTADO NO ESTACIONARIO”**, presentado por las Bachilleres Mercedes C. Chano V. y Melina Vicente V., queremos dejar constancia del excelente nivel del trabajo realizado, ya que el mismo en cuanto a su ejecución, presentación y utilidad de los resultados ameritó que se le asignara la calificación máxima de **VEINTE PUNTOS (20)**. Así mismo, hemos decidido por unanimidad, concederle **MENCIÓN HONORÍFICA** como un reconocimiento a la excelencia del trabajo realizado, por la aplicación del Método Ingenieril en la solución del problema planteado, así como la instalación de un sistema automatizado que permite la simulación, supervisión y control de variables de proceso, el cual contribuirá a la implantación del Laboratorio de Control de Procesos, siendo este un aporte significativo para la comunidad docente y estudiantil de la Escuela de Ingeniería Química.

En Caracas, a los veinticinco días del mes de junio del año dos mil siete.

Prof. Simón Morales
Jurado

Prof. Johnny Vásquez
Tutor Académico

Prof. José Romero
Jurado

Ing. José Barriola
Tutor Industrial

*Llegar hasta aquí ha sido el mejor
de nuestros logros y esta es
nuestra honra, para Dios
y a nuestros Padres.*

AGRADECIMIENTOS

Durante todo el recorrido de nuestras vidas nos proponemos infinitas metas, desde luego suponemos que la culminación de las mismas nos proporcionan felicidad y con el afán de alcanzar ese final olvidamos que la trayectoria estuvo siempre llena de momentos felices, aunque muchos de ellos fueron pequeños y duraron muy poco.

Una gran parte de ese largo e interminable camino que estuvo llena de tropiezos, la recorrimos junto a personas que nos apoyaron siempre, que nos ayudaron sin ningún interés, y nos alentaron cuando quisimos caer. Hoy por hoy, les damos las *Gracias* a todos los que han contribuido con nosotras y que son testigos de que este día al fin llegara, especialmente *Agradecemos*:

- *A Dios, por permitirnos ver que este día se hiciera realidad.*
 - *A nuestras Familias: Padres, Hermanos, Novios, por amarnos, estar presentes y animarnos siempre.*
 - *Al profesor: Johnny Vásquez, por confiarnos este estupendo tema de Tesis.*
 - *Al Ingeniero: José Barriola, por toda la dedicación, la confianza, el cariño y las oportunidades que nos ha brindado.*
 - *Al Ingeniero Arnoldo Pérez, por la seguridad, el apoyo y sus buenos consejos.*
 - *Al profesor Simón Morales, por su entusiasmo y sus recomendaciones.*
 - *Al equipo de personas en Honeywell, especialmente a los Ingenieros: José Luís Araujo, Luís Serantes, Ricardo Caballero, Israel Vargas, JuanDe Sousa y Jorge Charr que nos ayudaron, asesoraron y enseñaron pacientemente.*
 - *A Jorge Pereira, Luis Eduardo Salazar y Gustavo Villaroel por la colaboración brindada.*
 - *A nuestros amigos (as), que nos acompañaron y hoy celebran por nosotras. A todos los que estuvieron con nosotras desde la salida y gracias a los que están esperando por nosotras en la llegada. A los que están y los que ya no. “Gracias”.*
-

Chano V., Mercedes C.

Vicente V., Melina.

**ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN
DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS.
IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL PARA LA
PRÁCTICA DE BALANCES EN ESTADO NO ESTACIONARIO**

Tutor Académico: Prof. Johnny Vásquez. Tutor Industrial: Ing. José Barriola.

Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.

2007, 300 p.

Palabras Claves: Control de Procesos, Sistema Experion PKS, Controlador C200, Control en Tiempo Real.

Resumen. El área de Control de Procesos es de suma importancia tanto en la formación como en el desempeño profesional de los Ingenieros Químicos. En este sentido, es necesario que durante su formación académica, el estudiante cuente con la posibilidad de realizar prácticas de laboratorio que le faciliten la comprensión de los principios fundamentales, que deben ser considerados al momento de controlar un proceso químico dado.

Este Trabajo Especial de Grado pretende, como primera fase generar la información mínima necesaria para la instrumentación de las prácticas contempladas en el programa académico del Laboratorio de Ingeniería Química I del Laboratorio de Operaciones Unitarias, para ello se realizó el estudio de los procesos involucrados en cada una de ellas y se establecieron los lazos de presión, temperatura, nivel y flujo para el control de las variables y se elaboró la documentación de la instrumentación requerida para la implementación de estos lazos. Como segunda fase, se diseñó y modificó el proceso de la práctica inherente al área de Mecánica de Fluidos denominada Balances en Estado no Estacionario, implementando los lazos de control más comunes en la industria (presión, temperatura, nivel y flujo), esto se realizó mediante el estudio y análisis del proceso, la elaboración detallada de los planos asociados, el modelo matemático que lo representa y la simulación a lazo abierto con el Programa Simulink.

La simulación a lazo abierto en el programa Simulink[®], permitió analizar la influencia de las variables manipuladas sobre las variables controladas, mediante

perturbaciones en escalón asociadas a flujos que más afectaban la respuesta del sistema. Estas simulaciones permitieron comprobar que las ganancias y constantes de tiempo obtenidas por el modelo matemático no corresponden al comportamiento que debería reflejar el sistema, en consecuencia la obtención de estos parámetros se realizó por ensayo y error de acuerdo a la respuesta que debería generarse en las variables controladas del proceso ante cambios en las variables manipuladas.

Como última fase, se realizó la instalación para la comunicación de la plataforma del sistema de control referida al Software Experion[®] PKS con el controlador C200, para ello se configuraron los módulos de Entrada/Salida (analógicos y digitales) correspondientes a cada slot del controlador C200, esto permitió comprobar que la instalación se realizó de forma satisfactoria al mostrar en pantalla los módulos del C200 en completa actividad; además se configuraron las estrategias de control diseñadas de acuerdo a la programación de la herramienta Control Builder del Experion PKS

Por último, se elaboró el despliegue asociado al sistema con el uso de la herramienta de desarrollo de despliegues HMI Web, lo cual proporcionó al usuario la simulación del proceso (en el Software) mediante la manipulación de las variables involucradas, así como también la posibilidad de analizar los resultados obtenidos aplicando los conocimientos adquiridos, como si se tratara de una experiencia en un laboratorio real, comprobando que el sistema se comporta de acuerdo a lo establecido en las estrategias de control diseñadas para el sistema.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
I.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
I.2 OBJETIVOS	6
I.2.1 <i>Objetivo General</i>	6
I.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	6
I.3 ANTECEDENTES	7
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	9
II.1 AUTOMATIZACIÓN DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS	10
II.1.1 <i>Determinación de caídas de presión, velocidad de inundación y volumen retenido en una torre de relleno</i>	12
II.1.2 <i>Estudio de la condensación en forma de película y gota</i>	14
II.1.3 <i>Estudio de dos intercambiadores de calor</i>	16
II.1.4 <i>Estudio de las características de la filtración a presión constante de una suspensión</i>	19
II.1.5 <i>Destilación continua de una mezcla binaria en una columna de separación por etapas</i>	22
II.1.6 <i>Destilación diferencial al vacío de una mezcla ternaria</i>	24
II.1.7 <i>Rectificación de una mezcla binaria en una columna de relleno</i>	26
II.1.8 <i>Calibración de medidores de flujo</i>	27
II.1.9 <i>Lechos fluidizados – Estudio de sus principales características</i>	29

<i>II.1.10 Determinación de curvas características de bombas centrífugas.....</i>	31
<i>II.1.11 Determinación de las pérdidas de presión por fricción en conexiones y tramos de tubería.....</i>	32
<i>II.1.12 Balances en estado no estacionario.....</i>	34
<i>II.2 CONTROL DE PROCESOS.....</i>	38
<i>II.2.1 Conceptos Básicos.....</i>	38
<i>II.2.2 Los Modelos Matemáticos.....</i>	41
<i>II.2.3 Leyes Fundamentales.....</i>	42
<i>II.2.4 Funciones de Transferencia.....</i>	46
<i>II.2.5 Tipos de Controladores.....</i>	48
<i>II.2.6 Métodos de Ajuste.....</i>	50
<i>II.2.6.1 Método 3 de Ziegler y Nichols de 1^{er} Orden Más Tiempo Muerto (POMTM).....</i>	54
<i>II.2.6.2 Respuesta de razón asentamiento de 1/4 de Ziegler y Nichols.....</i>	57
<i>II.2.6. 3. Métodos con base en la cancelación de polos.....</i>	58
<i>II.2.7 Técnicas de Control de Procesos.....</i>	60
<i>II.2.8 Estrategias de Control Avanzadas.....</i>	65
<i>II.2.8.1 Control Multivariable.....</i>	65
<i>II.3 AUTOMATIZACIÓN.....</i>	69
<i>II.3.1 Etapas de la Automatización.....</i>	69
<i>II.3.2 Instrumentación & Control.....</i>	70
<i>II.3.3 Controladores.....</i>	77
<i>II.3.4 Programas de Adquisición y Control.....</i>	84
<i>II.3.4.1 Software Experion®.....</i>	86

<i>II.3.5 Aplicaciones Avanzadas</i>	92
<i>II.3.5.1 LabVIEW</i>	93
<i>II.3.5.2 MatLab Simulink</i>	95
<i>II.3.5.3 Simulador de Procesos PRO II</i>	96
<i>II.3.5.4 Simulador de Procesos Hysys Plant[®]</i>	97
<i>II.3.5.5 Gestión Avanzada de Alarmas</i>	98
<i>II.3.5.6 Profit Controller[®]</i>	100
II.4 EVALUACIÓN DE PROYECTOS	102
<i>II.4.1 Fases de un Proyecto</i>	102
GLOSARIO DE TÉRMINOS	104
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	108
<i>III.1 FASES DEL PROYECTO</i>	109
<i>III.1.1 Primera Fase: Ingeniería Conceptual</i>	109
<i>III.1.2 Segunda Fase: Ingeniería Básica</i>	110
<i>III.1.3 Tercera Fase: Ingeniería de Detalle</i>	112
<i>III.1.4 Cuarta Fase: Procura</i>	113
<i>III.1.5 Quinta Fase: Integración y Pruebas del Control Distribuido Experion[®]</i>	113
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS	115
<i>IV.1 LEVANTAMIENTO DE CAMPO Y DISCIPLINA DE INSTRUMENTACIÓN</i>	116
<i>IV.1.1 Identificación de equipos susceptibles a automatizar, variables a supervisar y controlar en cada práctica</i>	116

<i>IV.1.2 Identificación del estado actual de las instalaciones y grado de automatización</i>	126
<i>IV.1.3 Documentos de Ingeniería.....</i>	128
<i>IV.2. REDISEÑO DE LA PRÁCTICA DE BALANCES EN ESTADO NO ESTACIONARIO.....</i>	131
<i>IV.2.1 Modelo Matemático del sistema “Balances en Estado No Estacionario”.....</i>	137
<i>IV.2.2 Diagrama de Bloques del sistema “Balances en Estado No Estacionario”.....</i>	144
<i>IV.2.3 Simulación del sistema “Balances en Estado No Estacionario” a lazo abierto con MatLab Simulink.....</i>	145
<i>IV.2.4 Establecimiento y narrativa de las Estrategias de control.....</i>	153
<i>IV.2.5 Estudio de un control multivariable para la práctica de “Balances en Estado No Estacionario”.....</i>	156
<i>IV.3 PROCURA, INTEGRACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO EXPERION® PKS</i>	159
<i>IV.3.1 Acondicionamiento de la Sala de Control y Arquitectura de la Red... ..</i>	159
<i>IV.3.2 Gabinete de Conexión.....</i>	163
<i>IV.3.3 Características del Hardware y Software.....</i>	165
<i>IV.3.4 Implementación, Instalación y Configuración del Hardware y Software.....</i>	166
<i>IV.3.5 Diseño e Implementación de Despliegues de Operación.....</i>	172
<i>IV.3.7 Expansiones futuras.....</i>	175
<i>IV.3.8 Estudio Técnico Económico.....</i>	176
<i>IV.4 SIMULACION DEL SISTEMA BALANCES EN ESTADO NO ESTACIONARIO EN EL SOFTWARE EXPERION® PKS.....</i>	179
<i>IV.4.1 Configuración de la Base de Datos y Simulación del sistema Balances en Estado No Estacionario en Experion PKS.....</i>	181
<i>IV.4.2 Instructivo de operación del sistema de control de la práctica de Balances en Estado no Estacionario.....</i>	194

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES _____	196
CONCLUSIONES.....	197
RECOMENDACIONES.....	199
BIBLIOGRAFÍA.....	200
APENDICE A: DOCUMENTOS DE INGENIERÍA _____	204
A.1.PLANO DE PLANTA FÍSICA DEL L.O.U.....	206
A.2.PLANO DE LA SALA DE CONTROL.....	208
A.3.LISTA DE INSTRUMENTOS DISPONIBLES EN EL L.O.U	210
A.4.LISTAS DE EQUIPOS DE PROCESOS DE LAS PRACTICAS AUTOMATIZABLES.....	212
A.5.LISTA DE INSTRUMENTOS REQUERIDA PARA LA SUPERVISIÓN Y CONTROL DE LAS PRÁCTICAS AUTOMATIZABLES.....	214
A.6.LISTA DE VÁLVULAS DE CONTROL REQUERIDAS POR LAS PRACTICAS AUTOMATIZABLES.....	216
A.7.LISTA DE CONTROLADORES DE LAS PRÁCTICAS AUTOMATIZABLES.....	218
A.8.LISTA DE TUBERÍAS DE LAS PRACTICAS AUTOMATIZABLES.....	221
A.9.LISTAS DE ACCESORIOS REQUERIDOS POR LAS PRACTICAS AUTOMATIZABLES.....	223
A.10.HOJAS DE ESPECIFICACIONES DE LOS INSTRUMENTOS Y EQUIPOS REQUERIDOS POR LA PRÁCTICA BALANCES EN ESTADO NO ESTACIONARIO.....	225
A.11.DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO DE LAS PROPUESTAS PARA LA MODIFICACIÓN DE LA PRÁCTICA BALANCES EN ESTADO NO ESTACIONARIO.....	243

<i>A.12.DFP Y DTI DE LA PRÁCTICA “DETERMINACIÓN DE CAÍDAS DE PRESIÓN, VELOCIDAD DE INUNDACIÓN Y VOLUMEN RETENIDO EN UNA TORRE DE RELLENO”</i>	247
<i>A.13.DFP Y DTI DE LA PRÁCTICA “ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA FILTRACIÓN A PRESIÓN CONSTANTE DE UNA SUSPENSIÓN”</i>	250
<i>A.14.DFP Y DTI DE LA PRÁCTICA “DETERMINACIÓN DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE BOMBAS CENTRÍFUGAS”</i>	253
<i>A.15.DFP Y DTI DE LA PRÁCTICA “CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO”</i>	256
<i>A.16.DFP Y DTI DE LA PROPUESTA SELECCIONADA PARA LA PRÁCTICA DE “BALANCES EN ESTADO NO ESTACIONARIO”</i>	259
<i>A.17.DIAGRAMA DE INSTALACIÓN DE INSTRUMENTOS DE LA PRÁCTICA DE “BALANCES EN ESTADO NO ESTACIONARIO”</i>	262
<i>A.18.DIAGRAMA DE UBICACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS EN EL PANEL DE CONTROL DE LA PRÁCTICA DE “BALANCES EN ESTADO NO ESTACIONARIO”</i>	269
 <i>APENDICE B: CÁLCULOS TIPOS</i>	 271
 <i>APENDICE C: ALGORITMOS UTILIZADOS EN LA SIMULACIÓN</i>	 290

ÍNDICE DE GRÁFICAS

<i>Gráfica N° 1: Curva de reacción de un proceso.....</i>	55
<i>Gráfica N° 2: Parámetros del modelo POMTM.....</i>	57
<i>Gráfica N° 3: Temperaturas del Tanque T_1 ante el cambios de Apertura de las Válvulas LCV102A, LCV101 y TCV101.....</i>	149
<i>Gráfica N° 4: Variación de los niveles de los tres Tanques ante el cambio de Apertura de la Válvula LCV101.....</i>	151
<i>Gráfica N° 5: Variación de los niveles de los Tanques ante el cambio de Apertura de la Válvula LCV102A.....</i>	152

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla N° 1: Fórmulas de ajuste para respuesta de razón de asentamiento de ¼...</i>	58
<i>Tabla N° 2: Fórmulas de ajuste para Haalman.....</i>	59
<i>Tabla N° 3: Variables a controlar e instrumentación requerida para la práctica de Determinación de Caídas de Presión de una Columna de Relleno..</i>	120
<i>Tabla N°4: Variables a controlar e instrumentación requerida para la práctica de Filtración a Presión constante.....</i>	121
<i>Tabla N° 5: Variables a controlar e instrumentación requerida para la práctica de Calibración de Medidores de Flujo.....</i>	122
<i>Tabla N° 6: Variables a controlar e instrumentación requerida para la práctica de Determinación de Curvas Características de Bombas Centrífugas.</i>	123
<i>Tabla N° 7: Variables a supervisar e instrumentación requerida para la práctica de Destilación diferencial al vacío de una mezcla ternaria.....</i>	125
<i>Tabla N° 8: Variables a supervisar e instrumentación requerida para la práctica de Rectificación de una mezcla binaria en una columna de relleno...</i>	125
<i>Tabla N° 9: Prácticas instrumentadas.....</i>	127
<i>Tabla N° 10: Parámetros de ganancia y tiempo de respuesta del proceso.....</i>	146
<i>Tabla N° 11: Características del Servidor.....</i>	166
<i>Tabla N° 12: Características de la Consola.....</i>	166
<i>Tabla N° 13: Costos de los Instrumentos asociados a las prácticas automatizables.....</i>	176
<i>Tabla N° 14: Costos de los Equipos e Instrumentos asociados a la práctica Balances en Estado no Estacionario.....</i>	177
<i>Tabla N° 15: Costos del Hardware correspondiente al Rack del C200.....</i>	177
<i>Tabla N° 16: Costos del Hardware.....</i>	178
<i>Tabla N° 17: Costos del Software Experion PKS.....</i>	178
<i>Tabla N° 18: Capital de Inversión.....</i>	178
<i>Tabla N° 19.: Rangos de Operación de las Variables Controladas del proceso...</i>	182

<i>Tabla N° 20: Rangos de Operación de las Variables Manipuladas del proceso...</i>	182
<i>Tabla N° 21: Partición asociada a cada válvula para la estrategia de rango dividido.....</i>	193
<i>Tabla N° 22: Coeficientes máximos de flujos de las Válvulas de Control del proceso de Balances en Estado No Estacionario.....</i>	276
<i>Tabla N° 23: Condiciones de Operación de los fluidos asociados al serpentín.....</i>	284
<i>Tabla N° 24: Propiedades Físicas de los fluidos asociados al serpentín.....</i>	284
<i>Tabla N° 25: Características del Serpentín.....</i>	284

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura N° 1: Esquema general del sistema de la torre de relleno.....</i>	14
<i>Figura N° 2: Esquema general del sistema de condensación.....</i>	16
<i>Figura N° 3: Esquema general del sistema de intercambiadores.....</i>	19
<i>Figura N° 4: Esquema general del sistema de filtración.....</i>	21
<i>Figura N° 5: Esquema general del sistema de destilación continua.....</i>	23
<i>Figura N° 6: Esquema general del sistema de destilación diferencial.....</i>	25
<i>Figura N° 7: Esquema general del sistema de rectificación.....</i>	27
<i>Figura N° 8: Esquema general del sistema de medidores de flujo.....</i>	28
<i>Figura N° 9: Esquema general del sistema lechos fluidizados.....</i>	30
<i>Figura N° 10: Esquema general del sistema de bombas centrífugas.....</i>	32
<i>Figura N° 11: Esquema general del sistema de pérdidas por fricción.....</i>	34
<i>Figura N° 12: Esquema general del sistema de balances en estado no estacionario.....</i>	35
<i>Figura N° 13: Esquema a lazo abierto.....</i>	40
<i>Figura N° 14: Esquema a lazo cerrado.....</i>	40
<i>Figura N° 15: Esquema general de control de sistemas multivariables.....</i>	66
<i>Figura N° 16: Esquema general de control de sistemas multivariables con un solo lazo de control.....</i>	66
<i>Figura N° 17: Esquema general de un lazo de control (2x2).....</i>	67
<i>Figura N° 18: Sensor de Humedad con dispositivo transmisor, Sensor de Presión y Sensor de Proximidad</i>	74
<i>Figura N° 19: Sensor de Temperatura y Sensor de Nivel.....</i>	75
<i>Figura N° 20: Sensor de Flujo y Sensor de Ph.....</i>	75
<i>Figura N° 21: Transmisor Multivariable de Presión y Temperatura.....</i>	76

<i>Figura N°22: Válvulas de control con actuadores eléctricos para servicios.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura N°23: Esquema del chasis del controlador de procesos C200.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura N°24: Esquema del Sistema de Control Distribuido.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura N°25: Relación del Sistema de Adquisición de Datos con el Software de aplicación.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura N°26: Arquitectura del sistema Experion PKS R210.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura N°27: Esquema de Interfaz Humano-Máquina.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura N°28: Esquema de Manejo Avanzado de Alarmas.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura N°29: Esquema de Reporte de Tendencias.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura N°30: Despliegues en ambiente Windows.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura N°31: Despliegues en ambiente Windows.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura N°32: Alertas de Acontecimientos.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura N°33: Análisis de Acontecimientos de eventos.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura N°34: Diagrama de Instrumentación y Tuberías de la Práctica de Caídas de Presión en una Torre rellena.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura N°35: Diagrama de Flujo de Proceso para la Propuesta N°1.....</i>	<i>132</i>
<i>Figura N°36: Diagrama de Flujo de Proceso para la Propuesta N°2.....</i>	<i>134</i>
<i>Figura N°37: Diagrama de Flujo de Proceso para la Propuesta N°3.....</i>	<i>136</i>
<i>Figura N°38: Diagrama de Bloques del sistema Balances en Estado no Estacionario.....</i>	<i>144</i>
<i>Figura N°39: Diagrama de Bloques del sistema Balances en Estado no Estacionario para determinados valores de set point.....</i>	<i>147</i>
<i>Figura N°40: Diagrama de Instrumentación y Tuberías de la Práctica Balances en Estado no Estacionario.....</i>	<i>153</i>
<i>Figura N°41: Matriz de efecto de las variables manipuladas y perturbaciones sobre las variables controladas.....</i>	<i>156</i>
<i>Figura N°42: Estrategia para el control Multivariable de la Práctica de Balances en Estado no Estacionario.....</i>	<i>158</i>

<i>Figura N°43: Arquitectura de la Red Propuesta.....</i>	161
<i>Figura N°44: Gabinete de Conexiones.....</i>	163
<i>Figura N°45: Controlador instalado en el Gabinete, Panel de Simulación y Borneras.....</i>	164
<i>Figura N°46: Modo de acceso al Control Builder.....</i>	167
<i>Figura N°47: Creación del Modulo del Procesador de Control C200.....</i>	168
<i>Figura N°48: Caracterización del Módulo del Procesador de Control C200.....</i>	168
<i>Figura N°49: Configuración de Módulos de Entrada/Salida Analógicas y Digitales.....</i>	169
<i>Figura N°50: Caracterización de Módulos de Entrada/Salida Analógicas y Digitales.....</i>	169
<i>Figura N°51: Descarga de los Módulos al sistema Experion PKS.....</i>	170
<i>Figura N°52: Modo de acceso a la herramienta Network Tools.....</i>	171
<i>Figura N°53: Controlador C200 activo.....</i>	171
<i>Figura N°54: Despliegue de Balances en Estado no Estacionario.....</i>	172
<i>Figura N°55: Vista de faceplates de despliegue de Balances en Estado no Estacionario.....</i>	173
<i>Figura N°56: Despliegue de Grupos de la práctica de Balances en Estado no Estacionario.....</i>	174
<i>Figura N°57: Despliegue de Gestión de Alarmas de la práctica de Balances en Estado no Estacionario.....</i>	174
<i>Figura N°58: Diagrama de Bloques a lazo cerrado de la práctica de Balances en Estado no Estacionario.....</i>	179
<i>Figura N°59: Diagrama de Bloques a lazo cerrado de la práctica de Balances en Estado no Estacionario.....</i>	181
<i>Figura N°60: Configuración de los Módulos de Control.....</i>	183
<i>Figura N°61: Representación del lazo de control correspondiente al Control de Nivel LIC101.....</i>	185
<i>Figura N°62: Representación del lazo correspondiente al Modulo de Control LIC101.....</i>	185

<i>Figura N°63: Representación del lazo correspondiente al Modulo de Control P101 y PS101.....</i>	<i>186</i>
<i>Figura N°64: Representación del lazo correspondiente al Modulo de Control FIC101.....</i>	<i>187</i>
<i>Figura N°65: Representación del lazo correspondiente al Modulo de Control FIC102.....</i>	<i>189</i>
<i>Figura N°66: Representación del lazo correspondiente al Modulo de Control LIC102A.....</i>	<i>189</i>
<i>Figura N°67: Representación del lazo correspondiente al Modulo de Control LIC102B.....</i>	<i>190</i>
<i>Figura N°68: Representación del lazo correspondiente al Modulo de Control LIC103.....</i>	<i>192</i>
<i>Figura N°69: Representación del lazo correspondiente al Modulo de Control TIC101.....</i>	<i>193</i>
<i>Figura N°70: Algoritmo de regulatorio de control PID.....</i>	<i>291</i>
<i>Figura N°71: Algoritmo de regulatorio de control OVERDSEL.....</i>	<i>291</i>
<i>Figura N°72: Algoritmo de regulatorio de control AUTOMAN.....</i>	<i>292</i>
<i>Figura N°73: Algoritmo de regulatorio de control FANOUT.....</i>	<i>292</i>
<i>Figura N°74: Algoritmo Auxiliar AUXSUMMER.....</i>	<i>293</i>
<i>Figura N°75: Algoritmo Auxiliar LEADLAG.....</i>	<i>294</i>
<i>Figura N°76: Algoritmo Auxiliar TOTALIZER.....</i>	<i>294</i>
<i>Figura N°77: Algoritmo DATAADQUISITION.....</i>	<i>295</i>
<i>Figura N°78: Algoritmo DEVCTL.....</i>	<i>295</i>
<i>Figura N°79: Algoritmo Lógico PULSE.....</i>	<i>296</i>
<i>Figura N°80: Algoritmo Lógico ONDELAY.....</i>	<i>296</i>
<i>Figura N°81: Algoritmo Lógico LIMIT.....</i>	<i>297</i>
<i>Figura N°82: Algoritmo Lógico NOT.....</i>	<i>298</i>
<i>Figura N°83: Algoritmo FLAG.....</i>	<i>298</i>

Figura N°84: Algoritmo NUMERIC..... 299

Figura N°85: Algoritmo SWITCH..... 300

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

<i>Símbolo/Siglas</i>	<i>Significado</i>	<i>Unidades</i>
τ	<i>Constante de tiempo característica del proceso</i>	<i>Tiempo</i>
τ_D	<i>Tiempo derivativo</i>	<i>Depende del sistema</i>
τ_I	<i>Tiempo integral</i>	<i>Depende del sistema</i>
$f(t)$	<i>Función en términos del tiempo</i>	<i>Tiempo</i>
ξ	<i>Tasa de amortiguamiento</i>	<i>Adimensional</i>
K_t	<i>Constante de salto tipo Rampa, (perturbaciones)</i>	<i>Depende del sistema</i>
K_T	<i>Conductividad térmica</i>	<i>(energía) / (tiempo. longitud. temperatura)</i>
δQ	<i>Variación de la energía térmica</i>	<i>Depende del sistema</i>
dE	<i>Variación de la energía interna</i>	<i>Depende del sistema</i>
δW	<i>Variación del trabajo</i>	<i>Depende del sistema</i>
gc	<i>Factor Gravitacional de conversión de unidades</i>	<i>Fuerza</i>
a	<i>Aceleración de gravedad</i>	<i>longitud / tiempo²</i>
F	<i>Fuerza necesaria para acelerar un slug de masa, equivalente a 1 libra de fuerza</i>	<i>Lbf</i>
M	<i>Masa</i>	<i>Masa</i>
μ	<i>Viscosidad evaluada a determinada temperatura</i>	<i>masa / longitud.tiempo</i>
q_z	<i>Flujo de calor en la dirección z en términos de temperatura</i>	<i>Temperatura</i>
h_T	<i>Coefficiente de transferencia de calor</i>	<i>(energía) / (tiempo. longitud². temperatura)</i>
ΔT	<i>Variación de temperatura</i>	<i>Temperatura</i>
ΔC	<i>Variación de concentración</i>	<i>Concentración</i>

ΔI	<i>Variable de entrada (input)</i>	<i>Depende de la variable</i>
ΔO	<i>Variable de salida (output)</i>	<i>Depende de la variable</i>
K	<i>Ganancia del proceso</i>	<i>Depende de la variable</i>
mA	<i>Unidad de corriente de carga eléctrica</i>	<i>Miliampers</i>
HC	<i>Controlador híbrido</i>	-
CPU	<i>Unidad central de proceso</i>	-
I/O	<i>Referido a señales input / output (entrada / salida)</i>	-
VAC	<i>Tensión de corriente alterna</i>	<i>Voltios</i>
VDC	<i>Tensión de corriente continua</i>	<i>Voltios</i>
MHz	<i>Megahertz, variación repetitiva de un fenómeno en el tiempo</i>	<i>Medida de Velocidad</i>
$Mbytes$	<i>Megabytes, Unidad de medida de memoria</i>	<i>Mbytes</i>
RAM	<i>Memoria de acceso aleatorio</i>	<i>Depende de la cantidad</i>
ROM	<i>Memoria de solo lectura</i>	<i>Depende de la cantidad</i>
TCP/IP	<i>Protocolo de control de transmisión / Protocolo Internet</i>	-

INTRODUCCIÓN

En la mayoría de los procesos químicos existen un conjunto de variables que son necesarias supervisar y/o controlar de manera que se mantengan en un valor determinado. Para lograr esto es necesario realizar la implementación de un sistema de control en forma óptima.

Los procesos automatizados brindan facilidades al operador del proceso, cuando alguna variable se sale del rango establecido debido a una perturbación en el proceso, el sistema de control será capaz de tomar acciones sobre dicha variable para corregir esta situación, similar a la decisión que ejecutaría el operador manualmente, por lo tanto el sistema automático del proceso incluirá la incorporación de una serie de dispositivos tales como sensores, transmisores, válvulas, controlador, etc., que permitirán mantener a la variable deseada en el punto de control.

En los procesos referentes a las prácticas que se realizan en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química en la Universidad Central de Venezuela, se deben supervisar y/o controlar las variables que rigen cada proceso, como lo son temperatura, presión, nivel y flujo, además de ofrecer al estudiante la posibilidad de interactuar y aplicar físicamente los conocimientos adquiridos en la cátedra de Control de Procesos, específicamente como se ve afectada la respuesta de un proceso ante variaciones en las variables de entrada y el comportamiento del mismo ante estos cambios en tiempo real, por estas razones se tomó la iniciativa de realizar un estudio preliminar para implementar un sistema automatizado que supervise y controle las variables de proceso, además de ofrecer la oportunidad de experimentar con los instrumentos y equipos con los cuales se encontrará el estudiante una vez egresado de la Universidad en el campo de trabajo.

En este Trabajo Especial de Grado, se estudiarán los procesos involucrados en las prácticas del Laboratorio de Operaciones Unitarias para su instrumentación y se

diseñará y automatizará la práctica referente a Balances en Estado No Estacionario comprendida en el área de Mecánica de Fluidos. Para alcanzar los objetivos propuestos se realizarán las actividades referentes a Ingeniería Conceptual para analizar la instrumentación requerida para la instrumentación de todas las prácticas y así proceder con la de Ingeniería de Detalle, Procura, Integración y Pruebas del Sistema de Control donde se ejecutaron las actividades referentes a las disciplinas de:

- Levantamiento de campo para determinar el estado actual de las instalaciones, elaboración de análisis de necesidades identificando aquellos equipos susceptibles a automatizar y el correspondiente estudio de factibilidad.
- Instrumentación requerida para la supervisión de variables que rigen el proceso de cada práctica. Propuestas para la modificación de la práctica de Balances en Estado no Estacionario con instrumentación requerida referida al sistema de control que se instalará.
- Aplicación para establecer las estrategias de control del nuevo sistema.
- Gestión para adquisición de Hardware, Software *Experion[®] PKS* y Controlador *C200*.
- Especificaciones generales para la configuración, implementación e instalación del nuevo sistema de control.

Luego de la instalación de todos los elementos del sistema de control se realizará la simulación del sistema en el software *Experion[®] PKS*, verificando el funcionamiento del sistema según las estrategias diseñadas para la implementación de los lazos de control y se elaborará la documentación de la narrativa de control para la puesta en marcha del nuevo sistema.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El área de Control de Procesos es de suma importancia tanto en la formación como en el desempeño profesional de los Ingenieros Químicos. En este sentido, es necesario que durante su formación académica, el estudiante cuente con la posibilidad de realizar prácticas de laboratorio que le faciliten la comprensión de los principios fundamentales, que deben ser considerados al momento de controlar un proceso químico dado. Actualmente en la Escuela de Ingeniería Química no se realizan prácticas de Control de Procesos, donde el estudiante se relacione con elementos tecnológicos y de alguna forma con el quehacer de su profesión en esta área.

En el contexto de lo que se denomina actualmente "Prácticas de Control de Procesos", se desarrollan proyectos basados en el uso del programa Simulink[®], que aún cuando resultan ser interesantes y cumplen con su objetivo académico, terminan siendo actividades diseñadas que son un complemento obligado de la teoría, además de que los resultados obtenidos no son trasladables por los estudiantes a la realidad.

El laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química es el lugar por excelencia donde el estudiante pone en ejecución los principios fundamentales de la disciplina; sin embargo, está conformado por un conjunto de prácticas que son realizadas manualmente. Cabe destacar que algunas tienen asociados sistemas de instrumentación y dispositivos acondicionados para su automatización, como es el caso de la práctica de Intercambiadores de calor, no obstante actualmente no están operativas en términos de automatización. Por lo tanto, el estudiante no tiene la oportunidad de experimentar los principios fundamentales de un Sistema Automático de Control.

Como primera fase del proyecto de automatización del Laboratorio de Operaciones Unitarias y el diseño de prácticas de control de proceso, se seleccionó una práctica inherente al área de Mecánica de Fluidos denominada Balances en

Estado no Estacionario contemplada en el programa académico del Laboratorio de Ingeniería Química I. La misma está conformada por un sistema de tres tanques dispuestos en serie, en la cual se estudia el comportamiento del vaciado y llenado de un tanque en función del tiempo y la variación de la concentración del fluido de un sistema en serie. Sin embargo, cabe destacar que para el resto de las prácticas susceptibles a automatizar y que forman parte del programa académico del laboratorio de Ingeniería Química I y II, se recopilará toda la información necesaria para la instrumentación y diseño del correspondiente sistema de control, el cual será implementado en futuros proyectos.

Este Trabajo Especial de Grado pretende diseñar y/o modificar el proceso de la práctica seleccionada, considerando la implementación de los lazos de control más comunes en la industria: flujo, nivel, presión y temperatura. Esto mediante el conocimiento y análisis del proceso, la elaboración detallada de los planos asociados, el modelo matemático que lo representa y su estudio económico. Por otra parte, se instalará un sistema de control (software y controlador) para el control de procesos, se realizará la simulación del proceso en el software. Un aspecto importante y que hace atractivo el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado es el hecho de contar con el apoyo técnico y económico de la empresa Honeywell, la cual es especialista en instrumentación y control.

Con el resultado de este proyecto se pretende impulsar el desarrollo de un Laboratorio de Control de Procesos Multidisciplinario, en el cual puedan participar estudiantes y docentes de las Escuelas de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Eléctrica. Dicho laboratorio permitiría llevar a cabo actividades para adquirir conocimiento acerca de cómo se obtienen y analizan los datos de un proceso real y cómo se manejan y controlan algunas variables en la industria química, conocer dispositivos (instrumentación) y software para operar en tiempo real (Experion[®] de Honeywell).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Estudiar los procesos involucrados en las prácticas del Laboratorio de Operaciones Unitarias para su automatización. Diseñar y automatizar la práctica de Balances en Estado No Estacionario.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Levantamiento de la información existente en relación a las prácticas del Laboratorio de Operaciones Unitarias.
2. Desarrollo de la Ingeniería Básica para la automatización del Laboratorio de Operaciones Unitarias.
3. Desarrollo de la Ingeniería de Detalle para la práctica “Balances en Estado no Estacionario”.
4. Procura del Hardware (disponible por la Escuela de Química) y el Software (a ser provisto por Honeywell).
5. Integración y pruebas del Sistema de Control Distribuido Experion[®].

I.3 ANTECEDENTES

A continuación se describe el antecedente de automatización de un equipo de transferencia de calor del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Central de Venezuela realizado como Trabajo de Grado por el Ingeniero Rafael L. Pérez:

Título: “INSTRUMENTACIÓN Y SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA UN INTERCAMBIADOR DE CALOR”⁽¹⁾.

La Escuela de Ingeniería Química para el año 2000 contaba con un equipo de transferencia de calor, específicamente un intercambiador de modelo UTC – 1/EV de la firma Elettronica Veneta, dicho equipo era utilizado en las prácticas de laboratorio sobre intercambiadores de calor de esta escuela. El Ingeniero planteó como objetivo general utilizar el intercambiador de calor para realizar ensayos con estrategias de control avanzadas, que permitieran ser desarrolladas por los grupos de investigación en sistemas de control tanto de la Escuela de Ingeniería Química como de la Escuela de Ingeniería Eléctrica.

Por lo tanto para alcanzar ese objetivo, se hizo necesario instrumentar debidamente el intercambiador de calor a fin de poder sensor todas las variables necesarias para realizar un control, llevar esta información a un computador y desde este enviar los comandos a las válvulas de control de acuerdo a los resultados obtenidos de los algoritmos de control.

Cabe destacar que este proyecto tuvo como finalidad ser desarrollado en tiempo real con un PC y además seleccionar adecuadamente los instrumentos, realizar la instalación de los mismos y desarrollar el software y hardware necesarios en el PC. Para el desarrollo del software se utilizó el programa computacional llamado FIX versión 6.1 de la firma Intellution que le permitió realizar la adquisición de datos.

En cuanto al controlador implementado que permitió la recepción y el acondicionamiento de las señales provenientes de los sensores, se utilizó un Controlador Lógico Programable (PLC) modelo TSX 37 21001 de la firma Schneider, el cual permitió la comunicación al sistema en tiempo real con el PC.

Las conclusiones más importantes obtenidas por este proyecto se citan a continuación:

- El sistema implementado (SCADA) permite recolectar datos de campo y exportarlos a otro paquete de procesamiento de datos como Excel y regresarlos nuevamente al software FIX y posteriormente son enviados al (PLC) para comandar la válvula de control.
- El sistema instalado le permite a los investigadores de sistemas de control, realizar ensayos sobre el intercambiador de calor con técnicas de control avanzadas.

La aplicación de este antecedente para el presente Trabajo Especial de Grado está basada en la información y el aprovechamiento del cableado, la data registrada por el PLC y la instrumentación necesaria para la supervisión de las variables involucradas en el proceso.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

II.1 AUTOMATIZACIÓN DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS

El Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) de la Escuela de Ingeniería Química, permite al estudiante instruirse en diferentes procesos industriales a partir de prácticas que ayudan a familiarizarlo con dichos procesos y a su vez le proveen un acercamiento directo y real con las actividades que puede realizar el Ingeniero Químico en el campo industrial.

Las prácticas realizadas por los estudiantes en equipos tales como filtros, intercambiadores de calor, columnas de destilación, etc., cumplen los requisitos académicos, permitiendo que el estudiante ponga en ejecución los principios teóricos-prácticos fundamentales de las diferentes materias que constituyen la formación académica del futuro Ingeniero Químico. Sin embargo, para que las unidades funcionen adecuadamente y se obtengan resultados experimentales en tiempos reales que faciliten la comprensión de los fundamentos teóricos que las conforman, se requiere que ciertas variables se mantengan en valores constantes. Conducir algunas de estas unidades en forma manual, sobre todo cuando están interconectadas, puede resultar complicado y hasta imposible. Así surge que en estos equipos se requiera un Sistema de Control Automático, que permita el mantenimiento de las variables en valores preestablecidos y este puede definirse como aquel que compara el valor de la variable o condición a controlar con un valor deseado y toma una acción de corrección de acuerdo con la desviación existente.

El LOU posee un área de 450 m² y dentro de sus instalaciones se encuentran un conjunto de prácticas que forman parte del programa académico del Laboratorio de Ingeniería Química I y II, facilitando el adiestramiento del estudiante en el manejo de equipos, que le permitan la ampliación y aplicación de los conocimientos

adquiridos en las áreas de Transferencia de Masa, Transferencia de Calor, Procesos de Separación y Mecánica de Fluidos.

Estas prácticas se encuentran actualmente operativas, son realizadas manualmente y están distribuidas según el área a la cual pertenecen de la siguiente manera:

Transferencia de Masa:

- Determinación de caídas de presión, velocidad de inundación y volumen retenido en una torre de relleno.

Transferencia de Calor:

- Estudio de la condensación en forma de película y gota.
- Estudio de dos intercambiadores de calor.

Procesos de Separación:

- Estudio de las características de la filtración a presión constante de una suspensión.
- Destilación continua de una mezcla binaria en una columna de separación por etapas.
- Destilación diferencial al vacío de una mezcla ternaria.
- Rectificación de una mezcla binaria en una columna de relleno.

Mecánica de Fluidos:

- Calibración de medidores de flujo.
- Lechos fluidizados – Estudio de sus principales características.
- Determinación de curvas características de bombas centrífugas.
- Determinación de las pérdidas de presión por fricción en conexiones y tramos de tubería.
- Balances en estado no estacionario.

Para la automatización completa del laboratorio, a futuro, se pretende incorporar todas las prácticas anteriormente mencionadas a un sistema de control que

será diseñado mediante la conceptualización de las estrategias de control y analizando las variables de interés según el proceso asociado a cada práctica, esto puede implicar que algunas deberán ser rediseñadas a fin de implementar la automatización de cada una de ellas sin que se pierda el objetivo de aprendizaje requerido por la asignatura, y a su vez permitir al estudiante experimentar y afianzar sus conocimientos.

Con la finalidad de preparar al estudiante en cada una de las áreas mencionadas anteriormente, se pretende que el futuro Ingeniero Químico logre de manera general familiarizarse con los procesos industriales y la operación de cada uno de los equipos que comprende el laboratorio, determinar cuando un equipo opera en condiciones de estado estacionario, obtener resultados a partir de los datos generados en el laboratorio y discutir los mismos. No obstante, los objetivos varían específicamente de acuerdo al proceso estudiado en cada una de las prácticas.

A continuación se presenta la descripción de cada una de las prácticas que conforman el programa académico del Laboratorio de Ingeniería I y II.

II.1.1. Determinación de caídas de presión, velocidad de inundación y volumen retenido en una torre de relleno.

El objetivo primordial de esta práctica, es el de realizar el análisis fluidodinámico de una columna de relleno, con anillos Pall de 5/8" operando con aire y agua. Este estudio se realiza obteniendo teórica y experimentalmente algunos parámetros como: la caída de presión, la retención de líquido en el relleno, el punto de carga y el punto de inundación ⁽²⁾.

Para estudiar las características fluido dinámicas de la torre de relleno, se utiliza agua y aire en contracorriente. El agua es impulsada hacia el tope de la columna por medio de una bomba centrífuga controlando el caudal de operación a través de una válvula y observando su medición en un rotámetro; el aire seco proveniente de una red de

tuberías, es suministrado por un compresor, el cual se introduce por el fondo de la columna e igualmente se controla el caudal de aire a través de una válvula observando su medición en un rotámetro, este se introduce por el fondo de la columna. Operando la columna de esta manera se determina la caída de presión para cada uno de los distintos caudales de líquido y aire fijados mediante la visualización de las diferencias de alturas manométricas en el manómetro en “U”.

Para el estudio, se dispone de una Columna de Relleno (C), tal y como se muestra en la *Figura N° 1*, a ella se encuentra colocada una red de tuberías para el suministro de aire a presión proveniente de un compresor mediante la apertura de la Válvula (VG-1), el flujo de aire que se introduce a la columna es pasado previamente por un Separador Flash (V-1), seguido de un Filtro Deshumidificador (F) y una Válvula de Aguja (VA-1), la cual regula la presión del flujo de aire en 30 psi que se visualiza en un Manómetro de Bourdon (MB-1), por último se cuenta con un Rotámetro (R1) que mide el flujo de entrada de aire a la columna, este flujo se regula con la Válvula de Globo (VG-3).

La primera parte de la experiencia se realiza a relleno seco, de manera que para diferentes magnitudes de caudal de aire fijados en (R1), se reportan los valores de caída de presión de la columna que son apreciados por la diferencia de alturas manométricas en el Manómetro en “U” (M-1).

La segunda parte de la experiencia se realiza a relleno irrigado, para ello la columna de relleno (C), dispone de una entrada y de una cámara de distribución de líquido, en la parte superior e inferior respectivamente. Así mismo se cuenta con un sistema de medición (Mn-1) que permite determinar el nivel del líquido contenido en dicha cámara. También se cuenta con una Bomba Centrífuga (PB-1) que envía agua hacia el tope de la columna mediante la apertura de las Válvulas VP-1, VP-3 y VG-4. En la línea de tuberías se encuentra instalado un Rotámetro (R2) con el cual se fijan diferentes caudales de agua, regulados por la Válvula de Globo (V-9), y se reportan

las diferencias de alturas manométricas indicadas en (M-1), la variación del caudal de aire indicado en el (R1) y la altura del nivel de la cámara de distribución.

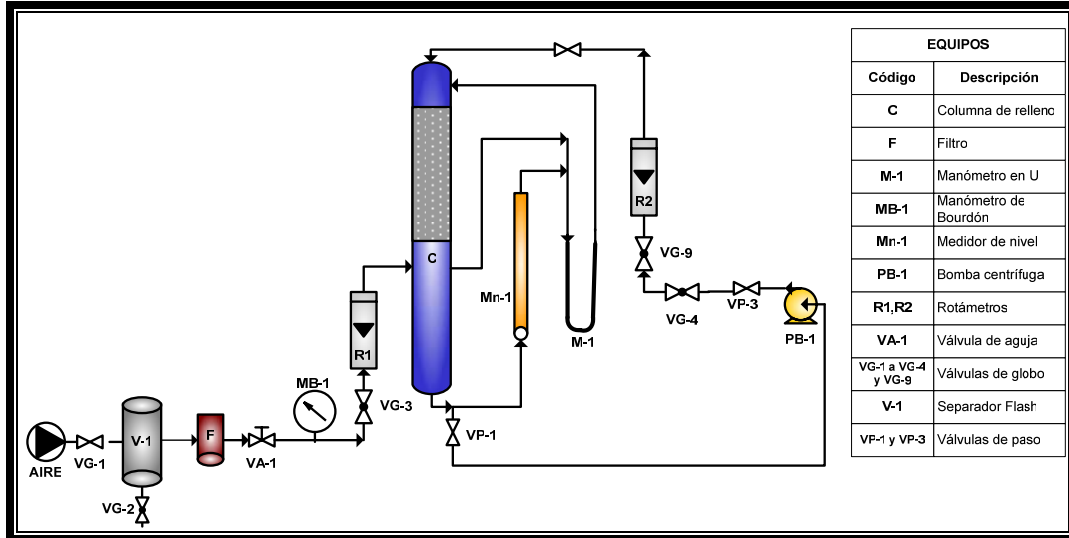


Figura N° 1: Esquema general del sistema de la torre de relleno. (Elaboración propia)

II.1.2. Estudio de la condensación en forma de película y gota.

En esta experiencia, principalmente se debe estudiar y establecer diferencias cualitativas y cuantitativas entre los procesos de condensación en gota y película, considerando las pérdidas de calor al ambiente y el efecto de la presencia de incondensables dentro del sistema de condensación ⁽²⁾.

La condensación sobre superficies sólidas tiene lugar por dos mecanismos. Uno se conoce como *condensación en película* y ocurre si el condensado moja fácilmente la superficie, formándose una película de líquido sobre la que se realiza la subsiguiente condensación. El segundo tipo de condensación, conocido como *condensación en gotas*, tiene lugar cuando el líquido moja la superficie de una manera parcial, haciendo que el condensado se aglutine formando gotas discontinuas adheridas a la superficie. Estas gotas crecen gracias a la posterior condensación sobre la superficie, uniéndose a las gotas adyacentes ⁽²⁾.

En esta práctica se pretende apreciar de forma visual y numérica estos dos fenómenos de condensación, así mismo determinar los coeficientes de transferencia de calor en cada uno de los procesos, determinar la resistencia controlante y en función de la misma graficar el coeficiente global versus el flujo másico o el coeficiente global versus la diferencia de temperatura (según sea el caso).

Para la apreciación de estos dos fenómenos de condensación, se debe conocer el equipo y su funcionamiento tal y como se muestra en la *Figura N° 2*, el mismo está constituido por un sistema hidráulico formado por un Tanque cilíndrico (T) abierto a la atmósfera que contiene agua, el sistema consta de una red de tuberías y se dispone de una Bomba Centrífuga (P-1), accionada por medio del Interruptor (I), que impulsa el fluido enviándolo a la cámara de condensación, la Válvula de Globo (VG-3) regula el flujo de agua hacia la bomba y la Válvula de Globo (VG-4) regula la recirculación directa del agua hacia el Tanque (T).

Además, la cámara de condensación dispone de un sistema de extracción de aire que está provisto de una Válvula de Paso Rápido (VP-1) y una Válvula de Globo (VG-1) que permiten desalojar el aire presente en la cámara de condensación. En la experiencia se abren las Válvulas (V1) y (V2) correspondientes a los Rotámetros (R1) y (R2) respectivamente, se fija un caudal mínimo de operación en ambos, se enciende la Resistencia con la perilla reguladora (P), se verifica que está encendida en la Luz Indicadora (In-1) y que el selector de temperaturas se encuentre indicando la señal del Termopar (T1) cuando el sistema no presente variaciones de temperatura se registra este valor, se cambia el selector para el Termopar (T2) y así sucesivamente hasta reportar todos los valores de temperatura terminando con el Termopar (T7).

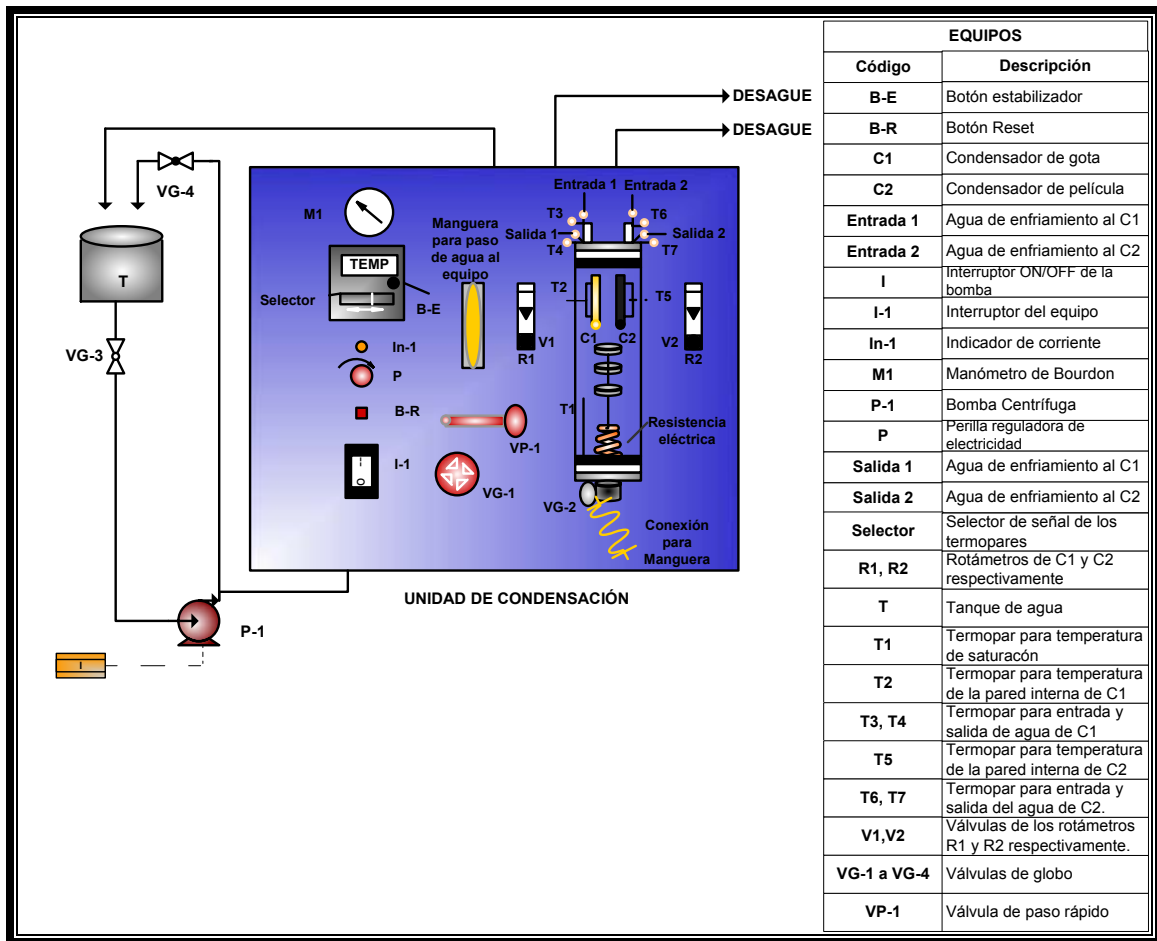


Figura N° 2: Esquema general del sistema de condensación. (Elaboración propia)

II.1.3. Estudio de dos intercambiadores de calor.

El objetivo principal de esta práctica es comparar el desempeño del intercambiador de calor de carcasa y tubos en “U” con el intercambiador de placas, para diferentes configuraciones de flujo bien sea a contracorriente o en paralelo operando a distintas magnitudes de caudal.

Un intercambiador de calor es un dispositivo que permite que dos fluidos a diferentes temperaturas, realicen un intercambio térmico sin que los fluidos tengan contacto físico entre sí, esto permite bien sea enfriar o calentar uno de los fluidos a partir del otro sin que los fluidos se mezclen ⁽²⁾.

Existen diferentes tipos de intercambiadores de calor tales como: tubos concéntricos, de placa, de carcaza y tubos en “U”, etc. Algunos tipos de intercambiadores permiten dos formas de circulación de los fluidos: en paralelo (fluidos circulando en el mismo sentido) y en contracorriente (fluidos circulando en sentidos contrarios), tal es el caso de los intercambiadores de tipo placas. Para otros intercambiadores (como el caso del intercambiador de tipo carcaza y tubos en “U”) se habla más bien de flujos mixtos ya que internamente los fluidos van alternadamente en paralelo y en contracorriente, existiendo sólo esa posibilidad para este tipo de intercambiador de calor.

Para alcanzar el objetivo de la práctica se debe conocer el equipo y su funcionamiento, tal y como se muestra en la *Figura N° 3*.

Se dispone de un Tanque de alimentación (T-1), de forma cilíndrica, el cual se encuentra abierto a la atmósfera. La Bomba (P-1), que se encuentra ligeramente por debajo del tanque de alimentación, toma el agua del fondo del mismo y se encarga de impulsarla a través del sistema. En la descarga de la bomba existe una recirculación hacia el tanque y una línea de tubería que suministra agua fría directamente a los intercambiadores.

El Condensador Horizontal (E-3), es alimentado con vapor proveniente de la caldera cuyo caudal es regulado manualmente mediante la Válvula Reguladora de Presión (PRV), además cuenta con un Manómetro (PI-1), que mide la presión del vapor y con un termómetro (TI-5) que refleja la temperatura de operación del Condensador (E-3), así como también cuenta con una Válvula Autopurgante (V11) que evita una sobrepresión en el intercambiador. En la corriente de salida de agua, ya caliente, se encuentra un termómetro (TI-6) para verificar la temperatura de la misma.

El Intercambiador de Placas (E-2), opera según la configuración de flujo en paralelo, por el accionamiento de las Válvulas (V3) y (V7) y para su configuración en contracorriente a través de las Válvulas (V5) y (V6), mientras que el intercambiador

de carcaza y tubos en “U” (E1), tiene la única posibilidad de operar con flujos mixtos con la apertura de las Válvulas (V4) y (V7).

La experiencia se realiza en tres partes según la configuración de flujo sometida a estudio (contracorriente o paralelo): En la primera se fija un caudal de operación constante para ambos fluidos, en la segunda se incrementa el flujo de agua caliente y por último, se incrementa el flujo de agua fría, mediante la manipulación de los Rotámetros (FI-1) y (FI-2) que se encuentran ubicados en la entrada de los intercambiadores.

Se debe esperar la estabilización del sistema y reportar los valores de temperatura de cada una de las corrientes de entrada y salida de los intercambiadores que se miden a través de cuatro Termopares (TI-1, TI-2, TI-3 y TI-4).

Los Termopares se encuentran ubicados adecuadamente en las tuberías, y sus lecturas pueden ser apreciadas en los visores del panel de control del equipo.

Finalmente los fluidos contenidos en el equipo son desalojados del mismo y enviados al desagüe.

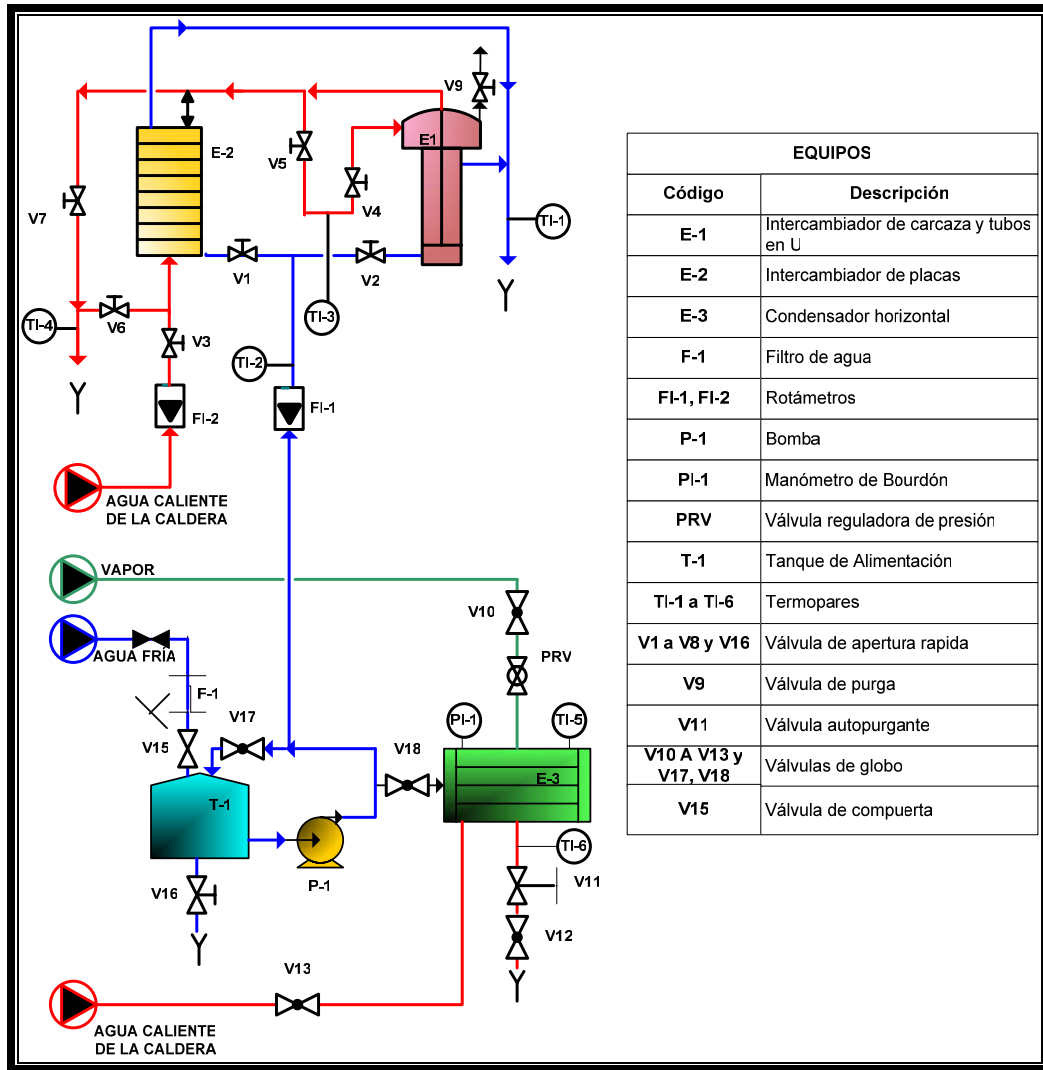


Figura N° 3: Esquema general del sistema de intercambiadores. (Elaboración propia)

II.1.4. Estudio de las características de la filtración a presión constante de una suspensión.

Esencialmente se pretende estudiar la operación de filtración y el proceso de lavado, así como las aplicaciones industriales de este tipo de equipos ⁽²⁾.

La filtración es una operación unitaria que permite separar una fase dispersa (partículas sólidas o líquidas) de una fase continua (líquida o gas) con ayuda de un

medio poroso que retiene las partículas. En este caso la fase dispersa es la suspensión de carbonato de calcio y la fase continua es el agua, como la suspensión es adquirida con una serie de especificaciones se requiere la supervisión del cambio de concentración de la suspensión una vez que se haya formado la torta (después del proceso de filtrado) ⁽²⁾.

A fin de alcanzar el objetivo se debe conocer el procedimiento a seguir para el funcionamiento del equipo. El sistema es mostrado en la *Figura N° 4* y cuenta con un Tanque de almacenamiento (TA-1), en el cual se encuentra una suspensión de carbonato de calcio (CaCO_3), que es homogeneizada utilizando un Agitador (SM) con un Motor eléctrico (M), accionado por un Interruptor (A-1) ubicado en el Panel de Control (P-1).

Para iniciar con el proceso de filtrado se da apertura a las Válvulas (V-2), (V-3), (V-4) a fin de promover la recirculación de los fluidos a través del sistema durante 4 min. Luego se enciende la Bomba de desplazamiento positivo (B1), la cual es encendida por medio del Interruptor (B-1) que se encuentra ubicado en el panel de control y está seguida de una red de Válvulas (V-3), (V-4), (V-5) y (V-6) y tuberías que dirigen el fluido al tanque de almacenamiento, al desagüe y/o al Filtro Prensa (FP-1). Previo a la entrada del filtro se cuenta con una Válvula de Globo (V-7) que regula la presión del fluido, dicha presión debe de ser igual a 12 psi y es indicada en un Manómetro (M-1).

El Filtro Prensa (FP-1), consta de tres placas filtrantes las cuales poseen a cada lado telas filtrantes que permiten la formación de la torta, así como también unas boquillas que arrojan el residuo al canal de desagüe para ser desalojado del sistema, luego se encuentra una placa tapón y por último dos placas marco. Este sistema de placas es prensado por medio de un tornillo sin fin el cual se mueve manualmente con la ayuda de una varilla de metal.

Una vez que se alcanza la presión de trabajo, se colocan cinco (5) recipientes con numeración sucesiva y con el uso de un cronómetro se miden los tiempos de llenado de cada uno de los recipientes hasta el nivel descrito en el mismo, se pesan estos recipientes y se determina la densidad y viscosidad de las muestras.

La experiencia culmina con el proceso de lavado, para lo cual se abren las Válvulas (V-4), (V-5) y (V-6) para purgar residuos de la suspensión. Se abre (V-1) para permitir la entrada de agua al sistema, se espera hasta observar que por el desagüe sale agua limpia, se regula nuevamente la presión hasta que se encuentre en 12 psi y se repite el procedimiento de llenado de los recipientes midiendo siempre el tiempo que transcurre para el llenado de los mismos. Este proceso se realiza para establecer la comparación entre la velocidad de filtrado y lavado del proceso.

Por otra parte, cuando se realiza el desmontaje del equipo y se obtiene la torta formada, se mide la altura, la base y profundidad de la misma para luego mediante cálculos específicos determinar: la resistencia específica de la torta, porosidad y resistencia del medio filtrante.

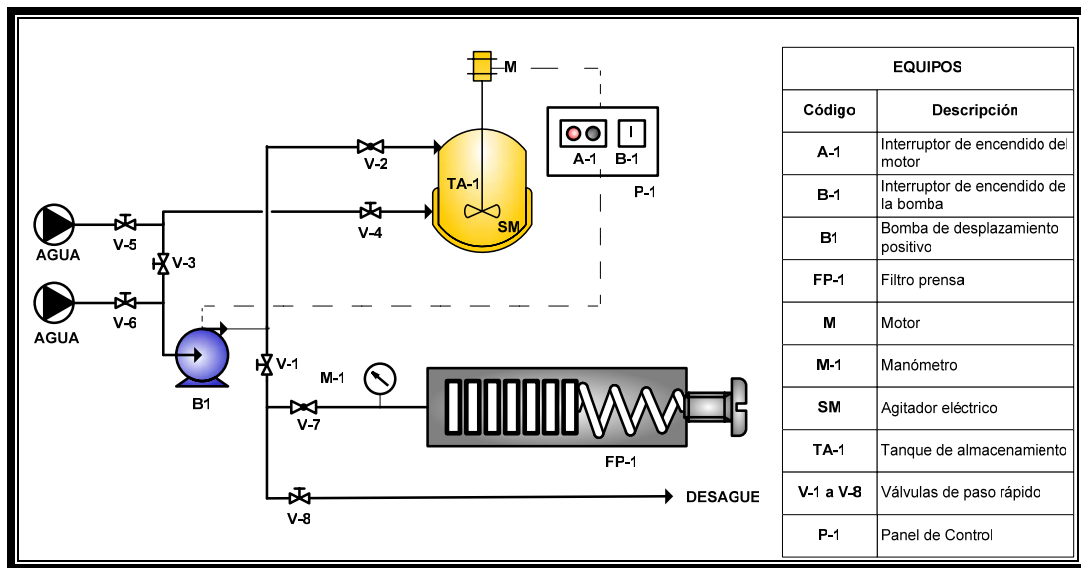


Figura N° 4: Esquema general del sistema de filtración. (Elaboración propia)

II.1.5. Destilación continua de una mezcla binaria en una columna de separación por etapas.

En esta experiencia de laboratorio, se estudia el funcionamiento y la operación de una columna de destilación para la separación de una mezcla binaria metanol-agua, cuando se opera a reflujo total y para una relación de reflujo determinada.

La rectificación continua o fraccionamiento, es una operación de destilación a contracorriente en varias etapas. Por lo general, para una solución binaria, con algunas excepciones, es posible separar mediante este método los componentes de una solución y recuperar cada componente en el estado de pureza que se desee ⁽²⁾. Este proceso de destilación se muestra en la *Figura N° 5*.

La mezcla metanol-agua se almacena en un Tanque de alimentación (D_1), seguidamente la mezcla es conducida a una Bomba Dosificadora (G_1), que la impulsa a través de un Precalentador (E_2) para luego ser alimentada en el quinto plato de la Columna de Destilación (C_1). El flujo en el rehervidor es calentado mediante una Resistencia eléctrica (J_1) ⁽²⁾.

Cuando se alcanza la temperatura de burbuja, los vapores pasan a través de la Columna de destilación (C_1) hasta llegar a la zona del Condensador (E_1), el cual utiliza agua como líquido de enfriamiento y este flujo se regula con la Válvula de Paso Rápido (V_7). Condensado el vapor comienza a caer el destilado y este es dirigido a la Electroválvula (EV_1), la cual mantiene la relación de reflujo según el tiempo de apertura y cierre de la misma; el flujo de destilado que no es recirculado a la columna, pasa por el Intercambiador de Calor (E_3), donde es enfriado para luego ser almacenado en el Tanque (D_2). Del mismo se recogen muestras de destilado cada cierto tiempo hasta que el sistema alcance las condiciones estacionarias, midiendo para cada corte índices de refracción y los perfiles de temperatura visualizados en los Termopares ($TI_1, TI_2, TI_3, TI_4, TI_5, TI_6$).

Se repite el procedimiento anterior pero esta vez para una relación de reflujo determinada, que se regula a través de la Electroválvula (EV1) por medio de dos temporizadores en donde se fijan el tiempo de apertura y cierre de la misma. Luego se reduce la temperatura del residuo en el Intercambiador (E₂) (tipo termosifón) y (E₄) producto del intercambio de calor con la corriente de alimentación. Posteriormente se abre la válvula (V6) para permitir que el residuo sea almacenado en el Tanque (D₃), también se enciende la Bomba dosificadora de alimentación (G₁) y se espera hasta que el perfil de temperaturas sea más o menos estable, esta variación de temperatura es registrada nuevamente por los termopares. A su vez se recogen cortes de destilado y se miden los índices de refracción de cada muestra.

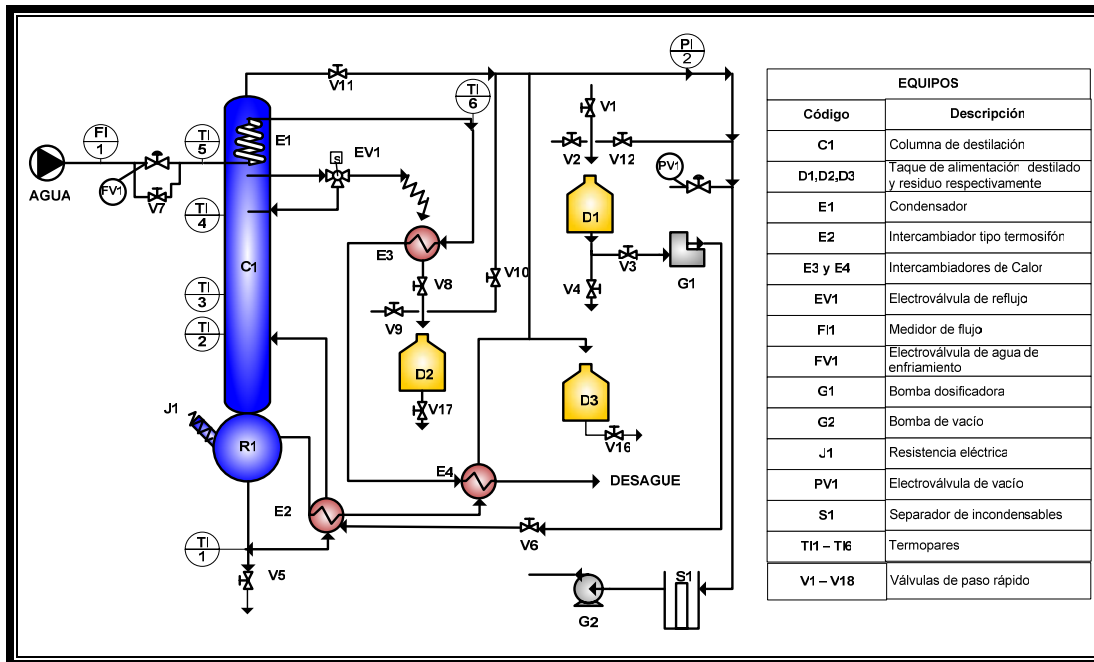


Figura N° 5: Esquema general del sistema de destilación continua. (Elaboración propia)

Los datos son analizados por los métodos de Ponchón-Savarit, McCabe-Thiele y Fenske para calcular el número de platos teóricos a reflujo total y a una relación de reflujo determinada aplicando sólo los dos primeros, lo que además permite comparar los métodos entre sí con los resultados experimentales. Adicionalmente, se determina

la eficiencia global de la columna y la eficiencia de los platos reales, y se estiman las pérdidas de calor al ambiente, para discutir si se cumple una suposición común a los métodos aplicados según la cual la columna debe operar en forma adiabática.

II.1.6. Destilación diferencial al vacío de una mezcla ternaria.

Se pretende familiarizar al estudiante con el proceso de destilación discontinua por carga de una mezcla multicomponentes (ciclohexano, tolueno, xilenos) y analizar la interrelación que existe entre las variables de temperatura, porcentaje vaporizado y composición del destilado ⁽²⁾.

La destilación diferencial es un proceso por lotes en el cual la mezcla a ser destilada se carga en un recipiente fijo, esta se hierve lentamente y los vapores se descargan en un condensador tan pronto como se forman, para ser almacenado en un colector, luego el producto es analizado para determinar las composiciones de los elementos de la mezcla. La primera porción de destilado será la más rica en la sustancia más volátil; a medida que transcurre la destilación se obtienen una serie de productos de diferente pureza ⁽²⁾.

El equipo tal y como se muestra en la *Figura N° 6*, tiene como finalidad recuperar los productos más volátiles a partir de una disolución líquida por destilación discontinua, para esto, la mezcla compuesta por Ciclohexano, Tolueno y Xileno (orto, meta, para) es introducida en el Balón de Destilación (BD-1) y se genera calor al mismo mediante la Manta de Calentamiento (MC-1) regulado por un Reóstato (R-1) hasta que el líquido alcance su temperatura de burbuja y parte de la carga se vaporice. Al Balón de destilación (BD-1) se encuentran acoplados dos termómetros, el primero (T1) ubicado en la abertura diagonal del balón, el cual mide la temperatura del líquido en ebullición, y el segundo (T2) por la abertura vertical a la altura de la entrada del Condensador (C-1), que se encarga de medir la temperatura del vapor.

El (C-1) de vidrio se encuentra colocado de forma inclinada y recibe agua de enfriamiento mediante la apertura de las Válvulas (V-1) y (V-0), que son las de paso principal del agua.

En el extremo del condensador (C-1), por donde sale la carga condensada de ciclohexano, tolueno y xileno correspondiente a cada corte, se encuentra conectado un Depósito de Destilado (DD-1), permitiendo la descarga del líquido ya destilado al cilindro recolector mediante la apertura de la Válvula (V-2). En la parte superior del Depósito de Destilado (DD-1) se encuentra conectado un Manómetro en “U” (MU-1), cuyo líquido manométrico es mercurio y mide la diferencia de presión que existe entre el sistema y el ambiente, esta diferencia de presión es posible mediante la apertura de la Válvula (V-4). Se tiene además la Válvula (V-3) que permite realizar el vacío entre el sistema y el ambiente conjuntamente con la Bomba (BV-1), la cual es encendida a través de un Interruptor principal (I-1).

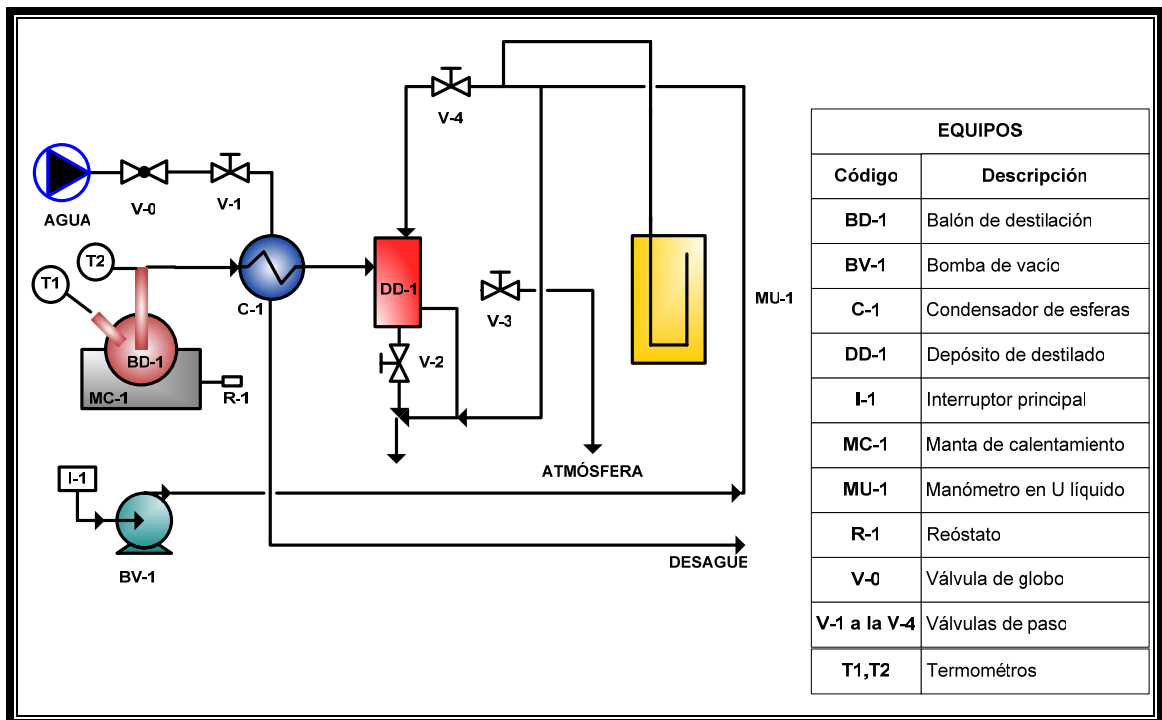


Figura N° 6: Esquema general del sistema de destilación diferencial. (Elaboración propia)

II.1.7. Rectificación de una mezcla binaria en una columna de relleno.

Principalmente se busca familiarizar al estudiante con la operación y funcionamiento de una columna de relleno y su empleo en la separación de una mezcla binaria por destilación discontinua.

En este caso, el líquido que se desea separar es cargado en un calderín donde continuamente su composición se ve modificada, ya que se va retirando del sistema un destilado más rico en el componente más volátil que la carga inicial a una relación de reflujo determinado. En el calderín la composición del líquido cambia y en consecuencia el destilado va enriqueciéndose en el componente más volátil (varía la composición del tope) ⁽²⁾.

El sistema mostrado en la *Figura N° 7*, consta principalmente de una Columna de Relleno (C_R), un Condensador de Tope (E_T) y un Rehervidor (B). Mediante la manta de calefacción se le suministra calor a la muestra que comienza a evaporar. Los vapores resultantes ascienden por la columna (C_R) y llegan al condensador (E_T) donde se produce el cambio de fase de vapor a líquido. El condensado cae y pasa a la Columna Hidrostática (CH). En el primer ramal se encuentra la Válvula de Mariposa (V3), que permite vaciar el contenido de la columna hidrostática, y por el segundo ramal se encuentran dos Rotámetros en serie (R1) y (R2), empleados para controlar el flujo de destilado, el flujo de retorno a la columna y la relación de reflujo a la cual operará el sistema de rectificación mediante la apertura o cierre de las Válvulas de Aguja (NV1) y (NV2) respectivamente.

En la corriente de salida de (R2) se encuentra el subenfriador (E), el cual descarga el destilado en el Recipiente (D) para ser retirado del sistema mediante la manipulación de la Válvula de Mariposa (V4) ⁽²⁾.

Adicionalmente en el sistema, se encuentra un Termómetro ubicado en el tope de la columna (T_T) y otro en el balón del rehervidor (T_F). La manta de calentamiento junto

con la manta aislante de la columna, permiten mantener la temperatura del sistema, y los termómetros permiten conocer el perfil de temperaturas que se presenta en el sistema, específicamente, la temperatura de tope y de fondo.

Por el sistema de enfriamiento, el Condensador de Tope (E_T) y el Subenfriador (E) se hace circular agua (proveniente de la calle), que luego de ser usada es descargada al desagüe. Para controlar el flujo se emplean tres Válvulas (VG-1), (VG-2) y (VG-3).

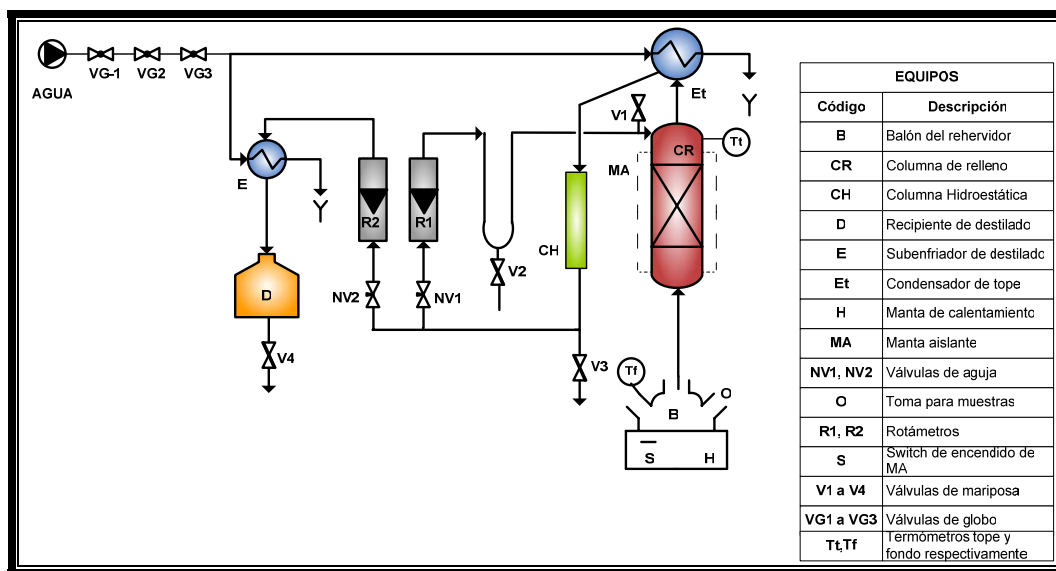


Figura N° 7: Esquema general del sistema de rectificación. (Elaboración propia)

II.1.8. Calibración de medidores de flujo.

El objetivo esencial de esta experiencia es realizar la curva de calibración del tubo de Venturi para un flujo de aire, a partir de los datos obtenidos experimentalmente con el tubo de Pitot y compararla con la obtenida a partir de los valores teóricos ⁽²⁾.

El equipo a utilizar mostrado en la Figura N° 8, está conformado por un tramo de tubería en el cual se encuentran instalados dos sistemas de medición de flujo, un Ventilador (F) que succiona el aire del medio ambiente, y una Válvula de Compuerta (V1) que permite regular la entrada de aire al sistema.

El primero de los medidores de flujo es un Tubo de Venturi (TV), que se encuentra conectado a un Manómetro en “U” (M1), con la modificación de que en el tramo de manguera que conecta al manómetro con el punto aguas abajo del tubo de Venturi, se encuentra una ramificación que abre al ambiente (por medio de una pinza), permitiendo determinar la diferencia de altura correspondiente a la diferencia de presión entre aguas arriba y la atmósfera. El líquido manométrico de este manómetro diferencial es agua destilada.

El segundo medidor de flujo instalado, es un Tubo de Pitot (TP) que también posee un Manómetro en “U” (M2), para determinar la diferencia de altura manométrica correspondiente a la diferencia de presión entre la presión estática y la dinámica. El líquido manométrico que utiliza es alcohol isopropílico. Las tomas manométricas del tubo de pitot se conectan a (M2) por medio de dos Válvulas de Mariposa (V2) y (V3).

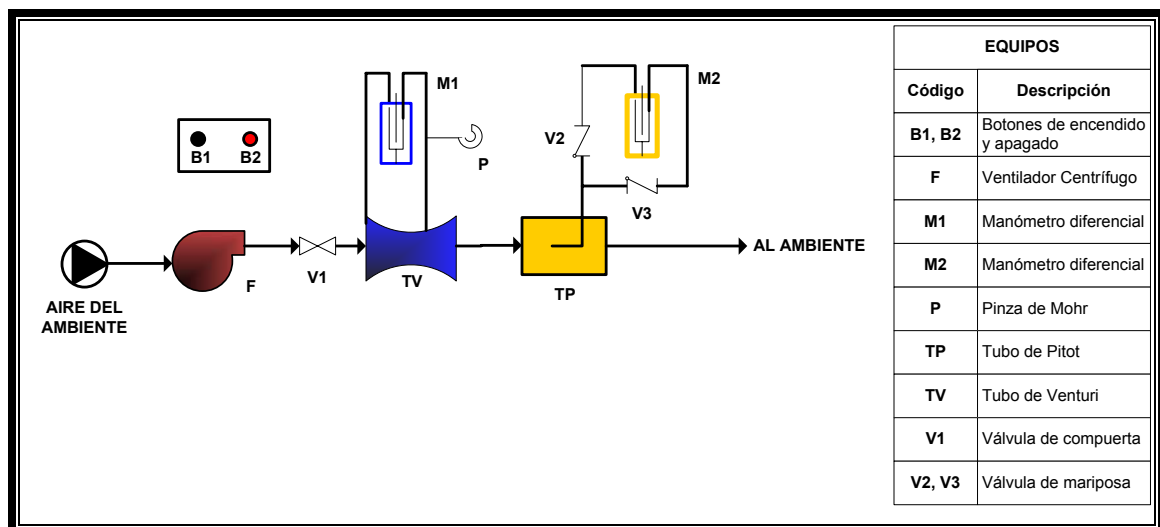


Figura N° 8: Esquema general del sistema de medición de flujo. (Elaboración propia)

II.1.9. Lechos fluidizados – Estudio de sus principales características.

En esta práctica se realiza el proceso de fluidización, el cual se relaciona con la condición de las partículas sólidas de un lecho completamente suspendidas en un fluido (líquido o gas) que atraviesa el mismo en dirección vertical ascendente, el cual presenta una velocidad suficiente para que la fuerza de la caída de presión en el lecho por el área de corte transversal donde pasa el fluido sea igual o relativamente mayor a la fuerza gravitatoria sobre la masa de las partículas ⁽²⁾. La fluidización permite el movimiento de las partículas del lecho expandiéndose y logrando una mayor altura por área de corte transversal.

Se busca estudiar el fenómeno de fluidización de partículas sólidas de un lecho, por medio del análisis de los principales parámetros que caracterizan dicho proceso. El sistema a utilizar para el estudio del comportamiento de un lecho esta conformado por: Un lecho de arena de mar y uno de catalizador (CVP-R8) por los que fluye aire comprimido ⁽²⁾.

Para el estudio, se tiene un equipo tal y como se muestra en la *Figura N° 9*, el cual consta de dos columnas de policarbonato abiertas a la atmósfera en su parte superior, por las cuales se hace circular aire comprimido. Una de estas columnas (C₂-LC) tiene como lecho un catalizador tipo (CVP-R8) y la otra columna (C₁-LA) tiene como lecho arena de mar.

Cada columna tiene instalado un Manómetro en “U” de vidrio conectado mediante empalmes con mangueras de caucho a los extremos superior e inferior de la torre, estos manómetros permiten medir la diferencia de altura asociada a la caída de presión del aire al circular por el lecho.

El Manómetro (PI-02) conectado a la Columna (C₂-LC) tiene como fluido manométrico tetracloruro de carbono; mientras que el Manómetro (PI-01) conectado a la Columna (C₁-LA) posee como líquido manométrico mercurio.

La entrada de aire comprimido al sistema es regulada por medio de una Válvula de Globo (V1); posteriormente el flujo pasa a través de un Filtro (F) para eliminar impurezas y humedad. A su vez la presión es regulada por una válvula de aguja (V2), la cual tiene acoplado un manómetro de Bourdon (M1) que indica la presión del aire entrante.

Después de mantener la presión del aire de entrada en 50 psi, se regula el caudal que se introduce a la columna en operación de manera de fijar una altura máxima y mínima del lecho en la columna, mediante una Válvula de Globo (V3) y un Rotámetro calibrado (R). El paso del aire es finalmente desviado hacia la columna (C₂-LC) o (C₁-LA) por medio de las Válvulas de Globo (V4) y (V5) respectivamente y se libera de las columnas por el tope. Para cada una de las columnas se reportan las diferencias de alturas manométricas y alturas de lecho para diferentes caudales de operación, así como también se observa el caudal de mínima fluidización.

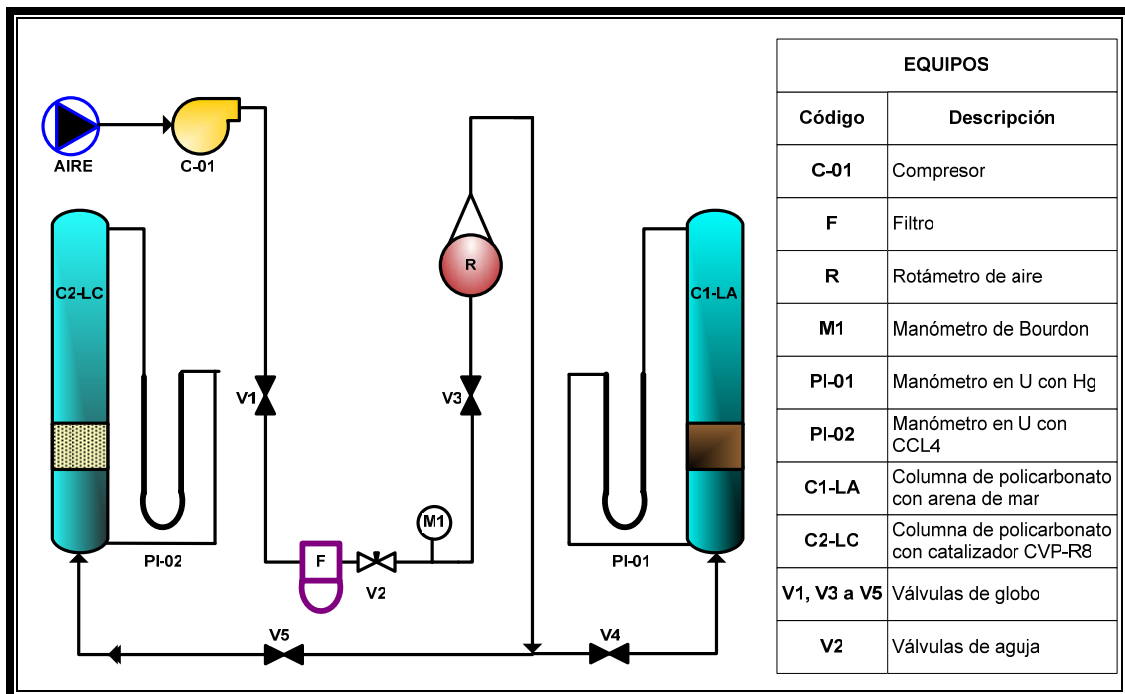


Figura N° 9: Esquema general del sistema de lechos fluidizados. (Elaboración propia)

II.1.10. Determinación de curvas características de bombas centrífugas.

En esta práctica se requiere elaborar y estudiar las curvas características de un sistema de bombas centrífugas operando de forma individual, en serie y en paralelo.

En el proceso, según la experiencia que se desee realizar, bien sea que el sistema opere en forma individual, en serie o en paralelo, se toma lectura de la variación de la presión de descarga de las bombas para distintos caudales de trabajo ⁽²⁾.

El recorrido del fluido se describe en el sistema mostrado en la *Figura N° 10*, a partir del agua saliente del fondo del Tanque (TK-01), se encuentra una bifurcación en Y que distribuye el flujo, por el costado izquierdo hacia la Bomba (P-1) y por el derecho hacia (P-2). Según la experiencia que se desea efectuar el fluido toma ambos caminos o uno sólo abriendo o cerrando las válvulas de las líneas correspondientes. Una vez llegada el agua a la(s) bomba(s) (P-1) y/o (P-2) el flujo es impulsado por la(s) misma(s) aguas arriba, donde inmediatamente se toma lectura de la presión de descarga; luego se encuentra otra división en Y donde se consigue con el flujo proveniente de la bomba opuesta y luego se dirigen ambos hacia una sola línea aguas arriba (en caso de operar en paralelo), o simplemente el flujo descargado por una de las bombas sigue el camino aguas arriba (en caso de operar con una sola bomba).

Cuando el sistema está configurado para operar en serie, el fluido entra primero por la Bomba (P-1) la cual en la descarga tiene ubicados manómetros que permiten medir la presión, luego se desvía el caudal hasta llegar a la Bomba (P-2) midiéndose igualmente la presión para luego continuar la línea aguas arriba.

Seguidamente el fluido proveniente de las bombas se encuentra con la Válvula de Globo (V9), que regula el paso hacia el Rotámetro (FI-1) y que se manipula para variar el nivel o la altura del flotador en el medidor de flujo (es decir variar el caudal) y así tomar las variaciones de presión de descarga en el sistema, la intensidad de corriente si se trabaja con la Bomba (P-1), la potencia eléctrica si se trabaja con la

Bomba (P-2) ó ambas magnitudes en caso de la configuración en serie o paralelo. A la salida del Rotámetro (FI-1) el agua es devuelta al tanque por la línea de recirculación. En la línea que conduce hacia la Bomba (P-1) se encuentra la desviación de desagüe que es restringida por la Válvula de Globo (V2) ⁽²⁾.

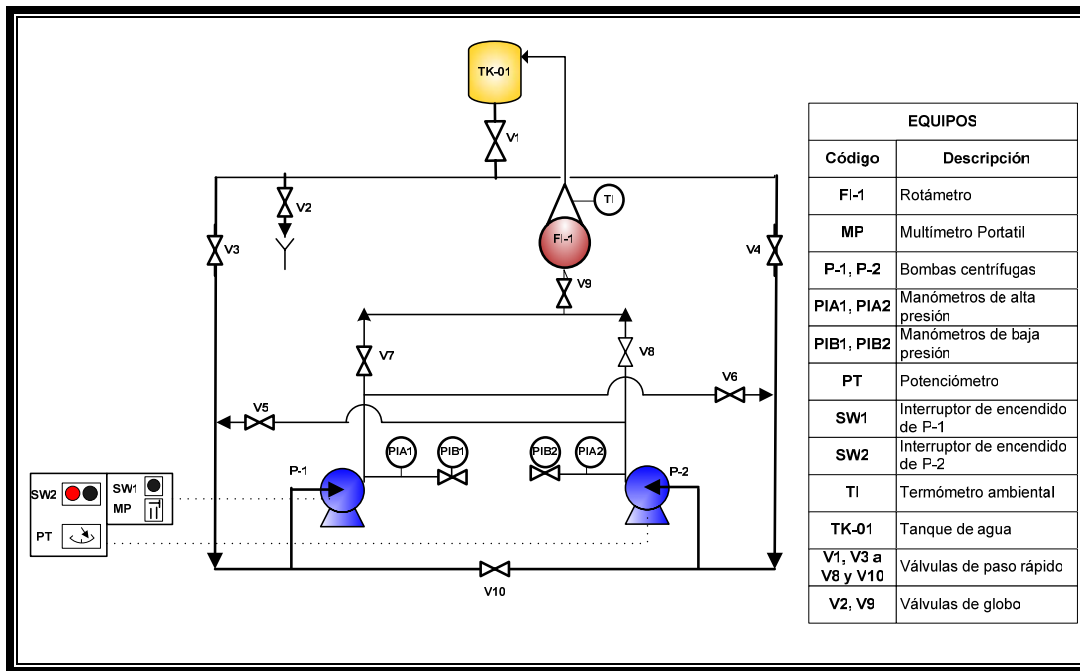


Figura N° 10: Esquema general del sistema de bombas centrífugas. ^(Elaboración propia)

II.1.11. Determinación de las pérdidas de presión por fricción en conexiones y tramos de tubería.

Fundamentalmente se estudia el comportamiento de un flujo dentro de una tubería y las pérdidas de presión ocasionadas por la fricción del fluido al circular a través de tramos de tubería, accesorios y medidores de flujo ⁽²⁾.

Este objetivo se pretende alcanzar mediante la utilización del equipo que se muestra en la *Figura N° 11*, que está conformado por un sistema de tuberías con un tramo removible, que permite intercambiar los accesorios, tramos de tubería y medidores de flujo a estudiar. Además de esto posee un tramo de tubería de borosilicato, el cual

permite observar el comportamiento del fluido en movimiento; este último tramo está conectado a un Balón Presurizado (V) que contiene tinta para apreciar con mayor detalle el comportamiento del líquido al fluir, la cantidad de tinta expulsada se controla por medio de la Válvula de Globo (V7). Este tramo se utiliza en la experiencia cualitativa que permite estudiar los diferentes regímenes de flujo.

Para realizar cada una de las experiencias por separado existe un conjunto de Válvulas de Paso Rápido (V1), (V2), (V3), (V4), (V5) y (V6) (cuando se encuentra abierta (V1), permite el paso del fluido a través del tramo en estudio y la recirculación del agua al tanque; y (V6) permite el paso del fluido por el tramo de borosilicato e impide la recirculación del agua con tinta al sistema) ⁽²⁾.

Este sistema de tuberías está conectado a una Bomba Centrífuga (G1) cuyo motor es de velocidad variable y puede ser regulado por medio de un potenciómetro que se encuentra en el panel de control, a fin de fijar el caudal de trabajo con ayuda del Medidor de Flujo (FI). El equipo también posee un Tanque (T) de acero inoxidable, para el depósito del agua que circulará por el mismo.

Para la realización de esta experiencia se debe encender el equipo presionando (B4), se colocan las tomas manométricas en el accesorio, cuidando colocar la toma de alta (identificada por H) en el punto de mayor presión y la toma de baja (identificada por B) en el punto de menor presión, se abre la Válvula (V1), se pone en funcionamiento la Bomba colocando (P2) en 1, y se espera hasta que se desaloje todo el aire del circuito hidráulico.

Se fija un caudal inicial girando el Potenciómetro (P3), se lee el caudal en el Medidor de Flujo o Rotámetro (FI) y se reporta este valor, luego se abren las Válvulas (V3), (V2) y (V4). Se lee la altura registrada en el Manómetro (PI) y se reporta este valor para el accesorio correspondiente. Se repite este procedimiento para diferentes caudales de operación, se cierran las tomas manométricas (V3) y (V2) y se apaga la

bomba colocando el selector (P2) en 0. Se repite este procedimiento para cada accesorio.

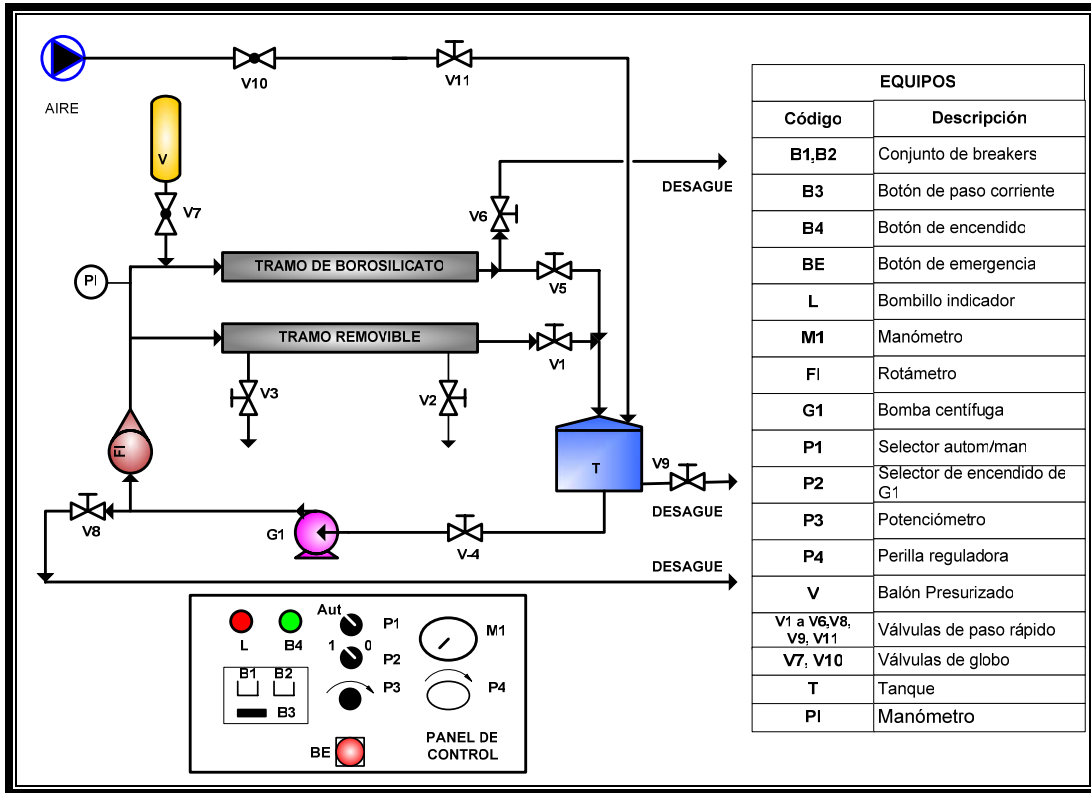


Figura N° 11: Esquema general del sistema de pérdidas por fricción. (Elaboración propia)

II.1.12. Balances en estado no estacionario.

El objetivo fundamental es el estudio en forma práctica del comportamiento de sistemas en estado no estacionario y comparar dicho comportamiento con el esperado a partir de los modelos matemáticos teóricos que los definen ⁽²⁾. Particularmente, se estudia el vaciado y llenado de un tanque así como la variación de la concentración de sal en un sistema de tanques conectados en serie.

Para alcanzar el objetivo se dispone de un sistema, mostrado en la *Figura N° 12*, conformado por un Tanque (T1) que es alimentado con agua proveniente de la línea

de la calle, abriendo las Válvulas de Globo (VG1) y (VG2) y la Válvula de Paso Rápido (VP1); a través de una línea conectada en el fondo del Tanque (T1) se suministra el caudal de agua que llega a la Bomba (B-1), que se enciende en el Interruptor (I-1), la cual permite por medio de una bifurcación en la tubería que una parte del fluido sea recirculado hacia el Tanque (T1) y la otra parte sea enviada hacia el Rotámetro (R1) regulado por la Válvula de Globo (VG3), permitiendo de esta forma la descarga de agua al Tanque (T2) abriendo la Válvula de Paso Rápido (VP4).

El Tanque (T2), tiene un orificio el cual descarga el fluido, mediante un tubo horizontal conectado en el fondo con una Válvula de Paso (VP5) que permite la alimentación al Tanque (T3).

El fluido contenido en este tanque (T3) puede devolverse al tanque (T1) si las válvulas de paso (VP6) y (VP8) se encuentran abiertas y la válvula (VP7) permanece cerrada. Desde la descarga del tanque (T3) sale una tubería que permite el desagüe de (T2) y (T3) abriendo la válvula de paso (VP7) y cerrando la válvula de paso rápido (VP8). Por su parte, el tanque (T1) se descarga abriendo la válvula de paso (VP2) la cual permite la circulación del fluido al desagüe.

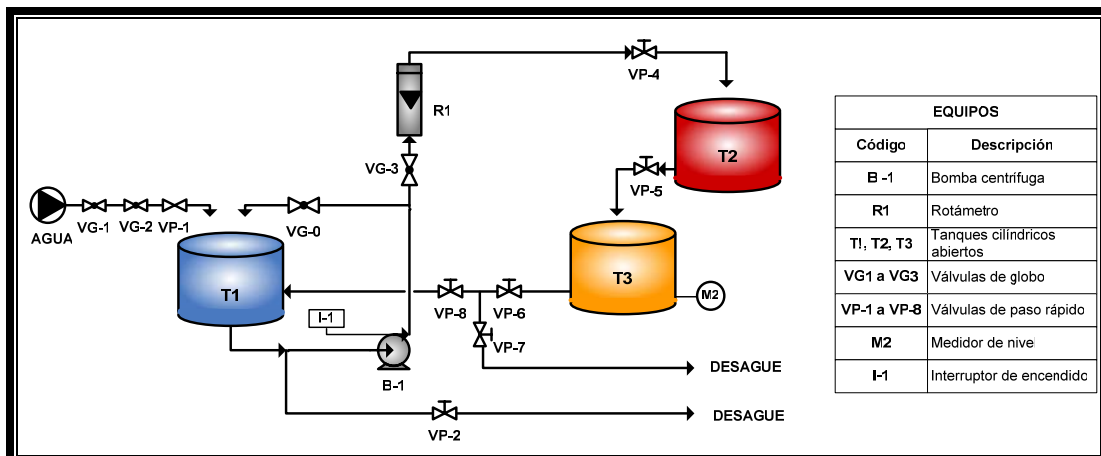


Figura N° 12: Esquema general del sistema, balances en estado no estacionario. (Elaboración propia)

Esta experiencia se divide en tres partes: en la primera se estudia el vaciado del Tanque (T2), para ello se comienza con la apertura de las válvulas (VG1), (VG2) y (V-1) para el llenado del (T1), que suministra el fluido a lo largo del sistema. Luego se abre la Válvula (VG-0), se enciende la bomba y se deja recircular el agua durante un tiempo.

Se realiza la apertura de las Válvulas (VG-3) y (VP-4) para el llenado del Tanque (T2), en el mismo se fija un nivel máximo y mínimo, cuando se alcance el nivel máximo se cierra (VP-4), se apaga la bomba y se abren las Válvulas (VP-8), (VP-6) y (VP-5) en este orden, en ese momento se mide con un cronómetro el tiempo que transcurre en vaciarse el tanque desde el nivel máximo hasta el mínimo.

Se cierra (VP-5) y se determina el intervalo de tiempo para el vaciado del tanque dividiendo el tiempo total de vaciado obtenido entre n número de mediciones (a criterio del técnico), ahora se vuelve a llenar el tanque y se determina la variación de nivel a medida que transcurre cada intervalo de tiempo.

Posteriormente se calcula el caudal experimental, en el que se alcanzan las condiciones estacionarias de nivel en el Tanque (T2), de acuerdo a las siguientes indicaciones ⁽²⁾:

- Graficar los datos de altura vs. tiempos obtenidos en el vaciado de (T2) desde $H_{\text{máx.}}$ hasta $H_{\text{mín.}}$
- Seleccionar la altura en el cual se alcanza las condiciones estacionarias de nivel.
- Determinar la pendiente de la recta $-dh/dt$ en el punto seleccionado anteriormente.
- Determinar la velocidad de descarga experimental del tanque (T2).

- Determinar la altura a la que debe estar ubicado el flotador del rotámetro (hr) utilizando la curva de calibración del rotámetro (caudal vs. altura del flotador).

Luego se enciende la bomba nuevamente, para proceder con la segunda parte del proceso referente al llenado de un tanque, con la Válvula de Globo (VG-3) se ubica la altura del flotador del Rotámetro, calculada en el paso anterior, se abren las Válvulas (VP-4) y (VP-5) y con el cronómetro se mide para cada intervalo de tiempo la variación del nivel en (M2), hasta que se repita tres veces dicha altura alcanzándose la condición estacionaria de nivel.

La tercera parte del proceso se refiere a las condiciones estacionarias de concentración de las soluciones salinas presentes en los Tanques (T2) y (T3), para esto se cierra completamente la Válvula de Paso Rápido (VP-8) y se abre la (VP-7) por completo, se agregan 2 Kg de sal al Tanque (T2) y se revuelve la solución con la ayuda de una paleta de madera hasta homogeneizarla.

Se debe calcular el tiempo teórico en el que se alcanzan las condiciones estacionarias de concentración y por medio de éste, determinar los intervalos de tiempo para medir las distintas concentraciones en (T2) y (T3). Se abren las Válvulas (VP-4), (VP-5) y (VP-6) por completo, se toman muestras de ambos tanques y se les mide el índice de refracción con el uso de un refractómetro de Abbe.

II.2 CONTROL DE PROCESOS

Como se dijo a comienzos de la *sección II.1* el conjunto de prácticas descritas anteriormente son operadas manualmente. Automatizar estas unidades de Ingeniería Química implica implementarles un control automático, esta acción se denomina *Control de Procesos* y está basada en la disciplina de los conocimientos generales sobre la teoría de Control Automático como lo son: los sistemas de control, lazo de control abierto, lazo cerrado, variables manipuladas, variables controladas, etc.

II.2.1. Conceptos Básicos

Los procesos deben ser analizados según el comportamiento dinámico de las variables que lo involucran y deben ser estudiados para prever la forma en la que se comportan. En procesos tales como refinación de petróleo, productos alimenticios, industria papelera, textil, etc., es absolutamente necesario controlar y mantener en un determinado valor de operación variables tales como: temperatura, presión, flujo y composición, bien sea por calidad de producción, seguridad en el funcionamiento de los equipos, rendimiento y economía, por lo que se debe diseñar e implementar un sistema de control.

En los procesos a controlar, se ven involucradas distintas variables que se deben clasificar de acuerdo a su desempeño o función en: *variable controlada* que es aquella que se desea mantener o controlar dentro de un valor deseado conocido como *set point*; *variable manipulada* que es aquella que se utiliza para mantener a la variable controlada en el set point; y *las perturbaciones* que son variables no manipulables que ocasionan desviaciones del set point en la variable controlada. Por lo tanto, el objetivo de la implementación de un Sistema Automático de Control de un proceso es utilizar la variable manipulada para mantener a la variable controlada en el punto de control a pesar de las perturbaciones ⁽³⁾.

Un *Sistema Automático de Control*, es un conjunto de dispositivos (sensor, transmisor, controlador y un elemento final de control), que permiten el control de las variables y puede definirse como aquel que compara el valor de la variable controlada con un valor deseado (*set point*) y realiza una acción de corrección de acuerdo con la desviación existente, proporcionando al operador información detallada sobre el comportamiento óptimo del sistema y suministrando su continua evolución mediante un sistema de monitoreo ⁽⁴⁾.

El *Sistema de Monitoreo* está compuesto físicamente por un conjunto de instrumentos como sensores/transmisores, que le facilitan al operador la intervención en el desarrollo del control, mediante ciertos parámetros, que son característicos de cada proceso, que alteran y modifican los algoritmos de programación. Además los *algoritmos de programación* son los que resuelven determinados problemas que podrían ocurrir ante desviaciones en la respuesta de un proceso, a través de una secuencia finita de instrucciones operacionales.

Estos algoritmos rigen al controlador y es por ello que este último es considerado el cerebro del sistema de control. Cabe destacar que el *Controlador* es un dispositivo que se encarga de llevar el proceso a un estado deseado o alrededor de un punto estable, mediante diversas estrategias que permiten lograr un control óptimo sobre la variable o variables de interés mediante el conocimiento de la dinámica del proceso y los algoritmos de control, dichas estrategias son conocidas como *Técnicas de Control de Procesos* y que serán explicadas con más detalle en la *sección II.2.7*.

Por otra parte, cuando en un proceso ocurre una desviación del valor de la variable en el punto de control, es el operador quien tiene la función de manipular las magnitudes del set point para que las variables vuelvan al punto deseado. A este tipo de sistema se denomina a *lazo abierto* ⁽³⁾, por el hecho de que el controlador no realiza ninguna función relativa a cómo mantener la variable controlada en el punto deseado, lo descrito anteriormente se muestra en la *Figura N° 13*.

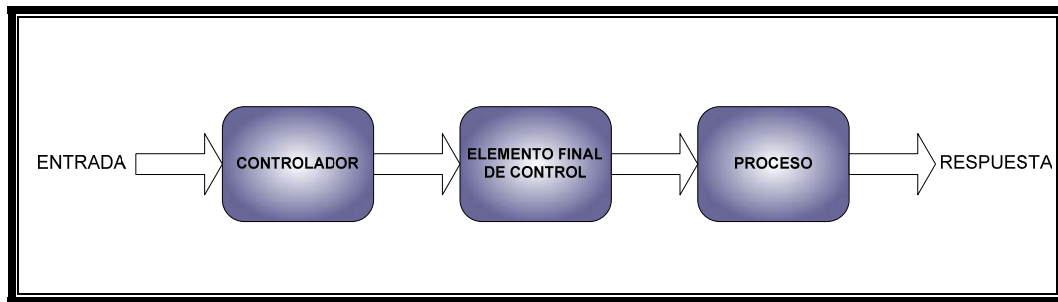


Figura N° 13: Esquema a lazo abierto. (Elaboración propia)

Sin embargo, lo habitual es que el sistema de control se encargue de la toma de ciertas decisiones y acciones ante determinados comportamientos del proceso, siendo este tipo de sistema conocido como *lazo cerrado* ⁽³⁾, es decir; se refiere a la situación en la cual el controlador compara el punto de control (referencia) con la variable controlada y determina la acción correctiva, en este caso el operador no ejerce ninguna función de control en el proceso. En el diagrama representado por la *Figura N° 14*, se muestra claramente la estructura de un sistema a lazo cerrado.

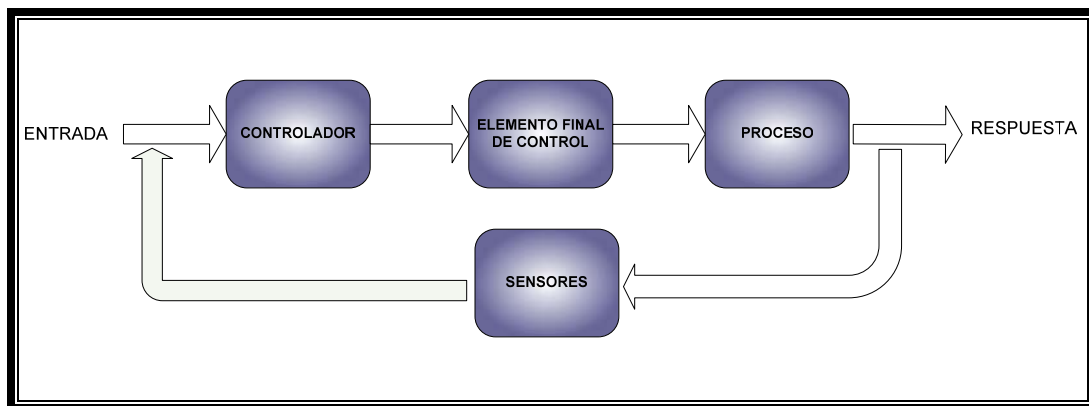


Figura N° 14: Esquema a lazo cerrado. (Elaboración propia)

Después de estudiar algunos conceptos no puede olvidarse que la meta del control de procesos es el desarrollo de un Sistema de Control que garantice los objetivos operacionales del proceso en presencia de perturbaciones siempre cambiantes. Por lo tanto para alcanzar dicha meta se necesita una descripción simple

de cómo el proceso reacciona ante varias entradas y esto es lo que los modelos matemáticos pueden proporcionar.

II.2.2. Los Modelos Matemáticos

Los Modelos Matemáticos pueden ser útiles en todas las fases de la Ingeniería Química, desde la investigación y el desarrollo de las operaciones de un proceso, hasta incluso en los negocios para el desarrollo de un estudio económico. La condición más importante para lograr el desarrollo de un modelo matemático de un sistema radica en la comprensión de lo que realmente ocurre en el proceso involucrado.

Los Principios de la formulación para los modelos matemáticos son considerados de la siguiente forma:

- (a) **Bases:** Los modelos matemáticos se basan fundamentalmente en las leyes físicas y químicas, tales como: conservación de la masa y energía, ecuaciones de estado, relaciones de equilibrio, cinética química, etc. ⁽⁵⁾.
- (b) **Suposiciones:** Probablemente el papel más importante del Ingeniero consiste en modelar matemáticamente, ejercitando su juicio en cuanto a lo válidas que puedan ser las suposiciones que se hagan. Se requiere un compromiso entre una descripción rigurosa y obtener respuestas que sean suficientemente buenas. Implica determinar las suposiciones necesarias y que pueden hacerse con validez a fin de simplificar el modelo.
- (c) **Consistencia matemática:** Una vez que todas las ecuaciones del modelo matemático son escritas se debe asegurar que el número de variables iguale el número de ecuaciones propuestas. Los llamados "grados de libertad" del sistema deben ser cero para obtener una solución única. Si esto no se cumple, el sistema está sobre-especificado o sub-especificado. El paso siguiente será verificar que las unidades de todos los términos en todas las ecuaciones sean consistentes.

- (d) **Solución de las ecuaciones del modelo:** Se resuelven todas las ecuaciones del modelo con las técnicas y/o las herramientas disponibles que permitan obtener los resultados finales⁽⁵⁾.
- (e) **Verificación/Validación:** Una vez obtenidos los resultados, se deben verificar y validar los mismos, es decir, se debe probar que el modelo describe la situación real que simula, comparando con datos experimentales o resultados históricos⁽⁵⁾.

II.2.3. Leyes Fundamentales

Para desarrollar el modelaje matemático de un proceso, es preciso conocer las leyes fundamentales que los rigen, estas leyes están conformadas por los principios básicos de Ingeniería Química para los cuales se emplean diferentes ecuaciones que permiten describir los procesos que se estudian, en esta sección se mencionarán las más empleadas como lo son: los balances de materia y energía; sin embargo a veces el uso de estas leyes no son suficientes para el cumplimiento de la consistencia matemática (grados de libertad=0), por lo tanto se deberá recurrir a otras leyes tales como: la termodinámica, la cinética, entre otras para cumplir con dicha consistencia.

(a) Ecuaciones de Continuidad, Conservación de la Masa

(a.1) Ecuación de Continuidad Total:

Esta importante ley se enuncia a continuación: “En una reacción química, la suma de las masas de las sustancias reaccionantes es igual a la suma de las masas de los productos de la reacción (la materia ni se crea ni se destruye solo se transforma)”.

Este principio de la conservación de la masa cuando está aplicado a un sistema dinámico se expresa en la ecuación (II.1)⁽⁵⁾:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Flujo de masa} \\ \text{dentro del sistema} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Flujo de masa} \\ \text{fuera del sistema} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{La tasa de cambio en el tiempo que} \\ \text{experimenta la masa dentro del sistema} \end{array} \right] \quad (II.1)$$

(a.2) Ecuación de Continuidad por Componentes:

A diferencia de la masa, los componentes químicos no se conservan. Si la reacción ocurre dentro de un sistema, el número de moles de un componente individual se incrementará si éste es el producto de la reacción o decrecerá si es un reactivo. Por lo tanto la ley conocida como continuidad por componentes de la especie química se expresa como lo muestra la ecuación (II.2):

$$\left[\begin{array}{l} \text{Velocidad de flujo del componente} \\ j \text{ hacia el sistema (moles/tiempo)} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Velocidad de flujo del componente} \\ j \text{ fuera del sistema (moles/tiempo)} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Velocidad de generación del} \\ \text{componente } j \text{ por reacción química} \\ \text{dentro del sistema (moles/tiempo)} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Velocidad de acumulación del componente } j \\ \text{dentro del sistema (moles/tiempo)} \end{array} \right] \quad (II.2)$$

Se puede escribir una ecuación de continuidad por componente para cada componente en el sistema. Si hay N componentes, se escribirán N ecuaciones de continuidad por componente para cualquier sistema. Sin embargo, el balance de masa total y estos N balances por componentes no son independientes entre sí. Por consiguiente un sistema dado tiene sólo N ecuaciones de continuidad por componentes independientes. Por lo general, se realiza el balance de masa total y se emplean N-1 ecuaciones por componentes existentes en el sistema las cuales son independientes entre sí, para que tenga solución finita ⁽⁵⁾.

(b) Ecuaciones de Energía, Conservación de la Energía:

Esta ley establece que el valor de la energía de un sistema aislado (sin interacción con ningún otro sistema) permanece invariable con el tiempo. Dentro de los sistemas termodinámicos, una consecuencia de la ley de conservación de la energía es la llamada *Primera ley de la termodinámica* ⁽⁵⁾, la cual establece para un sistema cerrado, que el cambio en la energía total del sistema, dE , es igual al flujo de calor hacia el sistema, δQ , menos el trabajo efectuado por el sistema sobre el entorno, δW , como lo

muestra la ecuación (II.3):

$$dE = \delta Q - \delta W \quad (II.3)$$

En la ecuación anterior, las δ indican que δQ y δW no son diferenciales exactos de una función de estado. Para un sistema abierto, existe intercambio de masa por tanto la ecuación (II.3) cambia y se representa como se muestra en la ecuación (II.4).

$$\left[\begin{array}{l} \text{Velocidad de acumulación de} \\ \text{energía dentro del sistema} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Velocidad de flujo de} \\ \text{calor del entorno al sistema} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Tasa de trabajo efectuado} \\ \text{por el sistema sobre el entorno} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Tasa de adición de energía al sistema} \\ \text{por flujo de masa hacia dentro del sistema} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Tasa de pérdida de energía del sistema} \\ \text{por flujo de masa fuera del sistema} \end{array} \right] \quad (II.4)$$

(c) Ecuaciones de Momento, Conservación del Momento:

Puede ser pensada como el equilibrio dinámico de la fuerza, está basada en la segunda ley de Newton que dice que la aceleración de un objeto es proporcional a la fuerza F actuando sobre ella e inversamente proporcional a su masa M , de esto se obtiene la ecuación (II.5):

$$F = \frac{Ma}{gc} \quad (II.5)$$

Donde:

F : Fuerza, lb.

M : Masa, lbm.

a : Aceleración de gravedad, ft/s².

gc : Constante de conversión, 32.2 lb, ft/lbf s².

(d) Ecuaciones de Transporte:

Para las ecuaciones de transporte a un nivel molecular, están regidas por la Ley de Fourier, Fick y Newton, basados en la determinación de constantes de proporcionalidad física que varían de acuerdo al sistema como lo son la conductividad térmica difusividad o viscosidad.

(e) Ecuaciones de Estado:

Para desarrollar los modelos matemáticos, se necesitan describir ecuaciones que incluyan propiedades físicas, principalmente como la densidad y la entalpía en función de la temperatura, la presión y la composición. Estas son conocidas como *ecuaciones de estado* ⁽⁵⁾, que simplemente son ecuaciones que describen el estado de agregación de la materia en relación funcional entre la temperatura, la presión, el volumen, la densidad, la energía interna y posiblemente otras funciones de estado asociadas con la materia.

Entre las ecuaciones de estado más importantes se conocen:

- *Ley de gas ideal*
- *Ecuación de Van der Waals, entre otras.*

(f) Ecuaciones de Equilibrio:

La segunda ley de la termodinámica es la base para las ecuaciones que pautan las condiciones de un sistema cuando prevalecen las condiciones del equilibrio. Entre las que se encuentran:

- *Equilibrio Químico*
- *Equilibrio de las fases*

(g) Cinética Química:

En el modelaje de muchos equipos con reacciones químicas, es necesario familiarizarse con las relaciones y la terminología básica usada en describir la cinética (índice de la reacción) de las reacciones químicas. Para la descripción de reacciones se destacan:

- *Dependencia de la temperatura de Arrhenius.*
- *Ley de acción de masas.*

Todas las leyes fundamentales anteriormente descritas permiten desarrollar los modelos matemáticos y a partir de estos se obtienen ecuaciones diferenciales ordinarias que a través de técnicas son reducidas a su mínima expresión dando lugar a las funciones de transferencia que representan la dinámica de los procesos.

II.2.4. Funciones de Transferencia.

Mediante el uso de la transformada de Laplace es posible convertir las ecuaciones diferenciales en ecuaciones algebraicas.

La *Función de Transferencia* se define como: la relación entre la Transformada de Laplace de la señal de salida y la Transformada de Laplace de la señal de entrada cuando las condiciones iniciales son nulas; es decir, esta relación indica la respectiva señal de entrada y salida de un proceso, instrumento o sistema de control.

Una función de transferencia se obtiene a partir de una ecuación diferencial lineal de orden n con coeficientes constantes y se expresa en forma general, tal y como lo muestra la ecuación (II.6):

$$Y(s) = \left[\frac{b_m S^m + b_{m-1} S^{m-1} + \dots + b_0}{a_n S^n + a_{n-1} S^{n-1} + \dots + a_0} \right] X(s) \quad (II.6)$$

Donde:

$Y(s)$: Es la transformada de Laplace de la variable de salida, en condiciones iniciales iguales a cero, donde $Y(0)=0$.

$X(s)$: Es la transformada de Laplace de la variable de entrada.

a_0, a_1, \dots, a_n : Son los coeficientes constantes de la variable de salida y sus derivadas.

b_0, b_1, \dots, b_n : Son los coeficientes constantes de la variable de entrada y sus derivadas.

Para aplicar esta ecuación se debe considerar condiciones iniciales nulas.

Las funciones de transferencia están compuestas por algunos parámetros importantes, como la *Ganancia* (K)⁽³⁾ del proceso o de estado estacionario que indica cuánto cambia la variable de salida por unidad de cambio en la variable de entrada, es decir, la ganancia define la sensibilidad del proceso. Ésta es definida matemáticamente a través de la ecuación (II.7):

$$K = \frac{\Delta O}{\Delta I} = \frac{\Delta \text{variable de salida}}{\Delta \text{variable de entrada}} \quad (II.7)$$

La ganancia es un parámetro relacionado con la personalidad del sistema que se controla y en consecuencia depende de las propiedades físicas y de los parámetros de operación del proceso. Existen otros parámetros que influyen en la personalidad del proceso como lo son: la constante de tiempo (τ), que guarda relación con la velocidad de respuesta del proceso, y el tiempo muerto (to)⁽³⁾, el cual representa un intervalo de tiempo (o retardo) que sufre el proceso para dar una respuesta cuando se origina una perturbación en la entrada del sistema.

Los parámetros K , τ y to , que son obtenidos a través de las funciones de transferencia, son el punto de partida para la obtención de parámetros específicos que

permiten la sintonización o ajuste del controlador según la acción requerida por el proceso.

II.2.5. Tipos de Controladores.

Los sistemas de control poseen controladores que toman acciones para mantener las variables de control en el set point y compensar cualquier perturbación.

La manera en la que los controladores toman una decisión para mantener el set point, es mediante el cálculo de la salida con base en la diferencia entre la variable que se controla y el set point, de acuerdo a esto existen tres tipos:

(a) Acción Proporcional: Estos controladores solo tienen un parámetro de ajuste denominado Ganancia del Controlador (Kc) que se aplica al sistema, se basan en el principio de que la respuesta del controlador debe ser proporcional a la magnitud del error. No corrige ni elimina perturbaciones, puede atenuar o aumentar la señal del error y operan con una desviación en estado estacionario en la variable que se controla ⁽⁶⁾.

La ecuación (II.8) representa las variaciones en las señales de salida ($m(t)$), también se aprecia que la salida del controlador es directamente proporcional a la señal del error (E), la cual es la diferencia entre el set point ($r(t)$) y la señal de la variable de proceso que se controla ($c(t)$) que proviene del transmisor ⁽³⁾. El \bar{m} es una señal constante y es el valor de salida de la válvula de control cuando no existe error.

$$m(t) = \bar{m} \pm Kc(r(t) - c(t)) \quad (II.8)$$

Donde:

$m(t)$: señales de salida del controlador, psig o mA.

$r(t)$: punto de control o set point, psig o mA.

$c(t)$: variable que se controla, psig o mA.

K_c : ganancia del controlador, psi/psi o mA/mA.

\bar{m} : valor base, psig o mA.

(b) Acción Proporcional-Integral: En algunos procesos es preciso trabajar sin ningún tipo de desviación en la respuesta del proceso, por lo tanto se aplica el control proporcional integral en donde se anulan los errores y se corrigen las perturbaciones mediante la búsqueda de la señal del set point, por lo tanto necesita de un tiempo (τ_I) para localizar dicha señal ⁽⁶⁾.

La acción proporcional del controlador funciona moviendo la válvula de control en proporción directa a la magnitud del error y como en algunos procesos no se puede controlar el error, éste se corrige cambiando el valor del set point ⁽⁵⁾.

Sin embargo la acción integral determina el movimiento específico que deberá tener la válvula de control en base al tiempo que tomará el cálculo de integración del error, esto es lo que demuestra la ecuación (II.9):

$$m(t) = \bar{m} + K_c E_t + \frac{K_c}{\tau_I} \int E_t dt \quad (II.9)$$

Donde:

τ_I : Tiempo integral del reajuste en minutos, éste tiempo es aquel que toma al controlador repetir la acción proporcional.

(c) Acción Proporcional-Integral-Derivativa: Al controlador proporcional integral se le añade otro tipo de control con acción derivativa, sirve para darle rapidez o aceleración a la acción de control y necesita de un diferencial de tiempo τ_D y τ_I para alcanzar la señal del set point.

El propósito de la acción derivativa consiste en anticipar el camino o el sentido de dirección del proceso, observando el cambio del controlador a través del tiempo ⁽³⁾.

Si se toma la derivada del error, se puede tener una acción derivativa ideal como se muestra en la ecuación (II.10):

$$m(t) = \bar{m} + KcE_i + \frac{Kc}{\tau_1} \int E_i dt + Kc\tau_D \frac{de(t)}{dt} \quad (II.10)$$

Donde:

τ_D : Tiempo derivativo en minutos.

Resumiendo las acciones de los controladores se puede decir que: el control proporcional actúa sobre el tamaño del error, el control integral rige el tiempo para corregir el error y finalmente el control derivativo le brinda la rapidez al controlador.

Una vez seleccionado el tipo de acción del controlador requerido por el proceso, se pueden obtener los parámetros de ajuste específicos mediante la utilización de ciertos métodos. Para elegir el método que mejor se ajusta a la respuesta deseada del proceso, se comparan entre sí a través de criterios de selección.

II.2.6. Métodos de Ajuste.

Para obtener los parámetros de ajuste que caracterizan el proceso y que permiten obtener una respuesta determinada en el controlador, es necesario aplicar diferentes métodos de sintonización (ajuste) o en otras palabras métodos que proporcionan ajustar el controlador.

Algunos métodos de ajuste emplean un modelo de la planta para determinar los parámetros del controlador, así como también existen otros que están basados en la información crítica o “última” del proceso, esto es, en la ganancia K_{cu} y el período de oscilación T_u en el límite de la estabilidad ⁽⁷⁾.

De manera general el proceso de ajuste de los controladores industriales consiste en dos etapas principales: la primera en la *identificación del proceso* a controlar y la segunda en *la sintonización del controlador*.

Por esta razón, los métodos de ajuste están ligados y al mismo tiempo restringidos, a la información disponible del proceso. El procedimiento de ajuste debe partir de un modelo del proceso a controlar y los parámetros de este deben de ser totalmente identificables ⁽⁷⁾.

Es importante destacar que el modo en el que se plantee el modelo matemático del proceso determina en su totalidad los resultados obtenidos con el sistema de control diseñado.

Existen diversos métodos de ajuste de controladores desarrollados que varían según el comportamiento deseado del lazo de control, o por la técnica de su desarrollo. Por ejemplo muchos métodos de ajuste para controladores sencillos están basados en ensayos de prueba y error, otros permiten la sintonización del mismo en una forma sistemática, como el método para el cálculo de los parámetros de los controladores *PID* de Ziegler y Nichols que determinaron a través de ecuaciones sencillas. Este es utilizado aún en la actualidad en su forma original o con variantes y a partir de ahí, el desarrollo de los métodos de sintonización ha crecido numerosamente.

Ziegler y Nichols desarrollaron su método basándose en la información última del proceso, obtenida mediante una prueba de lazo cerrado con un controlador P y a

partir de este, dedujeron otro basado en la información de lazo abierto. Consideraron que el lazo de control operaba como regulador y el criterio de desempeño empleado fue el decaimiento de un cuarto, esto es, que el error decrezca a su cuarta parte en cada ciclo de la respuesta. También desarrollaron los métodos de Primer Orden más Tiempo Muerto (POMTM), Razón de asentamiento de $\frac{1}{4}$, entre otros. De los cuales en esta sección serán explicados algunos de ellos.

Por otra parte existen métodos que están basados en criterios integrales que permiten evaluar el desempeño de los sistemas de control mediante el cálculo de una función de costo basada en el error, esto es, en la diferencia entre el valor deseado y el valor real de la variable controlada lo que significa que entre más grande sea el error y entre más dure este, peor es el desempeño del sistema de control.

Los criterios establecidos generalmente son integrales de alguna función del error y entre los más empleados se tienen: La integral del error absoluto (*IAE*), la integral del tiempo por el error absoluto (*ITAE*), Integral del cuadrado del error ponderado en tiempo (*ICET*), Integral del cuadrado del error (*ICE*), Integral del valor absoluto del error ponderado en tiempo (*IAET*).

Otro método empleado se conoce como Métodos basados en la cancelación de polos propuesto por Haalman. El principio básico de los métodos dentro de esta categoría, es colocar los ceros del controlador sobre los polos dominantes del proceso de manera que se cancelen entre sí.

Este procedimiento lleva a que un proceso de primer orden se controle con un controlador *PI* y uno de segundo orden con un *PID*, seleccionando el tiempo integral y el derivativo de manera de lograr que la función de transferencia de lazo cerrado del servomecanismo sea de primer orden. La ganancia del controlador se puede emplear entonces para variar la velocidad de respuesta del lazo de control. En el caso de los procesos con tiempo muerto, la ganancia del controlador se debe seleccionar

mediante un compromiso entre el sobrepaso máximo permitido y la velocidad de la respuesta del sistema de control. El cual será explicado al final de esta sección ⁽⁷⁾.

En muchos casos los métodos de ajuste aplicados a los sistemas de control conducen a determinadas respuestas en lazos cerrados por ejemplo, los sistemas según el tipo de respuesta, se denominan: *sistemas subamortiguados* cuando la respuesta es oscilatoria y tarda más en llegar al valor deseado; *sistemas críticamente amortiguados* cuando la respuesta se aproxima más rápido al valor final, sin oscilación; *sistemas sobreamortiguados*, la respuesta de ese sistema jamás sobrepasa al valor final y su aproximación es más lenta que en los sistemas críticamente amortiguados ⁽³⁾.

Una vez aclarado las diferentes respuestas de los sistemas, se puede mencionar entonces los métodos basados en la localización de polos, cuya respuesta obtenida en un sistema a lazo cerrado es *sobreamortiguada*, este método consiste en el ajuste de controladores basados en la cancelación de polos del proceso con los ceros del controlador, sin permitir la localización arbitraria de los polos de lazo cerrado.

Algunos criterios a considerar para aplicar los métodos de ajuste son:

- **Sobrepico:** se busca obtener el mínimo sobrepico o ningún sobrepico lo que representa una respuesta sobreamortiguada.
- **Tiempo de elevación:** es el tiempo que tarda la respuesta en alcanzar por primera vez el valor final, se debe conseguir el menor tiempo de elevación lo que significa generar respuestas rápidas ⁽³⁾.
- **Razón de asentamiento:** Se debe lograr una relación de asentamiento específica, la más común suele ser asentamiento de $\frac{1}{4}$.

- **Tiempo de asentamiento:** es el tiempo que tarda la respuesta en llegar a ciertos límites preestablecidos del valor final y permanecer dentro de ellos. Se deben alcanzar tiempos de asentamientos cortos.
- **Integral del error:** es importante minimizar la integral de los errores hasta que el proceso se haya asentado ⁽³⁾.
- **Error en el estado estacionario:** se pretende mantenerlo tan pequeño como sea posible.

1. Método 3 de Ziegler y Nichols de 1^{er} Orden Más Tiempo Muerto (POMTM).

Es el método en el que se basan la mayoría de las fórmulas de ajuste de los controladores. El método de Ziegler y Nichols, está caracterizado por tres parámetros como: la ganancia (Kc), el tiempo muerto (t_o) y la constante de tiempo (τ).

La solución de este método consiste en realizar algunas pruebas dinámicas en el sistema real o en una simulación del lazo en la computadora ⁽³⁾. La prueba más simple y popular es la del salto en escalón. En este método, en el proceso caracterizado se incluye el comportamiento dinámico de la válvula de control y del sensor/transmisor.

EL método de primer orden más tiempo muerto (POMTM) se describe a través de la ecuación (II.11), presentada a continuación:

$$G(s) = \frac{Ke^{-t_o s}}{\tau s + 1} \quad (II.11)$$

Donde:

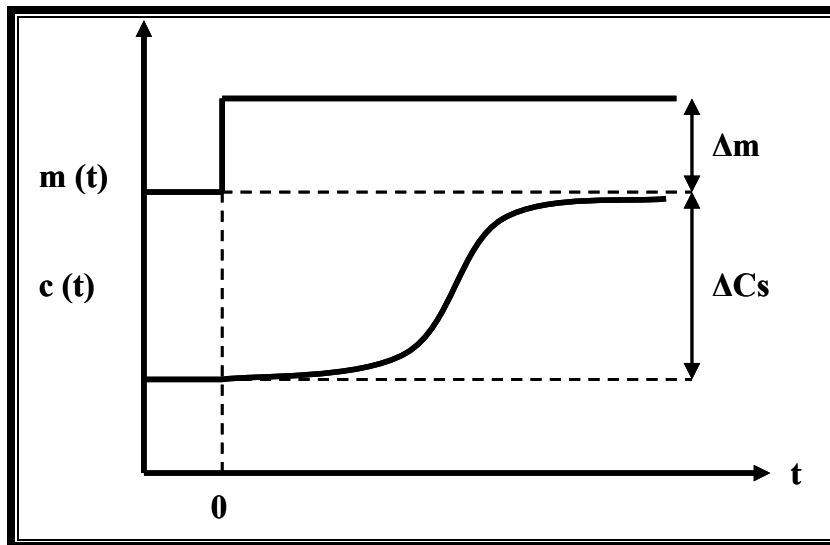
K: es la ganancia del proceso en estado estacionario.

s: representa el campo de Laplace.

Prueba de escalón del proceso

1. Con el controlador en manual se aplica un cambio en escalón a la señal de la salida del controlador $m(t)$, el cambio debe ser lo suficientemente grande para que se pueda medir un cambio en el transmisor, pero no tanto como para que las no lineales del proceso distorsionen la respuesta.
2. Se registra $C(t)$ en el período completo de la prueba, desde la introducción del escalón hasta el nuevo estado estacionario ⁽³⁾.

Es preciso que no entren perturbaciones al sistema mientras se realiza la prueba. La gráfica que se obtiene se conoce como curva de reacción del proceso. El siguiente paso es hacer coincidir la curva de reacción con el modelo POMTM para determinar los parámetros del modelo. La Gráfica N° 1 muestra una curva de reacción típica de la prueba.



Gráfica N° 1: Curva de reacción de un proceso ⁽³⁾.

La ganancia (K_c), se calcula a partir de los cambios totales de $\Delta C_s(t)$ y $\Delta m(t)$ en el estado estacionario como lo muestra la ecuación (II.12):

$$K_c = \frac{\Delta C_s}{\Delta m} \quad (II.12)$$

El tiempo muerto (t_o) y la constante de tiempo (τ), se pueden determinar de manera que la respuesta del modelo y la real coincidan en la región de alta tasa de cambio. Los dos puntos recomendados por el Dr. Cecil Smith son: $(t_o + \frac{1}{3}\tau)$ y $(t_o + \tau)$ los cuales corresponden a los siguientes valores de C_s :

$$\begin{array}{lll} \text{Para} & t = t_o + \tau & \Delta C(t) = 0.632\Delta C_s \\ \text{Para} & t = t_o + \frac{1}{3}\tau & \Delta C(t) = 0.283\Delta C_s \end{array}$$

En la *Gráfica N° 2* estos dos puntos se denominan t_1 y t_2 y los valores de t_o y de τ , se obtienen a partir de la resolución del siguiente sistema de ecuaciones:

$$1. \quad t_o + \tau = t_2 \quad \text{y} \quad t_o + \frac{1}{3}\tau = t_1$$

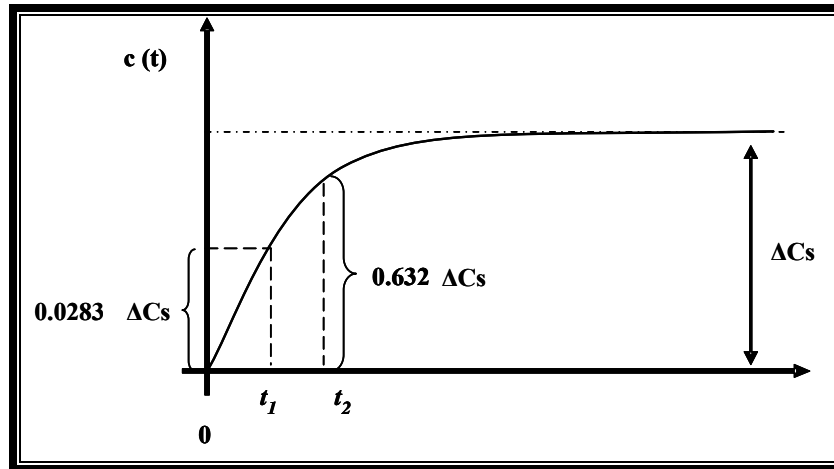
Esto se reduce a:

$$2. \quad \tau = \frac{3}{2}(t_2 - t_1) \quad \text{y} \quad t_o = t_2 - \tau$$

Donde:

t_1 : tiempo en el cual $\Delta C(t) = 0.283\Delta C_s$

t_2 : tiempo en el cual $\Delta C(t) = 0.632\Delta C_s$



Gráfica N° 2: Parámetros del modelo POMTM ⁽³⁾.

2. Respuesta de razón asentamiento de $\frac{1}{4}$ de Ziegler y Nichols.

Ziegler y Nichols proponen un conjunto de fórmulas que se basan en los parámetros de ajuste, para un modelo de primer orden, a la Curva de Reacción del proceso; dichas formulas se muestran en la *Tabla N° 1*.

A pesar de que los parámetros que utilizaron no son precisamente la ganancia (Kc), el tiempo muerto (t_0) y la constante de tiempo (τ), sus fórmulas se pueden modificar para expresarlas en términos de estos parámetros ⁽³⁾.

Cabe destacar que Ziegler y Nichols utilizaron el método 1 propuesto por ellos mismos para determinar los parámetros. Estos son presentados en la *Tabla N° 1*, se puede apreciar que las magnitudes relativas de la ganancia, el tiempo de integración y el de derivación en los controladores P, PI y PID, son las mismas que las fórmulas de ajuste en línea, las cuales se basan en el período y ganancia última.

Tabla N° 1: Fórmulas de ajuste para respuesta de razón de asentamiento de $\frac{1}{4}$.⁽³⁾

Tipo de Controlador	Ganancia proporcional K_c	Tiempo de integración	Tiempo de derivación
Proporcional <i>P</i>	$\frac{1}{K} \left(\frac{t_o}{\tau} \right)^{-1}$	-	-
Proporcional-Integral <i>PI</i>	$\frac{0.9}{K} \left(\frac{t_o}{\tau} \right)^{-1}$	$3.33 t_o$	-
Proporcional-Integral-Derivativo <i>PID</i>	$\frac{1.2}{K} \left(\frac{t_o}{\tau} \right)^{-1}$	$2.0 t_o$	$\frac{1}{2} t_o$

3. Métodos con base en la cancelación de polos.

El primer método de cancelación de polos fue el propuesto por Haalman (1965)⁽⁷⁾. Él utilizó un criterio de desempeño *ISE* para un cambio escalón en el valor deseado y realizó pruebas con el control *PI* para un proceso de tiempo muerto puro, encontrando que el mínimo de la función de costo se alcanzaba cuando $T_i=1.5 t_m$. Conocido este valor óptimo dedujo los ajustes para los otros procesos de manera que dieran la misma función de transferencia de lazo abierto. El ajuste del controlador corresponde a un controlador *PID*.

Los procesos considerados y los parámetros recomendados para los controladores están dados por las ecuaciones presentadas en la *Tabla N° 2*, en la que se reporta el tipo de proceso, la ganancia proporcional del controlador, el tiempo de integración y el tiempo de derivación:

Tabla N° 2: Fórmulas de ajuste para Haalman ⁽⁷⁾.

<i>Proceso</i>	<i>Ganancia proporcional Kc</i>	<i>Tiempo de integración</i>	<i>Tiempo de derivación</i>
$e^{-t_m s}$	-	1.5 t_m	-
$\frac{k_p * e^{-t_m s}}{s}$	$\frac{1}{1.5 * k_p * t_m}$	-	-
$\frac{e^{-t_m s}}{\tau s + 1}$	$\frac{\tau}{1.5 t_m}$	τ	-
$\frac{k_p e^{-t_m s}}{s(\tau s + 1)}$	$\frac{1}{1.5 * k_p * t_m}$	-	τ
$\frac{e^{-t_m s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}, \tau_1 > \tau_2$	$\frac{1}{1.5 * \tau_1 * t_m}$	τ_1	τ_2

Como se puede apreciar en las ecuaciones de ajuste, el cero del modo integral cancela el polo más lento del proceso y el cero del modo derivativo el otro ⁽⁷⁾.

Por otra parte se ve que para un proceso integrante, Haalman utiliza un controlador proporcional derivativo (PD), con el cual puede obtener error permanente cero en el caso de un cambio escalón en el valor deseado, pero no así si el cambio escalón ocurre en la perturbación.

Se puede observar que la función de transferencia a lazo abierto y lazo cerrado para todos los casos, están dadas por las ecuaciones (II.13) y (II.14):

$$L(s) = \frac{e^{-t_m s}}{1.5 t_m s} = \frac{e^{-t_m s}}{\tau' s} \tag{II.13}$$

y la de lazo cerrado:

$$M_r(s) = \frac{e^{-t_m s}}{\tau' s + e^{-t_m s}} \quad (II.14)$$

Si el tiempo muerto fuera muy pequeño, de tal forma que, $e^{-t_m s} \rightarrow 1$, la función de transferencia de lazo cerrado sería la de un sistema de primer orden con una constante de tiempo igual a $1.5 \tau_m$. La ganancia a lazo cerrado del servomecanismo es unitaria, lo que garantiza que el error sea permanente cero a una entrada escalón⁽⁷⁾.

Aunque la velocidad de la respuesta del sistema de lazo cerrado obtenido con las ecuaciones anteriores está fija, si se deseara otra, una vez fijados los parámetros de los modos integral y derivativo, se podría emplear la ganancia del controlador para variarla.

En esta sección se profundizó la teoría sobre los controladores, la sintonización (ajuste) de los parámetros y los métodos de ajuste. Sin embargo si se desea mejorar el desempeño de estos controladores, se deben emplear técnicas de control de procesos.

II.2.7. Técnicas de Control de Procesos.

Independientemente del sistema de control que se implemente a un proceso dado, existen estrategias que se aplican con el fin de lograr un control regulatorio óptimo sobre la variable de interés, las cuales se desvían del punto de control en la operación normal del proceso, debido a las perturbaciones internas y externas que sufre el proceso. En consecuencia, el funcionamiento correcto de un sistema de control está determinado por la naturaleza del proceso, las características de los lazos de control y los ruidos externos.

Antes de aplicar una técnica de control diferente a la retroalimentada en un proceso, es importante tomar en cuenta que un controlador, al iniciar su operación, requiere de la entonación de los parámetros de ajuste. Si por algún motivo no es posible reducir el error, se debe pensar entonces en una estrategia de control adecuada para mejorar la respuesta de esa variable.

Algunas filosofías de control comúnmente empleadas son:

1. Control Retroalimentado Feedback:

Es la forma más simple de aplicar un control en lazo cerrado, esta técnica de control realiza su función de la siguiente forma: como cualquier perturbación puede afectar a la variable controlada cuando esta se desvía del set point, el controlador cambia su salida para que la variable regrese al punto de control ⁽³⁾. Sin embargo el sistema de control no detecta qué tipo de perturbación entra al proceso, únicamente trata de mantener la variable controlada en el punto de control y de esta manera compensar cualquier perturbación.

Por lo tanto su objetivo fundamentalmente es mantener constante una variable en un valor deseado a través del tiempo ⁽³⁾. El problema en este tipo de control, es que la corrección se hace después de que la perturbación afecta el sistema propagándose por todo el proceso, desviando la variable controlada del punto de control.

2. Control Anticipativo Feedforward:

Su objetivo es sensar la perturbación de una variable, antes de afectar al proceso y tomar la acción correctiva para evitar un cambio en la variable de control.

En los procesos que tienen tiempos muertos muy grandes, se presentan desviaciones en magnitud y frecuencia variables, la señal del error se detecta una vez

que se produce el cambio en la variable de entrada y ha sido afectada la variable de salida, siendo imposible tomar una acción correctiva a tiempo.

El problema anterior se resuelve aplicando al proceso la técnica *feedforward*, que parte de la medición de una o varias señales de entrada, anticipando el error y tomando la acción correctiva simultáneamente sobre la variable de entrada, generando la salida deseada sobre el proceso ⁽³⁾.

La técnica de control *feedforward* debe ser considerada para emplearse en algunos procesos donde las perturbaciones no pueden ser controladas aunque si puedan ser medidas ⁽⁸⁾.

Sobre la filosofía de control *feedforward* se conocen muchas estrategias que son comúnmente empleadas en la industria tales como: Control en Cascada, Control de Relación, Control selectivo (Override), Control de Rango Divido. Las cuales serán explicadas a continuación:

2.1 Control en Cascada:

La aplicación de esta técnica de control, consiste en incluir uno o más lazos de control interno dentro de otro externo, con el objetivo de anular perturbaciones, impidiendo que estas perturbaciones secundarias afecten al sistema principal. Básicamente el controlador externo se encarga de la variable principal, mientras que los controladores internos se encargan de las perturbaciones más frecuentes. Como regla general, el lazo interno, debe ser el que ofrezca la respuesta más rápida.

Las Ventajas que ofrece esta técnica son:

- Las perturbaciones más frecuentes son corregidas antes de afectar a la variable principal.
- Permite emplear valores grandes de ganancias (ganancias altas).
- Ofrece respuestas rápidas al proceso ⁽⁹⁾.

Para que un sistema de control en cascada esté bien aplicado es necesario que se tomen en cuenta algunos aspectos como ⁽³⁾: localizar las variables más importantes del proceso, la variable básica a controlar y la variable que introduce la inestabilidad, así como también determinar la velocidad de cambio de ambas señales.

Naturalmente, estas recomendaciones están basadas en la experiencia, en la dinámica de los procesos, en el controlador y algo de sentido común.

2.2 Control de Relación:

El objetivo de esta estrategia consiste en mantener una proporcionalidad entre dos o más elementos dentro de un proceso continuo. Esta técnica de control, se aplica por lo general a dos cantidades de flujos, que deben mantener una relación en un determinado proceso.

Por lo general, se tiene una línea de un fluido libre y sobre esta se mide la cantidad del fluido existente en velocidad o volumen, este valor se envía a un controlador que contiene un factor multiplicador o un divisor, cuya señal actúa sobre la válvula de control de otra línea con flujo proporcional al valor sentido (flujo controlado). El flujo libre se llama variable independiente o salvaje y el flujo controlado representa al flujo dependiente.

Para este tipo de estrategia de control, es muy importante tomar las siguientes consideraciones: ambas señales deben tener las mismas unidades y deben estar linealizadas o en forma cuadrática, el rango de los controladores deben ser compatibles con las señales recibidas de un 0% a un 100%, se debe tomar en cuenta que en la medición de fluidos la linealidad se pierde en los extremos de la medición y que las características de los fluidos deben ser muy similares ⁽¹⁰⁾.

2.3 Control Selectivo (override):

Este tipo de control es utilizado en aplicaciones o procesos en los cuales se encuentran involucradas muchas variables que deben ser controladas y que son influenciadas por una sola variable manipulada.

El control override es una forma de control multivariable y funciona escogiendo a través de un selector de baja o de alta determinados valores en la entrada del proceso, afectando estos los valores a la salida. La acción de control se logra conectando la salida de los controladores a un switch selector.

Asumiendo que el selector de baja y de alta son dos entradas en el control override, entonces se puede decir que representan dos variables de procesos en donde ambas son afectadas por una sola variable manipulada pero en direcciones opuestas. Esto lo que significa, es que mientras la variable manipulada cambia en una dirección, una de las variables de proceso se incrementa y la otra decrece ⁽⁸⁾.

Lo que ocurre en el control override, es que se ejerce un control sobre dos variables de un proceso, relacionadas entre sí de tal modo que una u otra pueda ser controlada por una misma variable maestra ⁽⁹⁾. Este tipo de técnica generalmente es aplicada en procesos en los que se requiere un control de protección a fin de mantener las variables del proceso dentro de ciertos límites, generalmente ocurre en procesos donde se requieren altos niveles de seguridad y protección contra el mal funcionamiento de equipos y motores.

2.4 Control de Rango Dividido:

Es aplicado a sistemas con una sola variable controlada y dos o más variables manipuladas, las cuales afectan de igual forma a la variable controlada. Requiere compartir la señal de salida del controlador con varios elementos actuadores (válvulas) ⁽⁹⁾. Estas válvulas abren y cierran de acuerdo a la magnitud de señal recibida.

II.2.8. Estrategias de control Avanzado.

Los procesos suelen ser complejos, por lo tanto en muchos de estos pueden existir múltiples variables a controlar en un mismo instante, para estos casos se puede realizar un *control multivariable* ⁽⁴⁾ donde existen múltiples variables de entrada, entre manipuladas y perturbaciones y múltiples variables de salida (controladas), en el cual cada variable manipulada no sólo afecta su controlada respectiva sino, que también afecta al resto de las variables controladas.

II.2.8.1. Control Multivariable.

Los procesos con una sola variable de salida, controlados por una sola variable manipulada son conocidos como sistemas (SISO) como lo indican sus siglas en inglés single-input single-output, es decir, sistemas de una sola entrada y una sola salida. Sin embargo, en la mayoría de las Operaciones Unitarias de la Ingeniería Química es necesario controlar más de una variable, lo que se traduce en tener más de un lazo de control. Por lo tanto, los sistemas con más de un lazo de control son conocidos como sistemas (MIMO) tal y como lo indican sus siglas en inglés multi-input multi-output, es decir, múltiples entradas-múltiples salidas o control multivariable ⁽¹¹⁾.

Un esquema de control de sistemas multivariables también es conocido como esquema de control de lazos múltiples, la forma de resolver el problema de control de sistemas multivariables se reduce a diseñar cada lazo de control de manera independiente del resto de los lazos. Cada lazo se diseña usando los métodos conocidos para el control de sistemas univariados. Ejemplo de esto se ve representado en la *Figura N° 15*:

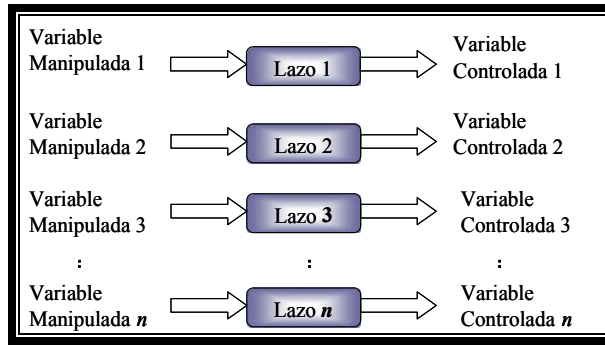


Figura N° 15: Esquema general de control de sistemas multivariados. (Elaboración propia)

Sin embargo, la presencia del efecto de “interacción” hará que el desempeño de un lazo afecte al de los otros y viceversa. En otras palabras, la interacción complica la sintonización de los lazos de manera independiente. Existe otro esquema para resolver el problema del control de sistemas multivariados y se basa en el uso de un solo controlador que manipula simultáneamente todas las variables manipuladas cuando algún o algunas variables controladas se alejan de su set point, tal como lo muestra la *Figura N° 16*. De esta forma se consigue compensar el efecto de interacción y el grado de compensación depende del diseño del controlador ⁽¹²⁾.

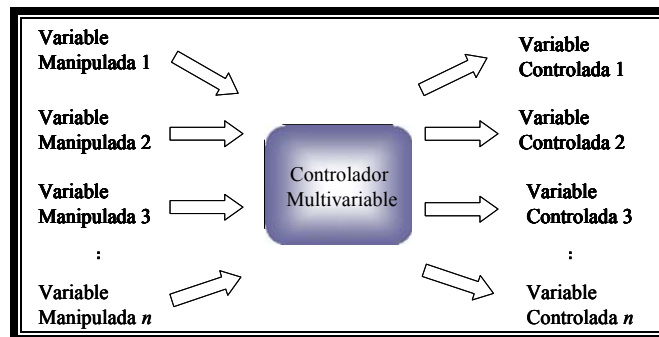


Figura N° 16: Esquema general de control de sistemas multivariados con un solo lazo de control. (Elaboración propia)

En sistemas multivariados la interacción entre variables es el efecto más importante en el diseño y sintonización de lazos de control. Se dice que un proceso presenta interacción cuando una variable de entrada afecta a más de una variable de

salida ⁽¹²⁾. El término afecta está relacionado con que la variable controlada se aleja de su set-point en virtud de cambios en la variable de entrada.

Una representación típica de un proceso con dos lazos de control, se muestra en la *Figura N° 17*.

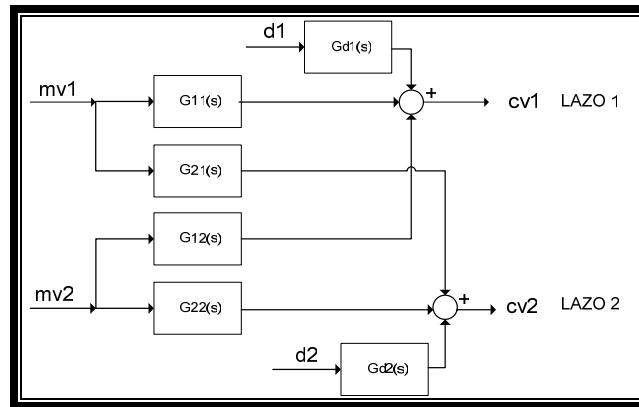


Figura N° 17: Esquema general de un lazo de control (2x2). ⁽¹³⁾

Donde:

$G_{11}(s)$: representa como la variable controlada (cv_1) responde ante un cambio en la variable manipulada (mv_1).

$G_{22}(s)$: representa como la variable controlada (cv_2) responde ante un cambio en la variable manipulada (mv_2).

$G_{21}(s)$: representa como la variable controlada (cv_2) responde ante un cambio en la variable manipulada (mv_1).

$G_{12}(s)$: representa como la variable controlada (cv_1) responde ante un cambio en la variable manipulada (mv_2).

$G_{d1}(s)$ y $G_{d2}(s)$: representa el cambio de las variables controladas con respecto a las perturbaciones del proceso.

Los elementos representados dentro de los bloques de la *Figura N° 17* son funciones de transferencia y definen la relación entre las respectivas entradas y salidas de cada lazo. Estas funciones se expresan de la forma como se muestra en la ecuación (II.13):

$$Gp(s) = \frac{Kp \cdot e^{-sto}}{\tau_p \cdot s + 1} \quad (II.13)$$

Donde:

Kp : representa la ganancia del proceso.

τ_p : representa la constante de tiempo del proceso.

to : representa el tiempo muerto.

Estos parámetros deben ser determinados mediante la utilización de los métodos mencionados en la sección *II.2.6 Métodos de ajuste*.

Pasos para establecer una estrategia de control multivariable:

1. Seleccionar las variables controladas vc_1 y vc_2 .
2. Seleccionar las variables manipuladas vm_1 y vm_2 .
3. Se realiza el modelado del proceso.
4. Se linealizan las ecuaciones del modelo utilizando la series de Taylor.
5. Se obtienen las funciones de transferencia.
6. Se determinan los parámetros de ajuste asociados a la función de transferencia.
7. Se realiza la simulación a lazo abierto del proceso mediante cualquier programa de simulación como por ejemplo la herramienta Simulink[®].

II.3 AUTOMATIZACIÓN

El análisis de un proceso y el estudio del comportamiento dinámico del mismo, son pasos que permiten realizar simulaciones que ayudan a comprender en tiempo virtual o real el proceso y en muchos casos como consecuencia de los resultados, de la aplicación y del objetivo de este análisis es importante controlar los procesos automatizando los sistemas.

La automatización busca desarrollar actividades de extensiones reales de la vida profesional del Ingeniero sobre todo en el campo de sistemas dinámicos y sus aplicaciones al control automático de procesos, teoría de señales, identificación, modelamiento e instrumentación.

La Automatización⁽¹⁴⁾ es la incorporación de un dispositivo electrónico que se encarga de controlar el funcionamiento de un proceso basándose en una serie de elementos definidos previamente.

II.3.1. Etapas de la Automatización

Todo proceso de automatización requiere una serie de etapas, tales como:

- (a) **Especificación:** En esta fase se busca conocer el proceso, estudiar las necesidades y seleccionar las variables a controlar.
- (b) **Diseño:** Una vez comprendido el proceso, se deben seleccionar los sensores y el acondicionamiento requerido, realizar los algoritmos y escoger la tecnología.
- (c) **Implementación:** Comprende la fase de instalación de los instrumentos requeridos y el bloque de decisión con su programación. En esta etapa deben realizarse las simulaciones del proceso y luego la integración de la parte operativa con la parte de mando, lo que permitirá el arranque de la fase de prueba.

(d) **Pruebas y Verificación:** Finalmente ésta es la fase de cierre donde se debe verificar la actuación de la instrumentación de acuerdo al programa desarrollado, a fin de realizar los ajustes necesarios para lograr un funcionamiento correcto del sistema. Adicionalmente, una vez completada la instalación del control automático se requiere monitorear el proceso durante la operación normal, con el objetivo de afinar el programa y asegurar las condiciones deseadas ⁽⁵⁾.

Antes de realizar la automatización se deben tener en cuenta ciertos aspectos que determinan el tipo de automatización a desarrollar y esto delimitará en gran medida los pasos a seguir. Para implementar la misma, una vez conocido el proceso, será necesario identificar las variables medibles según el proceso involucrado, así como también el instrumento requerido para supervisar y/o controlar dicha variable.

II.3.2. Instrumentación & Control

Para manejar (operar) una planta es necesario conocer el valor de las propiedades del proceso, utilizar esta información para diagnosticar la mejor forma de operarlo y disponer de los medios que lo modifiquen, implica establecer una secuencia de pasos tales como: identificar lo que se desea medir, decidir con que instrumento se quiere medir y finalmente actuar implementando el instrumento.

Dado que la selección de las variables a medir y sobre las que se debe actuar es un aspecto práctico, se deberá disponer de una serie de conocimientos teóricos a nivel de instrumentación que faciliten la formación de criterios para realizar la selección de un instrumento determinado. Se entiende por instrumento tanto los sistemas de medición (sensores) como los de manipulación (válvulas).

Los instrumentos industriales, son todos aquellos dispositivos eléctricos, mecánicos, electrónicos, neumáticos e hidráulicos que son utilizados en un ambiente

industrial como parte de un proceso productivo, cuyo uso permite el desarrollo de las acciones de control ⁽⁵⁾.

Los instrumentos industriales pueden realizar las siguientes funciones con las variables de proceso: Sensar, acondicionar, transmitir, controlar, indicar magnitudes, totalizar, registrar, convertir, alarmar por magnitud una variable y además interrumpir o permitir una secuencia dada, transmitir y amplificar una señal, y manipular una variable del proceso, etc.

En la industria los instrumentos son clasificados de acuerdo a:

- (a) **Su aplicación:** Neumáticos, hidráulicos, eléctricos, estación de control, electrónicos, electromecánicos, transductores, amplificadores, indicadores, analizadores, mixtos, estación de operador, estación de transferencia y relevador de cálculo ⁽⁹⁾.
- (b) **Su localización:** Instalados en campo, instalados localmente, instalados en tablero principal e instalados remotamente.
- (c) **Su tecnología:** En sistemas discretos, sistemas de control digital directo, sistemas de supervisión, sistemas de control supervisorio, sistemas de adquisición de datos, sistemas de control distribuido, sistemas de control avanzado.

Es importante conocer como funcionan los instrumentos de control que generalmente se encuentran localizados en los equipos del proceso:

- (a) **Sensores:** son elementos de medición de parámetros o variables del proceso. Los sensores pueden ser usados también como indicadores, para transformar la señal medida en señal eléctrica.

En la mayoría de los procesos es importante la tasa de flujo, la temperatura, la presión y el nivel, por lo tanto los sensores se clasifican según la variable que miden:

(a.1) Para flujos: estos monitorean la velocidad de fluidos detectando el flujo de líquidos y gases, entre los cuales se conocen los de placas de orificios con señales muy fluctuantes por la turbulencia del mismo.

(a.2) Para temperatura: se usan termocuplas que funcionan con un punto frío y otro caliente, usualmente con rangos de 0 a 1300 °F o termopozos con respuestas de 30 seg., termopares que son circuitos formados por dos metales distintos que producen un voltaje siempre y cuando los metales se encuentren a temperaturas diferentes ⁽⁴⁾. Además existen equipos de proceso cuya temperatura excede la de fusión del elemento sensor (por ejemplo, hornos de fundición de metales). En tal caso, se recurre a los pirómetros ópticos. Estos sensores se basan en la radiación de cuerpos negros y contienen en su interior un filamento que debe poder alcanzar la misma temperatura del cuerpo medido (al menos). También se utilizan los pirómetros (de baja temperatura) en microelectrónica y en sensibilidad instrumental, se comercializan comúnmente termómetros sin contacto. Este tipo de termómetros son muy útiles para medir la temperatura de sistemas en movimiento (por ejemplo un rodamiento) en los que no se podría instalar un termómetro que requiera equilibrio térmico.

(a.3) Para presión: la presión puede reflejar la fuerza motriz para la reacción o transferencia de gases; la fuerza motriz para el transporte de gases o líquidos; la cantidad másica de un gas en un volumen determinado; etc. Es también común medir la presión en una línea para cuantificar caudal, cuando se conoce la pérdida de carga; o pérdida de carga cuando se conoce el caudal ⁽⁵⁾. Para la medición de presión se emplean instrumentos llamados manómetros como: los tubos en “U” en donde se deposita una cantidad de líquido de densidad conocida y de acuerdo a la cantidad de

presión el líquido se desplaza; los de Bourdón que dependen de la elasticidad de los materiales utilizados en su construcción, este manómetro es el más común en plantas de procesos que requieran medición de presiones, consiste de un tubo metálico achatado y curvado en forma de "C", abierto sólo en un extremo. También existen los diafragmas para diferenciales de presión, estos últimos permiten conocer la presión relativa entre dos puntos, y están estructurados por dos cámaras separadas por un diafragma sensor en el centro, cuyo único requisito es impedir el paso del fluido interno de un lado hacia el otro.

(a.4) Para nivel: detectan el nivel de los líquidos, polvos y sólidos granulares. Se usan de acuerdo al nivel del líquido a medir como el tipo flotador o los de presión diferencial de dos niveles, que están directamente relacionados con el nivel del líquido dentro del recipiente ⁽⁴⁾.

Los tipos de sensores se clasifican en:

- **Sensores de contacto:** Son aquellos que realizan la medida en contacto directo, real y físico con el producto o materia. Ej. sensores de boya para medir nivel en un tanque, termocupla para medir temperatura, etc.
- **Sensores de no contacto:** Se basan en propiedades físicas de los materiales, son más exactos, pero propensos a interferencias del medio ambiente. Ej: sensores ultrasónicos (proximidad), sensores ópticos, etc ⁽⁵⁾.
- **Sensores digitales:** Trabajan con señales digitales, en código binario, pueden representar la codificación de una señal analógica, o también la representación de dos estados ON/OFF. Ej: sensores tipo switch.
- **Sensores analógicos:** Proporcionan medidas continuas, los rangos típicos son de 0 a 20 mA, 4 a 20 mA, 0 a 5 v, 1 a 5 v, entre otros. Ej: sensores capacitivos, sensores piezoresistivos, etc.

- **Sensores mecánicos:** Son aquellos que traducen la acción física del elemento medido, en un comportamiento mecánico, típicamente de movimiento y/o calor. Ej. barómetro, termómetro de mercurio, etc ⁽⁵⁾.
- **Sensores electro-mecánicos:** Este tipo de sensor emplea un elemento mecánico elástico combinado con un transductor eléctrico. Ej: sensores resistivos, sensores magnéticos, etc.

En las Figuras N° 18, N° 19 y N° 20 se presentan algunas imágenes con diferentes tipos de sensores:



Figura N° 18: Sensor de Humedad con dispositivo transmisor (Imagen Izquierda), Sensor de Presión (Imagen Derecha) y Sensor de Proximidad (Infrarrojo) (Imagen del centro). ⁽⁵⁾



Figura N° 19: Sensor de Temperatura (Termocuplas y RTD's) (Imagen Izquierda) y Sensor de Nivel (Imagen Derecha) ⁽⁵⁾



Figura N° 20: Sensor de Flujo (Imagen Izquierda) y Sensor de Ph (Imagen Derecha) ⁽⁵⁾

(b) Transmisores: Forman parte de la interfaz entre el proceso y el sistema de control, la función del transmisor es convertir la señal del sensor (milivoltios, movimientos mecánicos, diferenciales de presión, etc.) en señales de control (por ejemplo de 4 a 20 mA) ⁽⁴⁾. Los transmisores manejan rangos de operación, estos poseen parámetros de ajuste para poder cambiar la medición del mismo en función a los rangos. Además la dinámica de respuesta de la mayoría de los transmisores es más rápida que el proceso y que las válvulas de control, esto

significa que un cambio de señal en la entrada del transmisor es un cambio instantáneo en la señal de salida del mismo. Existen transmisores de presión, de temperatura, flujo (placas de orificios), multivARIABLES de presión y temperatura tal y como se muestra en la *Figura N° 21*.



Figura N° 21: Transmisor Multivariable de Presión y Temperatura ⁽⁵⁾

(c) Válvulas de Control: Son dispositivos mecánicos empleados para controlar, retener, regular, o dar paso a cualquier fluido que viaja a través de una tubería. Actúan como elementos finales de control. En la mayoría de los procesos de Ingeniería Química el elemento final de control es una válvula de control automático, conocida como válvula reguladora de la variable manipulada (flujo). La mayoría de las válvulas de control están compuestas por una pieza móvil o dispositivo en el extremo final de una corriente que abre o cierra la misma ⁽⁴⁾.

Las válvulas de control poseen ciertos aspectos importantes a considerar como: la acción de la válvula que depende del efecto que tenga la variable manipulada en el proceso o simplemente depende de acciones consideradas como emergencias y seguridad del proceso, también se encuentran las características que indican la relación que guarda la posición de la apertura de la válvula con la señal, éstas permiten determinar el tipo de válvula a emplear ajustando la característica de la misma a la necesidad del proceso y por último se tiene el tamaño, que generalmente depende de la cantidad de flujo que maneja, la

presión y las características del fluido. En la *Figura N° 22*, se presentan algunas imágenes con diferentes tipos de válvulas:



Figura N° 22: Válvulas de control con actuadores eléctricos para servicios ⁽⁵⁾

II.3.3. Controladores.

Como se dijo anteriormente, el cerebro del sistema de control, es el controlador y su función es comparar la señal del proceso con la señal del set point, en base a esta comparación calcula un error (diferencia entre valor medido y deseado), para luego actuar a fin de corregir este error.

Según la naturaleza de las señales que intervienen en el proceso, los sistemas de control pueden dividirse en analógicos y digitales. Los controladores analógicos transmiten continuamente señales electrónicas o neumáticas, produciendo cambios constantemente en la señal que va dirigida al elemento final o válvula de control para mantener la variable en el set point. Mientras que los controladores digitales, son discontinuos en operación, es decir, dependiendo del número de lazos de control transmite una señal correctiva para cada lazo manteniendo el valor de la variable en el set point ⁽⁴⁾.

En la industria existen diversos tipos de controladores de procesos que varían de acuerdo al tipo de aplicación, según esto conocen tres tipos de aplicaciones:

- Máquinas.
- Industrias manufactureras.
- Procesos continuos.

Usualmente para las dos primeras aplicaciones el controlador que se usa es el de tipo Controlador Lógico Programable (PLC), mientras que para los procesos continuos suelen emplearse Controladores Híbridos⁽¹⁵⁾.

Un Controlador Lógico Programable (PLC) es un dispositivo electrónico de funcionamiento digital basado en un microprocesador, que utiliza una memoria para el almacenamiento de las instrucciones de programa empleado para el control automático de máquinas y procesos, mediante la implementación de funciones específicas tales como operaciones lógicas, aritméticas, temporizaciones, cuentas y secuencias, a través de módulos de entrada y salida de tipo analógico / digital⁽¹⁶⁾.

Pueden poseer una interfaz humano-máquina (IHM) para la programación, o sino su programación se realiza utilizando la unidad de programación o una terminal de programación independiente, sin embargo actualmente existen PLC's cuya modularidad permite instalar módulos especializados que actúan en algunos casos como (IHM). Para programar el PLC se conmuta al modo de programación y cuando se culmine dicho procedimiento, el usuario cambia manualmente al modo ejecución a fin de que la CPU ejecute el programa en forma repetitiva⁽¹⁶⁾.

Existen PLC's compactos que reúnen en una sola unidad, la fuente de poder, el CPU, la memoria y las interfaces I/O. Esta versión representa grandes ventajas en lo que se refiere a costos más accesibles, utilización de espacios reducidos, su selección se hace más fácil, responde con alto desempeño en condiciones hostiles del

ambiente de trabajo, pueden ser programados mediante paquetes de software desde una computadora.

La capacidad de expansión de los PLC's permiten usarse en redes de transferencia de datos semejantes al usado por las micro o mini computadoras, estas redes son usadas para registrar datos desde cada máquina y generar reportes de estado de producción y comodidad para su manejo. Estas redes proveen comunicación entre cada PLC para el control de secuencia y sincronización de la planta. ⁽⁵⁾

Los PLC's son típicamente utilizados en sistemas SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Data), el cual es un sistema basado en computadores que permiten supervisar y controlar a distancia una instalación de cualquier tipo.

Características de los sistemas SCADA:

- Posee arquitectura del tipo abierta.
- El tipo de control predominante, es de supervisión, los lazos de control son cerrados por el operador. Adicionalmente se utilizan para control secuencial y regulatorio ⁽¹⁷⁾.
- Aplicado en áreas geográficamente amplias.
- Las unidades de adquisición de datos y control están basados en remotas y PLC's.
- Posee una amplia red de comunicaciones: radio, satélite, líneas telefónicas, conexión directa, LAN, WAN.

Cuando se combinan las funciones de un Controlador Lógico Programable y las funciones del control regulatorio en una misma plataforma se crean los *Controladores Híbridos*.

El *Controlador Híbrido C200* de Honeywell, proporciona un ambiente fácil y flexible de operación para realizar una variedad de tareas del control a diversas velocidades de ejecución. También permite la incorporación de señales, posee módulos de entrada y salida tanto discretas como analógicas para poder adquirir data de campo ⁽¹⁸⁾. Para determinar cuánto control puede ejercer este controlador, el uso del procesador y el uso de la memoria deben ser considerados los recursos disponibles de la computadora (CPU) y de la memoria, determinando así el número de módulos o los bloques que un procesador de control C200 puede ejecutar.

El controlador mostrado en la *Figura N° 23*, está conformado por un chasis (Rack), una Fuente de Poder, un Módulo Procesador de Control (CPM), una Interfaz FTE (FTE Bridge), un Módulo de Redundancia y Módulos I/O. Los chasis están disponibles en 5 tamaños: 4, 7, 10, 13 y 17 slots. Todos los módulos pueden ser removidos e insertados. Todos los componentes están disponibles con las máximas regulaciones de protección ambiental *conformal coating*.

Descripción de la Arquitectura del Controlador C200 de Honeywell:

1. **La Fuente de Poder ❶**: La Fuente de Poder posee capacidad para alimentar las tarjetas y está separada del gabinete donde se colocan los equipos (Rack) y por lo tanto no ocupa ningún espacio o ranura (slot). Ésta se ubica en la parte izquierda del Rack ⁽¹⁸⁾. La Fuente de Poder está disponible en 120/240 VAC y 24 VDC y está representada por el número 1 encerrado en el círculo rojo, tal como lo muestra la *Figura N° 23*.
2. **El Módulo Procesador de Control ❷**: Es un dispositivo que ocupa dos (2) ranuras con un procesador de 100 MHz Power PC603E y ocho (8) Mbytes de RAM con detección y corrección de errores. Incluye cuatro (4) Mbytes de Flash ROM de protección de paridad, la cual es utilizada para actualizaciones y el almacenamiento permanente del programa ⁽¹⁸⁾. Incluye una batería recargable de

respaldo para la base de datos del controlador y también la opción de un Módulo de Extensión de Batería que ocupa un (1) slot.

3. **El Módulo Ethernet ③** : Soporta comunicación Ethernet entre el Servidor y la Red de Control y provee una red punto a punto para establecer interoperabilidad. Esta es una red abierta basada en el hardware de la computadora y posee un modo de comunicación eficiente y familiar ⁽¹⁸⁾.
4. **El Módulos de Entrada y Salida ④** : Módulos que poseen entradas/salidas digitales y entradas/salidas analógicas al sistema Experion *Process Knowledge System* (PKS) ⁽¹⁸⁾.

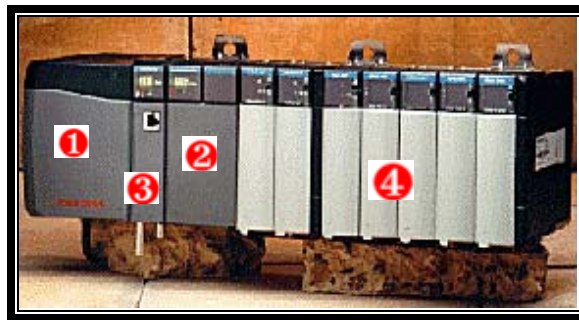


Figura N° 23: Esquema del chasis del controlador de Procesos C200 ⁽¹⁵⁾.

Los Controladores Híbridos son típicamente utilizados en Sistemas de Control Distribuido (DCS), que se caracterizan por realizar las acciones de control en forma automática. Estos sistemas distribuidos utilizan un controlador para uno o varios lazos de control y han sustituido un amplio sistema de comunicaciones por un único sistema ⁽⁵⁾. Estos sistemas son destinados al control de grandes o pequeñas plantas de procesos, fundamentalmente de tipo continuo (papeleras, cementeras, petroquímicas, energía, siderurgia, etc.), con capacidad de llevar a cabo el control integral de la planta. Se caracterizan por un fuerte componente informático y una estructura jerarquizada.

La ventaja de un Sistema de Control Distribuido, es la capacidad de integración que poseen los distintos componentes (software, dispositivos de control, entradas y salidas, instrumentos, etc.), la facilidad de diagnóstico que el sistema ofrece a los operadores, desarrollo del sistema en base a módulos en hardware, software y en el sistema interno de comunicaciones ⁽⁵⁾. Pueden realizar estrategias de control complejas, cuentan con la capacidad de comunicación con otros ordenadores encargados de la gestión del proceso, control avanzado, modelos matemáticos, etc. Además permite al operador monitorear y controlar todos y cada uno de los lazos de control en la planta a través de enlaces de comunicación de alta velocidad.

Entre las características del Sistema de Control Distribuido se pueden citar:

- El sistema cuenta con recursos de software y hardware compartidos, los cuales son administrados por un operador y pueden usar un modelo cliente/servidor.
- Son sistemas amplios, de arquitectura abierta, con interfases estandarizadas, a los cuales puede añadirse nuevos elementos y nuevos servicios ⁽⁵⁾.
- Poseen escalabilidad, es decir siguiendo una jerarquía de escalones uno por debajo de los otros consecutivamente ⁽⁵⁾.
- Debe poseer y brindar seguridad ante accesos no deseables.
- Debe poseer y brindar consistencia al momento de acceder a los datos.
- Debe poseer y brindar tolerancia a fallos. Si tenemos un sistema multiusuario, el fallo de un usuario puede hacer que caiga el sistema, en cambio en un sistema distribuido sólo hará que falle donde se produjo el error del usuario ⁽⁵⁾.

Los DCS, delimitan su arquitectura por los dispositivos de campo tal y como se muestra en la *Figura N° 24*, que se cablean uno a uno hasta los gabinetes con tarjetas de entradas y salidas, poseen terminales Interfaz Humano Maquina (IHM), la cual está referida a la realización y despliegue local del desarrollo de un proceso a través de un sistema de computadoras y un panel de control proporcionado por un

software en particular mediante un servidor que usualmente está habilitado para que el operador interactúe con los parámetros relacionados al proceso.

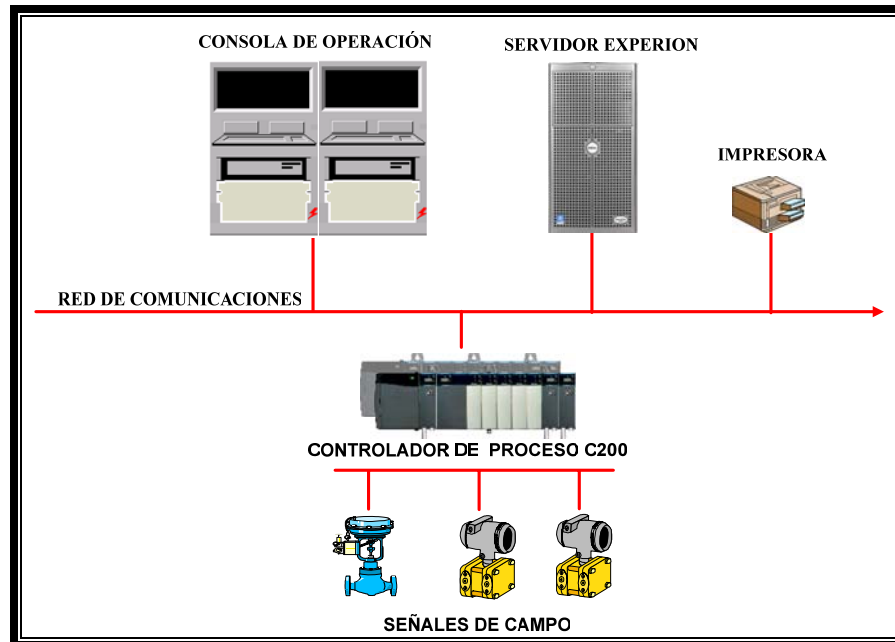


Figura N° 24: Esquema del Sistema de Control Distribuido. (Elaboración propia)

El *Software del DCS*, es un componente que permite el funcionamiento de una computadora a través de un conjunto de programas, algoritmos y procedimientos necesarios para hacer posible la realización de una aplicación informática ⁽⁵⁾. La función del software DCS consiste en la adquisición de datos provenientes de campo tomados por los equipos de instrumentación para procesarlos, analizarlos, almacenarlos y visualizarlos. Permitiendo desarrollar sistemas de control, supervisión y automatización.

Por otra parte este programa permite al operador corregir el error asociado al set point de una variable con los controladores a través de operaciones que el usuario realice en el teclado. La recepción de datos emitidos desde cualquier controlador puede ser detenida también con una instrucción del operador en el teclado. ⁽¹⁹⁾

El *Hardware del DCS*, está compuesto básicamente por los computadores y los controladores requiriendo como especificaciones: la arquitectura, modelo de procesador, velocidad, disco duro, memoria, puertos de comunicaciones, software, fuente de alimentación, capacidad de expansión, tarjetas de adquisición de datos, modelo físico, dimensiones, peso, servicio técnico, garantía, etc.

II.3.4. Programas de Adquisición y Control.

Un software es un conjunto de programas cuya aplicación informática es la de adquirir, procesar, analizar, almacenar, visualizar, datos provenientes de campo tomados por el hardware de instrumentación. Permitiendo desarrollar sistemas de control, supervisión y automatización ⁽⁵⁾.

El software de aplicación se encuentra vinculado con las señales de entrada y de salida a los equipos de control mediante un sistema (hardware) llamado adquisición de datos, tal como lo muestra la *Figura N° 25*, sin embargo para la adquisición de datos pueden ser empleados diferentes tipos de software de aplicación.

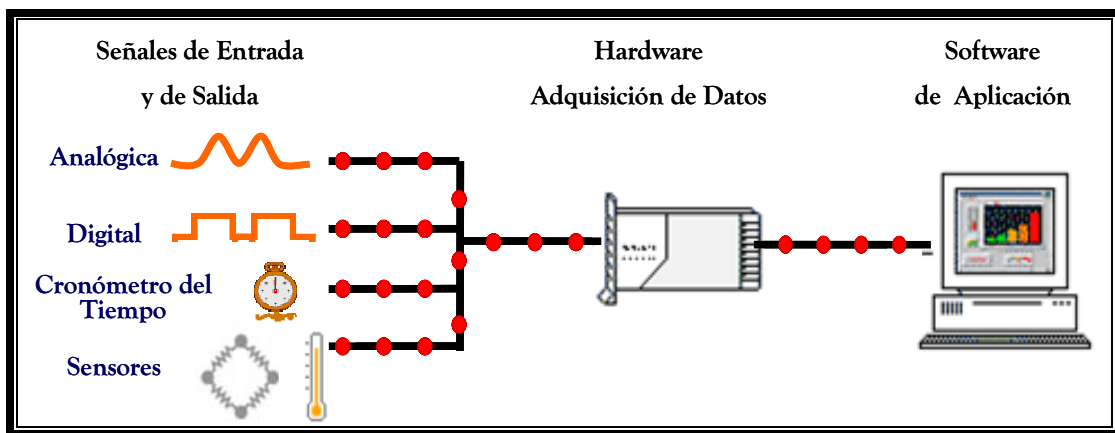


Figura N° 25: Relación del sistema de adquisición de datos con el software de aplicación.
(Elaboración propia)

La adquisición de datos ⁽²⁰⁾ es el proceso que involucra la recopilación de información de una forma automatizada a través de un conjunto de variables mensurables en forma física que a partir de fuentes de mediciones analógicas y digitales como sensores y dispositivos bajo prueba son convertidos en tensiones eléctricas, de tal manera que se puedan utilizar en la PC.

Para ello se requiere una etapa de acondicionamiento que adecua la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital. El elemento que hace dicha transformación es la Plaqueta de Adquisición de Datos (PAD). Una vez que las señales eléctricas se transformaron en digitales dentro de la memoria de la PC, se las puede procesar con un programa de aplicación adecuado al uso que el usuario desea. La adquisición de datos utiliza una combinación de medición de hardware y software basado en PC para proporcionar un sistema de medición flexible y definido por el usuario.

De la misma manera que se toma una señal eléctrica y se transforma en una digital dentro del ordenador, se puede tomar una señal digital o binaria y convertirla en una eléctrica, en este caso el elemento que hace la transformación es una PAD de salida o plaqueta de control. La señal dentro de la memoria de la PC la genera un programa adecuado a las aplicaciones que quiere el usuario y luego de procesada es recibida por mecanismos que ejecutan movimientos mecánicos, a través de servomecanismos (transductores).

Existe una extensa lista de software de aplicación para adquisición de datos, entre los cuales se conoce el Experion de Honeywell, así como otras aplicaciones avanzadas como: LabView, Matlab Simulink[®], PRO II, HYSYS Plant[®], entre otros, por su compatibilidad con otros fabricantes, su variada gama de aplicaciones y su extensa popularidad.

II.3.4.1. *Software Experion®.*

Es una plataforma con la cual los operadores pueden visualizar y controlar en forma óptima y eficiente un proceso, es decir, es la interfaz entre el proceso, el sistema de control y el operador. Posee usos avanzados para analizar y mejorar el funcionamiento de los procesos, facilitando así la interpretación de los resultados ⁽²¹⁾.

El Sistema *Experion Process Knowledge System* (PKS), es un sistema de control completamente integrado que se diferencia funcionalmente de los software de PC y los sistemas PLC. El sistema Experion PKS, incrementa la productividad de ingeniería a través de herramientas de orientación a objetos y una librería completa con funciones de control de proceso ⁽¹⁸⁾.

Experion PKS incorpora tecnología de punta, tecnología de sistemas abiertos, como Windows 2000 de Microsoft, Ethernet, ODBC, Advanced DDE, Visual Basic y OLE para control de procesos (OPC), junto con hardware de PC basado en tecnología Intel para así proveer un paquete económico y fácil de usar.

La arquitectura del Experion PKS, mostrada en la *Figura N° 26*, asegura que el usuario tiene un acceso transparente y completo a la base de datos de los controladores del proceso. Además él se puede integrar con un amplio rango de productos Honeywell y de terceros ayudando la mejora de sistemas existentes y habilitando la integración completa de la información del proceso ⁽¹⁸⁾. Dicha información es accesible por los operadores, ingenieros de proceso y las computadoras de nivel empresarial permitiendo el control y monitoreo para incrementar la productividad, reducir los costos, aumentar la consistencia del producto y disminuir el desecho.

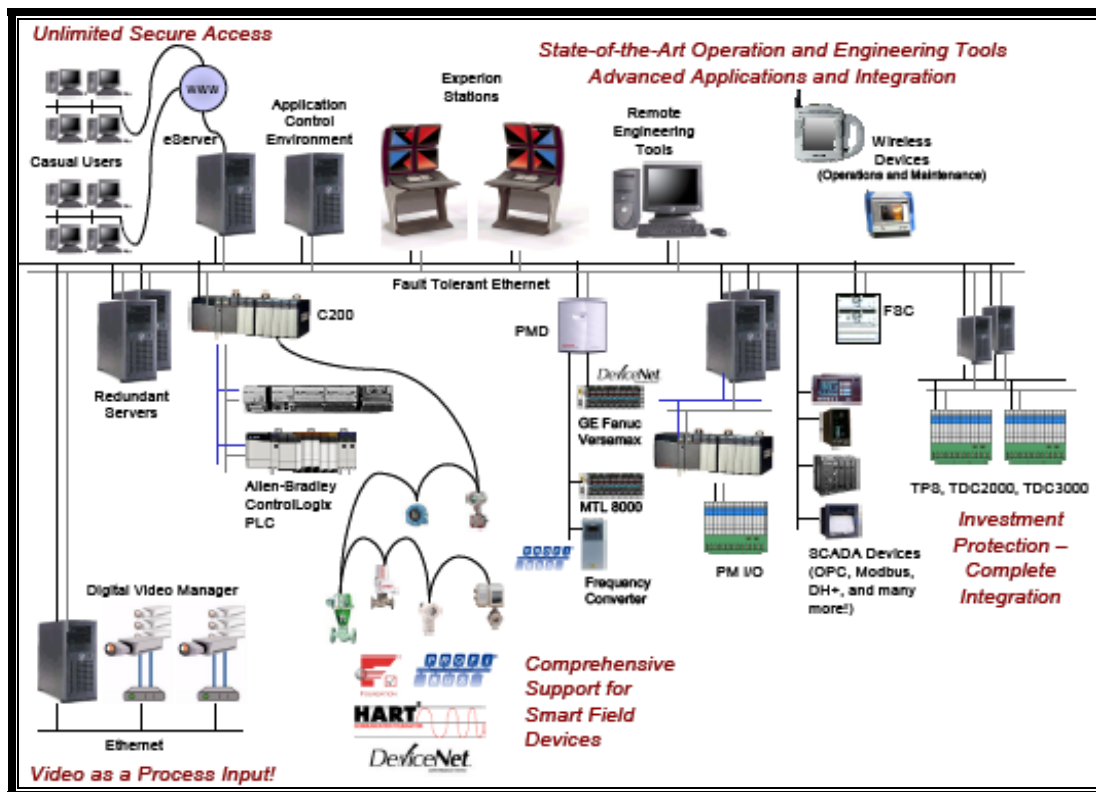


Figura N° 26: Arquitectura del sistema Experion PKS R210 ⁽¹⁸⁾.

Los componentes básicos del Sistema Experion PKS son:

1. Controlador de Procesos para procesos integrados y discretos ⁽¹⁸⁾:

El Controlador C200, es determinístico, es decir, posee la capacidad de manejar múltiples lazos en ventanas de tiempos determinadas. Además, ejecuta todas las funciones de control y éstas se establecen en un tiempo predeterminado, típicamente cada lazo se ejecuta en 200 mseg. Su programación se realiza en base a diagramas de bloques a fin de que el Ingeniero de Procesos, pueda ejecutar las secuencias de control, sin tener que recurrir al lenguaje tipo diagrama en escalera, con el cual no está familiarizado. También, incluye como parte de sus rutinas todos los algoritmos de control como P, PI, PID y las estrategias de control comunes como: relación, cascada, override, entre otras.

Además, posee familia de entradas y salidas (I/O) flexibles basados en chasis y con integración con módulos de I/O Honeywell Process Manager, I/O con aislamiento galvánico/intrínsecamente seguro para áreas peligrosas, integración con PLC5 Allen-Bradley y controlador lógicos Logix 5550, integración con dispositivos FOUNDATION fieldbus, HART y profibus.

2. Control Supervisor basado en PC:

El Experion PKS, está basado en tecnología Wintel, compuesto por la aplicación de control basado en sistema operativo Windows 2003 Server con computadores Intel, con Interfaz Humano Máquina usando Windows XP o VISTA.

3. Servidor de Alto Desempeño del Experion PKS:

Contiene una amplia selección de interfases con terceros, incluyendo OPC y una arquitectura de sistemas distribuidos para plantas con sistemas distribuidos geográficamente ⁽¹⁸⁾.

4. Experion PKS Interfaz Humano Máquina (IHM):

La tecnología usada en el Experion PKS, está basada en la tecnología HTML, debido a que la tendencia hacia el futuro es la Internet. Honeywell IHM Web, posee estaciones rotativas o permanentes para máxima flexibilidad y costo-efectividad, además cuenta con una interfase gráfica de operación con alta resolución y una tabla de visualización de despliegues de monitoreo en línea de las estrategias de control. En la *Figura N° 27* se muestra un despliegue típico de una Interfaz Humano Máquina.

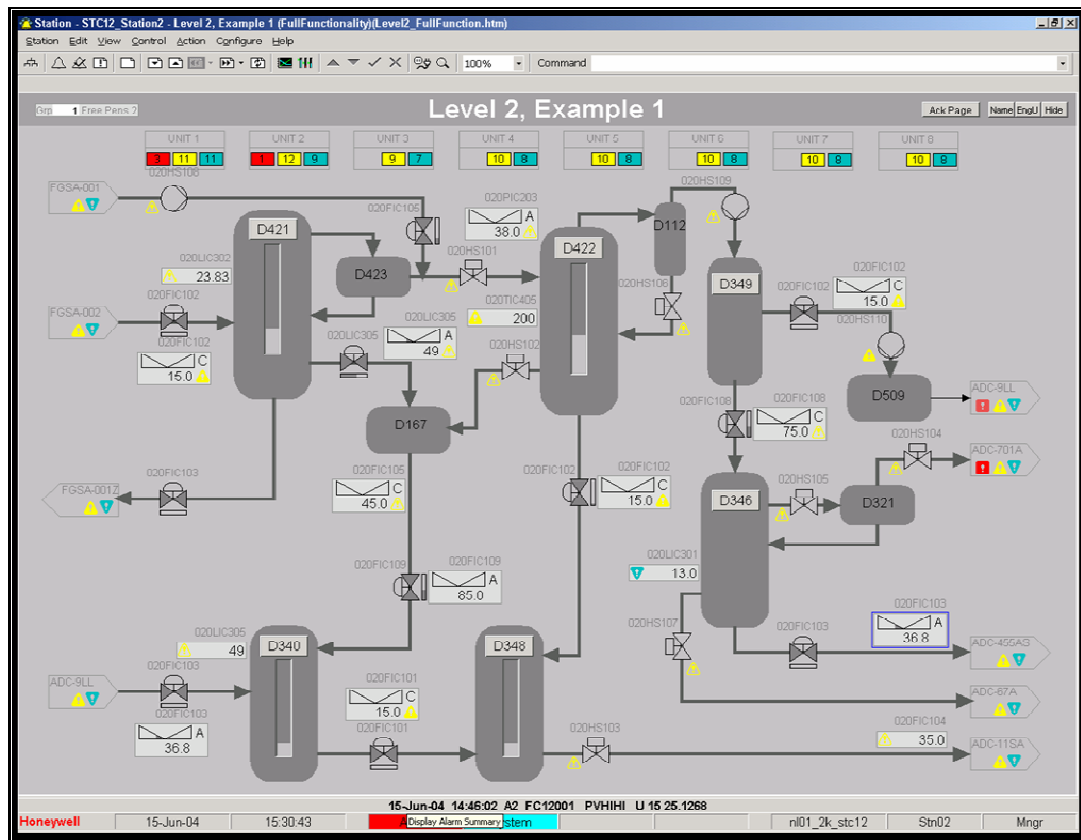


Figura N°27: Esquema de Interfaz Humano-Máquina. ⁽¹⁷⁾

5. Experion PKS Software:

Este es un software supervisor con características como manejo de datos dinámicos, manejo de alarmas/eventos, reportes, etc, también tiene herramientas control Builder con librerías avanzadas de control, así como una herramienta display Builder para la creación de despliegues basados en la tecnología html, documentación conocida sobre el Builder On-Line para la tecnología HTML, configuración y diagnóstico del sistema ⁽¹⁸⁾. Ejemplos de estos despliegues se presentan en las Figuras N° 28 y 29.

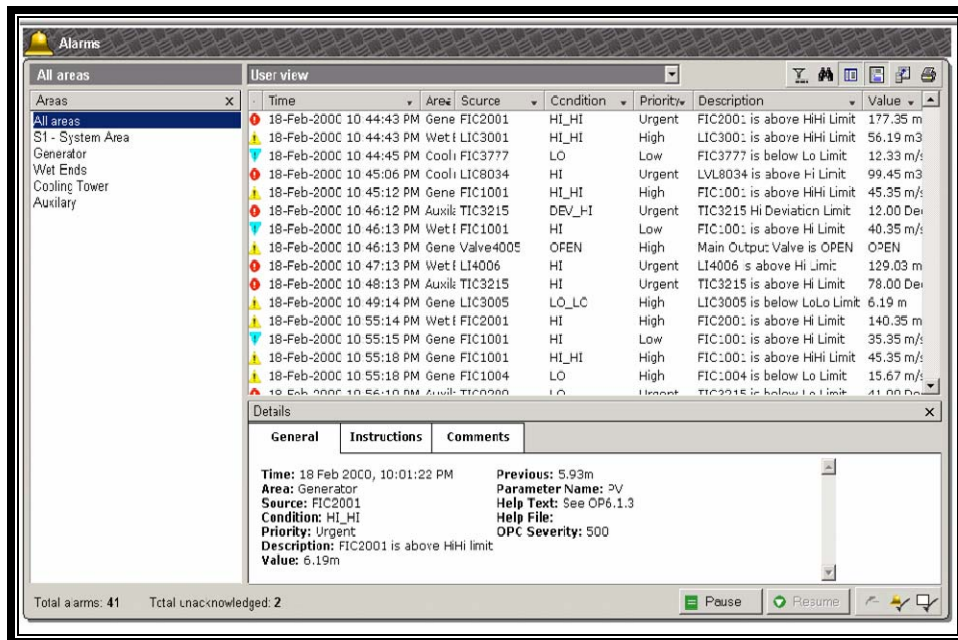


Figura N° 28: Esquema de Manejo Avanzado de Alarmas. ⁽¹⁸⁾



Figura N° 29: Esquema de Reporte de Tendencias. ⁽¹⁸⁾

6. Redes de Control de Proceso:

Posee red Ethernet Tolerante a Fallas (FTE), flexible para tecnología abierta ⁽¹⁸⁾

7. Sistema de Simulación del Proceso:

Proporciona simulación completa del sistema Experion PKS, así como también un ambiente de simulación de control en la PC sin necesidad de conexión con el hardware requerido, posee soportes para dispositivos Honeywell de control avanzado.

Construcción de las Estrategias de Control del Sistema PKS:

Las estrategias de control del Experion PKS, se construyen utilizando el *Control Builder*, que es una herramienta gráfica, ver *Figuras N° 30 y 31*, orientada a objetos que soporta el Control Execution Environment del Experion PKS. Esta herramienta permite el diseño, la documentación y el monitoreo, además permite el fácil manejo de I/O, incluyendo Fieldbus y Profibus, y cubre funciones de control continuo, lógico, motor, secuencial, batch y avanzado ⁽¹⁸⁾. Los Bloques de Función (FBs) son objetos básicos suministrados por Honeywell para ejecutar diferentes funciones de control. Cada bloque tiene parámetros que suministran una visión exterior de lo que el bloque esta realizando. Los FBs se interconectan fácilmente vía software para construir aplicaciones o estrategias de control.

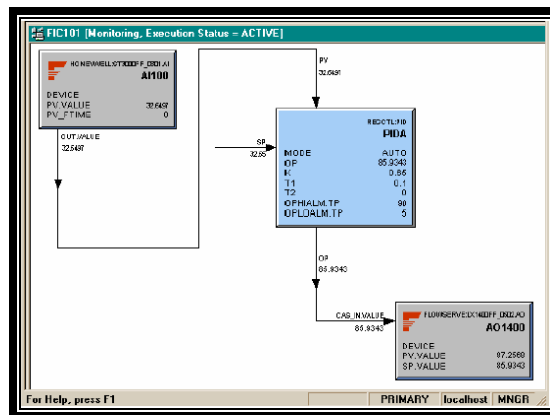


Figura N° 30: Despliegues en ambiente Windows (Estrategias de Control) ⁽¹⁸⁾.

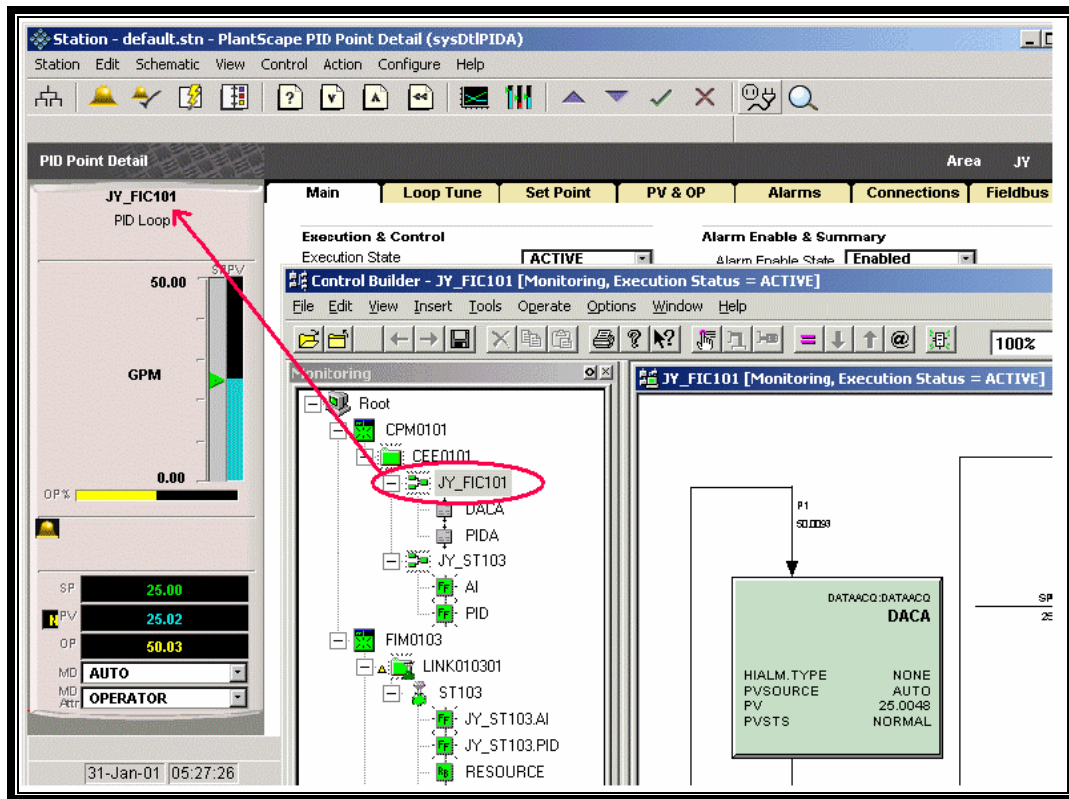


Figura N° 31: Despliegues en ambiente Windows Control Builder. (18).

Los bloques de función son agrupados en los Módulos de Control (CMs) y, en el caso de FBs secuenciales se agrupan en Módulos de Control Secuencial (SCMs). Los SCMs simplifican realmente la implementación de lógicas tipo batch utilizando una serie de pasos distintos para cumplir una o más tareas del proceso.

II.3.5. Aplicaciones Avanzadas.

Las aplicaciones han sido desarrolladas para facilitar el estudio del comportamiento dinámico de cualquier proceso a través de programas de simulación o simplemente de programas que lo optimicen. En muchos casos la selección de cualquiera de ellos depende de las necesidades del análisis del proceso.

*Aplicaciones para Simulación:***II.3.5.1. LabVIEW:**

Es un ambiente de programación gráfico diseñado para desarrollar aplicaciones de adquisición de datos, instrumentación, control y análisis de datos con interfaz hacia un computador personal y puede ejecutarse en un sin número de sistemas operativos incluyendo Windows y UNIX. Este lenguaje de programación gráfico fue desarrollado por National Instruments.

Labview permite diseñar interfaces de usuario mediante una consola interactiva basada en software. Este es un sistema de programación de propósito general con librerías y funciones para diversas tareas. En particular incluye librerías para:

- Adquisición de Datos.
- Bus de Interfaz de Propósito General (GPIB).
- Control serial de Instrumentos.
- Análisis de Datos.
- Presentación de Datos.
- Almacenamiento de Datos

Este paquete posee un entorno de programación destinado al desarrollo de aplicaciones, similar a los sistemas de desarrollo comerciales que utilizan el lenguaje C o Basic. Sin embargo, se diferencia de dichos programas en un importante aspecto: los citados lenguajes de programación se basan en líneas de texto para crear el código fuente del programa, mientras que LabView, emplea la programación gráfica o lenguaje G para crear programas basados en diagramas de bloques ⁽⁵⁾.

Una de sus principales aplicaciones es en sistemas de medición, como monitoreo de procesos y aplicaciones de control, un ejemplo de esto pueden ser

sistemas de monitoreo en transportación, laboratorios para clases en universidades y procesos de control industrial. También, es muy utilizado en procesamiento digital de señales, procesamiento en tiempo real, para aplicaciones biomédicas, manipulación de imágenes y audio, automatización, diseño de filtros digitales, generación de señales, entre otras.

El usuario le puede ordenar a la computadora qué hay que hacer con la información recibida desde cualquiera de los sensores de entrada y también qué información enviar a los canales de salida apropiados ⁽²²⁾. Los programas de LabVIEW se les llaman instrumentos virtuales (VIs) debido a que su aspecto y operación imitan a los instrumentos reales. Posee la facilidad de diagramas de bloques que muestran los componentes internos del programa. También se pueden crear (VIs) que actúen como servidores de información, que pueden ser utilizados a través de otras aplicaciones. Como un servidor, éste no usa comunicación basada en conexión.

LabVIEW posee un Módulo de Registro de Datos y un Control Supervisorio, que puede desarrollar interactivamente sistemas distribuidos de monitoreo y control. Con el Módulo DCS, se puede extender su aplicación para ver datos históricos y en tiempo real, configurar alarmas y eventos, establecer seguridad a sus aplicaciones y objetivos en tiempo real de LabVIEW juntos en un sistema completo y registrar datos de manera eficiente a una base de datos histórica y distribuida ⁽²²⁾. El Módulo DCS contiene asistentes intuitivos y cajas de dialogo para ayudarle al usuario a desarrollar aplicaciones más rápido y mejor.

Entre las muchas aplicaciones de este software se pueden destacar las siguientes:

- Desarrollo gráfico para monitoreo y control distribuido.
- Seguridad para aplicaciones a nivel de usuario.

- Tendencia histórica y de tiempo real.
- Alarmas y eventos basados en configuración.
- Base datos en red para registro de datos distribuido.
- Red integrada para compartir datos e integrar dispositivos de terceros.

II.3.5.2. Matlab Simulink:

Simulink es un paquete desarrollado por The MathWorks Inc., que se ejecuta acompañando a Matlab (parte gráfica) para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos. Es soportado en ambientes como Unix, Macintosh y Windows. En Simulink los sistemas son dibujados en la pantalla como diagrama de bloque, tales como funciones de transferencia, sumadores, uniones, etc., así como entradas y salidas virtuales de aparatos tales como generadores, voltímetros y osciloscopios.

Posee una interfaz de usuario gráfica (GUI), con diagramas de bloques para construir los modelos utilizando operaciones con el mouse del tipo pulsar y arrastrar. De esta forma, se puede dibujar los modelos de la misma forma que se haría con lápiz y papel. Una vez construidos los diagramas de bloques, se puede ejecutar simulaciones y analizar los resultados, también de forma gráfica ⁽⁵⁾.

Cuenta con dos fases de uso:

- La definición del modelo, que significa construir el modelo a partir de elementos básicos construidos previamente, tal como, integradores, bloques de ganancia, etc.
- El análisis del modelo, que significa realizar la simulación, linealización y determinar el punto de equilibrio de un modelo previamente definido.

Simulink, puede simular cualquier sistema que pueda ser definido por ecuaciones diferenciales continuas y ecuaciones diferenciales discretas. Esto significa que se pueden modelar sistemas continuos en el tiempo, discretos en el tiempo o

sistemas híbridos ⁽⁵⁾. Puede trabajar con sistemas lineales y no lineales; sistemas en tiempo continuo, muestreados o un híbrido de los dos; sistemas multifrecuencia, etc.

II.3.5.3. Simulador de Procesos PRO II:

El PRO II es un simulador de procesos de la empresa Simulation Sciences, referido al balance de materia y energía en estado estacionario, el cual tiene una interfase gráfica a través del ambiente Windows, facilitando el trabajo de simulación. Esta herramienta, es apropiada para la simulación de procesos de refinación de petróleo, ya que cuenta con una base de datos que permite trabajar amigablemente con el petróleo y sus fracciones ⁽²³⁾. Adicionalmente, el PRO II ofrece numerosos métodos para calcular propiedades termodinámicas, así como constantes de equilibrio K, entalpías, entropías, densidades, solubilidades de gas y sólidos en líquidos y fugacidades de vapor.

Estos métodos incluyen:

- Correlaciones generalizadas, tales como el método de Chao-Seader para constantes.
- Métodos para densidades °API de líquidos.
- Ecuaciones de estado, tales como método de Soave-Redlich-Kwong para calcular constantes K, entalpías, entropías y densidades ⁽²³⁾.
- Métodos de coeficiente de actividad del líquido, tales como métodos no aleatorios de dos líquidos para calcular constantes K.
- Método de fugacidad de vapor, tales como el método de Hayden-O'Connell para la dimerización de especies ⁽²³⁾.
- Métodos especiales para el cálculo de propiedades de sistemas específicos de componentes tales como alcoholes, amínas, glicoles y sistemas de aguas agrias.

II.3.5.4. *Simulador de Procesos Hysys Plant[®]:*

Hysys Plant[®] es un software de los más avanzados en ingeniería de procesos. Es completamente interactivo y es posible obtener acceso a altos niveles de definición de geometría de los equipos, obteniendo resultados detallados ⁽²⁴⁾. Hysys Plant[®] está diseñado para ser: integrado, intuitivo e interactivo, abierto y extensible.

Entorno de la simulación integrada en Hysys Plant[®].

Los parámetros comunes (que son el eje de las herramientas de modelización), se basan en: topología del modelo, interfase y termodinámica ⁽²⁴⁾.

Hysys Plant[®] utiliza el diseño orientado a objetos, junto con un entorno gráfico event-driven, consiguiendo calcular automáticamente cada vez que se le añada información nueva; y acceder libremente a la información que se necesite ⁽²⁴⁾.

Arquitectura abierta y extensible de Hysys Plant[®]

El entorno de simulación integrada y el software orientado a objetos, acaba ofreciendo ⁽²⁴⁾:

- Uso desarrollado del estado estacionario y dinámico de las operaciones unitarias.
- Expresiones cinéticas de las reacciones.
- Creación de paquetes de propiedades especializadas.

Uso de la herramienta:

Para poder realizar la simulación del proceso con esta herramienta, inicialmente se tiene que especificar al simulador las siguientes propiedades del sistema a simular:

- Modelo termodinámico y cinético.
- Entradas del proceso (composición, temperatura, caudal).
- Equipos y sus condiciones de diseño y operación.

La herramienta permite realizar simulaciones con base en el cálculo de propiedades físicas, componentes reales e hipotéticos, reacciones y equipos, todo esto dentro de una entidad singular ⁽²⁴⁾.

Las ventajas que presenta esta herramienta son:

- Información en una localización singular.
- Los paquetes de fluidos definidos pueden ser almacenados como una entidad completamente definida que puede ser usada en cualquier fase de la simulación.
- Paquetes de fluidos múltiples pueden ser usados en una misma simulación.

Aplicaciones para Simulación:

II.3.5.5. Gestión Avanzada de Alarmas:

Es una aplicación que provee soluciones avanzadas de alarmas que avisan a la gerencia de la planta, ayudando a proteger y asegurar la planta en todo momento, reduciendo las pérdidas causadas por alarmas falsas, aumenta la eficiencia del operador reduciendo el número de alarmas que requieren la intervención del operador, reduce la hora y el esfuerzo de desarrollar, de desplegar y de mantener un sistema de alarmas impropio e integra la inteligencia de la dirección en situaciones inusuales ⁽²⁵⁾.

Gestión Avanzada de Alarmas, posee aplicaciones adicionales que proporcionan soluciones para ingenieros, operadores y la dirección de planta:

(a) Gestión de configuración de alarmas: provee apoyo en la configuración de alertas y en la recopilación de documentos asociados para el sitio. Esta función suministra una opción que ayuda a capturar exigencias claves y luego hacerlas disponibles para alertar y generar notificaciones a los usuarios y otros usos ⁽²⁵⁾.

(b) **Alarma y Análisis de Acontecimiento de eventos:** proporciona alertas de los acontecimientos de eventos y análisis o configuración de los mismos. Tal y como lo muestran las Figuras N° 32 y 33. La demostración sincronizada de acontecimientos y la historia del proceso es un instrumento poderoso para el sincronizada de la historia del proceso y acontecimientos de los eventos ⁽²⁵⁾. Esto está disponible a través del Analista de Acontecimiento.

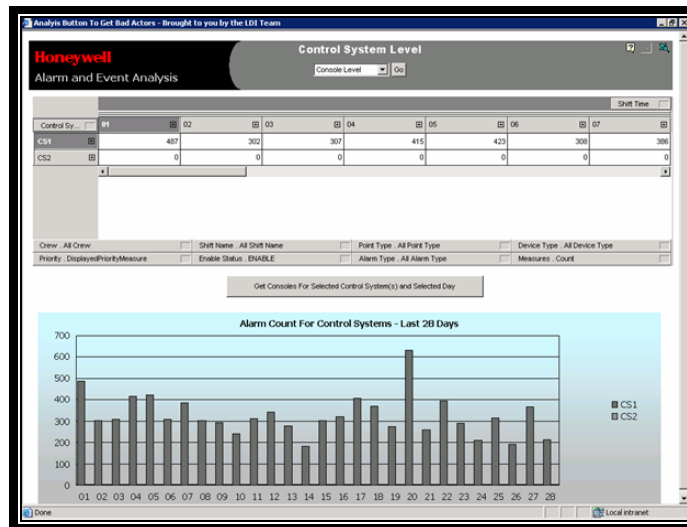


Figura N° 32: Alertas de acontecimientos ⁽²⁵⁾.

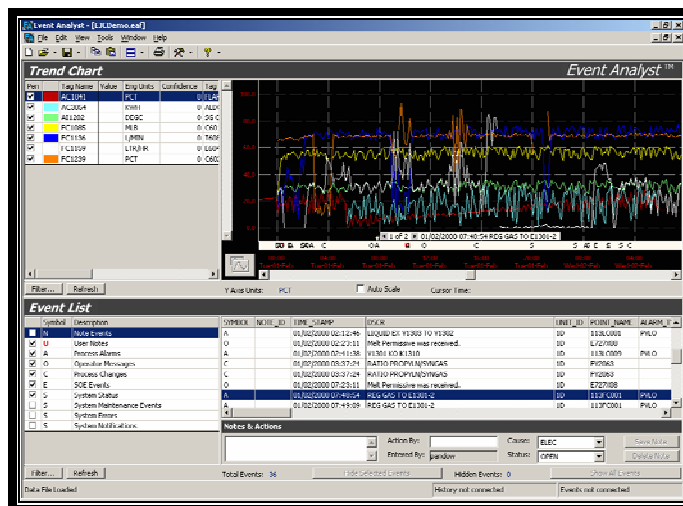


Figura N° 33: Análisis de acontecimientos de eventos ⁽²⁵⁾.

(c) **Alarma de Usuario:** esta opción permite enviar correos electrónicos y páginas Web para notificar a los operadores de una situación inusual. Los operadores pueden usar el Experion PKS con el Experion Release 200, la alarma y la demostración de acontecimiento para recibir y repasar la alerta, el acontecimiento y la alarma de usuario alertan sobre la información en el momento actual ⁽²⁴⁾. Los operadores pueden supervisar y hacer cumplir la configuración de alertas que incluyen el cambio de la configuración de las mismas para la planta en diferentes modos de operación. Las alarmas pueden ser configuradas para sustituir otras en condiciones que no las merezcan.

II.3.5.6. Profit Controller[®]:

El Profit Controller[®] de Honeywell, es la aplicación de control y optimización multivariable basada en la Tecnología de Control Predictivo Multivariable Robusto (RMPCT); ha sido diseñada especialmente para procesos industriales complejos y altamente interactivos y provee todas las herramientas necesarias para diseñar, implementar y mantener esquemas de control de múltiples entradas-múltiples salidas (MIMO) para así conducir los procesos a su máximo beneficio económico. ⁽²⁶⁾

Beneficios de Profit controller[®]:

- (a) **Eficiencia máxima del proceso:** posee un algoritmo de control avanzado multivariable que equilibra el funcionamiento y objetivos de robustez contra la economía de proceso para reducir al mínimo el costo del mismo.
- (b) **Flexibilidad para satisfacer la necesidad del proceso:** la trayectoria configurable de la respuesta de control permite adaptar el funcionamiento del mismo para cumplir los objetivos del proceso ⁽²⁶⁾.
- (c) **Grado óptimo del funcionamiento:** la independencia en la entonación del control feedforward y feedback, proporciona un desempeño óptimo al control para los cambios o disturbios del proceso ⁽²⁶⁾.

- (d) **La Robustez:** permite la configuración para el control basado únicamente en los objetivos, proporcionando la flexibilidad en el funcionamiento del control mismo.
- (e) **Diseño fácil de control de la gama de mantenimiento:** permite la fácil entonación y mejoras en desempeño; el diseño de control robusto minimiza las necesidades de entonación ⁽²⁶⁾.

Aplicaciones industriales del Profit controller[®]:

- (a) Maximiza los eventos de producción cuando los procesos funcionan bajo exigencias, muchas veces estas exigencias pueden ser manejadas para crear eventos de producción de alto nivel ⁽²³⁾. Los operadores típicamente no tienen el tiempo para supervisar las causas que conducen un acontecimiento indeseable. El Profit Controller[®] ajusta las variables apropiadas de aplicación para mitigar esta situación cuando se predice que pueda ocurrir, más que cuando este ocurre.
- (b) Mejora la calidad del producto a través del control multivariable que da lugar típicamente a una reducción del 50% en la desviación estándar de los valores medidos en el laboratorio de calidad del producto ⁽²³⁾. Esta mejora en calidad se deriva por la estabilidad del proceso, ya que se controlan la mayoría de los trastornos del mismo, y existe un control más constante a través de los cambios que realiza el operador.
- (c) Profit Controller[®], es la base para la solución y optimización de Honeywell y proporciona ventajas adicionales para la unidad o la optimización del proceso para toda la planta de manera rigurosa. También suministra un marco perfecto para poner en práctica objetivos de optimización de alto nivel.

II.4 EVALUACIÓN DE PROYECTOS

Entiéndase por *Proyecto*, la ejecución de una idea volcada en cierta documentación detallada que se materializa finalmente con la implementación y su aplicación ⁽²⁷⁾. En base a esto todo proyecto de Ingeniería para ser desarrollado debe contener un conjunto de fases o etapas a partir de las cuales sea posible lograr un buen término del mismo y alcanzar su total ejecución.

II.4.1 Fases de un proyecto:

1. Ingeniería Conceptual:

Se basa en la definición de ideas básicas, lineamientos e identificación de las necesidades generales del proyecto mediante la realización de un estudio preliminar donde deben ser contempladas las posibles alternativas que puedan efectuarse, a fin seleccionar la mejor opción y la determinación de factibilidad de la misma.

Estas ideas y definiciones del proyecto son los pilares en los que se basará la ingeniería de detalle y para ser llevadas a cabo se deben constituir un conjunto de actividades ⁽²⁷⁾.

2. Ingeniería Básica:

En esta fase se ejecutarán las actividades definidas en la ingeniería conceptual, específicamente se busca desarrollar en detalles el alcance y los planes de ejecución de la opción seleccionada que permitan generar la documentación necesaria para dar comienzo a la ingeniería de detalle del proyecto. Cabe destacar que la ingeniería básica no es constructiva ⁽²⁷⁾, es decir; con la información disponible en esta etapa no se pueden construir ni montar los equipos.

3. Ingeniería de Detalle:

La ingeniería de detalle, se ajusta en un todo a valores y especificaciones técnicas de la ingeniería básica, es siempre conveniente antes de iniciar esta etapa, someter la ingeniería básica a una cuidadosa revisión, detectando las observaciones que merezca, y proponiendo las mejoras que correspondan. La ingeniería de detalle, se debe realizar conforme a las normas aceptadas y convenidas al inicio del proyecto así como también criterios de seguridad.

El trabajo consiste en convertir la información de la ingeniería básica en el diseño detallado a través de cálculos, planos, especificaciones técnicas de manera de que se pueda comprar y/o construir los elementos constitutivos tales como instrumentos, tuberías, equipos, accesorios entre otros para que puedan ser montados en forma lógica cumpliendo con los requerimientos técnicos de la instalación ⁽²⁷⁾.

4. Procura:

En esta fase debe existir continuamente una supervisión del progreso, aquí se realizan las gestiones pertinentes para obtener presupuestos sobre los instrumentos, equipos de campo, accesorios, etc., necesarios para implementar el proyecto, a través de licitaciones que permitan seleccionar al proveedor. Por lo tanto se deben emitir listas de especificaciones con descripciones detalladas de lo requerido.

5. Integración y Pruebas del Sistema:

Esta fase combina la integración, implementación, instalación, pruebas y verificación del proyecto, con el continuo apoyo técnico de especialistas que con periódicas visitas al lugar de ejecución del proyecto brinden asesoramiento de interpretación correcta de los documentos, resultados y recojan aciertos y errores de las soluciones propuestas. Como parte de la integración se definen las necesidades específicas de equipos (hardware/software) y se elabora una especificación funcional detallada señalando dichas necesidades. Además se definen las necesidades para la configuración de los mismos.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Advanced DDE, son las siglas de Dynamic Data Exchanges en inglés, intercambio dinámico de datos, en general es un protocolo de mensajería de Windows que permite que las aplicaciones pidan e intercambien datos automáticamente.

Bucle, en programación es una sentencia que se realiza repetidas veces, se utiliza para hacer una acción repetida sin tener que repetir varias veces el mismo código, lo que ahorra tiempo, deja el código más claro y facilita su modificación en el futuro.

Bus, se relaciona con la idea de las transferencias internas de datos que se dan en un sistema computacional en funcionamiento.

Conformal Coating, es un revestimiento protector y aislador que se conforma con la configuración de los objetos para cubrir los tableros de circuito típicamente impresos, estableciendo una especie de barrera contra condiciones ambientales.

Drivers, es un programa el cual controla un dispositivo, así como una impresora. Todo lo que va conectado a una computadora ya sea externo o interno necesita un driver.

Error, es la diferencia que existiría entre el valor que el instrumento indique que tenga la variable de proceso y el valor que realmente tenga esta variable en ese momento.

Ethernet, se le llama así a la tecnología compuesta por un sistema de red de área local de alta velocidad que es la más extendida en la actualidad convirtiéndose así en un estándar de red corporativa.

Fieldbus, es un sistema de comunicación digital bidireccional que permite la interconexión en red de múltiples instrumentos directamente en el campo, realizando funciones de control y monitoreo de procesos y en estaciones de control (IHM) a través de softwares supervisorios.

FTE, son las siglas Fault Tolerant Ethernet en inglés, es la red de control del sistema de proceso conocido como Experion™ (PKS). FTE es diseñado para proporcionar no sólo la falta de tolerancia sino también la respuesta rápida, el determinismo, y la seguridad requerida para usos de control industriales.

Function block, son pequeños módulos de software sellados, que tienen entradas y salidas y una función (no intervenible) que las relaciona a ambas.

HTML, acrónimo inglés de HyperText Markup Language, es decir, lenguaje de marcas hipertextuales, lenguaje de marcación diseñado para estructurar textos y presentarlos en forma de hipertexto, que es el formato estándar de las páginas web.

Interoperabilidad, es una característica de los ordenadores que les permite su interconexión y funcionamiento conjunto de manera compatible. También se conoce como la capacidad de un programa para acceder a múltiples sistemas.

ODBC, son las siglas de Open Data Base Connectivity en inglés, un estándar de acceso a bases de datos desarrollado por Microsoft Corporation, el objetivo de *ODBC* es hacer posible el acceder a cualquier dato de cualquier aplicación, sin importar qué sistema gestor de bases de datos (*DBMS* por sus siglas en Inglés) almacene los datos.

OLE, DB es un estándar multiplataforma de Microsoft de acceso a datos. Además, es el sucesor del obsoleto ODBC. Mientras ODBC usa aplicaciones estáticas para acceder a fuentes de datos, OLE DB es rápido, simplifica el desarrollo de aplicaciones y lo acelera usando ADO: la interfaz sencilla y rápida de desarrollo para

OLE DB. Es sencillo de aprender para los programadores y puede ser utilizado en la mayoría de los entornos populares de programación.

OPC, de las siglas OLE para *Process Control* en inglés, es un estándar de comunicación en el campo del control y supervisión de procesos. Este estándar permite que diferentes fuentes de datos envíen datos a un mismo servidor OPC, al que a su vez podrán conectarse diferentes programas compatibles con dicho estándar. De este modo se elimina la necesidad de que todos los programas cuenten con drivers para dialogar con múltiples fuentes de datos.

Periféricos electrónicos, son unos dispositivos en los que se almacenan, temporal o permanente, los datos que va a manejar el CPU durante el proceso en curso, y que no es posible mantener en la memoria principal. Suponen un apoyo fundamental a la computadora para realizar su trabajo habitual.

Precisión, es la tolerancia mínima de medida que permitirá indicar, registrar o controlar el instrumento. En otras palabras, es la mínima división de escala de un instrumento indicador. Generalmente esta se expresa en porcentaje (%) del SPAN.

Profibus, del significado *Process Field Bus* en inglés, es un popular estándar de bus de campo. Se trata de una red abierta, estándar e independiente de cualquier fabricante, cuenta con varios perfiles y se adapta a las condiciones de las aplicaciones de automatización industrial.

Rack, es un gabinete metálico muy resistente, generalmente de forma cuadrada de aproximadamente 3 mts. de alto por uno de ancho en donde se colocan los equipos y tiene a ambos lados sendas guías troqueladas con agujeros a distancias constantes. Con este sistema, las máquinas pueden ir atornilladas a ambos lados del rack, minimizando el espacio ocupado y ayudando a que pueda haber una organización razonable.

Routers, son conmutadores de paquetes que operan en el nivel de red del modelo OSI. Sus principales características permiten interconectar tanto redes de área local como redes de área extensa y proporcionan un control del tráfico y funciones de filtrado a nivel de red, es decir, trabajan con direcciones de nivel de red. Los routers son más inteligentes que los switches, pues operan a un nivel mayor lo que los hace ser capaces de procesar una mayor cantidad de información.

Sensibilidad, es la relación entre la variación de la lectura del instrumento y el cambio en el proceso que causa este efecto.

Servo-Sistemas, es un sistema de control retroalimentado, en el que la salida es algún elemento mecánico, sea posición, velocidad o aceleración. Ejemplo: Sistema de posicionamiento de un motor eléctrico en una banda transportadora de objetos.

Slot, es una ranura de expansión; cada uno de los conectores donde se enchufan "pinchan" las tarjetas de expansión. De forma alargada y longitud variable, según la tecnología a la que pertenezcan: ISA, EISA, VESA, PCI, AGP, etc.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

III.1 FASES DEL PROYECTO

Para alcanzar los objetivos de este proyecto se elaboró un estudio dividido en cinco fases, Ingeniería Conceptual, Básica, de Detalle, Procura, Integración y Pruebas del Sistema de Control Distribuido.

III.1.1 Primera Fase: Ingeniería Conceptual.

Para realizar el estudio de esta fase se procedió con la identificación de las necesidades generales del proyecto y la determinación de la factibilidad del mismo para ello fue necesaria la realización de una serie de actividades descritas a continuación:

Se comenzó con un análisis de necesidades mediante la verificación del espacio disponible y el levantamiento de la información existente referente a las prácticas que conforman el programa académico del Laboratorio de Ingeniería Química I y II del LOU, para las cuales se identificaron aquellos equipos susceptibles a ser automatizados, así mismo se realizó un estudio de factibilidad para comprobar si era posible o no la implementación de instrumentación según el proceso involucrado y si la estructura física del equipo lo permitía. Para ello se recolectó la información necesaria en relación a las prácticas que se encontraban operativas en el laboratorio, además se entrevistó al personal técnico para completar la investigación obtenida en los manuales, guías y procedimientos disponibles por la cátedra. Por otra parte se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica vinculada a los sistemas de control existentes y aquellos que eran requeridos para la automatización.

Además se identificaron las variables a supervisar y controlar según el grado de importancia en el proceso involucrado tales como presión, temperatura, flujo y nivel; clasificándolas en variables manipuladas, controladas y de perturbación.

III.1.2 Segunda Fase: Ingeniería Básica.

En esta fase se ejecutaron las actividades definidas en la ingeniería conceptual; el objetivo de esto consistió en verificar o determinar la instrumentación existente y aquella que era requerida para la automatización de cada una de las prácticas y la factibilidad de hacerlo.

**** Levantamiento de campo:***

Se determinó el estado de las instalaciones durante el tiempo de estudio y el grado de automatización.

En las visitas de campo a las instalaciones del laboratorio se realizaron las siguientes actividades para cada una de las prácticas:

a) En cuanto al espacio físico:

- Se elaboró el plano de planta física del laboratorio definiendo las dimensiones del mismo.
- Se diseñó la sala de control para la dotación de los elementos básicos de oficina como: sillas, mesas, etc., en los que se ubicó la plataforma del Sistema de Automatización describiendo el hardware, los protocolos de comunicación, el servidor, el cajetín de conexión y la disposición física de los equipos en la sala destinada a éstos.

b) En cuanto a la instrumentación:

- Se elaboró la lista de los instrumentos existentes, verificando el estado de los mismos para el momento de su estudio.
- Se revisó la instrumentación del laboratorio definiendo el grado de obsolescencia de la misma.

- Se definió la instrumentación requerida para la supervisión y control de las variables, para los cuales se definieron los criterios que justificaron la adquisición.
- Se revisaron los paneles de control y las luces existentes, esta actividad permitió la verificación del estado de operación, como los botones de encendido, apagado y emergencia.

c) En cuanto a la electricidad:

- Se verificó que el sistema eléctrico era apto para la instalación del cableado que transporta las señales analógicas y digitales que viajan a la sala de control.
- Se revisó el espacio disponible para la ubicación de las cajas de conexión, se verificaron las áreas clasificadas y las instalaciones eléctricas existentes y requeridas.

d) En cuanto a los sistemas:

- Se definieron las señales que se llevaron al sistema de control, definiendo los criterios y justificación de selección de cada señal que fue clasificada como: entrada/salida analógica o entrada/salida digital.
- Se definió la arquitectura de la red propuesta para la programación del nuevo sistema de control.

*** Disciplina de instrumentación:**

Aquí se ejecutaron las actividades relacionadas con la instrumentación de las prácticas y se realizaron una serie de propuestas que permitieron la modificación del proceso de la práctica de Balances en Estado No Estacionario tal y como está estructurada para el Laboratorio de Ingeniería Química I, estas modificaciones permitieron establecer el sistema de control.

- Se elaboraron los Diagramas de Flujo de Proceso (DFP) y los Diagramas de Tuberías e Instrumentación de cada una de las prácticas consideradas posibles a automatizar, con la finalidad de facilitar la información mínima necesaria para la posterior instalación de los instrumentos requeridos en el futuro.

- Se realizaron una serie de propuestas sobre las posibles modificaciones del proceso representándolas a través de DFP's, a partir de las cuales fue escogida una de ellas mediante criterios de selección y a dicha propuesta, siendo la más viable se le desarrollo de la Ingeniería de Detalle.

III.1.3 Tercera Fase: Ingeniería de Detalle.

En esta fase se realizaron un conjunto de actividades referente exclusivamente a la práctica de Balances en Estado No Estacionario.

- Se realizaron los cálculos de dimensionamiento de los equipos para la modificación de la práctica actual, que incluyó un tanque con aire un serpentín de calentamiento.
- Se elaboró el Diagrama de Tuberías e Instrumentación de la propuesta seleccionada, lo que permitió establecer los lazos de control de presión, temperatura, nivel y flujo.
- Se realizó una figura del diagrama de ubicación de los instrumentos la cual fue ubicada en el panel de control.
- Se elaboraron listas de especificaciones para los instrumentos, accesorios y equipos, así como también hojas de especificaciones técnicas.
- Se realizaron los planos o diagramas de detalle de instalación mecánica y eléctrica de los instrumentos a colocar.
- Se realizó el modelado del sistema mediante el establecimiento de las ecuaciones matemáticas que rigen el proceso y que a su vez permitieron la obtención de las funciones de transferencia, estas funciones facilitaron la realización de la simulación del mismo a lazo abierto con el uso del programa Simulink®.
- Se establecieron las estrategias de control de presión, temperatura, nivel y flujo de acuerdo al proceso y a las variables involucradas para el óptimo

desempeño del sistema, es decir, se implementaron estrategias como el control en Cascada, Rango dividido, Override, etc.

- Se realizó un estudio referente a la implementación de un control multivariable para la práctica de Balances en Estado no Estacionario y se diseñó la estrategia para este fin.
- Se elaboró la narrativa asociada al Sistema de Control que permitió llevar a cabo la automatización; posteriormente se implementó el algoritmo adecuado.
- Se realizó un estudio técnico-económico en el cual se determinaron los costos totales para la instrumentación de todas las prácticas y la implementación del sistema de control distribuido.

III.1.4 Cuarta Fase: Procura.

Para este proyecto en particular, se realizaron todas las gestiones pertinentes que facilitaron la adquisición de un hardware (PC) que fue suministrado por la Escuela de Química y el software Experion[®] y controlador que fue donado por Honeywell. Así como también se realizaron gestiones para la adquisición del gabinete de conexión y las consolas.

III.1.5 Quinta Fase: Integración y Pruebas del Sistema de Control Distribuido Experion[®].

En esta fase se Integró el Sistema de Control Distribuido y se realizaron las pruebas del mismo, se definieron las necesidades específicas de los equipos (Hardware) y de programación (Software) que requería el Sistema de Control y se elaboró una especificación funcional detallada señalando dichas necesidades. Además se definieron las necesidades que permitieron configurar la base de datos y la programación de aplicación del Sistema de Control.

También se ejecutaron una serie de actividades para cumplir con el objetivo planteado de la siguiente manera.

- Se realizó la implementación del Hardware (PC).
- Se instaló y Configuró el software: inicialmente se instaló el sistema operativo Windows 2000 y el software del sistema Experion[®].
- Se configuró la base de datos: Se especificaron los valores de los parámetros a supervisar y/o controlar.
- Se diseñaron e implementaron los despliegues de operación, para los cuales fue necesario el diseño de un conjunto de librerías, que permitieron el monitoreo de las variables: temperatura, presión, nivel y flujo.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

IV.1 LEVANTAMIENTO DE CAMPO Y DISCIPLINA DE INSTRUMENTACIÓN

En los alcances definidos para el estudio de ingeniería conceptual, se abarcaron actividades, las cuales incluyen el levantamiento de información en el laboratorio y la identificación de cada una de las variables involucradas para su supervisión o control en cada uno de los procesos involucrados en cada práctica, así como la implementación del Sistema de Control para la práctica de Balances en Estado No Estacionario a través del sistema de control *Experion PKS* y el controlador Híbrido *C200* de Honeywell.

IV.1.1 Identificación de equipos susceptibles a automatizar, variables a supervisar y controlar en cada práctica

Para el levantamiento de la información asociada al laboratorio, se realizaron visitas programadas al mismo y se procedió a conocer los procesos involucrados en cada una de las prácticas, para lo cual se consultaron los manuales de los procedimientos experimentales definidos para las mismas.

Para comprender como operan los sistemas a estudiar y definir los instrumentos requeridos para el establecimiento de los lazos de control, se contó con la asesoría del personal técnico del laboratorio y del experto en instrumentación de la empresa Honeywell, lo cual permitió efectuar esta actividad en dos etapas: la primera consistió en observar, anotar y comprender cada paso del proceso, y la segunda en identificar las prácticas susceptibles a automatizar y las variables necesarias a supervisar y controlar así como la instrumentación requerida para el mismo fin.

Una vez comprendido el proceso involucrado en cada una de las prácticas, se clasificaron en tres categorías: Automatizadas, Automatizables y No Automatizables.

Categoría N° 1: Prácticas Automatizadas:

Esta se refiere a aquellas prácticas que poseen instrumentos o dispositivos que permiten el control de las variables que rigen el proceso pero que actualmente no se encuentran operativas (modo automático). A estas prácticas se les realizó un estudio determinando el porque de su inoperatividad. Las prácticas que fueron clasificadas dentro de esta categoría fueron las siguientes:

- Estudio de dos intercambiadores de calor.
- Destilación continua de una mezcla binaria en una columna de separación por etapas.
- Determinación de las pérdidas de presión por fricción en conexiones y tramos de tubería.

Para las prácticas incluidas dentro de esta categoría, específicamente para la referida a la *Destilación continua de una mezcla binaria en una columna de separación por etapas* y para la de *Determinación de las pérdidas por fricción en conexiones y tramos de tuberías*, se realizaron pruebas operando cada una de ellas en modo automático y se comprobó que los dispositivos de control (transmisor, válvula y controlador) se encontraban en buen estado y funcionando correctamente, para ello fue necesario realizar las gestiones para adquirir el manual de operación del Controlador Digitric P de Hartman & Braun, el cual fue facilitado por la empresa ABB. Dicho manual estará disponible para la configuración del mismo para la realización de prácticas de control de procesos en un futuro.

Para la práctica referente al *Estudio de dos Intercambiadores de Calor*, se determinó que la principal razón por la cual no se encontraba operativa se debía a que los instrumentos de campo que fueron instalados en alguna oportunidad habían sido desmontados sin razón aparente, además faltaba la bomba y sus respectivas tuberías,

equipos que no permitieron la puesta en marcha del sistema evitando la realización de las pruebas.

Categoría N° 2: Prácticas Automatizables:

Esta categoría, se refiere a las prácticas que no poseen ningún instrumento que permita el control de las variables y que su estructura física permite la instalación de estos dispositivos de control. Para cada una de ellas, se estudió y analizó el proceso, se determinaron las variables que podrían ser sometidas a control o supervisión según sea el caso, así como también se definió la instrumentación necesaria para el establecimiento de lazos de control en las mismas.

Las prácticas que fueron clasificadas dentro de esta categoría son las siguientes:

- Determinación de caídas de presión, velocidad de inundación y volumen retenido en una torre de relleno.
- Estudio de las características de la filtración a presión constante de una suspensión.
- Calibración de medidores de flujo.
- Determinación de curvas características de bombas centrífugas.
- Destilación diferencial al vacío de una mezcla ternaria.
- Rectificación de una mezcla binaria en una columna de relleno.
- Balances en estado no estacionario.

a) Determinación de caídas de presión, velocidad de inundación y volumen retenido en una torre de relleno.

El objetivo primordial de esta práctica, es el de realizar el análisis fluidodinámico de una columna de relleno, operando con aire y agua.

Una vez analizado el procedimiento experimental y estudiado el proceso que rige la práctica, se determinó que era necesario el control de la presión en la línea de flujo de aire que entra al proceso mediante la manipulación del flujo de aire en dicha línea, utilizando una estrategia de control feedback. Esta estrategia permitirá que la presión se mantenga en un valor constante a lo largo de la experiencia, siendo este un factor determinante en la recolección de la data experimental.

Por otra parte, existe un límite superior de la velocidad del gas para la cual se produce la inundación de la columna debido a la acumulación de líquido o retroceso del líquido en la misma, para evitar que esto ocurra se escogió la estrategia de control override, como se muestra en la *Figura N° 34*, en la cual el transmisor A-LT101 tomará lectura del nivel en la torre, posteriormente se fijará como set point en el controlador A-LIC101 el valor máximo de altura de líquido en la torre, de manera que siempre que la variable de proceso (VP) este por debajo de ese nivel el A-LIC101 enviará una señal al selector de baja A-LS101 y éste dará prioridad al paso de flujo de gas a la torre y cuando la VP exceda este valor el selector enviará una señal a la válvula de control de manera que cierre el paso de flujo de gas a la torre evitando así la inundación.

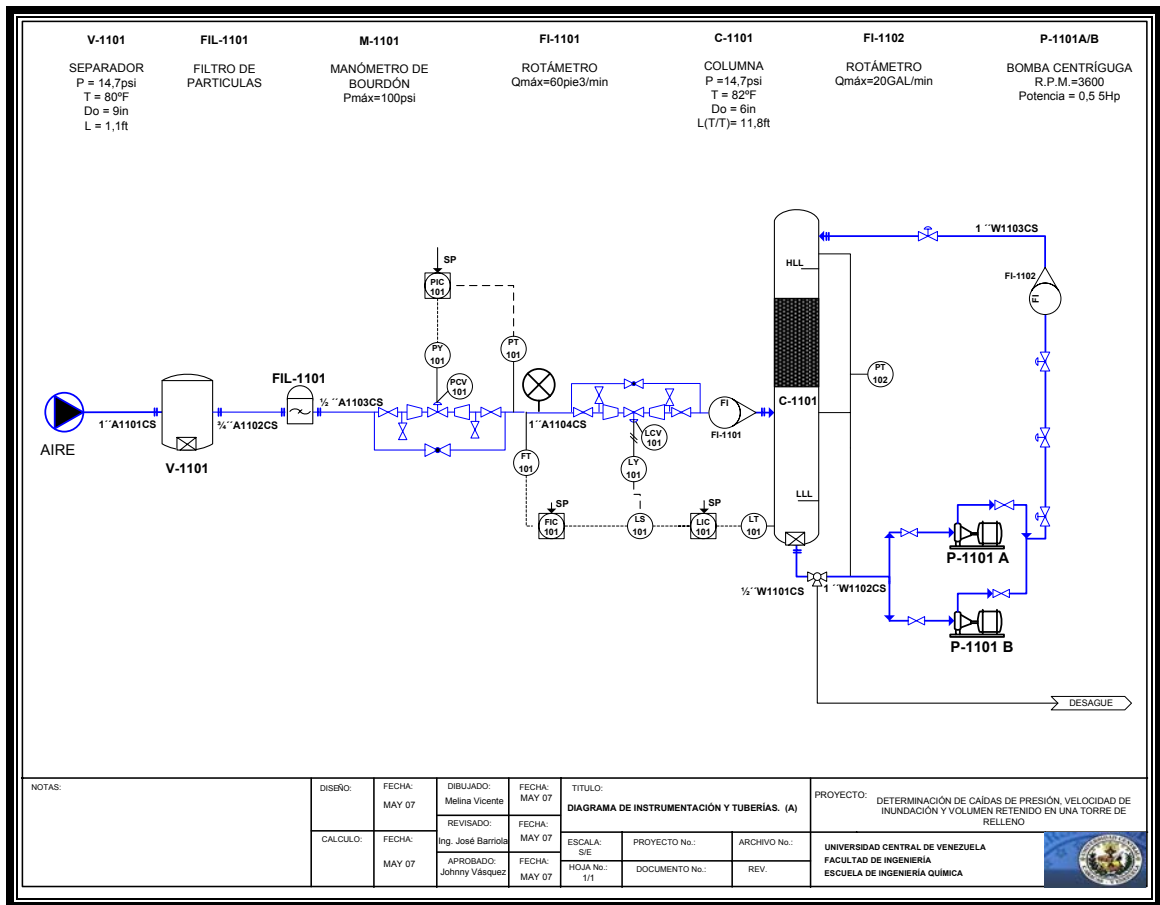


Figura N° 34: Diagrama de Instrumentación y Tubería de la Práctica: Determinación de Caídas de Presión en una Torre de Relleno (Elaboración propia)

En la *Tabla N° 3*, se muestran las variables que se desean controlar, así como la instrumentación requerida para lograr el control del proceso anteriormente descrito.

Tabla N° 3: Variables a controlar e instrumentación requerida para la práctica de Determinación de Caídas de Presión de una Columna de Relleno (Elaboración propia)

Variables a controlar	Instrumentación	Ubicación	¿Por que?
Caudal de operación de gas	Transmisor de presión diferencial de orificio integral y una válvula de control (set point).	Línea de tubería de suministro de aire.	Evitar caídas de presión altas en la torre.
Nivel de la torre	Transmisor diferencial de presión	Fondo de la torre	Evitar inundación

b) Estudio de las características de la filtración a presión constante de una suspensión.

El objetivo principal de esta práctica es estudiar la operación de filtración y el proceso de lavado, así como las aplicaciones industriales de este tipo de equipos. En este tipo de procesos la variable que rige al proceso es la presión y con la regulación de esta en un valor constante se lograra una mayor rapidez de filtrado y la formación de una torta más compacta y fácil de separar de la tela filtrante.

Para el control de presión en el proceso se seleccionó la estrategia de control en cascada (*Véase Apéndice A. Documentos de Ingeniería sección A.13*) este tipo de estrategia permitirá reconocer las posibles perturbaciones en la línea de flujo de entrada al filtro prensa antes de que estas afecten a la variable principal que es la presión En la *Tabla N° 4*, se muestran las variables que se desean controlar, así como la instrumentación requerida para lograr el control del proceso anteriormente descrito.

Tabla N° 4: Variables a controlar e instrumentación requerida para la práctica de Filtración a Presión constante (Elaboración propia)

<i>Variables a Controlar</i>	<i>Instrumentación</i>	<i>Ubicación</i>	<i>¿Por Que?</i>
<i>Presión</i>	Transmisor de presión	Línea de tubería de alimentación al Filtro Prensa.	Rapidez de filtrado
<i>Concentración de la torta</i>	Analizador de concentración (relacionado con partículas).	Se encuentra en la línea de tubería que conecta con el filtro prensa.	Cumplir con las especificaciones de calidad de la suspensión de carbonato de calcio.

c) Calibración de medidores de flujo.

Para determinar la cantidad de flujo que circula a través de una sección transversal, usualmente se determina una diferencia de presión ocasionada por el paso del fluido a través de un área transversal diferente. Para este caso, se determinó que la variable que se desea controlar es la caída de presión y para lograr esto se escogió una estrategia de control en cascada (*Véase Apéndice A. Documentos de Ingeniería sección A.15*), ya que esta permitirá reconocer las posibles perturbaciones en la línea de flujo de entrada al tubo de Venturi antes de que estas afecten a la variable principal que es la presión.

En la *Tabla N° 5*, se muestran las variables que se desean controlar, así como la instrumentación requerida para lograr el control del proceso anteriormente descrito.

Tabla N° 5: Variables a controlar e instrumentación requerida para la práctica de Calibración de Medidores de Flujo (Elaboración propia)

Variable a Controlar	Instrumentación	Ubicación	¿Por que?
<i>Caída de Presión</i>	2 Transmisores de presión diferencial, Válvula de control	Ubicados en la línea de flujo correspondiente al tubo de Venturi y Pitot.	Es la variable principal que rige el proceso.
	1 Actuador multivuelta eléctrico	Línea de Flujo correspondiente al tubo de Venturi y Pitot.	Cantidad de Flujo para introducir a la tubería.
	1 Columna graduada*	Línea de Flujo correspondiente al tubo de Venturi y Pitot.	Lectura de diferencias de altura manométricas

*Alternativa en caso de que los transmisores sean muy costosos.

d) Determinación de curvas características de bombas centrífugas.

En esta práctica se requiere elaborar y estudiar las curvas características de un sistema de bombas centrífugas operando de forma individual, en serie y en paralelo.

En el proceso, según la experiencia que se desee realizar, bien sea que el sistema opere en forma individual, en serie o en paralelo, se debe tener en cuenta que el suministro de agua al sistema proviene de un tanque y el nivel del mismo debe permanecer en un límite determinado para evitar daños en las bombas, para ello se propone una estrategia de control del tipo feedback (*Véase Apéndice A. Documentos de Ingeniería sección A.14*), que garantizará el NPSH requeridos por las bombas controlando el nivel del tanque mediante la manipulación del flujo de entrada al mismo. Adicionalmente, en la práctica constantemente se mide la presión de descarga de cada bomba y para ello en la *Tabla N° 6* se muestra la instrumentación requerida para la supervisión de la misma, así como también las variables sometidas a control.

Tabla N° 6: Variables a controlar e instrumentación requerida para la práctica de Determinación de Curvas Características de Bombas Centrífugas (Elaboración propia).

Variable a Controlar	Instrumentación	Ubicación	¿Por que?
<i>Presión de descarga.</i>	2 Transmisores de presión manométrica.	En la línea de descarga de cada bomba.	Es la variable principal que rige el proceso.
<i>Nivel del tanque.</i>	1 Transmisor de presión o switch ON/OFF.	En la línea de descarga del tanque.	Para garantizar que el nivel del líquido en el tanque este un 75% lleno, para evitar daños en las bombas.
-	2 Válvulas de purga.	En la línea de tubería de descarga de cada bomba.	Mayor precisión en las lecturas manométricas.
-	Válvulas solenoide.	En las líneas de tuberías para todas las configuraciones.	Para realizar los cambios de configuraciones en serie o paralelo.
-	Transductor.	En el panel de control.	Para transformar la corriente en señal de 4-20mA hacia el controlador.

Para las prácticas correspondientes a *Destilación diferencial al vacío de una mezcla ternaria* y *Rectificación de una mezcla binaria en una columna de relleno*, se aplicó el mismo análisis que para las prácticas anteriormente descritas, con la salvedad de que las variables no serán sometidas a control sino a supervisión, esto se debe a que la estructura física de estas prácticas no permite la instalación de instrumentos de control dado que las dimensiones de las tuberías son muy pequeñas y el material es de vidrio. Por estas razones no se realizaron los Diagramas de Instrumentación y Tuberías referentes a estas prácticas puesto que no se puede establecer ningún lazo de control.

e) Destilación diferencial al vacío de una mezcla ternaria

El objetivo primordial de esta práctica, es realizar la destilación discontinua de una mezcla ternaria y analizar la interrelación existente entre las variables: temperatura, porcentaje de vaporizado y composición de destilado.

La temperatura es la principal variable que rige al proceso, esta influye directamente en la facilidad de separación de los tres componentes de la mezcla, la supervisión de esta variable permitirá la recolección de data tomada por la instrumentación seleccionada para su monitoreo.

Para este caso las variables que necesitan supervisión según el procedimiento experimental que rige el proceso con la instrumentación requerida para la misma en esta práctica se muestran en la *Tabla N° 7*.

Tabla N° 7: Variables a supervisar e instrumentación requerida para la práctica de Destilación diferencial al vacío de una mezcla ternaria *(Elaboración propia)*.

Variable a supervisar	Instrumentación	Ubicación	¿Por que?
<i>Temperatura</i>	Termocuplas	Ubicadas en el balón de destilación para la supervisión de temperatura del vapor y líquido en el mismo.	Es la variable principal que rige el proceso.
<i>Caída de Presión</i>	Columna graduada, Fluido Manométrico.	Medición de presión manométrica que existe entre el sistema y el ambiente.	Por seguridad, puesto que se dispone de un manómetro en U, cuyo líquido manométrico es mercurio, siendo este sumamente peligroso.

f) Rectificación de una mezcla binaria en una columna de relleno.

Al igual que la práctica anterior, el proceso esta basado en la separación de una mezcla binaria y la variable que necesita supervisión según el procedimiento experimental es la temperatura, por ser la variable que rige al proceso tal y como se muestra en la *Tabla N° 8*.

Tabla N° 8: Variables a controlar e instrumentación requerida para la práctica de Rectificación de una mezcla binaria en una columna de relleno *(Elaboración propia)*.

Variable a supervisar	Instrumentación	Ubicación	¿Por que?
<i>Temperatura</i>	2 Termocuplas	Ubicadas en el tope de la columna y en el balón del rehervidor.	Es la variable principal que rige el proceso.

Categoría N° 3: No Automatizables:

Esta última categoría, se refiere a aquellas prácticas cuya estructura física no permiten la instalación de los dispositivos de instrumentación para el control de las variables en el proceso. Las prácticas que fueron clasificadas dentro de esta categoría son las siguientes:

- Estudio de la condensación en forma de película y gota.
- Lechos fluidizados. Estudio de sus principales características.

IV.1.2 Identificación del estado actual de las instalaciones y grado de automatización

El Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU), cuenta con el espacio disponible para soportar la infraestructura física del Sistema de Control planteado, el cual incluye un espacio físico destinado a la sala de control, que fue acondicionado para la ubicación y disposición de los equipos considerando la ergonomía de los usuarios brindándole a los estudiantes y profesores un área adecuada para su permanencia en la sala favoreciendo el estudio y el aprendizaje. La infraestructura de la sala está diseñada para permitir una expansión del sistema hasta dos estaciones de operación adicionales, de manera que permitiría el uso por parte de un número mayor de estudiantes simultáneamente.

En cuanto al grado de automatización del L.O.U. se realizó un levantamiento de información en torno a la instrumentación que contienen las prácticas. Del conjunto de prácticas evaluadas solo se encuentran instrumentadas las prácticas indicadas en la *tabla N° 9*, en la cual se presentan los instrumentos de control que están asociados a cada una de ellas:

Tabla N° 9: Prácticas instrumentadas (Elaboración propia).

<i>Prácticas Instrumentadas</i>	<i>Instrumentos de Control Asociados</i>
<i>Destilación continua de una mezcla binaria en una columna de separación por etapas</i>	<ul style="list-style-type: none"> - 1 Transmisor de presión diferencial absoluta. - 1 Transmisor de presión absoluta. - 1 Medidor de flujo. - 2 Válvulas de control. - 1 Manómetro indicador de presión. - Termocuplas incorporadas. - 6 Termopares.
<i>Determinación de curvas características</i>	- 4 Manómetros indicadores de presión
<i>Determinación de las pérdidas de presión por fricción en conexiones y tramos de tubería</i>	<ul style="list-style-type: none"> - 1 Manómetro indicador de presión. - 1 Medidor de temperatura. - 1 Medidor de flujo. - 1 Transmisor de presión diferencial.
<i>Estudio de las características de filtración a presión constante de una suspensión</i>	- 1 Manómetro indicador de presión.
<i>Estudio de dos intercambiadores de calor</i>	<ul style="list-style-type: none"> - 6 Termopares. - 1 Válvula de control convertidora.

Aunado a esto, se elaboró un levantamiento de información de los instrumentos disponibles, existentes en el laboratorio, que pudieran ser instalados a futuro. Dicha lista se anexa en el *Apéndice A. Documentos de Ingeniería sección A.3.*

IV.1.3 Documentos de Ingeniería.

En esta sección, se describirá el procedimiento desarrollado para generar la documentación correspondiente al Plano de planta física del LOU, la sala de control, las listas de los equipos, instrumentos, válvulas, controladores, los Diagramas de Flujo de Proceso y los Diagramas de Tubería e Instrumentación requerida para la realización del proyecto. Para obtener información de los *Documentos de Ingeniería* remítase al *Apéndice A*.

Plano de planta física del L.O.U y sala de control:

Se elaboraron los planos, de la planta física del L.O.U., mediante el uso de un programa de diseño asistido por computadora (*Autocad*), los cuales incluyen la información detallada con la ubicación y dimensiones de la sala de control y las estaciones incluyendo todos los equipos donde se desarrollan las prácticas. El plano para la nueva sala de control sirve de soporte técnico para la ubicación y construcción de nuevos equipos para las futuras prácticas o remodelaciones de las mismas. (*Véase Apéndice A. Documentos de Ingeniería, en la sección A.1 y A.2.*)

Listas de Equipos de Procesos, Instrumentos, Válvulas y Controladores:

Todos los equipos correspondientes a las prácticas automatizables han sido listados incluyendo su identificación, descripción, cantidad y la ubicación del mismo en el Diagrama de Instrumentación y Tubería (DTI). (*Véase: Apéndice A. Documentos de Ingeniería sección A.4.*)

Por otra parte se listan los instrumentos asociados a la supervisión y control de cada práctica automatizable, así como también se listan las válvulas de control requeridas para las mismas, destacando la identificación, descripción, rango del

instrumento, ubicación en el DTI, falla y tipo, según sea el caso. (Véase: Apéndice A. Documentos de Ingeniería sección A.5 y A.6 respectivamente).

De la misma forma, se realizaron las listas de controladores las cuales proveen la información referente a: ubicación del controlador en el DTI, tagname, variable controlada y manipulada, justificación del lazo, tipo de control, acción y set point. (Véase: Apéndice A. Documentos de Ingeniería sección A.7).

Lista de Tuberías y Accesorios:

Se elaboraron las listas correspondientes a tuberías y accesorios, en estas se describe: identificación de la línea, ubicación en el DTI, estado físico del fluido, desplazamiento del fluido entre equipos, diámetro y material de construcción. Estas listas se anexan en el Apéndice A. Documentos de Ingeniería sección A.8 y A.9 respectivamente.

Hojas de Especificaciones:

Se generaron las hojas de especificaciones, en las que se reportan los instrumentos y equipos requeridos por la práctica Balances en Estado No Estacionario. En estas hojas se especifican los equipos detalladamente en cuanto a identificación y dimensionamiento y construcción, así como también sus condiciones de operación y seguridad. Véase: Apéndice A. Documentos de Ingeniería sección A.10.

Diagrama de Flujo de Procesos:

En esta sección se encuentran siete (7) láminas elaboradas según el formato proporcionado por el programa computacional de *Microsoft Office Visio*, que proporciona un entorno familiar de dibujo e incluye una amplia gama de plantillas, formas y herramientas sofisticadas para el desarrollo de los Diagramas de Flujo de

Procesos (DFP's), estos fueron elaborados con la inclusión de algunos criterios del Manual de Ingeniería de Diseño PDVSA conjuntamente con las normas ISA que citan la adecuada preparación de DFP's. En este diagrama se representan todas las corrientes debidamente enumeradas, las condiciones de operación de los equipos y el tagname de cada equipo. Véase en: *Apéndice A. Documentos de Ingeniería desde la sección A.11 hasta la A.16.*

Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI):

Partiendo del Diagrama de Flujo de Proceso se desarrolló el Diagrama de Tuberías e Instrumentación (DTI), empleando la misma herramienta utilizada para el desarrollo de los DFP's. Este diagrama contiene toda la documentación necesaria para realizar el montaje de los equipos e instrumentos. Esta información fue compilada en toda la investigación realizada en la ingeniería básica. Por otra parte, estos diagramas documentan la información concerniente a tuberías e instrumentación, así como también equipos y estrategias de control que permiten controlar las variables que tienen mayor incidencia en los procesos. Se elaboraron cinco (5) DTI's, utilizando las normas ISA y los Manuales de Ingeniería de Diseño de PDVSA sobre Preparación de Diagramas de Proceso e Identificación y Numeración de Tuberías. Véase en: *Apéndice A. Documentos de Ingeniería desde la sección A.11 hasta la A.16.*

Diagramas de instalación y ubicación de Instrumentos:

Se elaboraron dos (2) tipos de diagramas de instrumentos, uno de ellos permite el montaje de los instrumentos de control en el sistema de Balances en Estado No Estacionario y el otro facilita la ubicación de los instrumentos requeridos en la misma representados en el diagrama de flujo, este diagrama deberá ser colocado en el panel de control una vez instalados los instrumentos en el sistema. Véase en el *Apéndice A. Documentos de Ingeniería secciones A.17 y A.18 respectivamente.*

IV.2 REDISEÑO DE LA PRÁCTICA DE BALANCES EN ESTADO NO ESTACIONARIO.

La práctica sobre “Balances en Estado No Estacionario” fue implementada como una práctica para experimentar los principios fundamentales de las variaciones de un llenado y vaciado de tanques y variación de la concentración en función del tiempo tal y como fue descrito en el *Capítulo I en Fundamentos de la Investigación* ver: *Capítulo II, sección de II.1.12 Balances en Estado no Estacionario, pág.34.*

Esta práctica ha sido rediseñada, sin cambiar su objetivo fundamental para la cual fue creada, de tal manera que puede ser considerada como una práctica de Control de Procesos, para ello se desarrollaron tres propuestas que serán explicadas a continuación y representadas en Diagramas de Flujo de Procesos (DFP's), en dichas propuestas se exponen las posibles modificaciones que se les debía realizar al proceso para implementar los cuatro lazos básicos de control a un proceso continuo de tres tanques dispuestos en serie.

Por otra parte cada propuesta se encuentra justificada en cuanto a la viabilidad y posibilidad de ser implementada, realizando a partir de ello la selección de la más apropiada. Basando los criterios de selección de la propuesta en razones económicas, condiciones de seguridad y análisis sobre la dinámica del proceso.

Propuesta N° 1

En esta propuesta, se sugiere implementar los lazos correspondientes a temperatura y presión en el Tanque T₁, véase *Figura N° 35*, aquí se plantea que el suministro de calor sea realice mediante la inyección de vapor por el fondo del tanque en forma de regadera, con lo cual impartirá un alto grado de turbulencia al fluido asegurando el contacto físico entre el vapor y el agua. Para la implementación del

lazo de presión, se plantea la presurización del tanque cerrándolo aprovechando el vapor incorporado.

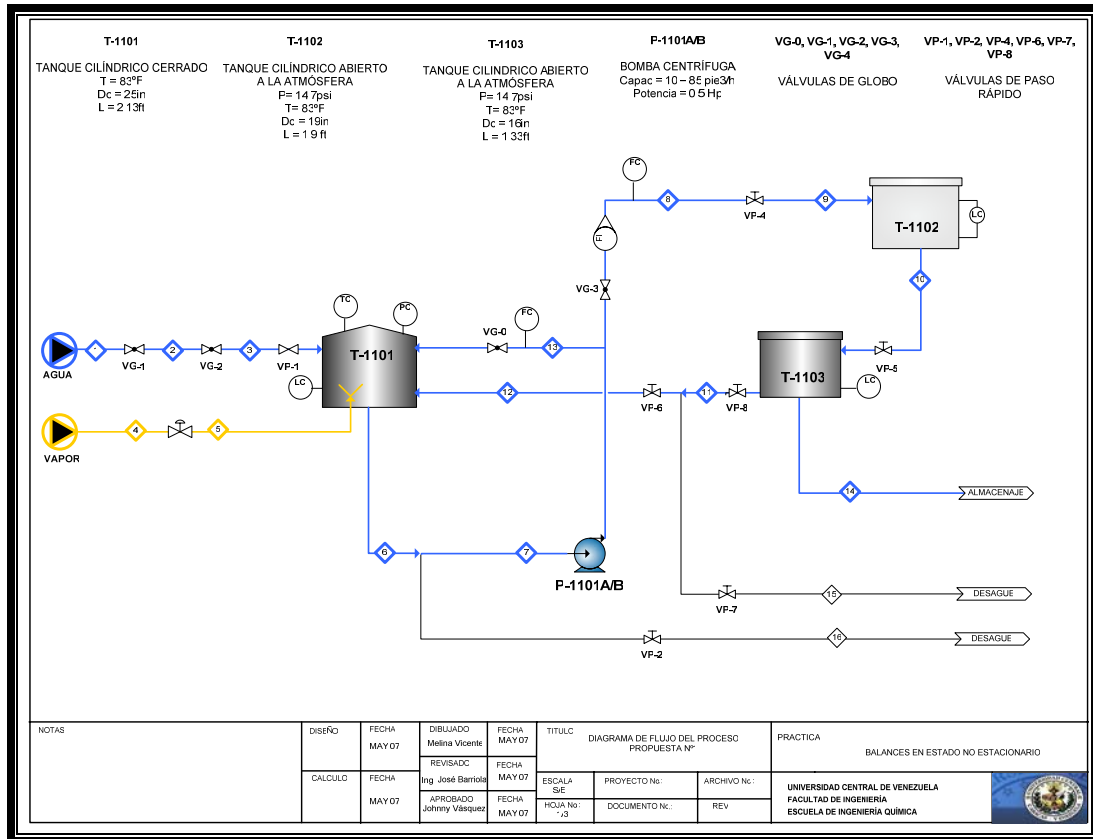


Figura N° 35: Diagrama de Flujo de Proceso para la Propuesta N° 1 (Elaboración propia)

También se propone el control de nivel en los tres tanques y por último con respecto al lazo de control de flujo se propone controlar los flujos correspondientes a: flujo de entrada al Tanque T₂ y flujo de recirculación hacia el Tanque T₁.

Al realizar el análisis del sistema, esta propuesta fue descartada debido a las condiciones de seguridad que deben ser consideradas cuando existe presurización en un tanque, así como también por la dinámica del sistema ya que en la práctica sobre Balances en Estado No Estacionario es irrelevante en cuanto al proceso establecer un control de presión puesto que no se está trabajando con fluidos altamente volátiles a

temperatura ambiente de manera que se amerite un control de presión para liberar el vapor que pudiera acumularse en el tanque.

Por otra parte, como el sistema posee alta capacitancia y esto está relacionado con las dimensiones de los tanques, realmente no amerita un control de presión a la descarga de la bomba para mantener un cabezal fijo, es decir, no se tiene un proceso aguas abajo que se vea afectado por lo que está ocurriendo en el sistema, ya que el sistema tiene como única función el llenado y vaciado de tanques.

Otra de las razones por las cuales no es necesaria la implementación de un lazo de control de presión al sistema, es que el fluido del sistema es agua y no contiene productos o aditivos que a condiciones normales de operación puedan reaccionar llegando a polimerizarlo, sin embargo si se cambiase el agua por un fluido que polimerice a condiciones ambientales es necesario inyectar nitrógeno para controlar la polimerización, entonces en este caso sí se debería establecer un control de presión.

La hipótesis de cambiar el fluido de proceso se descarta ya que esto implica un cambio en los objetivos de la práctica original que se estudia en el programa del Laboratorio de Ingeniería Química I y debe recordarse que estos objetivos deben permanecer invariables.

Propuesta N° 2

En esta propuesta a diferencia de la anterior (véase *Figura N° 36*) los lazos de temperatura y presión se proponen en el Tanque T₃, se sugiere un cambio en la implementación del lazo de temperatura empleando resistencias eléctricas.

En cuanto al lazo de presión, esta vez se propone realizar la presurización del tanque utilizando aire y dependiendo del requerimiento de presión que se desee

establecer, podría ser necesaria la inclusión de una línea de tubería adicional que permita una mayor entrada de flujo hacia el Tanque T₃ a fin de garantizar un nivel de tanque tal que cumpla con este requerimiento. Finalmente los lazos correspondientes al nivel y flujo se mantienen idénticos a la *propuesta N° 1*.

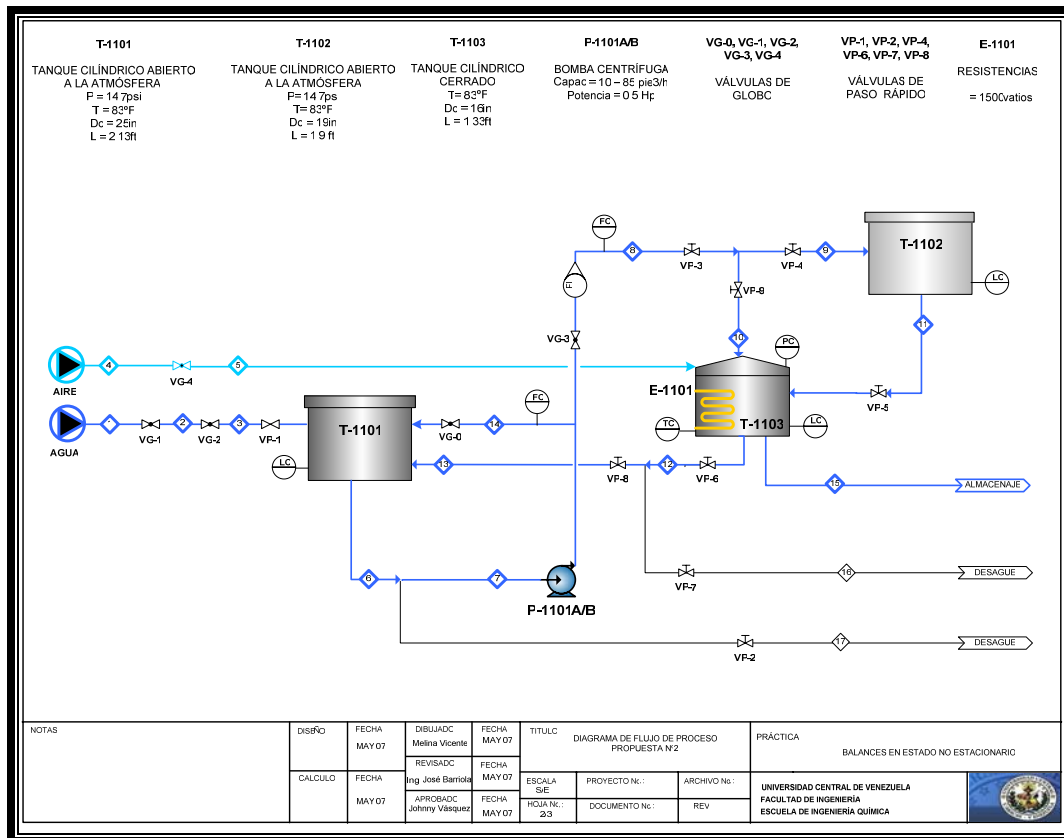


Figura N° 36: Diagrama de Flujo de Proceso para la Propuesta N° 2 (Elaboración propia)

Cabe destacar que esta propuesta se considero no viable debido al limitado control que el lazo de temperatura podría proporcionar ya que las resistencias emplean un control de tipo ON/OFF, lo que implica que su regulación se efectuaría en los límites de la temperatura de operación, es decir; comienza a calentar continuamente desde la temperatura límite baja hasta la temperatura límite alta de operación y una vez que llega al límite alto se apaga hasta que se enfría nuevamente y se repite el ciclo. Este tipo de calentamiento no permite un control de temperatura estable alrededor de un valor deseado.

También podría emplearse un control riguroso en la temperatura para las mismas resistencias y solucionar el problema del control en los límites, pero esto implica desarrollar una estrategia avanzada en cuanto a la incorporación de un mayor número de equipos lo que significa aumentar los costos del sistema propuesto.

Esta propuesta al igual que la *propuesta N° 1*, presenta riesgos en cuanto a la seguridad de los estudiantes relacionada con el control de presión, debido a una mala operación o el incumplimiento de las medidas de seguridad que conlleva operar este tipo de equipos razón por la cual tampoco fue seleccionada.

Propuesta N° 3

En esta propuesta, se plantea la implementación de los lazos de control de temperatura y presión en el tanque T₁, los lazos de nivel se realicen en los tres tanques y finalmente se propone que el lazo de control de flujo corresponda al flujo de entrada al tanque T₂ y el flujo de recirculación hacia el tanque T₁, de la misma forma en la que se realiza el control en las dos propuestas anteriores, véase *Figura N° 37*, el cambio con respecto a las dos propuestas anteriores radica principalmente en:

En cuanto al establecimiento del lazo de control de temperatura, se sugiere el empleo de un serpentín, que utiliza vapor de agua como fluido de calentamiento, facilitando el control de temperatura en el tanque regulado por la cantidad de flujo de vapor alimentado al mismo. Esto permitirá tener un control de temperatura estable para alcanzar el valor deseado, haciendo esta modificación más viable respecto a las anteriores.

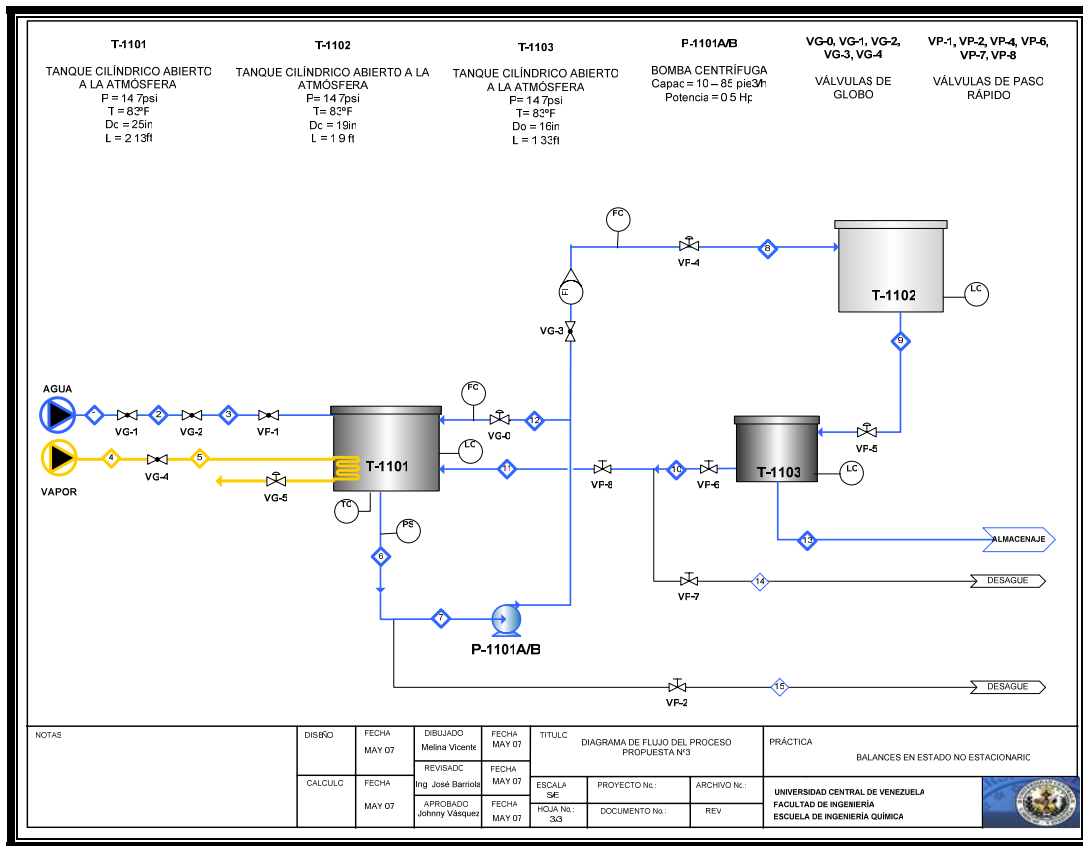


Figura N° 37: Diagrama de Flujo de Proceso para la Propuesta N° 3 (Elaboración propia)

En cuanto al control de presión, se propone establecer un sensor de presión tipo switch en la succión de la bomba, a fin de resguardar la seguridad de la misma debida a un bajo nivel en el Tanque T₁ garantizando así, la implementación del lazo de presión.

Debido a los costos asociados y la seguridad de los equipos y usuarios, se considera que esta propuesta es la más factible de ejecutar razón por la cual fue seleccionada para ser desarrollada en la ingeniería de detalle.

Ahora bien, como se dijo anteriormente de acuerdo a esta selección será desarrollado a continuación el modelaje del sistema de la *propuesta N° 3*, el cual permitirá realizar el análisis del sistema y el establecimiento del sistema de control.

IV.2.1 Modelo Matemático del sistema “Balances en Estado No Estacionario”

El modelo matemático del proceso representa una importante herramienta para el diseño de un modelo de control de cualquier proceso. Dicha herramienta ha permitido simular el proceso de estudio “Balances en Estado No Estacionario” reproduciendo el funcionamiento del sistema natural, y cuyo objetivo es el estudio y el análisis del mismo bajo diferentes condiciones.

Consideraciones y suposiciones empleadas para el desarrollo del modelo:

- Se asume que la temperatura de la corriente de alimentación al Tanque T_1 es aproximadamente de 83 °F, dado que el fluido es agua de servicio.
- Como el fluido que se desplaza por las tuberías es agua líquida, se considera fluido incompresible, es decir, densidad constante en todos los intervalos de tiempo del proceso.
- El vapor proveniente de la caldera se encuentra en estado de saturación.
- Los tanques se encuentran abiertos a la atmósfera.
- Como el fluido es líquido la capacidad calorífica permanece constante sobre todo el rango de temperatura de operación.
- En el sistema no existe ningún tipo de trabajo de eje, ni movimientos ni corrientes generadas en el sistema, por lo tanto $W=0$.
- La energía cinética del sistema energético se desprecia $k=0$ porque se asume que las velocidades de entrada y salida del sistema son muy bajas.
- La energía interna del sistema está dada por $U = PV + H$.
- En el sistema no existe reacción química.
- Dada la existencia del punto de división después de la válvula, se asume que la corriente de recirculación al Tanque T_1 no afecta al proceso, puesto que ésta corriente en el estado estacionario se encuentra totalmente cerrada, cabe destacar que ésta corriente solo permanece abierta para garantizar el caudal mínimo

requerido por la bomba para evitar ser estrangulada, por tanto una vez alcanzado el flujo mínimo de operación de la bomba esta corriente es igual a cero.

Balance de Masa en el Tanque 1

$$E = S + T + A$$

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s + \frac{\partial m}{\partial t}$$

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} = \frac{F_1 + F_3 - F_2}{A_{Tanque1}} \quad (Ec.1)$$

Donde:

F₁: Caudal de la corriente de alimentación al Tanque T₁ en, Gpm.

F₂: Caudal de la corriente de alimentación al Tanque T₂ en, Gpm.

F₃: Caudal de la corriente de recirculación del Tanque T₃ al Tanque T₁ en, Gpm.

h₁: Nivel del Tanque T₁, pie.

A_{Tanque1}: Área del Tanque T₁ en, pies.

Sustituyendo las ecuaciones de las válvulas de control LCV101, LCV103B y LCV102A* en la (Ec.1) se tiene:

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} = \frac{Cv_1vp_1(t)\sqrt{\frac{\Delta P_{LCV101}}{G_f}} - Cv_3vp_3(t)\sqrt{\frac{\Delta P_{LCV102A}}{G_f}} + Cv_5vp_5(t)\sqrt{\frac{\Delta P_{LCV103B}}{G_f}}}{A_{Tanque1}} \quad (Ec.2)$$

Donde:

vp₁: Apertura de la válvula (1), correspondiente a la corriente de alimentación al tanque T₁.

vp₃: Apertura de la válvula (3), correspondiente a la corriente de alimentación al tanque T₂.

vp_5 : Apertura de la válvula (5), correspondiente a la corriente de reciclo del tanque T_3 al tanque T_1 .

ΔP : Caída de presión Psig.

C_v : Coeficiente de la válvula.

G_f : Gravedad específica.

La ecuación (Ec.2) debe ser linealizada para obtener las funciones de transferencia correspondientes.

* Todas los cálculos para el dimensionamiento de las válvulas presentes en el proceso son presentadas en el Apéndice A. Véase la sección de Cálculos tipos. Modelo del sistema Balances en Estado no Estacionario.

Linealizando la ecuación 2 se tiene la ecuación (Ec.3) de primer orden:

$$h_1(s) = \frac{h_3(s)k_0 - vp_3(s)k_1 + vp_5(s)k_2 + vp_1(s)k_3}{\tau_1 s + 1} \quad (Ec.3)$$

De la ecuación (Ec.3) se obtienen las funciones de transferencia:

$$\frac{h_1}{vp_3} = \frac{k_1}{\tau_1 s + 1} \quad (3.a)$$

$$\frac{h_1}{vp_5} = \frac{k_2}{\tau_1 s + 1} \quad (3.b)$$

$$\frac{h_1}{vp_1} = \frac{k_3}{\tau_1 s + 1} \quad (3.c)$$

$$\frac{h_1}{h_3} = \frac{k_0}{\tau_1 s + 1} \quad (3.d)$$

Donde:

$k(1, 1, 2, 3, \dots n)$: representan las ganancias del proceso.

τ_1 : representa la constante de tiempo característica del proceso para el Tanque T₁ en, minutos.

Balance de Energía en el Tanque 1

$$E = S + T + A$$

$$\dot{m}e(u + k + p)_e = \dot{m}s(u + k + p)_s + \frac{\partial E}{\partial t} - Q_{\text{vapor}}$$

$$A_{\text{Tanque1}} h_1 \frac{\partial T_2}{\partial t} = F_b T_b + F_1 T_1 - F_2 T_2 - A_{\text{Tanque1}} T_2 \frac{\partial h_1}{\partial t} - A_{\text{Tanque1}} T_1 \frac{\partial h_1}{\partial t} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

F_b: Caudal de la corriente de recicló al Tanque T₁ en, Gpm.

F₂: Caudal de la corriente de alimentación al Tanque T₂ en, Gpm.

F₁: Caudal de la corriente de alimentación al Tanque T₁ en, Gpm.

h₁: Nivel del Tanque T₁, pie.

T₁: Temperatura de alimentación de la corriente al Tanque T₁, °F.

Incluyendo el punto de división y las ecuaciones de las válvulas LCV102A, LCV103B, TCV101 y LCV101 en la ecuación 4 se tiene:

$$A_{\text{Tanque1}} h_1 \frac{\partial T_2}{\partial t} = 2Cv_1 vp_1(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{LCV101}}}{Gf}} T_1 + Cv_5 vp_5(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{LCV103B}}}{Gf}} T_1 \dots$$

$$\dots - T_2 \left(Cv_1 vp_1(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{LCV101}}}{Gf}} \right) - T_1 \left(Cv_3 vp_3(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{LCV102A}}}{Gf}} \right) + Cv_0 vp_0(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{TCV101}}}{Gf}} \quad (\text{Ec. 5})$$

Linealizando la ecuación 5 se tiene la ecuación (Ec.6) de primer orden:

$$T_2(s) = \frac{T_1 k_{12} - \nu p_1 k_{13} - \nu p_3 k_{14} + \nu p_5 k_{15} + \nu p_0 k_{16} + h_3(s) k_{17} - h_1 k_{18}}{\tau_4 s + 1} \quad (\text{Ec.6})$$

Donde:

T_2 : Temperatura de salida del Tanque T_1 , °F.

τ_4 : representa la constante de tiempo característica del proceso para el Tanque T_1 para la función de transferencia de temperatura en, minutos.

νp_0 : Apertura de la válvula (0), correspondiente a la corriente de vapor del serpentín.

h_2 : Nivel del Tanque T_2 , pie.

h_3 : Nivel del Tanque T_3 , pie.

De la ecuación (Ec.6) se obtienen las funciones de transferencia:

$$\frac{T_2}{\nu p_0} = \frac{k_{16}}{\tau_4 s + 1} \quad (6.a)$$

$$\frac{T_2}{\nu p_1} = \frac{k_{13}}{\tau_4 s + 1} \quad (6.b)$$

$$\frac{T_2}{h_1} = \frac{k_{18}}{\tau_4 s + 1} \quad (6.c)$$

$$\frac{T_2}{\nu p_3} = \frac{k_{14}}{\tau_4 s + 1} \quad (6.d)$$

$$\frac{T_2}{\nu p_5} = \frac{k_{15}}{\tau_4 s + 1} \quad (6.e)$$

$$\frac{T_2}{h_3} = \frac{k_{17}}{\tau_4 s + 1} \quad (6.f)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{k_{12}}{\tau_4 s + 1} \quad (6.g)$$

Balance de Masa en el Tanque 2:

$$E = S + T + A$$

$$\rho F_2 = \rho F_4 + \frac{\partial(V_2 \rho)}{\partial t}$$

$$\frac{\partial h_2}{\partial t} = \frac{F_2 - F_4}{A_{\text{Tanque 2}}} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

F_4 : Caudal de la corriente de salida del Tanque T₂ en, Gpm.

$A_{\text{Tanque 2}}$: Área del Tanque T₂ en, pies.

vp_4 : Apertura de la válvula (4), correspondiente a la corriente de salida del Tanque T₂.

Sustituyendo la ecuación de la válvula *LCV102A* y *LCV102B* se tiene:

$$\frac{\partial h_2}{\partial t} = \frac{Cv_3 vp_3(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{LCV102A}}{Gf}} - Cv_4 vp_4(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{LCV102B}}{Gf}}}{A_{\text{Tanque 2}}} \quad (\text{Ec. 8})$$

Linealizando la ecuación 8 se tiene la ecuación (Ec.9) de primer orden:

$$h_2(s) = \frac{vp_3(s)k_9 - vp_4(s)k_{10} + h_1(s)k_{11}}{\tau_2s + 1} \quad (\text{Ec. 9})$$

De la ecuación (Ec. 9) se obtienen las funciones de transferencia:

$$\frac{h_2}{vp_3} = \frac{k_9}{\tau_2s + 1} \quad (9.a)$$

$$\frac{h_2}{vp_4} = \frac{k_{10}}{\tau_2s + 1} \quad (9.b)$$

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{k_{11}}{\tau_2s + 1} \quad (9.c)$$

Balance de Masa en el Tanque 3:

$$E = S + T + A$$

$$\rho F_4 = \rho F_5 + \rho F_6 + \frac{\partial(V_3\rho)}{\partial t}$$

$$\frac{\partial h_3}{\partial t} = \frac{F_4 - F_3 - F_5}{A_{\text{Tanque } 3}} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

F_5 : Caudal de la corriente de salida del Tanque T₃ en, Gpm.

$A_{\text{Tanque } 3}$: Área del Tanque T₃ en, pies.

Sustituyendo la ecuación de la válvula LCV103B, LCV103A y LCV102B en la (Ec.10) se tiene:

$$\frac{\partial h_3}{\partial t} = \frac{Cv_4 vp_4(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{LCV102B}}{Gf}} - Cv_5 vp_5(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{LCV103B}}{Gf}} - Cv_6 vp_6(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{LCV103A}}{Gf}}}{A_{Tanque3}} \quad (Ec. 11)$$

Donde:

vp_6 : Apertura de la válvula (6), correspondiente a la corriente de salida del Tanque T₃.

Linealizando la ecuación 11 se tiene la ecuación (Ec.12) de primer orden:

$$h_3(s) = \frac{vp_4(s)k_5 - vp_5(s)k_6 - vp_6(s)k_7 + h_2(s)k_8 + h_1(s)k_4}{\tau_3 s + 1} \quad (Ec. 12)$$

De la ecuación (Ec. 12) se obtienen las funciones de transferencia:

$$\frac{h_3}{vp_4} = \frac{k_5}{\tau_3 s + 1} \quad (12.a)$$

$$\frac{h_3}{vp_5} = \frac{k_6}{\tau_3 s + 1} \quad (12.b)$$

$$\frac{h_3}{vp_6} = \frac{k_7}{\tau_3 s + 1} \quad (12.c)$$

$$\frac{h_3}{h_2} = \frac{k_8}{\tau_3 s + 1} \quad (12.d)$$

$$\frac{h_3}{h_1} = \frac{k_4}{\tau_3 s + 1} \quad (12.e)$$

IV.2.2 Diagrama de Bloques del sistema “Balances en Estado No Estacionario”

Del modelado del proceso de Balances en Estado no Estacionario se obtienen las funciones de transferencia, estas facilitan el estudio de la dinámica del sistema, definiendo completamente las características de estado estacionario.

En la *Figura N° 38* se presenta el diagrama de bloques que representa el modelo matemático del proceso de Balances en Estado no Estacionario.

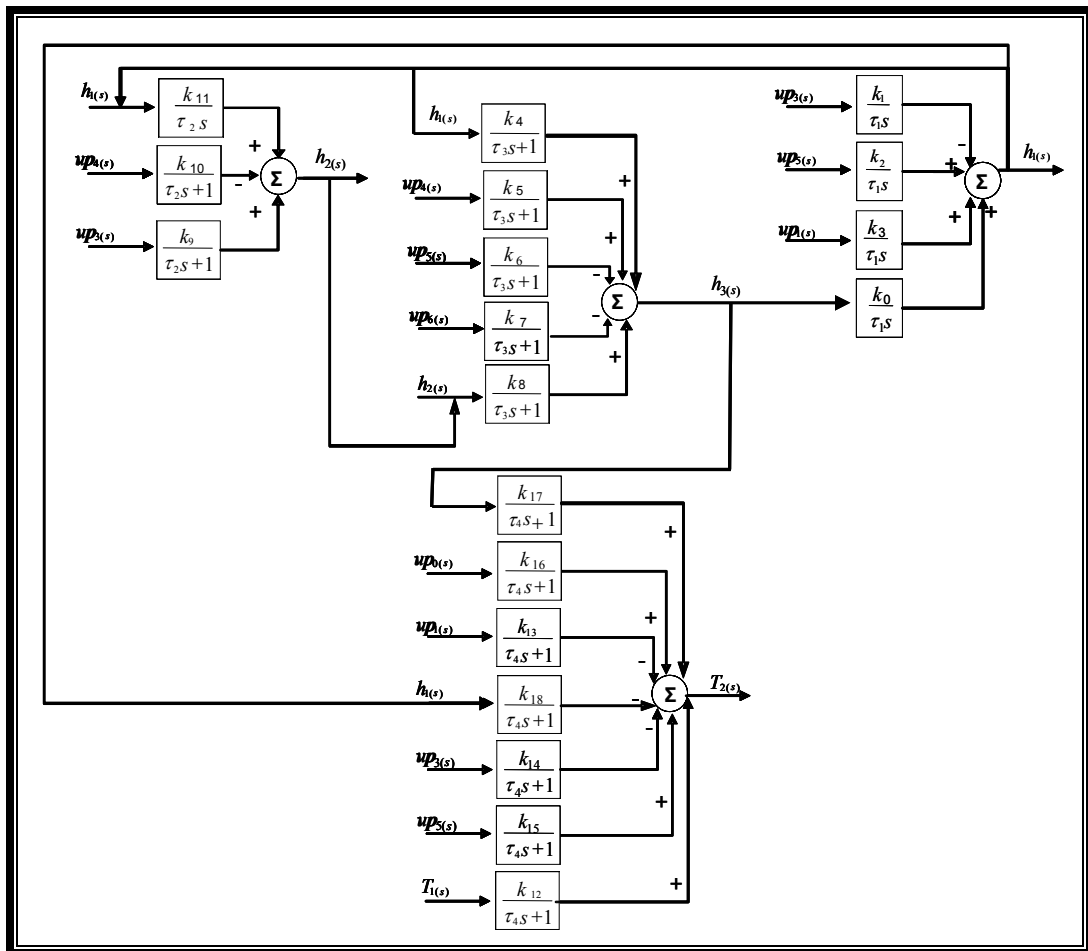


Figura N° 38: Diagrama de Bloques del sistema Balances en Estado No Estacionario (Elaboración propia)

En la *Figura N°38*, se muestra la relación existente entre las variables manipuladas sobre las variables controladas. En ella se muestra que las variables vp_1 , vp_3 , vp_4 , vp_5 correspondientes al flujo de alimentación al Tanque T₁, flujo de alimentación al Tanque T₂, flujo de salida del Tanque T₂ hacia el T₃ y flujo de salida del T₃ hacia el Tanque T₁ respectivamente son las que más afectan a los niveles de los tres tanques.

IV.2.3 Simulación del sistema “Balances en Estado No Estacionario” a lazo abierto con MatLab Simulink

Para la simulación a lazo abierto, se efectuaron los cambios asociados a las posibles perturbaciones que más afectan al sistema, ésta simulación se realizó con el uso del programa computarizado *MatLab Simulink*[®], el cual permitió apreciar la influencia de las perturbaciones del sistema sobre las variables controladas y cuales de ellas lo afectan más.

El análisis realizado con *Simulink*[®] fue elaborado para un estado estacionario del sistema en particular en el cual se desean las siguientes condiciones:

- Nivel del Tanque T₁ igual a 1.6 pies de Altura.
- Nivel del Tanque T₂ igual a 1 pie de Altura.
- Nivel del Tanque T₃ igual a 0,7 pies de Altura.
- Temperatura del Tanque T₁ igual a 100 °F.

Cabe destacar, que los parámetros utilizados correspondientes a la ganancia (k) y tiempo de respuesta (τ), se obtuvieron a partir del modelo matemático, estos parámetros sirvieron como valores de referencia para realizar la simulación a lazo abierto, sin embargo con el uso de estos valores no se reflejaba la respuesta que debería tener el sistema de acuerdo al comportamiento estudiado, por esta razón se realizaron perturbaciones en escalón mediante iteraciones de estos parámetros

logrando obtener una respuesta que reflejara el comportamiento real del sistema. Los parámetros asociados a la ganancia de cada función de transferencia se representan en la *Tabla N°10*.

Tabla N° 10: Parámetros de ganancia y tiempo de respuesta del Proceso (Elaboración propia)

Ganancia	$k_0 = 1 [-]$	$k_1 = 0.6 \text{ pie}$	$k_2 = 1 * 10^{-4} \text{ pie}$
	$k_3 = 2.1 \text{ pies}$	$k_3 = 2.1 \text{ pies}$	$k_4 = 0.01 [-]$
	$k_5 = 0.3 \text{ pie}$	$k_6 = 0.05 \text{ pie}$	$k_7 = 0.5 \text{ pie}$
	$k_8 = 0.7 \text{ pie}$	$k_9 = 1 * 10^{-4}$	$k_{10} = 0.5 \text{ pie}$
	$k_{11} = 1 [-]$	$k_{12} = 3 \text{ }^\circ F$	$k_{13} = 6 \text{ }^\circ F$
	$k_{14} = 10 \text{ }^\circ F$	$k_{15} = 0.006 \text{ }^\circ F/\text{pie}$	$k_{16} = 1 * 10^{-4} [-]$
	$k_{17} = 1 \text{ }^\circ F/\text{pie}$ y $k_{18} = 10 \text{ }^\circ F/\text{pie}$		
Tiempo de Respuesta	$\tau_1 = 30 \text{ min}$	$\tau_2 = 18 \text{ min}$	$\tau_3 = 10 \text{ min}$ $\tau_4 = 25 \text{ min}$

Nota: El programa *Simulink*[®] trabaja con variables de desviación por lo tanto los saltos de perturbación deben ser desviaciones (deltas) de la variable a perturbar.

En la *Figura N° 39*, se muestra el diagrama utilizado para la simulación a lazo abierto, en la cual se ven reflejados bloques asociados a las funciones de transferencia, adicionalmente se muestran las variables manipuladas representadas en colores para la visualización de la interrelación de estas sobre las variables controladas. También se muestra, la simulación realizada en el estado estacionario, correspondientes a los niveles de los tanques y la temperatura, la respuesta del proceso en el estado estacionario es el set point fijado puesto que esta primera simulación se realiza sin perturbaciones en escalón para comprobar que el sistema esta programado adecuadamente.

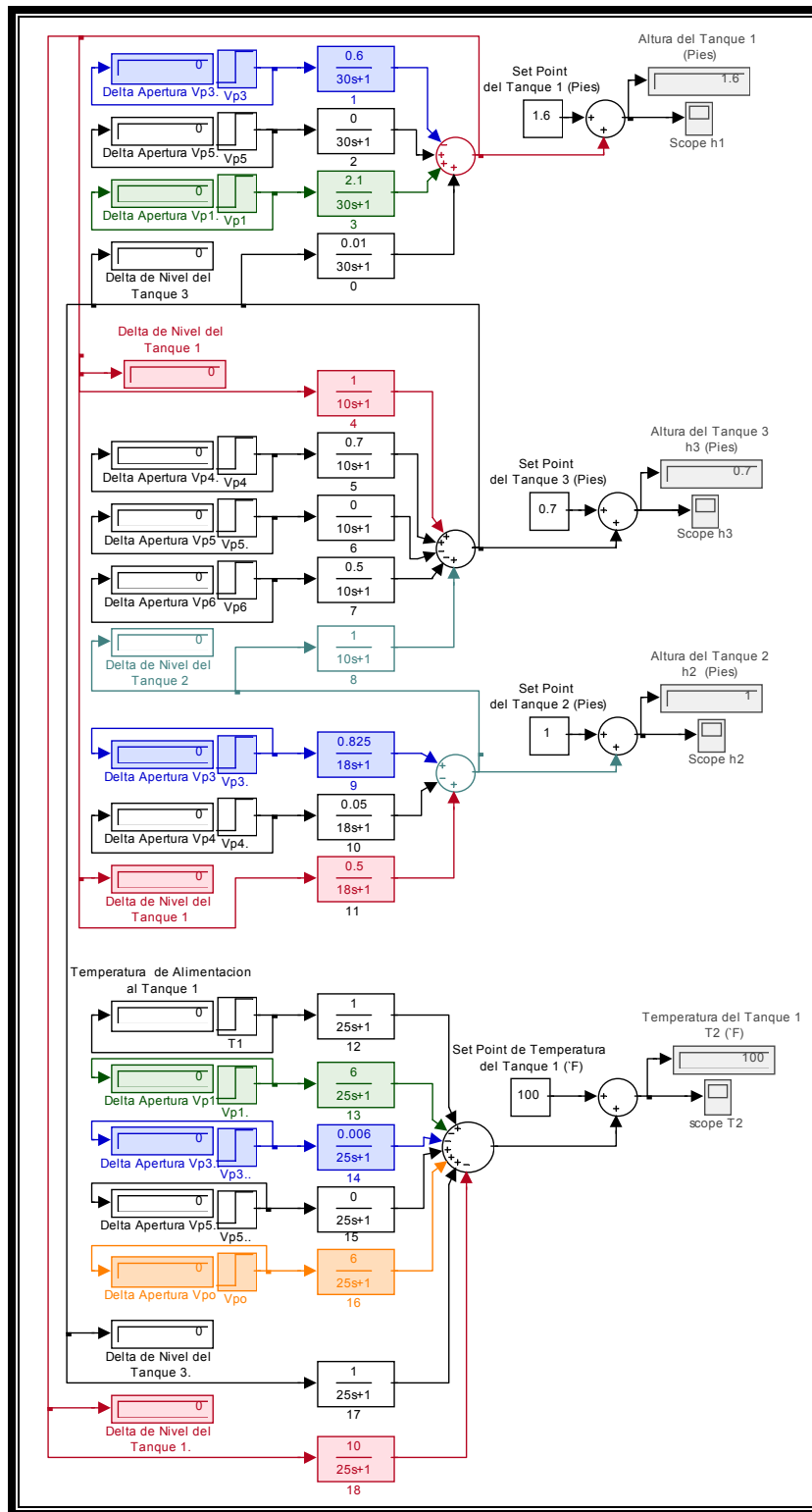


Figura N° 39: Diagrama de Bloques del sistema Balances en Estado No Estacionario para determinados valores de set point (Elaboración propia)

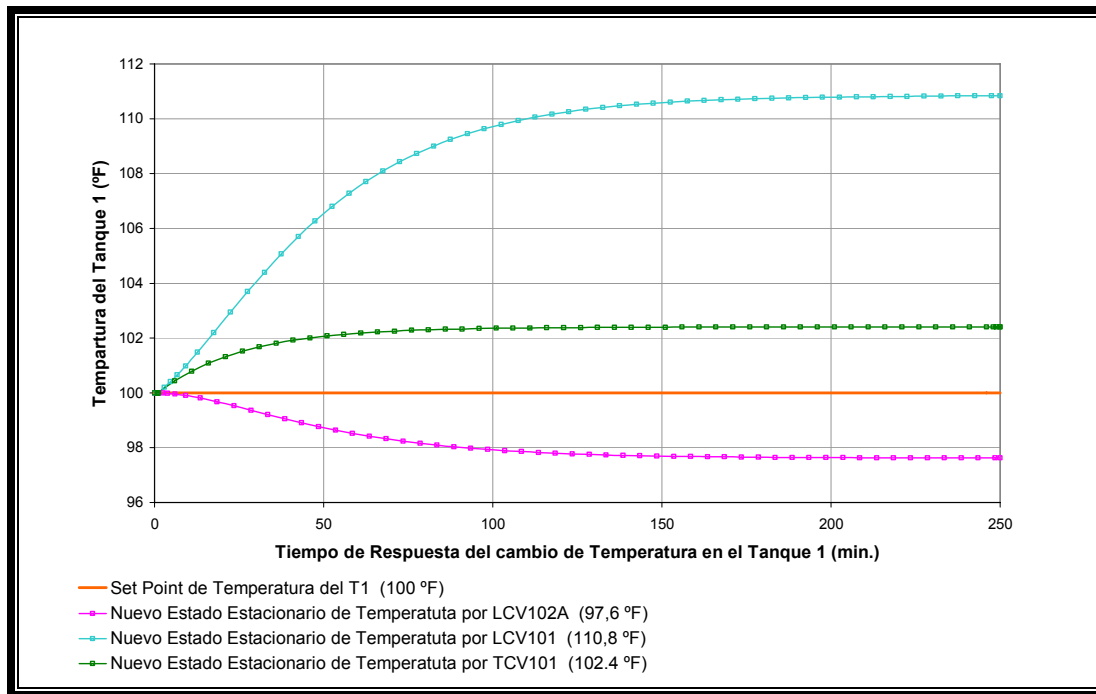
Para la simulación, se realizaron perturbaciones a diferentes variables del proceso como lo son: el flujo de alimentación al Tanque T₁ manipulado por la válvula LCV101, el flujo de vapor manipulado por la válvula TCV101 y el flujo de alimentación al Tanque T₂ manipulado por la válvula LCV102A, estas variables fueron las seleccionadas ya que son las que más afectan al sistema.

Cabe destacar, que los efectos asociados a cada perturbación en escalón se analizaron para cada tanque individualmente para apreciar el efecto ejercido por cada una de ellas sobre la variable controlada. Los deltas de perturbación seleccionados, están basados sobre el porcentaje de apertura de las válvulas, es decir, si el Tanque T₁ tiene un nivel del 70% de su volumen significa que tiene una altura igual 1.6 pies, entonces la válvula LCV101 debe estar abierta un 60% (0.6) para que el Tanque T₁ tenga ese nivel, por lo tanto al realizar una perturbación en esa variable cerrándola hasta un 20% el delta asociado a este cambio será del 40% (0.4). Este mismo análisis se aplicó para las perturbaciones realizadas en el resto de la simulación.

Por otra parte, el tiempo de simulación considerado para la corrida del programa fue de 250 minutos, tiempo suficiente para lograr alcanzar el nuevo estado estacionario de las variables después de realizar la perturbación.

Respuesta del Proceso frente a diversas perturbaciones:

Como consecuencia de perturbaciones efectuadas al sistema mediante un delta del 40% de apertura de las válvulas LCV101, LCV102A y TCV101 correspondientes al flujo de alimentación del Tanque T₁, flujo de salida del Tanque T₁ hacia el Tanque T₂ y flujo de vapor inyectado al serpentín respectivamente, se obtuvo la *Grafica N°3*, en la que se aprecia el cambio en la variable controlada (temperatura) ante las perturbaciones realizadas.



Gráfica N° 3: Temperaturas del Tanque T₁ ante el cambio de Apertura de las Válvulas LCV102A, LCV101 y TCV101 (Elaboración propia)

En la *Gráfica N° 3*, se aprecia que cuando se realiza una disminución del 40% correspondiente a la apertura de la válvula LCV101 (color azul), la temperatura sufrió un aumento alrededor de 10 grados, esto se debe a que al cerrar la válvula que permite el paso de agua al Tanque T₁, disminuye la cantidad de fluido frío que entra al sistema y en consecuencia ocurrirá una disminución del nivel del tanque, lo que ocasiona que para una cantidad de flujo de vapor constante el agua se caliente más rápido y alcance una temperatura mayor.

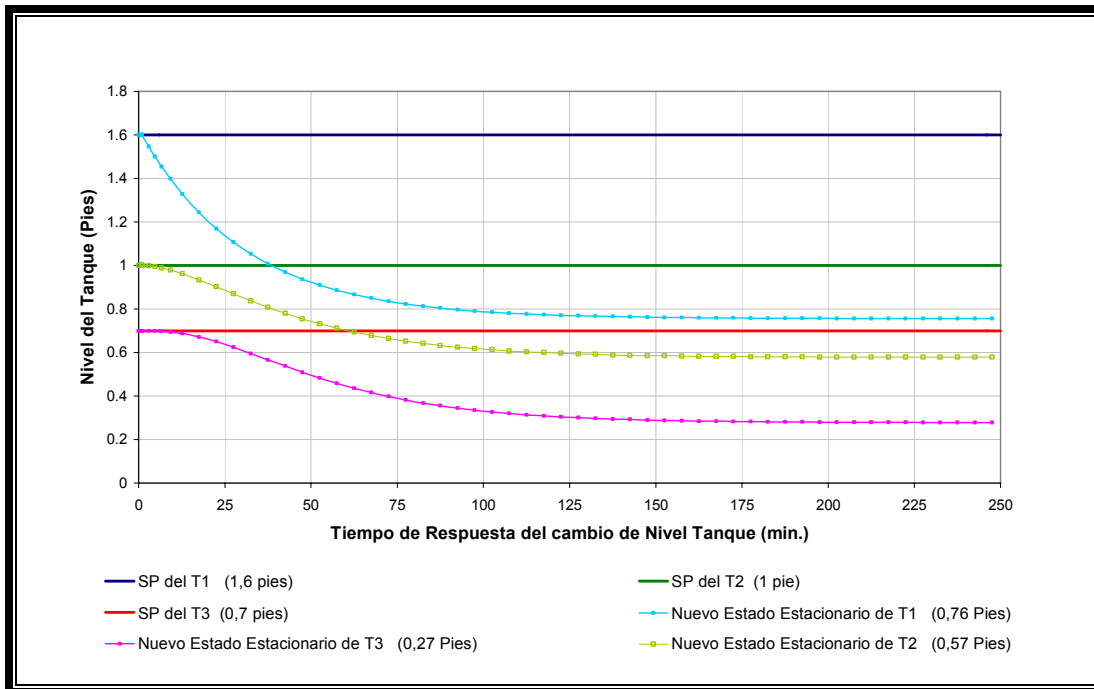
En la *Gráfica N° 3*, la curva representada con color verde, presenta el mismo comportamiento que la curva descrita anteriormente, observándose que para un aumento del 40% en la apertura de la válvula TCV101, aumentará también la Temperatura del Tanque T₁, dado que ahora existe más cantidad de vapor para calentar una tasa constante de alimentación de agua al Tanque T₁.

Por otra parte, en la curva representada en color rosado, se observa que cuando la válvula LCV102A disminuye su apertura, la temperatura del Tanque T_1 decrece, alejándose del set point y esto se debe a la acumulación de agua en el Tanque T_1 , esto esta relacionado con la tasa de flujo de alimentación al Tanque T_1 es constante (ocasionando que exista un nivel mayor de líquido en el tanque), aunado a esto también es constante la tasa de flujo de vapor que no es suficiente para mantener la temperatura del aumento del líquido en el tanque y por ello disminuye la temperatura del agua.

En las tres curvas, se muestra que la respuesta de la temperatura de salida del agua del Tanque T_1 , representa un atraso de primer orden sin tiempo muerto, donde el tiempo de respuesta τ referida a la perturbación asociada al: flujo de entrada al tanque T_1 y al flujo de alimentación al Tanque T_2 es de 160 minutos y para el flujo de vapor es de 80 minutos. De esta forma puede verse que son los flujos de vapor y de alimentación los que más inciden en la temperatura del Tanque T_1 , puesto que presentan mayores valores de ganancia.

De la misma forma, que para el caso anterior, se realizaron pruebas asociadas a saltos en escalón de las variables referidas a la apertura de la válvula correspondiente al flujo de alimentación del Tanque T_1 (LCV101) y a la apertura de la válvula correspondiente al flujo de alimentación al Tanque T_2 (LCV102A), pero esta vez se verá reflejado el efecto de estas variables sobre los niveles de los tres tanques (variables controladas) para una disminución de apertura del 40% para ambas válvulas.

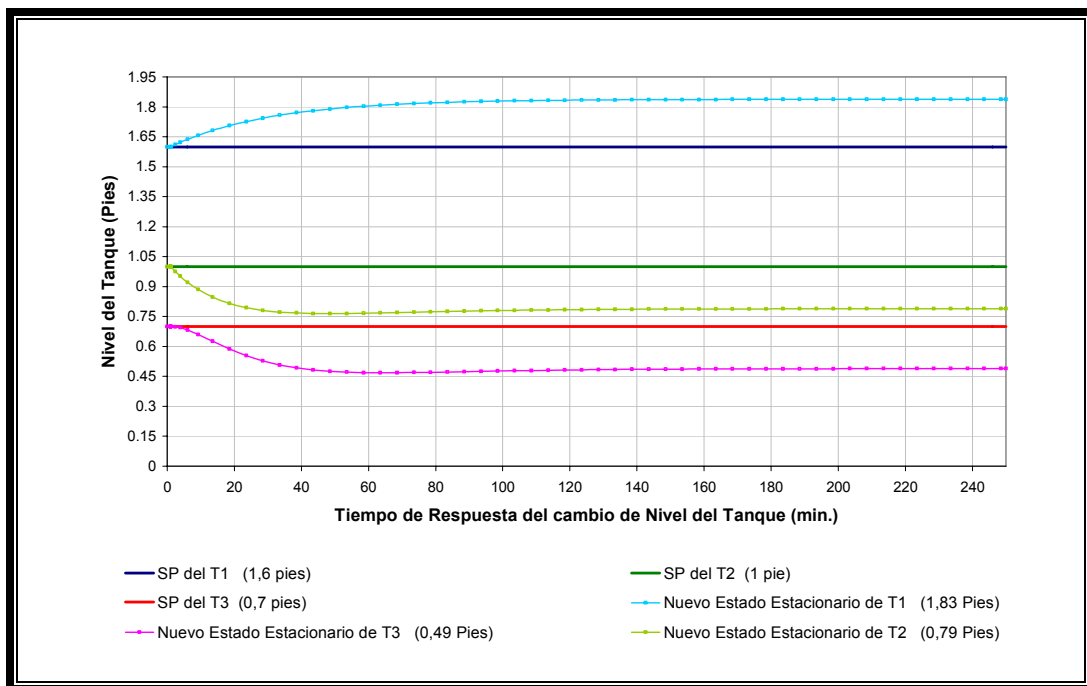
En las Gráficas N° 4 y N° 5, se analizan los cambios del sistema en términos de los niveles de los tres tanques cuando se varían las aperturas de las válvulas LCV101 y LCV102A.



Gráfica N° 4: Variación de los niveles de los tres Tanques ante el cambio de Apertura de la Válvula LCV101 (Elaboración propia).

En la Gráfica N°4, puede notarse como los niveles de los tres Tanques decrecen ante el cierre del 40% de la válvula LCV101 respecto a su set point, este comportamiento es el esperado, puesto que al disminuir la alimentación al proceso ocurre una disminución del flujo que viaja a través de las tuberías, esto es debido a que es la única alimentación del fluido al sistema. También puede observarse que la curva de color azul correspondiente al nivel del Tanque T₁ es la que más se aleja de su set point y esto se debe a que tanto el Tanque T₂ como el Tanque T₃ necesitan de un nivel de llenado del Tanque T₁ lo suficientemente alto para garantizar el llenado de los mismos.

Ahora bien si se observa en la *Gráfica N° 5*, el cambio del sistema frente a la disminución del 40% de la apertura de la válvula LCV102A correspondiente a la alimentación del Tanque T₂ LCV102A, ocurre todo lo contrario a lo explicado anteriormente, es decir, aumenta el nivel del Tanque T₁, lo cual era de esperarse, puesto que se ha cerrado el suministro de fluido al Tanque T₂ y T₃ ocasionando que los niveles de ambos disminuyan.



Gráfica N° 5: Variación de los niveles de los Tanques ante el cambio de Apertura de la Válvula LCV102A (Elaboración propia)

Es importante resaltar la incidencia que tiene la válvula LCV102A frente al Tanque T₁, debido a que puede ocasionar desbordamiento del líquido que contenga o puede generar un vaciado indebido del tanque, esto último representa una condición extrema de seguridad del sistema, debido a que el Tanque T₁ posee en su interior un serpentín de calentamiento. Por esta razón, se recomienda un nivel de llenado del tanque del 75% y controlar el flujo de salida del Tanque T₁ hacia el Tanque T₂ evitando así daños en el serpentín.

IV.2.4 Establecimiento y narrativa de las Estrategias de control

Las estrategias de control se realizaron en base al resguardo de la seguridad de los equipos, de las instalaciones del laboratorio y de los usuarios.

En la Figura N° 40, se muestran las estrategias de control diseñadas para el sistema, representadas en el Diagrama de Instrumentación y Tuberías para la práctica de Balances en Estado No Estacionario.

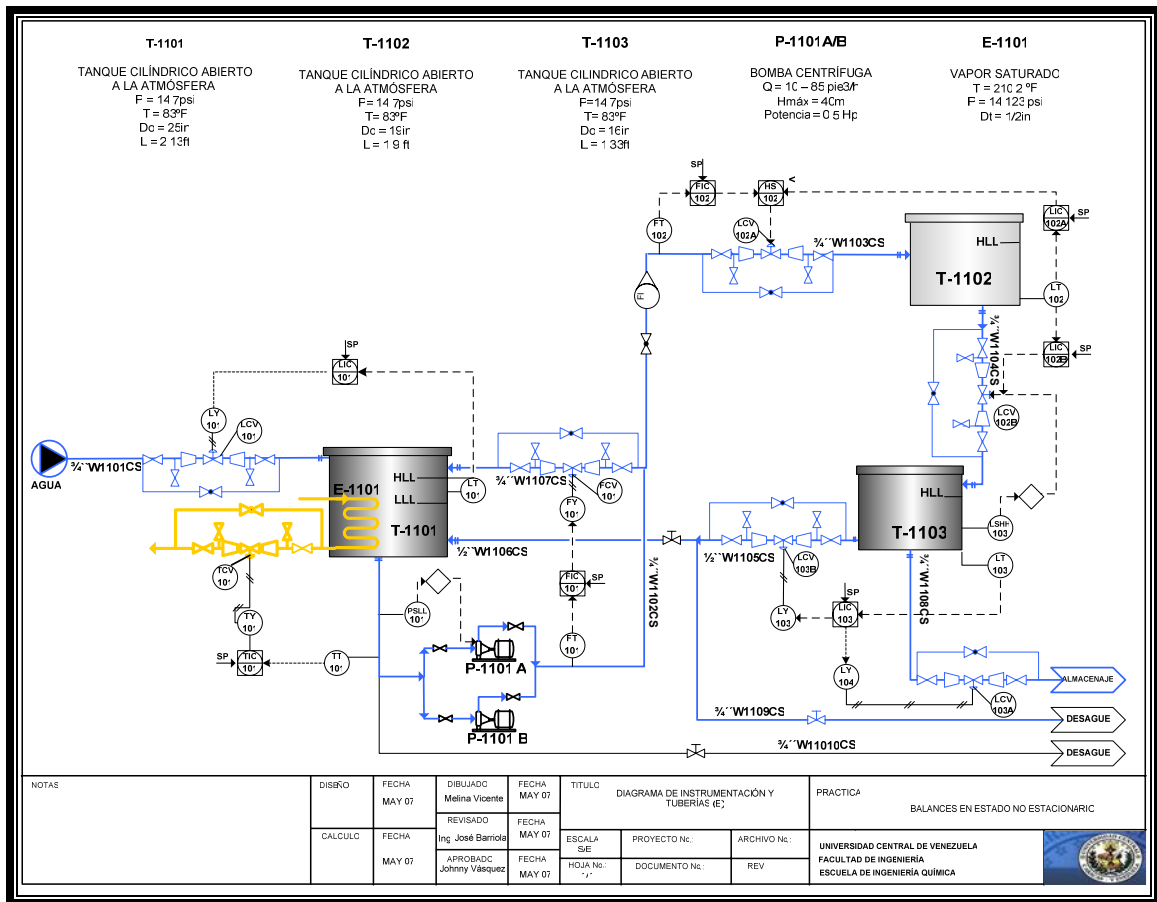


Figura N° 40: Diagrama de Tuberías e Instrumentación de la práctica Balances en Estado No Estacionario (Elaboración propia)

Para el establecimiento del lazo de control de temperatura fue necesaria la inclusión de un serpentín, equipo que permitirá el calentamiento del fluido del Tanque T₁ utilizando vapor saturado. La estrategia utilizada para el control de temperatura, es del tipo feedback, en la cual el controlador TIC101, regulará el flujo de vapor saturado basado en la medición del transmisor TT101 ubicado en la línea de tubería correspondiente a la salida del Tanque T₁ y en el valor prefijado en el controlador TIC101. El valor máximo de temperatura que se podrá alcanzar en el tanque será de 100 °F.

Se implementó un lazo de control de nivel en el Tanque T₁ para evitar el rebose del tanque y además garantizar el NPSH de la bomba. El control de nivel del tanque se realiza mediante la manipulación de la válvula correspondiente a la línea de tubería que suministra el fluido hacia el tanque, es decir, el controlador LIC101 regulará el paso de fluido hacia el Tanque T₁, modulando la válvula LCV101 basado en la medición recibida del transmisor LT101 y a un valor prefijado en el controlador LIC101. Este valor prefijado será el 70% del volumen del Tanque T₁. Cuando el transmisor LT101 alcanza el valor prefijado enviará una señal digital para el arranque de la bomba P-1101.

Adicionalmente para garantizar un sistema de protección en la bomba, se colocó un pressure switch (interruptor de presión) por baja presión en la succión de la misma, este sistema de protección enviará una señal a la bomba para que se apague cuando exista un cambio que altere el NPSH de la bomba.

Una vez puesta en marcha la bomba, se debe garantizar que la cantidad de flujo que se desplaza por la tubería es el mínimo requerido por la bomba, para ello el controlador FIC101 enviará una señal a la válvula LVC101 para que permita el paso de flujo hacia el tanque basado en la medición recibida por el transmisor FT101, la condición normal para la válvula LVC101 es que siempre opere cerrada y comenzará a abrir cuando se experimente una variación de flujo que afecte la bomba.

Cuando se ha alcanzado el flujo mínimo de la bomba, el controlador FIC102 enviará una señal a la válvula LCV102A para que comience a abrir permitiendo el paso del fluido al Tanque T₂, la cantidad de flujo que pasa hacia el Tanque T₂ será prefijada por el usuario esta condición se considera riesgosa, puesto que si el punto de ajuste que se coloca es muy alto y la válvula comienza a abrir se comienza a introducir un flujo tan grande a tal punto que la salida del tanque no se da abasto y se corre el riesgo de rebose del tanque. Para este tipo de condición extrema se planteó una estrategia del tipo override.

Para explicar la estrategia de control override aplicada al Tanque T₂, supongamos que se coloque como punto de ajuste el máximo nivel permitido del tanque en el controlador LIC102A, el selector de baja permitirá el paso de fluido siempre que la variable de proceso (PV) este por debajo de este valor, dándole prioridad al control de flujo FIC102 haciendo que se abra la válvula mientras no se alcance este valor máximo, pero una vez que se alcance este valor máximo el selector dará prioridad al control de nivel cerrando la válvula. Adicionalmente, se tiene el controlador LIC102B el cual enviará una señal para la apertura de la válvula LCV102B la cual permitirá la descarga del fluido del Tanque T₂ al Tanque T₃ evitando así el rebose del Tanque T₂.

Para el control de nivel en el Tanque T₃ se decidió implementar una estrategia de control rango dividido, de manera que el LIC103 enviaría una señal para la apertura de la válvula LCV103A realizando así la descarga del tanque T₃ hacia un tanque de almacenamiento, pero si esta salida no se da abasto suponiendo que la capacidad del tanque de almacenamiento no sea muy grande entonces el controlador LIC103 enviará una señal para la apertura de la válvula LCV103B devolviendo parte del fluido hacia el tanque T₁.

IV.2.5 Estudio de un control multivariable para la práctica de “Balances en Estado No Estacionario”

Para realizar el estudio sobre la posibilidad de implementar un control multivariable, se definieron las variables que se podrían controlar mediante la manipulación de múltiples variables. Las estrategias de control diseñadas para el sistema de tres tanques actúan por separado siguiendo una serie de secuencias y como el sistema opera continuamente, al ocurrir un cambio en una variable, los cambios se ven reflejados en los niveles de los tanques. Aunque el sistema opera de acuerdo a lo definido se podría implementar un control multivariable basado en la Tecnología de Control Predictivo Multivariable Robusto basado en modelos conocido como (RMPCT), que permitirá la sincronización de los lazos de control correspondientes a los niveles de los tres tanques de manera más efectiva.

Lo primero que se debe hacer para establecer un control multivariable es crear una matriz en la cual se vean representados los cambios ocurridos en las variables controladas mediante cambios efectuados en las variables manipuladas tal y como se muestra en la *Figura N° 41*.

CV's	MV's							DV's
	F1	F2	F3	F4	F5	FB	Fv	TF1
LIC101	■	■	■	□	□	□	□	□
LIC102	□	■	□	■	□	□	□	□
LIC103	□	□	■	■	■	□	□	□
FIC101	□	□	□	□	□	■	□	□
TIC101	□	□	□	□	□	□	■	■

Variables Manipuladas (MV's)	Variables Controladas (CV's)	Perturbaciones (DV's)
F1: Flujo de Alimentación al Tanque T1	LIC10: Nivel del Tanque T1	TF: Temperatura de Alimentación al Tanque T1
F2: Flujo de Alimentación al Tanque T2	LIC102: Nivel del Tanque T2	
F3: Flujo de Salida del Tanque T3 hacia el T1	LIC103: Nivel del Tanque T3	
F4: Flujo de Salida del Tanque T2	FIC10: Flujo de recirculación al Tanque T1	
F5: Flujo de Salida del Tanque T3	TIC10: Temperatura del Tanque T1	
FB: Flujo de Recirculación al Tanque T1		

Leyenda
■ Ganancia Negativa
■ Ganancia Positiva

Figura N° 41: Matriz de efecto de las variables manipuladas y perturbaciones sobre las variables controladas (Elaboración propia)

En la *Figura N° 41*, se representa la Matriz asociada al efecto que tienen las variables manipuladas (MV's) y las perturbaciones (DV's) sobre las variables controladas (CV's) para la práctica de Balances en Estado No Estacionario.

También se muestra como afectan las variables manipuladas a las variables controladas, por ejemplo, para un aumento de flujo F_1 el nivel LIC101 también aumenta, esta acción (proporción en la misma dirección) se ve representada por el color verde; en cambio si ocurre un aumento en el flujo F_2 el nivel LIC101 disminuirá esta acción (inversa) se ve representada por el color rojo.

El análisis se realiza de la misma manera reflejando el efecto de cada variable manipulada y cada perturbación sobre cada variable controlada. Los cuadros en blanco representan que no existe efecto de la variable manipulada sobre la variable controlada.

Una vez obtenida la Matriz, se deben realizar las pruebas tipo escalón, para obtener el modelo que representa el cambio que ocurre en cada variable controlada ante cambios en cada una de las variables manipuladas, estos modelos serán determinados a través del paquete *Profit Design Studio* que serán implementados en el *RMPCT*. El siguiente paso que se debe realizar es especificar el rango de los niveles del proceso. Luego se sintoniza el controlador pero esta sintonía esta referida a la velocidad de cambio del controlador, es decir, que tan rápido quiero que ocurra un cambio; también se refiere a la rata de cambio, es decir, si se realiza un cambio en la variable controlada correspondiente al nivel de 50% al 70% pero a la variable manipulada se le coloca una restricción en la que ella puede variar en un 1% cada vez que se ejecute el controlador y si el controlador se ejecuta cada minuto entonces cada minuto el nivel cambiara en 1%.

Una forma de ejemplificar lo que haría un control multivariable en el proceso de la Práctica de Balances en Estado No Estacionario se muestra en la *Figura N° 42*,

en ella se aprecia el bloque correspondiente al RMPCT el cual representa el control maestro y los bloques, LIC101, LIC102 y LIC103 corresponderán a los controladores esclavos. EL RMPCT escribirá el Set Point del flujo F_1 (variable manipulada) dentro de un rango delimitado, al cambiar el flujo cambia la OP (abriendo o cerrando la válvula) esto se verá reflejado en el nivel del Tanque T_1 asociado a la PV del nivel LIC101, este cambio en la PV será notado por el RMPCT el cual tomará acciones correctivas; de la misma forma realizará cambios en los set point's de cada variable manipulada del proceso (siempre dentro del rango preestablecido) y tomará acciones correctivas de acuerdo a las variables que más afecten a las variables controladas del proceso (niveles de los tanques).

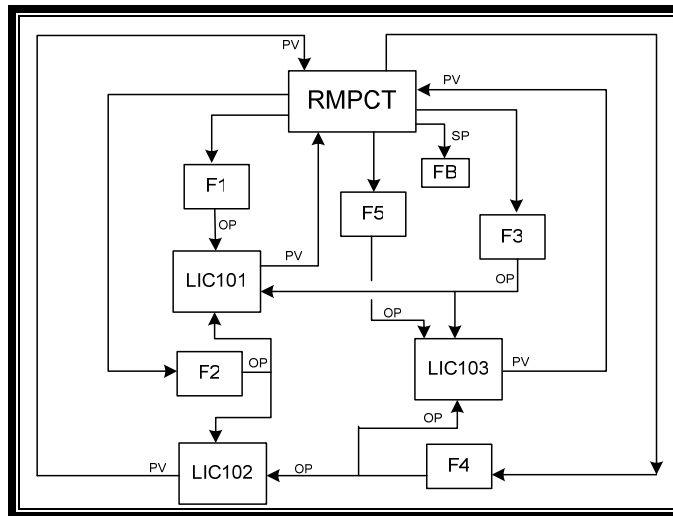


Figura N° 42: Estrategia para el control Multivariable de la práctica
Balances en Estado No Estacionario (Elaboración propia)

La implementación del control multivariable al proceso, tiene como objetivo mejorar el desempeño del sistema que puede no llegar a lograrse con el uso de estrategias diseñadas específicamente para el control de un lazo individual, debido a la interacción existente entre estos lazos; el RMPCT hará que el desempeño global del sistema sea el más óptimo de acuerdo a los límites preestablecidos en cuanto al control de los niveles de los tres tanques simultáneamente.

IV.3 PROCURA, INTEGRACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO EXPERION®

IV.3.1 Acondicionamiento de la sala de control y Arquitectura de la red

Para el acondicionamiento de la sala de control se realizaron trabajos de reparación, los cuales consistieron en una serie de actividades descritas a continuación:

a) Reparación y Mantenimiento:

- En cuanto a las paredes: se realizaron trabajos de recuperación de las paredes de la sala mediante el raspado y frisado para el posterior pintado de la misma.
- En cuanto a la iluminación y la electricidad: se realizaron los cambios del sistema de iluminación, reparando aquellos puntos donde las lámparas no servían y reemplazando los bombillos dañados por bombillos nuevos. También fueron chequeados los puntos eléctricos de la sala reparando los interruptores de luz.

b) Limpieza y Reorganización:

- Se limpiaron las instalaciones de la sala y se reorganizaron los muebles existentes en la misma a fin de aprovechar al máximo el espacio disponible con la intención de favorecer la ubicación de las consolas, computadoras y gabinetes de conexión que serían instalados posteriormente.

c) Diseño, Ubicación y Traslado:

- Para el diseño de la sala fueron consideradas las dimensiones del espacio físico de la misma, de los muebles y de los gabinetes existentes, las dimensiones de la

sala permitieron la incorporación, diseño y ubicación de dos consolas de la marca *Spectro-Data® Vision*, destinadas a la disposición de las computadoras y los procesadores. También fueron considerados para su diseño las dimensiones y ubicación del gabinete de conexión en el cual reposa el controlador híbrido *C200*, el cual está conectado al servidor.

- Consolas: Fueron diseñadas según la ergonomía, necesidades y finalidades básicas de los usuarios para manejar el sistema de control *Experion PKS*.
- Traslado de los equipos: se realizaron las gestiones pertinentes para el traslado de las consolas, gabinetes de conexión y procesadores desde Honeywell de Venezuela hasta las instalaciones de la sala de control en el Laboratorio de Operaciones Unitarias dentro de la Universidad Central de Venezuela.

Arquitectura de la Red:

El Sistema *Experion PKS*, es un sistema de control abierto que integra la interfases humano-máquina, procesadores de control, periféricos, dispositivos de comunicación, redes, software, instrumentos de campo, etc., y así mismo automatiza y provee herramientas de software para la operación del L.O.U.

La arquitectura del sistema de red propuesto incluye en forma general los siguientes equipos (véase *Figura N° 43*):

- Sistema *Experion PKS Server Versión 301.1*.
- Estaciones de Operación *Experion PKS*.
- Controlador de Procesos *C200*.
- Infraestructura del Sistema (Redes)

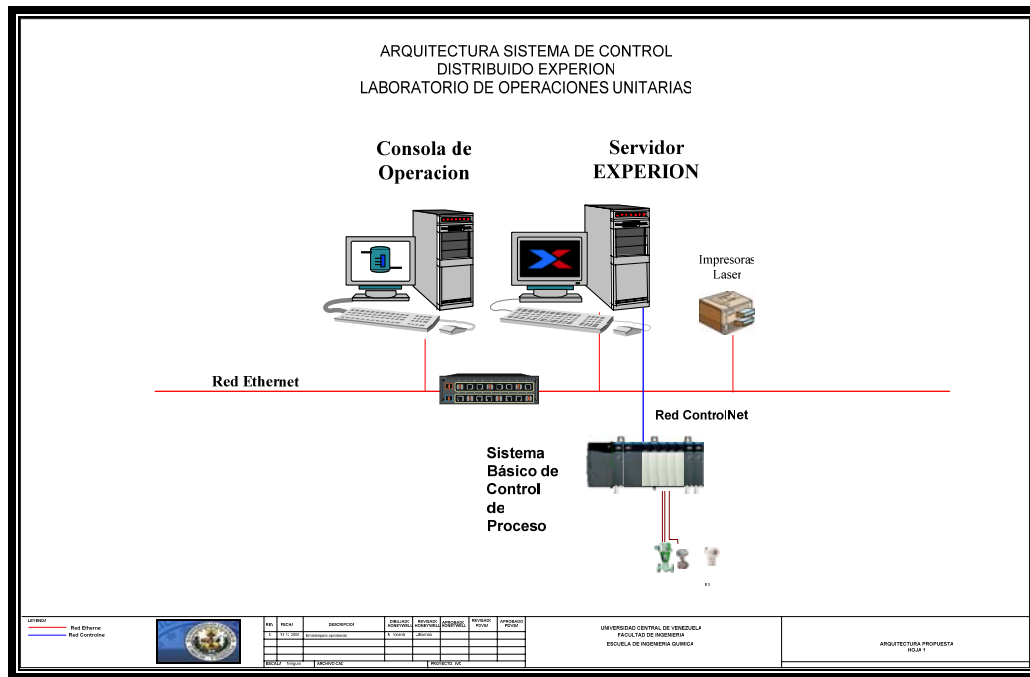


Figura N° 43: Arquitectura de la Red Propuesta (Elaboración propia)

1. Sistema de Control Honeywell – Experion PKS:

(1.a) **Experion PKS Server:** El “Servidor” Experion PKS se compone de un computador *X Tech* con procesador Pentium 4 con alto rendimiento para soportar la operación del Sistema.

(1.b) **Controlador C200 con I/O Local:** Según las especificaciones, Honeywell suministró un controlador para cubrir los requerimientos de la práctica Balances en Estado no Estacionario en el LOU. El equipo es un *Controlador Híbrido C200*, conectado a la red supervisora Controlnet, conformado por módulos I/O no redundantes. El controlador C200 y los IOM’s asociados están instalados en un gabinete de conexión ubicado en la sala de control del LOU. El Controlador C200 utiliza un gabinete Rittal, contando con una fuente de poder de 110VAC.

La arquitectura del *C200* consiste básicamente de: Procesador, módulos de comunicación Controlnet y módulos de entrada/salida (I/OM).

(1.c) Red Ethernet: El sistema de control *Experion PKS* implementado, hace el uso extensivo de la red Ethernet. Esta red, facilitó la infraestructura necesaria para establecer una conexión robusta y confiable con los dispositivos de control de proceso abiertos y adicionalmente suministrar enlaces seguros con la red administrativa.

Por otra parte contiene un equipo de conexión denominado *Hub Compaq Neteligent con 8 puertos 10BaseT-TX* para la red Ethernet, el cual se encarga de establecer la comunicación entre cada uno de los dispositivos conectados a la red.

(1.d) Estaciones de Operación: En la Sala de Control serán ubicadas unas consolas de operación. El Servidor *experion* también podrá ser utilizado como consola de operación. Cada monitor podrá mostrar los gráficos de operación, sumarios de alarma, despliegues de grupo, nivel del sistema, etc. Cada Estación se proveerá con un ratón, teclado tipo *QWERTY/IKB* y unidad de *CDRW*.

IV.3.2 Gabinete de Conexión

Para la conexión de los instrumentos de campo con el Sistema de Control Distribuido Experion PKS, se diseñó un gabinete que permitiera el cableado de las señales digitales y analógicas que se requieren desde la estación (práctica) hasta la sala de control. El gabinete de conexiones, fue construido con ruedas de manera que pudiese ser trasladado desde la sala de control hacia cada estación (prácticas) del laboratorio para la recolección de la data de campo mediante un conector que transmite las señales de la estación que serán procesadas en el controlador C200 y configuradas en el *Experion PKS*, tal y como se muestra en la *Figura N° 44*.

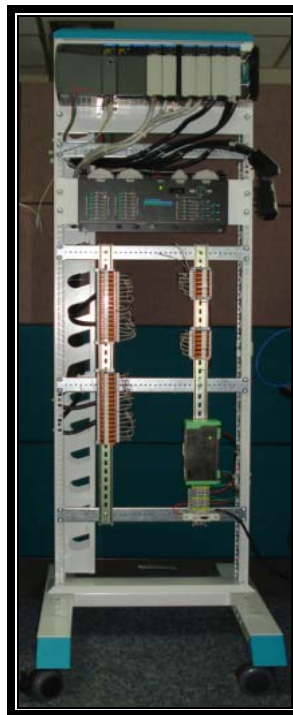


Figura N° 44: Gabinete de Conexión (Elaboración propia)

También, fue elaborado para operar en tres diferentes estados (*Ver Figura N° 45*): uno empleando la funcionalidad que permite el controlador *Híbrido C200* para simulaciones de procesos a través del *Sistema de Control Distribuido*

Experion PKS, dos utilizando el panel de simulación conectado al controlador *Híbrido C200* que a través de switches permiten recrear señales analógicas y digitales en el *Sistema de Control Distribuido Experion PKS* simulando data de campo y tres utilizando las borneras que permiten recibir las señales del campo al controlador *Híbrido C200*.

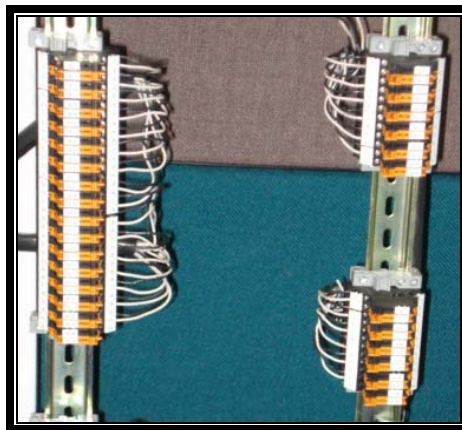


Figura N° 45: Controlador instalado en el Gabinete, Panel de Simulación de señales y Borneras
(Elaboración propia)

IV.3.3 Características del Hardware y Software

En cuanto al Hardware del sistema Honeywell Experion PKS:

Los componentes básicos del *Experion PKS* implementado, en cuanto al hardware son:

1. En cuanto al Sistema Experion PKS:

- Controlador Híbrido de Procesos para proceso integrados y discretos (C200).
- Control Supervisor basado en PC.
- Servidor Advanced Performance de Experion PKS.
- Experion PKS Interfase Hombre Máquina (HMI).
- Experion PKS Software.
- Redes de Control de Proceso.
- Sistema de Simulación del Proceso.

2. En cuanto al Gabinete de Conexión:

- Controlador Híbrido C200 instalado.
- Panel de simulación incluido.
- Borneras de conexión.
- Fuente de voltaje (24VDC).

Características del hardware:

Para el Servidor: Características del hardware correspondiente al Sistema de Control implementado en la plataforma de la computadora a fin de correr los componentes del *Servidor* los cuales se muestran en la *Tabla N° 11*.

Tabla N° 11: Características del Servidor. (Elaboración propia)

<i>Configuración de la Computadora</i>	<i>Características Mínimas</i>
<i>Procesador</i>	Pentium IV
<i>Memoria RAM</i>	2 GB.
<i>Video Resolución</i>	1024 x 768, 65K colores
<i>Disco Duro</i>	80 GB
<i>Sistema Operativo</i>	Windows 2003 Server SP1 (32-bit)

Para la Consola: Características del hardware que se instaló en la plataforma del procesador a fin de correr los componentes de la *Estación Experion* los cuales son reportados en la *Tabla N° 12*.

Tabla N° 12: Características de la Consola (Elaboración propia)

<i>Configuración de la Computadora</i>	<i>Características Mínimas</i>
<i>Procesador</i>	2.0 GHz Pentium IV
<i>Memoria RAM</i>	512 MB
<i>Video Memoria RAM</i>	32 MB
<i>Video Resolución</i>	1024 x 768 or 1280 x 1024 (standard) 65K colors
<i>Red</i>	100 Mbps Ethernet o FTE
<i>Disco Duro</i>	20 GB
<i>Sistema Operativo</i>	Windows XP SP2 Professional

IV.3.4 Implementación, Instalación y Configuración del Hardware y Software.

Para la integración del Sistema de Control Distribuido, se instaló el Hardware (PC) conectando la red de cables para la conexión entre la computadora y el gabinete que incluye al controlador *C200* y el panel de simulación de señales.

Una vez realizada la conexión de los equipos (hardware), se procedió a la instalación y configuración del Software *Experion PKS*[®], como primera parte de la instalación se introdujeron los CD's correspondientes a las licencias de Microsoft[®]

Windows® Server 2003 y el Software *Experion PKS Version 301.1*, posteriormente se siguieron las instrucciones de programación de instalación de ambas licencias hasta completar la descarga de las mismas.

La herramienta del Experion PKS para el diseño de las estrategias de control, es el *Control Builder*, para poder usar esta herramienta se configuró una clave de acceso al sistema, posteriormente se procedió a la configuración del hardware y los módulos de entrada y salida tanto analógicas como digitales del controlador *C200*. El modo de acceso al *Control Builder* se describe de la siguiente manera y se muestra en la *Figura N° 46*:

Modo de Acceso al Control Builder:

1. Click en *Configuration Studio*.
2. Click en *Servers*
3. Click en *SERVER_106*
4. Click en *Control Strategy*
5. Click en *Configure process control strategies*.

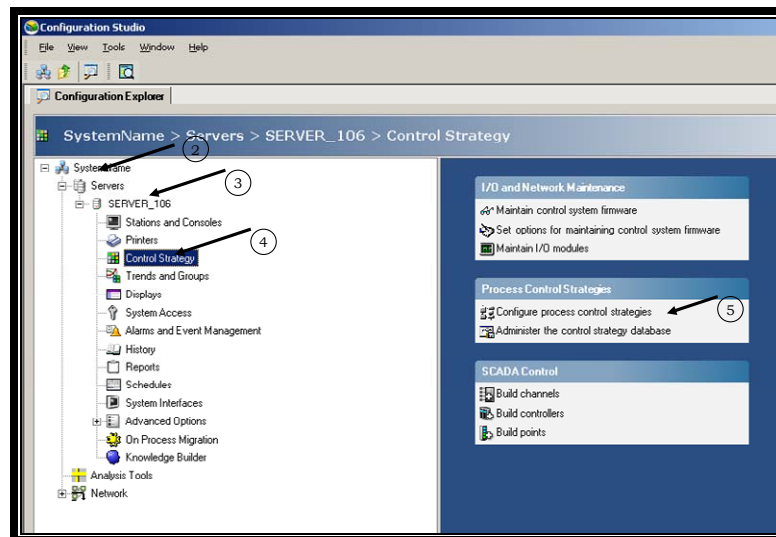


Figura N° 46: Modo de Acceso al Control Builder (Elaboración propia)

Para la Configuración del Hardware (C200) se creó un módulo del Procesador CM200, como se muestra en la *Figura N° 47*.

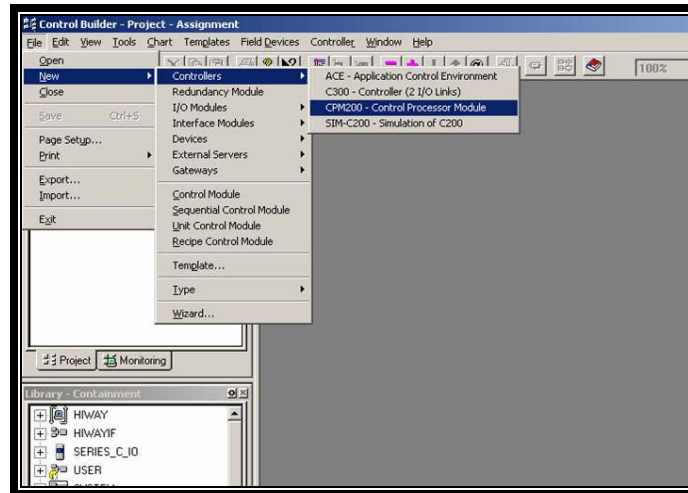


Figura N° 47: Creación del Módulo del Procesador de Control C200 (Elaboración propia)

Posteriormente, se introdujeron los datos referentes al Nombre, Tipo de Conexión (ControlNet o Ethernet), Driver Name, Dirección de Conexión del Servidor y el número de Slot correspondiente al primer módulo del chasis del C200, tal y como se muestra en la *Figura N° 48*.

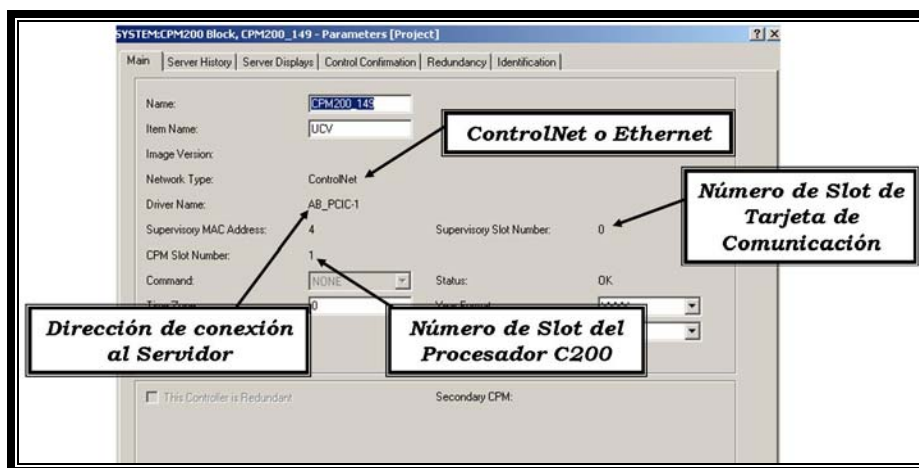


Figura N° 48: Caracterización del Módulo del Procesador de Control C200 (Elaboración propia)

Luego se procedió con la configuración de los Módulos de señales de Entrada/Salida (analógicas y digitales), siguiendo los pasos que se muestran en la *Figura N° 49*.

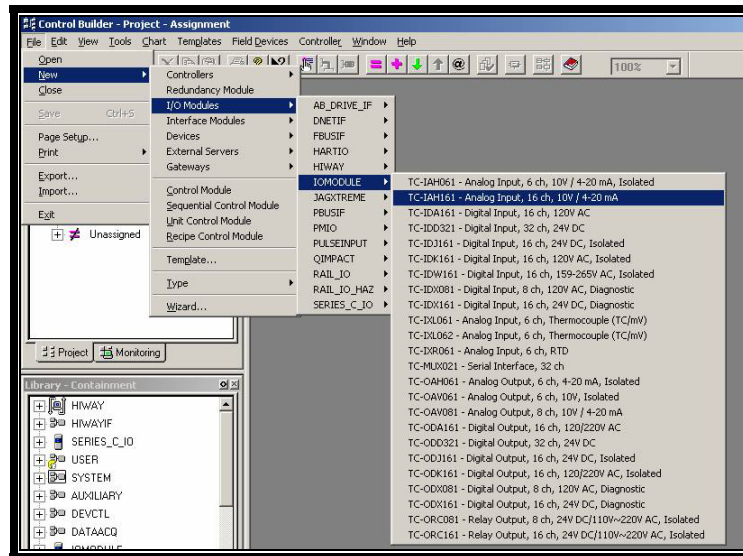


Figura N° 49: Configuración de Módulos de Entrada/Salida Analógicas y Digitales (Elaboración propia).

Una vez seleccionado el módulo de entrada o salida, se especificó el número de slot al cual pertenece ese modulo y el número de slot correspondiente a la tarjeta de comunicación, tal y como se muestra en la *Figura N° 50*.

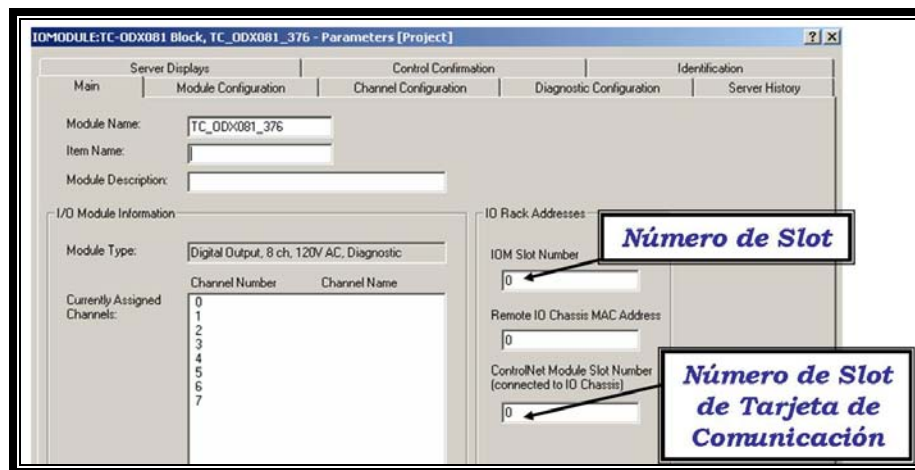


Figura N° 50: Caracterización de Módulos de Entrada/Salida Analógicas y Digitales (Elaboración propia).

El módulo adicionado aparecerá en la pantalla izquierda del Project como no asignado, se deberá cargar al sistema tal y como se muestra en la *Figura N° 51*.

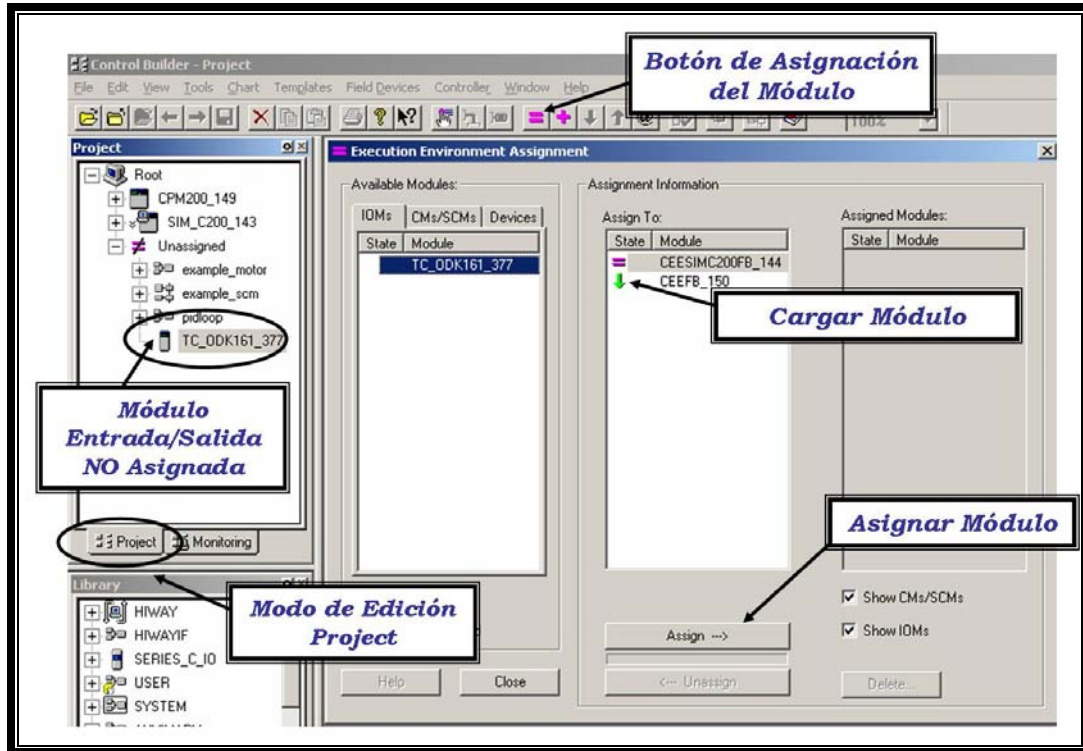


Figura N° 51: Descarga de los módulos al sistema Experion® PKS (Elaboración propia).

Una vez que se cargaron los módulos de Entradas/Salidas analógicas y digitales, se verificó que la configuración se hizo correctamente, para esto se debe abrir la opción Network Tools en cuya ventana se verá reflejado el controlador C200 con cada uno de los módulos en color verde, lo cual indica que se realizó la conexión de los módulos del procesador C200 con el sistema.

En la Figura N° 52, se representa los pasos a seguir para el acceso al Network Tools y en la Figura N° 53 se muestra al Controlador C200 con los módulos Entrada/Salida en actividad.

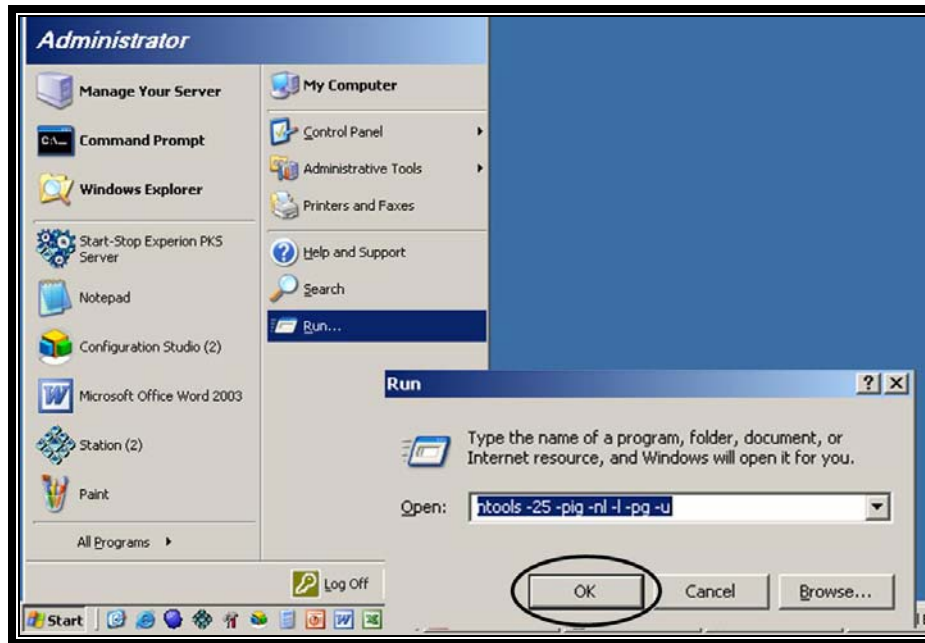


Figura N° 52: Modo de acceso a la herramienta Network Tools (Elaboración propia)

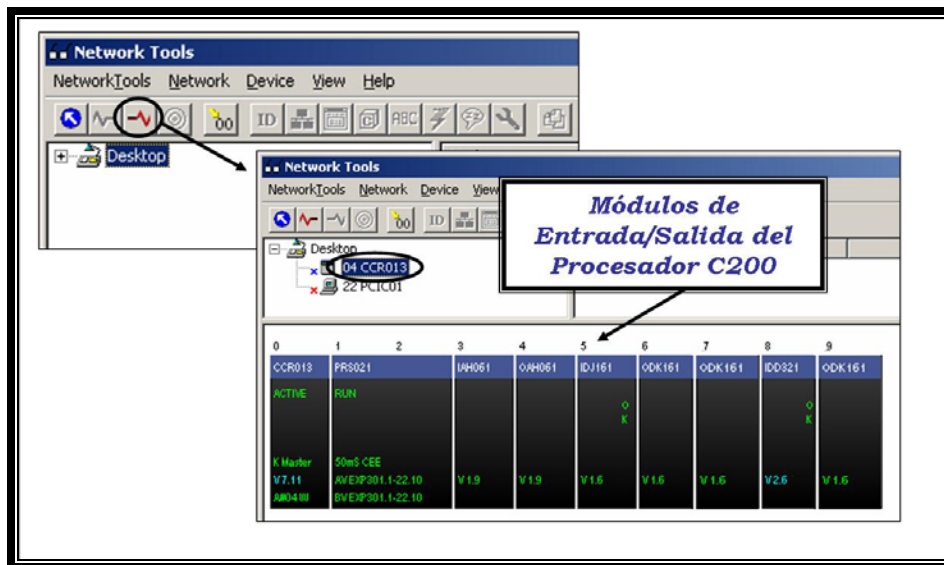
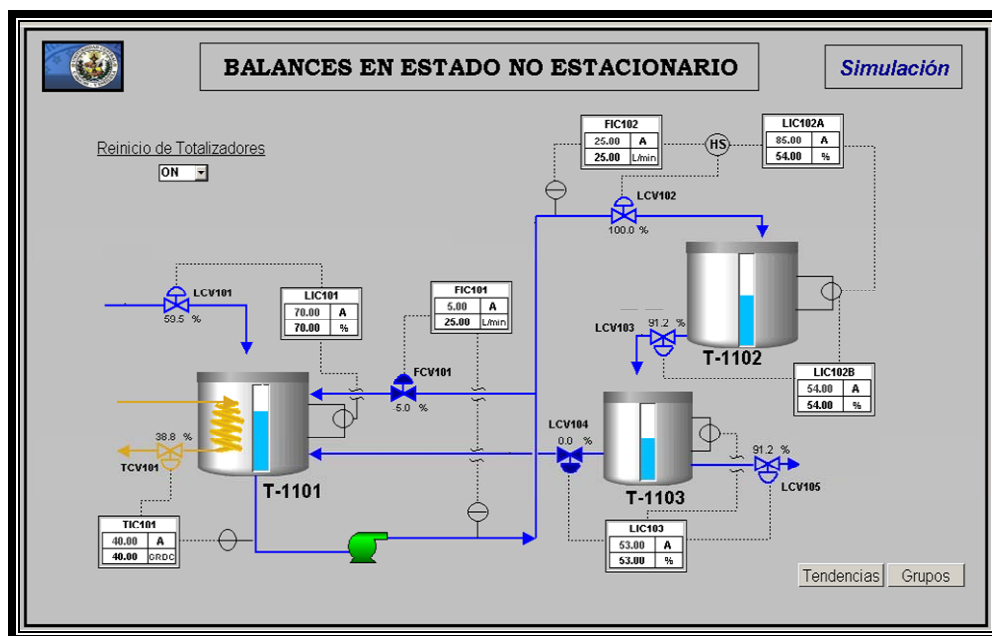


Figura N° 53: Controlador C200 activo (Elaboración propia)

IV.3.5 Diseño e Implementación de los Despliegues de Operación

El Experion PKS, posee la herramienta para el desarrollo de despliegues HMIWeb Display Builder, con la cual se realizaron los despliegues correspondientes a las prácticas.

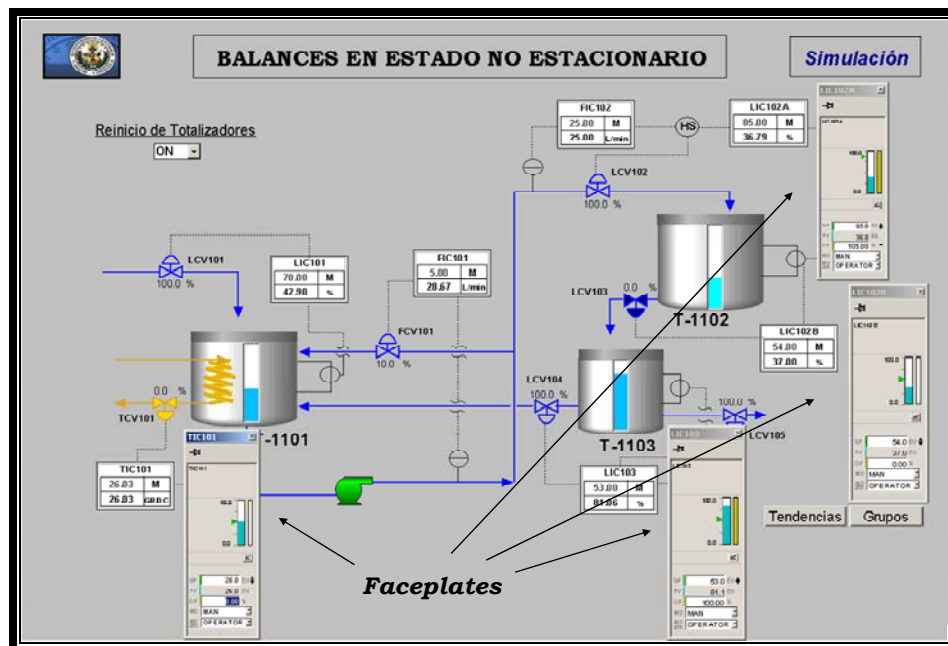
En la *Figura N° 54*, se muestra el despliegue asociado a la práctica de Balances en Estado No Estacionario, en la que se puede destacar que las tuberías de color azul representan el flujo de agua que circula a través del sistema y la de color amarillo corresponde al Flujo de Vapor que se introduce al serpentín. Adicionalmente se tiene un botón de reinicio para los totalizadores ya que cada vez que se comienza la simulación del sistema deben ser reiniciados para evitar la pérdida de acumulación del sistema. También cuando se hace click en la bomba aparece una pantalla (faceplate) en la que se tienen los dos estados de la bomba Encendida o Apagada.



La Figura N° 54: Despliegue de Balances en Estado No Estacionario (Elaboración propia)

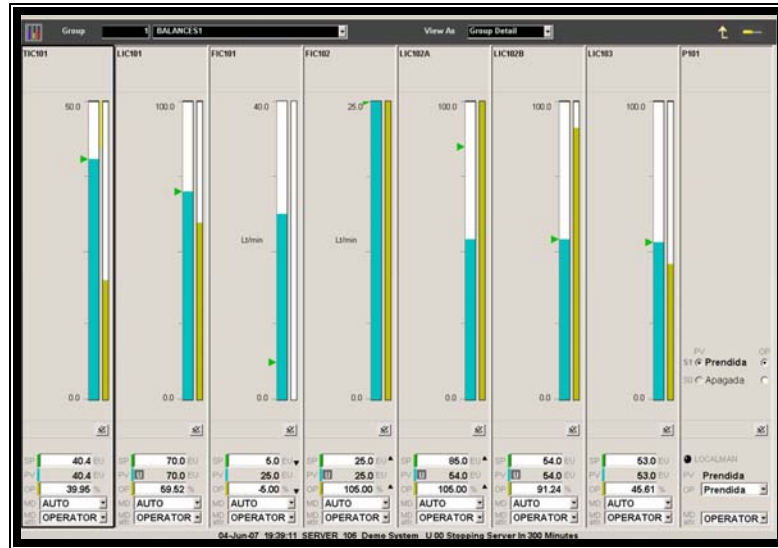
En el despliegue se configuraron las alarmas de manera tal que a medida que los niveles de los tanques se acercan al límite de rebose o vaciado cambien de color de acuerdo a los límites prefijados (rebose o vaciado). También las válvulas de control fueron configuradas de manera que cuando se encuentran abiertas se ponen intermitentes y cuando se encuentran cerradas se oscurecen.

Por otra parte, se crearon una serie de ventanas que representan a los controladores correspondientes a cada estrategia de control diseñada, en ellas se muestran: la variable controlada PV, el Set Point, el modo de operación del controlador (Modo Automático o Manual) y las unidades de las variables. También al hacer click sobre la ventana aparece una pantalla (faceplate) que refleja el cambio de la variable de proceso VP, para llegar al set point prefijado mediante apertura o cierre de la válvula representada como la variable se salida del controlador OP que muestra el porcentaje de apertura de la válvula de control. Estas pantallas se muestran en la *Figura N° 55*.

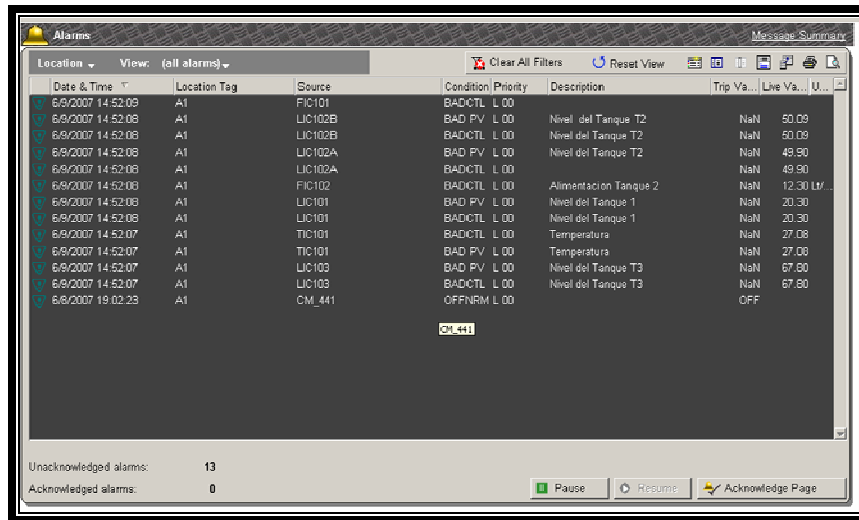


La Figura N° 55: Vista de faceplates en despliegue de Balances es Estado No Estacionario
(Elaboración propia)

Adicionalmente el sistema posee la posibilidad de ver todos los faceplates (grupos) asociados a cada controlador en una misma pantalla, permitiendo al usuario ver todos los lazos de control al mismo tiempo, tal y como se muestra en la *Figura N° 56*. También tiene la aplicación de Gestión de Alarmas como se muestra en la *Figura N° 57*.



La Figura N° 56: Despliegue de Grupos de la práctica Balances en Estado No Estacionario (Elaboración propia)



La Figura N° 57: Despliegue de Gestión de Alarmas de la práctica Balances en Estado No Estacionario (Elaboración propia)

IV.3.6 Expansiones futuras

Con la intención de proyectar un crecimiento del Laboratorio de Control de Procesos se realizó un estudio preliminar de las prácticas posibles a automatizar contempladas en el programa académico del laboratorio de Ingeniería Química I y II. Éste estudio permitirá incorporar otras prácticas de dicho laboratorio a simulaciones de control a través del controlador híbrido C200.

A fin de completar el propósito de este estudio de automatización que permitirá ejecutar a futuro prácticas de control de procesos en tiempo real, es necesario realizar la instalación de los instrumentos de control necesarios a las prácticas sugeridas a automatizar, de esta manera se podrá obtener la data de campo precisa que llegará al controlador *C200* y que posteriormente será descargada del mismo a través del software *Experion PKS*, permitiendo a los estudiantes experimentar el comportamiento real de un sistema controlado mediante un equipo industrial.

El Sistema *Experion* ha sido dimensionado para soportar ampliaciones futura incorporando todas las prácticas actuales así como futuras. La capacidad de manejo del *Experion PKS* del L.O.U. es de 20100 Tags y el *C200* fue suministrado para manejar aproximadamente 100 señales con capacidad de expansión futura a más de 1000 por controlador.

IV.3.7 Estudio Técnico Económico

Para la estimación del Capital de Inversión, se requirieron los costos asociados a: los instrumentos para la automatización de las prácticas automatizables, los instrumentos referidos particularmente para la práctica de Balances en Estado No Estacionario y el hardware y software del Sistema de Control Distribuido Experion PKS.

Tabla N° 13: Costos de los Instrumentos asociados las Prácticas Automatizables

(Elaboración Propia)

<i>Práctica</i>	<i>Instrumento</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Costo Unitario</i>	<i>Costo(\$)</i>
<i>Determinación de Caídas de Presión de una Columna de Relleno</i>	Transmisor de presión diferencial de orificio integral	1	\$1263	\$1263
	Transmisor diferencial de presión	1	\$1263	\$1263
	Válvula de control	1	\$1000	\$1000
<i>Filtración a Presión Constante</i>	Transmisor de presión diferencial	1	\$1263	\$1263
	Analizador de concentración (relacionado con partículas).	1	\$1000	\$1000
<i>Calibración de Medidores de Flujo</i>	Transmisores de presión diferencial	2	\$1263	\$2526
	1 Actuador multivuelta eléctrico	1	\$800	\$800
	Válvula de control	1	\$1000	\$1000
<i>Determinación de Curvas Características de Bombas Centrifugas</i>	Transmisores de presión manométrica.	2	\$1263	\$2526
	Transmisor de presión o switch ON/OFF.	1	\$1263	\$1263
	Válvulas de purga.	2	\$1000	\$2000
	Válvulas solenoide.	4	\$900	\$3600
	Transductor.	1	\$1200	\$1200
<i>Destilación al vacío de una mezcla</i>	Termocuplas	2	\$450	\$900
<i>Rectificación de una mezcla.</i>	Termocuplas	2	\$450	\$900
			<i>SUBTOTAL:</i>	<i>\$22.504</i>

Tabla N° 14: Costos de los Equipos e Instrumentos asociados a la Práctica de Balances en Estado No Estacionario (Elaboración Propia)

<i>Equipos</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Costo Unitario(\$)</i>	<i>Costo(\$)</i>
Serpentín	1	\$80	\$80
Tanque de almacenamiento	1	\$95	\$95
Transmisor de temperatura	1	\$1018	\$1018
Termocuplas (RTD`S)	2	\$450	\$900
Transmisor de presión diferencial (nivel)	1	\$1386	\$1386
Transmisor de presión diferencial (nivel)	1	\$1376	\$1376
Transmisor de presión diferencial (nivel)	1	\$1263	\$1263
Pressure switch	1	\$1263	\$1263
Válvulas de control	7	\$1000	\$7000
SubTotal:			\$14.381

Tabla N° 15: Costos del Hardware correspondiente al Rack del Controlador C200. (Elaboración Propia)

<i>Modelo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Cant.</i>	<i>Costo Unitario</i>	<i>Costo(\$)</i>
9904-TPR	CN T TAP, DROP CABLE W/RIGHT ANGLE CONN	2	\$93	\$186
TC-CCN014	PWA, CNI CARD SGL MEDIA	1	\$1.570	\$1.570
TC-PCXX2	POWER SUPPLY 120/240 VAC	1	\$849	\$849
TC-FXX102	10 SLOT RACK	1	\$551	\$551
TC-IAH061	IOM, ANALOG IN, 6PT (10 V + 4-20MA)	2	\$1.575	\$3.150
TC-IDJ161	IOM, 24 VDC INPUT, 16 PT(ISO)	2	\$551	\$1.102
TC-CCX03	CONTROLNET TRUNK CABLE 3M	1	\$45	\$45
TC-OAH061	IOM, ANALOG OUTPUT, 6PT (4-20MA)	1	\$2.153	\$2.153
TC-ODJ161	IOM, 24 VDC OUTPUT, 16 PT(ISO)	2	\$673	\$1.346
TC-TBCH	I/O MODULE CONNECTOR 36 POSITIONS	4	\$72	\$288
TC-TBNH	I/O MODULE CONNECTOR, 20 POSITIONS	3	\$36	\$108
TK-PRS021	C200 CONTROL PROCESSOR	1	\$6.584	\$6.584
Subtotal			\$17.932	

Tabla N° 16: Costos del Hardware (Elaboración Propia)

<i>Modelo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Cant.</i>	<i>Costo Unitario</i>	<i>Costo(\$)</i>
TP-DFP191100	Panel Display, 15" Desktop -120v	1	\$500	\$500
MZ-PCSV10	Server, PC XTECH	1	\$500	\$500
MZ-PCWS30	PC, Workstation 490 Single PROCWXP	1	\$1.000	\$1.000
TC-PCIC02	ControlNet Interface Module, PCI bus	1	\$1.750	\$1.750
HUB	Hub Compaq Neteligent 10BaseT-TX	1	\$100	\$100
Rittal	Gabinete de Conexiones	1	\$1500	\$1500
			Subtotal	\$5.350

Tabla N° 17: Costos del Software Experion PKS. (Elaboración Propia)

<i>Modelo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Cant.</i>	<i>Costo Unitario</i>	<i>Costo(\$)</i>
EP-BASE1	Database Base Software	1	\$6.500	\$6.500
EP-DPR100	100 PROCESS Point Adder to Database Size	1	\$1.200	\$1.200
EP-DSC100	100 SCADA point Adder to Database Size	1	\$600	\$600
EP-EPKY01	Experion PKS Keyboard Overlay	1	\$0	\$0
EP-PMP01	Experion PKS Mousepad	1	\$0	\$0
EP-EDS03	Windows 2003 Server Media	1	\$0	\$0
EP-EDXP2	Windows XP Media for R300	1	\$0	\$0
EP-PKS301	Experion PKS R301 Media and Doc Set	1	\$0	\$0
EP-STAT01	Experion station - flex (1 connection)	5	\$4.250	\$21.250
MZ-QLCL2	MS SQL Client access license	2	\$120	\$240
SW-NEW	New Customer Software	1	\$0	\$0
TC-WCS11	C200 Control Execution Environment, 50 msec	1	\$2.850	\$2.850
			Subtotal	\$32.640

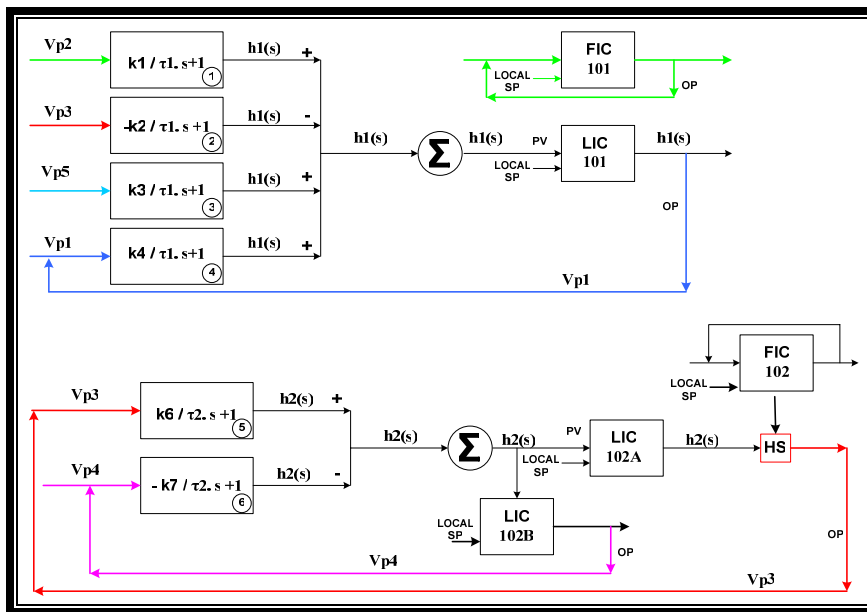
Tabla N° 18: Capital de Inversión. (Elaboración Propia)

<i>Inversión total</i>	\$92.807
<i>Inversión realizada</i>	\$63.128
<i>Inversión por realizar</i>	\$29.679

IV.4 SIMULACION DEL SISTEMA BALANCES EN ESTADO NO ESTACIONARIO EN EL SISTEMA EXPERION® PKS

Para poder realizar las simulaciones en el sistema *Experion PKS* con el controlador *C200* se realizó el diagrama de bloques representando el sistema a lazo cerrado a partir de las funciones de transferencia obtenidas por el modelo matemático.

En la *Figura N° 58*, se muestra como el primer bloque que corresponde al control del nivel del Tanque T₁ (LIC101) esta relacionado con respecto a las aperturas de las válvulas vp₁, vp₂, vp₃ y vp₅, parámetros que están asociados al flujo del Tanque T₁, flujo de recirculación, flujo de entrada al Tanque T₂ y flujo de salida del Tanque T₃ hacia el Tanque T₂ respectivamente, los cuales repercuten en el control de nivel del Tanque T₁. Adicionalmente se muestra un bloque correspondiente al control de flujo de recirculación al tanque.



La Figura N° 58: Diagrama de Bloques a lazo cerrado de la práctica Balances en Estado No Estacionario (Elaboración propia)

Las aperturas de las válvulas han sido identificadas con colores para representar la influencia de las variables manipuladas sobre las variables controladas y cómo es la dinámica de su influencia. La dinámica esta representada por los bloques numerados con 1, 2, 3 y 4 (caso LIC101), posteriormente van a un sumador cuya salida entra al controlador PID (LIC101), la señal de salida del controlador en la realidad, va a una válvula donde se ajusta su apertura; pero para realizar la simulación la señal de salida del controlador (OP) se retroalimenta al proceso para observar cambios en la variable del proceso (PV). Además, los set points son de tipo local, es decir, son introducidos por el usuario.

Los bloques identificados como LIC102A y LIC102B corresponden al control de nivel del Tanque T_2 , el LIC102A representa la relación entre la variable de proceso correspondiente al nivel influenciada por la apertura de la válvula vp_3 correspondiente al flujo de alimentación al tanque T_2 , mientras que el LIC102B representa la relación del nivel influenciada por la apertura de la válvula vp_4 correspondiente al Flujo de Salida del Tanque T_2 . El bloque identificado como HS corresponde al selector de baja quien dará prioridad al control de nivel LIC102A para mantenerlo controlado por debajo del valor límite de rebose o dará prioridad al FIC102 permitiendo la entrada de flujo hacia el Tanque T_2 mientras no se ha alcanzado el límite de rebose del tanque T_2 .

En la *Figura N° 59*, se muestra el bloque correspondiente al controlador de nivel del Tanque T_3 (LIC103), la salida del controlador (LIC103) se divide en dos ramas representando la estrategia de control de rango dividido para lo cual la válvula vp_5 corresponde al flujo de recirculación al Tanque T_1 y la vp_6 corresponde al flujo de salida del Tanque T_3 . El rango para válvula vp_6 será de 0 a 50% y la válvula vp_5 de 50 a 100%.

Por último se tiene el bloque correspondiente al control de temperatura del Tanque T_1 (TIC101), en el cual se representa la influencia de las variables

manipuladas vp_0 , vp_1 , vp_2 , vp_3 y vp_5 correspondientes al flujo de vapor del Serpentin, flujo de alimentación al Tanque T_1 , flujo de recirculación al Tanque T_1 y flujo de salida del Tanque T_3 hacia el Tanque T_2 respectivamente con respecto a la variable controlada T_2 .

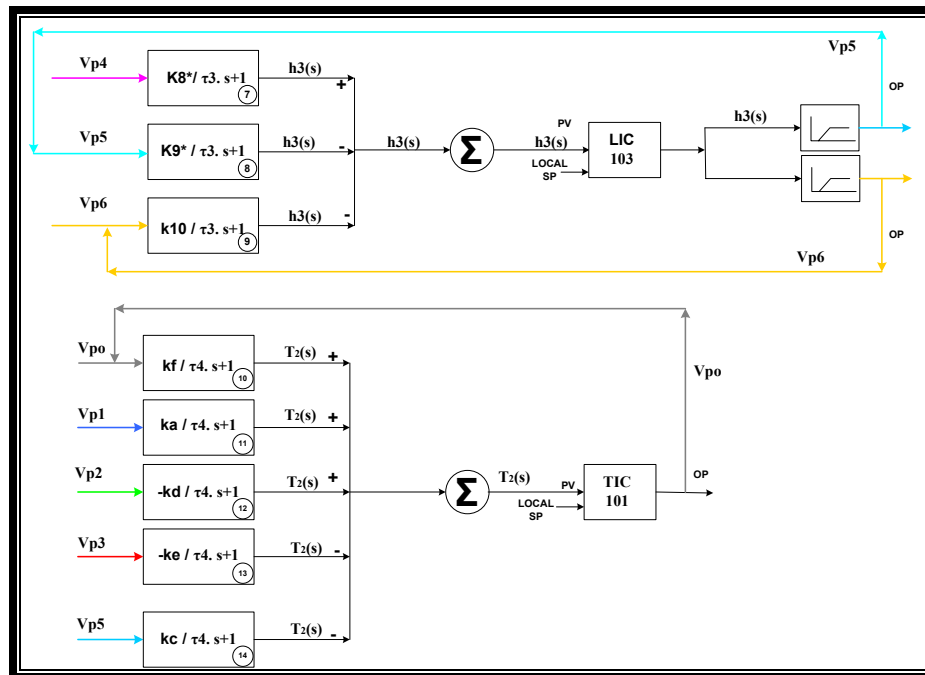


Figura N° 59: Diagrama de bloques a lazo cerrado de la práctica Balances en Estado No Estacionario (Elaboración propia)

IV.4.1 Configuración de la Base de Datos y Simulación del sistema Balances en Estado No Estacionario en Experion PKS.

Una vez estudiada la influencia de las variables manipuladas sobre las variables controladas del sistema, se establecieron los rangos máximos y mínimos de operación, correspondientes a las variables manipuladas y a las variables controladas. Los rangos establecidos para la simulación del proceso se muestran en las Tablas N° 19 y N° 20.

Tabla N° 19: Rangos de Operación de las Variables Controladas del proceso (Elaboración propia)

N° VC	Tagname	Descripción	Rango		Unidad
			Mín	Máx	
1	TIC101 PIDA.PV	Temperatura del Tanque T ₁	0	50	°C
2	LIC101 PIDA.PV	Nivel del Tanque T ₁	0	100	%
3	FIC101 PIDA.PV	Flujo de recirculación al Tanque T ₁	5	28	l/min
4	FIC102 PIDA.PV	Flujo de entrada al Tanque T ₂	0	25	l/min
5	LIC102A PIDA.PV	Nivel del Tanque T ₂	0	100	%
6	LIC102B PIDA.PV	Nivel del Tanque T ₂	0	100	%
7	LIC103 PIDA.PV	Nivel del Tanque T ₃	0	100	%

Tabla N° 20: Rangos de Operación de las Variables Manipuladas del proceso (Elaboración propia)

N° VM	Tagname	Descripción	Rango		Unidad
			Mín	Máx	
1	TIC101_PIDA.OP	Apertura de válvula correspondiente al Flujo de Vapor.	0	100	%
2	LIC101_PIDA.OP	Flujo de Alimentación al Tanque T ₁	0	42	l/min
3	FIC101_PIDA.OP	Flujo de Recirculación al Tanque T ₁	0	37	l/min
4	FIC102_PIDA.OP	Flujo de Alimentación al Tanque T ₂	0	25	l/min
5	LIC102B_PIDA.OP	Flujo de salida del Tanque T ₂	0	25	l/min
6	LIC103_AUTOMAN_SAL.OP	Flujo de salida del Tanque T ₃	0	25	l/min
7	LIC103_AUTOMAN_REC.OP	Flujo de recirculación del Tanque T ₃ al T ₁	0	20	l/min

Estos rangos, se establecieron de acuerdo a los caudales máximos que circulan por las tuberías, caudal mínimo requerido por la bomba y alturas máximas y mínimas de los tanques.

Una vez definidos los límites de operación se realizó la configuración de los módulos de control que representarán las estrategias de control diseñadas. Para la configuración de las estrategias de control se realizó la misma secuencia que para la creación de los módulos de Entrada/Salida Analógicas y Digitales en el Project del

Control Builder (Véase Capítulo IV.3.4), con la diferencia de que ahora se debe hacer click en Control Module tal y como se muestra en la *Figura N° 60*.

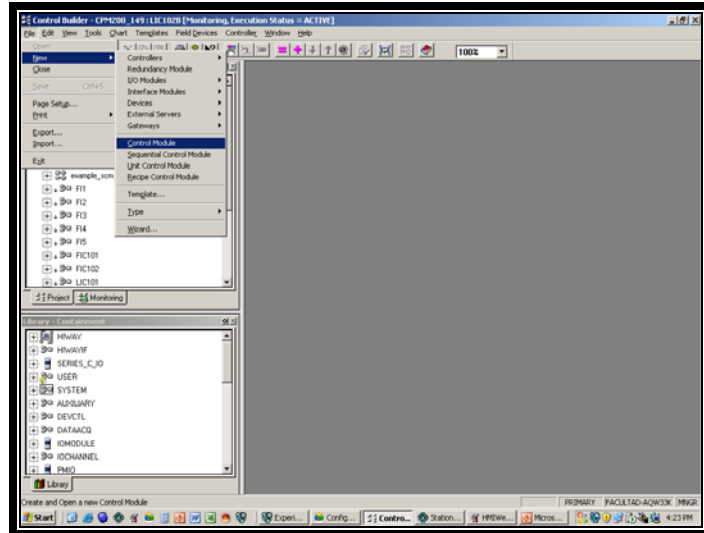


Figura N° 60: Configuración de Módulos de Control (Elaboración propia)

En esta parte del proceso de configuración de la base de datos, se realizaron los diagramas de bloques que constituyen cada una de las estrategias de control diseñadas para la práctica de Balances en estado No Estacionario representadas en las *Figuras N°58 y N°59*, con la diferencia de que los bloques cambian de acuerdo a la programación de los algoritmos del Control Builder.

En general, cuando se realiza la configuración de puntos el usuario debe definir: (i) el nombre del punto (tagname) que lo distingue de los otros puntos que conforman el esquema de simulación o control; (ii) la categoría o tipo de punto, esto es si es un regulatorio de control, auxiliar, lógico, etc.; (iii) indicar cuales son las salidas, es decir hacia donde se destina la señal calculada y (iv) definir las condiciones de alarma.

En el Control Builder se construyeron los módulos de control correspondientes a cada lazo, para ello se definieron los nombres que van a tener cada uno de los controladores en el sistema. Los nombres elegidos fueron los siguientes: para el Control de Temperatura se usó (TIC101), para el Control de Nivel en el Tanque T₁ se usó (LIC101), para el Control de Flujo de Recirculación al Tanque T₁ se usó (FIC101), para el Control de Flujo en la línea de tubería de descarga al Tanque T₂ se usó (FIC102), para el Control de Nivel en el Tanque T₂ se usaron (LIC102A y LIC102B), para el Control de Nivel en el Tanque T₃ se usó (LIC103). Una vez creados los módulos de control se asignaron y cargaron en el Project de la misma forma que se hizo para los módulos de Entrada/Salida Analógica y Digital (*Véase Capítulo IV. Sección IV.3.4 Figura N° 51*).

A continuación se presentará la configuración correspondiente a cada uno de los lazos de control para recrear la simulación del sistema en el *Experion[®] PKS*.

Configuración del Lazo de Control de Nivel del Tanque T₁ (LIC101):

En la *Figura N° 61*, se muestra el algoritmo asociado al Control de nivel del Tanque T₁ y esta representado por los bloques correspondientes al flujo de entrada al tanque T₁ (TOTALIZERA), al flujo de recirculación al T₁ (TOTALIZERB) y el flujo de recirculación desde el Tanque T₃ hacia el Tanque T₁ (TOTALIZERC), la suma de todos los flujos se envían a un sumador que representará la acumulación de todas las entradas (ACUM_ENTRADA). Adicionalmente, se representa el bloque que representa el flujo de salida del Tanque T₁ hacia el Tanque T₂ como (ACUM_SALIDA).

La dinámica del proceso se representó a través del uso de totalizadores, cada totalizador posee un factor de escalamiento que representa la máxima cantidad de flujo que pasa por las tuberías en porcentaje.

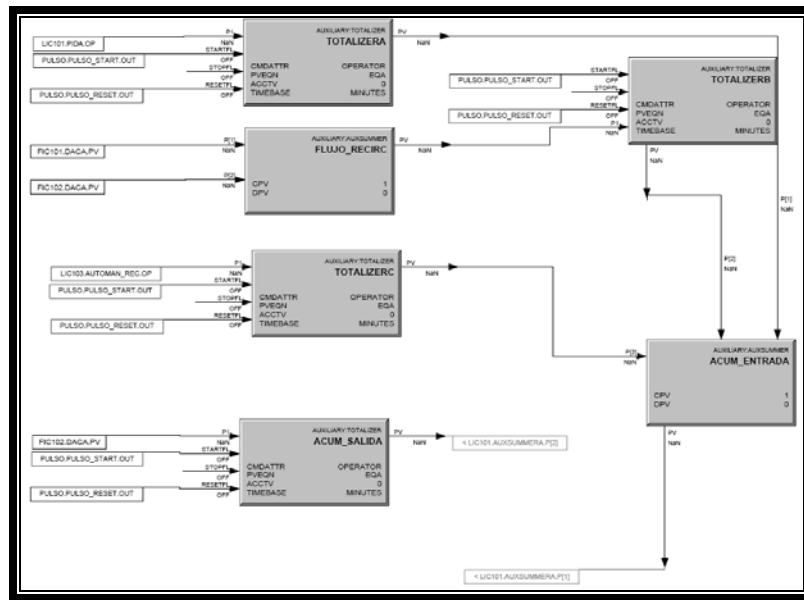


Figura N° 61: Representación del lazo de control correspondiente al Control de Nivel LIC101 (Elaboración propia)

En la Figura N° 62, se muestra a un bloque sumador (AUXSUMMERA) que totaliza las contribuciones del ACUM_ENTRADA y el ACUM_SALIDA de la Figura N° 65, adicionalmente el AUXSUMMERA posee un factor escalar asociado al volumen del Tanque T₁, en unidades de porcentaje (%). La salida OP del PIDA, es recirculada al TOTALIZERA que corresponde al Flujo de entrada del Tanque T₁ (Variable manipulada) cerrando así el lazo de control.

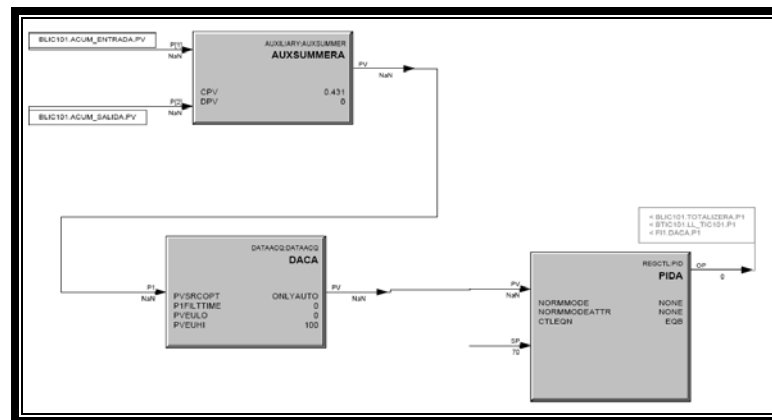


Figura N° 62: Representación del lazo correspondiente al módulo de control LIC101 (Elaboración propia)

Configuración de la Puesta en Marcha de la Bomba (P101) y Pressure Switch PS101:

En la *Figura N° 63*, se ve reflejado el algoritmo DEVCTLA, utilizado para el encendido y apagado de la bomba. La salida PVFL(0), del bloque DEVCTLA, repercutirá en los módulos de control asociados al flujo de entrada al Tanque T₂ (FIC102) y al Flujo de recirculación al Tanque T₁ (FIC101), debido a que estos flujos podrán desplazarse por el sistema sólo si la bomba está encendida. Además se incluye el bloque LEA que representará al pressure switch, de manera que comparará el valor de nivel recibido el LIC101 y si es menor al 25% apagará la bomba.

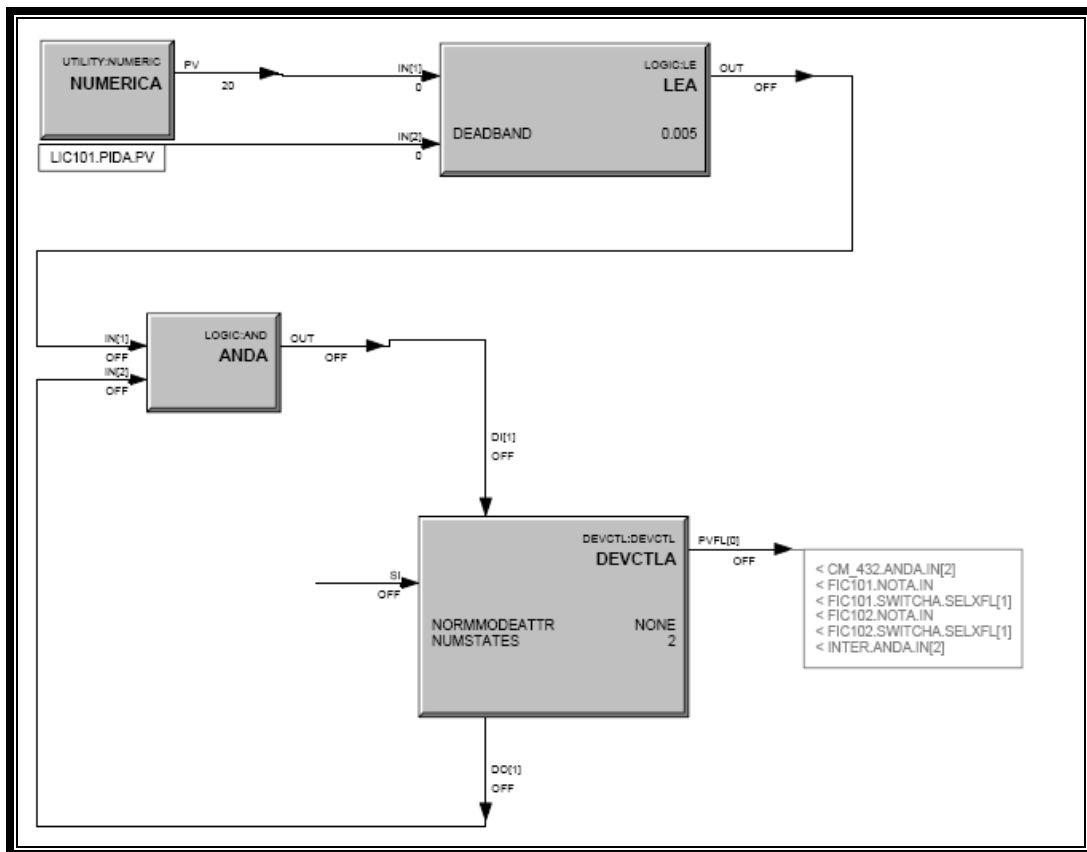


Figura N° 63: Representación del lazo correspondiente al módulo de Control P101 y Pressure Switch (Elaboración propia)

Configuración del Lazo de Control de Flujo (FIC101):

En la *Figura N° 64*, el bloque FIC101 representa el lazo de control asociado al flujo que se recircula hacia el Tanque T₁. El lazo de control se representa con un bloque DACA, que convierte la señal de 0-100% a una señal de ingeniería de (0 – 37 l/min), y la incorporación de un bloque PID. El flujo de recirculación depende de si la bomba esta operando o no, por lo tanto fue necesario incorporar en el modulo de control correspondiente al FIC101, una serie de algoritmos que reflejaran el efecto en la variable PV (flujo PIDA.PV), el hecho de que la bomba este encendida o apagada.

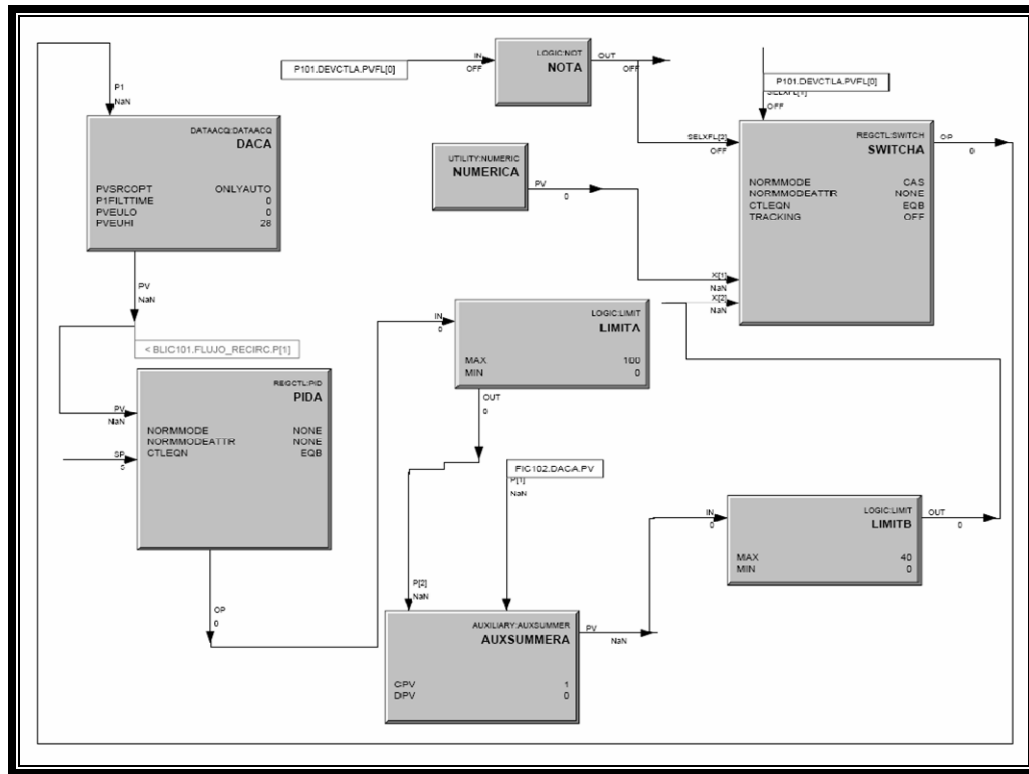


Figura N° 64: Representación del lazo correspondiente al Módulo de Control FIC101 (Elaboración propia)

La salida OP del bloque SWITCH representa la bomba, la PV que entra al bloque SWITCH representa al flujo que pasa por la bomba cuando esta encendida, si

la bomba esta apagada, aunque la posición de la válvula este al 100% abierta, no hay paso de flujo.

El bloque SWITCH selecciona X(2) si la bomba esta encendida recibiendo el flujo de la válvula correspondiente al flujo que entra al Tanque T₂ o cuando la bomba esta apagada selecciona a X(1) correspondiente a un cero (0). El bloque correspondiente a NUMERIC (numérico) es un valor fijo que es un cero (0) que indica que la bomba esta apagada. La OP del SWITCH se expresa como: $OP=X_1$ si la entrada SELXfl(1)=ON y $OP=X_2$ si la entrada SELXFL(2)=ON pero son excluyentes, es decir, que si el SELCFL(1) está en ON, entonces el SELXFL(2) deberá estar en OFF. La salida OP del SWITCH es recirculada hacia el DACA para representar la simulación.

Configuración del Lazo de Control de Flujo (FIC102) y Control de Nivel (LIC102A):

La configuración de estos lazos de control se ven reflejadas en la *Figura N° 65* y *N° 66*. En la *Figura N° 65*, se muestra que posee la misma lógica que se utilizó para la configuración del módulo de control FIC101 relacionada con la bomba y esto se debe a que el módulo de control FIC102 que corresponde al control del flujo que se desplaza hacia el Tanque T₂, depende de si la bomba está encendida o apagada. Adicionalmente, se muestra el bloque que representa al selector de baja (OVERDSELA), siendo este el motor principal para implementar la estrategia de control Override quien dará prioridad al control de flujo o nivel según sea el caso.

Por otra parte, en la *Figura N° 66*, se aprecian los bloques DACA y PIDA correspondientes al control de nivel del Tanque T₂, en el cual para este último la salida OP del PIDA es introducida al selector quien simulará la acción de la válvula referida al paso o cierre de flujo de alimentación según el valor prefijado en el PIDA correspondiente al (LIC102A).

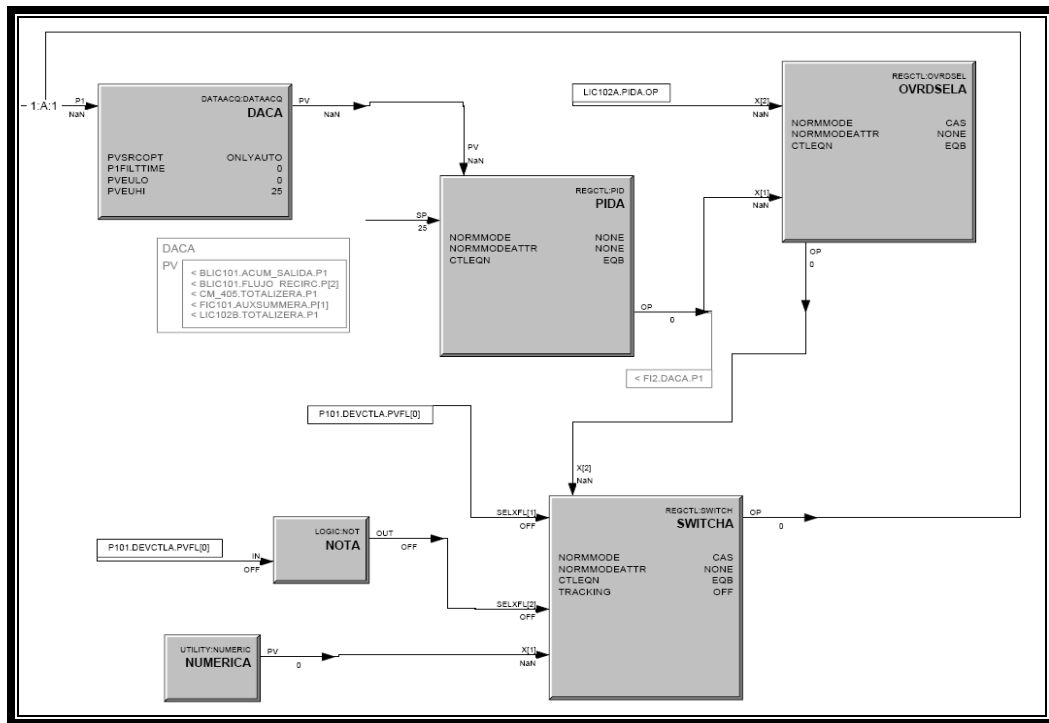


Figura N° 65: Representación del lazo correspondiente al módulo de control FIC102
(Elaboración propia)

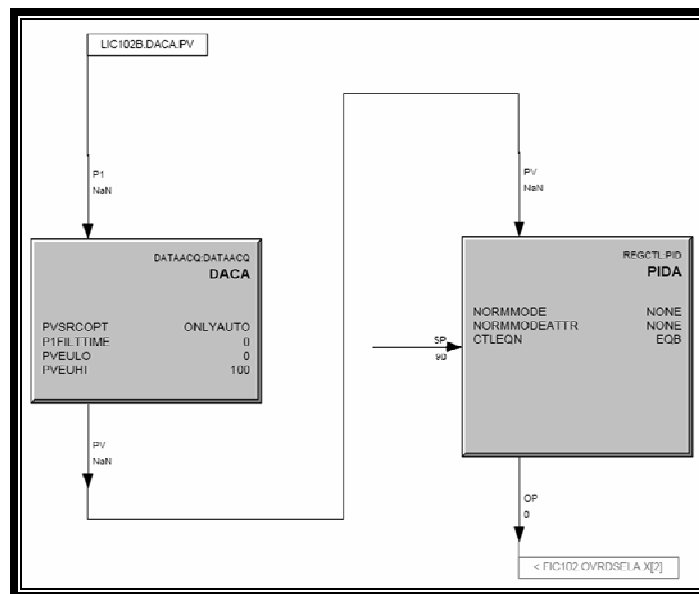


Figura N° 66: Representación del lazo correspondiente al módulo de control LIC102A
(Elaboración propia)

Configuración del Lazo de Control de Nivel del Tanque T2(LIC102B):

En la *Figura N° 67*, se representan las contribuciones asociadas al flujo de entrada al Tanque T₂ y al flujo de salida representado por el TOTALIZERA y TOTALIZER_1 respectivamente, ambos totalizadores poseen un factor escalar asociados a los flujos. Posteriormente las PV's de ambos se suman en el AUXSUMMERA, este algoritmo también posee un factor escalar asociado al volumen del tanque; la PV resultante del sumador es recirculada hacia el PIDA cerrando el lazo de control.

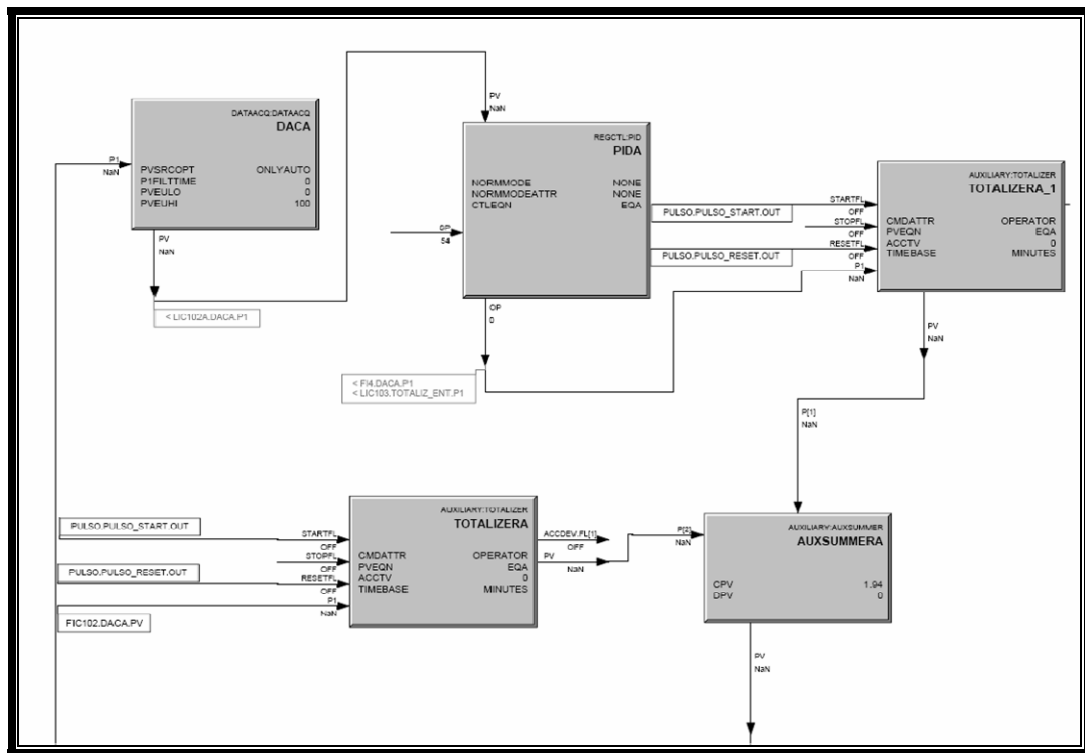


Figura N° 67: Representación del lazo correspondiente al módulo de control LIC102B (Elaboración propia)

Configuración del Lazo de Control de Nivel en el Tanque T3 (LIC103):

La configuración asociada a la estrategia de control de rango dividido, se ve representada en la *Figura N°68*, en la misma se muestra que la salida OP del bloque PIDA se introduce a un bloque FANOUT, el cual genera dos salidas, cada una de ellas se envía a dos bloques AUTOMAN (Automanales), que representan el flujo de salida del Tanque T₃ (AUTOMAN_SAL) y el flujo de recirculación del Tanque T₃ al Tanque T₁ (AUTOMAN_REC).

Para los bloques asociados a este control, se definió la partición para cada válvula y se ve representada en la *Tabla N°21*, en la cual se muestra que para el AUTOMAN_SAL, tendrá una partición de 0-50% y al AUTOMAN_REC le corresponderá la partición de 0-100%.

Los valores de las OP's de los automanales, se envían a una serie de totalizadores para representar la dinámica del proceso, el TOTALIZER_ENT corresponde al flujo de salida del Tanque T₂, el TOTALIZ_REC corresponde al flujo de recirculación del Tanque T₃ hacia el Tanque T₂ y por último el TOTALIZ_SAL corresponde al flujo de salida del Tanque T₃; cada totalizador posee un factor escalar asociado al flujo máximo que pasa por la tubería.

Aunado a esto las PV's de los totalizadores son sumadas y multiplicadas por el factor asociado al máximo nivel del tanque en el AUXSUMMER la salida de este bloque se realimenta al PIDA para completar el lazo de control.

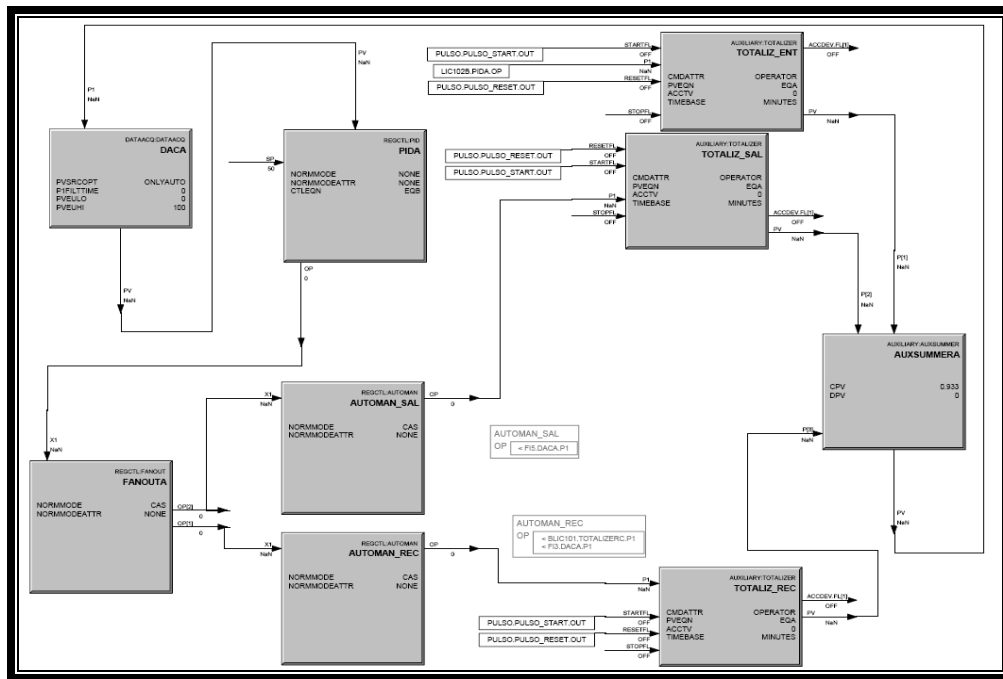


Figura N° 68: Representación del lazo correspondiente al módulo de control LIC103 (Elaboración Propia)

En la *Tabla N° 21*, se muestra la partición asociada a cada válvula en donde se aprecia el porcentaje de apertura de la válvula en función de la señal recibida, la LCV103A, correspondiente a la salida del Tanque T₃, refleja que para una señal de cero (0) la válvula se encuentra cerrada y para una señal de 50, la válvula estará 100% abierta; mientras que la válvula LCV103B, correspondiente al flujo de recirculación del Tanque T₃ al Tanque T₁ para una señal de 50 estará totalmente cerrada y para una señal de 100 la válvula estará 100% abierta. Estas particiones se incluyeron dentro de cada bloque automanual.

Tabla N° 21: Partición asociada a cada válvula para la estrategia de rango dividido (Elaboración propia)

Válvula	Algoritmo	Partición		Descripción
		Señal(%)	Apertura (%)	
LCV103A	AUTOMAN_SAL	0	0	Cerrada
		50	100	Abierta
LCV103B	AUTOMAN_REC	50	0	Cerrada
		100	100	Abierta

Configuración del Lazo de Control de Temperatura (TIC101):

En la *Figura N° 69*, se ve representado el lazo de control correspondiente a la temperatura del Tanque T1.

El bloque PIDA, representa la simulación de la variable manipulada correspondiente al flujo de vapor, la señal de salida del controlador va hacia dos bloques del tipo leadlag (*Véase Apéndice B*).

El LEADLAGA, corresponde a la contribución ejercida por la válvula asociada al flujo de vapor que se introduce al serpentín y LL_TIC101 corresponde a la contribución ejercida por el flujo de agua que entra al Tanque T₁, ambos bloques representan la dinámica del proceso, luego ambas salidas se unen en un sumador y se introducen a un bloque DACA cuya función es convertir la señal de la salida del controlador (OP) de 0-100% escalándola a unidades de ingeniería (80-100°F) para servir como la entrada (PV) del mismo.

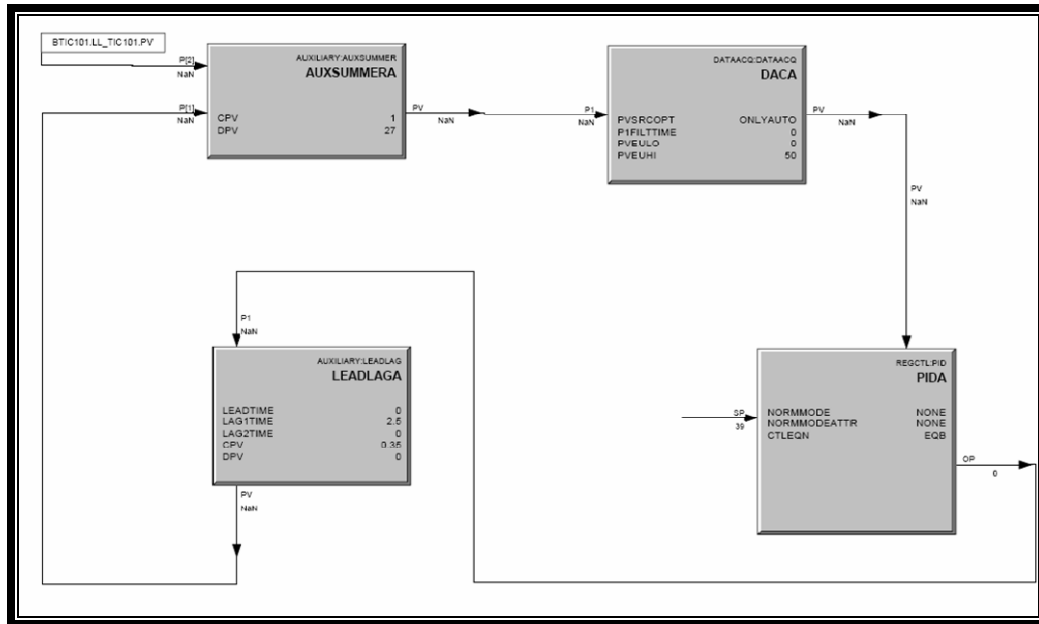


Figura N° 69: Representación del lazo correspondiente al Modulo de Control TIC101. (Elaboración Propia)

IV.4.2 Instructivo de operación del sistema de control de la práctica de “Balances en Estado No Estacionario”

Para iniciar la simulación de la práctica en el software *Experion PKS* y permitir arrancar el sistema de control es necesario seguir una secuencia de etapas que serán descritas a continuación:

1. La simulación se realiza en la HMIWeb Station.
2. Se debe realizar el Reinicio de Totalizadores.
3. Los tanques deben encontrarse vacíos, de no estarlo se deberá encender la bomba en el faceplate asociado a la misma cambiando el estado de Apagada a Encendida. Se deben cerrar las válvulas LCV101 y FCV101 colocando en modo manual los faceplates asociados a los controladores LIC101 y FIC 101 y 0% en la ventana correspondiente a la OP del faceplate; se deben abrir las válvulas LCV102A, LCV102B y LCV103A colocando en modo manual los faceplates asociados a los controladores LIC102A, LIC102B y LIC103 colocando 0% en la ventana referida al SP.
4. Una vez que se han vaciado los tanques, se debe apagar la bomba (de la misma forma que para el encendido), se observará el cambio de color de verde a rojo indicando que ha sido apagada.
5. Para el inicio de la simulación, los controladores LIC101 y FIC101 estarán en modo manual mientras que los controladores correspondientes al LIC102A, LIC102B y LIC103 que deben encontrarse en Modo Automático.
6. Para el llenado del Tanque T₁, se debe colocar en Modo Automático al LIC101 y fijar el valor deseado de Set Point dentro del rango de 0-100% correspondiente al porcentaje de volumen de llenado del tanque se recomienda 70%.
7. Una vez que en el LIC101 refleje el 25%, quedará garantizado que el serpentín está totalmente sumergido y se podrá proceder al encendido de la bomba que indicará el cambio de estado de Apagada a Encendida cuando cambie de color de rojo a verde.

8. Seguidamente, se debe colocar en Modo Automático al FIC101 y fijar el SP = 5 lt/min correspondiente al flujo mínimo requerido por seguridad de la bomba.
9. Luego, se debe colocar al controlador FIC102 en modo automático y fijar la cantidad de flujo que se desea introducir al Tanque T₂, se recomienda 25 lt/min que es el máximo flujo permitido por la tubería. Simultáneamente se deben fijar los valores deseados correspondientes a los Set Points de cada controlador reflejando el nivel. Se recomienda fijar en el LIC102A 85%, en el LIC102B 54% y en el LIC103 54%. Estos pasos permitirán el llenado tanto del Tanque T2 como el del Tanque T3.

Una vez realizados todos los pasos anteriormente descritos se debe observar como responde el sistema de control de acuerdo a las estrategias de control diseñadas.

Si se quisieran realizar perturbaciones al sistema y que sea el operador el que actué como lo haría el controlador se deben colocar todos los controladores en Modo manual y el usuario tomará el control de las variables mediante la manipulación de los flujos representadas por las OP's.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. Se implementó el Sistema de Control Distribuido, para la supervisión y control de las variables asociadas a cada una de las prácticas del Laboratorio de Operaciones Unitarias.
2. Las prácticas consideradas como Automatizadas son aptas para realizar la conexión de la data de campo al sistema de Control Distribuido DCS en tiempo real.
3. Las prácticas consideradas como Automatizables, requieren la incorporación de la instrumentación para realizar la conexión de la data de campo al sistema de Control Distribuido DCS en tiempo real.
4. Las prácticas Automatizables, deben ser rediseñadas a fin de establecer estrategias de control adicionales, a las que fueron propuestas en el estudio realizado a cada una de ellas, para luego ser simuladas en el Experion PKS.
5. La infraestructura del laboratorio permitió el diseño de la Sala de Control para la ubicación e instalación de la Plataforma del Sistema de Control Distribuido.
6. La propuesta seleccionada permitió la implementación de los lazos básicos de control por su viabilidad técnica y económica.
7. Las funciones de transferencia permitieron establecer la relación existente entre las variables manipuladas con las variables controladas.
8. La simulación a lazo abierto, permitió obtener los parámetros de ganancia (k) y tiempo muerto (τ) del proceso mediante pruebas de ensayo y error asociados

a saltos en escalón. Además permitió representar el efecto de las variables manipuladas sobre las variables controladas ante estos cambios.

9. Es posible la implementación de un control multivariable en la Práctica de Balances en Estado No Estacionario, controlando los niveles de los tres tanques simultáneamente.

10. Fue posible implementar la simulación del sistema de la Práctica de Balances en Estado No Estacionario en el Experion PKS.

11. La simulación logró recrear de la manera más exacta posible las estrategias de control diseñadas para la implementación de los lazos típicos de control utilizados en la industria.

12. Los controladores del proceso cumplen a cabalidad con su función de mantener las variables controladas y además son capaces de llevar cualquier variable controlada a un Set Point o rango específico.

13. El despliegue asociado a la práctica de Balances en Estado No Estacionario, permitió al usuario la interacción con el sistema en tiempo real.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar las simulaciones de las estrategias de control para cada una de las prácticas estudiadas recreando cada proceso en el Sistema Experion PKS, esto con la finalidad de implementar una cátedra de Simulación de Control de Procesos.
2. Se recomienda implementar el controlador RMPCT, para el control de los niveles de los tanques simultáneamente para mejorar el desempeño global del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

1. Pérez, Rafael L. (2000). “*Instrumentación y Sistema de Adquisición de Datos para un Intercambiador de Calor*”. Trabajo de Maestría. Inédito. *Universidad Central de Venezuela*, Caracas.
2. *Universidad Central de Venezuela*. Escuela de Ingeniería Química. “*Manuales de las prácticas de Laboratorio de Ingeniería Química I y II del Laboratorio Operaciones Unitarias*”. [Consulta: 2006, agosto 10 al 30].
3. Corripio, A. y Smith, C (1991). “*Control Automático de Proceso, Teoría y Práctica*”. México, Limusa. 717 p.
4. Roselló, R. (2003). “*Introducción al Control Industrial*” [Página Web en línea] Disponible: <http://gpds.uv.es/plc/plc.pdf> [Consulta: 2006, septiembre 5].
5. Luyben, W. de (1996). “*Process Modeling, Simulación and Control for Chemical engineers*”. Second Edition. Singapore, Mc.Graw-Hill International, 724 p.
6. Mendiburu, H. de (2006). “*Instrumentación Virtual Industrial*” [Libro en línea]. Perú, Copyright © Henry Antonio Mendiburu Díaz. Versión libro electrónico. 180 p. Disponible: <http://www.hamd.galeon.com/> [Consulta: 2006, Diciembre 3].
7. Alfaro, V. de (2004). “*Evolución y Tendencias en el Desarrollo de los Métodos de Sintonización de Controladores PID*” [Libro en línea]. Costa Rica, Versión libro electrónico. 76 p. Disponible: www2.eie.ucr.ac.cr/~valfaro/docs/Vma.ucr.evolucion_metsintpid.pdf [Consulta: 2007, Abril 15].
8. Honeywell C.A. (2000). “*A Process Control Primer*”. [Documento Pdf.]U.S.A.

9. Mendiburu, H. de (2003). “*Automatización Medio Ambiental*” [Libro en línea]. Perú, Copyright © Henry Antonio Mendiburu Díaz. Versión libro electrónico. 319 p. Disponible: <http://www.hamd.galeon.com/> [Consulta: 2006, Diciembre 4].
10. Molina, J. (2006). “*Instrumentación Industrial*” [Página Web en línea]. Disponible: <http://www.profesormolina.com.ar/index.htm> [Consulta: 2006, octubre 12].
11. Mendiburu D., H. (2006). “*Introducción al Control Predictivo*”. [Documento en línea]. Disponible: <http://www.ilustrados.com/publicaciones/EEVFFkEEEupegfSOxr.php> [Consulta: 2006, septiembre 7].
12. Javier. (2002). “*Control de Sistemas Multivariables*”. [Documento en línea]. Disponible: <http://200.13.98.241/~javier/mimoP04.pdf#search=%22control%20multivariable%20SISO%22> [Consulta: 2006, septiembre 7].
13. Tham, M. (1999). “*Multivariable Control*” [Documento en línea]. Disponible: <http://lorien.ncl.ac.uk/ming/mloop/MULTIVAR.pdf>. [Consulta: 2007, Enero 23].
14. Vallejo, H. (1999). “*PLC, Los Controladores Lógico Programables*”. México, Saber Electrónica, N° 126, edición 12/11, Pág. 5-13.
15. Universidad de Buenos Aires. Ferreira, F. (2002). “*Controladores de Procesos*” [Documento en línea]. Disponible: <http://www.fi.uba.ar/materias/7206/trCP.pdf> [Consulta: 2006, septiembre 4].
16. Barriola, J. (2003). Honeywell de Venezuela. Presentación Power Point: “*Controladores Lógicos Programables*”. Caracas: Honeywell de Venezuela C.A. (2006).

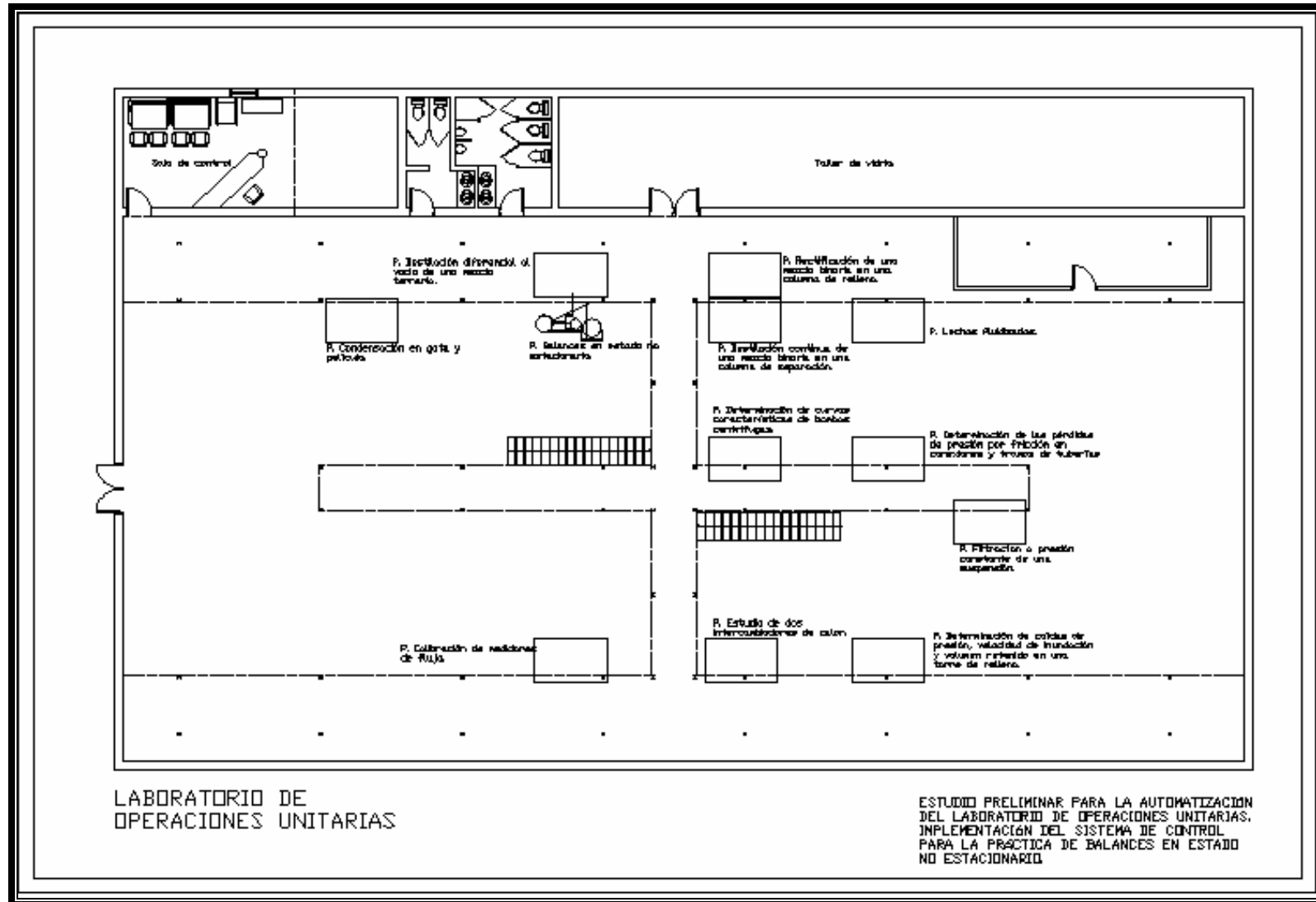
17. J. Barriola, Entrevista Personal, Enero 23, 2007.
18. Forero, R. y Serantes, L. (2006). Honeywell de Venezuela. “*Descripción General del Sistema Expérion PKS.*” Caracas: Honeywell de Venezuela C.A. (2006).
19. GRUPO AESA, SIGE. (2006). “*Sistemas de Control Distribuido (DCS)*”, [Página Web en línea]. Disponible: <http://www.sige.es/modules.php?name=Section&op=viewarticle&artid=80> [Consulta: 2006, septiembre 4].
20. National Instruments, (2006). “*Adquisición de Datos*”, [Página Web en línea]. Disponible: <http://www.ni.com/dataacquisition/esa/whatis.htm> [Consulta: 2006, diciembre 7].
21. Honeywell de Venezuela. “*Documentación Expérion*”, (2006). Cd, Show Petrolero.
22. National Instruments, (2006). “*labVIEW*”, [Página Web en línea]. Disponible: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/10418> [Consulta:2006,diciembre 6]
23. Rodríguez, E. (2000). “*Simulación y Diseño*” [Documento en línea]. Disponible: <http://www.deq.uem.br/biblioteca/deq/Anais/cobeqXIII/pdf/870.pdf> [Consulta: 2007, Enero 16].
24. Mariño, J. (2001). “*Simulación, Hysys*” [Documento en línea]. Disponible: http://www.tesisexarxa.net/TESIS_URV/AVAILABLE/TDX-0623106-120033//ANEXO.A.pdf [Consulta: 2007, Enero 16].
25. Yingst, J. (2004). “*AdvancedAlarmManagementPIN2, PN03-101 PSc FBus R400 Product Note*” Caracas: Honeywell de Venezuela C.A. (2006).

26. Steve, K. (2006). “*ProfitControllerPIN_PN05-030-ENGSept05, Honeywell used a combination of advanced regulatory control strategies and model-based advanced controls in this project to mee*” Caracas: Honeywell de Venezuela C.A. (2006).
27. Rifaldi, A. (2006). “*La Ingeniería Básica*”, [Documento en línea]. Disponible: <http://www.ing.unlp.edu.ar/sispot/libros/et/et-03/et-036/et-036.htm> [Consulta: 2006, Diciembre 10].
28. Manual PIP PCCTE001, (July 1999). Temperature Measurement Criteria. “Process Industry Practices”.

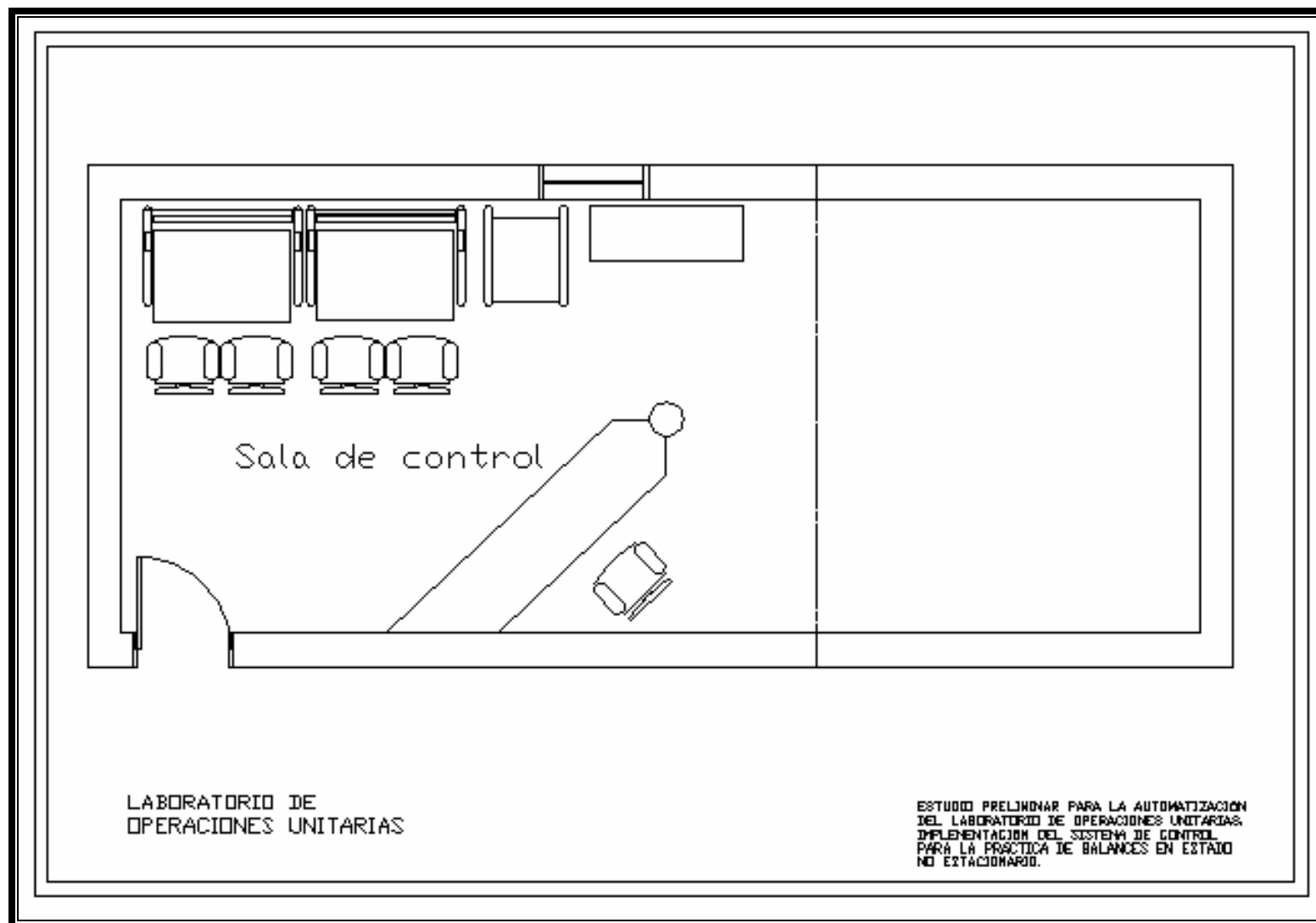
APÉNDICE A

DOCUMENTOS DE INGENIERÍA

A.1. PLANO DE PLANTA FÍSICA DEL L.O.U.




A.2. PLANO DE LA SALA DE CONTROL




**A.3. LISTA DE INSTRUMENTOS DISPONIBLES
EN EL L.O.U**

		Universidad Central de Venezuela Escuela de Ingeniería Química Laboratorio de Operaciones Unitarias	Proyecto: ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL L.O.U. Localización: LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS	Sheet 1 Of 1	
LISTA DE INSTRUMENTOS DISPONIBLES COMO INVENTARIO					
Ubicación	Identificación	Descripción	Detalles	Rango	Acción
Almacén del L.O.U.	Tag. # 50 - Válvula	Research Control Valve "Presicion Products and Control INC.". Tulsa .U.S.A. - TY78s	Serial: 38356	3-15 #	FA/ATC
Almacén del L.O.U.	Tag. # 52 - Válvula	Research Control Valve "Presicion Products and Control INC.". Tulsa .U.S.A. - TYPF78S3W	Serial: 38358	3-15 #	FA/ATC
Almacén del L.O.U.	Tag. # - Válvula	The Foxboro Company	Serial: 1459538	3000 psig / 400 F	FA/ATC


**A.4. LISTA DE EQUIPOS DE PROCESOS DE LAS
PRÁCTICAS AUTOMATIZABLES**

 Universidad Central de Venezuela Escuela de Ingeniería Química Laboratorio de Operaciones Unitarias		Proyecto: ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL L.O.U. Localización: LABORATORIO DE OPERACIONES	Sheet 1 Of 1		
LISTA DE EQUIPOS DE LAS PRACTICAS AUTOMATIZABLES					
Ubicación	Identificación	Descripción	Cantidad	Presión de Operación (psi)	Temperatura de Operación (°F)
DTI-A	S-1101	Separador	1	14.7	80
DTI-A	FIL	Filtro de Particulas	1	14.7	80
DTI-A	M-1101	Manómetro de Bourdon	1	100	78
DTI-A	FI-1101	Rotámetro	1	100	78
DTI-A	C-1101	Columna de Relleno	1	14.7	82
DTI-A	FI-1102	Rotámetro	1	14.7	82
DTI-A	P-1101A/B	Bomba Centrífuga	1	-	82
DTI-B	T-1101	Tanque Cerrado	1	14.7	78
DTI-B	FIL-1101	Filtro Prensa	1	100	78
DTI-B	MO-1101	Motor	1	14.7	78
DTI-B	P-1101A/B	Bomba Centrífuga	1	-	78
DTI-C	T-1101	Tanque Abierto a la Atmosfera	1	14.7	83
DTI-C	P-1101A/B	Bomba Centrífuga	1	-	83
DTI-C	P-1102A/B	Bomba Centrífuga	1	-	83
DTI-C	PIA-1101	Manómetro de Bourdon	1	0-200	83
DTI-C	PIB-1101	Manómetro de Bourdon	1	0-86	83
DTI-D	K-1101	Ventilador Centrífugo	1	2.7	83
DTI-D	FE-1101	Tubo de Venturi	1	-	83
DTI-D	FE-1102	Tubo de Pitot	1	-	83
DTI-D	M-1101	Manómetro Diferencial	1	-	83
DTI-E	M-1102	Manómetro Diferencial	1	-	83
DTI-E	T-1101	Tanque Cilíndrico Abierto a la Atmosfera	1	14.7	100
DTI-E	T-1102	Tanque Cilíndrico Abierto a la Atmosfera	1	14.7	100
DTI-E	T-1103	Tanque Cilíndrico Abierto a la Atmosfera	1	14.7	100
DTI-E	P-1101A/B	Bomba Centrífuga	1	-	100
DTI-E	E-1101	Serpentín	1	60	100


**A.5. LISTA DE INSTRUMENTOS REQUERIDA PARA LA
SUPERVISIÓN Y CONTROL DE LAS PRÁCTICAS
AUTOMATIZABLES**


		Universidad Central de Venezuela Escuela de Ingeniería Química Laboratorio de Operaciones Unitarias	Proyecto: ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL L.O.U. Localización: LABORATORIO DE OPERACIONES	Sheet 1 Of 1
LISTA DE INSTRUMENTOS DE LAS PRACTICAS AUTOMATIZABLES				
Ubicación	Identificación	Descripción	Rango del Instrumento	
DTI-A	PT101	Transmisor de presión de la línea de tubería A1104CS	0-15 psia	
DTI-A	FT101	Transmisor de flujo de la línea de tubería A1104CS	0-60 pie ³ /min	
DTI-A	PT102	Transmisor de presión de la Columna Rellena C-1101	5- 12 pies	
DTI-A	LT101	Transmisor de nivel de la Columna Rellena C-1101	5- 12 pies	
DTI-B	FT101	Transmisor de flujo de la línea de tubería S1105CS	0-60 pie ³ /min	
DTI-B	PT102	Transmisor de presión de la línea de tubería S1103CS	0-100 psia	
DTI-C	LT101	Transmisor de nivel del Tanque T-1101	1 -7 pies	
DTI-D	FT101	Transmisor de flujo de la línea de tubería A1101CS	0-30000 Lbm/h	
DTI-D	FT102	Transmisor de flujo de la línea de tubería A1101CS	0-30000 Lbm/h	
DTI-E	LT101	Transmisor de nivel del Tanque T-1101	1/2-3 pies	
DTI-E	LT102	Transmisor de nivel del Tanque T-1102	1/2-2 pies	
DTI-E	LT103	Transmisión de nivel del Tanque T-1103	1/2-2 pies	
DTI-E	PSLL101	Transmisor de presión de la línea de tubería W1102CS	0-100 psia	
DTI-E	TT101	Transmisor de temperatura de la línea de tubería W1102CS	70-150 F	
DTI-E	FT101	Transmisor de flujo de la línea de tubería W1102CS	0-5000Lbm/h	
DTI-E	FT102	Transmisor de flujo de la línea de tubería W1103CS	0-4000Lbm/h	

***A.6. LISTAS DE VÁLVULAS DE CONTROL REQUERIDAS
POR LAS PRÁCTICAS AUTOMATIZABLES***


		Universidad Central de Venezuela Escuela de Ingeniería Química Laboratorio de Operaciones Unitarias		Proyecto: ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL L.O.U.	Sheet 1 Of 1
				Localización: LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS	
LISTA DE VÁLVULAS					
Ubicación	Identificación	Tipo de Válvula	Variable Controlada		Falla
DTI-A	PCV-101	Globo	Reguladora de Presión a la Columna C-1101		FC-ATO
DTI-A	LCV-101	Globo	Reguladora de Nivel en la Columna C-1101		FC-ATO
DTI-B	FCV-101	Globo	Reguladora de Flujo al FIL-1101		FC-ATO
DTI-C	FCV-101	Globo	Reguladora de Nivel en el Tanque T-1101		FA-ATC
DTI-D	FCV-101	Globo	Reguladora de flujo de aire y presión de los equipos FE-1101 y FE-1102		FC-ATO
DTI-E	LCV-101	Globo	Reguladora de Nivel al Tanque T-1101		FC-ATO
DTI-E	FCV-101	Globo	Reguladora de Flujo de Recirculación al Tanque T-1101		FA-ATC
DTI-E	TCV-101	Globo	Reguladora de Flujo de Vapor al Serpentín E-1101		FC-ATO
DTI-E	LCV-102A	Globo	Reguladora de Flujo de Alimentación al Tanque T-1102		FC-ATO
DTI-E	LCV-102B	Globo	Reguladora de Nivel al Tanque T-1102		FA-ATC
DTI-E	LCV-103A	Globo	Reguladora de Nivel al Tanque T-1103		FC-ATO
DTI-E	LCV-103B	Globo	Reguladora de Nivel al Tanque T-1103		FC-ATO

**A.7. LISTA DE CONTROLADORES DE LAS PRÁCTICAS
AUTOMATIZABLES**


 Universidad Central de Venezuela Escuela de Ingeniería Química Laboratorio de Operaciones Unitarias		Proyecto: ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL L.O.U. Localización: LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS		Sheet 1 Of 1			
LISTA DE CONTROLADORES DE LAS PRACTICAS AUTOMATIZABLES							
Ubicación	Identificación	Variable Controlada	Variable Manipulada	Justificación del Lazo de Control	Tipo	Acción	Set Point
DTI-A	FIC-101	Nivel de la Columna C-1101	Flujo de Alimentación a la Columna C-1101	Evitar el desbordamiento o vaciado de la Columna C-1101, resguardando la seguridad de la misma.	P	Inversa	20 Lt/min.
DTI-A	LIC-101	Nivel de la Columna C-1101	Flujo de Alimentación a la Columna C-1101	Evitar el desbordamiento o vaciado de la Columna C-1101, resguardando la seguridad de la misma.	P	Inversa	50 % del volumen de la Columna C-1101
DTI-A	PIC-101	Presión mínima de Operación del Manómetro MB-1	Flujo de Alimentación a la Columna C-1101	Evitar la excesiva presión en la alimentación al sistema.	PI	Inversa	30 psi
DTI-B	FIC-101	Caudal de lavado del Filtro FIL-1101	Flujo de Alimentación al Filtro FIL-1101.	Evitar el desbordamiento del FIL-1101, resguardando la seguridad del mismo.	P	Inversa	30 Lt/min.
DTI-B	PIC-101	Presión mínima de Operación del Manómetro M1	Flujo de Alimentación al Filtro FIL-1101.	Evitar la excesiva presión en la alimentación al sistema.	PI	Inversa	12 psi
DTI-C	LIC-101	Nivel del Tanque T-1101	Flujo de Salida del Tanque T-1101.	Evitar el desbordamiento o vaciado del Tanque T-1101, resguardando la seguridad del mismo.	P	Inversa	40% del volumen del Tanque T-1101
DTI-D	FIC-101	Caudal de Operación del Tubo de Venturi FE-1101	Flujo de Alimentación al Tubo de Venturi FE-1101.	Evitar colapso del Equipo, resguardando la seguridad del mismo.	P	Directa	3000 Lb/h
DTI-D	PIC-101	Presión mínima de Operación del Tubo de Venturi FE-1101	Flujo de Alimentación al Tubo de Venturi FE-1101.	Evitar la excesiva presión en el manómetro M-1101.	PI	Directa	15 psi
DTI-D	FIC-102	Caudal de Operación del Tubo de Pitot FE-1102	Flujo de Alimentación al Tubo de Venturi FE-1101.	Evitar colapso del Equipo, resguardando la seguridad del mismo.	P	Directa	3000 Lb/h
DTI-D	PIC-102	Presión mínima de Operación del Tubo de Pitot FE-1102	Flujo de Alimentación al Tubo de Venturi FE-1101.	Evitar la excesiva presión en el manómetro M-1102.	PI	Directa	15 psi

		Universidad Central de Venezuela Escuela de Ingeniería Química Laboratorio de Operaciones Unitarias		Proyecto: ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL L.O.U. Localización: LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS	Sheet 1 Of 1		
LISTA DE CONTROLADORES DE LA PRACTICA BALANCES EN ESTADO NO ESTACIONARIO							
Ubicación	Identificación	Variable Controlada	Variable Manipulada	Justificación del Lazo de Control	Tipo	Acción	Set Point
DTI-E	TIC-101	Temperatura del líquido del Tanque T-1101	Flujo de vapor de Alimentación al Serpentin E-1101	Mantener la temperatura del Tanque T-1101 dentro del rango apropiado para garantizar la seguridad del equipo y operabilidad del proceso.	PID	Inversa	40 °C / 100 °F
DTI-E	LIC-101	Nivel del Tanque T-1101	Flujo de Alimentación a la entrada del Tanque T-1101	Evitar el desbordamiento o vaciado del Tanque T-1101, resguardando la seguridad del tanque y el serpentín.	PID	Inversa	70 % del volumen del Tanque T-1101
DTI-E	FIC-101	Caudal mínimo de Operación de la Bomba P-1101	Flujo de Recirculación al Tanque T-1101	Evitar el estrangulamiento y cavitación de la Bomba P-1101 para garantizar el buen funcionamiento y la vida útil de la misma.	PID	Directa	5 Lt/min.
DTI-E	FIC-102	Flujo de Alimentación al Tanque T-1102	Flujo de Alimentación a la entrada del Tanque T-1102.	Evitar el vaciado del Tanque T-1102, resguardando la seguridad del mismo.	PID	Directa	25 Lt/min.
DTI-E	LIC-102A	Nivel del Tanque T-1102	Flujo de Alimentación a la entrada del Tanque T-1102.	Evitar el desbordamiento del Tanque T-1102, resguardando la seguridad del mismo.	PID	Inversa	85 % del volumen del Tanque T-1102
DTI-E	LIC-102B	Nivel del Tanque T-1102	Flujo de Salida del Tanque T-1102.	Evitar el desbordamiento o vaciado del Tanque T-1102, resguardando la seguridad del mismo.	PID	Inversa	54% del volumen del Tanque T-1102
DTI-E	LIC-103	Nivel del Tanque T-1103	Flujos de Salida del Tanque T-1102.	Evitar el desbordamiento o vaciado del Tanque T-1103, resguardando la seguridad del mismo.	PID	Directa	53% del volumen del Tanque T-1102


**A.8. LISTAS DE TUBERÍAS DE LAS PRÁCTICAS
AUTOMATIZABLES**


 Universidad Central de Venezuela Escuela de Ingeniería Química Laboratorio de Operaciones Unitarias				Proyecto: ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL L.O.U. Localización: LABORATORIO DE OPERACIONES		Sheet 1 Of 1		
LISTA DE TUBERÍAS DE LAS PRACTICAS AUTOMATIZABLES								
Ubicación	TUBERÍA			Fase	Servicio	DESCRIPCIÓN		Temperatura de Operación (°F)
	Identificación	Clase	Tamaño (Ø nominal)			Desde	Hacia	
DTL-A	A1101CS	40	1"	AIRE	P	Alimentación	S-1101	80
DTL-A	A1102CS	40	3/4"	AIRE	P	S-1101	FIL-1101	80
DTL-A	A1103CS	40	1/2"	AIRE	P	FIL-1101	M-1101	80
DTL-A	A1104CS	40	1"	AIRE	P	M-1101	C-1101	80
DTL-A	W1101CS	40	1/2"	L	P	C-1101	P-1101A	82
DTL-A	W1102CS	40	1"	L	P	C-1101	P-1101A	82
DTL-A	W1103CS	40	1"	L	P	P-1101A	C-1101	82
DTL-B	W1101CS	40	1/2"	L	P	Alimentación	P-1101A	79
DTL-B	S1101CS	40	1/2"	Suspensión	P	T-1101	P-1101A	80
DTL-B	S1105CS	40	1 1/2"	Suspensión	P	P-1101A	T-1101	78
DTL-B	W1102CS	40	1/2"	L	P	Alimentación	P-1101A	79
DTL-B	S1102CS	40	1 1/2"	Suspensión	P	P-1101A	FIL-1101	78
DTL-B	S1103CS	40	1"	Suspensión	P	P-1101A	FIL-1101	79
DTL-B	S1104CS	40	1"	Suspensión	P	FIL-1101	Producto	79
DTL-B	WW1101CS	40	1 1/2"	Agua	S	P-1101A	Desague	79
DTL-C	W1108CS	40	1"	L	P	FIL	T-1101	83
DTL-C	W1101CS	40	1"	L	P	T-1101	P-1101A	83
DTL-C	W1102CS	40	1"	L	P	T-1101	P-1101A	83
DTL-C	W1103CS	40	1"	L	P	T-1101	P-1101A	83
DTL-C	W1104CS	40	1"	L	P	T-1101	P-1102A	83
DTL-C	W1105CS	40	1"	L	P	T-1101	P-1102A	83
DTL-C	W1106CS	40	1"	L	P	P-1101A	FIL	83
DTL-C	W1107CS	40	1"	L	P	P-1102A	FIL	83
DTL-D	A1101CS	40	4"	Aire	P	K-1101	FE-1101	82
DTL-D	A1102CS	40	4"	Aire	P	FE-1101	FE-1102	82
DTL-D	A1103CS	40	4"	Aire	P	FE-1102	Ambiente	82
DTL-E	W1101CS	40	3/4"	L	P	Alimentación	T-1101	79
DTL-E	W1102CS	40	3/4"	L	P	T-1101	P-1102A	100
DTL-E	W1102CS	40	3/4"	L	P	P-1102A	FIL	100
DTL-E	W1103CS	40	3/4"	L	P	FIL	T-1102	100
DTL-E	W1104CS	40	3/4"	L	P	T-1102	T-1103	100
DTL-E	W1105CS	40	1/2"	L	P	T-1103	T-1101	100
DTL-E	W1106CS	40	1/2"	L	P	T-1103	T-1101	100
DTL-E	W1107CS	40	3/4"	L	P	P-1102A	T-1101	100
DTL-E	W1108CS	40	3/4"	L	P	T-1103	Almacenaje	100
DTL-E	W1109CS	40	3/4"	L	P	T-1103	Desague	100
DTL-E	W11010CS	40	3/4"	L	P	T-1101	Desague	100


**A.9. LISTA DE ACCESORIOS REQUERIDOS PARA LAS
PRÁCTICAS AUTOMATIZABLES**


		Universidad Central de Venezuela Escuela de Ingeniería Química Laboratorio de Operaciones Unitarias		Proyecto: ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL L.O.U.	Sheet 1 Of 1
				Localización: LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS	
LISTA DE ACCESORIOS PARA EL SISTEMA DE BALANES EN ESTADO NO ESTACIONARIO					
Ubicación	Instrumento	Cant.	Unid.	Descripción	Código Sicoma
DTI-E	LT-101 / LT-102 LT-103	6	Mts.	TUBO, 316SS, SIN COSTURA, 1/2" OD, ESP 0.049	40.01.SS.00.05.G.Z.Z.ZZ
		9	Pzas.	CONECTOR MACHO, 316SS, 1/2" OD x 1/2" NPT-M	41.02.SS.05.0.05.M.Z.ZZ
	LCV101 LCV102A FCV101 LCV103B LCV103A LCV102B	6	Pzas.	NIPLE, SCH80, CS, ASTM A-53 Gr.B, GALV., 1/4" NPT-M	10.NN.AA.AKA.AJ.X3.00
		12	Mts.	TUBO, COBRE, ASTM B75, SIN COSTURA, 1/4" OD, ESP 0.035", CON CHAQUETA DE PVC	40.01.C0.00.03.D.P.Z.ZZ
		12	Pzas.	CONECTOR MACHO, BRONCE, 1/4" NPT-M	41.02.BR.03.0.03.M.Z.ZZ
		24	Mts.	TUBO, COBRE, ASTM B75, SIN COSTURA, 3/8" OD, ESP 0.035",	40.01.C0.00.04.D.P.Z.ZZ
		6	Pzas.	CONECTOR MACHO, BRONCE, 3/8" OD x 1/4" NPT-M	41.02.BR.04.0.03.M.Z.ZZ
		6	Pzas.	CONECTOR MACHO, BRONCE, 3/8" OD x 1/2" NPT-M	41.02.BR.04.0.05.M.Z.ZZ
		6	Pzas.	UNION, BRONCE, 3/8" OD x 3/8" OD	41.01.BR.04.0.04.0.Z.ZZ
		FT102 / FT101	8	Mts.	TUBO, 316SS, SIN COSTURA, 1/2" OD, ESP 0.065"
8	Pzas.		CONECTOR MACHO, 316SS, 1/2" OD x 1/2" NPT-M	41.02.SS.05.0.05.M.Z.ZZ	


***A.10. HOJAS DE ESPECIFICACIONES DE LOS
INSTRUMENTOS Y EQUIPOS REQUERIDOS PARA
LA PRÁCTICA “BALANCES EN ESTADO NO ESTACIONARIO”***


 <p>Universidad Central de Venezuela Escuela de Ingeniería Química</p>		INSTRUMENTO VÁLVULA DE CONTROL		Sheet 1 Of 1	
		Proyecto: ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL L.O.U.		Nº Ch, C.	Revisó A, J.L. Fecha 15/03/07 21/05/07 06/06/07
Documento N°:		Localización: LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS		REV. 0	
GENERAL	1. Tag N°	TCV101			
	2. Service	Water			
	3. Line N°/ Vessel N°	E-1101			
	4. Pipe Line Size / Schedule N°	In 1/2" O.D: 0.84 Wal:0.109 Sch: 40 Out 1/2" O.D: 0.84 Wal:0.109 Sch: 40			
	5. Type	1/2" Valve			
	6. Electrical Conn.	1/2" NPT <input checked="" type="checkbox"/> Other _____			
BODY / BONNET / GENERAL	6. Type	Body / Bonnet _____ Globe Recipocating / Integral Bonnet			
	7. Type	Trim: adj. Cv,2.3 (No1) Plug: Linear Contoured S.R. Clamped			
	8. Material	Body Mat'1: A351gr CF3M		Packing Bonnet _____	
	9. Trim	Size Linear Contoured Characteristic _____ %		Material 316 / SS _____	
10. Flow Dir.	Flow to Open _____		Rated Cv: 2.3 Max. Rated Cv: 2.3		
ACTUATOR	11. Model	Spring-Diaphragm _____		Type Air to Open, fail close Model: 87	
	12. Standard Signals	3 - 15 # <input checked="" type="checkbox"/> 3 - 27 # <input type="checkbox"/> 6 - 30 # <input type="checkbox"/> Size: 6 max. Avail. 80psig			
INNERVALVE CHART	13. Charts	Max. Cv 1.39		Orifice Dia. (in) _____ Orifice Area (sq in) _____	
	14. Nominal Rangeability	Linear _____ Equal % _____			
ACCESORY	15. Positioner	Electropneumatic / Model 47000P / Characteristic: linear / Action: Direct			
SERVICE CONDITIONS	16. Units.	Velocity ft/s _____			
	17. Pressure Drop.	Min. 3 psi Max. 8 psi			
	18. Quant Norm.	Flow Rate: 70 gpm		Inlet Pressure: 54 psia Outlet Pressure: 48.4 psia Temperature: 320 °F	
	19. Pressure Max.	Inlet 77.4 psia		Outlet 69.4 psia	
Tag.	20. Element	Serial N° _____ Modelo Series 28000 CC			
Options	21. Manufacturer	Masoneilan Control Valve / Series 28000			
Notes:					
Tag.	PI&D	Process Fluid	Line	Range (lb/h)	Equip.
TCV101	DTI-E	Agua		0 - 150	E-1101


 <p>Universidad Central de Venezuela Escuela de Ingeniería Química</p>		<p>INSTRUMENTO VÁLVULA DE CONTROL</p>		<p>Sheet 1 Of 1</p>													
<p>Documento N°:</p>		<p>Proyecto: ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL L.O.U.</p>		<table border="1"> <tr> <td>N°</td> <td>Por Ch. C.</td> <td>Revisó A, J.L.</td> <td>Aprobó B, J</td> </tr> <tr> <td colspan="4">Fecha</td> </tr> <tr> <td>15/03/07</td> <td>21/05/07</td> <td colspan="2">06/06/07</td> </tr> </table>		N°	Por Ch. C.	Revisó A, J.L.	Aprobó B, J	Fecha				15/03/07	21/05/07	06/06/07	
N°	Por Ch. C.	Revisó A, J.L.	Aprobó B, J														
Fecha																	
15/03/07	21/05/07	06/06/07															
<p>Localización: LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS</p>		<p>REV. 0</p>															
GENERAL	1. Tag N°	LCV101															
	2. Service	Water															
	3. Line N° / Vessel N°	W1101CS															
	4. Pipe Line Size / Schedule N°	In 3/4" O.D: 1.05 Wal:0.113 Sch: 40 Out 3/4" O.D: 1.05 Wal:0.113 Sch: 40															
	5. Type	3/4" Valve															
	6. Electrical Conn.	1/2" NPT <input checked="" type="checkbox"/> Other _____															
BODY / BONNET / GENERAL	6. Type	Body / Bonnet <u>Globe Reciprocating / Standard Bonnet</u>															
	7. Size	Rating <u>ANSI 150</u> ANSI Class <u>150 IV</u>															
	7. Type	Trim: Linear Contoured Plug: <u>Linear Contoured</u> S.R. <u>Quick Change</u>															
	8. Material	Body Mat'l: <u>A216 gr WCC</u> Packing Bonnet _____															
	9. Trim	Size <u>Linear Contoured</u> Characteristic <u> </u> % Material <u>316 / SS</u>															
10. Flow Dir.	<u>Flow to Open</u> Rated Cv: <u>12</u> Max. Rated Cv: <u>12</u> <u>Leak Class IV</u>																
ACTUATOR	11. Model	<u>Spring-Diaphragm</u> Type <u>Air to Open, fail close</u> Model: 87															
	12. Standard Signals	3 - 15 # <input checked="" type="checkbox"/> 3 - 27 # <input type="checkbox"/> 6 - 30 # <input type="checkbox"/> Size: 6 max. Avail. 80psig															
INNERVALVE CHART	13. Charts	Max. Cv <u>3.26</u> Orifice Dia. (in) <u> </u> Orifice Area (sq in) <u> </u>															
	14. Nominal Rangeability	Linear <u> </u> Equal % <u> </u>															
ACCESSORY	15. Positioner	Electropneumatic / Model <u>47000P</u> / Characteristic: <u>linear</u> / Action: <u>Direct</u>															
SERVICE CONDITIONS	16. Units.	Velocity <u>ft/s</u>															
	17. Pressure Drop.	Min. <u>3 psi</u> Max. <u>8 psi</u>															
	18. Quant Norm.	Flow Rate: <u>6.46 gpm</u> Inlet Pressure: <u>48</u> psia Outlet Pressure: <u>42.4</u> psia Temperature: <u>83</u> °F															
	19. Pressure Max.	Inlet <u>68.7</u> psia Outlet <u>60.7</u> psia															
Tag.	20. Element	Serial N° <u> </u> Modelo <u>Series 21000</u> CE															
Options	21. Manufacturer	Masoneilan Control Valve / Series 21000															
Notes:																	
Tag.	PI&D	Process Fluid	Line	Range (gpm)	Equip.												
LCV101	DTI-E	Agua	W1101CS	0 - 9.24	Valve												


 <p>Universidad Central de Venezuela Escuela de Ingeniería Química</p>		<p>INSTRUMENTO VÁLVULA DE CONTROL</p>		<p>Sheet 1 Of 1</p>													
<p>Documento N°:</p>		<p>Proyecto: ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL L.O.U.</p>		<table border="1"> <tr> <th>N°</th> <th>Por Ch. C.</th> <th>Revisó A, J.L.</th> <th>Aprobó B, J</th> </tr> <tr> <td colspan="4">Fecha</td> </tr> <tr> <td>15/03/07</td> <td>21/05/07</td> <td>06/06/07</td> <td></td> </tr> </table>		N°	Por Ch. C.	Revisó A, J.L.	Aprobó B, J	Fecha				15/03/07	21/05/07	06/06/07	
N°	Por Ch. C.	Revisó A, J.L.	Aprobó B, J														
Fecha																	
15/03/07	21/05/07	06/06/07															
<p>Localización: LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS</p>		<p>REV. 0</p>															
GENERAL	1. Tag N°	FCV101															
	2. Service	Water															
	3. Line N°/ Vessel N°	W-1107CS															
	4. Pipe Line Size / Schedule N°	In 3/4" O.D: 1.05 Wal:0.113 Sch: 40 Out 3/4" O.D: 1.05 Wal:0.113 Sch: 40															
	5. Type	3/4" Valve															
	6. Electrical Conn.	1/2" NPT <input checked="" type="checkbox"/> Other _____															
BODY / BONNET / GENERAL	6. Type Size	Body / Bonnet <u>Globe Recipocating / Standard Bonnet</u> Rating <u>ANSI 150</u> ANSI Class <u>150 IV</u>															
	7. Type	Trim: Linear Contoured Plug: <u>Linear Contoured</u> S.R. Quick Change															
	8. Material	Body Mat'l: <u>A216 gr WCC</u> Packing Bonnet _____															
	9. Trim	Size <u>Linear Contoured</u> Characteristic <u> </u> % Material <u>316 / SS</u>															
10. Flow Dir.	<u>Flow to Clouse</u> Rated Cv: <u>12</u> Max. Rated Cv: <u>12</u> <u>Leak Class IV</u>																
ACTUATOR	11. Model	<u>Spring-Diaphragm</u> Type <u>Air to Clouse, fail Open</u> Model: 87															
	12. Standard Signals	3 - 15 # <input checked="" type="checkbox"/> 3 - 27 # <input type="checkbox"/> 6 - 30 # <input type="checkbox"/> Size: 6 max. Avail. 80psig															
INNERVALVE CHART	13. Charts	Max. Cv <u>2.87</u> Orifice Dia. (in) <u> </u> Orifice Area (sq in) <u> </u>															
	14. Nominal Rangeability	Linear <u> </u> Equal % <u> </u>															
ACCESORY	15. Positioner	Electropneumatic / Model <u>47000P</u> / Characteristic: <u>linear</u> / Action: <u>Direct</u>															
SERVICE CONDITIONS	16. Units.	Velocity <u>ft/s</u>															
	17. Pressure Drop.	Min. <u>3 psi</u> Max. <u>8 psi</u>															
	18. Quant Norm.	Flow Rate: <u>5.72 gpm</u> Inlet Pressure: <u>48.4 psia</u> Outlet Pressure: <u>42 psia</u> Temperature: <u>100 °F</u>															
	19. Pressure Max.	Inlet <u>68.7 psia</u> Outlet <u>60.7 psia</u>															
Tag.	20. Element	Serial N° <u> </u> Modelo <u>Series 21000</u> <u>CE</u>															
Options	21. Manufacturer	<u>Masonellan Control Valve / Series 21000</u>															
Notes:																	
Tag.	PI&D	Process Fluid	Line	Range (gpm)	Equip.												
FCV101	DTI-E	Agua	W-1107CS	0 - 9	FCV101												


 Universidad Central de Venezuela Escuela de Ingeniería Química		INSTRUMENTO VÁLVULA DE CONTROL		Sheet 1 Of 1	
Documento N°:		Proyecto: ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL L.O.U.		N° Por Ch. C. Revisó A, J.L. Aprobó B, J. Fecha 15/03/07 21/05/07 06/06/07	
Localización: LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS		REV. 0			
GENERAL	1. Tag N°	LCV102A			
	2. Service	Water			
	3. Line N°/ Vessel N°	W-1103CS			
	4. Pipe Line Size / Schedule N°	In 3/4" O.D: 1.05 Wal:0.113 Sch: 40 Out 3/4" O.D: 1.05 Wal:0.113 Sch: 40			
	5. Type	3/4" Valve			
	6. Electrical Conn.	1/2" NPT <input checked="" type="checkbox"/> Other _____			
BODY / BONNET / GENERAL	6. Type Size	Body / Bonnet <u>Globe Recipocating / Integral Bonnet</u> Rating <u>ANSI 150</u> ANSI Class <u>150 IV</u>			
	7. Type	Trim: adj. Cv,2.3 (No1) Plug:Linear Contoured S.R. Clamped			
	8. Material	Body Mat'l: <u>A351gr CF3M</u> Packing Bonnet _____			
	9. Trim	Size <u>Linear Contoured</u> Characteristic <u> </u> % Material <u>316 / SS</u>			
	10. Flow Dir.	<u>Flow to Open</u> Rated Cv: <u>2.3</u> Max. Rated Cv: <u>2.3</u> Leak Class <u>IV</u>			
ACTUATOR	11. Model	<u>Spring-Diaphragm</u> Type <u>Air to Open, fail Clouse</u> Model: 87			
	12. Standard Signals	3 - 15 # <input checked="" type="checkbox"/> 3 - 27 # <input type="checkbox"/> 6 - 30 # <input type="checkbox"/> Size: 6 max. Avail. 80psig			
INNERVALVE CHART	13. Charts	Max. Cv <u>1.95</u> Orifice Dia. (in) <u> </u> Orifice Area (sq in) <u> </u>			
	14. Nominal Rangeability	Linear <u> </u> Equal % <u> </u>			
ACCESORY	15. Positioner	Electropneumatic / Model <u>47000P</u> / Characteristic: <u>linear</u> / Action: <u>Direct</u>			
SERVICE CONDITIONS	16. Units.	Velocity <u>ft/s</u>			
	17. Pressure Drop.	Min. <u>3 psi</u> Max. <u>8 psi</u>			
	18. Quant Norm.	Flow Rate: <u>5.5 gpm</u> Inlet Pressure: <u>48.4 psia</u> Outlet Pressure: <u>42.4 psia</u> Temperature: <u>100 °F</u>			
	19. Pressure Max.	Inlet <u>68.7 psia</u> Outlet <u>60.7 psia</u>			
Tag.	20. Element	Serial N° <u> </u> Modelo <u>Series 28000</u> CE			
Options	21. Manufacturer	Masoneilan Control Valve / Series 28000			
Notes:					
Tag.	PI&D	Process Fluid	Line	Range (gpm)	Equip.
LCV102A	DTI-E	Agua	W-1103CS	0 - 6	LCV102A


 Universidad Central de Venezuela Escuela de Ingeniería Química		INSTRUMENTO VÁLVULA DE CONTROL		Sheet 1 Of 1		
Documento N°:		Proyecto: ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL L.O.U.		N° Por Ch. C. Revisó A, J.L. Aprobó B, J. Fecha		
Localización: LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS		15/03/07 21/05/07 06/06/07		REV. 0		
GENERAL	1. Tag N°	LCV102B				
	2. Service	Water				
	3. Line N°/ Vessel N°	W-1104CS				
	4. Pipe Line Size / Schedule N°	In 3/4" O.D: 1.05 Wal:0.113 Sch: 40 Out 3/4" O.D: 1.05 Wal:0.113 Sch: 40				
	5. Type	3/4" Valve				
	6. Electrical Conn.	1/2" NPT <input checked="" type="checkbox"/> Other _____				
BODY / BONNET / GENERAL	6. Type Size	Body / Bonnet <u>Globe Recipocating / Standard Bonnet</u> Rating <u>ANSI 600</u> ANSI Class <u>IV</u>				
	7. Type	Trim: Linear Contoured Plug: Linear Contoured S.R. Quick Change				
	8. Material	Body Mat'l: <u>A216 gr WCC</u> Packing Bonnet _____				
	9. Trim	Size <u>Linear Contoured</u> Characteristic <u>%</u> Material <u>316 / SS</u>				
10. Flow Dir.	<u>Flow to Clouse</u> Rated Cv: <u>12</u> Max. Rated Cv: <u>12</u> <u>Leak Class IV</u>					
ACTUATOR	11. Model	<u>Spring-Diaphragm</u> Type <u>Air to Clouse, fail Open</u> Model: 87				
	12. Standard Signals	3 - 15 # <input checked="" type="checkbox"/> 3 - 27 # <input type="checkbox"/> 6 - 30 # <input type="checkbox"/> Size: 6 max. Avail. 80psig				
INNERVALVE CHART	13. Charts	Max. Cv <u>3.17</u> Orifice Dia. (in) _____ Orifice Area (sq in) _____				
	14. Nominal Rangeability	Linear _____ Equal % _____				
ACCESSORY	15. Positioner	Electropneumatic / Model <u>47000P</u> / Characteristic: <u>linear</u> / Action: <u>Direct</u>				
SERVICE CONDITIONS	16. Units.	Velocity <u>ft/s</u>				
	17. Pressure Drop.	Min. <u>1 psi</u> Max. <u>3 psi</u>				
	18. Quant Norm.	Flow Rate: <u>5.5 gpm</u> Inlet Pressure: <u>15.3 psia</u> Outlet Pressure: <u>12.5 psia</u> Temperature: <u>100 °F</u>				
19. Pressure Max.	Inlet <u>15.5 psia</u> Outlet <u>12.8 psia</u>					
Tag.	20. Element	Serial N° _____ Modelo <u>Series 21000</u> CE				
Options	21. Manufacturer	Masoneilan Control Valve / Series 21000				
Notes:						
Tag.	PI&D	Process Fluid	Line	Range (gpm)	Equip.	
LCV102B	DTI-E	Agua	W-1104CS	0 - 6	LCV102B	


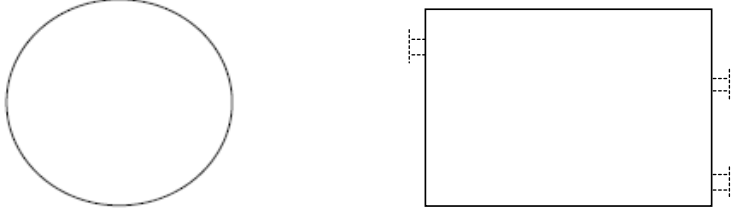
 <p>Universidad Central de Venezuela Escuela de Ingeniería Química</p>		INSTRUMENTO VÁLVULA DE CONTROL		Sheet 1 Of 1			
		Proyecto: ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL L.O.U. Localización: LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS		Nº	Por Ch. C.	Revisó A, J.L.	Aprobó B, J
				Fecha			
Documento N°:				15/03/07	21/05/07	06/06/07	
				REV. 0			
GENERAL	1. Tag N°	LCV103A					
	2. Service	Water					
	3. Line N°/ Vessel N°	W-1109CS					
	4. Pipe Line Size / Schedule N°	In 3/4" O.D: 1.05 Wal:0.113 Sch: 40 Out 3/4" O.D: 1.05 Wal:0.113 Sch: 40					
	5. Type	3/4" Valve					
	6. Electrical Conn.	1/2" NPT <input checked="" type="checkbox"/> Other _____					
BODY / BONNET / GENERAL	6. Type Size	Body / Bonnet <u>Globe Reciprocating / Standard Bonnet</u> Rating <u>ANSI 600</u> ANSI Class <u>IV</u>					
	7. Type	Trim: Linear Contoured Plug: Linear Contoured S.R. Quick Change					
	8. Material	Body Mat'l: <u>A216 gr WCC</u>		Packing Bonnet _____			
	9. Trim	Size <u>Linear Contoured</u> Characteristic <u> </u> %		Material <u>316 / SS</u>			
10. Flow Dir.	<u>Flow to Open</u> Rated Cv: <u>12</u> Max. Rated Cv: <u>12</u>		<u>Leak Class IV</u>				
ACTUATOR	11. Model	<u>Spring-Diaphragm</u> Type <u>Air to Open, fail Clouse</u> Model: 87					
	12. Standard Signals	3 - 15 # <input checked="" type="checkbox"/> 3 - 27 # <input type="checkbox"/> 6 - 30 # <input type="checkbox"/> Size: 6 max. Avail. 80psig					
INNERVALVE CHART	13. Charts	Max. Cv <u>3.3</u> Orifice Dia. (in) _____ Orifice Area (sq in) _____					
	14. Nominal Rangeability	Linear _____ Equal % _____					
ACCESORY	15. Positioner	Electropneumatic / Model <u>47000P</u> / Characteristic: linear / Action: Direct					
SERVICE CONDITIONS	16. Units.	Velocity <u>ft/s</u>					
	17. Pressure Drop.	Min. <u>1 psi</u> Max. <u>3 psi</u>					
	18. Quant Norm.	Flow Rate: <u>5.5 gpm</u>		Inlet Pressure: <u>15 psia</u> Outlet Pressure: <u>12 psia</u>		Temperature: <u>100 °F</u>	
	19. Pressure Max.	Inlet <u>15.3 psia</u>		Outlet <u>12.3 psia</u>			
Tag.	20. Element	Serial N° _____ Modelo <u>Series 21000</u> <u>CC</u>					
Options	21. Manufacturer	<u>Masoneilan Control Valve / Series 21000</u>					
Notes:							
Tag.	PI&D	Process Fluid	Line	Range (gpm)	Equip.		
LCV103A	DTI-E	Agua	W-1109CS	0 - 6	LCV103A		


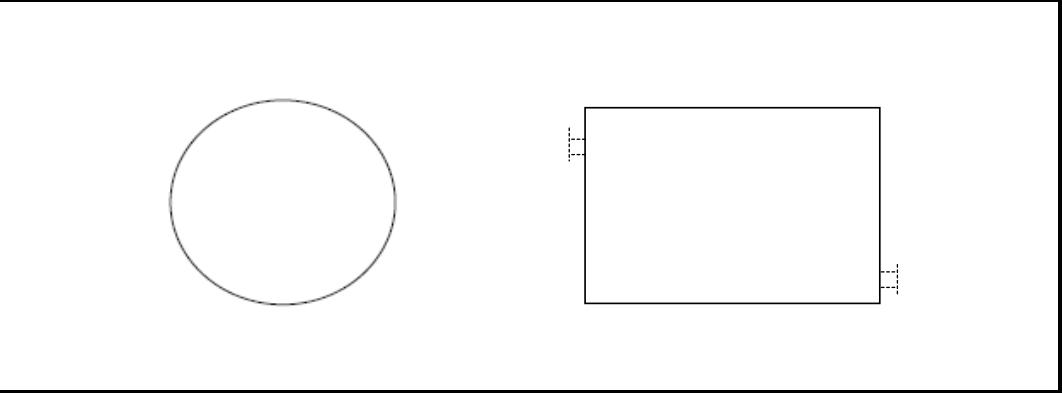
Universidad Central de Venezuela  Escuela de Ingeniería Química		INSTRUMENTO VÁLVULA DE CONTROL		Sheet 1 Of 1	
Documento N°:		Proyecto: ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL L.O.U.		N° Por Ch. Revisó A, Aprobó B. C. J.L. J	
Localización: LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS		Fecha		15/03/07 21/05/07 06/06/07	
REV. 0					
GENERAL	1. Tag N°	LCV103B			
	2. Service	Water			
	3. Line N°/ Vessel N°	W-1106CS			
	4. Pipe Line Size / Schedule N°	In 1/2" O.D: 0.84 Wal:0.109 Sch: 40 Out 1/2" O.D: 0.84 Wal:0.109 Sch: 40			
	5. Type	3/4" Valve			
	6. Electrical Conn.	1/2" NPT <input checked="" type="checkbox"/> Other _____			
BODY / BONNET / GENERAL	6. Type Size	Body / Bonnet <u>Globe Recipocating / Standard Bonnet</u> Rating <u>ANSI 600</u> ANSI Class <u>IV</u>			
	7. Type	Trim: Linear Contoured Plug: Linear Contoured S.R. Quick Change			
	8. Material	Body Mat'l: <u>A216 gr WCC</u> Packing Bonnet _____			
	9. Trim	Size <u>Linear Contoured</u> Characteristic <u> </u> % Material <u>316 / SS</u>			
10. Flow Dir.	<u>Flow to Open</u> Rated Cv: <u>12</u> Max. Rated Cv: <u>12</u> <u>Leak Class IV</u>				
ACTUATOR	11. Model	<u>Spring-Diaphragm</u> Type <u>Air to Open, fail Clouse</u> Model: 87			
	12. Standard Signals	3 - 15 # <input checked="" type="checkbox"/> 3 - 27 # <input type="checkbox"/> 6 - 30 # <input type="checkbox"/> Size: 6 max. Avail. 80psig			
INNERVALVE CHART	13. Charts	Max. Cv <u>2.5</u> Orifice Dia. (in) <u> </u> Orifice Area (sq in) <u> </u>			
	14. Nominal Rangeability	Linear <u> </u> Equal % <u> </u>			
ACCESORY	15. Positioner	Electropneumatic / Model <u>47000P</u> / Characteristic: <u>linear</u> / Action: <u>Direct</u>			
SERVICE CONDITIONS	16. Units.	Velocity <u>ft/s</u>			
	17. Pressure Drop.	Min. <u>1 psi</u> Max. <u>3 psi</u>			
	18. Quant Norm.	Flow Rate: <u>4.4 gpm</u> Inlet Pressure: <u>15</u> Outlet Pressure: <u>12 psia</u> Temperature: <u>100</u> °F			
19. Pressure Max.	Inlet <u>15.3 psia</u> Outlet <u>12.3 psia</u>				
Tag.	20. Element	Serial N° <u> </u> Modelo <u>Series 21000</u> CE			
Options	21. Manufacturer	Masoneilan Control Valve / Series 21000			
Notes:					
Tag.	PI&D	Process Fluid	Line	Range (gpm)	Equip.
LCV103A	DTI-E	Agua	W-1109CS	0 - 5	LCV103A

 Universidad Central de Venezuela Escuela de Ingeniería Química		INSTRUMENTO TRANSMISOR DE PRESION DIFERENCIAL "NIVEL"		Sheet 1 Of 1			
Documento N°:		Proyecto: ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACION DEL L.O.U.		N°	Por Ch. C.		
		Localización: LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS		Revisó A. J.L.	Aprobó B.J.		
				Fecha 15/03/07 20/04/07			
				REV. 0			
GENERAL	1. Tag N°						
	2. Function	Record <input type="checkbox"/>	Indicate <input type="checkbox"/>	Control <input type="checkbox"/>	Trans. <input checked="" type="checkbox"/>	Blind <input checked="" type="checkbox"/>	Other _____
	3. Case	MFR. STD. <input checked="" type="checkbox"/>	Nom. Size <input type="checkbox"/>	Color: MFR. STD. <input checked="" type="checkbox"/>	Other _____		
	4. Mounting	Flush <input type="checkbox"/>	Surface <input checked="" type="checkbox"/>	Yoke <input type="checkbox"/>	Other _____		
	5. Enclosure Class	General Purpose <input checked="" type="checkbox"/>	Dust Ignition Proof <input checked="" type="checkbox"/>	Explosion Proof <input checked="" type="checkbox"/>	Class <u>1</u>		
	6. Power Supply	117 V 60 Hz <input type="checkbox"/>	20 P.S.I.G <input type="checkbox"/>	Other ac _____ dc <u>24</u> Volts D.C.			
	7. Scales	Type _____	Range 1 _____ 2 _____ 3 _____				
	8. Electrical Conn.	1/2" NPT <input checked="" type="checkbox"/>					
	9. Vacuum Region - Min. Pressure	inH2O absolute, Ref. Cond. Atmospheric, Rated Condition: 13, Oper. Limits: 1 Short term					
XMTR	10. Transmitter Output	4 - 20 mA <input checked="" type="checkbox"/>	10 - 50 mA <input type="checkbox"/>	3 - 15 Psig <input type="checkbox"/>	Other <u>Hart Protocol / DE digital</u>		
		For Receiver See Spec Sheet _____					
ELEMENT	11. Service	Gage Press. <input type="checkbox"/>	Vacuum <input type="checkbox"/>	Absolute <input checked="" type="checkbox"/>	Compound <input type="checkbox"/>		
	12. Element Type	Diaphragm <input checked="" type="checkbox"/>	Helix <input type="checkbox"/>	Bourdon <input type="checkbox"/>	Bellows <input type="checkbox"/>		
			Other _____				
	13. Material	316 SS <input checked="" type="checkbox"/>	Ber. Copper <input type="checkbox"/>	Other _____			
			Process Head <u>316 SS, Carbon Steel (zinc-plated), Monel, Hastelloy</u> Body meter <u>CS</u>				
	14. Range	Diaphragms <u>316L SS, Hastelloy C-276</u>	Fill Fluid <u>Silicone DC 200 oil</u>				
	15. Process Data	Fluid _____	Max. Temp <u>257</u> °F	Max. Press _____			
	16. Process Conn.	1/4" NPT <input type="checkbox"/>	1/2" NPT <input checked="" type="checkbox"/>	Other <u>with adapter (on 1/4" NPT Head)</u>			
17. Material	Process Flange <u>316 SS</u>	1/2" NPT Adapter <u>with CS Bolts</u>	Vent Valve <u>316 SS</u>				
18. Mounting Bracket	Flange Bolts <u>316 SS, Hastelloy C-276, Monel</u> Gasket <u>Glass filled PTFE Std.</u>						
		Shape & Material <u>Carbon Steel (zinc-plated) or Stainless Steel angle bracket</u>					
Tag	19. Element	Serial N° _____	Unit <u>bar / Note 1</u>	Max. Span: <u>7</u>	Min. Span <u>0.35</u>		
		M.W.P		Custom Calibration & I.D. in Memory <input checked="" type="checkbox"/>			
		U.R.L: <u>7</u> L.R.L: <u>0.35</u>		O.V.P <u>310</u> Certificate of Conformance (F3391) / CC /Certificate of Origin (F0195)			
Options	20. Manufacturer	ST 3000 Smart Pressure Transmitter / Series 900 Differential Pressure Models Honeywell / Product Code: STD930-A1H-00000-MB,S2,ZS,1C+XXXX					
Note: 1. Applies for temperature range -40 to 125 °C.							
Tag.	PI&D	Process Fluid	Line	Range (&)	Equip.		
LT101	DTI-E	Agua		0- 100	LT101		
LT102	DTI-E	Agua		0- 100	LT102		
LT103	DTI-E	Agua		0- 100	LT103		


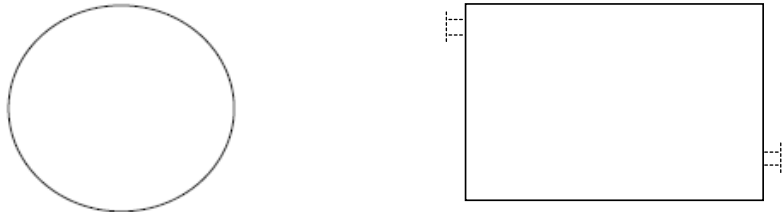
 Universidad Central de Venezuela Escuela de Ingeniería Química		INSTRUMENTO TRANSMISOR DE NIVEL		Sheet 1 Of 1	
Documento N°:		Proyecto: ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACION DEL L.O.U.		N° Por Ch. C. Revisó A. J.L. Aprobó B.J. Fecha 15/03/07 20/04/07	
Localización: LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS		REV. 0			
GENERAL	1. Tag N°				
	2. Function	Record <input type="checkbox"/> Indicate <input type="checkbox"/> Control <input type="checkbox"/> Trans. <input checked="" type="checkbox"/> Blind <input checked="" type="checkbox"/> Other _____			
	3. Case	MFR. STD. <input checked="" type="checkbox"/> Nom. Size <input type="checkbox"/> Color: MFR. STD. <input checked="" type="checkbox"/> Other _____			
	4. Mounting	Flush <input type="checkbox"/> Surface <input checked="" type="checkbox"/> Yoke <input type="checkbox"/> Other _____			
	5. Enclosure Class	General Purpose <input checked="" type="checkbox"/> Dust Ignition Proof <input checked="" type="checkbox"/> Explosion Proof <input checked="" type="checkbox"/> Class <u>I</u> For Use In Intrin. Safe System <input checked="" type="checkbox"/> Other <u>Non - Incendive</u>			
	6. Power Supply	117 V 60 Hz <input type="checkbox"/> 20 P.S.I.G <input type="checkbox"/> Other ac _____ dc <u>24</u> Volts D.C.			
	7. Scales	Type _____ Range 1 _____ 2 _____ 3 _____			
	8. Electrical Conn.	1/2" NPT <input checked="" type="checkbox"/>			
	9. Vacuum Region - Min. Pressure	inH2O absolute. Ref. Cond. Atmospheric. Rated Condition: 13, Oper. Limits: 1 Short term			
XMTR	10. Transmitter Output	4 - 20 mA <input checked="" type="checkbox"/> 10 - 50 mA <input type="checkbox"/> 3 - 15 Psig <input type="checkbox"/> Other <u>Hart Protocol / DE digital</u> For Receiver See Spec Sheet _____			
ELEMENT	11. Service	Gage Press. <input type="checkbox"/> Vacuum <input type="checkbox"/> Absolute <input checked="" type="checkbox"/> Compound <input type="checkbox"/>			
	12. Element Type	Diaphragm <input checked="" type="checkbox"/> Helix <input type="checkbox"/> Bourdon <input type="checkbox"/> Bellows <input type="checkbox"/> Other _____			
	13. Material	316 SS <input checked="" type="checkbox"/> Ber. Copper <input type="checkbox"/> Other _____ Process Head <u>316 SS, Carbon Steel (zinc-plated), Monel, Hastelloy</u> Body meter <u>CS</u> Diaphragms <u>316L SS, Hastelloy C-276</u> Fill Fluid <u>Silicone DC 200 oil</u>			
	14. Range	Fixed <input checked="" type="checkbox"/> Adj. Range _____ Set at _____ Overrange protection to _____			
	15. Process Data	Fluid _____ Max. Temp <u>257 °F</u> Max. Press _____			
	16. Process Conn.	1/4" NPT <input type="checkbox"/> 1/2" NPT <input checked="" type="checkbox"/> Other <u>with adapter (on 1/4" NPT Head)</u>			
	17. Options	Lightning Protection <input checked="" type="checkbox"/> Other _____			
	18. Material	Process Flange <u>316 SS</u> 1/2" NPT Adapter <u>with CS Bolts</u> Vent Valve <u>316 SS</u> Flange Bolts <u>316 SS, Hastelloy C-276, Monel</u> Gasket <u>Glass filled PTFE Std.</u>			
Tag.	19. Element	Serial N° _____ Unit <u>Note 1</u> Max. Span: <u>1000mbar</u> Min. Span: <u>25mbar Note 2</u> U.R.L: <u>1000mbar</u> L.R.L: <u>25mbar</u> M.W.P O.V.P <u>310 bar</u> Custom Calibration & I.D. in Memory <input checked="" type="checkbox"/> NACE Certificate(F0198)/CC 89/336/EEC, Electromagnetic Compatibility (EMC) Directive.			
	Options	Manufacturer: ST 3000 Smart Pressure Transmitter / Series 900 Differential Pressure Models Honeywell / Product Code: STD924-A1H-00000-S2,MB,LP,1C+XXXX			
Note: 1. Applies for temperature range -40 to 125 °C. 2. Recommended minimum span in square root mode is 20inH2O.					
Tag.	PI&D	Process Fluid	Line	Range (%)	Equip.
LT101	DTI-E	Agua		0- 100	LT101
LT102	DTI-E	Agua		0- 100	LT102
LT103	DTI-E	Agua		0- 100	LT103


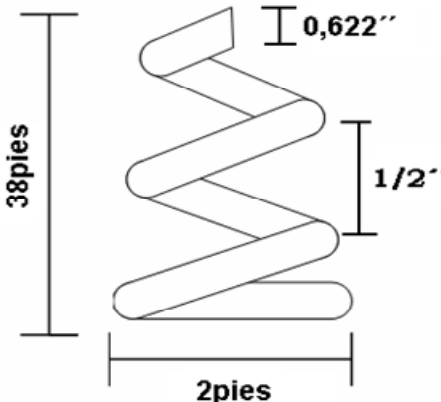
 Universidad Central de Venezuela Escuela de Ingeniería Química		INSTRUMENTO TRANSMISOR DE PRESIÓN ABSOLUTA		Sheet 1 Of 1	
Documento N°:		Proyecto: ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL L.O.U.		N° Por Ch. C.	Revisó A. J.L.
		Localización: LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS		Aprobó B.J.	
				Fecha 15/03/07 20/04/07	
				REV. 0	
GENERAL	1. Tag N°				
	2. Function	Record <input type="checkbox"/> Indicate <input type="checkbox"/> Control <input type="checkbox"/> Trans. <input checked="" type="checkbox"/> Blind <input checked="" type="checkbox"/> Other _____			
	3. Case	MFR. STD. <input checked="" type="checkbox"/> Nom. Size <input type="checkbox"/> Color: MFR. STD. <input checked="" type="checkbox"/> Other _____			
	4. Mounting	Flush <input type="checkbox"/> Surface <input checked="" type="checkbox"/> Yoke <input type="checkbox"/> Other _____			
	5. Enclosure Class	General Purpose <input checked="" type="checkbox"/> Dust Ignition Proof <input checked="" type="checkbox"/> Explosion Proof <input checked="" type="checkbox"/> Class <u>I</u> For Use In Intrin. Safe System <input checked="" type="checkbox"/> Other <u>Non - Incendive</u>			
	6. Power Supply	117 V 60 Hz <input type="checkbox"/> 20 P.S.I.G <input type="checkbox"/> Other ac _____ de <u>24</u> Volts D.C.			
	7. Scales	Type _____ Range 1 _____ 2 _____ 3 _____			
	8. Electrical Conn.	1/2" NPT <input checked="" type="checkbox"/>			
	9. Vacuum Region - Min. Pressure	Operate within specifications above 25 mmHgA. Short term exposure (2 hours at 158 °F) to full vacuum will not result in damage.			
XMTR	10. Transmitter Output	4 - 20 mA <input checked="" type="checkbox"/> 10 - 50 mA <input type="checkbox"/> 3 - 15 Psig <input type="checkbox"/> Other <u>Hart Protocol / DE digital</u> For Receiver See Spec Sheet _____			
ELEMENT	11. Service	Gage Press. <input type="checkbox"/> Vacuum <input type="checkbox"/> Absolute <input checked="" type="checkbox"/> Compound <input type="checkbox"/>			
	12. Element Type	Diaphragm <input checked="" type="checkbox"/> Helix <input type="checkbox"/> Bourdon <input type="checkbox"/> Bellows <input type="checkbox"/> Other _____			
	13. Material	316 SS <input checked="" type="checkbox"/> Ber. Copper <input type="checkbox"/> Other _____ Process Head <u>316 SS, Carbon Steel (zinc-plated), Hastelloy C-276</u> Body meter <u>CS</u> Diaphragms <u>316L SS, Hastelloy C-276</u> Fill Fluid <u>Silicone DC 200 oil</u>			
	14. Range	Fixed <input checked="" type="checkbox"/> Adj. Range _____ Set at _____ Overrange protection to _____			
	15. Process Data	Fluid _____ Max. Temp <u>176 °F</u> Max. Press _____			
	16. Process Conn.	1/4" NPT <input type="checkbox"/> 1/2" NPT <input checked="" type="checkbox"/> Other <u>DIN</u> Location: Bottom <input type="checkbox"/> Back <input type="checkbox"/> Other _____			
	17. Material	Process Flange _____ 1/2" NPT Adapter _____ Vent Valve <u>316 St.St.</u> Flange Bolts _____ Gasket <u>Viton is Standard</u>			
	18. Mounting Bracket	Shape & Material <u>Carbon Steel (zinc-plated) or Stainless Steel angle bracket</u>			
Tag.	19. Element	Serial N° _____ Unit <u>barA</u> Max. Span <u>35</u> Min. Span <u>1.4</u> M.W.P _____ U.R.L <u>35</u> L.R.L <u>1.4</u> O.V.P <u>52</u> Custom Calibration and I.D. in Memory <input checked="" type="checkbox"/> NACE Certificate(F0198)/CC 89/336/EEC, Electromagnetic Compatibility (EMC) Directive.			
Options	20. Manufacturer	ST 3000 Smart Transmitter / Series 900 Absolute Pressure Models Honeywell / Product Code: STA940-1G-00000-1C,CC,CR,F7,HC,MB,SM,TC,TG,W2+XXXX			
Notas:					
Tag.	PI&D	Process Fluid	Line	Range (barg)	Equip.
PSLL	DTI-E	Agua		0-20	PSLL


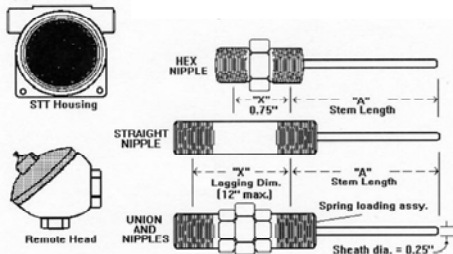
Universidad Central de Venezuela  Escuela de Ingeniería Química		ESPECIFICACION DE PROCESOS TANQUE DE AGUA		Sheet 1 Of 1	
Documento N°.:		Proyecto: ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL L.O.U.		N° Por Ch. C. Revisó A. J.L. Aprobó B.J.	
		Localización: LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS		Fecha: 15/03/07 20/04/07	
				REV. 0	
DESIGN DATA	1. Fluid	Water		What type of tank will the instrument be installed on? <input type="checkbox"/> Cone roof <input type="checkbox"/> Internal floating roof <input type="checkbox"/> External floating roof <input type="checkbox"/> Sphere <input type="checkbox"/> Horizontal cylinder <input checked="" type="checkbox"/> Vertical cylinder	
	2. Type	Atmospheric			
	3. Tank Diameter	2,1 ft			
	4. Tank height	2,3 ft			
	5. Working Capacity	8,2 ft^3			
	6. Vessel Design Temperature	200 °F			
	7. Maximum fill level	1,73 ft			
MOUNTING	8. Nozzle Connection	Flange size: ANSI# <input type="checkbox"/> 1½" NPT <input type="checkbox"/> Flange class: Distance from flange to tank entry (H):			
DETAILS MECHANIC	9. Communications Output	Profibus <input type="checkbox"/> 4-20 mA <input type="checkbox"/> HART <input type="checkbox"/> Foundation Fieldbus <input type="checkbox"/> Other <input type="checkbox"/>			
	10. Dielectric Constant	What accuracy is required?: ± <input type="checkbox"/> mm ±3-1 <input type="checkbox"/> mm What current tank gauging technology is used on this tank? Radar <input type="checkbox"/> HTG <input type="checkbox"/> Servo Hybrid <input type="checkbox"/> Mechanical <input type="checkbox"/> Magnetostrictive <input type="checkbox"/> Other:			
	11. Temperature Units	<input type="checkbox"/> °C <input checked="" type="checkbox"/> °F			
	12. Process Data	Temperature min.: 60 °F is 62.4 lb/ft3 Temperature max.: 250 °F Temperature max.: 100° F Gf: 1			
Tag.	14. Tanque 1				
					
Note:					
Tag.	PI&D	Process Fluid	Line	Range (ft^3)	Equip.
T-1101	DTI-E	Agua		0- 8,2	T-1101


Universidad Central de Venezuela  Escuela de Ingeniería Química		ESPECIFICACION DE PROCESOS TANQUE DE AGUA		Sheet 1 Of 1	
Documento N°.:		Proyecto: ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL L.O.U.		N° Por Ch. C.	Revisó A. J.L. Aprobó B.J.
		Localización: LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS		Fecha 15/03/07 09/04/07	
				REV. 0	
DESIGN DATA	1.	Fluid	Water	What type of tank will the instrument be installed on? <input type="checkbox"/> Cone roof <input type="checkbox"/> Internal floating roof <input type="checkbox"/> External floating roof <input type="checkbox"/> Sphere <input type="checkbox"/> Horizontal cylinder <input checked="" type="checkbox"/> Vertical cylinder	
	2.	Type	Atmospheric		
	3.	Tank Diameter	1,4 ft		
	4.	Tank height	1,3 ft		
	5.	Working Capacity	1,8 ft ³		
	6.	Vessel Design Temperature	200 °F		
	7.	Maximum fill level	0,98 ft		
MOUNTING	8.	Nozzle Connection	Flange size: Flange class: ANSI# <input type="checkbox"/> 1½" NPT <input type="checkbox"/> Distance from flange to tank entry (H):		
	9.	Communications Output	Profibus <input type="checkbox"/> Foundation Fieldbus <input type="checkbox"/> 4-20 mA HART <input type="checkbox"/> Other <input type="checkbox"/>		
DETAILS MECHANIC	10.	Dielectric Constant	What accuracy is required?: ±1 <input type="checkbox"/> m ±3-10 <input type="checkbox"/> n What current tank gauging technology is used on this tank? Radar <input type="checkbox"/> Servo <input type="checkbox"/> Mechanical <input type="checkbox"/> HTG <input type="checkbox"/> Hybrid <input type="checkbox"/> Magnetostrictive <input type="checkbox"/> Other: <input type="checkbox"/>		
	11.	Temperature Units	<input type="checkbox"/> °C <input checked="" type="checkbox"/> °F		
	12.	Process Data	Temperature min.: Temperature max.:250 °F Temperature min.: 83 °F Temperature max.:100° F		
	13.		Density: 60 °F is 62.4 lb/ft ³ GE 1		
Tag.	14.	Tanque 2			
					
Note:					
Tag.	PI&D	Process Fluid	Line	Range (F°3)	Equip.
T-1103	DTI-E	Agua		0-1,8	T-1103

Universidad Central de Venezuela Escuela de Ingeniería Química		ESPECIFICACION DE PROCESOS TANQUE DE AGUA		Sheet 1 Of 1	
Documento N°.:		Proyecto: ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL L.O.U. Localización: LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS		N°	Por Ch. C.
				Revisó	A. J.L.
				Aprobó	B.J.
				Fecha 15/03/07 09/04/07	
				REV. 0	
DESIGN DATA	1.	Fluid	Water	What type of tank will the instrument be installed on? <input type="checkbox"/> Cone roof <input type="checkbox"/> Internal floating roof <input type="checkbox"/> External floating roof <input type="checkbox"/> Sphere <input type="checkbox"/> Horizontal cylinder <input checked="" type="checkbox"/> Vertical cylinder	
	2.	Type	Atmospheric		
	3.	Tank Diameter	1,6 ft		
	4.	Tank height	1,9 ft		
	5.	Working Capacity	3,8 ft ³		
	6.	Vessel Design Temperature	200 °F		
	7.	Maximum fill level	0,98 ft		
MOUNTING	8.	Nozzle Connection	Flange size: Flange class: ANSI# <input type="checkbox"/> 1½" NPT <input type="checkbox"/> Distance from flange to tank entry (H):		
	9.	Communications Output	Profibus <input type="checkbox"/> Foundation Fieldbus <input type="checkbox"/> 4-20 mA <input type="checkbox"/> HART <input type="checkbox"/> Other <input type="checkbox"/>		
DETAILS MECHANIC	10.	Dielectric Constant	What accuracy is required?: ±1 <input type="checkbox"/> m ±3-10 <input type="checkbox"/> m What current tank gauging technology is used on this tank? Radar <input type="checkbox"/> Servo <input type="checkbox"/> Mechanical <input type="checkbox"/> HTG <input type="checkbox"/> Hybrid <input type="checkbox"/> Magnetostrictive <input type="checkbox"/> Other: <input type="checkbox"/>		
	11.	Temperature Units	<input type="checkbox"/> °C <input checked="" type="checkbox"/> °F		
	12.	Process Data	Temperature min.: Temperature max.: 250 °F Temperature min.: 83 °F Temperature max.: 100° F		
	13.		Density: 60 °F is 62.4 lb/ft ³ GF: 1		
Tag.	14.	Tanque 3			
Note:					
Tag.	PI&D	Process Fluid	Line	Range (ft ³)	Equip.
T-1102	DTI-E	Agua		0- 3,8	T-1102

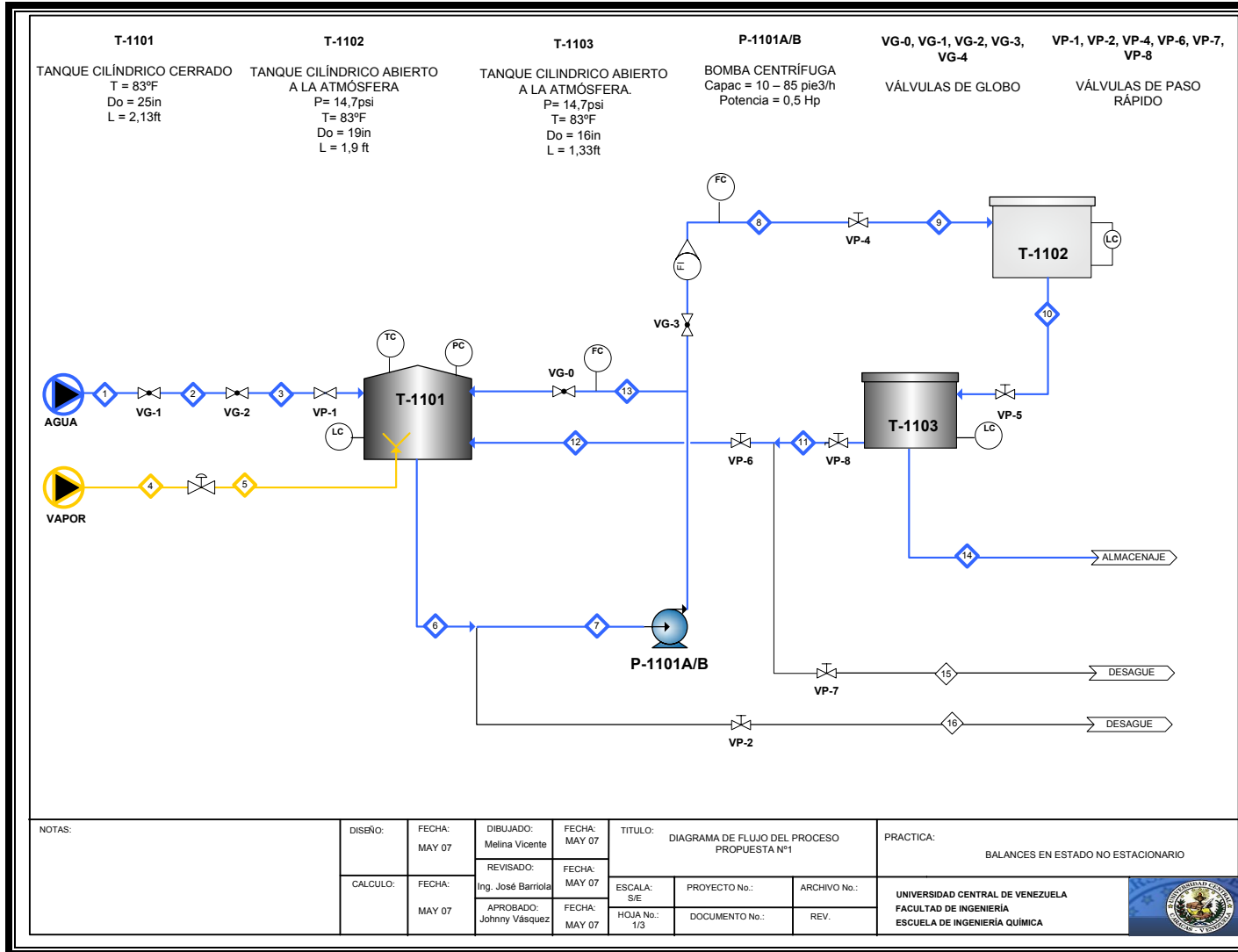
Universidad Central de Venezuela  Escuela de Ingeniería Química		ESPECIFICACION DE PROCESOS TANQUE DE AGUA		Sheet 1 Of 1	
Documento N°:		Proyecto: ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL L.O.U. Localización: LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS		N°	Por
				Ch. C.	Revisó
				A. J.L.	Aprobó
				Fecha	
				15/03/07	09/04/07
				REV. 0	
DESIGN DATA	1.	Fluid	Water	What type of tank will the instrument be installed on? <input type="checkbox"/> Cone roof <input type="checkbox"/> Internal floating roof <input type="checkbox"/> External floating roof <input type="checkbox"/> Sphere <input type="checkbox"/> Horizontal cylinder <input checked="" type="checkbox"/> Vertical cylinder	
	2.	Type	Atmospheric		
	3.	Tank Diameter	2,2 ft		
	4.	Tank height	4 ft		
	5.	Working Capacity	14,12 ft ³		
	6.	Vessel Design Temperature	200 °F		
	7.	Maximum fill level	3 ft		
MOUNTING	8.	Nozzle Connection Flange size: ANSI# <input type="checkbox"/> 1½" NPT <input type="checkbox"/> Flange class: Distance from flange to tank entry (H):			
DETAILS MECHANIC	9.	Communications Output Profibus <input type="checkbox"/> 4-20 mA <input type="checkbox"/> Foundation Fieldbus <input type="checkbox"/> HART <input type="checkbox"/> Other <input type="checkbox"/>			
	10.	Dielectric Constant What accuracy is required?: ±1 <input type="checkbox"/> n ±3-10 <input type="checkbox"/> n What current tank gauging technology is used on this tank? Radar <input type="checkbox"/> Servo <input type="checkbox"/> Mechanical <input type="checkbox"/> HTG <input type="checkbox"/> Hybrid <input type="checkbox"/> Magnetostrictive <input type="checkbox"/> Other: <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> °C <input checked="" type="checkbox"/>			
	11.	Temperature Units Temperature min.: Temperature max.: 250 °F			
	12.	Process Data Temperature min.: 83 °F Temperature max.: 100° F Density: 60 °F is 62.4 lb/ft ³ GF. 1			
Tag.	14.	Tanque 4			
					
Note:					
Tag.	PI&D	Process Fluid	Line	Range (ft ³)	Equip.
T-1104	DTI-E	Agua		0- 14,2	T-1104

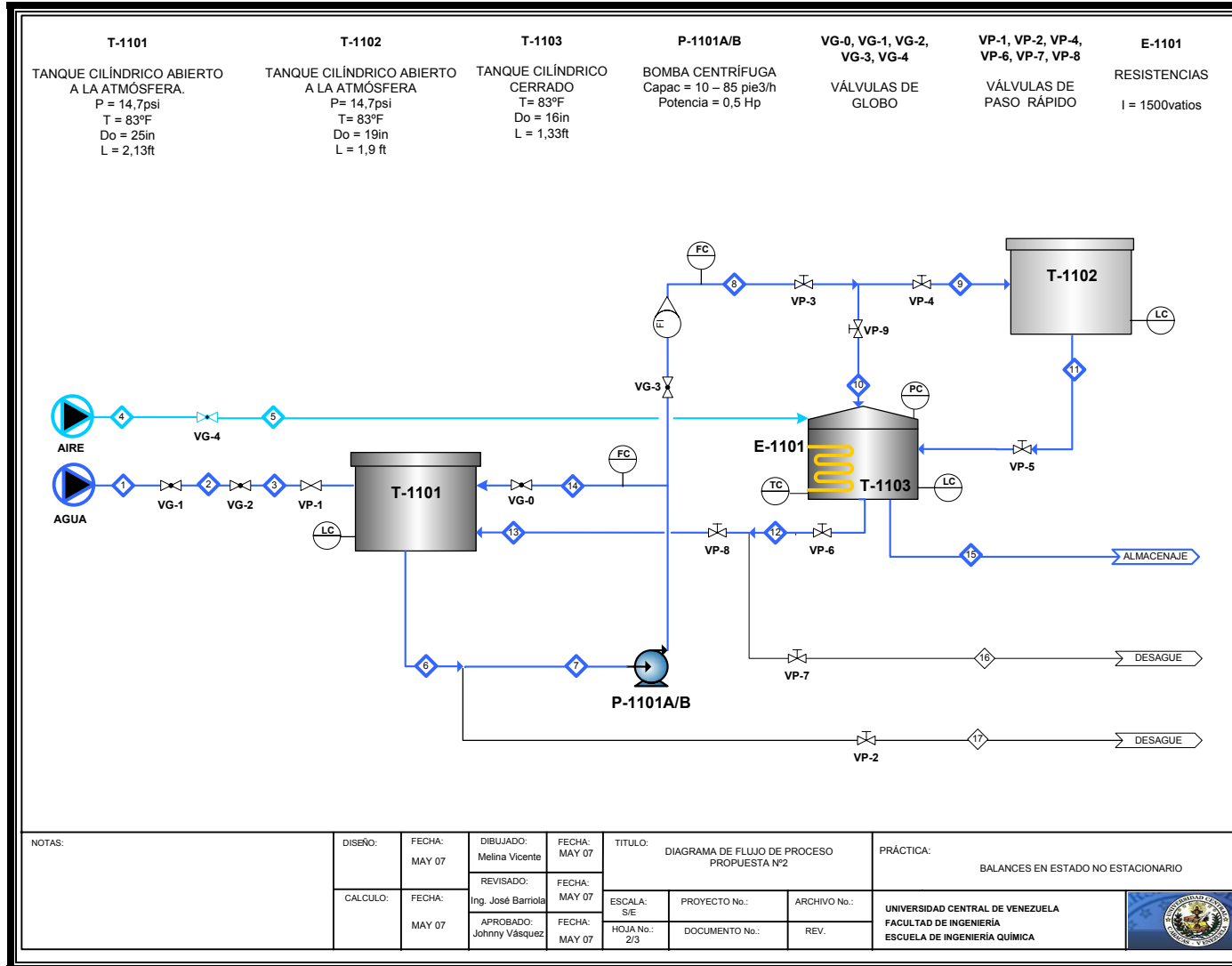
 <p>Universidad Central de Venezuela Escuela de Ingeniería Química</p>	INSTRUMENTO	SERPENTIN DE	Sheet 1 Of 1			
	CALENTAMIENTO		Nº	Por	Revisó	Aprobó
	Proyecto:	ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL L.O.U.		Vicente,M.		Fecha
	Localización:	LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS		15/03/07		
Documento Nº:			REV. 0			
IDENTIFICATION: E-1101			PLANT : LOU			
SERVICE: Calentamiento del fluido del Tanque T1			Nº REQUEST: 1			
DESCRIPCION: SERPENTÍN DE CALENTAMIENTO						
LOCALITATION OF FLUID						
			SIDE		SIDE TUBE	
Name of the fluid			WATER		STEAM	
Flow masico lb/h			5550		100	
Temperature (inlet /outlet) °F			83 / 100		292,7 / 266,9	
Pressure (inlet/outlet) psia			14,7		60	
Inlet Pressure psia			14,7		60	
Heat interchanged 0,0942 MMBtu/h			LMTD 187,9°F			
Global Coefficient of Heat Transference : 100 Btu/pie ² .h.°F						
Nº LAPS: 6		OD, pulg: 0,840		Lenght, pie: 38		
		ID, pulg: 0,622		Material: Cobre		
						
Observations						
Reviewed by:			Date:		Approved by	

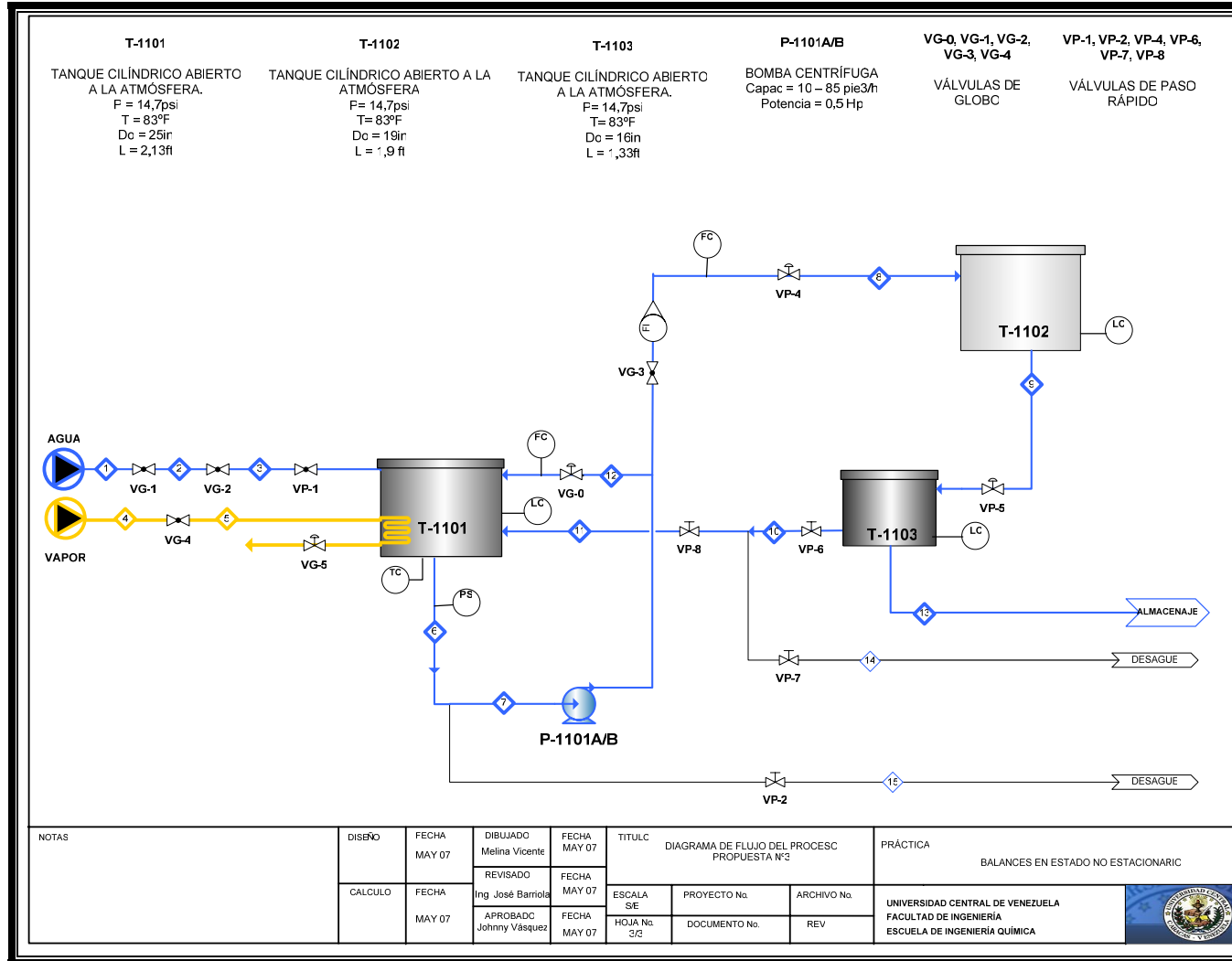
Universidad Central de Venezuela  Escuela de Ingeniería Química		INSTRUMENTO MEDIDOR DE TEMPERATURA		Sheet 1 Of 1	
Documento N°.:		Proyecto: ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL L.O.U.		N° Por Ch. C. Revisó A. J.L. Aprobó B.J.	
		Localización: LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS		Fecha 15/03/07 20/03/07 25/03/07	
				REV. 0	
GENERAL	1. Tag N°				
	2. Function	Record <input type="checkbox"/> Indicate <input type="checkbox"/> Control <input type="checkbox"/> Trans. <input checked="" type="checkbox"/> Blind <input checked="" type="checkbox"/>			
	3. Case	MFR. STD. <input checked="" type="checkbox"/> Nom. Size <input type="checkbox"/> Color: MFR. STD. <input checked="" type="checkbox"/>			
	4. Mounting	Flush <input type="checkbox"/> Surface <input type="checkbox"/> Yoke <input type="checkbox"/> Other <u>On line</u>			
	5. Enclosure Class	General Purpose <input type="checkbox"/> Dust Ignition Proof <input type="checkbox"/> Explos. Proof <input checked="" type="checkbox"/> Class <u>Note 1</u> For Use In Intrin. Safe System <input type="checkbox"/> Other _____			
	6. Power Supply	117 V 60 Hz <input type="checkbox"/> 20 P.S.I.G <input type="checkbox"/> Other ac _____ dc <u>24</u> Volts D.C.			
	7. Type Probe	<u>100 Ω DIN (0.00385) platinum.</u>			
	8. Electrical Conn.	1/2" NPT <input checked="" type="checkbox"/> Other _____			
	9. Material	Sheath: <u>Stainless Steel</u> Head Conn.: <u>Cast Aluminum</u>			
XMTR	10. Transmitter Output	4 - 20 mA <input checked="" type="checkbox"/> 10 - 50 mA <input type="checkbox"/> 3 - 15 Psig <input type="checkbox"/> Other <u>Hart Protocol / DE digital</u> For Receiver See Spec Sheet _____			
ELEMENT	11. Element Type	Thermocuple <input type="checkbox"/> RTD <input checked="" type="checkbox"/>			
	12. Number of Leadwires	<u>3 - wire sensor - Single / Lead length: 6"</u>			
	13. Housing	Field <input checked="" type="checkbox"/> Mount <input type="checkbox"/> Other <u>Explosion-Proof Aluminum with Beige Epoxy Coating</u>			
	14. Service	<u>Parameter: Standard Vibration (25 gS)</u>			
	15. Steam Length "A" Dimension	<u>Stem length: where A is in inches (3" minimum, 24" Max.) "5.5 inch Steam Length"</u>			
	16. Process Data	Fluid _____ Max. Temp. <u>500° F</u> Max. Press. _____			
	17. Remote Conn.Head	<u>3/4" long 316SS hex nipple, Explosion - proof, standard cast aluminum</u>			
	18. Probe	Lag Hardware with 1/2" NPT SST fittings: Hex nipple as 3/4" long satandard 316ss (specify as "A")			
Options	19. Manufacturer	STT 3000 Series STT / Smart Temperature Transmitter / Models 22D / Spring - Loaded Honeywell / Product Code: <u>22D-S-11-B-S-5.5-A-R-6</u>			
Tag.	20. Element	Serial N° _____			
					
Note: 1. Class I Div. 1, Groups B,C,D. Class II Div. 1, Groups E,I,G and Class III Hazardous Locations.					
Tag.	PI&D	Process Fluid	Line	Range (barg)	Equip.
1	DTI-E	Agua		(60 - 120) °F	T-1101
2	DTI-E	Agua		(60 - 120) °F	T-1101

Universidad Central de Venezuela  Escuela de Ingeniería Química		INSTRUMENTO TRANSMISOR DE TEMPERATURA		Sheet 1 Of 1	
Documento N°:		Proyecto: ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL L.O.U.		N° Por Ch. C. Revisó A. J.L. Aprobó B.J.	
		Localización: LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS		Fecha: 15/03/07 20/03/07 28/03/07	
				REV. 0	
GENERAL	1. Tag N°				
	2. Function	Record <input type="checkbox"/> Indicate <input type="checkbox"/> Control <input type="checkbox"/> Trans. <input checked="" type="checkbox"/> Blind <input checked="" type="checkbox"/>			
	3. Case	MFR. STD. <input checked="" type="checkbox"/> Nom. Size <input type="checkbox"/> Color: MFR. STD. <input checked="" type="checkbox"/>			
	4. Mounting	Flush <input type="checkbox"/> Surface <input type="checkbox"/> Yoke <input type="checkbox"/> Other <u>On line</u>			
	5. Enclosure Class	General Purpose <input checked="" type="checkbox"/> Dust Ignition Proof <input checked="" type="checkbox"/> Explosion Proof <input checked="" type="checkbox"/> Class <u>Note 1</u> For Use In Intrin. Safe System <input checked="" type="checkbox"/> Other <u>Non - Incendive</u>			
	6. Power Supply	117 V 60 Hz <input type="checkbox"/> 20 P.S.I.G <input type="checkbox"/> Other ac _____ dc <u>24</u> Volts D.C.			
	7. Load resistance	0 to 1110 Ω			
	8. Electrical Conn.	1/2" NPT <input checked="" type="checkbox"/> Other <u>Cable / Conduit Entry</u>			
	9. Humidity	Operative Limits: Rack mounted % RH <u>5 to 100</u> In field housing % RH <u>5 to 100</u>			
XMTR	10. Transmitter Output	4 - 20 mA <input checked="" type="checkbox"/> 10 - 50 mA <input type="checkbox"/> 3 - 15 Psig <input type="checkbox"/> Other <u>Hart Protocol / DE digital</u> For Receiver See Spec Sheet _____			
ELEMENT	11. Element Type	Thermocuple <input type="checkbox"/> RTD <input checked="" type="checkbox"/>			
	12. Sensor	<u>No Integral Sensor Probe or Thermowell Supplied</u>			
	13. Housing	Field <input checked="" type="checkbox"/> Mount <input type="checkbox"/> Other <u>Explosion-Proof Aluminum with Beige Epoxy Coating</u>			
	14. Integral Meter	Analog <input type="checkbox"/> Digital <input checked="" type="checkbox"/> Other <u>For Field Mount Housing / Note 2</u>			
	15. Configuration	<u>Factory Default Configuration Supplied</u>			
	16. Lightning Protection	<u>Externally Mountable to Field Housing</u>			
	17. Process Data	Fluid _____ Max. Temp. _____ Max. Press. _____			
	18. Mounting Arrangement	<u>Stainless stel Mounting Bracket for 2" Pipe</u>			
Tag.	19. Element	Serial N° _____ No Transmitter Configuration/Calibration Certificate, No certificate of Conformance/Origin			
Options	20. Manufacturer	STT 3000 Series STT / Smart Temperature Transmitter / Models STT25H Honeywell / Product Code: <u>STT25H-0-ENS-000-S0L-000-00-1J</u>			
Note: 1. Shipped with Engineering Unit Meter. 2. Class I Div.1, Groups A,B,C,D. Class II,III Div. 1 Groups E, F,G and Class I,II,III Div. 1 Groups A,B,C,D,E,F,G. Class I,Div.2, Groups A,B,C,D Suitable for Class II,II,Div.2, Groups F,G					
Tag.	PI&D	Process Fluid	Line	Range (barg)	Equip.
1	DTI-E	Agua		(60 - 120) °F	T-1101
2	DTI-E	Agua		(60 - 120) °F	T-1101

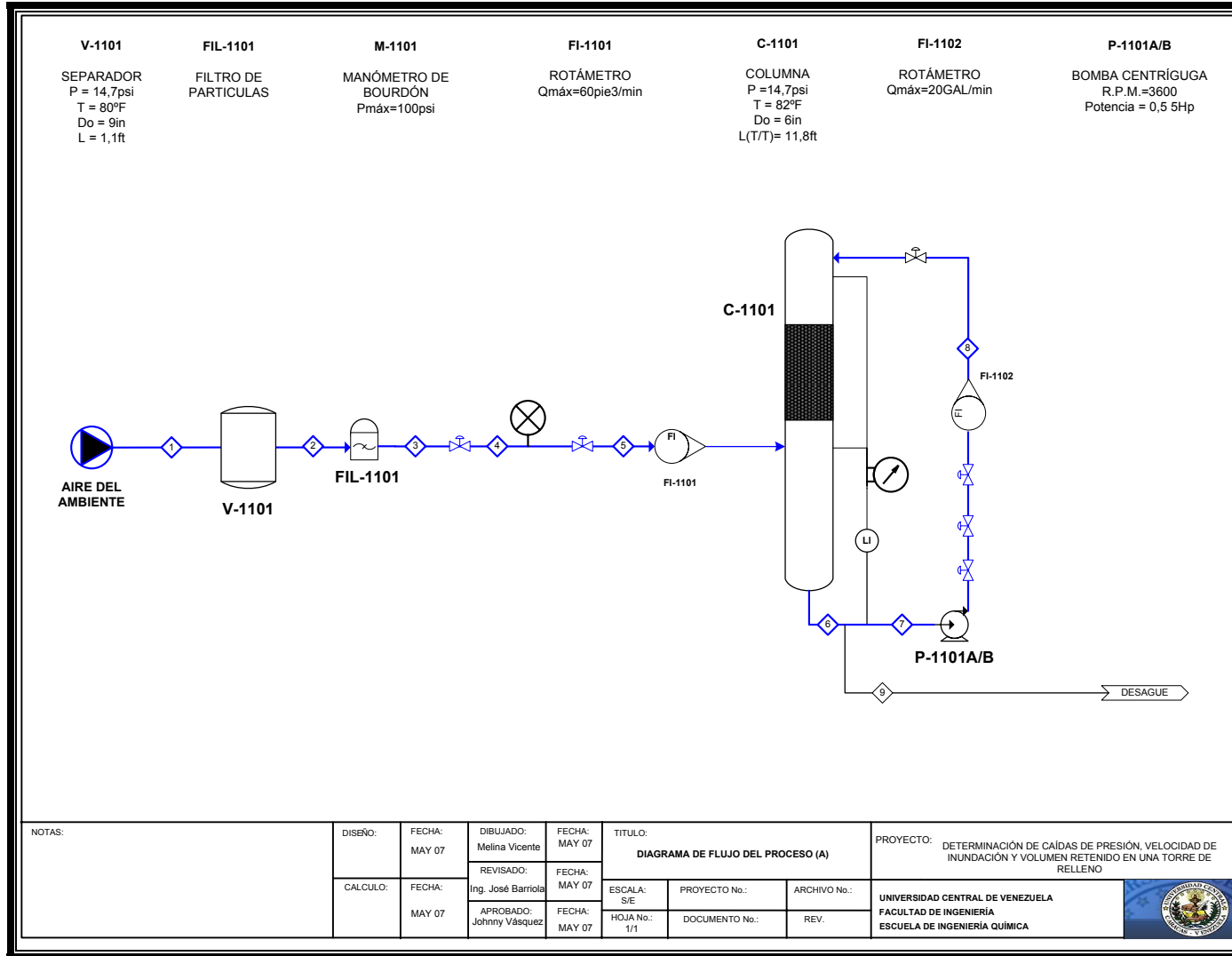
***A.11. DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO DE LAS
PROPUESTAS PARA LA MODIFICACIÓN
DE LA PRÁCTICA
“BALANCES EN ESTADO NO ESTACIONARIO”***

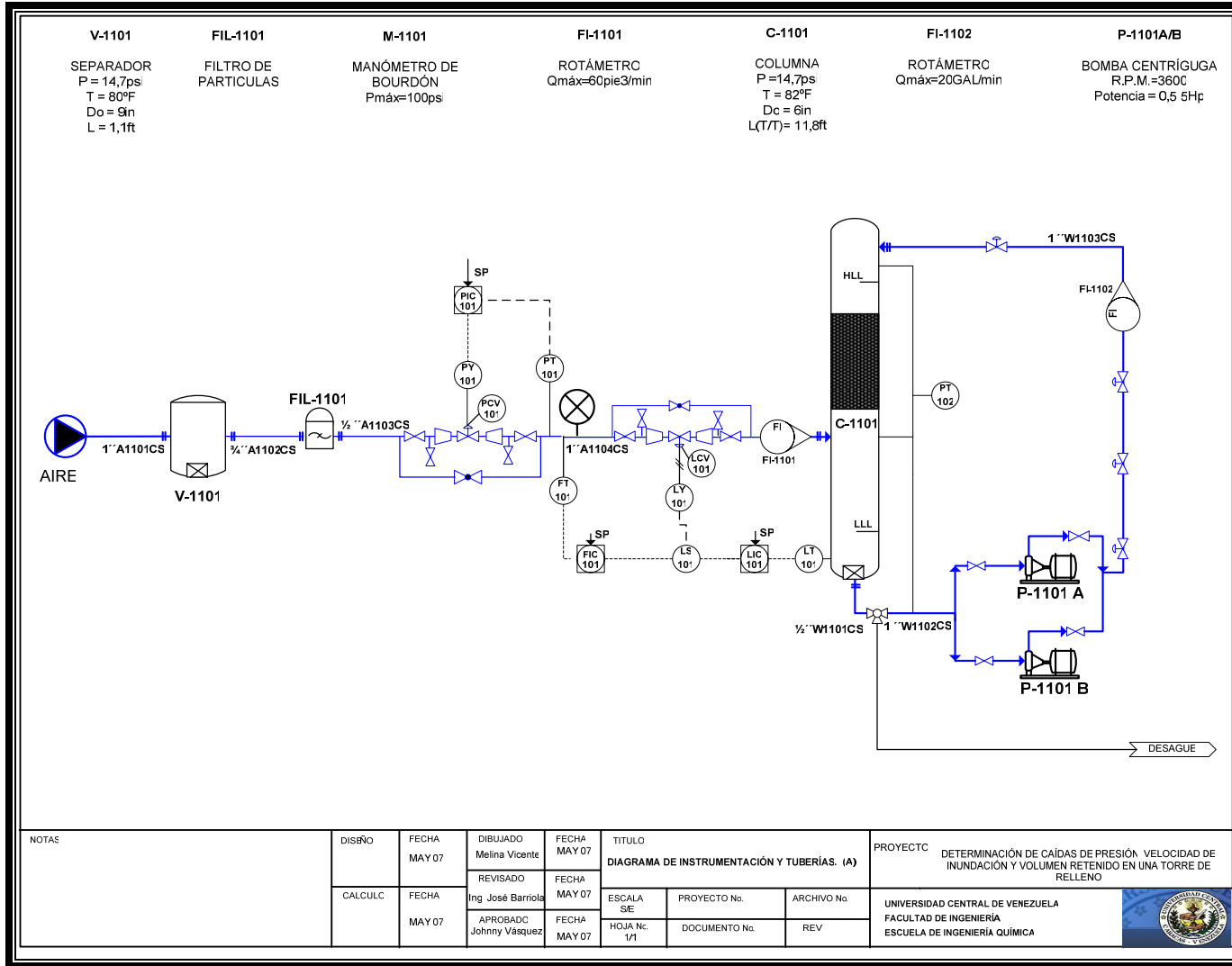




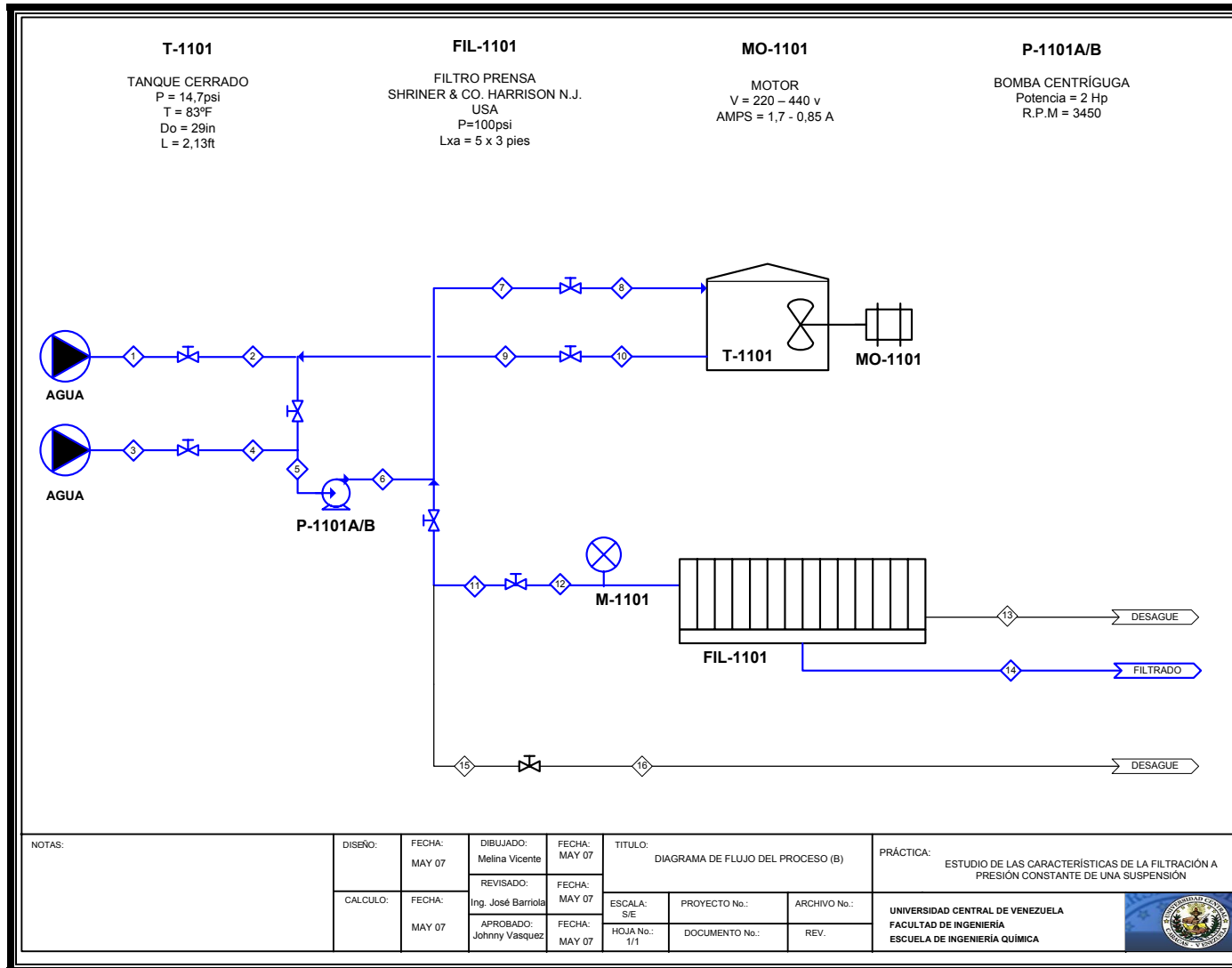


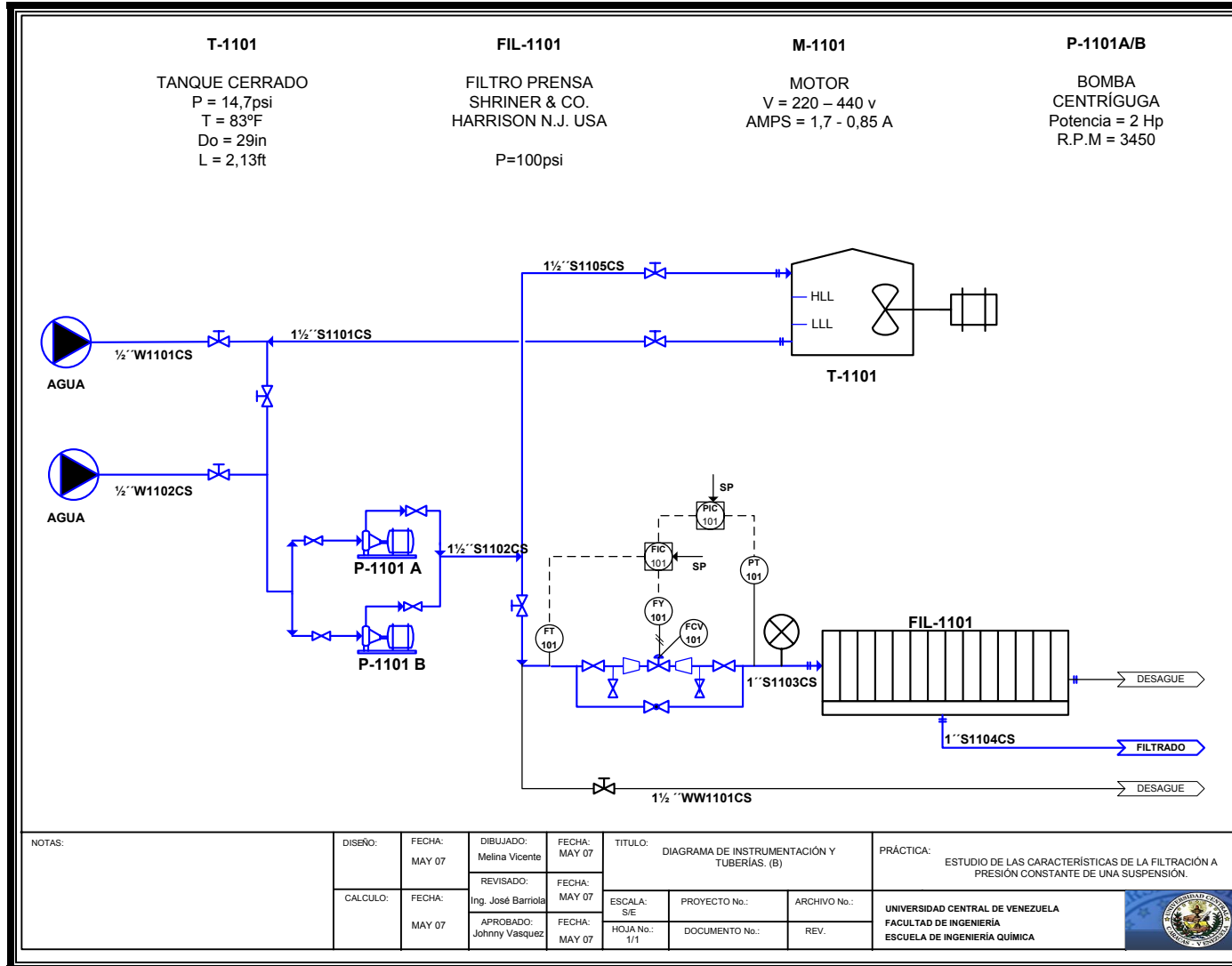
**A.12. DFP Y DTI DE LA PRÁCTICA
“DETERMINACIÓN DE CAÍDAS DE PRESIÓN, VELOCIDAD DE
INUNDACIÓN Y VOLUMEN RETENIDO EN UNA TORRE DE
RELLENO”**



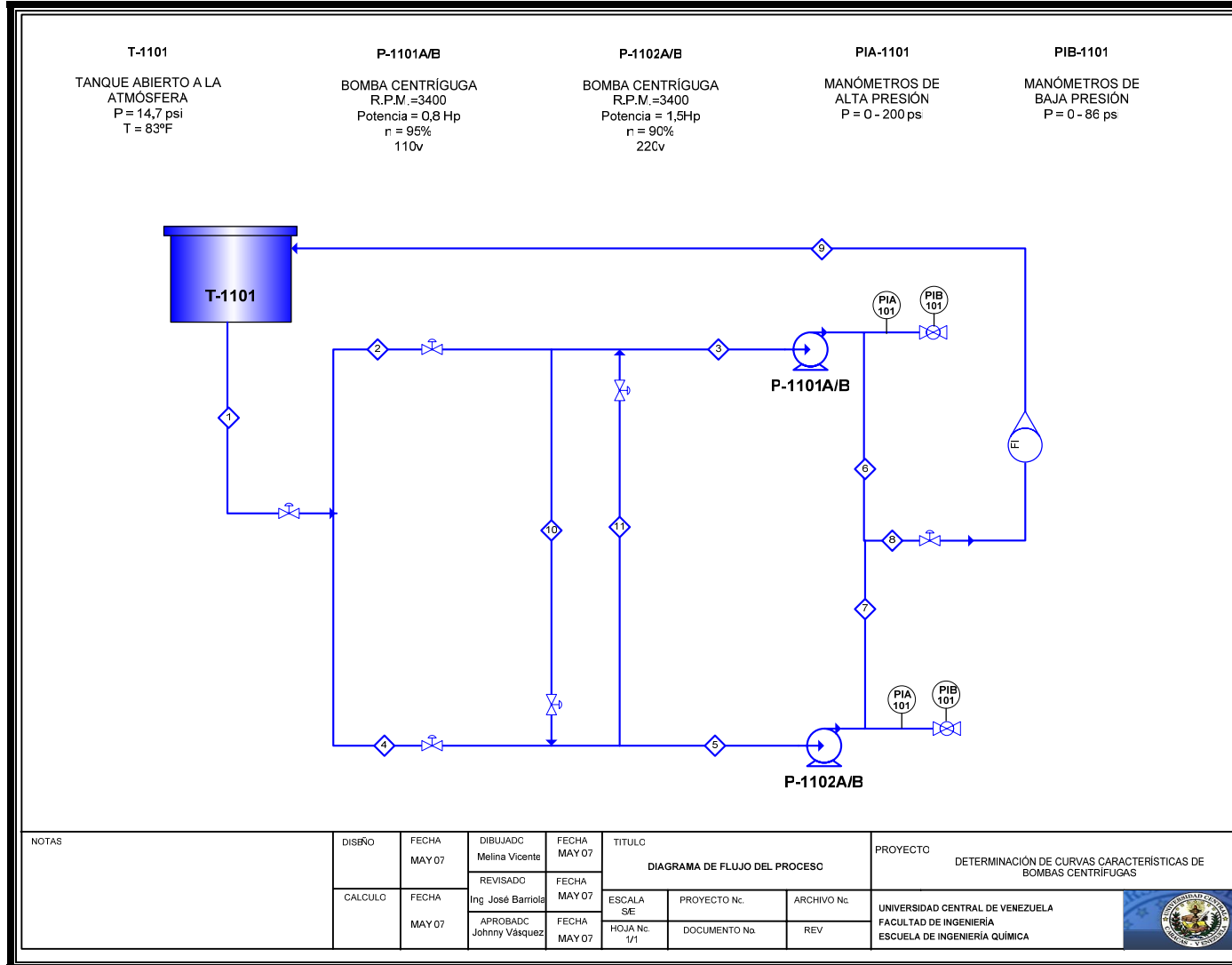


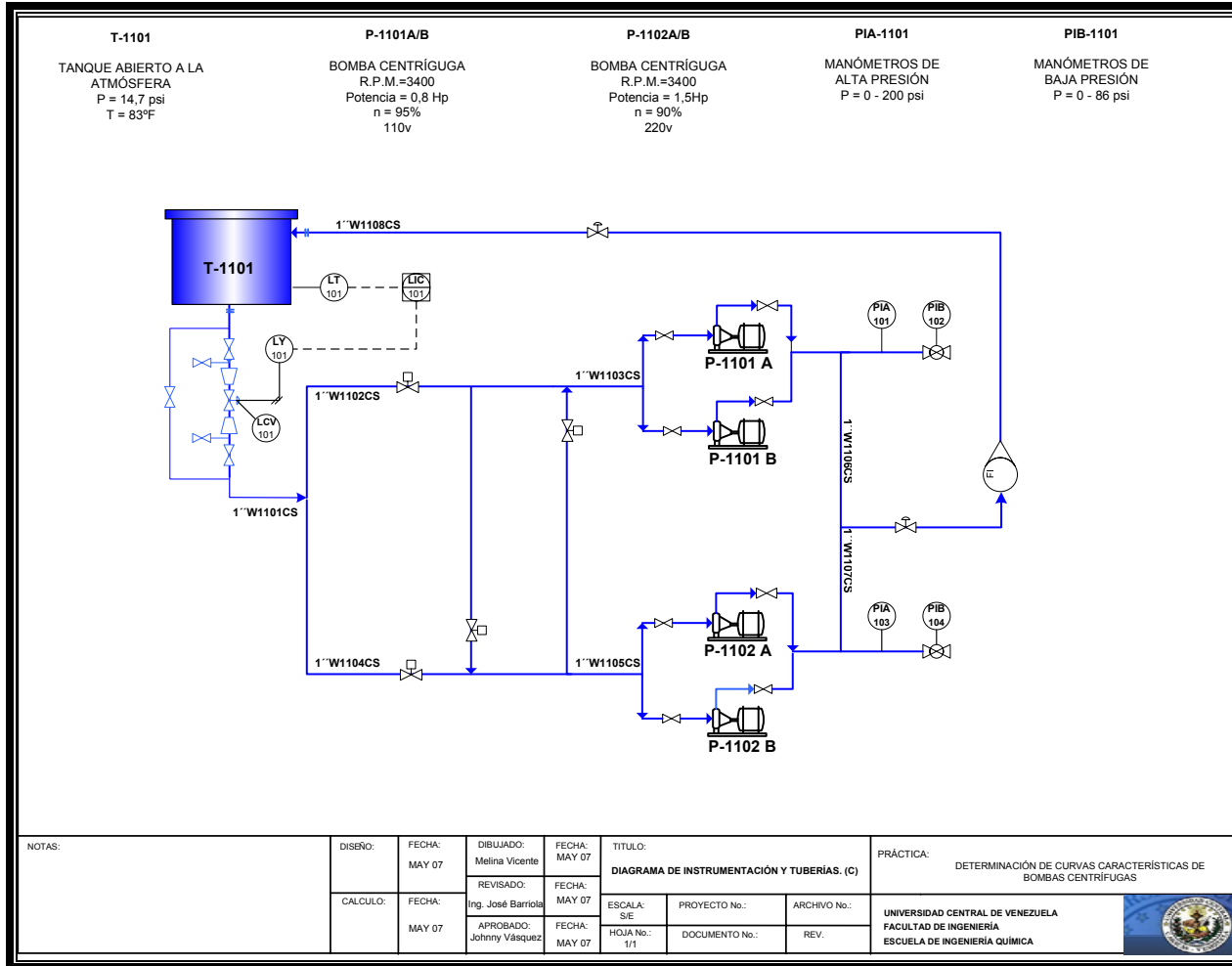
A.13. DFP Y DTI DE LA PRÁCTICA
“ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA FILTRACIÓN A
PRESIÓN CONSTANTE DE UNA SUSPENSIÓN”



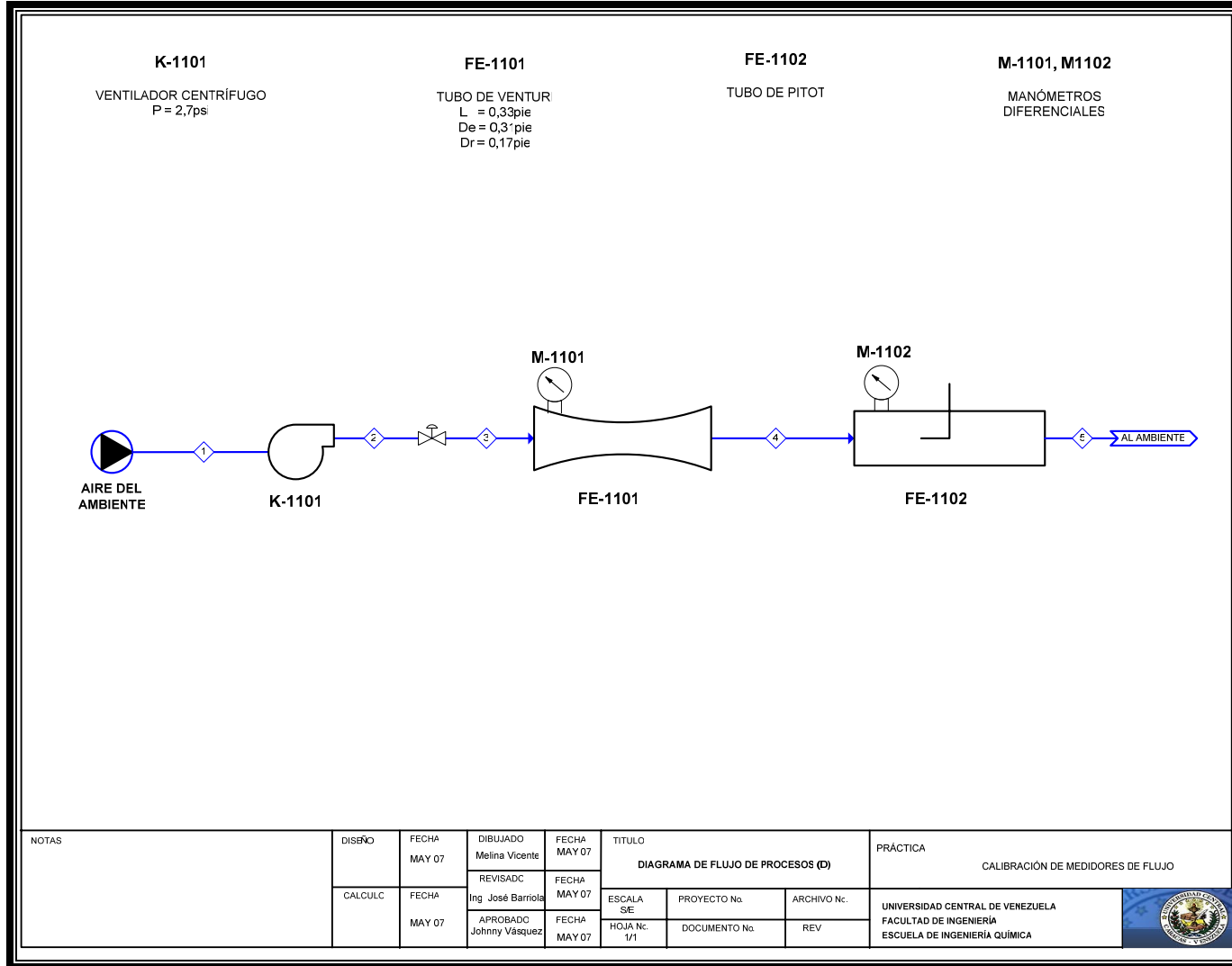


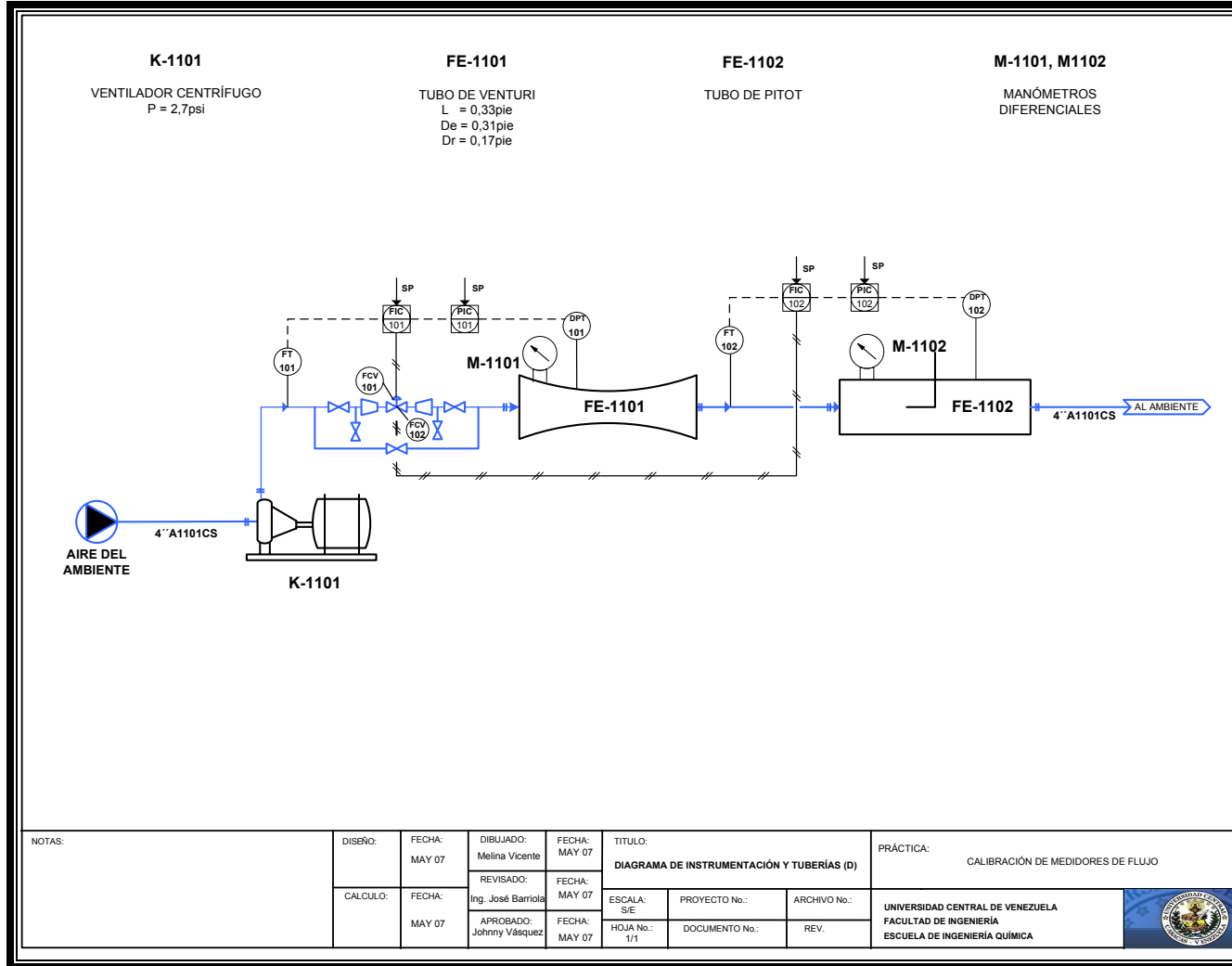
A.14. DFP Y DTI DE LA PRÁCTICA
“DETERMINACIÓN DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE
BOMBAS CENTRÍFUGAS”



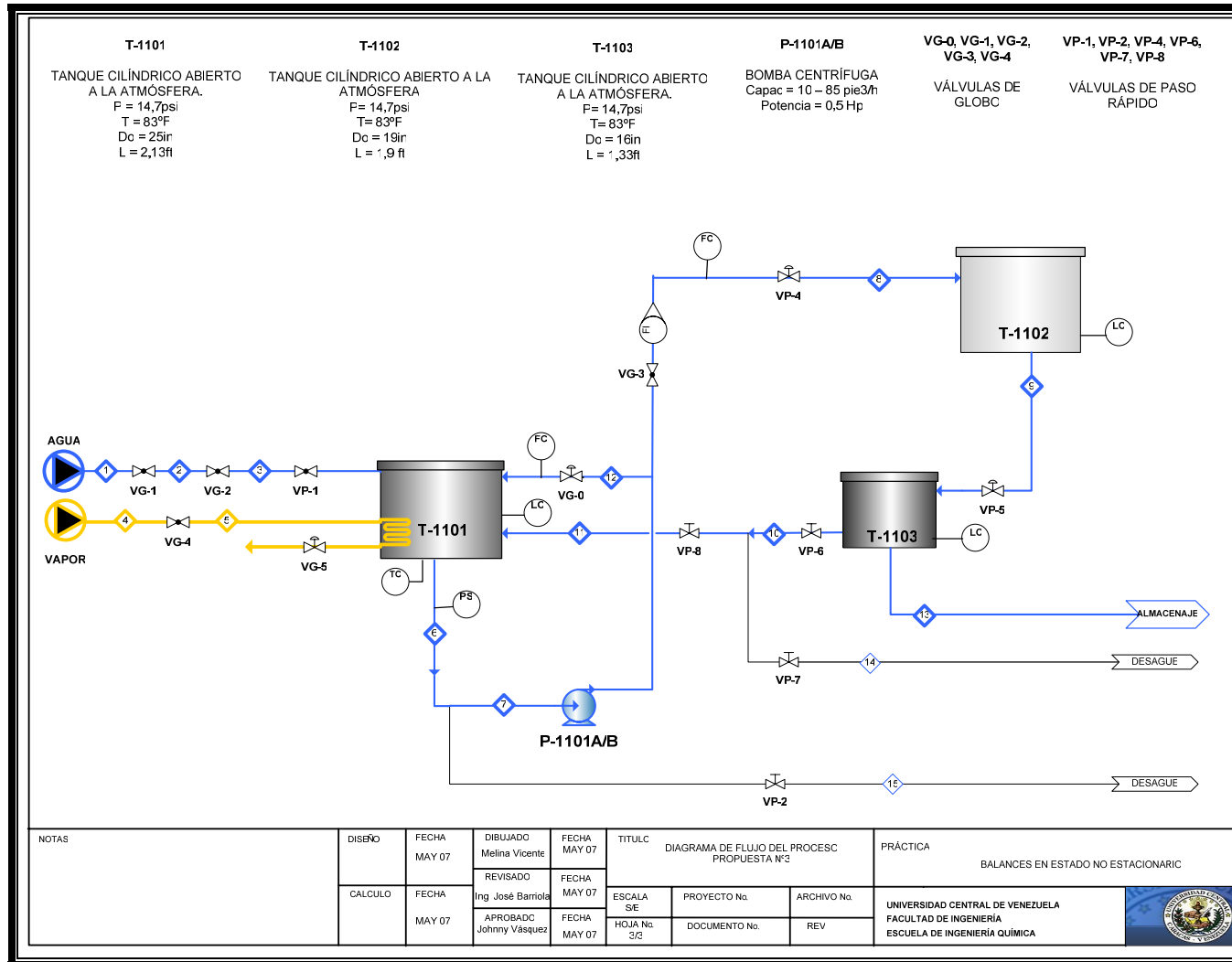


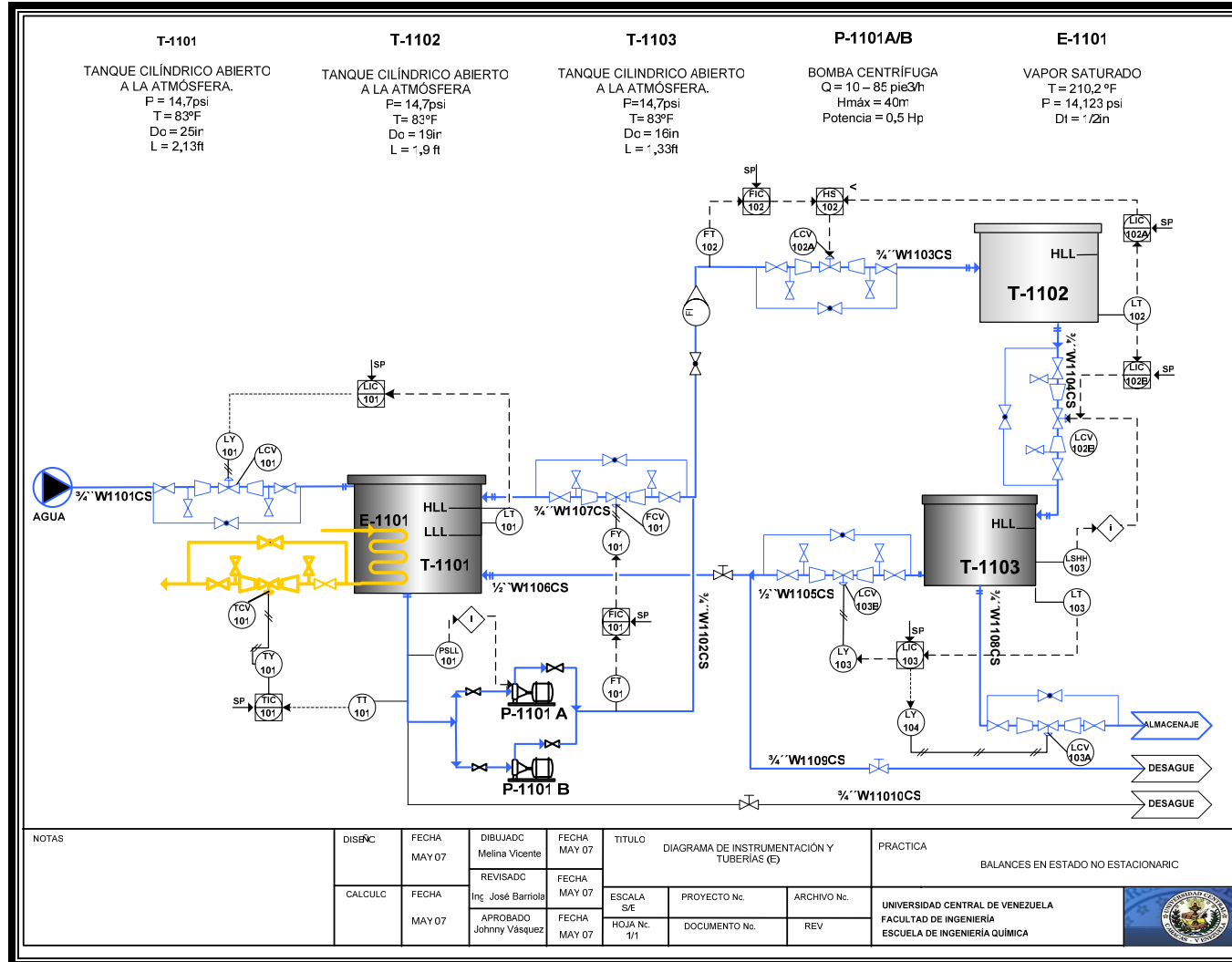
**A.15. DFP Y DTI DE LA PRÁCTICA
“CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO”**



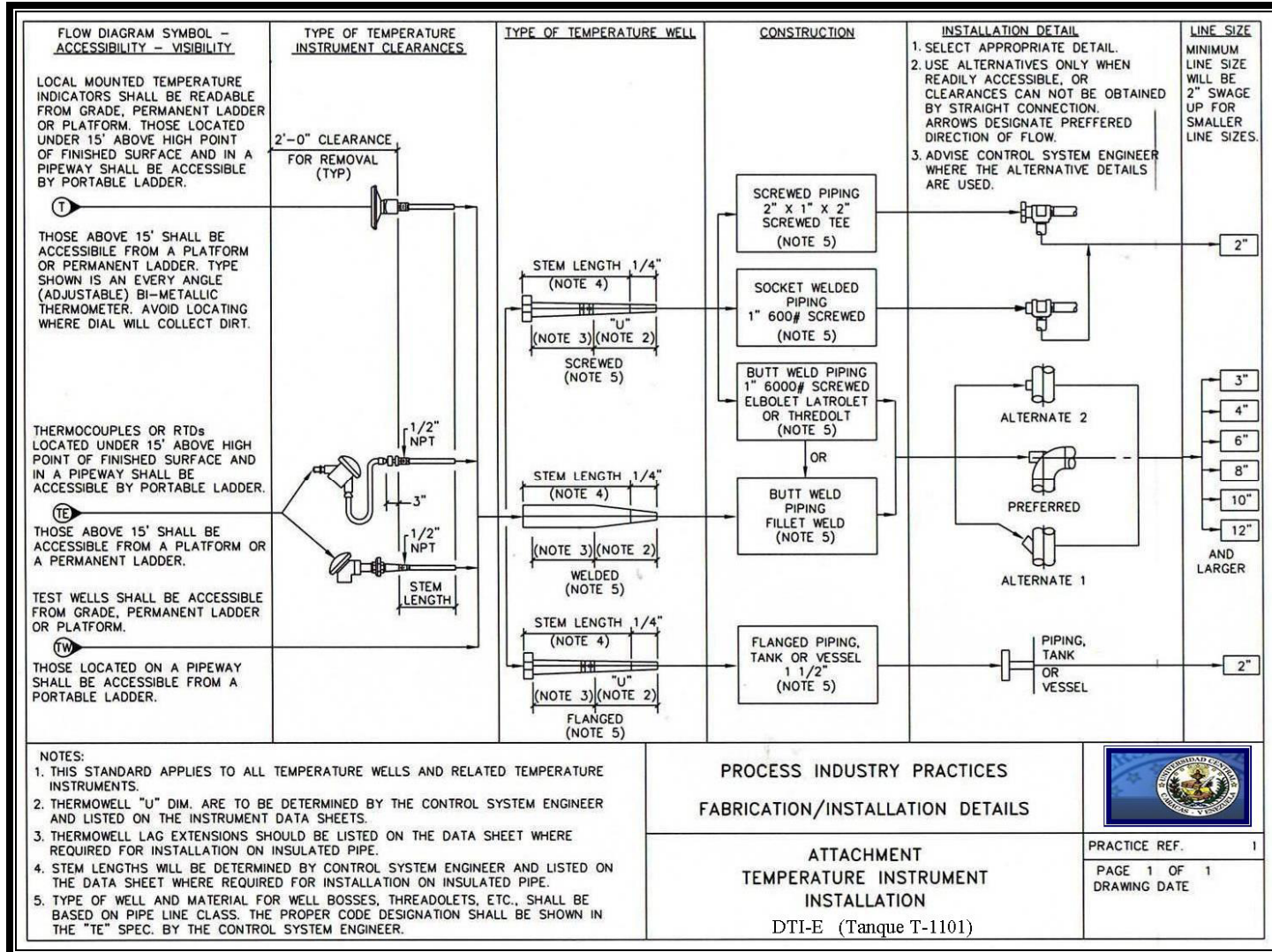


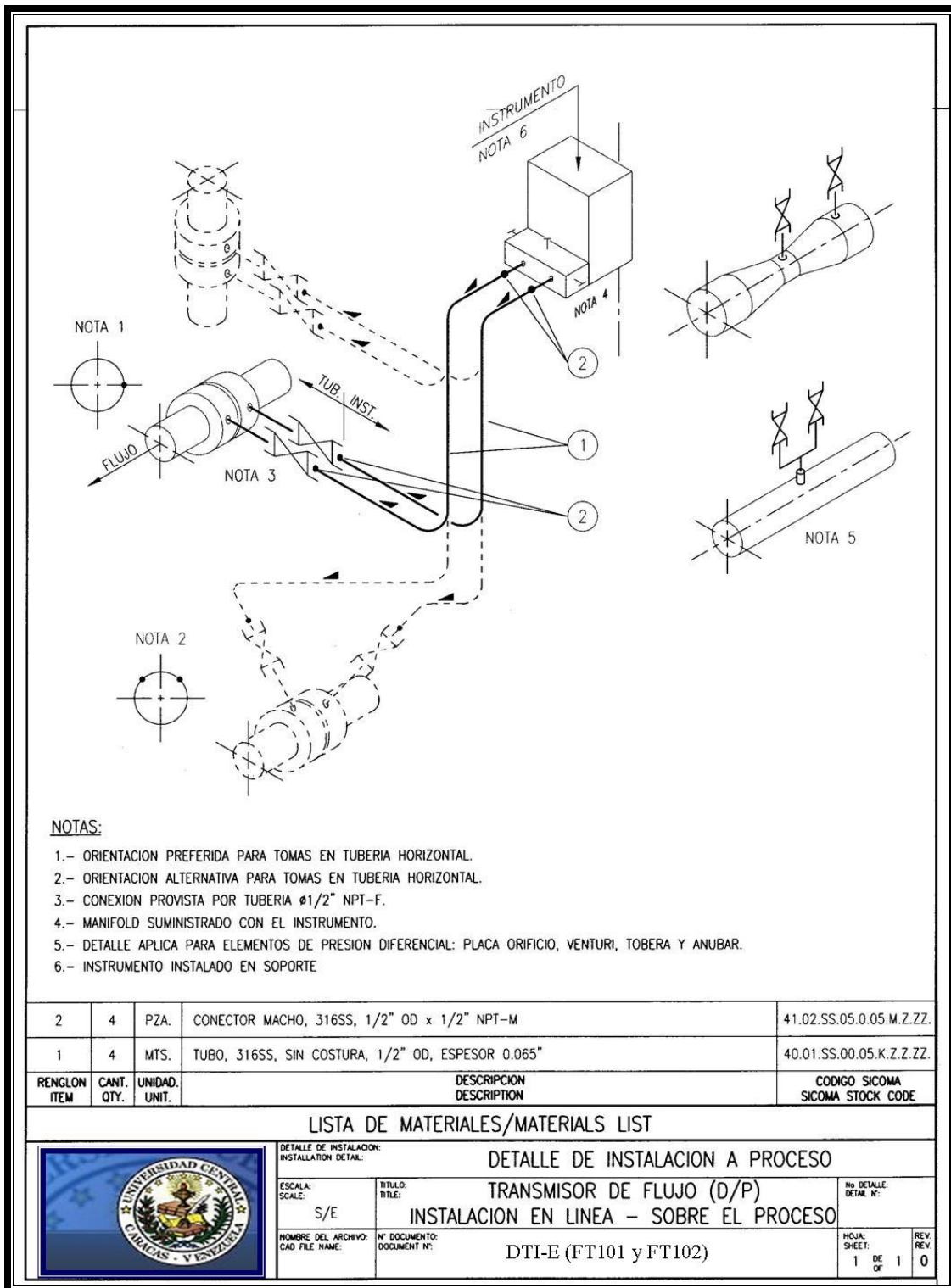
***A.16. DFP Y DTI DE LA PROPUESTA SELECCIONADA PARA
LA PRÁCTICA DE “BALANCES EN ESTADO NO
ESTACIONARIO”***





***A.17. DIAGRAMA DE INSTALACIÓN DE INSTRUMENTOS
DE LA PRÁCTICA DE “BALANCES EN ESTADO NO
ESTACIONARIO”***






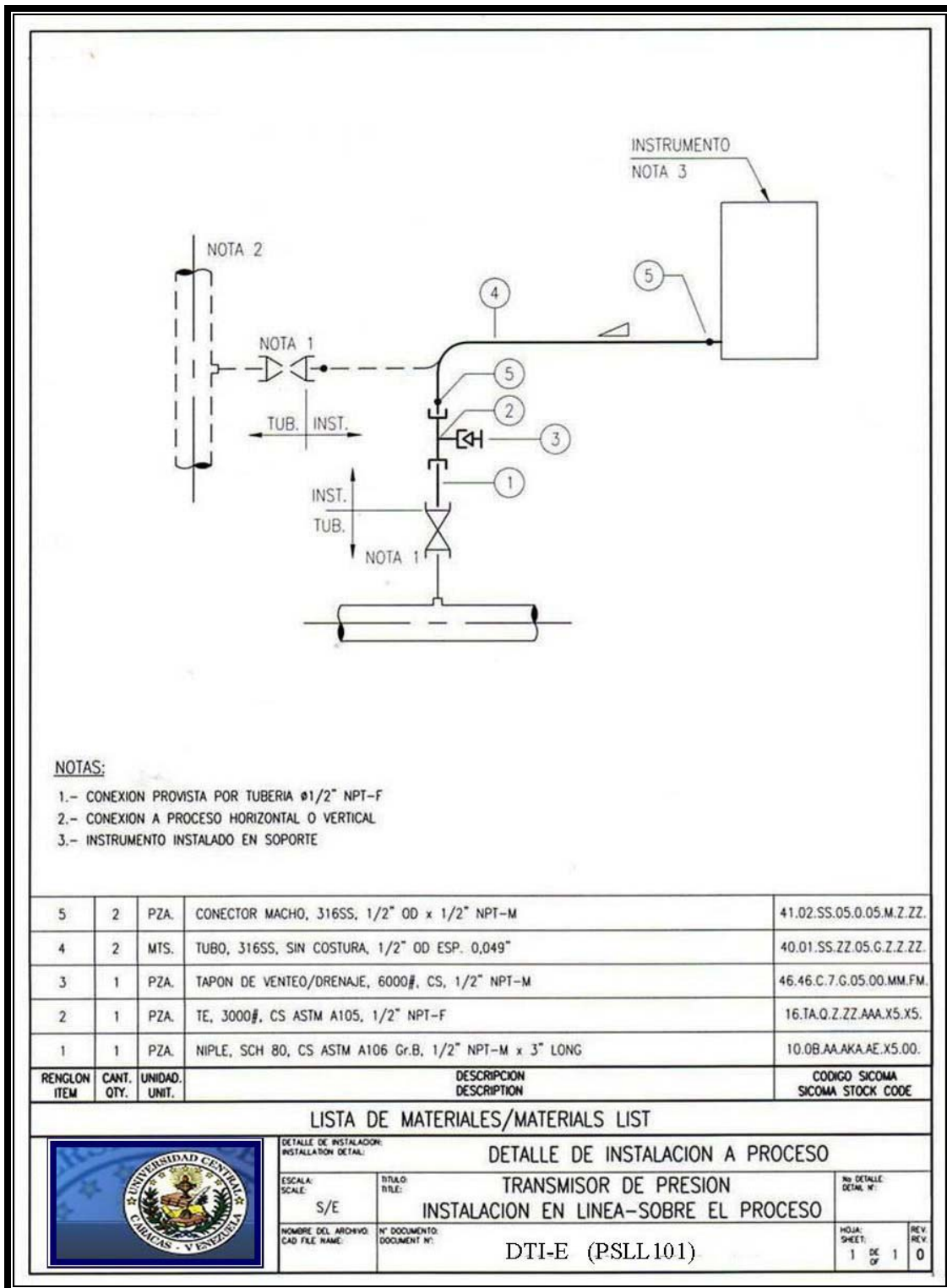
NOTAS:

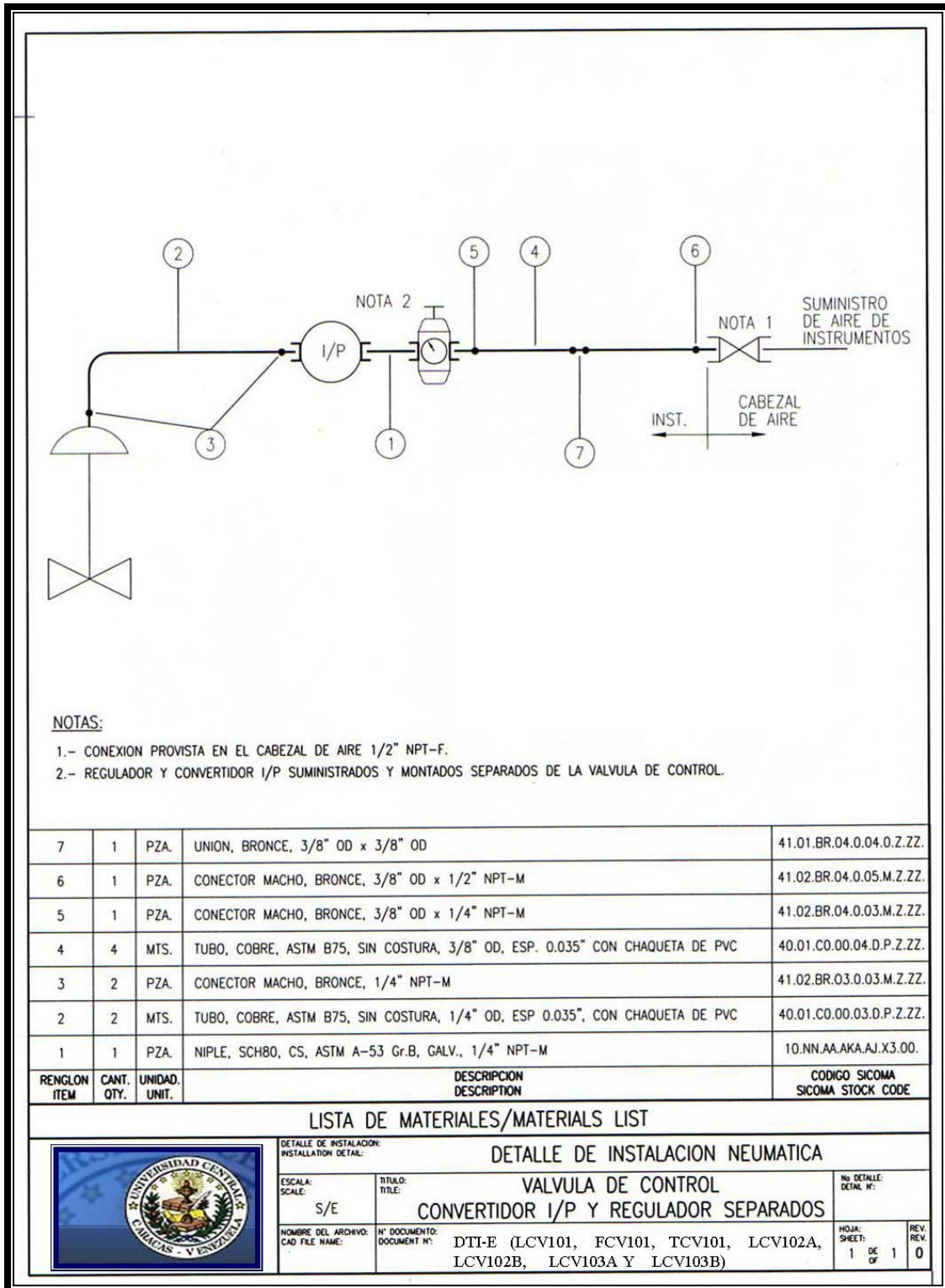
- 1.- CONEXION PROVISTA POR TUBERIA $\frac{3}{4}$ " NPT-F
- 2.- MANIFOLD SUMINISTRADO CON EL INSTRUMENTO.
- 3.- INSTRUMENTO INSTALADO EN O POR DEBAJO DE LA TOMA INFERIOR.
- 4.- INSTRUMENTO INSTALADO EN SOPORTE

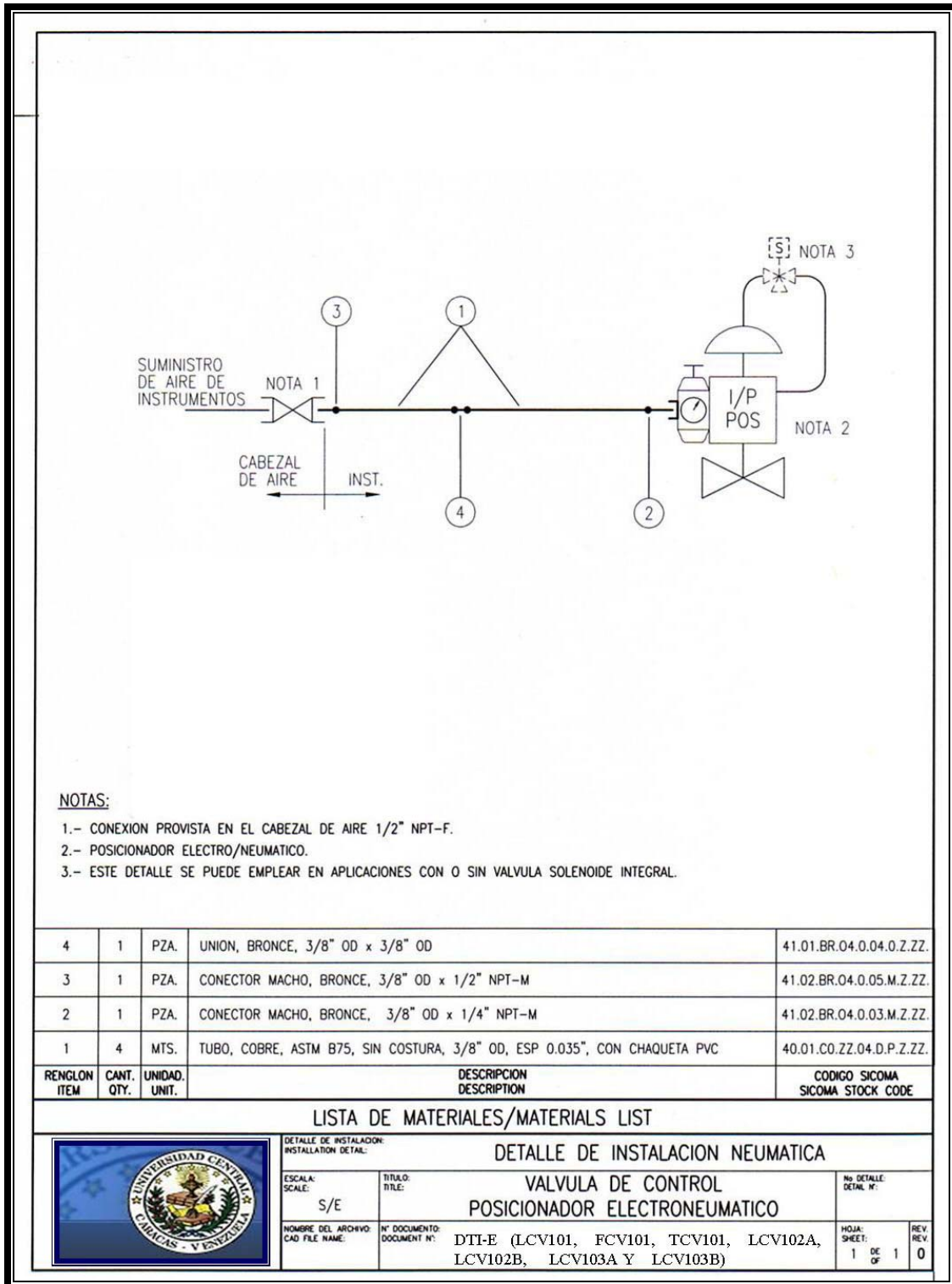
REGLON ITEM	CANT. QTY.	UNIDAD. UNIT.	DESCRIPCION DESCRIPTION	CODIGO SICOMA SICOMA STOCK CODE
2	3	PZA.	CONECTOR MACHO, 316SS, 1/2" OD x 1/2" NPT-M	41.02.SS.05.0.05.M.Z.ZZ.
1	2	MTS.	TUBO, 316SS, SIN COSTURA, 1/2" OD, ESP 0.049"	40.01.SS.00.05.G.Z.Z.ZZ.

LISTA DE MATERIALES/MATERIALS LIST

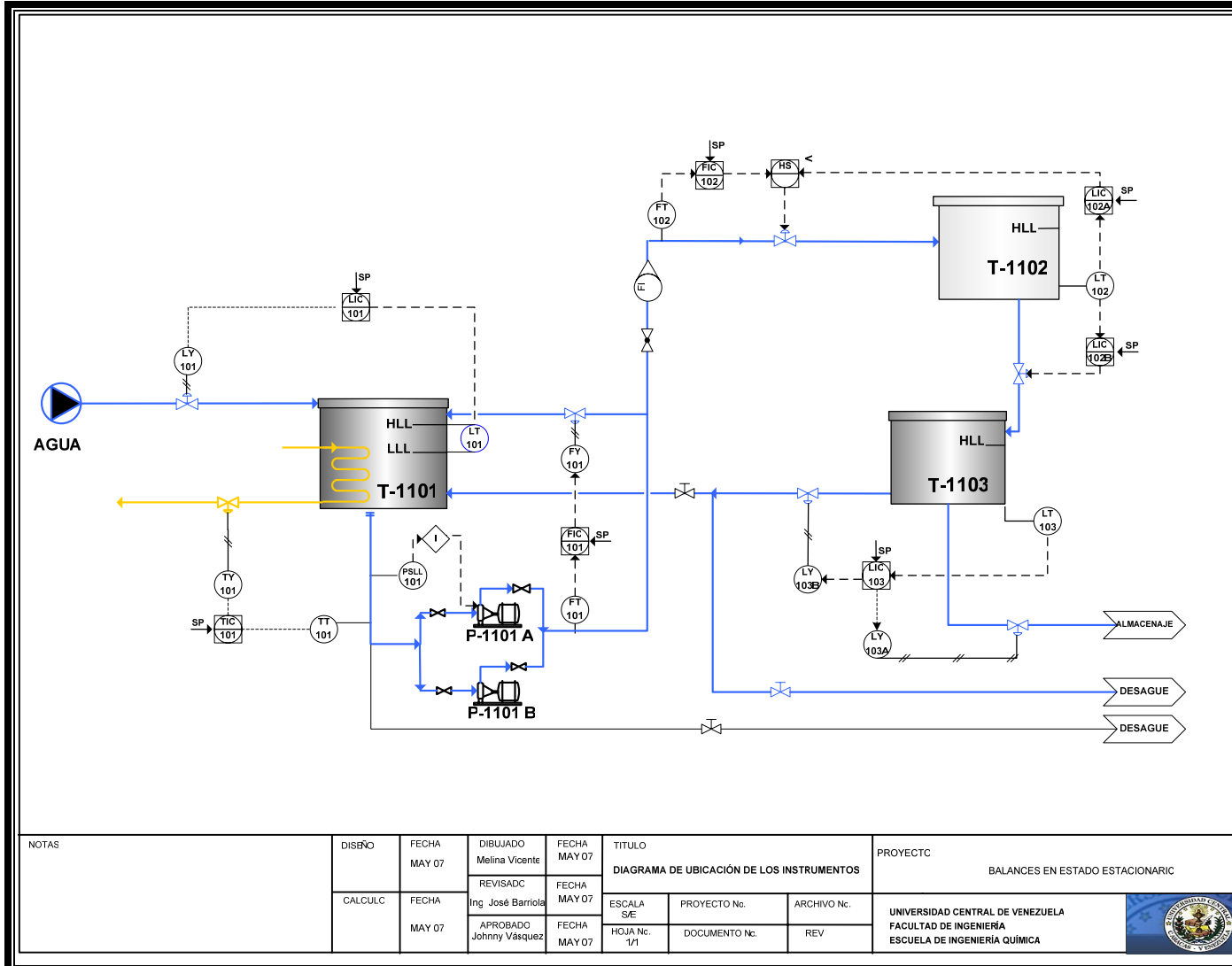
	DETALLE DE INSTALACION: INSTALLATION DETAIL:			DETALLE DE INSTALACION A PROCESO	
	ESCALA: SCALE:	TITULO: TITLE:	No DETALLE: DETAIL N°:		
	S/E	TRANSMISOR DE NIVEL (D/P) INSTALACION INFERIOR - ATMOSFERICO			
	NOMBRE DEL ARCHIVO: CAD FILE NAME:	N° DOCUMENTO: DOCUMENT N°:	DTI-E (LT101, LT102 y LT103)	HOJA: SHEET:	REV. REV.
			1 DE OF	1 0	







**A.18. *DIAGRAMA DE UBICACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS
EN EL PANEL DE CONTROL DE LA PRÁCTICA DE
“BALANCES EN ESTADO NO ESTACIONARIO”***



NOTAS	DISEÑO	FECHA MAY 07	DIBUJADO Melina Vicente	FECHA MAY 07	TITULO DIAGRAMA DE UBICACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS			PROYECTC	BALANCES EN ESTADO ESTACIONARIC
	CALCULC	FECHA MAY 07	REVISADC Ing José Barriola	FECHA MAY 07	ESCALA S/E	PROYECTO Nc.	ARCHIVO Nc.	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA	
			APROBADO Johnny Vásquez	FECHA MAY 07	HOJA Nc. 1/1	DOCUMENTO Nc.	REV		

APÉNDICE B
CÁLCULOS TIPOS

CÁLCULOS TIPOS

Dimensionamiento de los equipos en la práctica de “Balances en Estado no Estacionario”

Esta sección presenta toda la información mínima necesaria del diseño de equipos e instrumentos de la práctica “Balances en Estado No Estacionario”, describiendo los criterios empleados en cada caso, heurísticas y las suposiciones empleadas más relevantes del mismo, apoyados en las normas PDVSA.

1. Dimensionamiento de Válvulas de Control

Previo al dimensionamiento de las válvulas de control se deben conocer: condiciones de operación, rangos de operación, diámetros de las tuberías a las cuales les serán instalados los instrumentos de control, así como también se debe seleccionar el tipo de válvula a emplear.

El procedimiento empleado para el dimensionamiento corresponde al descrito según el documento de PDVSA CIED denominado “Cálculo y Selección de Válvulas de Control”.

Aspectos generales y heurísticas que requieren atención especial en el proceso de selección de una válvula de control:

- Limite permisible de Presión: seleccionada en función del estándar ANSI de presiones en base al acero y al acero inoxidable, de acuerdo a los elementos comúnmente más utilizados en la factibilidad del cuerpo de las válvulas.
- Temperatura: debe ser tomada en cuenta especialmente en cuanto a la dureza del material del cuerpo y la expansión de ciertas partes de la válvula.

- Selección del tipo de material: los materiales del cuerpo deben cubrir dos aspectos importantes; deben soportar la presión de operación y ser resistentes a la corrosión
- Características de flujo: se debe al modelo de variación del flujo, a la caída de presión constante, con respecto a la posición de la válvula, como por ejemplo: apertura rápida, lineal e isoporcentual. La selección de la característica tiene una fuerte influencia en la estabilidad y controlabilidad del proceso, debido a que esta característica modifica la ganancia de lazo cerrado.
- Rangoabilidad: se debe tomar en cuenta la relación o cociente entre el flujo máximo y mínimo controlable a través de una válvula.
- Caída de presión: se toma en consideración la caída de presión que la válvula puede soportar cuando se encuentra totalmente abierta.
- Ruido y cavitación: deben ser tomados en cuenta ya que ambos son consecuencias de las altas caídas de presión y las altas tasas de flujo.
- Tipo de conexiones.

Válvula de Control seleccionada:

(1.a) Tipo: Válvula de Globo.

Criterios empleados para la selección de las Válvulas de Control de tipo Globo:

- Este tipo de válvulas se emplea en líneas de flujo que requieren estrangulamiento y regulación del fluido y a su vez necesitan manipulación continua.
- Se recomienda su uso para corrientes líquidas, vapores y sustancias corrosivas.
- Es eficiente a nivel de estrangulamiento desde un rango moderado hasta un flujo pleno.
- Permite un control exacto del fluido.

- Provee buen control con bajos volúmenes de flujo.
- Las válvulas de globo que están destinadas para aberturas y cierres, permiten cambiar la empacadura del vástago de servicio con la válvula totalmente abierta.

Sin embargo durante el análisis de selección se tomaron en cuenta las siguientes desventajas:

- Implementar una válvula de este tipo implica afrontar costos elevados.
- Se manejan altas caídas de presión.
- El asiento puede dañarse con facilidad con los sólidos atrapados entre el macho o el disco y el asiento. Por ello se prefieren estas válvulas para servicios limpios, tal y como es el caso de esta propuesta.
- Se debe considerar que aún en casos donde el fluido es limpio ocurren daños al arranque de la planta antes de poder lavar las tuberías para eliminar incrustaciones y otros cuerpos extraños.

(1.b) Característica: Isoporcentual.

Se determinó esta característica debido a que produce un cambio muy pequeño en el flujo regulado al inicio del desplazamiento de la válvula, pero conforme éste se abre hasta la posición de abertura máxima, el flujo aumenta considerablemente. Condición requerida en el sistema de estudio.

Para realizar el dimensionamiento de válvulas se debe considerar que el fluido se encuentre bastante alejado de su temperatura de saturación (a condiciones de entrada), en la zona turbulenta, con una viscosidad cercana a la del agua y tamaños de tuberías y válvulas idénticos, en este caso.

Es importante considerar que para el dimensionamiento de la válvula mediante el cálculo del coeficiente de flujo de la válvula (C_v), el valor de C_v debe ser

calculado de tal manera que, cuando la válvula se abra completamente, el flujo que pase sea más del que se requiere en condiciones normales de operación; es decir, debe existir un factor de sobrediseño en la válvula para el caso en el que se requiera más flujo y este sobre diseño se expresa mediante la ecuación (Ec.13);

$$q_{Diseño} = 2.0 q_{Requerido} \quad (Ec.13)$$

Donde:

$q_{diseño}$: Flujo de líquido sobrediseñado en Gpm.

$q_{Requerido}$: Flujo de líquido requerido en Gpm.

Por ejemplo para la válvula que regula el flujo de alimentación al tanque 1, para un flujo máximo de operación igual a 9.24 gpm se tiene un flujo de sobrediseño:

$$q_{Diseño} = 2.0 * 9.24 \text{ gpm}$$

$$q_{Diseño} = 18.48 \text{ gpm}$$

La ecuación básica (1.2) es la que se utiliza con líquidos para dimensionar una válvula de control y es la misma para todos los fabricantes,

$$q = cv \sqrt{\frac{\Delta P}{Gf}} \quad (Ec. 14)$$

Donde:

q: Flujo de líquido de operación en Gpm.

Cv: Coeficiente de flujo de la válvula.

Gf: Gravedad específica del líquido a la temperatura en que fluye, para agua = 1 a 60 °F.

ΔP : Caída de presión P1-P2, en Psi en la sección de la válvula.

Para la selección de la caída de presión existen varias reglas prácticas que se aplican mayormente. En este caso se aplicó una caída de presión igual a 10 psi, sin embargo cabe destacar que la escogencia de este valor dependió de la situación y del criterio aplicado, basado en la simplificación de los cálculos debido a la poca información disponible.

Continuando con el ejemplo para la válvula que regula el flujo de alimentación al tanque 1:

Se tiene un valor de C_v para un flujo máximo igual a 9.24 Gpm:

$$9.24\text{Gpm} = C_v \sqrt{1 * 10/1}$$

$$C_v = 3$$

Para el cálculo de la apertura de la válvula de control se emplea la ecuación (Ec.15) correspondiente a la válvula de característica isoporcentual:

$$C_{v_{Oper}} = (C_v|_{vp=1}) \alpha^{vp-1} \tag{Ec. 15}$$

Donde:

α : Parámetro de ajuste de la válvula.

$(C_v|_{vp=1})$: Coeficiente de la válvula cuando está completamente abierta.

vp : Abertura de la válvula de control.

Tabla N° 22: Coeficientes máximos de flujos de las Válvulas de Control del proceso de Balances en Estado No Estacionario (Elaboración propia).

Corrientes	Flujo máximo en la corriente (Gpm)	Válvula de Control	Cv máximo
Vapor de Caldera	100 Lb/h	TCV 101	1.39
Alimentación al Tanque T ₁	9.24	LCV 101	3.26
Alimentación al Tanque T ₂	5.5	LCV 102B	3.17
Alimentación al Tanque T ₃	5.5	LCV 102A	1.95
Recirculación del Tanque T ₁	8.14	FCV 101	2.87
Salida del Tanque T ₃	5.5	LCV 103A	3.3
Salida del Tanque T ₃ al T ₁	4.4	LCV 103B	2.5

2. Desarrollo del modelo matemático del sistema Balances en Estado no Estacionario.

Balace de Masa en el Tanque 1

$$E = S + T + A$$

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s + \frac{\partial m}{\partial t}$$

$$\rho F_1 + \rho F_3 + \rho F_b = \rho F_0 + \frac{\partial(V_1 \rho)}{\partial t}$$

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} = \frac{F_1 + F_3 + F_2}{A_{Tanque1}} \tag{Ec. 16}$$

Ecuación de la Válvula de Control (*LCV 101*) de la corriente de Alimentación al Tanque 1:

$$F_1 = C_{v_1} u_{p_1}(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{LCV101}}{G_f}} \quad (Ec. 17)$$

Ecuación de la Válvula de Control (*LCV 103A*) de la corriente del Tanque 3 al Tanque1:

$$F_3 = C_{v_5} u_{p_5}(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{LCV103}}{G_f}} \quad (Ec. 18)$$

Ecuación de la Válvula de Control (*FCV 102A*) de la corriente de Alimentación al Tanque 2:

$$F_2 = C_{v_3} u_{p_3}(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{FCV102}}{G_f}} \quad (Ec. 19)$$

Sustituyendo en la (Ec. 16), las (Ec. 17,18 y 19) se tiene:

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} = \frac{C_{v_1} v_{p_1}(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{LCV101}}{G_f}} - C_{v_3} v_{p_3}(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{LCV102A}}{G_f}} + C_{v_5} v_{p_5}(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{LCV103B}}{G_f}}}{A_{Tanque1}} \quad (Ec. 20)$$

Nota: La ecuación (Ec. 20) es la que se debe linealizar para obtener las funciones de transferencia correspondiente.

Linealizando la Ecuación (Ec. 20) se tiene:

$$h_1(s) = \frac{h_3(s)k_0 - \nu p_3(s)k_1 + \nu p_5(s)k_2 + \nu p_1(s)k_3}{\tau_1 s + 1} \quad (\text{Ec. 21})$$

De la ecuación (Ec. 21) se obtienen las funciones de transferencia:

$$\frac{h_1}{\nu p_3} = \frac{k_1}{\tau_1 s + 1} \quad (21.a)$$

$$\frac{h_1}{\nu p_5} = \frac{k_2}{\tau_1 s + 1} \quad (21.b)$$

$$\frac{h_1}{\nu p_1} = \frac{k_3}{\tau_1 s + 1} \quad (21.c)$$

$$\frac{h_1}{h_3} = \frac{k_0}{\tau_1 s + 1} \quad (21.d)$$

Balance de Energía en el Tanque 1

$$E = S + T + A$$

$$\dot{m} e(u + k + p)_e = \dot{m} s(u + k + p)_s + \frac{\partial E}{\partial t} - Q_{\text{vapor}}$$

$$\dot{m} e(u + k + p)_e = \dot{m} s(u + k + p)_s + \frac{\partial U}{\partial t} - Q_{\text{vapor}}$$

$$\rho C_p T_1 F_1 = \rho C_p T_2 F_2 + \frac{\partial (m C_p (T_2 - T_1))}{\partial t} - Q_{\text{vapor}}$$

$$\rho C_p T_1 F_1 = \rho C_p T_2 F_2 + \frac{\partial(\rho V C_p (T_2 - T_1))}{\partial t} - m_{\text{vapor}} * \lambda_{\text{vapor}}$$

$$A_{\text{Tanque1}} h_1 \frac{\partial T_2}{\partial t} = F_b T_b + F_1 T_1 - F_2 T_2 - A_{\text{Tanque1}} T_2 \frac{\partial h_1}{\partial t} - A_{\text{Tanque1}} T_1 \frac{\partial h_1}{\partial t} \quad (\text{Ec. 22})$$

Sustituyendo la ecuación (Ec. 17 y 19) en la Ecuación (Ec. 22) se tiene:

$$A_{\text{Tanque1}} h_1 \frac{\partial T_2}{\partial t} = 2C_{v_1} v_{p_1}(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{LCV101}}{Gf}} T_1 + C_{v_5} v_{p_5}(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{LCV103B}}{Gf}} T_1 \dots$$

$$\dots - T_2 \left(C_{v_1} v_{p_1}(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{LCV101}}{Gf}} \right) - T_1 \left(C_{v_3} v_{p_3}(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{LCV102A}}{Gf}} \right) + C_{v_0} v_{p_0}(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{TCV101}}{Gf}} \quad (23)$$

Nota: La ecuación (Ec. 23) es la que se debe linealizar para obtener las funciones de transferencia correspondientes.

Linealizando la Ecuación (24) se tiene:

$$T_2(s) = \frac{T_1 k_{12} - v_{p_1} k_{13} - v_{p_3} k_{14} + v_{p_5} k_{15} + v_{p_0} k_{16} + h_3(s) k_{17} - h_1 k_{18}}{\tau_4 s + 1} \quad (\text{Ec. 24})$$

De la ecuación (Ec.24) se obtienen las funciones de transferencia:

$$\frac{T_2}{v_{p_0}} = \frac{k_{16}}{\tau_4 s + 1} \quad (24.a)$$

$$\frac{T_2}{v_{p_1}} = \frac{k_{13}}{\tau_4 s + 1} \quad (24.b)$$

$$\frac{T_2}{h_1} = \frac{k_{18}}{\tau_4 s + 1} \quad (24.c)$$

$$\frac{T_2}{vp_3} = \frac{k_{14}}{\tau_4 s + 1} \quad (24.d)$$

$$\frac{T_2}{vp_5} = \frac{k_{15}}{\tau_4 s + 1} \quad (24.e)$$

$$\frac{T_2}{h_3} = \frac{k_{17}}{\tau_4 s + 1} \quad (24.f)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{k_{12}}{\tau_4 s + 1} \quad (24.g)$$

Balance de Masa en el Tanque 2:

$$E = S + T + A$$

$$\dot{m}e = \dot{m}s + \frac{\partial m}{\partial t}$$

$$\rho F_2 = \rho F_4 + \frac{\partial(V_2 \rho)}{\partial t}$$

$$\frac{\partial h_2}{\partial t} = \frac{F_2 - F_4}{A_{\text{Tanque 2}}} \quad (Ec. 25)$$

Ecuación de la Válvula de Control (*LCV 102B*) de la corriente de Alimentación al Tanque 3:

$$F_4 = C_{v_4} u_{p_4}(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{LCV102}}{Gf}} \quad (Ec. 26)$$

Sustituyendo en la ecuación (25) la ecuación (19 y 26) se tiene:

$$\frac{\partial h_2}{\partial t} = \frac{C_{v_3} u_{p_3}(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{FCV102}}{Gf}} - C_{v_4} u_{p_4}(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{LCV102}}{Gf}}}{A_{Tanque 2}} \quad (Ec.27)$$

Nota: La ecuación (27) es la que se debe linealizar para obtener la función de transferencia correspondiente.

Linealizando la Ecuación (27) se tiene:

$$h_2(s) = \frac{vp_3(s)k_9 - vp_4(s)k_{10} + h_1(s)k_{11}}{\tau_2 s + 1} \quad (Ec. 28)$$

De la ecuación (Ec. 28) se obtienen las funciones de transferencia:

$$\frac{h_2}{vp_3} = \frac{k_9}{\tau_2 s + 1} \quad (28.a)$$

$$\frac{h_2}{vp_4} = \frac{k_{10}}{\tau_2 s + 1} \quad (28.b)$$

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{k_{11}}{\tau_2 s + 1} \quad (28.c)$$

Balace de Masa en el Tanque 3:

$$E = S + T + A$$

$$\dot{m} e = \dot{m} s + \frac{\partial m}{\partial t}$$

$$\rho F_4 = \rho F_3 + \rho F_5 + \frac{\partial(V_3 \rho)}{\partial t}$$

$$\frac{\partial h_3}{\partial t} = \frac{F_4 - F_3 - F_5}{A_{\text{Tanque 3}}} \quad (\text{Ec. 29})$$

Ecuación de la Válvula de Control (*LCV 102A*) de la corriente de Salida del Tanque 3:

$$F_5 = C_{v_6} u_{p_6}(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{LCV102}}{Gf}} \quad (\text{Ec. 30})$$

Sustituyendo en la ecuación (29) las ecuaciones (18, 25 y 29) se tiene:

$$\frac{\partial h_3}{\partial t} = \frac{C_{v_4} v_{p_4}(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{LCV102B}}{Gf}} - C_{v_5} v_{p_5}(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{LCV103B}}{Gf}} - C_{v_6} v_{p_6}(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{LCV103A}}{Gf}}}{A_{\text{Tanque 3}}} \quad (\text{Ec. 31})$$

Nota: La ecuación (31) es la que se debe linealizar para obtener la función de transferencia correspondiente.

Linealizando la Ecuación (31) se tiene:

$$h_3(s) = \frac{vp_4(s)k_5 - vp_5(s)k_6 - vp_6(s)k_7 + h_2(s)k_8 + h_1(s)k_4}{\tau_3s + 1} \quad (Ec. 32)$$

De la ecuación (32) se obtienen las funciones de transferencia:

$$\frac{h_3}{vp_4} = \frac{k_5}{\tau_3s + 1} \quad (32.a)$$

$$\frac{h_3}{vp_5} = \frac{k_6}{\tau_3s + 1} \quad (32.b)$$

$$\frac{h_3}{vp_6} = \frac{k_7}{\tau_3s + 1} \quad (32.c)$$

$$\frac{h_3}{h_2} = \frac{k_8}{\tau_3s + 1} \quad (32.d)$$

$$\frac{h_3}{h_1} = \frac{k_4}{\tau_3s + 1} \quad (32.e)$$

3. Dimensionamiento del Serpentín de Calentamiento

El E-1101 es un serpentín de calentamiento y fue diseñado con la finalidad de establecer el lazo de control de temperatura. Para el dimensionamiento del mismo, se utilizó el programa de Simulación PROII 5.61.

En la *Tabla N° 23* se muestran las condiciones de operación de los fluidos asociados al serpentín de Calentamiento E-1101.

Tabla N° 23: Condiciones de Operación de los fluidos asociados al serpentín ^(Elaboración Propia).

Propiedades	Fluido Caliente (Vapor Saturado)	Fluido Frío (Agua)
Temperatura de entrada del fluido (°F)	293	83
Temperatura de salida del fluido (°F)	266	100
Temperatura media del fluido (°F)	279,5	91,5
Flujo másico (lb/h)	100	5550

Para el diseño del intercambiador fue necesario estimar las propiedades físicas de los fluidos involucrados, esto se realiza evaluando las propiedades a la temperatura media del fluido. Estos valores fueron obtenidos a partir del programa de simulación comercial PROII 5.61; y son mostrados en la *Tabla N° 24* y *N° 25*.

Tabla N° 24: Propiedades Físicas de los fluidos asociados al serpentín ^(Elaboración Propia).

Propiedades	Fluido Caliente (Vapor Saturado)	Fluido Frío (Agua)
Densidad (lb/pie ³)	0,134	62,338
Capacidad Calorífica (Btu/lb°F)	0,282	0,998
Viscosidad (lb/pie·h)	0,01395	0,028
Conductividad Térmica (Btu/hpie°F)	0,0164	0,355

Tabla N° 25: Características del Serpentín ^(Elaboración Propia).

Características	
Cantidad de Calor Q (MMBTU/hr)	0,0942
Área de Transferencia A (pie ²)	5,01
$\Delta T_m \ln$ (°F)	187,9

A partir del área de transferencia, se calculó la longitud efectiva del tubo para el diámetro nominal establecido de ½ plg.

$$L = \frac{A}{\pi \cdot D_{nom}} \tag{Ec. 33}$$

Donde:

A : Área de transferencia de calor (pie²).

L : Longitud del tubo (pie).

D_{nom} : Diámetro nominal seleccionado (pie).

$$L = \frac{5,01 \text{ pie}^2}{3,14159 \cdot 0,5 \text{ pie} \cdot \left(\frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pie}} \right)} = 38 \text{ pies}$$

Asumiendo que el serpentín ocupará el diámetro del tanque, se tiene:

$$L_{CIRCUNFERENCIA} = \pi \cdot D_{tanqueT1}$$

$$L_{CIRCUNFERENCIA} = \pi \cdot 2,13 \text{ pie} = 6,69 \text{ pie}$$

Por consiguiente el número de vueltas que debe tener el serpentín fue:

$$N^{\circ} \text{ vueltas} = \frac{L}{L_{CIRCUNFERENCIA}} \quad (\text{Ec. 34})$$

$$N^{\circ} \text{ vueltas} = \frac{38 \text{ pies}}{6,69 \text{ pies}} = 6 \text{ vueltas} .$$

Cálculo de la caída de presión

Para el cálculo de la caída de presión se tomó en cuenta que a través del tubo ocurre condensación del vapor según los reportes arrojados por el Simulador PROII, por lo tanto se hizo el cálculo en base a la condensación ya que la caída de presión en el líquido será mayor que para el vapor.

Área de flujo del tubo

$$A_{FT} = \frac{\pi}{4} \cdot Di^2 \quad (Ec. 35)$$

$$A_{FT} = \frac{\pi}{4} \cdot (0,622 \text{ plg})^2 \cdot \left(\frac{1 \text{ pie}^2}{144 \text{ plg}^2} \right)$$

$$A_{FT} = 0,00844 \text{ pie}^2$$

Velocidad másica del fluido

$$G_T = \frac{m_t}{A_{FT}} \quad (Ec. 36)$$

Donde:

G_T : Velocidad de flujo másico por los tubos (lbm/h.pie²).

m_t : Flujo másico de condensado que pasa por los tubos (lbm/h).

$$G_T = \frac{100 \text{ lb/h}}{0,00844 \text{ pie}^2}$$

$$G_T = 11904,8 \frac{\text{lb}}{\text{h} \cdot \text{pie}^2}$$

Número de Reynolds

$$Re_T = \frac{Di \cdot G_T}{\mu_T} \quad (Ec. 37)$$

Donde:

Re_T : Número de Reynolds (*adim*).

μ_{TEGT} : Viscosidad evaluada a T_m del fluido que circula por los tubos (lbm/pie.h).

$$Re_T = \frac{0,622 p \lg \cdot \left(\frac{1 pie}{12 p \lg} \right) \cdot 11904,8 lb/h \cdot pie^2}{0,028 lb/pie \cdot h}$$

$$Re = 22038 \quad (\text{Régimen turbulento})$$

Factor de Darcy

$$f_D = 0,184 \cdot Re^{-0,2} \quad (Ec. 38)$$

Donde:

f_D : Factor de Fricción de Darcy para los tubos (adim).

$$f_D = 0,184 \cdot (22038)^{-0,2}$$

$$f_D = 0,024$$

Caída de Presión del lado del tubo

$$\Delta P_t = f_D \cdot \frac{l}{\rho_w^2 \cdot g} \cdot \frac{G_w^2}{D_{it}} \quad (Ec. 39)$$

Donde:

ΔP_t : Caída de Presión del lado del tubo (psi).

$$\Delta P_t = 0,024 \cdot \frac{38 pie}{\left(62,338 lb/pie^3 \right)^2 \cdot 4,17 \times 10^8 pie/h^2} \cdot \frac{\left(22038 lb/hpie^2 \right)^2}{0,5 p \lg \cdot \left(\frac{1 pie}{12 p \lg} \right)}$$

$$\Delta P_t = 5,3 \times 10^{-3} \text{ pie}.$$

$$\Delta P_t = 5,3 \times 10^{-3} \text{ pie} \cdot \frac{62,338 \text{ lb/pie}^3}{62,4 \text{ lb/pie}^3} \cdot \frac{14,7 \text{ psi}}{33,9 \text{ pieH}_2\text{O}} = 2,3 \times 10^{-3} \text{ psi}$$

APÉNDICE C

ALGORITMOS UTILIZADOS PARA LA SIMULACIÓN

ALGORITMOS UTILIZADOS PARA LA SIMULACIÓN

Los algoritmos regulatorios de control, tienen una entrada (PV) que corresponde con la variable que se controla y una entrada de referencia (SP) que es el valor al cual debe llegar, el algoritmo de control actúa sobre la diferencia de estos dos valores para generar una señal de salida que corresponde a la acción de control. El valor de referencia (SP) puede ser indicado directamente por el operador, por el supervisor o por el ingeniero, estas posibilidades dan origen a tres modos de operación típicos de los puntos regulatorios de control: modo manual (MAN), modo automático (AUTO) y modo cascada (CAS).

En el modo manual (MAN), el punto se desvincula del esquema de control en el que se haya inserto y el usuario es capaz de fijar directamente el valor de salida del punto (OP). Es decir, la referencia (SP) y la señal de proceso (PV) no toman parte en el cálculo de la OP sino que ésta responde únicamente al valor indicado por el usuario. En el modo automático (AUTO) el usuario especifica el valor del SP y el algoritmo actúa de tal manera que la salida del punto se ajuste para satisfacer el valor configurado en la referencia. Por último, en el modo cascada (CAS) el SP es recibido de un controlador maestro.

Algoritmos Regulatorios de Control:

Algoritmo PID: representa un bloque regulatorio de control que opera como un controlador de acción proporcional-integral-derivativa. Posee dos entradas analógicas, la variable de proceso (PV) y el set point (SP). La diferencia entre la PV y el SP es el error y este bloque calcula la señal de salida (OP) que deberá reducir el error hasta cero. El set point SP es escrito por el operador cuando el punto trabaja en el modo AUTO, mientras que si es escrito de otro punto del sistema debe operar en modo CAS. Tanto las señales de SP como las PV son procesadas para verificar sus rangos y llevarlas a porcentaje, luego se aplica el algoritmo y se genera la señal de

salida que es procesado para expresarla en una señal OP. Es importante, cuando se trabaja con algoritmos PID, saber si la acción del controlador es directa o inversa; ya que muchas veces ocurren problemas en los esquemas de control por no elegir adecuadamente esta acción. En la *Figura N° 70*, se muestra el esquema del algoritmo.

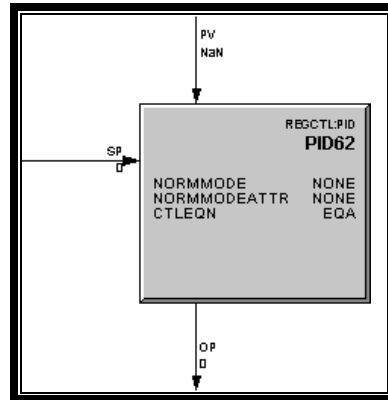


Figura N° 70: Algoritmo Regulatorio de Control PID (Elaboración propia)

OVRDSEL (Selector Override): Este bloque acepta por encima de cuatro entradas (primarias) y selecciona una basando en el valor más alto o más bajo de la entrada; el bloque siempre fuerza a la entrada no seleccionada para seguir las entradas seleccionadas. En la *Figura N° 71*, se muestra el esquema del algoritmo.

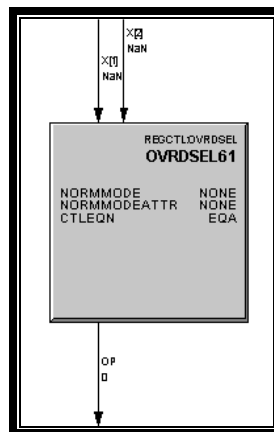


Figura N° 71: Algoritmo Regulatorio de Control OVRDSEL (Elaboración propia)

AUTOMAN (Auto Manual): este bloque aplica para una ganancia y bias especificado por el usuario en la salida. Este valor especificado puede ser un valor prefijado. Este valor prefijado es almacenado manualmente o por programación o por un valor externo proviene de otro bloque. En la *Figura N° 72*, se muestra el esquema del algoritmo.

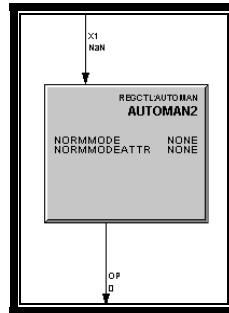


Figura N° 72: Algoritmo Regulatorio de Control AUTOMAN (Elaboración propia)

FANOUT: Este bloque usa una entrada y provee múltiples salidas. Se puede especificar una ganancia, bias y razón de flujo para cada salida. Cada valor puede ser fijado o externo, es decir puede provenir de otro bloque. El valor fijado puede ser almacenado manualmente o programado. Este bloque calcula un bias flotante por separado para cada salida siguiendo la inicialización o el cambio de modo. En la *Figura N° 73*, se muestra el esquema del algoritmo.

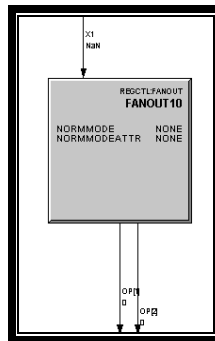


Figura N° 73: Algoritmo Regulatorio de Control FANOUT (Elaboración propia)

Algoritmos Auxiliares:

AUXSUMMER (Sumador Auxiliar): EL bloque sumador permite configurar más de diez entradas separadas para calcular una variable de proceso (PV). A través de la configuración, se puede definir un factor escalar, un bias y la descripción de cada entrada. Este algoritmo se ve representado en la *Figura N° 74*.

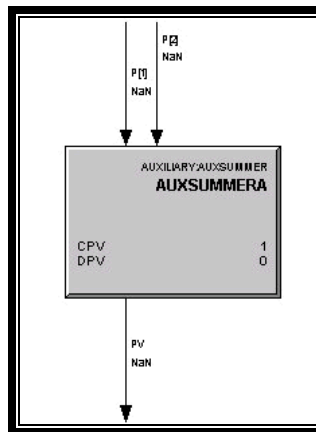


Figura N° 74: Algoritmo Auxiliar AUXSUMMER (Elaboración propia)

LEADLAG (Atraso/Adelanto): Este algoritmo provee una señal de salida que puede estar retrasada en un tiempo determinado por el usuario. A esta señal de entrada se le aplica una dinámica mediante una función de transferencia. Por consiguiente, este algoritmo resulta de gran utilidad para recrear las dinámicas de los procesos cuando se quiere realizar una simulación, aunque este algoritmo suele estar asociado a la alimentación adelantada (Feedforward) para compensar perturbaciones en los procesos. Está sujeto a cambios en el valor de la entrada (P1) para una compensación por adelanto y dos factores para la compensación por retraso. Existe una constante de tiempo configurado por el usuario para cada factor de compensación. En la *Figura N° 75*, se muestra el esquema del algoritmo.

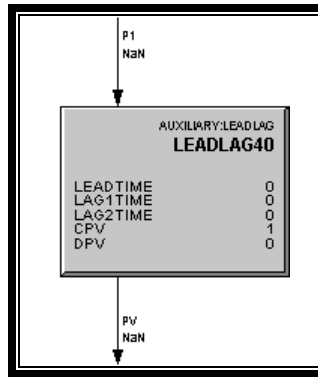


Figura N° 75: Algoritmo Auxiliar LEADLAG (Elaboración propia)

TOTALIZER (Totalizador): Este algoritmo periódicamente adiciona un valor de entrada (P1) a un valor del acumulador (PV).

El TOTALIZADOR tiene dos estados: Arranque y Parada. El parámetro STATE identifica el estado actual y pueden ser usados para cambiar el estado: El operador puede comandar al acumulador a Arrancar, Parar o Reajustar. El totalizador debe reiniciarse usando el pin RESET antes de que el totalizador comience a contar, de otra manera P1 tendrá un buen valor pero la PV quedará en cero. Cuando el totalizador recibe el comando de RESET, copia el último valor de la PV y luego lo hace igual a la PV con el valor de reinicio. Esto permite que no se pierda la acumulación. En la *Figura N° 76*, se muestra el esquema del algoritmo.

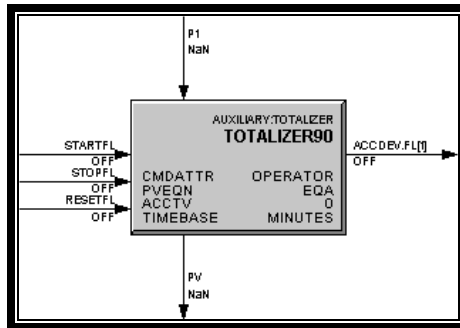


Figura N° 76: Algoritmo Auxiliar TOTALIZER (Elaboración propia)

DATAACQ (Adquisición de Data): este algoritmo convierte un valor específico de entrada (P1) en un valor deseado de salida PV en unidades de ingeniería. En la *Figura N° 77*, se muestra el esquema del algoritmo.

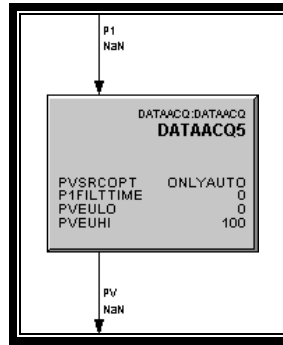


Figura N° 77: Algoritmo DATAADQUISITION (Elaboración propia)

DEVCTL (Device Control): este algoritmo de control de dispositivo, permite la manipulación de un conjunto de salidas digitales y las interpreta correspondiendo a la retroalimentación de las señales de entrada digital. La operación consiste en transmitir el comando representado por el estado del parámetro OP (Comando de Estado de Salida), monitoreo de PV (estado activo) y produciendo alarmas basados en varias configuraciones tales como si o no la PV ha alcanzado el estado comandado en la OP. En la *Figura N° 78*, se muestra el esquema del algoritmo.

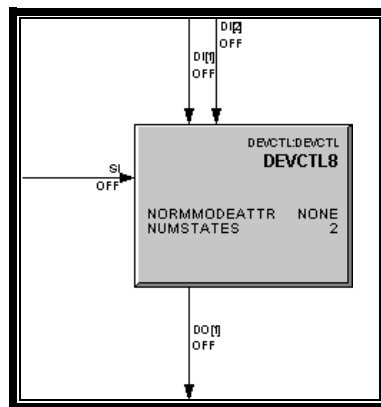


Figura N° 78: Algoritmo DEVCTL (Elaboración propia)

PULSE: Este bloque provee un pulso fijo a la salida cada instante en que la entrada transita del estado OFF al ON. En la *Figura N° 79*, se muestra el esquema del algoritmo.

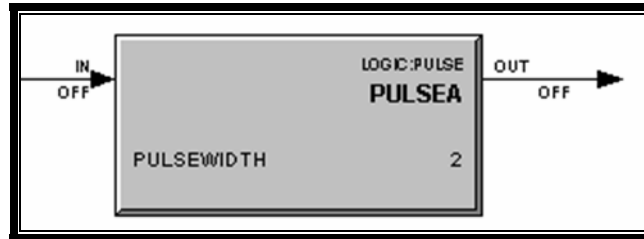


Figura N° 79: Algoritmo Lógico PULSE (Elaboración propia)

ONDELAY: Cuando el estado de la entrada cambia de OFF a ON, un temporizador interno comienza a contar cuando el flanco va de bajada asociado al retraso que es especificado en el parámetro DLYTIME. Cuando se acaba el tiempo, la entrada es monitoreada de nuevo, y si esta todavía en ON, la salida esta en estado ON; cuando el estado de la entrada esta transitando a OFF, la salida cambiará a OFF, seguidamente el temporizador se apagará. En la *Figura N° 80*, se muestra el esquema del algoritmo.

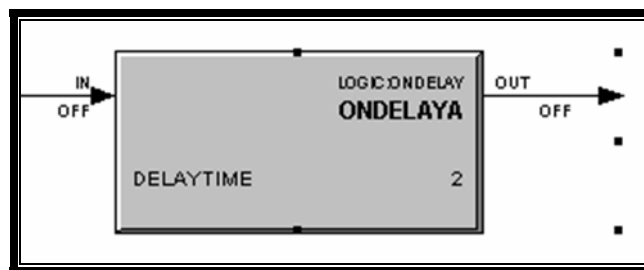


Figura N° 80: Algoritmo Lógico ONDELAY (Elaboración propia)

LIMIT: Provee una función límite de tres entradas, es decir, que provee una salida que es mantenida dentro de un rango específico de valores máximos y mínimos definidos por el usuario.

- $MN \leq OUT \leq MX$
- If IN is not NaN, $OUT = MIN (MAX (IN, MIN), MAX)$
- If IN = NaN, $OUT = NaN$

En la *Figura N° 81*, se muestra el esquema del algoritmo.

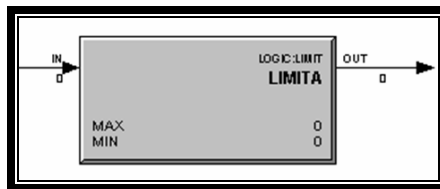


Figura N° 81: Algoritmo Lógico LÍMITE (Elaboración propia)

NOT: este algoritmo se comporta como una función inversa, es decir, invierte el estado de una entrada digital (IN) tal que la salida (OUT) es el complemento de la sola entrada, por lo tanto:

- $OUT = \text{opuesto de } IN$
- Si $IN = ON$, entonces: $OUT = OFF$.
- Si $IN = OFF$, entonces $OUT = ON$.

En la *Figura N° 82*, se muestra el esquema del algoritmo.

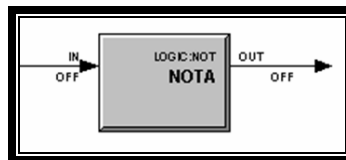


Figura N° 82: Algoritmo Lógico NOT (Elaboración propia)

FLAG: La función del bloque FLAG provee el almacenaje para un simple valor de dos estados. El valor puede ser accesado como un simple Boolean (Off u ON) usando el parámetro PVFL, o como uno de los dos valores de estado configurado por el usuario (como Arranque y Parada) a través del parámetro PV. En la *Figura N° 83*, se muestra el esquema del algoritmo.

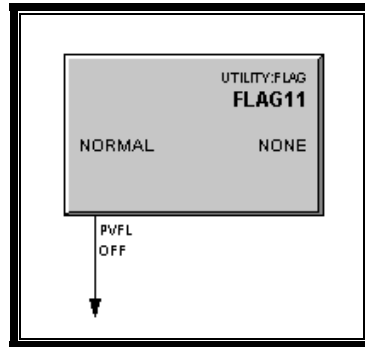


Figura N° 83: Algoritmo FLAG (Elaboración propia)

NUMERIC: Este bloque provee el almacenaje para un valor flotante el cual es accesible a través de la configuración del parámetro PV. En la *Figura N° 84*, se muestra el esquema del algoritmo.

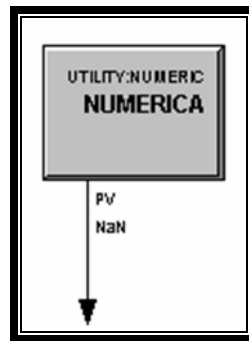


Figura N° 84: Algoritmo NUMERIC (Elaboración propia)

SWITCH: Este algoritmo acepta por encima de ocho (8) entradas y opera como un solo polo. La posición del SWITCH puede ser cambiado por el operador, por un programa o por otro bloque de función. En la *Figura N° 85*, se muestra el esquema del algoritmo.

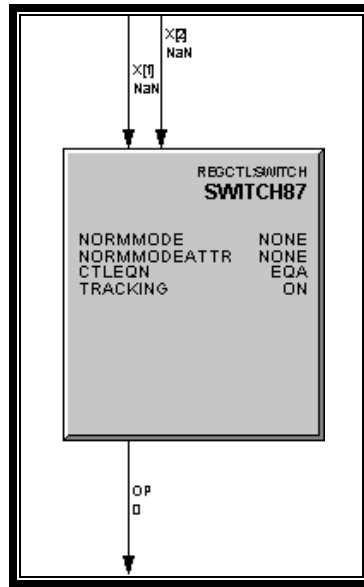


Figura N° 85: Algoritmo SWITCH (Elaboración propia)

Se puede forzar la entrada no seleccionada para seguir la entrada a través de la opción TRACKING. Si esta opción está en ON, este algoritmo continuamente inicializa en la entrada no seleccionada, es decir, en cada ciclo solicita las primarias no seleccionadas para inicializar y para fijar su salida el valor en el valor de entrada seleccionada. Si TRACKING está en OFF, este bloque no inicializa la entrada no seleccionada.