



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE REGULACIÓN AUTOMÁTICA CONTROLADO POR FLUJO
PARA LA DOSIFICACIÓN DE LÍQUIDOS EN PROCESOS INDUSTRIALES**

Lucía del Mar Wolford Ramírez

Asesorado por el Ing. Byron Odilio Arrivillaga Méndez

Guatemala, agosto de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE REGULACIÓN AUTOMÁTICA CONTROLADO POR FLUJO
PARA LA DOSIFICACIÓN DE LÍQUIDOS EN PROCESOS INDUSTRIALES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUCÍA DEL MAR WOLFORD RAMÍREZ

ASESORADO POR EL ING. BYRON ODILIO ARRIVILLAGA MÉNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA EN ELECTRÓNICA

GUATEMALA, AGOSTO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADORA	Inga. Ingrid Salomé Rodríguez de Loukota
EXAMINADOR	Ing. Walter Giovanni Alvarez Marroquín
EXAMINADOR	Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UN SISTEMA DE REGULACIÓN AUTOMÁTICA CONTROLADO POR FLUJO PARA LA DOSIFICACIÓN DE LÍQUIDOS EN PROCESOS INDUSTRIALES

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 7 de febrero de 2022.


Lucía del Mar Wolford Ramírez

Guatemala 21 de mayo de 2022

Ingeniero
Julio César Solares Peñate
Coordinador del Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Apreciable Ingeniero Solares.

Me permito dar aprobación al trabajo de graduación titulado “**Diseño de un sistema de regulación automática controlado por flujo para la dosificación de líquidos en procesos industriales**”, de la señorita **Lucía del Mar Wolford Ramírez**, por considerar que cumple con los requisitos establecidos.

Por tanto, la autora de este trabajo de graduación y, yo, como su asesor, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente,



Ing. Byron Odilio Arrivillaga Méndez
Colegiado 5,217
Asesor

Byron Arrivillaga Méndez
Ingeniero Electrónico
Colegiado 5217



Guatemala, 30 de mayo de 2022

Señor director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC

Estimado Señor director:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE UN SISTEMA DE REGULACIÓN AUTOMÁTICA CONTROLADO POR FLUJO PARA LA DOSIFICACIÓN DE LÍQUIDOS EN PROCESOS INDUSTRIALES**, desarrollado por la estudiante **Lucía del Mar Wolford Ramírez**, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Julio César Solares Peñate'.

Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador de Electrónica

REF. EIME 53.2022.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área , al trabajo de Graduación de la estudiante Lucía del Mar Wolford Ramírez: **DISEÑO DE UN SISTEMA DE REGULACIÓN AUTOMÁTICA CONTROLADO POR FLUJO PARA LA DOSIFICACIÓN DE LÍQUIDOS EN PROCESOS INDUSTRIALES**, procede a la autorización del mismo.



Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo

Guatemala, 11 de agosto de 2022.

LNG.DECANATO.OI.571.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE UN SISTEMA DE REGULACIÓN AUTOMÁTICA CONTROLADO POR FLUJO PARA LA DOSIFICACIÓN DE LÍQUIDOS EN PROCESOS INDUSTRIALES**, presentado por: **Lucía del Mar Wolford Ramírez**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana



Guatemala, agosto de 2022

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Mi padre	Sergio Wolford. Por ser un ejemplo de un padre excepcional, por tu apoyo en todos los aspectos de mi vida y por ser una luz y una guía para mí.
Mi madre	Lilian Ramírez. Por tu amor incondicional y velar siempre por mi bienestar, por tu dulzura y por escucharme siempre que lo he necesitado.
Mis hermanos	Sofía, Rodrigo, Camilo y Diego (q. e. p. d.). Por ser mis compañeros de aventuras, mis mejores amigos y por siempre estar a mi lado.
Mis tíos	Manuel Ramírez, Luis Ramírez, María Wolford y Alberto Hernández por ser un ejemplo en mi vida de excelencia académica y profesional.
Mis abuelos (q. e. p. d.)	Samuel Wolford, Marta Estrada, Jesús Ramírez, Lidia García y Tiburcia de Jesús. Por enseñar a mis padres a vivir una vida basada en humildad, amor, generosidad, ética y excelencia.
Rodrigo de León	Por tu apoyo, comprensión y amor incondicionales, porque me ayudas y me motivas cada día a cumplir mis sueños. Tu presencia en mi vida es invaluable.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios y la que me brindó la oportunidad de superación profesional.
Facultad de Ingeniería	Por ser el segundo hogar durante mis años de estudio, donde encontré conocimientos, experiencias y amigos de por vida.
Mis padres	Sergio Wolford y Lilian Ramírez. Por el apoyo moral y económico que me dio la oportunidad de estudiar la carrera que yo deseara. Sin ustedes no hubiera sido posible.
Mi mascota	Kira. Por tu compañía que me motiva en cada noche de desvelo. Por brindarme tu cariño sin condición.
Mis amigos	Nelly Tórtola y Byron Paiz. El haber trabajado los proyectos con ustedes me creó gratos recuerdos. Gracias por su apoyo y amistad.
Ing. Byron Arrivillaga	Por su apoyo y por creer en mí. Por darme la oportunidad de representar a la Universidad en concursos de robótica y por haberme dado el espacio para laborar en el laboratorio de electrónica. Por su esfuerzo por los estudiantes.

**Ing. Luis Luján e Ing.
Francisco Oliva**

Por compartirme sus conocimientos y experiencias profesionales. Les agradezco su apoyo en la elaboración de este trabajo.

**Laboratorio de
Electrónica**

Por ser un espacio de aprendizaje, gracias a mis catedráticos y auxiliares que me impulsaron a seguir ampliando mis conocimientos.

**Departamento de
Matemática**

Al Ing. Arturo Samayoa por haberme dado la oportunidad de formarme en el aspecto profesional. Al Lic. Carlos Morales por sus enseñanzas y por motivarme a seguir creciendo profesionalmente y a mis amigos auxiliares, gracias por su apoyo y por tantas experiencias vividas.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. FUNDAMENTOS INGENIERILES DE LOS PROCESOS INDUSTRIALES	1
1.1. Procesos de manufactura.....	1
1.1.1. La industria y la ingeniería.....	1
1.2. Instrumentación	2
1.2.1. Instrumentación en sistemas de dosificación industrial	3
1.2.2. Sensores y transmisores	3
1.2.2.1. Clasificación de sensores	5
1.2.3. Elementos finales de control y actuadores	8
1.2.3.1. Válvulas de control	9
1.2.3.2. Variadores de frecuencia	11
1.3. Controladores de proceso y sistemas de control.....	11
1.3.1. Acondicionamiento de señales	12
1.3.1.1. Amplificación de señal	12
1.3.1.2. Filtrado.....	13
1.3.1.3. Linealización	13
1.3.1.4. Conversión analógica – digital.....	14

1.3.2.	Fundamentos de los sistemas de control industriales	16
1.3.3.	Elementos de un sistema de control industrial	18
1.3.3.1.	Señales del sistema	18
1.3.3.2.	Procesamiento del sistema de control.....	19
1.3.3.3.	Proceso industrial.....	20
1.3.3.4.	Retroalimentación	20
1.3.4.	Tipos de sistemas de control industriales.....	22
1.3.4.1.	Sistemas de control no lineales intermitentes.....	22
1.3.4.2.	Sistemas de control lineales continuos.....	25
1.4.	Modelo VDI 2221	37
1.4.1.	Partición de algoritmo en fases	37
1.4.2.	Basado en el diagrama funcional de secuencias	38
1.4.2.1.	Etapas	38
1.4.2.2.	Transiciones.....	40
1.4.2.3.	Evolución.....	40
1.4.2.4.	Operaciones permanentes	41
1.4.2.5.	Modos de operación.....	41
1.5.	Sistemas de dosificación.....	42
1.5.1.	Equipos industriales	42
1.5.1.1.	Agitadores industriales	42
1.5.1.2.	Bombas	43
1.5.2.	Control de dosificación por peso	44
1.5.2.1.	Celdas de carga	44
1.5.2.2.	Condiciones de proceso	45
1.5.3.	Control de dosificación por flujo	48

	1.5.3.1.	Flujómetros	48
1.6.		Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID)	50
2.		ARQUITECTURA Y LÓGICA DE CONTROL DEL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN PARA PROCESOS NO SANITARIOS.....	53
2.1.		Integración de equipos e instrumentos.....	55
	2.1.1.	Circuito de alimentación	55
		2.1.1.1. Consideraciones físicas.....	56
		2.1.1.2. Equipos involucrados.....	56
		2.1.1.3. Selección de instrumentos.....	58
		2.1.1.4. Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID).....	61
	2.1.2.	Circuito de recirculación de material.....	63
		2.1.2.1. Consideraciones físicas.....	63
		2.1.2.2. Equipos involucrados.....	65
		2.1.2.3. Selección de instrumentos.....	68
		2.1.2.4. Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID).....	70
	2.1.3.	Circuito de dosificación.....	72
		2.1.3.1. Consideraciones físicas.....	72
		2.1.3.2. Equipos involucrados.....	77
		2.1.3.3. Selección de instrumentos.....	78
		2.1.3.4. Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID).....	79
2.2.		Definición de las fases del proceso	82
	2.2.1.	Fase de alimentación a tanque pulmón	82
		2.2.1.1. <i>Interlocks</i>	83
		2.2.1.2. Estados y transiciones.....	87
		2.2.1.3. Secuencia de fase	91

2.2.2.	Fase de recirculación	93
2.2.2.1.	<i>Interlocks</i>	93
2.2.2.2.	Estados y transiciones	99
2.2.2.3.	Secuencia de fase	103
2.2.3.	Fase de adición con recirculación interrumpida	106
2.2.3.1.	<i>Interlocks</i>	107
2.2.3.2.	Estados y transiciones	115
2.2.3.3.	Secuencia de fase	119
2.3.	Lógica de los sistemas de control	124
2.3.1.	Control de presión con bomba de recirculación	124
2.3.1.1.	Instrumentos y equipos involucrados .	124
2.3.1.2.	Señales del sistema de control.....	125
2.3.1.3.	Diagrama P&ID	126
2.3.1.4.	Condiciones de activación.....	128
2.3.2.	Control de presión con válvula de retorno a tanque	129
2.3.2.1.	Instrumentos y equipos involucrados .	129
2.3.2.2.	Señales del sistema de control.....	130
2.3.2.3.	Diagrama P&ID	131
2.3.2.4.	Condiciones de activación.....	133
2.3.3.	Regulación de apertura de válvula de dosificación.....	133
2.3.3.1.	Instrumentos y equipos involucrados .	134
2.3.3.2.	Señales del sistema de control.....	134
2.3.3.3.	Algoritmo de control	135
2.3.3.4.	Diagrama P&ID	137
2.3.3.5.	Condiciones de activación.....	139
2.3.4.	Algoritmo de intercalación de sistemas de control	139
2.4.	Diagrama final del sistema de dosificación	141

3.	ARQUITECTURA Y LÓGICA DE CONTROL DEL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN PARA PROCESOS SANITARIOS.....	143
3.1.	Integración de equipos e instrumentos.....	145
3.1.1.	Circuito de alimentación	145
3.1.1.1.	Instrumentos adicionales	145
3.1.1.2.	Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID).....	145
3.1.2.	Circuito de recirculación y adición	146
3.1.2.1.	Equipos involucrados.....	147
3.1.2.2.	Selección de Instrumentos.....	148
3.1.2.3.	Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID).....	150
3.2.	Definición de fases del proceso.....	153
3.2.1.	Fase de alimentación a tanque pulmón	153
3.2.2.	Fase de recirculación.....	154
3.2.2.1.	<i>Interlocks</i>	154
3.2.2.2.	Estados y transiciones.....	161
3.2.2.3.	Secuencia de fase	164
3.2.3.	Fase de adición con recirculación perpetua	167
3.2.3.1.	<i>Interlocks</i>	167
3.2.3.2.	Estados y transiciones.....	176
3.2.3.3.	Secuencia de fase	178
3.3.	Lógica de los sistemas de control.....	182
3.3.1.	Control de presión con válvula de retorno a tanque.....	182
3.3.1.1.	Instrumentos y equipos involucrados.	182
3.3.1.2.	Señales del sistema de control	183
3.3.1.3.	Diagrama P&ID.....	184
3.3.1.4.	Condiciones de activación	186

3.3.2.	Control de flujo con bomba de recirculación.....	186
3.3.2.1.	Instrumentos y equipos involucrados .	187
3.3.2.2.	Señales del sistema de control.....	187
3.3.2.3.	Diagrama P&ID	189
3.3.2.4.	Condiciones de activación.....	191
3.3.3.	Regulación de apertura de válvula de dosificación.....	191
3.3.3.1.	Instrumentos y equipos involucrados .	192
3.3.3.2.	Señales del sistema de control.....	193
3.3.3.3.	Algoritmo de control	194
3.3.3.4.	Diagrama P&ID	196
3.3.3.5.	Condiciones de activación.....	198
3.4.	Diagrama final del sistema de dosificación	198
4.	AJUSTE DE SISTEMAS DE CONTROL.....	201
4.1.	Ajuste de sistemas de control PID	201
4.1.1.	Sintonización de PID por método heurístico.....	201
4.2.	Ajuste de sistemas de apertura de válvulas	207
5.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL PROCESO PARA VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN	211
5.1.	Control estadístico de procesos	211
5.1.1.	Muestreo de datos.....	212
5.1.2.	Variabilidad de procesos a corto plazo.....	213
5.1.3.	Variabilidad de procesos a largo plazo.....	217
	CONCLUSIONES.....	219
	RECOMENDACIONES	221
	BIBLIOGRAFÍA.....	223

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Amplificador de instrumentación básico	13
2.	Muestreo correcto de una señal	15
3.	Efecto de <i>aliasing</i>	15
4.	Sistema de control de lazo abierto	17
5.	Sistema de control de lazo cerrado	18
6.	Señales del sistema de control de lazo cerrado	21
7.	Diagrama del sistema de control de lazo cerrado	21
8.	Variantes del controlador todo – nada.....	24
9.	Controlador todo – nada multiposición	25
10.	Sistema de control proporcional	27
11.	Respuesta de un motor a diferentes ganancias (KP).....	28
12.	Control proporcional con <i>offset</i>	29
13.	Integración de la señal de error	30
14.	Respuesta de un motor a diferentes ganancias (KI)	31
15.	Sistema de control proporcional – integral	32
16.	Respuesta de un motor a diferentes ganancias (KD)	34
17.	Sistema de control proporcional – derivativo.....	35
18.	Sistema de control proporcional – integral – derivativo (<i>pid</i>).....	36
19.	Bomba de desplazamiento positivo.....	44
20.	Tanques mezcladores con celdas de carga	47
21.	Ejemplo de un p&id	51
22.	Esquema general del sistema de dosificación propuesto.....	54
23.	Contenedor ibc	55

24.	Válvula manual	59
25.	Transmisor de presión <i>rosemount</i>	60
26.	P&id de circuito de alimentación	61
27.	P&id de circuito de recirculación	70
28.	Posición recomendada para flujómetros	74
29.	Golpe de ariete en sistemas hidráulicos	75
30.	Partes de una válvula de bola	76
31.	Partes de una válvula de aguja	77
32.	Flujómetro másico de efecto coriolis marca siemens	79
33.	P&id de circuito de dosificación	80
34.	Diagrama de transición de estados	90
35.	Secuencia de fase de alimentación	92
36.	Diagrama de transición de estados	103
37.	Secuencia de fase de recirculación	105
38.	Diagrama de transición de estados	119
39.	Secuencia de fase de adición	123
40.	Elementos del sistema de control pid	126
41.	Diagrama p&id con sistema de control 001	127
42.	Elementos del sistema de control pid	131
43.	Diagrama p&id con sistema de control 002	132
44.	Diagrama p&id con sistema de control 003	138
45.	Ejemplo de señal de control	141
46.	P&id - sistema de dosificación para procesos no sanitarios	142
47.	Piernas muertas en sistema de dosificación no sanitario	144
48.	P&id de circuito de alimentación para sistemas sanitarios	146
49.	Ejemplo de sifón	147
50.	P&id de circuito de recirculación y adición	151
51.	Secuencia de fase de recirculación	166
52.	Secuencia de fase de adición	181

53.	Elementos del sistema de control pid.....	184
54.	Diagrama p&id con sistema de control 001	185
55.	Elementos del sistema de control pid.....	189
56.	Diagrama p&id con sistema de control 002.....	190
57.	Comportamiento de totalizadores en un instante de tiempo.....	194
58.	Diagrama p&id con sistema de control 003.....	197
59.	P&id - sistema de dosificación para procesos sanitarios.....	199
60.	Logo de aveva historian	202
61.	Ejemplo de distribución normal con distintos valores CPK.....	216

TABLAS

I.	Instrumentos y equipos del circuito de alimentación	62
II.	Instrumentos y equipos del circuito de recirculación	71
III.	Instrumentos y equipos del circuito de dosificación.....	81
IV.	Tag id de fase de alimentación a tanque pulmón	82
V.	<i>Interlocks</i> de la fase de alimentación a tanque pulmón.....	83
VI.	Fallas de sistema en fase de alimentación.....	86
VII.	Estados de la fase de alimentación a tanque pulmón	87
VIII.	Condiciones de transición de estados	89
IX.	Tag id de fase de recirculación.....	93
X.	<i>Interlocks</i> de la fase de recirculación	94
XI.	Fallas de sistema en fase de recirculación.....	98
XII.	Estados de la fase de recirculación.....	99
XIII.	Condiciones de transición de estados	102
XIV.	Tag id de fase de adición	107
XV.	<i>Interlocks</i> de la fase de adición	107
XVI.	Fallas de sistema en fase de adición	114
XVII.	Estados de la fase de adición.....	115

XVIII.	Condiciones de transición de estados	118
XIX.	Tag id del sistema de control	124
XX.	Identificación de sistema de control en p&id	126
XXI.	Condiciones de activación del sistema de control.....	128
XXII.	Tag id del sistema de control	129
XXIII.	Identificación de sistema de control en p&id	131
XXIV.	Condiciones de activación del sistema de control.....	133
XXV.	Tag id del sistema de control	134
XXVI.	Variables del algoritmo de control propuesto	136
XXVII.	Identificación de sistema de control en p&id	137
XXVIII.	Condiciones de activación del sistema de control.....	139
XXIX.	Equipos del circuito de recirculación y adición	152
XXX.	Tag id de fase de recirculación	154
XXXI.	Interlocks de la fase de recirculación	154
XXXII.	Fallas de sistema en fase de recirculación	160
XXXIII.	Estados de la fase de recirculación	162
XXXIV.	Tag id de fase de adición	167
XXXV.	Interlocks de la fase de adición	168
XXXVI.	Fallos de sistema en fase de adición	175
XXXVII.	Estados de la fase de adición	176
XXXVIII.	Tag id del sistema de control	182
XXXIX.	Identificación de sistema de control en p&id	184
XL.	Condiciones de activación del sistema de control.....	186
XLI.	Tag id del sistema de control	187
XLII.	Identificación de sistema de control en p&id	189
XLIII.	Condiciones de activación del sistema de control.....	191
XLIV.	Tag id del sistema de control	192
XLV.	Descripción de variables de apertura de válvula.....	196
XLVI.	Identificación de sistema de control en p&id	196

XLVII.	Condiciones de activación del sistema de control	198
XLVIII.	Condiciones de los valores de la función de apertura	208
XLIX.	Pasos para ajustar el sistema con aforos.....	209
L.	Valores de d_2	214
LI.	Valores de C_p y su interpretación	215
LII.	Utilización de índices de capacidad y desempeño	218

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
τ_i	Constante de tiempo de integración
τ_d	Constante de tiempo derivativa
K_d	Constante derivativa
K_i	Constante integral
K_p	Constante proporcional
CV	Control variable
$\frac{d}{dx}f$	Derivada de f respecto a x
e	Error
Hz	Hertz
HMI	<i>Human – machine interface</i>
$\int f dx$	Integral de f respecto a x
kHz	Kilo Hertz
MV	<i>Manipulated variable</i>
T	Periodo
P&ID	<i>Piping and instrumentation diagram</i>
PV	<i>Process variable</i>
PLC	<i>Programmable logic controller</i>
PID	<i>Proportional – integral – derivative</i>
PWM	<i>Pulse width modulation</i>
s	Segundo
SFC	<i>Sequential function chart</i>
SP	<i>Set point</i>

GLOSARIO

Algoritmo	Secuencia de instrucciones lógicas que efectúan un objetivo.
<i>Aliasing</i>	Efecto que causa que una señal se distorsione cuando se muestrea en el procesamiento de señales.
Amortiguamiento	En señales, se produce cuando existe un efecto de disipación en las oscilaciones de una señal en un periodo de tiempo específico.
Bucle	Ejecución repetida de un proceso o instrucción lógica.
Dosificación	Verter la proporción requerida de un material para realizar una mezcla.
Flujo volumétrico	También conocido como caudal, es el volumen del fluido que atraviesa una superficie en un periodo determinado.
<i>Interlock</i>	Sección de código que provoca o previene la ejecución de otros segmentos del programa.
Latencia	Retardos en la transmisión de paquetes de datos a través de una red.

Oscilación	Variaciones periódicas entre dos o más estados con un valor central.
Perturbación	Alteración de las condiciones de operación normal de un proceso industrial.
Presión	Magnitud física que define las unidades de fuerza aplicadas perpendicularmente por unidad de área.
Producto	Resultado final de las transformaciones efectuadas a la materia prima, en un proceso de producción.
Sensor	Dispositivo capaz de captar propiedades del medio físico y transformarlas, a través de transductores, en otro tipo de señales.
Sistema	Conjunto de elementos que interactúan entre sí para ejecutar un objetivo.
Tag	Conjunto de palabras que identifican las variables de programación de un sistema industrial.
Tolerancia	Rango de valores en los cuales es aceptable que se encuentre alguna característica cuantitativa de un proceso o producto.

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla un sistema de regulación automática controlado por flujo para la dosificación de líquidos en procesos industriales, integrando los conceptos de instrumentación, equipos y programación de dispositivos electrónicos. Se propone el sistema para procesos que requieran altos niveles de confiabilidad y que utilicen materiales críticos en la dosificación.

En el primer capítulo se describen los fundamentos de los procesos industriales, equipos industriales, instrumentación y sistemas de control.

El segundo capítulo desarrolla la arquitectura y la lógica de control de un sistema de dosificación para procesos no sanitarios. El sistema de dosificación posee una recirculación interrumpida y no es robusto ante materiales que requieran control microbiológico.

El tercer capítulo desarrolla la arquitectura y la lógica de control de un sistema de dosificación para procesos sanitarios. El sistema de dosificación posee una recirculación perpetua y el control de un flujo mínimo de material en tuberías para evitar estancamientos de material.

El cuarto capítulo integra los conceptos de ajuste y sintonización de los sistemas de control propuestos a través del método heurístico.

El quinto capítulo incorpora métodos estadísticos para el análisis de la capacidad del proceso de dosificación, para determinar el funcionamiento correcto del sistema.

OBJETIVOS

General

Diseñar un sistema estable de regulación automática controlado por flujo para la dosificación de líquidos en procesos industriales.

Específicos

1. Integrar conceptos de procesos de manufactura, instrumentación eléctrica, controladores y sistemas de dosificación industriales.
2. Diseñar la arquitectura y la lógica de control de un sistema de dosificación con recirculación interrumpida, controlado por flujómetros, para procesos no sanitarios.
3. Diseñar la arquitectura y la lógica de control de un sistema de dosificación con recirculación perpetua, controlado por flujómetros, para procesos con requerimientos sanitarios.
4. Proponer lineamientos y métodos para los ajustes de los sistemas de control.
5. Proponer el análisis estadístico para evaluar la capacidad del proceso de dosificación.

INTRODUCCIÓN

Actualmente en la industria guatemalteca, muchos de los procesos de dosificación de líquidos a tanques de proceso se realizan de forma manual, siendo susceptibles a los errores de carácter humano. Esto pone en riesgo, tanto la seguridad de los operarios, como la calidad del producto terminado. La inadecuada manipulación de los materiales, así como la ausencia de sistemas de control que permitan garantizar una dosificación precisa y rápida, atentan contra la seguridad, calidad y productividad de la planta.

Automatizar un proceso industrial va más allá de agregar sensores o actuadores en un sistema, si se dejan por fuera los criterios de diseño, la selección de equipos industriales y no se analiza la amplia cantidad de variables físicas que alteran las condiciones de proceso, el funcionamiento del sistema será incapaz de alcanzar la precisión y elaborar un producto conforme, a pesar de no existir intervención humana.

Por ello, es indispensable cumplir con los requerimientos y analizar todas las variables que pueden incurrir en un error en el sistema, al garantizar una base de diseño robusta y una lógica de programación adecuada, puede construirse un sistema de dosificación que responda correctamente a las necesidades del proceso. Por lo tanto, un manual o guía que permita tomar las decisiones correctas al momento de realizar el diseño es indispensable.

1. FUNDAMENTOS INGENIERILES DE LOS PROCESOS INDUSTRIALES

1.1. Procesos de manufactura

Un proceso es un conjunto de etapas ordenadas que se ejecutan secuencialmente o de forma alternativa para obtener un resultado específico. Los procesos de manufactura engloban todas las operaciones que transforman materias primas e insumos en productos terminados, los cuales serán lanzados al mercado¹. Esto requiere involucrar áreas de estudio económicas, sociales, científicas e ingenieriles.

1.1.1. La industria y la ingeniería

Un proceso industrial se define como un conjunto de etapas y acciones realizadas por una o más máquinas sincronizadas, que permiten la fabricación de un producto final. La ingeniería ha incrementado considerablemente el desempeño y la confiabilidad de los procesos industriales a través de la investigación e implementación de nuevas tecnologías y equipos. Los controles de proceso electrónicos e instrumentos han reducido los errores de medición de variables críticas y han incrementado considerablemente la velocidad de respuesta de los sistemas para garantizar un correcto funcionamiento. Los sistemas de automatización tienen como objetivos; incrementar la productividad y reducir los errores. En la mayoría de los procesos industriales, las etapas de

¹ KALPAKJIAN, Serope y SCHMID, Steven. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. p. 1.

control manual tienen más probabilidad de que ocurra un fallo por acción humana y, por lo tanto, un producto final fuera de especificaciones y una menor eficiencia del proceso. Esto se corrige agregando equipos e instrumentos interconectados que permitan una correcta medición y una mejor respuesta para regular continuamente las variables del sistema.

1.2. Instrumentación

Para garantizar la calidad de un producto final, es necesario mantener estables las magnitudes de las variables y las condiciones del proceso industrial, dentro de un rango de tolerancia definido. La instrumentación es el conjunto de ciencias y tecnologías que brindan las herramientas necesarias para la medición, transmisión y control de estas variables.

Los seres humanos tienen limitantes en sus facultades sensoriales, esto les imposibilita garantizar un correcto resultado de un proceso de medición. Un instrumento, en cambio, es un dispositivo creado con la finalidad de determinar la magnitud de una variable con un rango de precisión. Para entender los procesos de medición, se deben considerar los términos²:

- **Precisión:** es la medida de reproducibilidad de las mediciones efectuadas.
- **Exactitud:** es la aproximación con la que el valor medido por un instrumento se acerca a la magnitud real de la medición.

² COOPER, William; HELFRICK, Albert. *Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición*. p. 1.

- Sensibilidad: es la razón entre la señal de salida de un instrumento y la variación de la señal de entrada.
- Resolución: es el cambio mínimo en la señal de entrada para la cual puede responder un instrumento.
- Zona muerta: es el rango de valores de entrada que no harán variar la señal de salida del instrumento.
- Error: es la desviación entre el valor real y la variable medida.

1.2.1. Instrumentación en sistemas de dosificación industrial

Un sistema de dosificación consiste en trasladar material desde su almacenamiento hasta el lugar de uso en cantidades previamente calculadas y en una relación definida. La medición de la cantidad de material puede llegar a ser crítica para un proceso de manufactura, por ejemplo, en inyecciones de químicos en las industrias agroalimentarias, de consumo o farmacéuticas. La instrumentación es necesaria para realizar las mediciones de las condiciones de proceso del sistema de dosificación, (presión, temperatura, PH, conductividad, nivel, caudal, entre otros), así como para delimitar la cantidad de material que se dosificará en el punto de uso.

1.2.2. Sensores y transmisores

Los sensores son instrumentos que se ocupan de la recepción de información de las distintas variables del proceso. Los sensores generan una señal en función de una determinada variable física (presión, temperatura, PH, velocidad, entre otros). Pueden tener transductores para convertir la variable

medida en otra forma física, por ejemplo, en señales eléctricas. También pueden ser capaces de transmitir la señal obtenida a un controlador para efectuar alguna acción que permita corregir las variables de proceso. Un transmisor puede enviar la información a través de señales neumáticas, electrónicas, digitales, ópticas, hidráulicas o por radiofrecuencias.

La comunicación entre los instrumentos del proceso y los controladores se basan en señales analógicas neumáticas, electrónicas o digitales³. Los transmisores digitales tienen la ventaja de almacenar y manejar masivamente los datos obtenidos.

- Protocolos serie: fue el primer método de comunicación entre instrumentos. A través de estos protocolos puede realizarse la configuración de los instrumentos, diagnósticos de desempeño, historización, entre otros. Las interfaces series con mayor extensión son:
 - RS-232
 - RS-422
 - RS-485

- Protocolos híbridos: involucran comunicación electrónica con el estándar de comunicación 4-20 mA, así como protocolos de comunicación digital. Algunos ejemplos de protocolos híbridos son:
 - DE: desarrollado por *Honeywell*.
 - INTENSOR: propiedad de *Endress & Hausser*.

³ CREUS, Antonio. *Instrumentación industrial*. p. 72.

- HART: desarrollado por *Rosemount* pero extendido a varios fabricantes.
 - FSK: desarrollado por ABB.
 - FOXCOM: propiedad de *Foxboro*.
 - BRAIN: propiedad de *Yokogawa*.
 - MODBUS: desarrollado por *Gould Modicon*.
- Protocolos abiertos: los protocolos de comunicación abiertos más utilizados son:
 - HART
 - World FIP
 - ISP
 - BITBUS
 - INTERBUS-S
 - P-NET
 - ECHELON
 - CAN

1.2.2.1. Clasificación de sensores

Existen varias clasificaciones aplicables a los sensores dependiendo de las características a analizar⁴:

- Clasificación según el principio de funcionamiento:

⁴ MANDADO, Enrique, et al. *Autómatas programables y sistemas de automatización*. p. 429.

- Activos: son los sensores capaces de generar la señal eléctrica de salida al realizar la medición de la magnitud física. Los instrumentos basados en el efecto piezoeléctrico forman parte de esta clasificación y no requieren de una alimentación adicional para su funcionamiento.
 - Piezoeléctricos
 - Fotoeléctricos
 - Termoeléctricos
 - Magnetoeléctricos

- Pasivos: la magnitud física modifica los parámetros eléctricos actuales del sensor, por lo tanto, requieren de un circuito de alimentación externo para su funcionamiento. Los sensores fotorresistivos y termorresistivos son algunos ejemplos de sensores pasivos ya que se modifica su resistencia con base a la magnitud física medida.
 - Resistivos
 - Inductivos
 - Capacitivos

- Clasificación según el tipo de señal generada:
 - Analógicos: generan señales eléctricas analógicas. Estas señales pueden tomar ilimitados valores en un rango determinado. Pueden ser señales analógicas variables o continuas.

- Digitales: generan señales eléctricas digitales. Estas señales toman un valor delimitado en un número finito de estados. Las señales más comunes son las binarias representando cada unidad de señal como “bit”. Los sensores analógicos pueden convertir sus señales en digitales para su procesamiento a través de un circuito de acondicionamiento y de convertidores analógico-digitales.
- Temporales: se les conoce como “sensores de señales moduladas”, porque la señal de salida se obtiene al modificar los parámetros temporales de una señal senoidal o de una onda cuadrada, a través de un circuito modulador de señal. La señal de salida se encuentra asociada al parámetro del tiempo y tienen una amplitud fija.
- Clasificación según la función de transferencia: una función de transferencia es la señal de respuesta ante las variaciones de la entrada.
- Clasificación según el nivel de integración:
 - Discretos: el acondicionamiento de la señal se realiza con dispositivos electrónicos separados al sensor.
 - Integrados: el sensor y el acondicionamiento se construyen en un único circuito electrónico.
 - Inteligentes: pueden realizar procesamiento de datos, tener comunicación por red inalámbrica, calibración y diagnósticos automáticos o incluir la medición de más de una variable de proceso a la vez.

- Clasificación según variable de proceso: corresponde al tipo de variable física medida en el proceso, sin tomar en cuenta la conversión de la señal. Existen varios tipos de sensores en esta categoría, sin embargo, se especificarán únicamente los propuestos en el desarrollo del sistema de dosificación de fluidos. Estos son:
 - Sensor de flujo
 - Sensor de nivel
 - Sensor de presión
 - Sensor de densidad
 - Sensor de viscosidad
 - Sensor de peso específico
 - Sensor de temperatura

1.2.3. Elementos finales de control y actuadores

Los elementos finales de control son los instrumentos que efectúan cambios en un sistema dependiendo de la magnitud de las variables del proceso. Ejecutan la respuesta ante la medición realizada por los sensores-transmisores. En los sistemas de dosificación de fluidos, es común encontrar válvulas de control y bombas como los elementos finales de control del sistema, para regular variables como; flujo, presión, temperatura, nivel, entre otros.

Un actuador es un dispositivo que transforma la energía hidráulica, neumática o eléctrica en la activación de un elemento final de control. Los actuadores reciben señales de un controlador y alteran el estado del elemento final de control como forma de respuesta.

1.2.3.1. Válvulas de control

Una válvula es un dispositivo que puede modificar la apertura total o parcial de un conducto, a través de una pieza movable interna, para controlar la circulación de un fluido. Una válvula puede conectar o aislar completamente etapas de un proceso, así como modificar la cantidad de material que fluirá en una tubería. Una válvula de control es una válvula de accionamiento con actuador que se utiliza, generalmente, para regular diversas variables de proceso, como presión, flujo o temperatura en un sistema.

Existen nueve categorías para los tipos de válvulas, su selección depende específicamente del proceso industrial para el cual se utilizarán:

- Válvulas de compuerta: se utilizan para procesos que requieran aperturas o cierres totales. Los accionamientos deben ser poco frecuentes y el proceso no debe tener una concentración muy alta de fluido en la tubería al momento de la apertura o cierre, ya que estas válvulas poseen mínima resistencia a la circulación de material.
- Válvulas de globo: poseen un control preciso de apertura y cierre para regular la circulación de fluidos. El accionamiento puede ser frecuente. Posee una resistencia a la circulación de material aceptable y se utiliza para cortes positivos de gases o aire.
- Válvulas de bola: utilizadas en procesos de conducción y corte, rápida respuesta de apertura. Posee mínima resistencia a la circulación.
- Válvulas de mariposa: se utilizan para procesos que requieran aperturas o cierres totales. El accionamiento puede ser frecuente. Necesita una alta

torsión para el accionamiento, ideal para el corte positivo de gases o líquidos.

- Válvulas de apriete: aperturas y cierres. No recomendada para aplicaciones de vacío.
- Válvulas de diafragma: se utilizan para procesos que requieran aperturas o cierres totales y que manejen baja presión de operación.
- Válvulas de macho: se utilizan para procesos que requieran aperturas o cierres totales. Para accionamientos frecuentes. El proceso no debe tener una concentración muy alta de fluido en la tubería al momento de la apertura o cierre, ya que estas válvulas poseen mínima resistencia a la circulación de material.
- Válvulas de cheque: se utilizan para impedir una inversión en la dirección de la circulación del fluido. Al momento que el fluido circula en la dirección deseada, la válvula se abre, cuando se invierte, la válvula se cierra automáticamente. Su funcionamiento es similar a un diodo en un circuito electrónico.
- Válvulas de alivio: se utilizan para regular automáticamente la presión de un sistema. Al momento de un aumento de presión, la válvula se abre con lentitud, regulando la presión nuevamente.

1.2.3.2. Variadores de frecuencia

Los motores eléctricos son ampliamente utilizados en procesos industriales, requieren una determinada cantidad de energía para proporcionar torque y velocidad. Un variador de frecuencia es un dispositivo industrial capaz de regular la velocidad de un motor eléctrico, esto abre la posibilidad de poder aplicar un control inteligente sobre el sistema y regular la velocidad del motor al valor deseado.

1.3. Controladores de proceso y sistemas de control

Un controlador de proceso es un dispositivo interconectado con sensores y actuadores. Recibe la información transmitida por el sensor, la procesa y toma decisiones que envía al actuador para estabilizar las variables del sistema o provocar cambios en el proceso. Los controladores ejecutan algoritmos de sistemas combinatorios, así como secuenciales.

Por lo general, se utilizan autómatas programables (PLC) para controlar procesos industriales de media y alta complejidad, como es el caso de los sistemas de dosificación de material de alta precisión. Los PLC son dispositivos modulares que poseen una unidad operativa y una unidad de control programable, garantizando la flexibilidad de adaptarse a cualquier proceso industrial a través de lógica secuencial de programación.

En la actualidad, los PLC mayormente utilizados son aquellos cuya unidad operativa posee además una unidad aritmética - lógica que forma parte del CPU de un computador, esto los hace capaces de procesar variables analógicas y realizar operaciones simultáneas.

1.3.1. Acondicionamiento de señales

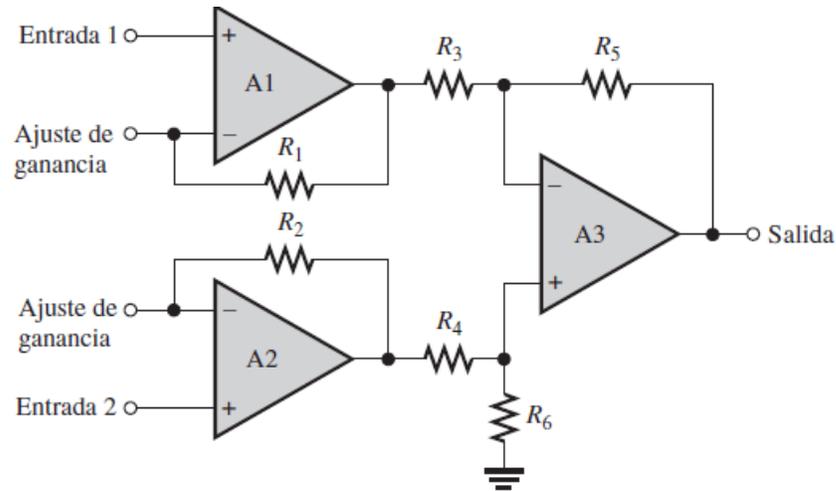
Una señal analógica es inutilizable a la entrada de un sistema digital. La señal de salida de un sensor puede contener interferencias, o encontrarse en un rango de voltaje que el sistema digital es incapaz de leer, por lo tanto, debe modificarse la información obtenida por el sensor a través de varias etapas, tales como; amplificación, filtrado, linealización y conversión. Estas modificaciones se conocen en conjunto como “Acondicionamiento de Señales”.

Acondicionar una señal es indispensable para una medición precisa en un sistema de adquisición de datos y para la protección de los dispositivos involucrados. Las etapas de acondicionamiento varían dependiendo de la señal medida y el sensor utilizado. Los transmisores poseen fases de acondicionamiento de señal e incluso son capaces de transmitir las señales con protocolos estándar al controlador del sistema para garantizar el entendimiento de los datos. Los controladores también pueden recibir señales analógicas y realizar la conversión analógica – digital para procesar la información.

1.3.1.1. Amplificación de señal

Un amplificador incrementa la tensión entregada por el sensor de forma proporcional para tener un mejor rango de voltaje a la entrada de los conversores analógicos – digitales. Para los sistemas de adquisición de datos, es comúnmente utilizado el amplificador de instrumentación. Estos circuitos integrados se utilizan en ambientes que presentan ruido en modo común y para pequeñas señales, como las entregadas por un transductor. Consta de tres amplificadores operacionales y un conjunto de resistores que constituyen un circuito de ganancia de voltaje diferencial entre sus dos terminales de entrada.

Figura 1. **Amplificador de instrumentación básico**



Fuente: FLOYD, Thomas. *Dispositivos electrónicos*. p. 710.

1.3.1.2. Filtrado

La etapa de filtrado consiste en conservar únicamente los datos de interés bloqueando las frecuencias de la señal que carecen de información como el ruido generado por el ambiente o los demás dispositivos conectados. Por lo general, se utilizan filtros digitales que facilitan su ajuste y no requieren de equipos físicos, o filtros activos con transistores y amplificadores operacionales.

1.3.1.3. Linealización

Se busca linealizar la respuesta de un sensor para ajustar su salida de forma proporcional a las variaciones de la señal medida. El comportamiento de la respuesta del sensor se acercará a una función lineal para que la información obtenida sea confiable. Uno de los métodos más comunes para linealizar sensores es el método de mínimos cuadrados.

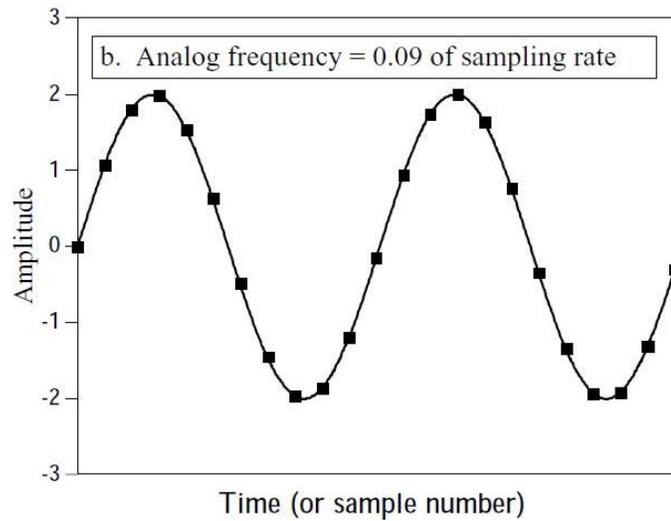
1.3.1.4. Conversión analógica – digital

El procesamiento digital de señales es la manipulación, transformación, representación y almacenamiento de la información contenida en una señal. Procesar una señal en un computador requiere que ésta sea discreta en amplitud y en tiempo.

Una señal analógica no cumple con la condición anterior debido a su continuidad en tiempo y amplitud, para su procesamiento es necesario convertirla a discreta a través de un proceso denominado “Conversión Analógica – Digital” la cual comprende de tres etapas:

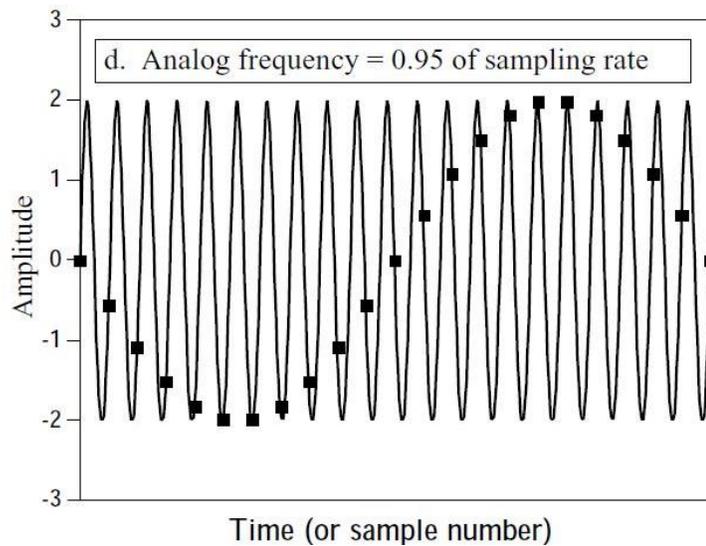
- Muestreo: es la etapa que transforma una señal continua en el tiempo, en una discreta en el tiempo. En esta etapa se selecciona la tasa de muestreo apropiada dependiendo de la frecuencia de la señal a muestrear. El muestreo de la señal puede llevarse a cabo a través de un tren de impulsos que tomará los datos de la señal de forma discreta en el tiempo. El teorema del muestreo o también conocido como el teorema de Nyquist, indica que una señal continua puede reconstruirse apropiadamente si la frecuencia de muestreo es igual o mayor al doble de la frecuencia más alta de la señal. Al no seleccionar la frecuencia de muestreo adecuada, la señal muestreada asumirá una frecuencia o fase errónea, a este fenómeno se le conoce como *aliasing*, y hace imposible la reconstrucción correcta de la señal original. Los filtros anti *aliasing* y la selección adecuada de la frecuencia de muestreo evitan este inconveniente.

Figura 2. **Muestreo correcto de una señal**



Fuente: SMITH, Steven. *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*. p. 41.

Figura 3. **Efecto de *aliasing***



Fuente: SMITH, Steven. *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*. p. 41.

- **Cuantificación:** en esta etapa, se mapea el voltaje continuo de la señal muestreada en niveles discretos de voltaje. La cantidad de niveles seleccionados afecta el ruido de cuantificación, producido por la aproximación de valores de voltaje continuo en rangos no definidos a los niveles más próximos aceptados. Se define la resolución de los niveles cuantificados, a través de la cantidad de bits que se usarán para almacenar la magnitud del voltaje discreto.
- **Codificación:** en esta etapa, las señales cuantificadas se convierten en una representación digital. A cada nivel de voltaje cuantificado se le asigna un código único, por lo general, binario. Esta es la última etapa de la conversión analógica – digital y contiene la información necesaria para que un sistema digital comprenda y procese la información proveniente de una señal analógica.

1.3.2. Fundamentos de los sistemas de control industriales

Un sistema de control industrial es una combinación de equipos e instrumentos que trabajan en conjunto al procesar y almacenar variables físicas para actuar sobre un sistema electromecánico⁵, optimizando la productividad y garantizando la calidad del producto. Deben ser robustos frente a perturbaciones y trabajar en tiempo real para estabilizar rápidamente las variables de interés.

Cuando poseen más de una entrada y más de una salida con un control acoplado se les conoce como sistema multivariable, así mismo, un único

⁵ DEL VALLE GUTIÉRREZ, Marllelis e ITURRALDE, Sadi. *Fundamentos básicos de instrumentación y control*. p. 104.

proceso industrial puede tener varios sistemas de control simples e independientes trabajando en paralelo.

El funcionamiento puede ser en lazo abierto si la entrada del sistema afecta a la salida sin que exista una retroalimentación. A cada entrada del sistema le corresponderán variables fijas de operación para producir la salida deseada, esto hace que el sistema no sea apto para funcionar ante cualquier perturbación. Estos sistemas de bajo costo y utilizados para aplicaciones no críticas debido a su inexactitud y bajo desempeño.

Figura 4. **Sistema de control de lazo abierto**

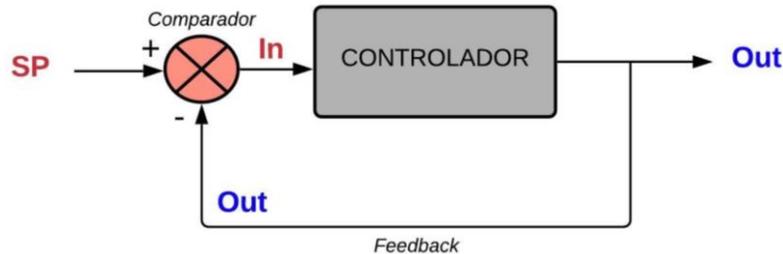


Fuente: elaboración propia, empleando Google Drawings.

Los sistemas de control en lazo cerrado comparan constantemente el valor de la variable de proceso contra una entrada de referencia, o valor esperado, a esto se le conoce como retroalimentación y permite calcular la diferencia entre ambos valores.

El controlador utiliza este cálculo para determinar la variación de las señales de salida y ajustar la variable de proceso hasta minimizar o eliminar completamente la diferencia.

Figura 5. **Sistema de control de lazo cerrado**



Fuente: elaboración propia, empleando Google Drawings.

1.3.3. Elementos de un sistema de control industrial

Siendo un sistema de control en lazo cerrado, se identifican una serie de componentes que permiten ejecutar las acciones necesarias para estabilizar el proceso.

1.3.3.1. Señales del sistema

- *Process variable*: es el valor de interés en un proceso industrial. Esta señal la envían los transmisores al controlador para definir el estado actual del proceso. Todo el objetivo del sistema de control es modificar y regular la variable de proceso a un valor específico. Para un sistema de dosificación, puede ser una medida de presión, flujo, masa o temperatura captada por un sensor.
- *Set point*: también se le conoce como señal de referencia, representa el valor al que se desea llevar la variable de proceso. Es constante al momento que el controlador realiza los cálculos, al existir una modificación de la señal de referencia, el sistema regulará la variable de proceso hasta alcanzar el nuevo valor de la señal de referencia.

- *Error*: la señal de error es la diferencia entre la variable de proceso y la señal de referencia. El sistema de control se basa en el valor de la señal de error para efectuar los cálculos necesarios para regular el sistema.
- *Control variable*: la variable de control es la señal de salida que entrega el controlador y lo envía al proceso industrial, su valor depende de la señal de error y del algoritmo de control del sistema.
- *Manipulated variable*: la variable manipulada es el resultado de la transformación de la variable de control después de alcanzar el actuador. Puede convertirse en un movimiento electromecánico, como la apertura de una válvula o el arranque de un motor, esto afectará las variables físicas del proceso industrial y consecuentemente afectará el valor de la variable de proceso.

1.3.3.2. Procesamiento del sistema de control

- Comparador: efectúa la operación entre la señal de referencia y la variable de proceso para obtener de resultado la señal de error y enviarla al controlador del sistema de control.
- Algoritmo de control: son todos los cálculos matemáticos y operaciones que efectúa el controlador al momento de recibir la señal de error. El algoritmo puede utilizar de base algunos modelos matemáticos, pero sus parámetros serán específicos para cada sistema de control. Como señal de salida se obtiene la variable de control que será enviada al proceso industrial.

1.3.3.3. Proceso industrial

- Actuator: el actuador convierte la variable de control en algún tipo de activación para un elemento final de control, enviando una señal manipulada al equipo para que efectúe una acción capaz de modificar el valor de la variable de proceso.
- Elementos y equipos: algunos de los elementos finales de control y equipos son las válvulas, bombas, motores, relés, variadores de frecuencia, entre otros.
- Sensor: el sensor capta la variable física de interés, transforma la señal con un transductor interno y la convierte en la variable de proceso, que será enviada por un transmisor al comparador para los cálculos respectivos. Pueden ser sensores transmisores de temperatura, nivel, caudal, presión, peso, viscosidad, entre otros.

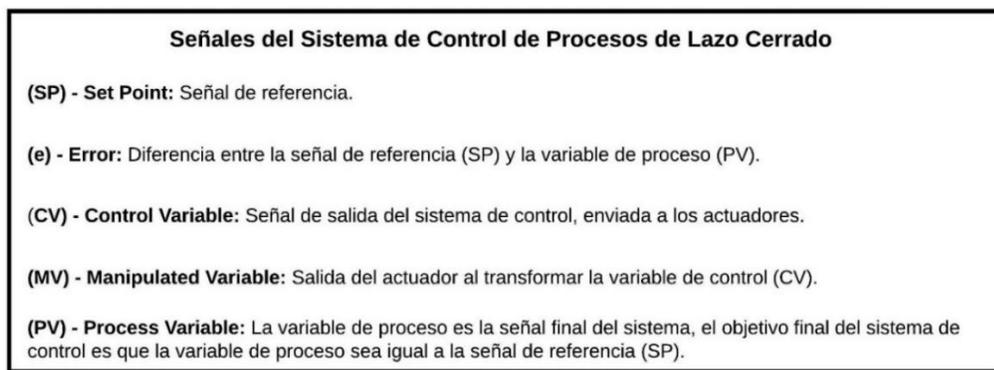
1.3.3.4. Retroalimentación

Permite que el controlador reciba información en sus entradas sobre la variable de proceso, esto genera una gran visibilidad del estado del sistema después de haber efectuado las acciones de control y permite que pueda regularse hasta alcanzar el valor de error mínimo. Es un elemento único de los sistemas de control de lazo cerrado y tiene efectos positivos en su desempeño, como en su ganancia, sensibilidad y estabilidad⁶.

⁶ KUO, Benjamín. *Sistemas de control automático*. p. 11.

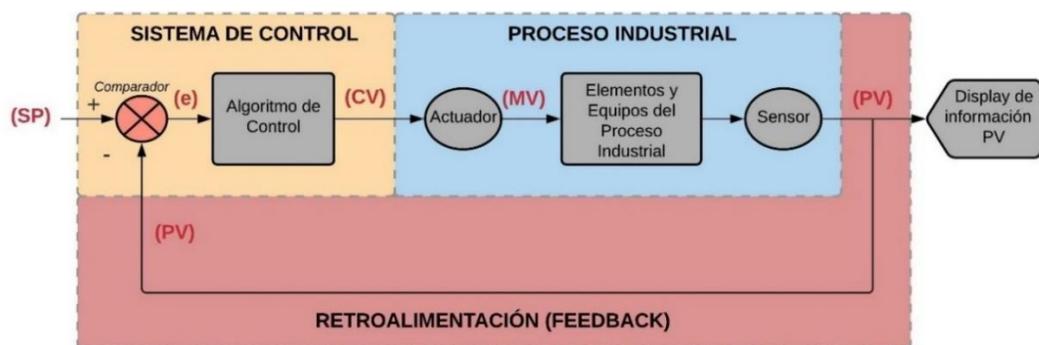
La retroalimentación es la principal razón por la que se utiliza un sistema de lazo cerrado en lugar de uno de lazo abierto para aplicaciones críticas y con mayor perturbación externa, sin embargo, es de suma importancia que el algoritmo de control sea robusto y sus parámetros se ajusten correctamente para que la retroalimentación no sea el causante de desestabilizar las salidas del sistema de control.

Figura 6. **Señales del sistema de control de lazo cerrado**



Fuente: elaboración propia, empleando Google Drawings.

Figura 7. **Diagrama del sistema de control de lazo cerrado**



Fuente: elaboración propia, empleando Google Drawings.

1.3.4. Tipos de sistemas de control industriales

Existen diferentes tipos de sistemas de control que pueden utilizarse individualmente o combinados en un mismo proceso. Los más ampliamente utilizados en la industria son; los sistemas de control no lineales intermitentes y los lineales continuos.

1.3.4.1. Sistemas de control no lineales intermitentes

Cuando las magnitudes de las señales no presentan un intervalo de porción lineal, el sistema se considera como no lineal. Este tipo de sistemas son difíciles de calcular matemáticamente y carecen de métodos generales para resolver la respuesta del sistema.

Un sistema de control intermitente utiliza señales en forma de pulsos de datos y forma parte de la clasificación de sistemas de control de tiempo discreto. Las señales se encuentran moduladas por pulsos, por lo que se recibe la información del sistema de forma intermitente en instantes de tiempo específicos.

En el controlador todo – nada el elemento final de control solo puede adoptar dos posibles valores, es común utilizar válvulas eléctricas operadas por solenoides donde las únicas posiciones hábiles son abierta o cerrada. Este tipo de control es funcional si la velocidad de reacción del proceso es lenta y el tiempo de retardo es bajo. La salida del sistema se define con la siguiente expresión:

$$CV = \begin{cases} CV_{Max} & e > 0 \\ CV_{Min} & e < 0 \end{cases} \quad e = SP - PV$$

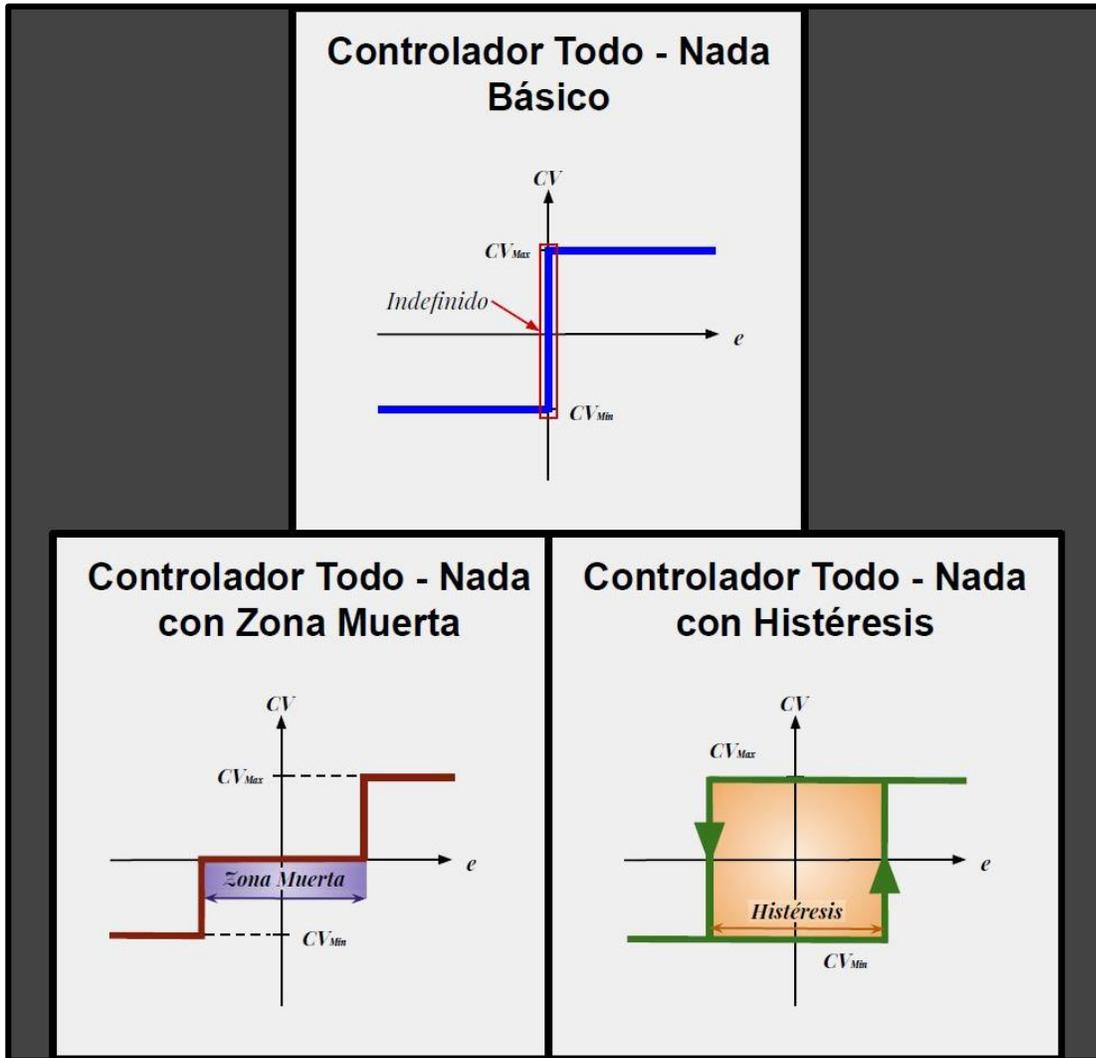
Se observa que cuando el error alcanza un valor cero, la variable de control es indefinida, adicional, es evidente que pequeñas variaciones en la variable de proceso en un rango cercano a cero produce oscilaciones en el valor de CV .

Esto puede desestabilizar el sistema y provocar un deterioro apresurado en los elementos electromecánicos por la cantidad de accionamientos innecesarios.

Existen dos posibles soluciones para estos inconvenientes al modificar el comportamiento del control todo – nada de las siguientes formas:

- Zona muerta: se agrega una zona muerta donde la variable de control tomará el valor de cero mientras el valor de error se encuentre en dicha zona. Esto evitará oscilaciones y valores indefinidos para la variable de control.
- Histéresis: la zona de histéresis produce que el valor de la variable de control dependa del sentido en que varía el error, dentro del rango de histéresis la variable de control no modificará su valor hasta llegar al límite designado para el valor opuesto al actual.

Figura 8. Variantes del controlador todo – nada

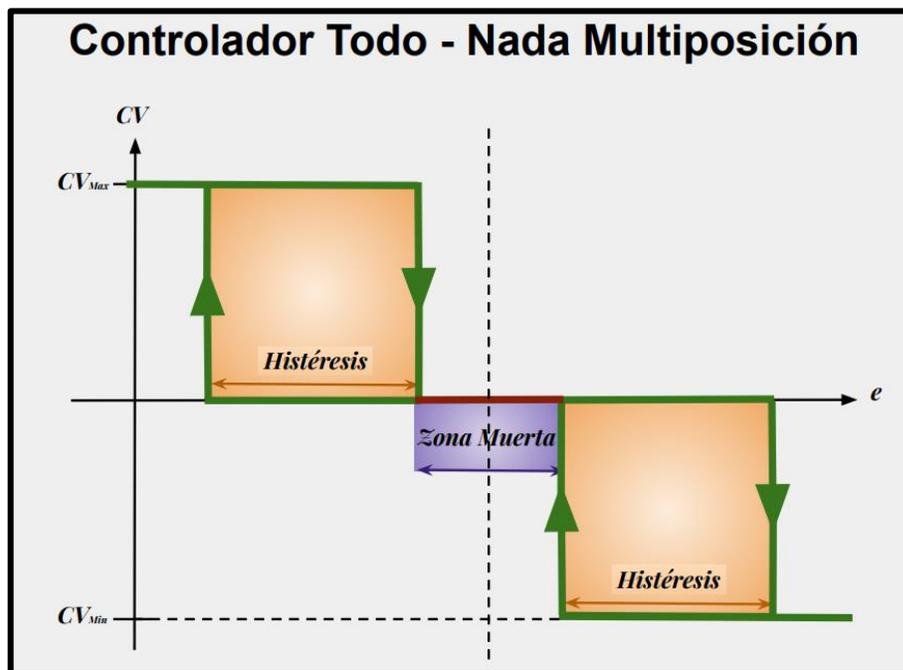


Fuente: elaboración propia, empleando Google Drawings.

En algunos sistemas resulta útil utilizar la combinación de histéresis con la zona muerta. Esto resulta en el denominado controlador todo-nada multiposición. Este sistema presenta una ventaja para el control de motores reversibles para el accionamiento de válvulas o posicionadores, esto para evitar

conmutaciones bruscas tanto para el paro y el giro en un mismo sentido, como en el cambio de sentido de giro del motor.

Figura 9. **Controlador todo – nada multiposición**



Fuente: elaboración propia, empleando Google Drawings.

1.3.4.2. **Sistemas de control lineales continuos**

Describiendo objetivamente, ningún sistema de control en la práctica es completamente lineal, los sistemas físicos presentan perturbaciones que los convierten de alguna forma en no lineales. Sin embargo, esta clasificación se creó para definir a los sistemas donde puede aplicarse el principio de superposición debido a que sus componentes presentan características lineales.

En un sistema de control en tiempo continuo, la variable continua tiempo modifica los valores de las señales y lo convierte en un sistema variante con el tiempo. Algunos algoritmos de control ampliamente utilizados en la industria son:

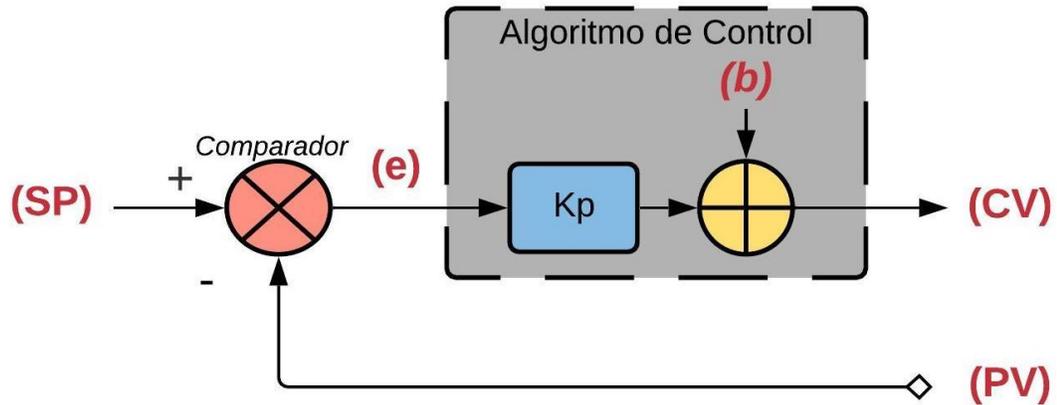
- Control proporcional: es uno de los algoritmos de control más básicos, conformado por un amplificador simple con una ganancia constante. El valor de la variable de control (*CV*) se relaciona matemáticamente con la señal de error (*e*), entregada por el comparador, a través de una constante proporcional. Este algoritmo de control puede describirse de la siguiente forma.

$$CV(t) = K_p e(t) + b \qquad e(t) = SP - PV(t)$$

$$K_p = \text{Constante proporcional}$$
$$b = \text{Valor base o bias}$$

La variable base *b* corresponde al valor que tendrá el elemento final de control cuando el error sea igual a 0, este dato se obtiene durante la calibración del controlador. Puede observarse que la variable de control (*CV*), la señal de error (*e*) y la variable de proceso (*PV*) son función del tiempo (*t*). El sistema es dependiente de las perturbaciones ocasionadas en un periodo de tiempo, por lo tanto, debe tener la capacidad de responder y reajustar la variable de control antes que se produzcan modificaciones significativas en la variable de proceso. Un retardo extenso en el accionamiento mecánico de los elementos finales de control o en el procesamiento de las señales, comparado con la frecuencia promedio de modificación de la variable de proceso, ocasiona que el sistema sea incapaz de estabilizarse.

Figura 10. Sistema de control proporcional

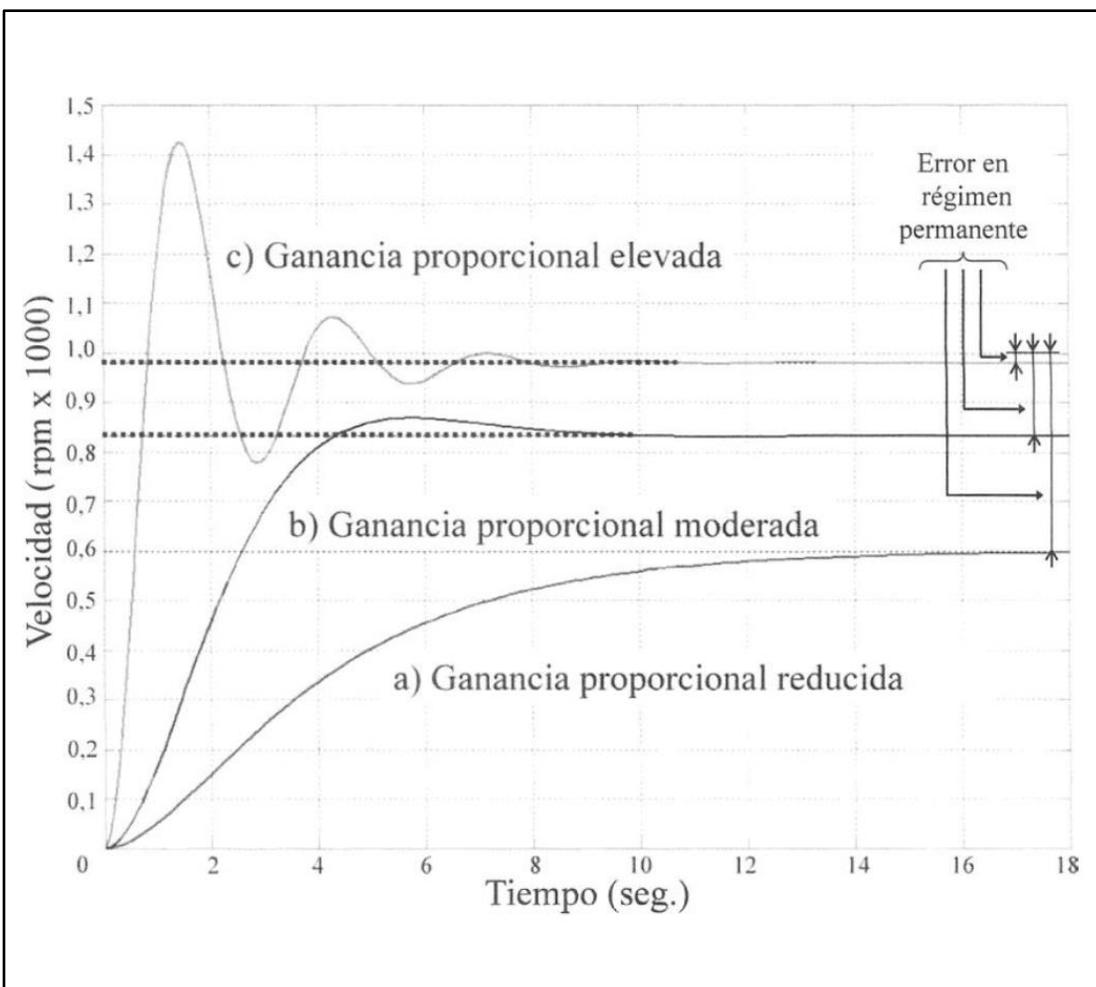


Fuente: elaboración propia, empleando Google Drawings.

La constante proporcional debe seleccionarse cuidadosamente para garantizar el correcto funcionamiento del sistema. Una ganancia insuficiente evita que la variable de interés alcance al *set point*, además de producir retardos en la respuesta del proceso. En caso contrario, una ganancia demasiado elevada desestabiliza el sistema y produce cambios demasiado bruscos. Lo ideal es seleccionar una ganancia moderada que garantice el tiempo de respuesta y una corrección estable del sistema. En un proceso industrial, el sistema de control es incapaz de corregir todas las posibles condiciones que afectan el valor de la variable de proceso, por lo general, un solo sistema se centra en la corrección de una sola variable de control, a estas variables no controladas se les conoce comúnmente como cargas. La mayor limitación del control proporcional recae cuando se presentan cambios de carga o modificaciones en el *set point* (SP), ocasionando que el sistema se equilibre con un error estacionario entre la variable de proceso y el *set point*, este error es conocido como *offset*. El *offset* puede eliminarse

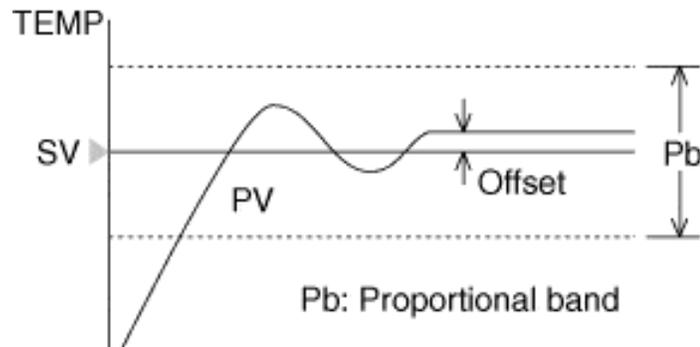
reajustando el *set point* o incrementando la constante proporcional del sistema, cuidando no producir inestabilidad, sin embargo, cualquier nueva perturbación en otras cargas creará un nuevo *offset* a la salida del controlador.

Figura 11. **Respuesta de un motor a diferentes ganancias (K_p)**



Fuente: MANDADO, Enrique. *Autómatas programables y sistemas de automatización*. p. 382.

Figura 12. Control proporcional con offset



Fuente: VILLAJULCA, José. *Instrumentación y control*. <https://instrumentacionycontrol.net/el-problema-de-offset-en-controladores-proporcionales-un-analisis-detallado/>. Consulta: 10 de febrero de 2022.

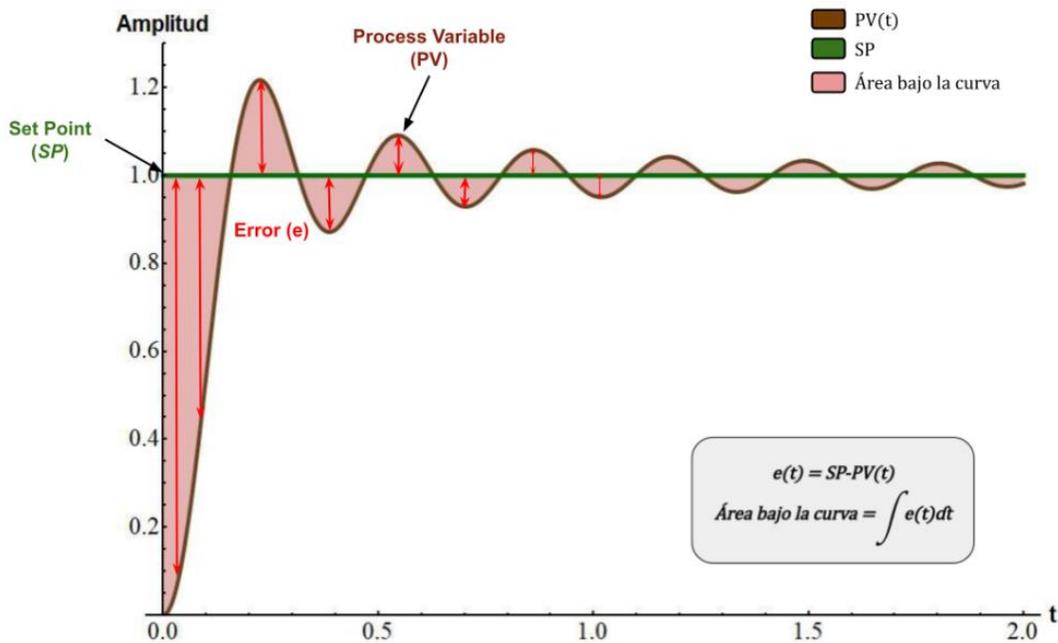
- Control proporcional – integral: el control integral es utilizado para corregir la desviación estacionaria mencionada en el apartado anterior. La acción integral permite al sistema realizar un cálculo de las desviaciones pasadas para proporcionar una nueva corrección en la variable de control y reajustar la variable de proceso en el *set point*, eliminando el *offset*. El área de desviación entre ambas funciones puede calcularse a través de una integral de la siguiente forma:

$$e(t) = SP - PV(t)$$

$$Offset\ Area = \int e(t) dt$$

La integral es la sumatoria de los errores pasados y permite corregir la desviación actual para alcanzar a la señal de referencia.

Figura 13. Integración de la señal de error



Fuente: elaboración propia, empleando Wolfram Mathematica 8.0.

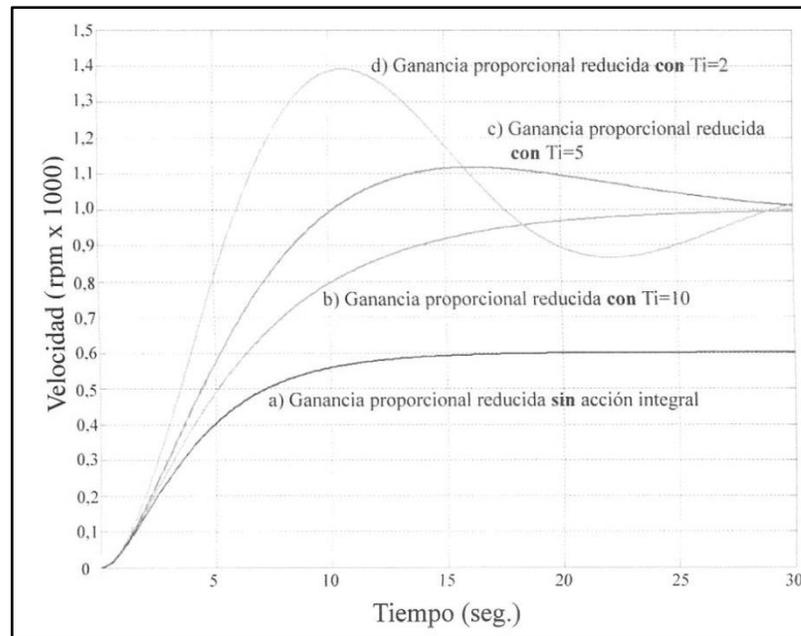
Tal como la acción proporcional, se agrega una constante K_i para ajustar la ganancia de la acción integral sobre el sistema. Para que funcione correctamente, se debe analizar la constante de tiempo de integración τ_i , este es un acercamiento del tiempo que se tarda la acción integral en producir una salida igual a la acción proporcional. Para seleccionar el valor de la constante integral se realiza el siguiente cálculo:

$$K_i = \frac{K_p}{\tau_i}$$

$$\text{Acción Integral} = K_i \int e(t) dt$$

Un valor extremadamente elevado del tiempo de integración (τ_i) elimina la acción integral en el sistema al acercar la constante integral a cero. Así mismo, un valor muy pequeño del tiempo de integración puede convertir la salida en un sistema subamortiguado con sobre oscilación, pudiendo caer incluso en inestabilidad oscilatoria.

Figura 14. **Respuesta de un motor a diferentes ganancias (K_i)**



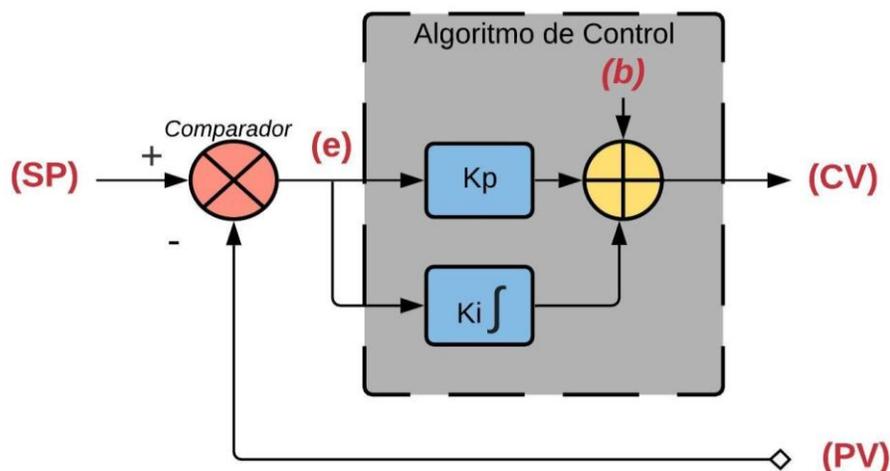
Fuente: MANDADO, Enrique. *Autómatas programables y sistemas de automatización*. p. 387.

Tal como fue descrito anteriormente, el principio de superposición puede aplicarse sobre un sistema de control lineal, tal es el caso del control proporcional – integral. En este tipo de sistemas, se sumará la acción proporcional y la acción integral para obtener el resultado de la variable de control. El sistema puede definirse con la siguiente ecuación:

$$CV(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + b$$

Si el error tiene un incremento elevado, la acción integral producirá un cambio muy pronunciado que saturará el valor la variable de control y el actuador se posicionará en su máximo. Las modificaciones desmesuradas en el accionamiento del actuador tienden a generar oscilaciones en el sistema. A este fenómeno se le conoce como saturación integral, y se corrige limitando la influencia de la acción integral sobre el cálculo del valor de la variable de control. Una de las formas en que puede aplicarse la desaturación integral es manteniendo el valor máximo o mínimo de la integral al quedar fuera de un rango de error definido. En otros procesos, se desactiva completamente la acción integral si el error es demasiado elevado, dejando únicamente que la acción proporcional acerque la variable de proceso al *set point*, antes de activar nuevamente el integrador para eliminar el *offset*.

Figura 15. **Sistema de control proporcional – integral**



Fuente: elaboración propia, empleando Google Drawings.

- Control proporcional – derivativo: la acción derivativa juega un papel predictivo en los cálculos del controlador y se utiliza principalmente para suavizar la curva hasta establecerse en el *set point*. Se activa cuando existe alguna variación en la señal de control y busca anticipar hacia dónde va el proceso para frenar la actuación del controlador y corregir el error con mayor suavidad. La variación de la señal de control puede medirse como la pendiente de la curva, o matemáticamente expresado, como su derivada.

$$e(t) = SP - PV(t)$$

$$\text{Pendiente de la Curva} = \frac{d}{dt} e(t)$$

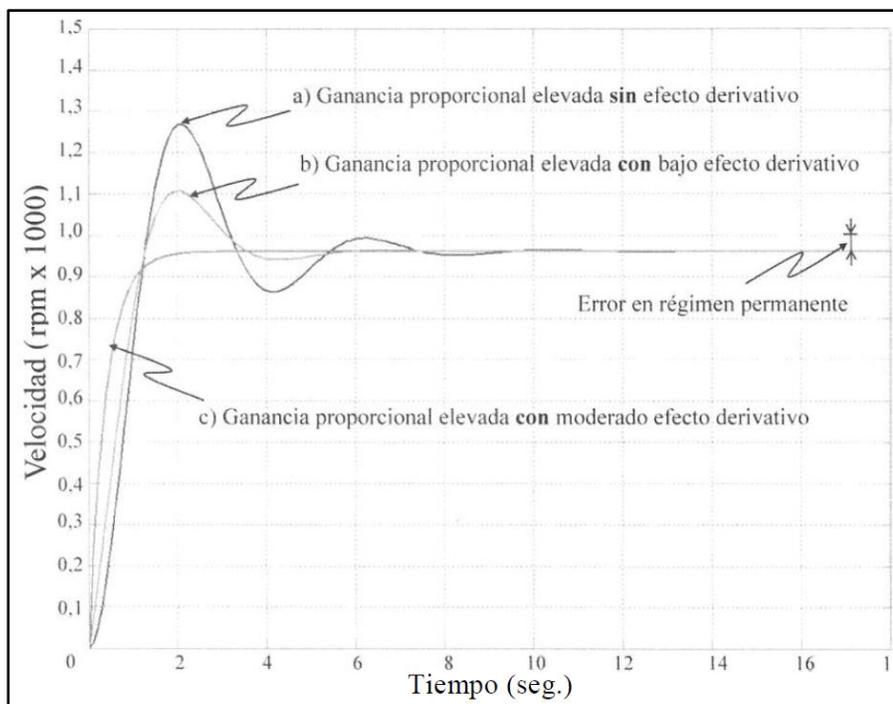
La acción derivativa puede corregir las sobre oscilaciones producidas cerca del *set point* por una elevada velocidad de respuesta de la acción proporcional, funciona como un freno aplicado sobre la señal antes de llegar al punto de interés. La magnitud de la respuesta de la acción derivativa depende de la constante K_d , para ajustar este valor, se analiza la constante de tiempo derivativa τ_d , este es un acercamiento del tiempo que se tarda la acción proporcional en producir una salida igual a la acción derivativa. Para seleccionar el valor de la constante derivativa se realiza el siguiente cálculo:

$$K_d = K_p \tau_d$$

$$\text{Acción Derivativa} = K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Si la constante de tiempo derivativa τ_d es cero, la acción derivativa se elimina. Para encontrar la estabilidad, el valor de τ_d debe ser igual o superior a cero, pero inferior a la cuarta parte del periodo de oscilación del sistema. A pesar de disminuir o anular la sobreoscilación, el control proporcional – derivativo es incapaz de eliminar el *offset*.

Figura 16. **Respuesta de un motor a diferentes ganancias (K_d)**

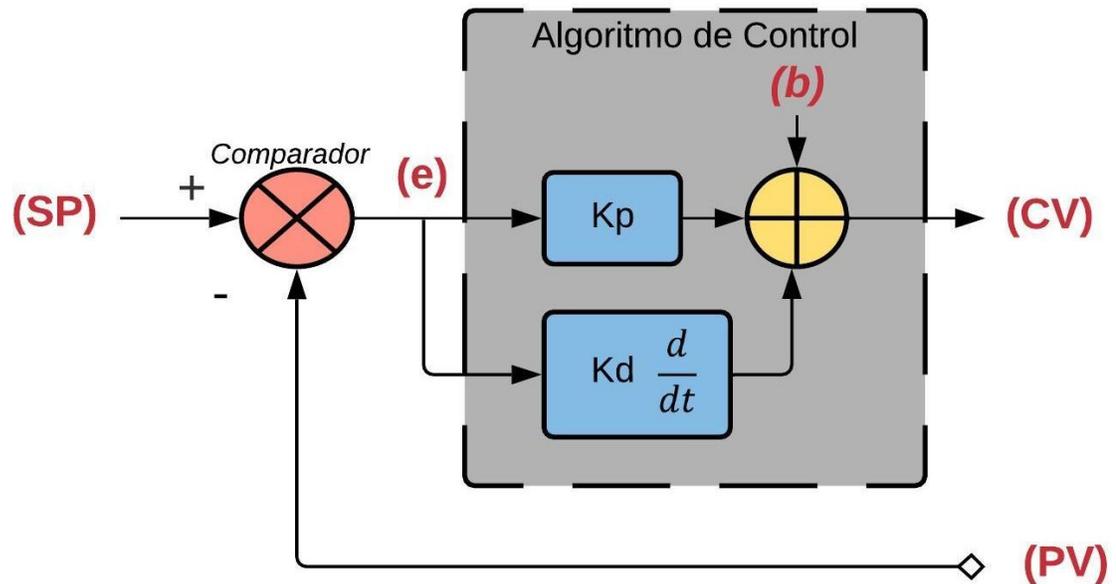


Fuente: MANDADO, Enrique. *Autómatas programables y sistemas de automatización*. p. 390.

Si se aplica la superposición de la acción proporcional y la acción derivativa se puede calcular el valor de la salida del sistema *PD* con la siguiente ecuación:

$$CV(t) = K_p e(t) + K_d \frac{d}{dt} e(t) + b$$

Figura 17. Sistema de control proporcional – derivativo



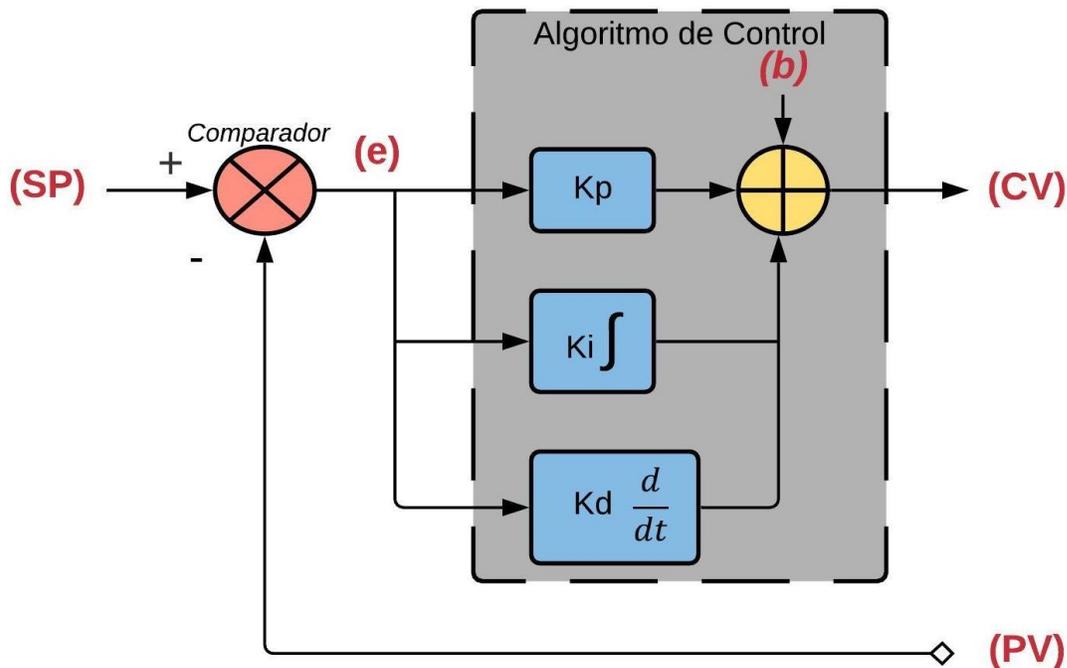
Fuente: elaboración propia, empleando Google Drawings.

- Control proporcional, integral y derivativo: cada una de las acciones proporcional, integral y derivativa presentan ciertas limitaciones para llegar a obtener un control total y estable del sistema. El control proporcional es la base para alcanzar el *set point* y tanto la acción integral como la derivativa la necesitan, pero es incapaz de eliminar el *offset* de la señal de error y puede ocasionar cambios muy bruscos en la variable de control al estar cercano al *set point*. El control proporcional - integral puede eliminar el *offset* pero produce sobre oscilaciones en el sistema si no se adecúan correctamente las constantes o si el proceso tiene picos de variación muy rápidos sobre la variable de proceso. Por último, el control proporcional - derivativo puede atenuar los picos y sobre oscilaciones cerca del *set point* pero no puede eliminar el *offset* del

sistema. El sistema de control *PID* suma la acción proporcional, la integral y la derivativa para dar una sola respuesta a la variable de control. Para que la señal de error se minimice sin producir oscilaciones, las constantes K_p , K_i y K_d deben seleccionarse en proporciones adecuadas. Puede intuirse que, al sumar todas las acciones, el comportamiento del sistema se describe bajo la siguiente ecuación:

$$CV(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) + b$$

Figura 18. Sistema de control proporcional – integral – derivativo (*PID*)



Fuente: elaboración propia, empleando Google Drawings.

1.4. Modelo VDI 2221

Para diseñar el funcionamiento de un sistema de control lógico secuencial existen una variedad de métodos, en algoritmos complejos se desarrolló el modelo *VDI 2221*⁷. Este modelo separa por módulos los componentes de un sistema complejo para que estos sean diseñados por separado y finalmente los agrupa en un proceso jerárquico. La separación crea subprocesos que requieren de un análisis de toma de decisión más sencillo que al evaluar el proceso en su totalidad, y el sistema de módulos hace posible reutilizarlos con diferentes combinaciones creando otros sistemas de control para procesos similares.

1.4.1. Partición de algoritmo en fases

Los sistemas secuenciales memorizan las variables de entrada en forma de estado interno para poder ejecutar acciones y tomar decisiones en función del valor de las variables. Una fase posee una subrutina y puede contener uno o varios estados, los valores y decisiones tomadas dentro de una fase pueden activar una transición a otras fases del sistema. Para definir correctamente este método de diseño, es necesario completar lo siguiente:

- Determinar la cantidad de fases necesarias para el control del sistema.
- Asignar a cada fase un propósito específico y un identificador.

⁷ MANDADO, Enrique, et al. *Autómatas programables y sistemas de automatización*. p. 315.

- El controlador debe consultar cual identificador está activo para correr la subrutina de la fase.
- Determinar en cada fase las condiciones para producir una transición de fase.

El controlador consulta de forma sucesiva las fases existentes para verificar si alguna de ellas se encuentra en activación. Esta consulta será cíclica en el bloque de organización principal.

1.4.2. Basado en el diagrama funcional de secuencias

El diagrama funcional de secuencias, conocido como *SFC*⁸, es un lenguaje de programación para autómatas programables basado en la norma IEC-848 “*Preparation of function charts for control systems*”. Este lenguaje pertenece al sistema normalizado IEC 1131-3 de programación, se creó para facilitar el diseño de los sistemas secuenciales complejos que actúan sobre varios procesos interdependientes, sin utilizar diagramas de estado. Se han desarrollado varios lenguajes basados en el *SFC*.

1.4.2.1. Etapas

Una etapa se asocia con las acciones que activan o desactivan variables lógicas de un sistema. Refleja la situación donde el comportamiento de un sistema permanece invariable. Cuando se arranca el sistema se activan las

⁸ MANDADO, Enrique, et al. *Autómatas programables y sistemas de automatización*. p. 324.

etapas iniciales con sus acciones anidadas. Las acciones pueden asociarse o estar condicionadas por otras acciones.

- Acciones estándar: son las ejecutadas mientras la etapa se encuentra activa. Pueden ser:
 - Sin registro
 - De activación
 - De desactivación
 - De retardo
 - Impulso limitado
 - Llamada a módulo

- Acciones condicionadas (*interlock*): en una etapa puede configurarse condiciones de enclavamiento o *interlocks*, estas condiciones se vuelven verdaderas si el valor de una o varias variables coincide con un valor configurado. Si la condición de enclavamiento se cumple, las acciones se ejecutarán. Los *interlocks* se utilizan comúnmente para garantizar la seguridad de los operadores y de los equipos durante la ejecución del algoritmo.

Una supervisión es una ecuación lógica que engloba las variables de las cuales dependerá la transición de una etapa a otra. Se ligan a fallos del sistema y permiten determinar si la ejecución de una etapa fue correcta o entró en fallo.

Un evento es una variable que se activa o se desactiva cuando una etapa, supervisión o *interlock* cambia su estado de activación, algunas acciones pueden combinarse con eventos y estar asociadas a etapas.

Un evento determina el punto de activación o desactivación de una etapa, por lo tanto, las acciones preventivas o correctivas pueden desencadenarse por el control de un evento activado, así mismo, existe la capacidad de combinar activaciones de *interlocks* con acciones a través del uso de eventos.

1.4.2.2. Transiciones

Constituyen la capacidad de transición de una etapa a otra. Para cada transición se identifica una condición de disparo que se ejecuta, para producir el salto.

1.4.2.3. Evolución

La evolución es una secuencia de situaciones regidas por reglas donde se establecen las condiciones de activación de transiciones entre etapas. Una cadena secuencial es el conjunto de etapas y transiciones regidas mediante reglas de evolución. La evolución puede realizarse de las siguientes formas:

- Saltos: son las transiciones de una etapa a otra perteneciente a la misma o a otra cadena secuencial.
- Ramas alternativas: una misma etapa tiene la oportunidad de activar la transición a diferentes etapas, pero la selección de la etapa a la cual saltará dependerá del valor de la condición de disparo, no debe ser posible la activación de dos condiciones de disparo distintas en una misma etapa, ya que esto generaría un conflicto en la programación del sistema

- Fin de cadena: concluye la cadena secuencial, incluyendo su procesamiento cíclico, se colocan al finalizar una transición. Una cadena secuencial puede arrancarse nuevamente cuando el controlador llama el bloque completo de instrucciones nuevamente.
- Ramas simultáneas: permite iniciar varias etapas de forma simultánea. En la mayoría de los casos, es necesario que las etapas finalicen al mismo tiempo para garantizar la ejecución de la siguiente secuencia correctamente. Las ramas pueden tener una secuencia de etapas que se ejecutan en paralelo, generando transiciones simultáneas para correr la siguiente secuencia de etapas.

1.4.2.4. Operaciones permanentes

Una operación permanente no se ve regida por cadenas secuenciales, se ejecutan una vez por cada ciclo del controlador y pueden estar antes o después de la ejecución de una cadena secuencial.

1.4.2.5. Modos de operación

- Automático: las cadenas secuenciales se ejecutan automáticamente y las etapas evolucionan basadas en los valores de las funciones de supervisión o de las condiciones de transición.
- Manual: involucra a un operador que seleccione la etapa a ejecutar y acciona la cadena secuencial manualmente. En este tipo de operación las condiciones de transición no ejecutarán la activación de etapas sin que un operador intervenga en el sistema.

1.5. Sistemas de dosificación

Un sistema de dosificación tiene como objetivo distribuir la materia prima en cantidades exactas a una velocidad óptima para garantizar la conformidad de una fórmula química y la productividad.

Existen sistemas de dosificación de polvos, granos, entre otros, sin embargo, en este trabajo de investigación, se estudiará únicamente los sistemas de dosificación de líquidos.

1.5.1. Equipos industriales

Se describen los equipos industriales que son generalmente utilizados en un sistema de dosificación industrial.

1.5.1.1. Agitadores industriales

Son equipos utilizados en tanques de proceso de líquidos que requieren movimientos rotacionales para garantizar la mezcla de la carga en el interior del tanque. Un agitador consiste en aspas o hélices montadas sobre un eje que es accionado por un motor eléctrico. El modo de agitación depende de las hélices seleccionadas, las cuales pueden generar agitación de flujo axial, generar corrientes radiales o tangenciales. La selección de las hélices depende de la velocidad de agitación necesaria, así como de la viscosidad del material a mezclar. Los agitadores pueden producir ruido en los sistemas de dosificación debido al movimiento de las hélices dentro del tanque y a las vibraciones del rotor, esto es una característica que debe tomarse en cuenta al momento del diseño de un sistema de dosificación.

1.5.1.2. Bombas

Los equipos de bombeo movilizan fluido de un punto a otro, en los sistemas de dosificación automáticos, se utilizan para transportar el fluido de su punto de almacenamiento hacia el punto de dosificación.

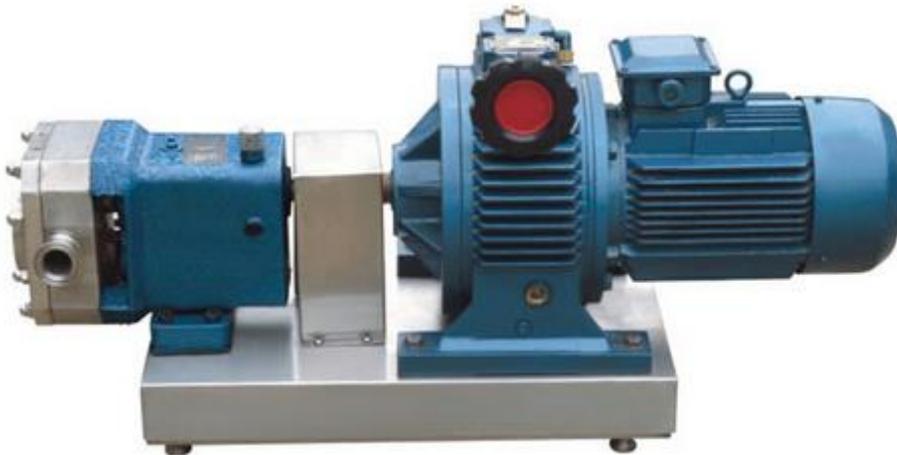
Un equipo de bombeo recibe energía mecánica proveniente de un motor y lo transforma en la energía que recibe un fluido en forma de presión, posición o velocidad⁹. Normalmente los equipos de bombeo se accionan por motores eléctricos, térmicos, entre otros. Se clasifican en dos grandes categorías:

- Bombas de desplazamiento positivo: se utilizan para sistemas donde se requiere trasladar líquidos en pequeñas porciones, son ideales para trabajar a presión alta y pueden ser utilizadas para líquidos viscosos.
- Bombas dinámicas: son útiles para trasladar líquidos en grandes porciones, trabajan a presión reducida o media presión y pueden trasladar todo tipo de líquidos excepto los de alta viscosidad.

La selección de la bomba a utilizar depende mucho del proceso industrial, existen ciertas características que deben tomarse en cuenta; si es requerido utilizar bombas sanitarias por el tipo de industria, precisión de dosificación, bombas resistentes a la corrosión, cantidad de material a dosificar, especificaciones y requerimientos del material, presión manejable, entre otros.

⁹ ZUBICARAY, Manuel. *Bombas. Teoría, diseño y aplicaciones*. p. 13.

Figura 19. **Bomba de desplazamiento positivo**



Fuente: MEJIA, Williams. *Global Packaging Plus Corp.*

<http://www.gpackplus.com/products/bomba-de-desplazamiento-positivo/>. Consulta: 10 de febrero de 2022.

1.5.2. Control de dosificación por peso

Los sistemas de dosificación pueden poseer distintas variables de proceso para autorregular la dosificación, sin embargo, la variable de proceso que indica la cantidad de material dosificado en el punto de uso es la de mayor importancia. Esta variable puede basarse en el peso del material dosificado.

1.5.2.1. Celdas de carga

Una celda de carga es un módulo de pesaje que transforma la fuerza aplicada sobre ella en una señal enviada a un controlador. En un sistema de dosificación a un tanque de proceso, la celda de carga se posiciona de forma que sea capaz de medir cualquier variación de peso que exista en el tanque al

momento de una dosificación. Se puede intuir, que el peso del tanque se tara para poder analizar únicamente los materiales que se dosifican en su interior.

Las celdas de carga también pueden trabajar en tanques de almacenamiento, traduciendo la variable de proceso en una medición del descuento de material del tanque hacia el sistema de dosificación. Para este tipo de sistemas, se debe tomar en cuenta la cantidad de material remanente en la tubería después de realizar la dosificación, ya que existiría una descompensación de material al no medir el dato exacto del valor que cae en el tanque de proceso.

Las celdas de carga suelen ser más baratas que los flujómetros, sin embargo, son menos precisas. La selección del tipo de sistema de dosificación debe realizarse tomando en cuenta el tipo de proceso industrial, los requerimientos de dosificación, las especificaciones físicas de los materiales y las tolerancias aceptadas en la receta.

1.5.2.2. Condiciones de proceso

Para procesos que requieren dosificar varios materiales utilizando diferentes tuberías, es más barato utilizar celdas de carga y tanques de pre-pesaje.

Se presentan las condiciones de proceso para utilizar celdas de carga:

- La dosificación se realiza de forma secuencial, cada material deberá esperar su turno para ser dosificado en el tanque. Esto debido a que la celda de carga no es capaz de distinguir el peso individual si se vierten dos sustancias a la vez.

- Es necesario realizar taras automáticas del sistema después de finalizar la dosificación y previo a pasar a la siguiente secuencia de dosificación. Si una tara no se ejecuta correctamente, puede ocasionar errores de medición en el siguiente material.
- La agitación durante dosificaciones de material ocasiona ruido debido a los movimientos en el interior del tanque, esto perturba las mediciones realizadas por la celda de carga y puede ocasionar errores de dosificación, para corregir esto pueden utilizarse tanques de pre-pesaje arriba del tanque mezclador, en el pre-pesaje se realizan las mediciones de dosificación y después se abre la válvula para permitir el paso de las sustancias hacia el tanque mezclador.
- El tanque debe estar correctamente alineado a las tuberías de dosificación para garantizar una correcta medición del peso.
- Dependiendo de la viscosidad del fluido, se debe cerrar la válvula de dosificación antes de llegar al peso de referencia, de tal forma que el material remanente en la tubería y el que sigue cayendo sin tocar aún la celda de carga, permitan llegar al peso deseado sin sobrepasarlo. Para ello, es necesario realizar cálculos y pruebas del comportamiento de cada material para poder ajustar el cierre además de garantizar una presión constante en la tubería.
- Para este tipo de sistemas, el material no necesita un flujo continuo a través de las tuberías y puede dosificarse por pulsos, además, no es necesario inundar por completo una tubería.

- El peso de todos los materiales al momento de dosificación debería ser similar o estar en un rango de tolerancias similares para conseguir una celda de carga que se ajuste a todos, sin embargo, cuando éste no es el caso, es necesario tener un tanque de pre-pesaje para obtener dosificaciones de mayor precisión, y aquellas que requieren menos precisión pueden dosificarse directamente al tanque de proceso. Para ello, se realizaría una inversión de celdas de carga tanto para el tanque de pre-pesaje como para el tanque de proceso.

Para propósitos de este trabajo, no se entrará en detalle sobre la construcción y ajuste de sistemas de dosificación controlados por peso, sin embargo, es importante mencionar que este tipo de sistema puede llegar a ser una opción más adecuada que el controlado por flujo, si el proceso así lo amerita.

Figura 20. **Tanques mezcladores con celdas de carga**



Fuente: Direct Industry – *Celda de Carga de compresión*.

<https://www.directindustry.es/prod/schenck-process-holding-gmbh/product-14361-1697928.html>. Consulta: 15 de febrero de 2022.

1.5.3. Control de dosificación por flujo

En este tipo de control, la variable de proceso principal se mide a través del flujo para determinar la cantidad de material que se ha dosificado en el punto de uso. En general, este control suele ser más caro que el controlado por peso, sin embargo, también es útil para sistemas que requieren alta precisión en la dosificación.

1.5.3.1. Flujómetros

Un flujómetro es un instrumento capaz de monitorear y calcular la cantidad de un fluido que ha circulado en una tubería. Existen dos tipos de flujómetros; los volumétricos utilizados para aplicaciones generales, y los másicos, los cuales se reservan para aplicaciones que requieren mayor exactitud en la medida.

- Medidores volumétricos
 - Desplazamiento positivo: cuenta e integra volúmenes separados del fluido. Sus partes mecánicas se mueven aprovechando la energía del fluido y generan una pérdida de carga.
 - Disco Oscilante
 - Pistón Oscilante
 - Pistón Alternativo
 - Rotativos
 - Remolino: en este tipo de flujómetros, se agrega una hélice estática dentro de la tubería sobre la cual pasa el fluido generando

un movimiento rotacional a una frecuencia proporcional a la velocidad del fluido. Para que su medición sea correcta, el medidor debe instalarse alineado con la tubería para que los remolinos se formen adecuadamente.

- Vórtex: similares a los flujómetros de remolino, en este caso se agrega un cuerpo con forma cónica que genera vórtices desfasados 180° , la frecuencia de estos vórtices es directamente proporcional a la velocidad del fluido. Así mismo, este medidor también debe instalarse alineado perfectamente a la tubería para que la creación de vórtices sea adecuada.
- Electromagnético: miden el voltaje inducido por el fluido a medida que recorre la tubería, dependiendo de la conductividad del fluido, el voltaje se traduce a la medición de flujo. Este tipo de flujómetros se utilizan ampliamente en la industria por su buen desempeño y su robustez ante perturbaciones en las condiciones del proceso.
- Ultrasonido: mide la velocidad por la que un fluido recorre la tubería utilizando ondas ultrasónicas. Su selección depende de otras variables del sistema, como la presión o la temperatura.
- Presión diferencial: se basa en el Teorema de Bernouilli, al medir la diferencia de presión provocada por un estrechamiento en el canal del fluido, puede calcularse la velocidad del material antes y después del estrechamiento.
 - Tubo Pitot
 - Tubo Annubar

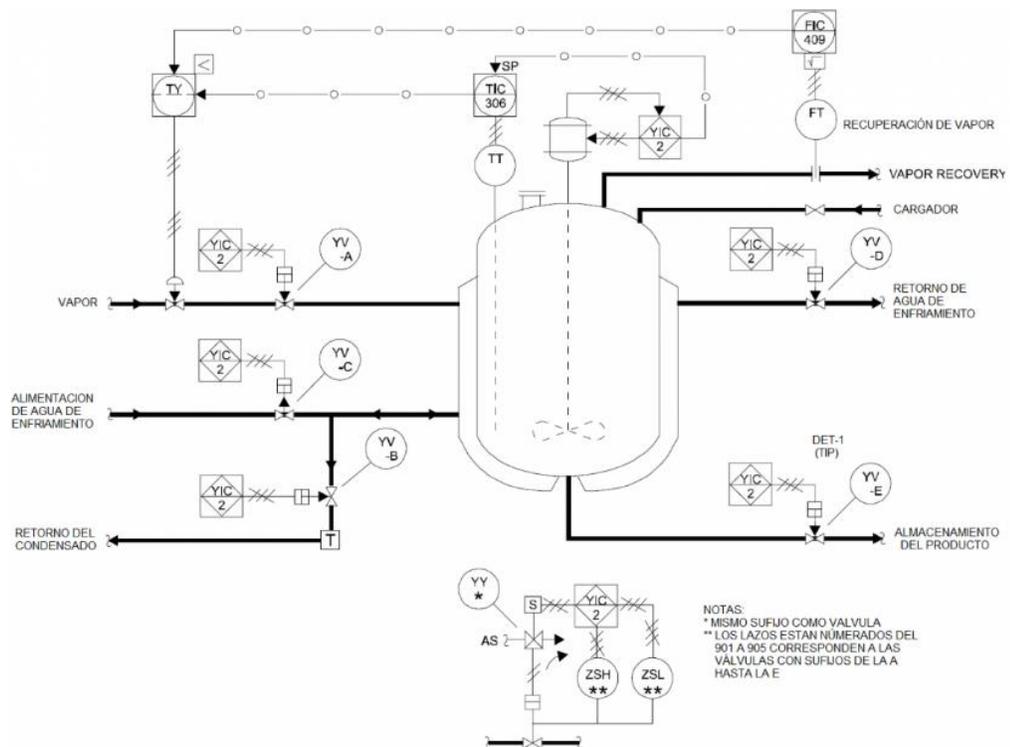
- Medidor de Codo
- Medidores másicos
 - Volumétrico compensado: puede combinarse la operación de un medidor volumétrico con compensación de densidad con un medidor másico, al operar la densidad del fluido con la medición de velocidad y así obtener el flujo másico.
 - Térmico: miden el flujo másico elevando la temperatura del material al tener contacto con un punto del tubo que proporciona un calor constante. Se mide la variación de temperatura de una sonda a otra, al estar un fluido en reposo, su temperatura será igual en ambas sondas, sin embargo, al existir un flujo se presentará una diferencia de temperatura entre ambas sondas que se incrementará a medida que el flujo aumente.
 - Coriolis: la medición se basa en el teorema de Coriolis para determinar el flujo másico del fluido. La fuerza Coriolis aparece cuando un cuerpo experimenta una aceleración en un sistema de rotación, es una manifestación de la inercia del objeto y produce una aceleración perpendicular al eje de rotación del sistema.

1.6. Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID)

Los diagramas de tuberías e instrumentación son ampliamente conocidos por su nombre en inglés; *Piping and Instrumentation Diagram* (P&ID), éstos son una representación gráfica de los equipos e instrumentos instalados en un sistema o proceso. Poseen distintos símbolos para identificar cualquier

componente del sistema, sus características y sus conexiones con otros elementos del proceso. Los P&ID utilizan normas para estandarizar los símbolos, líneas, códigos y configuraciones del diagrama. Generalmente, se basan en la Norma ANSI/ISA 5.1, *Instrumentation Symbols and Identification*.

Figura 21. Ejemplo de un P&ID



Fuente: Control Real Español. *P&ID diagramas de tuberías e instrumentación*.

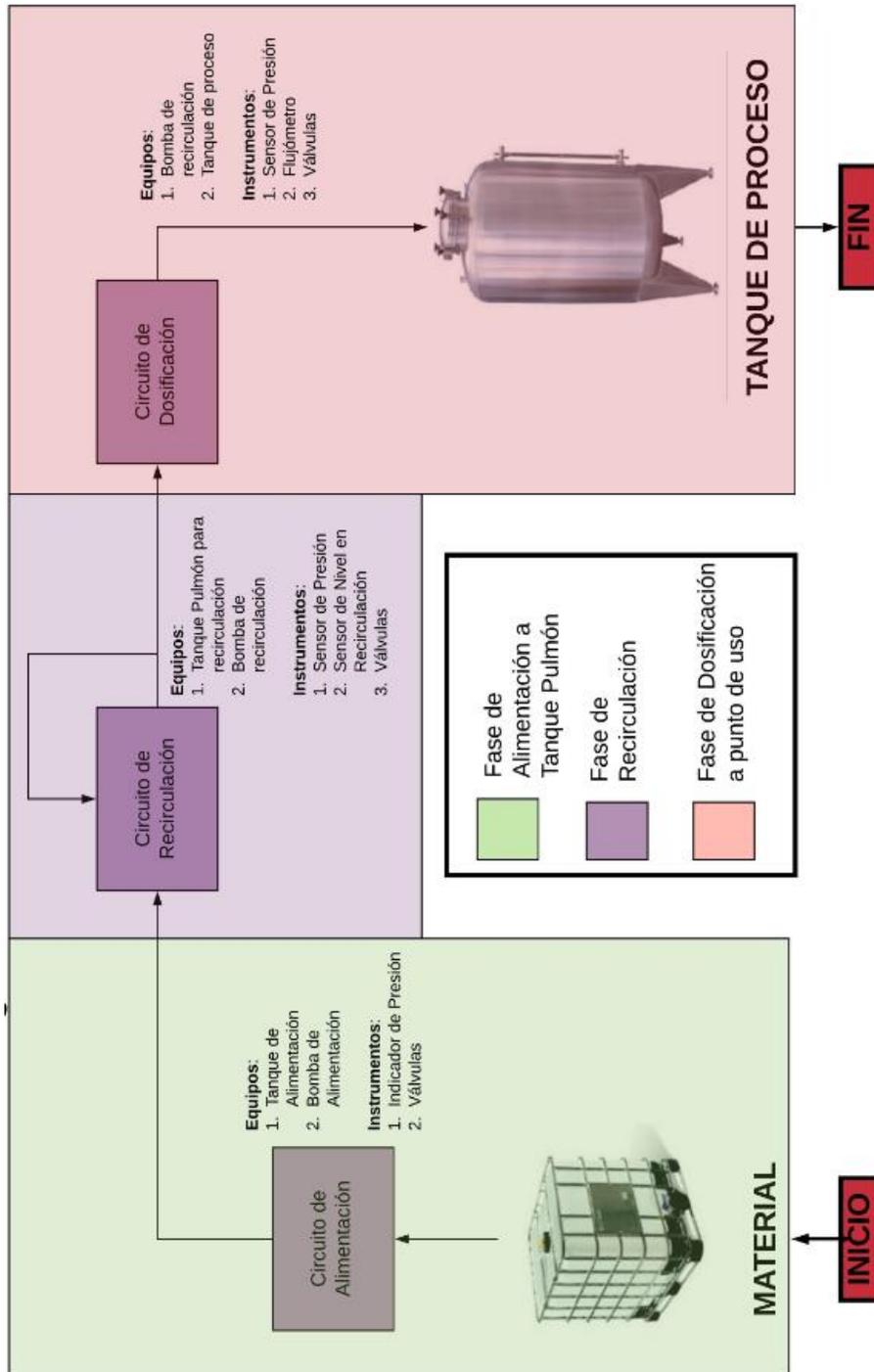
<https://controlreal.com/es/diagramas-de-tuberias-e-instrumentacion-pid/>. Consulta: 17 de febrero de 2022.

2. ARQUITECTURA Y LÓGICA DE CONTROL DEL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN PARA PROCESOS NO SANITARIOS

No todos los sistemas de dosificación se trabajan bajo el mismo diseño ni todos sus equipos se controlan bajo la misma lógica, por ello, es importante identificar las necesidades del proceso industrial para que el sistema de dosificación seleccionado sea diseñado correctamente. Algunos procesos industriales realizan la dosificación de diferentes materiales a un punto de uso, sin embargo, cuando existen materiales con una mayor criticidad en el proceso, éstos requieren de un control y precisión mucho mayor para adecuarse a las especificaciones de las cargas producidas y cumplir con el rango de tolerancia de la receta. Este trabajo se enfoca principalmente en este tipo de dosificación, la cual requiere de un bucle independiente para el material crítico y un control mucho más robusto que los sistemas de dosificación comunes. La dosificación de materiales de baja criticidad y de un rango amplio en su tolerancia, no justifica la inversión realizada en el sistema de dosificación propuesto en este trabajo de investigación.

Para explicar el posicionamiento y función de cada equipo e instrumento utilizado, es necesario realizar una segmentación del sistema de dosificación en circuitos y explorarlos individualmente, cada circuito propuesto involucra una lógica de control combinada por fases, estados y transiciones que efectúa las decisiones adecuadas en cada etapa del proceso. Los sistemas de control involucrados se relacionarán con sus respectivos sensores y actuadores, y estarán conectados a la lógica condicionada por *interlocks* y a las transiciones de fase. Se presenta el esquema general del sistema propuesto en la figura 22.

Figura 22. Esquema general del sistema de dosificación propuesto



Fuente: elaboración propia, empleando Google Drawings.

2.1. Integración de equipos e instrumentos

La instalación de los equipos, instrumentos y demás elementos físicos es el paso posterior al diseño del sistema de dosificación.

2.1.1. Circuito de alimentación

El circuito de alimentación es la primera etapa del sistema de dosificación, tal y como se muestra en la figura 22. Su propósito consiste únicamente en proveer de material al sistema de recirculación. Los equipos en el circuito pueden variar en todos los procesos de dosificación e involucran la forma en la que se obtiene la materia prima para dosificarse en el punto de uso. El depósito del material puede ser un contenedor IBC, un camión cisterna, un tanque de almacenamiento, tonel, entre otros.

Figura 23. **Contenedor IBC**



Fuente: [Todocontenedores.com](https://www.todocontenedores.com). *Contenedores*.

<https://www.todocontenedores.com/producto/contenedor-ibc-usado-1000-litros-con-palet.html>.

Consulta: 19 de febrero de 2022.

2.1.1.1. Consideraciones físicas

Para este circuito, la activación de la transferencia de material al tanque de recirculación se realizará de forma manual. Sin embargo, la desactivación puede ser tanto manual como automática. Es recomendable que el depósito de alimentación sea un IBC, tonel o un tanque de almacenamiento previamente instalado. En la instalación del circuito, se debe asegurar que puede extraerse material del depósito utilizando una bomba, no existen tantas consideraciones físicas adicionales ya que este circuito es el menos crítico y no requiere de mayor control.

2.1.1.2. Equipos involucrados

- Depósito de alimentación (CA-TANK-01): el contenedor del material debe tener la capacidad de conectarse a la bomba de alimentación para poder extraer el líquido y transferirlo al tanque de recirculación.
- Bomba de alimentación (CA-PMP-01): la selección de la bomba de alimentación no necesita ser tan rigurosa, ya que este circuito no tiene comunicación directa con el circuito de dosificación final. Sin embargo, es necesario tomar ciertos criterios para que la bomba seleccionada sea capaz de trabajar con el material.
 - Tipo de fluido: el material de construcción de la bomba debe seleccionarse asegurando que no se desgaste o se lastime si el fluido es corrosivo o posee otras propiedades de este tipo. Adicional, si el proceso es de tipo sanitario, debe considerarse qué tipo de material utilizar en las bombas para cumplir con las

especificaciones sanitarias y microbiológicas del proceso industrial.

- Viscosidad: la viscosidad genera resistencia ante el movimiento del fluido, a mayor viscosidad, mayor oposición tendrá el fluido ante un intento de desplazarlo. Las bombas centrífugas son adecuadas para baja viscosidad y las bombas volumétricas son una buena opción para líquidos con mayor viscosidad.
- Presión y Caudal requerido: la cantidad de GPM (galones por minuto) de una bomba dependerá del volumen de material que se desea desplazar en una unidad de tiempo. Si se trabaja con contenedores muy grandes y el tanque de recirculación tiene suficiente volumen para almacenarlos, se evaluará la selección con una bomba de mayor GPM que el promedio. El caudal se traducirá como el tiempo que tardará la bomba en vaciar el contenedor y llenar el tanque de recirculación. Importante evaluar la curva de presión – caudal en las especificaciones técnicas de la bomba.
- Temperatura: la bomba debe seleccionarse de forma que la carcasa aguante la temperatura máxima del fluido.
- Altura de aspiración: la altura de aspiración no debería de sobrepasar 10 metros de profundidad, en caso contrario, es más útil utilizar una bomba sumergible.
- Altura de descarga y distancia entre la bomba y el punto de suministro.

- Pérdidas de carga: involucra a todos los instrumentos o uniones de tuberías tipo codos que crean cierto obstáculo al momento de la transferencia del fluido.

2.1.1.3. Selección de instrumentos

- Válvulas del circuito
 - De apertura y cierre manual: las válvulas manuales permiten segmentar las tuberías para poder realizar limpiezas o cambios sin que se tenga acceso a todo el circuito. Al momento de activar el sistema en automático, debe realizarse una verificación del estado de todas las válvulas manuales para que correspondan al correcto.
 - Válvula manual (CA-VBM-01): de contenedor a bomba de alimentación.
 - Válvula manual (CA-VBM-02): posterior a válvula de cheque.
 - Válvula manual (CA-VBM-03): en dosificación a tanque de recirculación.
 - Válvula manual (CA-VBM-04): transferencia hacia manómetro para medición de presión.

Figura 24. **Válvula manual**



Fuente: Ninbo SIO Fluid Equipment Co., Ltd. *Válvulas manuales*. <https://www.siovalve.com/product-category/valvulas-manuales/>. Consulta: 19 de febrero de 2022.

- Antirretorno
 - Válvula de cheque en transferencia de bomba a tanque de recirculación (CA-CHV-01): tal como se definieron en el capítulo anterior, las válvulas de cheque solo permiten el paso del fluido en una dirección, en la posición seleccionada para el circuito de alimentación, la válvula sólo permite el paso del líquido en dirección al tanque de recirculación y evita el retorno del fluido hacia la bomba.

- De apertura y cierre controlado
 - Válvula de control de contenedor a bomba de dosificación (CA-VBA-01): la válvula de control habilita el paso del material desde el contenedor hacia la bomba de alimentación. La activación de la válvula es automática y es controlada en la fase de alimentación.

- Sensores
 - Transmisor de presión (CA-PIT-01): el transmisor de presión tiene como objetivo verificar que el circuito se encuentre en condiciones normales de presión. Si existe una sobrepresión en la tubería, el transmisor enviará la medición al controlador y este podrá efectuar las acciones necesarias para evitar el daño de los equipos.
 - Sensor de Flujo (CA-FT-01): un sensor de flujo, a diferencia de un flujómetro, sólo es capaz de detectar la existencia o inexistencia de flujo en el interior de una tubería. El flujómetro, en cambio, mide la cantidad de fluido que pasa en un segmento de tubería. En el caso del sensor de flujo, se podrá determinar si existe material al momento de alimentar al tanque de recirculación.

Figura 25. **Transmisor de presión *Rosemount***



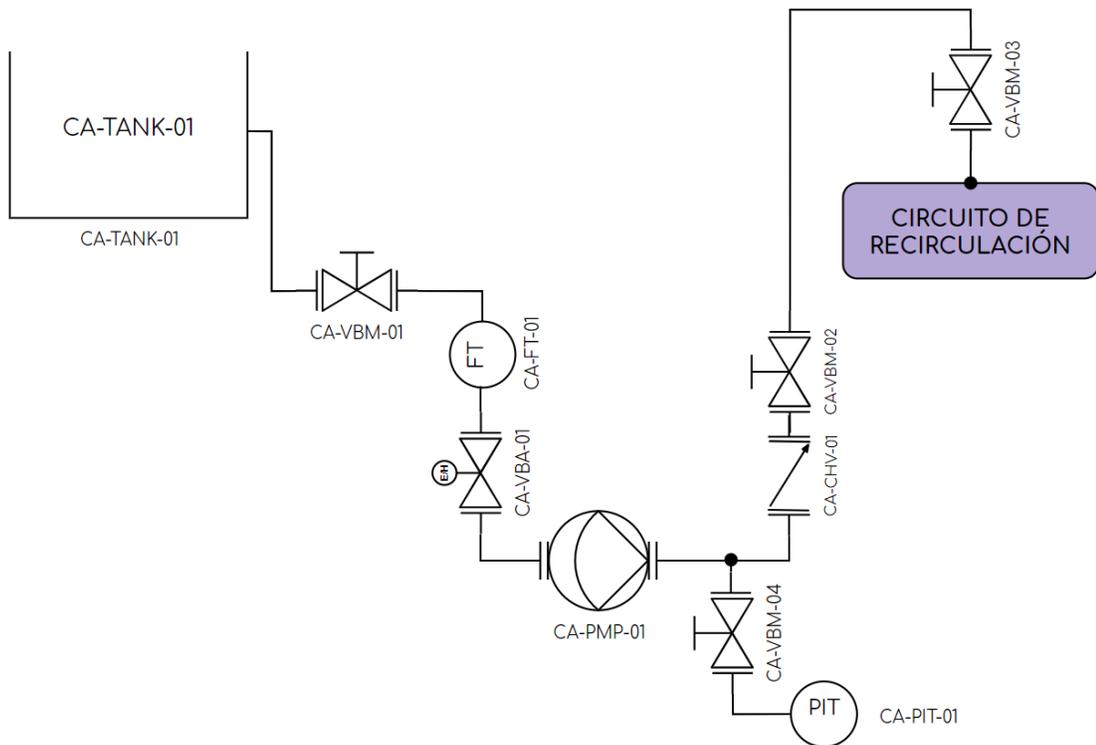
Fuente: Emerson. *Transmisor de presión Rosemount 3051 con protocolo HART.*
<https://www.emerson.com/documents/automation/manual-rosemount-3051-transmisor-de-presi%F3n-con-protocolo-hart-es-es-78704.pdf>

Consulta: 19 de febrero de 2022.

2.1.1.4. Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID)

Los equipos, instrumentos y otros elementos físicos se ven incluidos en el diagrama P&ID de la figura 26 con sus respectivos códigos de identificación. Para el circuito de alimentación, todos los códigos iniciarán con las letras CA. En este diagrama aún no se incluirán los sistemas de control asociados al sistema ya que se definirán más adelante.

Figura 26. P&ID de circuito de alimentación



Fuente: elaboración propia, empleando Visual Paradigm.

La conexión al circuito de recirculación puede observarse en el recuadro morado, siendo la válvula CA-VBM-03 el último elemento del circuito de alimentación, previo a la dosificación en el tanque de recirculación. El diagrama muestra una referencia del posicionamiento de los equipos e instrumentos, las distancias y tipos de conexiones, así como la selección de la bomba, pueden variar. En el caso del diagrama de la figura 26, se utilizó el símbolo de una bomba de diafragma para el elemento CA-PMP-01, sin embargo, la selección de la bomba dependerá de las condiciones especificadas en el apartado anterior.

Para visualizar mejor los equipos e instrumentos agregados en el circuito de alimentación, se presenta la tabla I.

Tabla I. **Instrumentos y equipos del circuito de alimentación**

Categoría	Tipo	Tag ID	Descripción
Equipo	Tanque / Contenedor / Cisterna	CA-TANK-01	Depósito donde se almacena el fluido.
	Bomba	CA-PMP-01	Bomba para transferir el fluido del depósito al tanque de recirculación.
Instrumento	Válvula Manual	CA-VBM-01	Válvula de contenedor a bomba de alimentación.
		CA-VBM-02	Válvula posterior a cheque.
		CA-VBM-03	Válvula anterior a tanque de recirculación.
		CA-VBM-04	Válvula para manómetro. Opcional.

Continuación de la tabla I.

Categoría	Tipo	Tag ID	Descripción
	Válvula de Control	CA-VBA-01	Válvula automática para activación de alimentación.
	Válvula de Cheque	CA-CHV-01	Válvula antirretorno posterior a bomba de alimentación.
	Transmisor de Presión	CA-PIT-01	Transmisor de presión.
	Transmisor de flujo	CA-FT-01	Transmisor de flujo.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

2.1.2. Circuito de recirculación de material

El circuito de recirculación es la segunda etapa del sistema, obtiene el líquido proveniente del circuito de alimentación y almacena el material en un tanque con un bucle de recirculación cerrado. El objetivo primordial del circuito es asegurar que se posea la totalidad de material al momento de la dosificación, si el material se acaba al momento de realizar la dosificación, indudablemente, el sistema se volverá incontrolable y no será capaz de adicionar la cantidad correcta en el punto de uso. Esto se debe a que se creará una interrupción durante la dosificación y las condiciones del proceso se verán modificadas. Al momento de reactivar la dosificación, las tuberías no estarán inundadas del material y los sistemas de control no trabajarán correctamente bajo esas circunstancias.

2.1.2.1. Consideraciones físicas

El circuito de recirculación posee una criticidad media, ya que algunos de sus componentes afectan directamente al circuito de dosificación. Algunas de

las consideraciones físicas que deben tomarse en cuenta al momento de diseñar el circuito son:

- El tanque de recirculación debe poseer un bucle cerrado de recirculación de material que asegure las tuberías inundadas del líquido. Esto conlleva a que los diámetros de la tubería deben ser seleccionadas respecto a la cantidad de material promedio que se mantendrá en constante movimiento dentro del bucle de recirculación.
- La selección de la capacidad del tanque está sujeto a la cantidad de veces que se dosifica en un periodo de tiempo, la cantidad de material en cada dosificación, el tipo de depósito de alimentación en el circuito de alimentación, entre otros. Por ejemplo, si el depósito de alimentación fuese un camión cisterna, lo ideal sería almacenar en el tanque de recirculación la cantidad total de material que se entrega, si el tanque de recirculación no es lo suficientemente grande, el camión cisterna tendría que esperar a que se realicen varias dosificaciones para poder liberar el resto del material en el tanque de recirculación. Ahora bien, si ya se posee previamente un tanque de almacenamiento y este funciona como el depósito en el circuito de alimentación, el tanque de recirculación puede tener una capacidad mucho menor, y su tamaño dependería de la cantidad de dosificaciones que desean almacenar en el circuito de recirculación. Es recomendable que el tanque de recirculación no sea tan grande en comparación con la cantidad de material que se dosifica, debido a que la bomba de recirculación tendría que ser muy robusta y de un gran caudal, ocasionando que, al momento de dosificar, el bombeo sea muy intenso, disminuyendo la precisión del circuito de dosificación.

- La selección de la bomba de recirculación debe ser cautelosa, ya que será la misma bomba que transfiera el material hacia el circuito de dosificación. Para el circuito de dosificación, es ideal tener un flujo parejo y constante, una bomba de desplazamiento positivo con un disco excéntrico puede ser una buena opción para entregar el flujo continuo y estable al momento de realizar la adición al punto de uso. Adicional, deben considerarse todas las recomendaciones para la selección de la bomba explicadas en el subcapítulo anterior, tanto para las condiciones del circuito de recirculación, como para las del circuito de dosificación.
- Por temas de seguridad industrial y protección de los equipos, el control antiderrame en el tanque de recirculación es indispensable, así como la revisión de cantidad mínima del material dentro del tanque para iniciar el proceso de recirculación.
- Se requiere de un control de presión adecuado dentro de la tubería para evitar la sobrepresión al momento del cierre de las válvulas.

2.1.2.2. Equipos involucrados

- Tanque de recirculación (CR-TANK-01): la selección de la capacidad del tanque debe calcularse con base a las necesidades del proceso. Las variables para tomar en cuenta son:
 - Tipo de depósito en circuito de alimentación: esto juega un papel muy importante en la selección de la capacidad del tanque. Algunas variantes son:

- Camión cisterna: no recomendable, idealmente alimentar con el camión cisterna a un tanque de almacenamiento previo al tanque de recirculación.
 - Contenedor IBC o toneles: verificación de la cantidad de movimientos desde la bodega de almacenamiento de contenedores y toneles hasta la ubicación del circuito de alimentación.
 - Tanque de almacenamiento o cisterna: es el más recomendable, un circuito de almacenamiento previo al circuito de alimentación es la mejor opción para trabajar con grandes cantidades de fluido en este tipo de sistemas, sin embargo, depende de la logística de compra del material, si se adquiere en toneles o contenedores IBC, estos pueden ser utilizados para alimentar al tanque de recirculación directamente sin inconvenientes.
- Especificaciones del proceso: cada proceso es diferente y procede bajo distintas condiciones. Algunos de los eventos a tomar en cuenta para efectuar la selección de la capacidad del tanque son:
 - Cantidad de movimientos de traslado: es indispensable calcular los movimientos necesarios para trasladar toneles o tanques IBC con base a la demanda de material, si estos fueran el tipo de depósito utilizado en el circuito de alimentación. Si el proceso se vuelve muy complicado y repetitivo, la capacidad del tanque de recirculación puede

ser mayor para almacenar más cantidad de material y no requerir de movimientos tan frecuentes.

- Promedio diario de dosificaciones: para procesos de alimentación muy complicados y alta demanda de material, el tanque de recirculación puede funcionar como un almacenamiento intermedio. Si las dosificaciones no son solicitadas con tanta frecuencia, la capacidad del tanque de recirculación puede ser menor ya que no requerirá repetir el proceso de alimentación tan a menudo.
 - Volumen del material en cada dosificación: si la cantidad de material solicitada en cada dosificación es muy alta y la capacidad del tanque de recirculación no logra suplir, existirán interrupciones frecuentes por falta de material en recirculación, idealmente debe de poder suplir varias dosificaciones antes de requerir una nueva alimentación.
- Bomba de recirculación (CR-PMP-01): encargada de bombear el líquido a través del bucle de recirculación y hacia el circuito de dosificación. Es importante que su selección sea tanto para las condiciones del circuito de recirculación como las del circuito de dosificación, una selección errónea de la bomba producirá inestabilidad al momento de dosificar material. Si el flujo no es continuo causará variaciones al dosificar. Las bombas centrífugas o neumáticas que trabajan por pulsaciones no afectan tanto a los sistemas de dosificación con celdas de carga, sin embargo, para el uso de flujómetros, no son las opciones más adecuadas. La selección de la bomba debe involucrar también la cantidad de galones por minuto capaces de bombear y la presión de trabajo.

2.1.2.3. Selección de instrumentos

- Válvulas
 - De apertura y cierre manual
 - Válvula manual (CR-VBM-01): a la descarga del tanque de recirculación.
 - Válvula manual (CR-VBM-02): para transmisor de presión CR-PIT-01.
 - Válvula manual (CR-VBM-03): posterior a la válvula de cheque.
 - Válvula manual (CR-VBM-04): previa a la conexión con el circuito de dosificación.
 - Válvula manual (CR-VBM-05): posterior a la conexión con el circuito de dosificación.
 - De apertura y cierre controlado
 - Válvula de control (CR-VBA-01): a la descarga del tanque de recirculación Activa y desactiva la recirculación.
 - Válvula de control (CR-VBA-02): retorno al tanque de recirculación, funciona como una válvula reguladora de presión, por lo tanto, debe ser de apertura proporcional.

- Antirretorno
 - Válvula de cheque (CR-CHK-01): posterior a bomba de recirculación.

- Sensores
 - Transmisor de presión (CR-PIT-01): este sensor transmite al controlador el valor de la presión en la tubería de recirculación previo a la conexión con el circuito de dosificación. Este transmisor permitirá evitar las sobrepresiones en la línea.

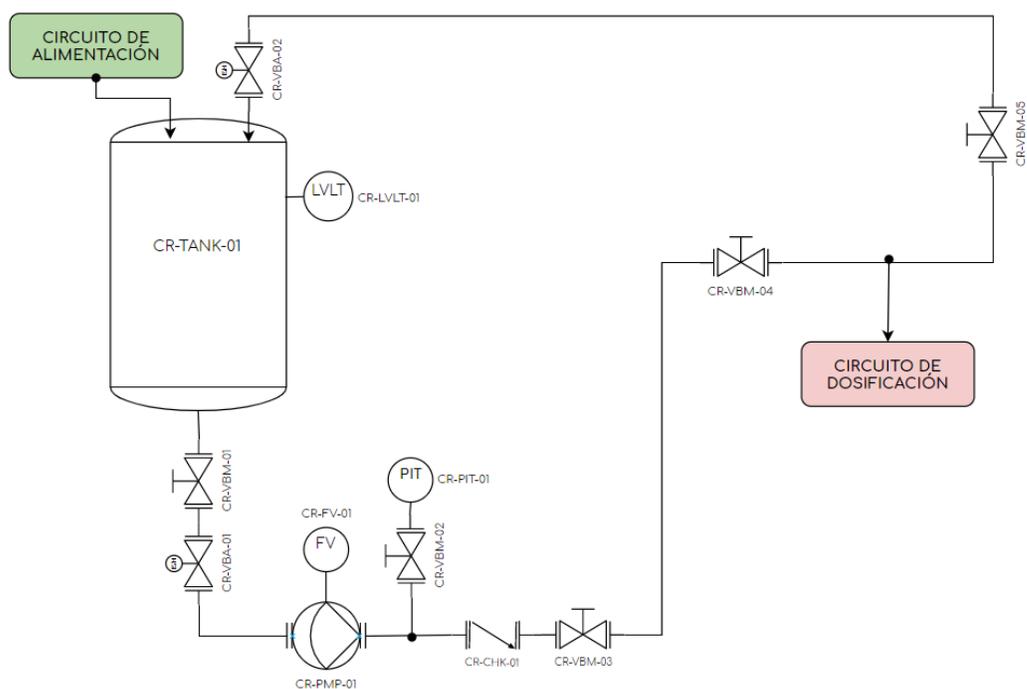
 - Transmisor de nivel (CR-LVLT-01): el transmisor de nivel enviará el valor del nivel dentro del tanque de recirculación al controlador para que éste pueda correr la lógica necesaria para evitar derrames o evitar la activación del proceso de recirculación o dosificación cuando el nivel de material es demasiado bajo.

- Variadores de frecuencia
 - Variador de frecuencia de bomba de recirculación (CR-FV-01): es el encargado de controlar la velocidad de bombeo de la bomba de recirculación y por consecuente regulará la presión en la tubería y el flujo de material que pasa a través de ella. Es ajustado con el algoritmo de control para la regulación de presión y su control se intercala con la válvula proporcional de retorno a tanque de recirculación.

2.1.2.4. Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID)

Los equipos, instrumentos y otros elementos físicos se ven incluidos en el diagrama P&ID de la figura 27 con sus respectivos códigos de identificación. Para el circuito de recirculación, todos los códigos iniciarán con las letras CR.

Figura 27. P&ID de circuito de recirculación



Fuente: elaboración propia, empleando Visual Paradigm.

Puede observarse la conexión con el circuito de alimentación en el recuadro verde, y, con el circuito de dosificación en el recuadro rosado. Para visualizar mejor los equipos e instrumentos agregados en el circuito de recirculación, se presenta la tabla II.

Tabla II. **Instrumentos y equipos del circuito de recirculación**

Categoría	Tipo	Tag ID	Descripción
Equipo	Tanque	CR-TANK-01	Tanque de recirculación
	Bomba	CR-PMP-01	Bomba para transferir el fluido a través de todo el circuito de recirculación y al circuito de dosificación.
Instrumento	Válvula Manual	CR-VBM-01	Válvula de descarga de tanque.
		CR-VBM-02	Válvula para transmisor de presión 1.
		CR-VBM-03	Válvula posterior al cheque.
		CR-VBM-04	Válvula previa a conexión con circuito de dosificación.
		CR-VBM-05	Válvula posterior a conexión con circuito de dosificación.
	Válvula de Control	CR-VBA-01	Válvula automática en descarga de tanque.
		CR-VBA-02	Válvula automática para regulación de presión.
	Válvula de Cheque	CR-CHK-01	Válvula antirretorno posterior a bomba de recirculación.
	Transmisor de Presión	CR-PIT-01	Transmisor de presión 1.
	Sensor de Nivel	CR-LVLT-01	Transmisor de nivel.
	Variador de Frecuencia	CR-FV-01	Variador de frecuencia para bomba de recirculación.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

2.1.3. Circuito de dosificación

El circuito de dosificación es la última etapa del sistema, obtiene el líquido proveniente del sistema de recirculación y realiza la dosificación al tanque de proceso.

Son pocos los elementos instalados en este sistema, sin embargo, su selección debe ser la más cuidadosa para garantizar la precisión en la dosificación y minimizar la variación de las condiciones de proceso.

2.1.3.1. Consideraciones físicas

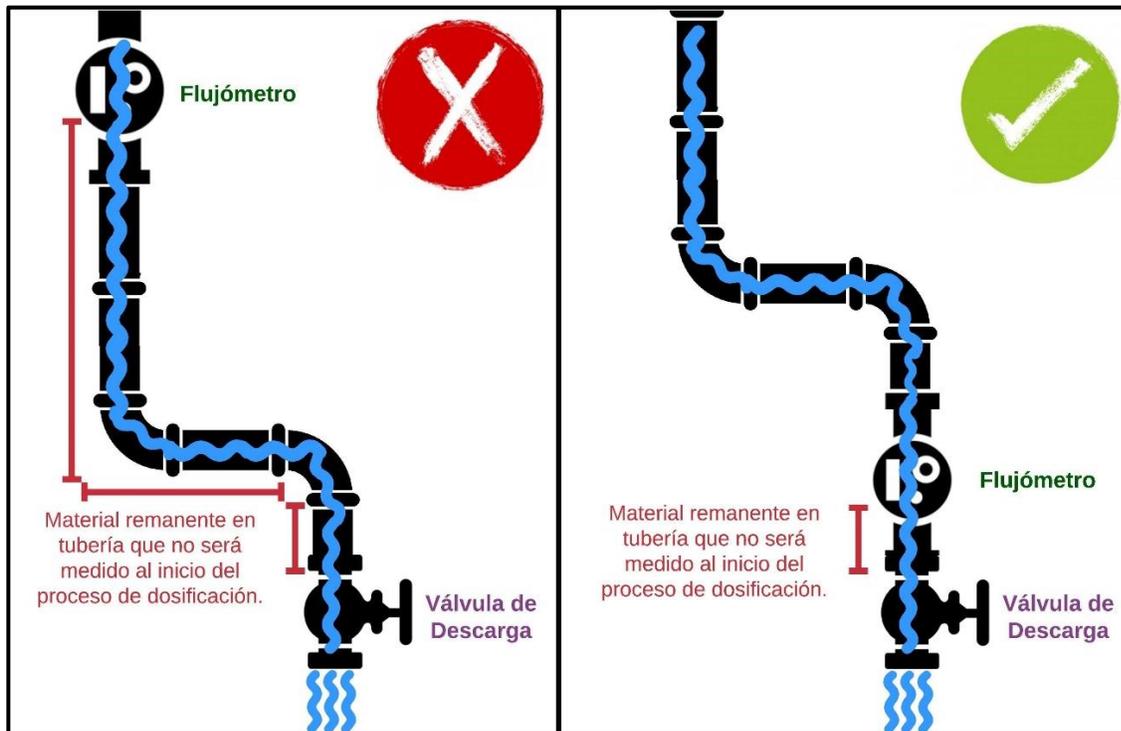
Este circuito es de criticidad alta y requiere un alto control para efectuar la dosificación con precisión. Algunas de las consideraciones físicas que deben tomarse al momento de diseñar el circuito son:

- La medición de la cantidad de material dosificada se realizará con flujómetros, por lo cual es indispensable disponer de un flujo continuo y estable al momento de entrar a la fase de adición.
- Para asegurar el dato obtenido en la medición de flujo, se realizará la confirmación del valor con un segundo instrumento. Por lo general, se utilizan dos flujómetros, el primario para registrar la medición y el secundario para verificar y confirmar el valor entregado. Cualquier variación entre ambos flujómetros puede detener el sistema para evitar errores de dosificación.
- Las burbujas de aire formadas sobre el material en una tubería horizontal ocasionan errores al momento de realizar la medición de flujo. La

posición de los flujómetros debe ser de forma vertical forzando que el material pase en el punto de medición para evitar este fenómeno.

- Los flujómetros máscicos proporcionan más información del fluido, lo cual puede llegar a ser útil para el sistema de dosificación y la historización de las especificaciones del material. Sin embargo, esto los hace más caros que los flujómetros volumétricos, lo cual es una variable para tener en consideración al momento de seleccionar el instrumento.
- Si se desea tener una línea central con varios puntos de dosificación debe colocarse un medidor de presión por cada punto y un juego de flujómetros. Los ajustes y regulaciones se deben realizar para cada uno de los puntos de dosificación. Las dosificaciones de material en paralelo no son recomendables por la complejidad que ello implica en el control y la fácil desestabilización del proceso. Sin embargo, pueden realizarse de manera secuencial para garantizar únicamente un sistema de dosificación activo a la vez.
- Los flujómetros deben posicionarse lo más cercanos al punto de descarga, en este caso, la válvula de dosificación. Los flujómetros miden la cantidad de material que se encuentra fluyendo a través de la tubería, todo aquel material que se encuentre estancado no se medirá. Mientras más lejos se coloque el instrumento del punto de descarga, mayor será la cantidad de material remanente en la tubería, que el flujómetro será incapaz de captar al momento de realizar una nueva dosificación. Si esto sucede, el control y ajuste de los sistemas de control se dificultará y existirá una mayor variabilidad entre dosificaciones al no poder asegurar siempre la misma cantidad de material en la tubería.

Figura 28. **Posición recomendada para flujómetros**



Fuente: elaboración propia, empleando Google Drawings.

- La presión del fluido en la tubería de dosificación debe ser constante para que las condiciones se mantengan después de realizar los ajustes a los sistemas de control.
- El golpe de ariete es uno de los principales causantes de daño en las tuberías de un sistema hidráulico. Se ocasiona al cerrar bruscamente una válvula mientras existe flujo de material en esa dirección, esto ocasiona una sobrepresión que comprime el fluido y dilata la tubería. Al detenerse por completo el fluido, después del choque, este vuelve a expandirse y se desplaza en dirección contraria, similar a un rebote, generando un vacío. Si este efecto no se disipa, la onda expansiva puede destruir la

tubería, o el vacío generado posteriormente la puede contraer y deformarla permanentemente. Para evitarlo, debe existir una regulación de presión combinada entre el cierre de la válvula de dosificación y la velocidad de bombeo en la bomba de recirculación.

Figura 29. **Golpe de ariete en sistemas hidráulicos**



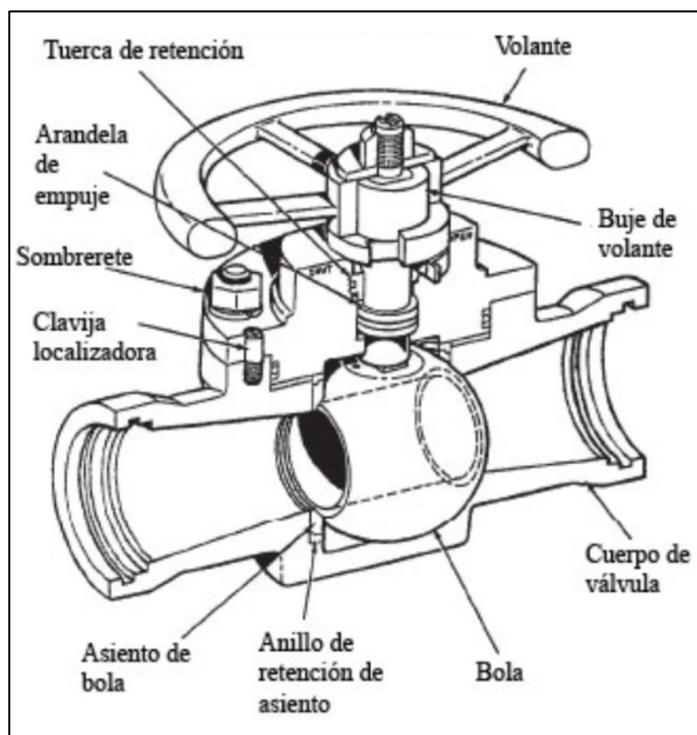
Fuente: SAN JUAN, Danahé. *Golpe de ariete, consecuencias y prevenciones*.

<https://0grados.com.mx/golpe-de-ariete-consecuencias-y-prevenciones/>. Consulta: 25 de febrero de 2022.

- Lo ideal es instalar una válvula proporcional caracterizada para tener un comportamiento lineal desde la apertura hasta el cierre de la válvula de dosificación. En promedio, estas válvulas se comportan linealmente del 5 % al 100 % de apertura, esto permite una mayor estabilidad y un ajuste más sencillo en los sistemas de control. Una válvula no caracterizada de

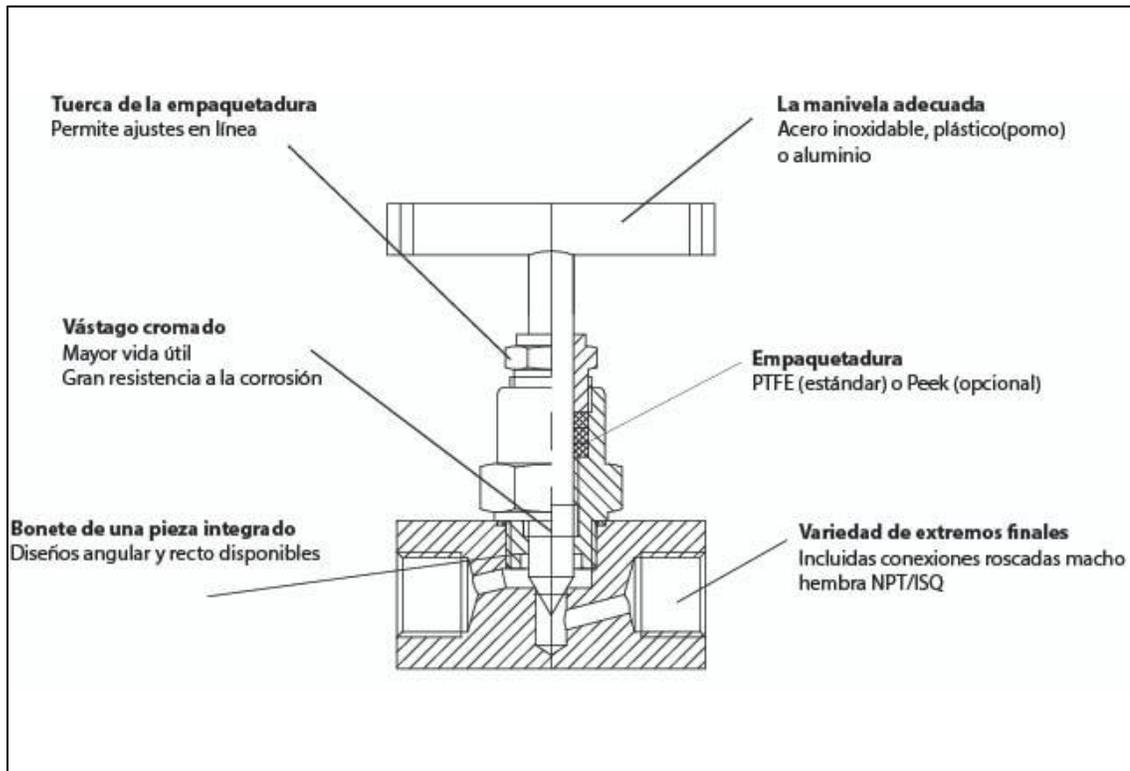
bola es incapaz de mantener un comportamiento lineal de apertura debido a la construcción mecánica interna del sistema, del 0 % al 20 % de apertura, el espacio es muy similar, y la diferencia de apertura entre los valores del 30 % al 70 % aumenta significativamente. Los sistemas que requieran una precisión de dosificación muy alta y que no necesiten cumplir con especificaciones sanitarias pueden ser aptos para utilizar las válvulas de aguja, las cuales se caracterizan por tener un comportamiento lineal del 0 % al 100 % de apertura.

Figura 30. Partes de una válvula de bola



Fuente: InformeBlogspot. *Válvulas de bloqueo y válvulas de caudal hidráulicas.*
<http://informefebrerotanquehidraulico828826.blogspot.com/2015/04/valvulas-de-bloqueo-y-valvulas-de.html>. Consulta: 28 de febrero de 2022.

Figura 31. Partes de una válvula de aguja



Fuente: GRM Industrial. *¿Cómo funciona una válvula de aguja?*
<https://www.grm.com.es/es/project/como-funciona-una-valvula-de-aguja/>.
Consulta: 28 de febrero de 2022.

2.1.3.2. Equipos involucrados

- Tanque de proceso (CD-TANK-01): es el punto final donde se dosificará el material, por lo general suelen ser tanques mezcladores, pailas o similares. Para este equipo, no es necesario realizar una selección rigurosa, todo dependerá del resto del proceso, si involucra agitación, más dosificaciones, mezclas, espera de reacciones, entre otros.

2.1.3.3. Selección de instrumentos

- Válvulas
 - De apertura y cierre manual
 - Válvula manual (CD-VBM-01): entrada al circuito de dosificación.
 - De apertura y cierre controlado
 - Válvula de dosificación (CD-VBA-01): la válvula de control habilita el paso de material al tanque de proceso.
- Sensores
 - Flujómetro primario (CD-FIT-01): la selección del flujómetro deberá coincidir con la precisión deseada para la dosificación, así como el tipo de tecnología. El flujómetro primario medirá la cantidad de material y enviará el dato al controlador para su procesamiento.
 - Flujómetro secundario (CD-FIT-02): medirá la cantidad de material y enviará el dato al controlador para que éste realice una comparación con los datos medidos en el flujómetro primario y confirme que ambos midieron datos similares. El flujómetro secundario no se involucra en la regulación de la dosificación, únicamente sirve de referencia del flujómetro primario.

Figura 32. **Flujómetro másico de efecto Coriolis marca Siemens**



Fuente: Direct Industry. *Siemens Process Instrumentation*.

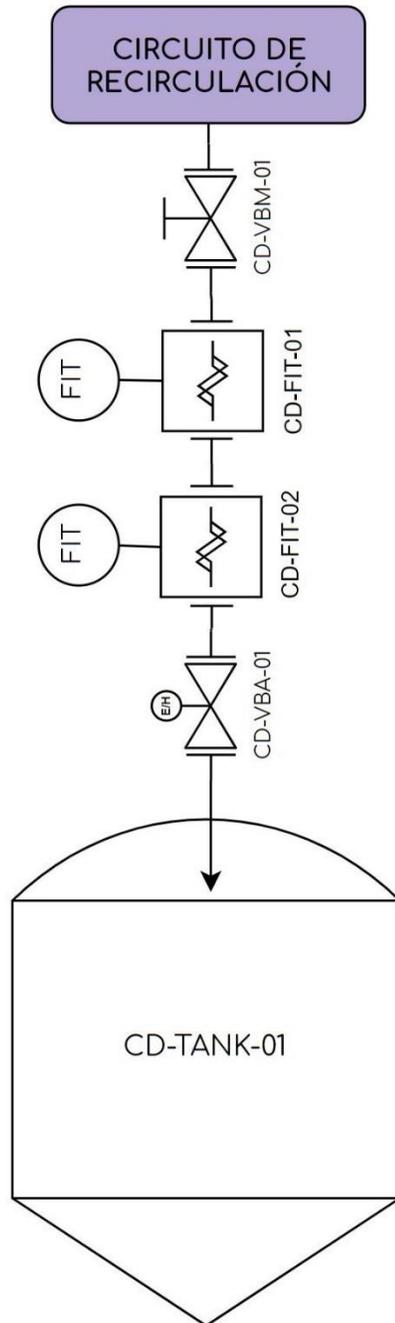
<https://www.directindustry.es/prod/siemens-process-instrumentation/product-18343-900342.html>. Consulta: 28 de febrero de 2022.

2.1.3.4. Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID)

Los equipos, instrumentos y otros elementos físicos se ven incluidos en el diagrama *P&ID* de la figura 33 con sus respectivos códigos de identificación. Para el circuito de dosificación, todos los códigos iniciarán con las letras CD.

En este diagrama aún no se incluirán los sistemas de control asociados al sistema ya que se definirán más adelante.

Figura 33. **P&ID de circuito de dosificación**



Fuente: elaboración propia, empleando Visual Paradigm.

Puede observarse la conexión con el circuito de recirculación en el recuadro morado.

En el caso del diagrama de la figura 33, se utilizó el símbolo de flujómetro másico de efecto Coriolis para los elementos CD-FIT-01 y CD-FIT-02, sin embargo, la selección del flujómetro queda a discreción del lector, tomando en cuenta las distintas especificaciones y requerimientos de su proceso.

Para visualizar mejor los equipos e instrumentos agregados en el circuito de dosificación, se presenta la tabla III.

Tabla III. **Instrumentos y equipos del circuito de dosificación**

Categoría	Tipo	Tag ID	Descripción
Equipo	Tanque	CD-TANK-01	Tanque de proceso. Puede ser un mezclador, paila, pre-mezclador, entre otros.
Instrumento	Válvula Manual	CD-VBM-01	Válvula de entrada a circuito de dosificación.
	Válvula de Control	CD-VBA-01	Válvula automática de dosificación.
	Flujómetro	CD-FIT-01	Flujómetro primario. Es el instrumento principal del sistema de dosificación, registra la medición y envía los datos al sistema de control.
CD-FIT-02		Flujómetro secundario. No se involucra en la regulación de dosificación. Únicamente funciona como referencia del valor del flujómetro primario.	

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

2.2. Definición de las fases del proceso

Después de diseñar el posicionamiento y las conexiones físicas de cada uno de los equipos e instrumentos, puede definirse el comportamiento de cada fase del sistema de dosificación. En esta etapa del diseño, se determinarán las acciones a efectuar, condiciones, transiciones de estados y demás lógica de control.

Cabe mencionar que los circuitos están interconectados y las acciones de cada uno afectan a los demás, por lo tanto, la lógica de control no se separa por circuito, los equipos e instrumentos de diferentes circuitos afectan el comportamiento de la fase.

Para cada una de las fases se definirá un *Tag* de identificación, este será utilizado tanto para denominar la fase como para identificar los *interlocks* asociados a ella.

2.2.1. Fase de alimentación a tanque pulmón

El objetivo de la fase es alimentar con material al tanque de recirculación o también denominado tanque pulmón. Para ello, debe valerse de la activación y desactivación de sus elementos finales de control, basándose en las condiciones de los sensores anidados a la fase.

Tabla IV. **TAG ID de fase de alimentación a tanque pulmón**

TAG ID
PH0_FEED

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

2.2.1.1. Interlocks

La habilitación de lectura de los *interlocks* se realiza al momento de activar la secuencia de fase. Los *interlocks* propuestos para la fase de alimentación a tanque pulmón se definen en la tabla V.

Tabla V. **Interlocks de la fase de alimentación a tanque pulmón**

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
PH0_FEED.Interlock.HighTankLevel	CR-LVLT-01	<p>Para el instrumento CR-LVLT-01, sensor de nivel de tanque de recirculación, se ajustará un valor máximo de nivel aceptable en el controlador para evitar el derrame de material. Si este nivel es alcanzado por el líquido ya contenido en el sistema, entonces se activará el <i>interlock</i> por nivel alto de material en tanque. Debe tomarse en cuenta que parte del material se encontrará en recirculación, para asegurarse que no exista un derrame, el límite máximo del material configurado debe considerar el volumen de líquido que se encuentra en la tubería de recirculación y ocupar un máximo del 85% de la capacidad total del sistema de recirculación.</p> <p>La capacidad total del sistema de recirculación se obtendrá con la capacidad operativa del tanque de recirculación menos la cantidad de volumen en tuberías.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 0, & x < 0.85 * (C_{Tank} - C_{Tub}) \\ 1, & x \geq 0.85 * (C_{Tank} - C_{Tub}) \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p>$f(x)$ = Valor del interlock en el controlador. Activado: $f(x) = 1$ Desactivado: $f(x) = 0$</p> <p>x = Nivel de material en Tanque CR – LVLT – 01. C_{Tank} = Capacidad operativa en CR – TANK – 01. C_{Tub} = Capacidad operativa en tubería de recirculación.</p>

Continuación de la tabla V.

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
PH0_FEED.Interlock.HighPressure	CA-PIT-01	<p>Si la tubería del circuito de alimentación experimenta una sobrepresión, los valores captados por el transmisor de presión CA-PIT-01 sobrepasarán el umbral máximo permitido. Para ello, un <i>interlock</i> debe activarse a valores superiores de presión que las tolerables en el sistema. Idealmente todas las válvulas manuales del circuito de alimentación deben estar abiertas, sin embargo, si se diera el caso en que una de las válvulas se encuentre cerrada, se generará sobrepresión al momento de iniciar el bombeo de material hacia el tanque de recirculación.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 0, & x < P_{Max} \\ 1, & x \geq P_{Max} \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Medición de presión en tubería por CA – PIT – 01. <i>P_{Max}</i> = Presión máxima permitida en tubería.</p>
PH0_FEED.Interlock.LowFlow	CA-FT-01	<p>La ausencia de flujo captado por el sensor durante un periodo prolongado de tiempo se ocasiona cuando el material del depósito de alimentación no recorre la tubería hacia la bomba, posiblemente por alguna desconexión con el depósito o por falta de material. Si esto ocurre, se activará el <i>interlock</i> por bajo flujo.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 1, & x = 0 \\ 0, & x = 1 \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Existencia de flujo, medido por CA – FT – 01. Flujo existente: <i>x</i> = 1 Sin flujo: <i>x</i> = 0</p>

Continuación de la tabla V.

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
PH0_FEED.Interlock.Confirmation	CA-VBA-01	Al controlar automáticamente una válvula, ésta envía una confirmación de su estado de apertura para asegurar que la comunicación entre la válvula y el controlador fue efectiva. Si se solicita la apertura o cierre de la válvula y no se recibe una confirmación con el mismo estado, se activará el <i>interlock</i> por falta de confirmación de válvula.
PH0_FEED.Interlock.EmergencyStop	Botón de paro de emergencia	Si el operador presiona manualmente el paro de emergencia del circuito, se activará el <i>interlock</i> de paro de emergencia. Por lo general este es un botón mecánico colocado cerca de la pantalla <i>HMI</i> o pantalla de control.
PH0_FEED.Interlock.Abort	Todos los aplicables	Si el operador activa manualmente el botón para abortar la fase, se activará el <i>interlock</i> de aborto de fase.
PH0_FEED.Interlock.NoConnection	Todos los aplicables	Si el controlador detecta falta de conexión con alguno de los dispositivos de la fase, se activará el <i>interlock</i> por falta de conexión.
PH0_FEED.Interlock.Wait	Todos los aplicables	Si el sistema se encuentra detenido o en espera por un tiempo lo suficientemente largo, se activará el <i>interlock</i> de espera. Si existe alguna latencia en la respuesta del sistema o si alguna de las etapas de la fase entra en conflicto con el resto de la secuencia, el sistema podría detenerse durante un tiempo y activará el <i>interlock</i> .
PH0_FEED.Interlock.DosingPhase	Detección de Fase	Si se llamó la fase de adición o ya se encuentra habilitada, se activará el <i>interlock</i> por fase de adición.
PH0_FEED.Interlock.Off	Todos los aplicables	Se activa el <i>interlock</i> si el operador presiona el botón de desactivación de fase.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

La activación de cualquiera de los *interlocks* produce que el sistema entre en falla, existen tres tipos de falla para la fase de alimentación. Ver tabla VI.

Tabla VI. **Fallas de sistema en fase de alimentación**

TAG ID de Falla	<i>Interlocks</i> que generan la activación
PH0_FEED.Phase.Interlocked_ABORT	<ol style="list-style-type: none"> 1. PH0_FEED.Interlock.Abort 2. PH0_FEED.Interlock.HighTankLevel 3. PH0_FEED.Interlock.Wait 4. PH0_FEED.Interlock.HighPressure
PH0_FEED.Phase.Interlocked_HOLD	<ol style="list-style-type: none"> 1. PH0_FEED.Interlock.LowFlow 2. PH0_FEED.Interlock.NoConnection 3. PH0_FEED.Interlock.Confirmation 4. PH0_FEED.Interlock.EmergencyStop
PH0_FEED.Phase.Interlocked_OFF	<ol style="list-style-type: none"> 1. PH0_FEED.Interlock.DosingPhase 2. PH0_FEED.Interlock.Off

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

Una falla es un registro en el controlador que permite ejecutar transiciones entre estados de la fase cuando un *interlock* se encuentra activo. La falla PH0_FEED.Phase.Interlocked_OFF es superior en jerarquía y ejecutará su transición, sin importar que existan otras fallas al mismo tiempo.

La segunda en jerarquía de ejecución es la falla PH0_FEED.Phase.Interlocked_ABORT la cual ejecutará su transición sin importar que la falla PH0_FEED.Phase.Interlocked_HOLD esté activada.

2.2.1.2. Estados y transiciones

El estado de una fase es el conjunto de configuraciones, condiciones y acciones dentro del sistema. Los *interlocks* condicionan el accionamiento de un estado y detonan las transiciones a través de las fallas. Los estados existentes para la fase de alimentación se observan en la tabla VII.

Tabla VII. **Estados de la fase de alimentación a tanque pulmón**

Estado	Descripción	Acción efectuada
<i>READY</i>	<p>El sistema se encuentra listo para ejecutar la fase. Este estado configura las condiciones iniciales requeridas para iniciar la ejecución de la fase.</p> <p>Lectura de Interlocks: parcialmente activada.</p> <ul style="list-style-type: none"> • HighPressure • HighTankLevel • Abort • DosingPhase 	<ul style="list-style-type: none"> • CA-VBA-01: cerrada. • CA-PMP-01: apagada. • CA-FT-01: desactivado. • CA-PIT-01: activado, tomando datos. • CR-LVLT-01: valor de fase de recirculación.
<i>RUN</i>	<p>La fase se encuentra en ejecución y seguirá la secuencia de fase programada.</p> <p>Lectura de <i>Interlocks</i>: activada totalmente.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • CA-VBA-01: abierta. • CA-PMP-01: encendida • CA-FT-01: activado, tomando datos. • CA-PIT-01: activado, tomando datos. • CR-LVLT-01: activado, tomando datos.
<i>HOLD</i>	<p>La fase estará en espera ocasionada por la activación de una falla, la reactivación es manual y prosigue con la última etapa de la secuencia de fase que fue ejecutada.</p> <p>Lectura de <i>Interlocks</i>: parcialmente activada.</p> <ul style="list-style-type: none"> • HighPressure • HighTankLevel • Abort • DosingPhase 	<ul style="list-style-type: none"> • CA-VBA-01: abierta. • CA-PMP-01: apagada. • CA-FT-01: desactivado. • CA-PIT-01: activado, tomando datos. • CR-LVLT-01: activado, tomando datos.

Continuación de la tabla VII.

Estado	Descripción	Acción efectuada
<i>ABORT</i>	<p>Se aborta la fase por activación de una falla. El sistema es incapaz de finalizar la secuencia de fase por la activación de un <i>interlock</i> crítico. Para salir del estado, se reinicia el proceso y la secuencia.</p> <p>Lectura de <i>Interlocks</i>: parcialmente activada.</p> <ul style="list-style-type: none"> • DosingPhase 	<ul style="list-style-type: none"> • CA-VBA-01: cerrada. • CA-PMP-01: apagada. • CA-FT-01: desactivado. • CA-PIT-01: activado, tomando datos. • CR-LVLT-01: valor configurado en fase de recirculación o adición.
<i>OFF</i>	<p>Fase desactivada, no realiza cambios en el sistema ni se ve afectada por las condiciones del proceso. Mientras la fase se encuentre en este estado, es invisible para el controlador. El operador puede mandar a llamar la fase para activarla y efectuar una transición al estado <i>READY</i>.</p>	<p>Desactivación de todos los procesos de la fase de alimentación. Es importante que la secuencia de desactivación de fase involucre apagar primero las bombas y posteriormente cerrar las válvulas para evitar un golpe de ariete o una sobrepresión en el circuito.</p>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

Es necesaria la creación de botones que serán mostrados en pantalla al momento de entrar en el estado específico.

- Botón *RESET*: aparecerá en pantalla únicamente al estar en el estado *ABORT*. Reinicia la fase.
- Botón *RESTART*: aparecerá en pantalla únicamente al estar en el estado de *HOLD*. Retorna a la secuencia de fase.
- Botón *ABORT*: activa el *interlock* PH0_FEED.Interlock.Abort. Aparecerá en pantalla en los estados *READY*, *RUN* y *HOLD*.
- Botón *OFF*: activa el *interlock* PH0_FEED.Interlock.Off. Aparecerá en la pantalla de los estados *RUN* y *ABORT*.

Los botones se generarán en la pantalla al momento de activarse el estado que los contiene.

Las condiciones de transición entre estados se ligan con las fallas del sistema las cuales son habilitadas o deshabilitadas por los valores de los *interlocks*. Ver tabla VIII.

Tabla VIII. **Condiciones de transición de estados**

Estado Actual	Posibles transiciones	Causa de Activación
<i>OFF</i>	<i>READY</i>	Activación manual de la fase por solicitud del operador.
<i>READY</i>	<i>RUN</i>	Confirmación de inicio de secuencia por parte del operador.
	<i>ABORT</i>	Activación de falla: PH0_FEED.Phase.Interlocked_ABORT
<i>RUN</i>	<i>HOLD</i>	Activación de falla: PH0_FEED.Phase.Interlocked_HOLD
	<i>ABORT</i>	Activación de falla: PH0_FEED.Phase.Interlocked_ABORT
	<i>OFF</i>	Activación de falla: PH0_FEED.Phase.Interlocked_OFF
<i>HOLD</i>	<i>RUN</i>	Activación manual de RESTART por parte del operador.
	<i>ABORT</i>	Activación de falla: PH0_FEED.Phase.Interlocked_ABORT
	<i>OFF</i>	Activación de falla: PH0_FEED.Phase.Interlocked_OFF

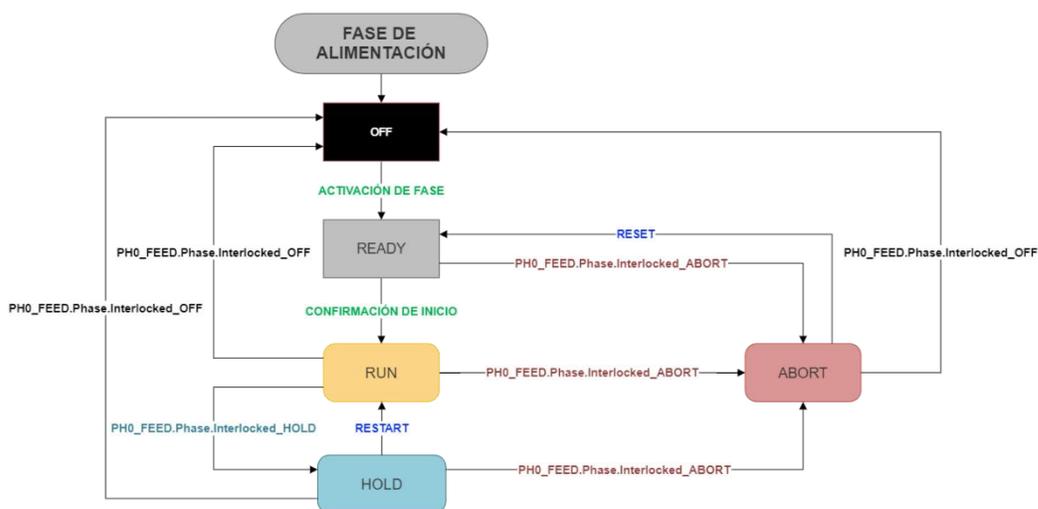
Continuación de la tabla VIII.

Estado Actual	Posibles transiciones	Causa de Activación
ABORT	READY	Activación manual de <i>RESET</i> por parte del operador.
	OFF	Activación de falla: PH0_FEED.Phase.Interlocked_OFF

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

La transición de estados de la fase de alimentación se representa en el diagrama de la figura 34. El estado *READY* es previo a la activación de la secuencia, en él se configuran las condiciones iniciales de los equipos e instrumentos. Mediante una confirmación manual para correr la fase, se realiza una transición al estado *RUN* donde se ejecuta la secuencia de fase.

Figura 34. Diagrama de transición de estados



Fuente: elaboración propia, empleando Smartdraw.

2.2.1.3. Secuencia de fase

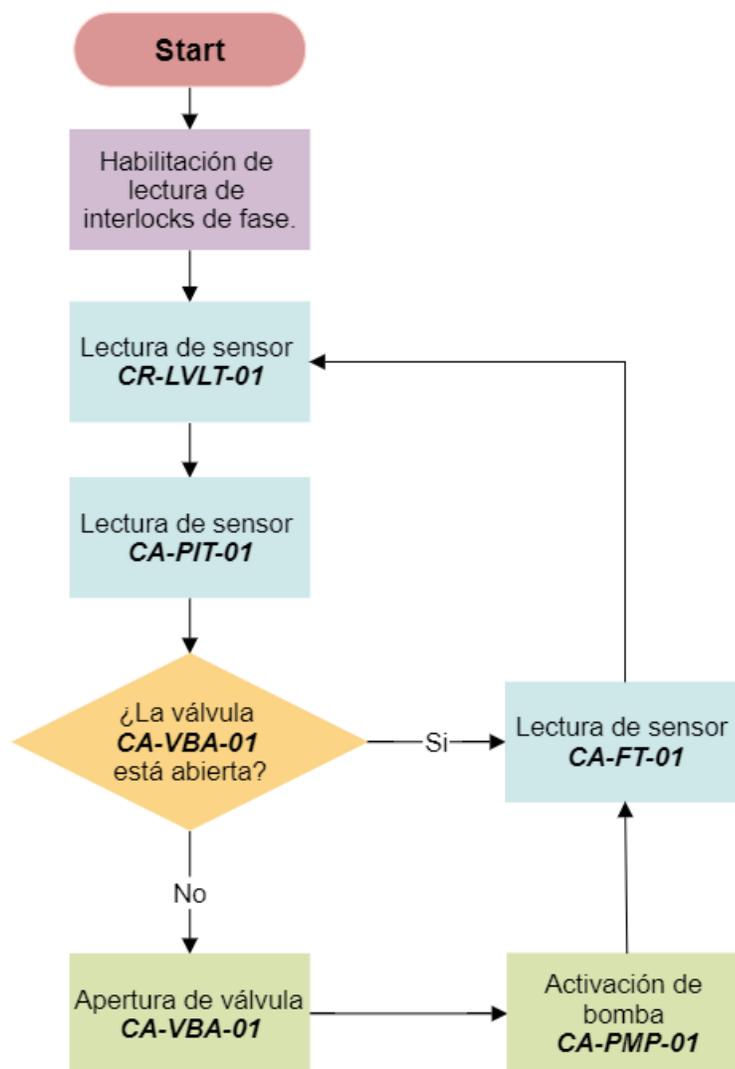
Al momento de la activación de la fase de alimentación, el comportamiento del sistema se verá reflejado siguiendo la secuencia propuesta:

- Etapa # 1: activación de lectura de *interlocks*.
- Etapa # 2 (ejecución en bucle): evaluación del nivel de material en tanque de recirculación (CR-TANK-01) por medición entregada por el sensor CR-LVLT-01.
- Etapa # 3 (ejecución en bucle): evaluación de la presión al interior de las tuberías en el circuito de alimentación. Medidas de presión entregadas por el transmisor CA-PIT-01.
- Etapa # 4: apertura automática de válvula CA-VBA-01.
- Etapa # 5: activación automática de bomba CA-PMP-01: en esta etapa el material fluirá a través de la tubería de alimentación hacia el tanque de recirculación (CR-TANK-01).
- Etapa # 6 (ejecución en bucle): revisión de flujo de material en tubería de alimentación por el sensor CA-FT-01.

Las etapas 2, 3 y 6 se ejecutan periódicamente hasta la desactivación de la fase, la frecuencia de ejecución está sujeta a la tasa de refresco del PLC. La ejecución en bucle de la toma de datos es de suma importancia debido a que los sensores toman los datos de las variables de proceso, éstas pueden cambiar de un momento a otro, por lo que es necesario captar todas las

modificaciones posibles para efectuar las acciones correspondientes a tiempo. El controlador realiza la comparación de las mediciones entregadas por los sensores para activar *interlocks* si aplica el caso. El diagrama de flujo de la secuencia de fase puede observarse en la figura 35.

Figura 35. **Secuencia de fase de alimentación**



Fuente: elaboración propia, empleando Smartdraw.

2.2.2. Fase de recirculación

La recirculación se utiliza cuando se requiere un material en constante movimiento, o cuando la línea de dosificación es muy larga. Es útil para lograr inundar completamente la tubería previa a la dosificación y evitar burbujas de aire al momento de activar la adición de materiales.

Para los sistemas sin requerimientos sanitarios, la recirculación puede ser interrumpida para realizar la dosificación.

Otra de las ventajas de mantener el material en constante recirculación se da para todos aquellos fluidos que tienen su punto de solidificación a temperatura ambiente o menor, un sistema de recirculación y un sistema de trazado de vapor en la tubería, pueden mantener en estado líquido al material.

Tabla IX. TAG ID de fase de recirculación

TAG ID
PH1_LOOP

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

2.2.2.1. Interlocks

La habilitación de lectura de los *interlocks* se realiza al momento de activar la secuencia de fase.

Los *interlocks* propuestos para la fase de recirculación se definen en la tabla X.

Tabla X. **Interlocks de la fase de recirculación**

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
PH1_LOOP.Interlock.HighTankLevel	CR-LVLT-01	<p>Similar a la fase de alimentación, el instrumento CR-LVLT-01 medirá el nivel de material en el tanque.</p> <p>El nivel máximo para la activación de este <i>interlock</i> deberá ser ligeramente superior al valor ajustado en la fase anterior. Utilizar un límite del 90% de la capacidad del tanque en esta fase y un 85% en la fase de alimentación puede ser efectivo.</p> <p>Para evitar el derrame debe tomarse en cuenta el volumen de material que se encuentra en las tuberías de recirculación. Si se sobrepasa el nivel, se solicitará al operador que drene material fuera del circuito para evitar derrames al momento de activar la recirculación.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 0, & x < 0.90 * (C_{Tank} - C_{Tub}) \\ 1, & x \geq 0.90 * (C_{Tank} - C_{Tub}) \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p>$f(x)$ = Valor del interlock en el controlador. Activado: $f(x) = 1$ Desactivado: $f(x) = 0$</p> <p>x = Nivel de material en Tanque CR - LVLT - 01. C_{Tank} = Capacidad operativa en CR - TANK - 01. C_{Tub} = Capacidad operativa en tubería de recirculación.</p>
PH1_LOOP.Interlock.LowTankLevel	CR-LVLT-01	<p>El sensor de nivel enviará al controlador la información del nivel de material en el interior del tanque, se ajustará un mínimo de material en el tanque, el suficiente para inundar completamente las tuberías de recirculación y sobrepasar el valor de la dosificación requerida.</p> <p>Si esto no se cumple, se activará el <i>interlock</i> por bajo nivel de material en tanque de recirculación.</p>

Continuación de la tabla X.

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
		<p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 1, & x \leq L_{Low} \\ 0, & x > L_{Low} \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Nivel de material en Tanque CR – LVL1 – 01. <i>L_{Low}</i> = Nivel mínimo de material permitido en tanque.</p>
PH1_LOOP.Interlock.HighPressure	CR-PIT-01	<p>Si la tubería del circuito de recirculación experimenta una sobrepresión, los valores captados por el transmisor de presión CR-PIT-01 sobrepasará el umbral máximo permitido.</p> <p>Para ello, un <i>interlock</i> debe activarse a valores superiores de presión que las tolerables en el sistema.</p> <p>Idealmente todas las válvulas manuales del circuito de recirculación deben estar abiertas, sin embargo, si se diera el caso en que una de las válvulas se encuentre cerrada, se generará sobrepresión al momento de activar la recirculación de material.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 0, & x < P_{Max} \\ 1, & x \geq P_{Max} \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Medición de presión en tubería por CR – PIT – 01. <i>P_{Max}</i> = Presión máxima permitida en tubería.</p>

Continuación de la tabla X.

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
PH1_LOOP.Interlock.LowPressure	CR-PIT-01 CR-PMP-01	<p>Se ajustará un nivel mínimo de presión en la tubería de recirculación.</p> <p>Si la bomba CR-PMP-01 se encuentra activa y la presión no sobrepasa el nivel mínimo, entonces se activará el <i>interlock</i> por baja presión de tubería.</p> <p>Esto puede suceder si al activar la bomba, la válvula manual de descarga del tanque se encuentra cerrada, debido a ello, no logrará succionar material y la presión en la tubería de recirculación no se elevará lo suficiente como para generar cambio de presión en la tubería de recirculación posterior a la bomba.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 1, & x \leq P_{Min} \\ 0, & x > P_{Min} \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Medición de presión en tubería por CR – PIT – 01. <i>P_{Min}</i> = Presión mínima para detectar bombeo en tubería.</p>
PH1_LOOP.Interlock.Wait	Todos los aplicables	<p>Si el sistema se encuentra detenido o en espera por un tiempo lo suficientemente largo, se activará el <i>interlock</i> de espera.</p> <p>Si existe alguna latencia en la respuesta del sistema o si alguna de las etapas de la fase entra en conflicto con el resto de la secuencia, el sistema podría detenerse durante un tiempo y activará el <i>interlock</i>.</p>
PH1_LOOP.Interlock.Abort	Todos los aplicables	<p>Si el operador activa manualmente el botón para abortar la fase, se activará el <i>interlock</i> de aborto de fase.</p>

Continuación de la tabla X.

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
PH1_LOOP.Interlock.NoConnection	Todos los aplicables	Si el controlador detecta falta de conexión con alguno de los dispositivos de la fase, se activará el <i>interlock</i> por falta de conexión.
PH1_LOOP.Interlock.Confirmation01	CR-VBA-01	Si se solicita la apertura o cierre de la válvula y no se recibe una confirmación con el mismo estado, se activará el <i>interlock</i> por falta de confirmación de válvula.
PH1_LOOP.Interlock.Confirmation02	CR-VBA-02	Si se solicita la apertura o cierre de la válvula y no se recibe una confirmación con el mismo estado, se activará el <i>interlock</i> por falta de confirmación de válvula.
PH1_LOOP.Interlock.Confirmation03	CD-VBA-01	Si se solicita la apertura o cierre de la válvula de dosificación CD-VBA-01 y no se recibe una confirmación con el mismo estado, se activará el <i>interlock</i> por falta de confirmación de válvula.
PH1_LOOP.Interlock.EmergencyStop	Todos los aplicables	Si el operador presiona manualmente el paro de emergencia del circuito, se activará el <i>interlock</i> .
PH1_LOOP.Interlock.DosingPhase	Detección de Fase	Si se llamó a la fase de adición o ya se encuentra habilitada, se activará el <i>interlock</i> por fase de adición. La fase de recirculación no podrá correr si se necesita realizar una dosificación, esto se plantea para que las condiciones del proceso sean reguladas completamente por la fase de adición y no exista conflicto en los valores configurados para los equipos que ambas fases utilizan, por ejemplo, la bomba de recirculación CR-PMP-01, la cual bombea material para recirculación y para dosificación. La activación de este <i>interlock</i> involucra un apagado inmediato de la fase de recirculación, ya que interfiere con la ejecución de la fase de adición y en las condiciones generadas para la dosificación de material.
PH1_LOOP.Interlock.Off	Todos los aplicables	Se activa el <i>interlock</i> si el operador presiona el botón de desactivación de fase.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

La activación de cualquiera de los *interlocks* hace que el sistema entre en falla, existen tres tipos de falla para la fase de recirculación. Ver tabla XI.

Tabla XI. **Fallas de sistema en fase de recirculación**

TAG ID de Falla	<i>Interlocks</i> que generan la activación
PH1_LOOP.Phase.Interlocked_ABORT	<ol style="list-style-type: none"> 1. PH1_LOOP.Interlock.Abort 2. PH1_LOOP.Interlock.HighTankLevel 3. PH1_LOOP.Interlock.LowTankLevel 4. PH1_LOOP.Interlock.Wait 5. PH1_LOOP.Interlock.HighPressure 6. PH1_LOOP.Interlock.LowPressure 7. PH1_LOOP.Interlock.Confirmation03
PH1_LOOP.Phase.Interlocked_HOLD	<ol style="list-style-type: none"> 1. PH1_LOOP.Interlock.NoConnection 2. PH1_LOOP.Interlock.Confirmation01 3. PH1_LOOP.Interlock.Confirmation02 4. PH1_LOOP.Interlock.EmergencyStop
PH1_FEED.Phase.Interlocked_OFF	<ol style="list-style-type: none"> 1. PH1_LOOP.Interlock.DosingPhase 2. PH1_LOOP.Interlock.Off

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

La falla PH1_LOOP.Phase.Interlocked_OFF es superior en jerarquía y ejecutará su transición, sin importar que existan otras fallas al mismo tiempo. La segunda en jerarquía de ejecución es la falla PH1_LOOP.Phase.Interlocked_ABORT.

2.2.2.2. Estados y transiciones

Los estados existentes para la fase de recirculación con sus respectivas acciones a efectuar al momento de su transición se observan en la tabla XII.

Tabla XII. **Estados de la fase de recirculación**

Estado	Descripción	Acción efectuada
<p style="text-align: center;"><i>READY</i></p>	<p>El sistema se encuentra listo para la activación de la fase.</p> <p>Este estado representa las condiciones iniciales de la fase y configura los equipos en modo de preparación. Las válvulas y la bomba tomarán el valor que les configure la fase de adición si esta se encuentra activa, en caso contrario se encontrarán cerradas y apagada la bomba.</p> <p>Lectura de <i>Interlocks</i>: parcialmente habilitada. (Presión, nivel, fase de adición).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • CD-VBA-01: cerrada. • CR-VBA-01: valor de fase de adición o cerrada. • CR-PMP-01: valor de fase de adición o apagada. • CR-VBA-02: valor de fase de adición o cerrada. • CR-PIT-01: activo, tomando datos. • CR-LVLT-01: activo, tomando datos. • Sistemas de control de regulación de presión: desactivados.
<p style="text-align: center;"><i>RUN</i></p>	<p>La fase se encuentra en ejecución y seguirá la secuencia de fase programada.</p> <p>Lectura de <i>Interlocks</i>: habilitada totalmente.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • CD-VBA-01: cerrada. • CR-VBA-01: abierta. • CR-PMP-01: encendida. • CR-VBA-02: abierta. • CR-PIT-01: activo, tomando datos. • CR-LVLT-01: activo, tomando datos. • Sistema de control de regulación de presión 01: activado. • Sistema de control de regulación de presión 02: activado. • Algoritmo lógico de intercalación de sistemas de control de presión: activado.

Continuación de la tabla XII.

Estado	Descripción	Acción efectuada
<i>HOLD</i>	<p>La fase estará en espera ocasionada por la activación de una falla, la reactivación es manual y prosigue con la última etapa de la secuencia de fase que ejecutó.</p> <p>En este estado, la fase puede continuar su secuencia si el operador logra corregir los errores captados en los <i>interlocks</i> activos.</p> <p>Lectura de <i>Interlocks</i>: parcialmente activada. (Presión, nivel, abort, fase de adición).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • CR-VBA-01: abierta. • CR-PMP-01: apagada. • CR-VBA-02: abierta. • CR-PIT-01: activo, tomando datos. • CR-LVLT-01: activo, tomando datos. • Sistemas de control de regulación de presión: desactivados para fase de recirculación.
<i>ABORT</i>	<p>Se aborta la fase por activación de una falla. El sistema es incapaz de finalizar la secuencia de fase por la activación de un <i>interlock</i> crítico. Después de realizar las correcciones en los equipos, es necesario reiniciar todo el proceso y la secuencia comenzará desde cero. Las válvulas y la bomba tomarán el valor que les configure la fase de adición si esta se encuentra activa, en caso contrario se encontrarán cerradas y apagada la bomba.</p> <p>Lectura de <i>Interlocks</i>: desactivada.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • CR-VBA-01: valor de fase de adición o cerrada. • CR-PMP-01: apagada. • CR-VBA-02: valor de fase de adición o cerrada. • CR-PIT-01: activo, tomando datos. • CR-LVLT-01: activo, tomando datos. • Sistemas de control de regulación de presión: desactivados para fase de recirculación.
<i>OFF</i>	<p>Fase desactivada, no realiza cambios en el sistema ni se ve afectada por las condiciones del proceso. Mientras la fase se encuentre en este estado, es invisible para el controlador. El operador puede mandar a llamar la fase para activarla y efectuar una transición al estado <i>READY</i>.</p>	<p>Desactivación de todos los controles y procesos de la fase de recirculación. Si la fase de adición está en proceso de ejecución, mantiene prioridad de ejecución y realiza las configuraciones a los equipos del circuito de recirculación.</p>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

La activación de la fase de adición se sobrepone a la fase de recirculación por la existencia del *interlock PH1_LOOP.Interlock.DosingPhase*, esto obliga a que la fase de recirculación se detenga y pase temporalmente a un estado apagado mientras se ejecuta la fase de adición.

Cualquier estado del sistema de recirculación fuera del *RUN* y *HOLD* debe tomar los valores de los elementos finales de control dados por la fase de adición, si está activa, para no causar un conflicto entre fases al momento de dosificar.

Es necesaria la creación de botones que serán mostrados en pantalla al momento de entrar en el estado específico.

- Botón *RESET*: aparecerá en pantalla únicamente al estar en el estado de *ABORT*. Reinicia la fase.
- Botón *RESTART*: aparecerá en pantalla únicamente al estar en el estado de *HOLD*. Retorna a la secuencia de fase en la última etapa ejecutada.
- Botón *ABORT*: activa el interlock *PH1_LOOP.Interlock.Abort*. Aparecerá en pantalla en los estados *RUN* y *HOLD*.
- Botón *OFF*: activa el interlock *PH1_LOOP.Interlock.Off*. Aparecerá en la pantalla de los estados *RUN* y *ABORT*.

Los botones se generarán en la pantalla al momento de la activación del estado que los contiene.

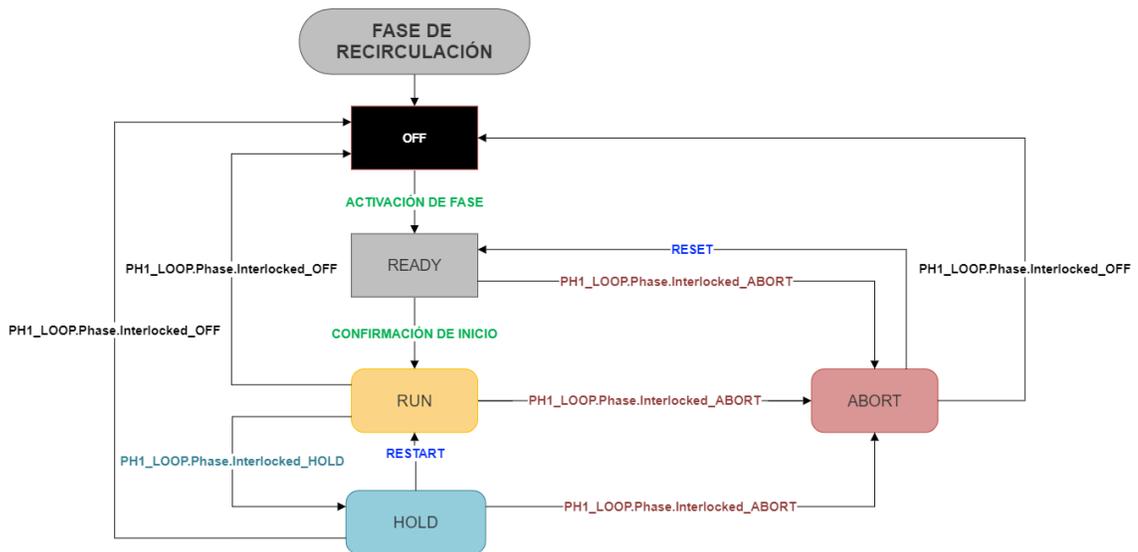
Las condiciones de transición entre estados se ligan al valor de las fallas de sistema y a la activación de botones. Ver tabla XIII.

Tabla XIII. **Condiciones de transición de estados**

Estado Actual	Posibles transiciones	Causa de Activación
<i>OFF</i>	<i>READY</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Activación manual de la fase. 2. Solicitud de activación por la fase de adición.
<i>READY</i>	<i>RUN</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Confirmación de inicio de secuencia. 2. Confirmación realizada por la fase de adición.
	<i>ABORT</i>	Activación de falla: <i>PH1_LOOP.Phase.Interlocked_ABORT</i>
<i>RUN</i>	<i>HOLD</i>	Activación de falla: <i>PH1_LOOP.Phase.Interlocked_HOLD</i>
	<i>ABORT</i>	Activación de falla: <i>PH1_LOOP.Phase.Interlocked_ABORT</i>
	<i>OFF</i>	Activación de falla: <i>PH1_LOOP.Phase.Interlocked_OFF</i>
<i>HOLD</i>	<i>RUN</i>	Activación manual de <i>RESTART</i> por parte del operador.
	<i>ABORT</i>	Activación de falla: <i>PH1_LOOP.Phase.Interlocked_ABORT</i>
	<i>OFF</i>	Activación de falla: <i>PH1_LOOP.Phase.Interlocked_OFF</i>
<i>ABORT</i>	<i>READY</i>	Activación manual de <i>RESET</i> por parte del operador.
	<i>OFF</i>	Activación de falla: <i>PH1_LOOP.Phase.Interlocked_OFF</i>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

Figura 36. Diagrama de transición de estados



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

2.2.2.3. Secuencia de fase

Al momento de la activación de la fase de recirculación, el comportamiento del sistema se verá reflejado siguiendo la secuencia propuesta:

- Etapa # 1: activación de lectura de *interlocks*.
- Etapa # 2 (ejecución en bucle): evaluación del nivel de material en tanque de recirculación (CR-TANK-01) por medición entregada por el sensor CR-LVLT-01.

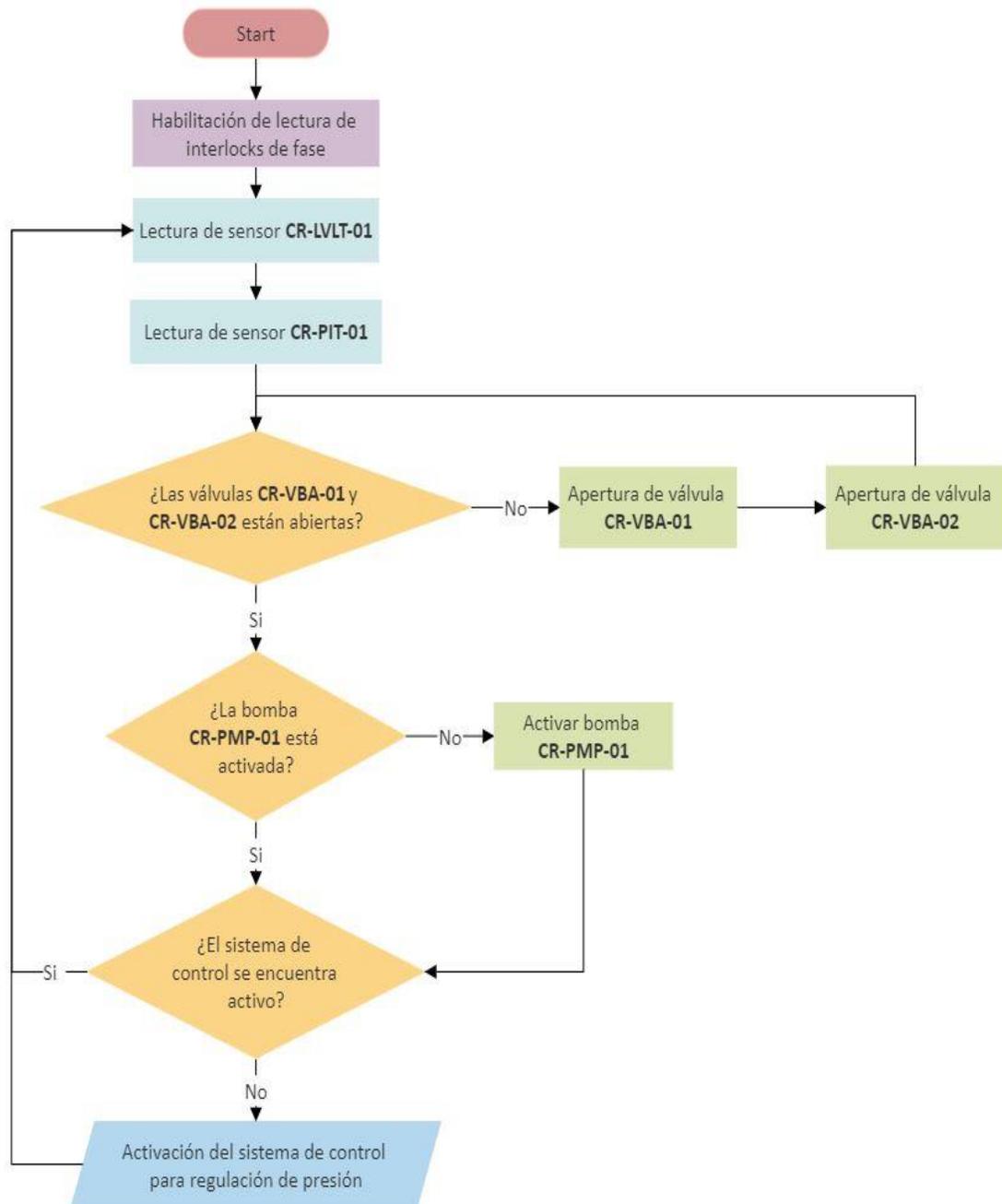
- Etapa # 3 (ejecución en bucle): evaluación de la presión al interior de las tuberías en el circuito de recirculación. Medidas de presión entregadas por el transmisor CR-PIT-01.
- Etapa # 4: apertura de válvula de descarga CR-VBA-01.
- Etapa # 5: apertura de válvula de control de retorno al tanque de recirculación CA-VBA-02.
- Etapa # 6: espera de un par de segundos después de activación de la válvula de control. Activación de bomba de recirculación CA-PMP-01.
- Etapa # 7: activación de sistemas de control para regulación de presión y del algoritmo de intercalación de sistemas.

La ejecución periódica se dará en las etapas 2 y 3 para la toma de datos de los sensores de nivel y presión. Estas mediciones alimentan la base del controlador, el cual realiza las comparaciones especificadas en los *interlocks* para determinar la activación o desactivación de estos.

La secuencia de fase puede verse interrumpida en cualquier momento por la activación de un *interlock* ya que conlleva a la activación de una fase y esto a la transición de estado. El sistema de control para regulación de presión modificando la velocidad de la bomba CA-PMP-01 se activará en la etapa 7, este sistema se desarrollará posteriormente en este capítulo.

El diagrama de flujo de la secuencia de fase puede observarse en la figura 37.

Figura 37. **Secuencia de fase de recirculación**



Fuente: elaboración propia, empleando Smartdraw.

2.2.3. Fase de adición con recirculación interrumpida

La fase de adición de material es la de mayor criticidad en el sistema de dosificación, en ella se realiza la activación, configuraciones y secuencia para dosificar material desde el circuito de recirculación hasta el tanque de proceso.

En la jerarquía de ejecución de fases, toma el puesto de mayor prioridad. Tanto en la fase de alimentación como en la fase de recirculación se cuenta con un *interlock* dedicado a la revisión de la habilitación o ejecución en proceso de la fase de adición, si la dosificación es solicitada por el operador o se encuentra en proceso, tanto la fase de recirculación como la fase de alimentación sufren de una transición al estado de *OFF*.

Para la fase de recirculación en el estado *OFF* todos los dispositivos compartidos con la fase de adición tomarán los ajustes e instrucciones configuradas por la fase de adición. Esto quiere decir que la fase de adición, además de ser la de mayor prioridad en ejecución, también es la de mayor prioridad sobre el control de dispositivos.

Se propone la lógica de proceso para la fase de adición considerando una recirculación interrumpida para un proceso de dosificación sin requerimientos sanitarios. Como puede observarse en los diagramas de tuberías e instrumentación, el circuito de dosificación estará siempre lleno de material al momento de iniciar una dosificación, al tener la tubería inundada, la cantidad de material que se encuentre en la tubería de dosificación antes de iniciar la fase de adición debe ser considerada en los cálculos de material dosificado. Antes de iniciar la fase de adición, es recomendable que la fase de recirculación se encuentre activa para asegurar material en las tuberías.

Tabla XIV. TAG ID de fase de adición

TAG ID
PH2_ADD

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

2.2.3.1. Interlocks

La habilitación de lectura de los *interlocks* se realiza al momento de activar la secuencia de fase, antes de iniciar con los ajustes de los dispositivos. Los *interlocks* propuestos para la fase de adición se definen en la tabla XV.

Tabla XV. Interlocks de la fase de adición

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
PH2_ADD.Interlock.LowTankLevel	CR-LVLT-01	<p>El sensor de nivel enviará al controlador la información del nivel de material en el interior del tanque, se ajustará un mínimo de material en el tanque, el suficiente para inundar completamente las tuberías de recirculación y sobrepasar el valor de la dosificación requerida. Si esto no se cumple, se activará el <i>interlock</i> por bajo nivel de material en tanque de recirculación.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 1, & x \leq L_{Low} \\ 0, & x > L_{Low} \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Nivel de material en Tanque CR – LVLT – 01. <i>L_{Low}</i> = Nivel mínimo de material permitido en tanque.</p>

Continuación de la tabla XV.

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
PH2_ADD.Interlock.FlowDrift	CD-FIT-01 CD-FIT-02	<p>La cantidad de material dosificado en el tanque de proceso se calcula con los datos obtenidos del flujómetro primario CD-FIT-01, sin embargo, existe una comparación constante de medición con el flujómetro secundario CD-FIT-02 para confirmar la exactitud de los datos. Para que los flujómetros entreguen un flujo similar en un lapso específico, deben ser instalados en serie y lo más cercanos posibles. Con una variación muy grande entre los datos de ambos flujómetros, es posible que alguno de los dos tenga un fallo y no se puede garantizar la conformidad de la dosificación. Si esto sucede, se activará el <i>interlock</i> por desviación de datos entre flujómetros. Ambos flujómetros se encuentran en serie y con distintas condiciones físicas, por lo que, el flujo medido puede variar en ciertos puntos de la secuencia de adición, sin embargo, esto no significa que exista un fallo de medición de alguno de los dos instrumentos. La correcta selección de la tolerancia de desviación entre flujómetros evita activaciones innecesarias del <i>interlock</i> puede realizarse la verificación del <i>interlock</i> únicamente al inicio de la fase de adición, asegurando ambos flujómetros en cero.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 0, & (F_2 - T) \leq x \leq (F_2 + T) \\ 1, & (F_2 + T) \leq x \\ 1, & (F_2 - T) \geq x \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Valor de flujo medido por CD - FIT - 01. <i>F₂</i> = Valor de flujo medido por CD - FIT - 02. <i>T</i> = Tolerancia de desviación entre flujómetros.</p>

Continuación de la tabla XV.

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
PH2_ADD.Interlock.HighPreact	CD-VBA-01	<p>Si se solicita una dosificación menor al valor del preactuado, configurado en la válvula de dosificación, se activará el <i>interlock</i> por preactuado alto. Un valor muy bajo para el <i>target</i> de dosificación, comparado con el ajuste de preactuado de válvula, es imposible para el sistema de lograr, ya que la instalación física no es la adecuada.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 1, & x \leq V_{Preact} \\ 0, & x > V_{Preact} \end{cases}$ <p>Donde: <i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = <i>Target</i> de dosificación solicitado. <i>V_{Preact}</i> = Valor de preactuado configurado.</p>
PH2_ADD.Interlock.LowAddition	CD-FIT-01	<p>Después de dosificar, se realiza una comparación entre la cantidad de material dosificado y el <i>target</i> de dosificación. Si la dosificación real tiene un valor menor al solicitado, se activará el <i>interlock</i> por baja adición. Se ajusta una tolerancia permitida para la dosificación. La selección de la tolerancia se ve ligada al proceso industrial y al rango de dosificación en la receta.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 1, & x < D - T \\ 0, & x \geq D - T \end{cases}$ <p>Donde: <i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Material dosificado medido por CD - FIT - 01. <i>D</i> = <i>Target</i> de Dosificación solicitada por el operador. <i>T</i> = Tolerancia de dosificación permitida.</p>

Continuación de la tabla XV.

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
PH2_ADD.Interlock.HighAddition	CD-FIT-01	<p>Después de dosificar, se realiza una comparación entre la cantidad de material dosificado y el <i>target</i> de dosificación. Si la dosificación real tiene un valor mayor al solicitado, se activará el <i>interlock</i> por alta adición. Se ajusta una tolerancia permitida para la dosificación. La selección de la tolerancia se ve ligada al proceso industrial y al rango de dosificación en la receta.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 0, & x < D + T \\ 1, & x \geq D + T \end{cases}$ <p>Donde: <i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Material dosificado medido por CD – FIT – 01. <i>D</i> = Target de Dosificación solicitada por el operador. <i>T</i> = Tolerancia de dosificación permitida.</p>
PH2_ADD.Interlock.HighPressure	CR-PIT-01	<p>Si la tubería experimenta una sobrepresión, los valores captados por el transmisor de presión CR-PIT-01 sobrepasarán el umbral máximo permitido. Para ello, un <i>interlock</i> debe activarse a valores superiores de presión que las tolerables en el sistema. Si una de las válvulas manuales previas a la derivación de dosificación se encuentra cerrada, se generará sobrepresión al activar la recirculación de material.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 0, & x < P_{Max} \\ 1, & x \geq P_{Max} \end{cases}$ <p>Donde: <i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Medición de presión en tubería por CR – PIT – 01. <i>P_{Max}</i> = Presión máxima permitida en tubería.</p>

Continuación de la tabla XV.

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
PH2_ADD. <i>Interlock.LowPressure</i>	CR-PIT-01	<p>Se ajustará un nivel mínimo de presión en la tubería de recirculación previo a la derivación de dosificación.</p> <p>Si la bomba CR-PMP-01 se encuentra activa y la presión no sobrepasa el nivel mínimo, se activará el <i>interlock</i> por baja presión de tubería. Si al activar la bomba, la válvula CR-VBM-01 se encuentra cerrada, la presión en la tubería de recirculación no se elevará lo suficiente.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 1, & x \leq P_{Min} \\ 0, & x > P_{Min} \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Medición de presión en tubería por CR – PIT – 01. <i>P_{Min}</i> = Presión mínima para detectar bombeo en tubería.</p>
PH2_ADD. <i>Interlock.LowFlow</i>	CD-FIT-01	<p>Al momento de la dosificación el flujo debe ser continuo y estable, los sistemas de control regularán la presión y la selección de la bomba permitirá un flujo continuo a través de la tubería.</p> <p>Si el sistema no detecta flujo en un periodo de tiempo después de haber activado la fase de adición, se activará el <i>interlock</i> por bajo flujo. Una de las razones por las cuales podría suceder este evento es cuando se cierra manualmente la válvula CD-VBM-01 y se llama a la fase de adición, el material no logrará fluir a través de la tubería de dosificación y el flujómetro no detectará variaciones.</p>

Continuación de la tabla XV.

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
		<p>Debido a que no ha iniciado la dosificación del producto en este punto, este tipo de <i>interlocks</i> no generan un ABORT de la fase.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 1, & x < F_{Min} \\ 0, & x \geq F_{Min} \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Medición de flujo en tubería por CD – FIT – 01. <i>F_{Min}</i> = Flujo mínimo.</p>
PH2_ADD.Interlock Confirmation01	CD-VBA-01	<p>Si se solicita la apertura o cierre de la válvula de dosificación CD-VBA-01 y no se recibe una confirmación con el mismo estado, se activará el <i>interlock</i> por falta de confirmación de válvula.</p>
PH2_ADD.Interlock Confirmation02	CR-VBA-01	<p>Si se solicita la apertura o cierre de la válvula CR-VBA-01 y no se recibe una confirmación con el mismo estado, se activará el <i>interlock</i> por falta de confirmación de válvula.</p>
PH2_ADD.Interlock Confirmation03	CR-VBA-02	<p>Si se solicita la apertura o cierre de la válvula de retorno a tanque de recirculación CR-VBA-02 y no se recibe una confirmación con el mismo estado, se activará el <i>interlock</i> por falta de confirmación de válvula.</p>

Continuación tabla XV.

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
PH2_ADD.Interlock.Wait	Todos los aplicables	Si el sistema se encuentra detenido o en espera por un tiempo lo suficientemente largo, se activará el <i>interlock</i> de espera. Si existe alguna latencia en la respuesta del sistema o si alguna de las etapas de la fase entra en conflicto con el resto de la secuencia, el sistema podría detenerse durante un tiempo y activará el <i>interlock</i> .
PH2_ADD.Interlock.NoConnection	Todos los aplicables	Si el controlador detecta falta de conexión con alguno de los dispositivos de la fase, se activará el <i>interlock</i> por falta de conexión.
PH2_ADD.Interlock.EmergencyStop	Todos los aplicables	Si el operador presiona manualmente el paro de emergencia del circuito, se activará el <i>interlock</i> .
PH2_ADD.Interlock.Abort	Todos los aplicables	Si el operador activa manualmente el botón para abortar la fase, se activará el <i>interlock</i> de aborto de fase.
PH2_ADD.Interlock.Off	Todos los aplicables	Se activa el <i>interlock</i> si el operador presiona el botón de desactivación de fase.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

Los *interlocks* que generan una falla PH2_ADD.Phase.Interlocked_HOLD solo pueden ser activados antes de la dosificación o posterior a ella ya que reanudar una dosificación interrumpida provocará errores de medición.

En la tabla XVI se muestran las fallas de sistema y los *interlocks* que las generan.

Tabla XVI. **Fallas de sistema en fase de adición**

TAG ID de Falla	Interlocks que generan la activación
<i>PH2_ADD.Phase.Interlocked_HOLD</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>PH2_ADD.Interlock.LowAddition</i> 2. <i>PH2_ADD.Interlock.HighAddition</i> 3. <i>PH2_ADD.Interlock.LowFlow</i> 4. <i>PH2_ADD.Interlock.NoConnection</i> 5. <i>PH2_ADD.Interlock.Confirmation01</i> 6. <i>PH2_ADD.Interlock.Confirmation03</i>
<i>PH2_ADD.Phase.Interlocked_ABORT</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>PH2_ADD.Interlock.Confirmation02</i> 2. <i>PH2_ADD.Interlock.FlowDrift</i> 3. <i>PH2_ADD.Interlock.LowTankLevel</i> 4. <i>PH2_ADD.Interlock.HighPreact</i> 5. <i>PH2_ADD.Interlock.HighPressure</i> 6. <i>PH2_ADD.Interlock.Wait</i> 7. <i>PH2_ADD.Interlock.EmergencyStop</i> 8. <i>PH2_ADD.Interlock.LowPressure</i> 9. <i>PH2_ADD.Interlock.Abort</i>
<i>PH2_ADD.Phase.Interlocked_OFF</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>PH2_ADD.Interlock.Off</i>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

La falla *PH2_ADD.Phase.Interlocked_ABORT* es superior en jerarquía y ejecutará la transición al estado *ABORT*, sin importar que existan otras fallas al mismo tiempo. Los *interlocks* que activan la falla de aborto de fase son críticos y representan peligro para los operadores, los equipos y el proceso de dosificación.

2.2.3.2. Estados y transiciones

Los estados existentes para la fase de adición con sus respectivas acciones a efectuar al momento de su transición se observan en la tabla XVII.

Tabla XVII. Estados de la fase de adición

Estado	Descripción	Acción efectuada
READY	<p>El sistema se encuentra listo para la activación de la secuencia de fase. Configura los equipos para tener un comportamiento similar a la fase de recirculación.</p> <p>Lectura de <i>Interlocks</i>: parcialmente activada.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>FlowDrift</i> • <i>LowTankLevel</i> • <i>HighPressure</i> • <i>LowPressure</i> • <i>Abort</i> <p>El sistema enciende la señal encargada de activar el <i>interlock.DosingPhase</i> en las fases de recirculación y alimentación.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • CR-VBA-01: abierta. • CR-PMP-01: encendida. • CR-VBA-02: abierta • CR-PIT-01: activo, tomando datos. • CR-LVLT-01: activo, tomando datos. • CD-VBA-01: cerrada. • CD-FIT-01: activo, tomando datos. • CD-FIT-02: activo, tomando datos. • Sistemas de control de fase: únicamente activada la regulación de presión.
RUN	<p>La fase se encuentra en ejecución y seguirá la secuencia de fase programada.</p> <p>Lectura de <i>Interlocks</i>: habilitada totalmente.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • CR-VBA-01: abierta. • CR-PMP-01: encendida. • CR-VBA-02: cerrada. • CR-PIT-01: activo, tomando datos. • CR-LVLT-01: activo, tomando datos. • CD-VBA-01: abierta. • CD-FIT-01: activo, tomando datos. • CD-FIT-02: activo, tomando datos. • Sistemas de control de fase: regulación de presión y apertura de válvula de dosificación activos.

Continuación de la tabla XVII.

Estado	Descripción	Acción efectuada
<p><i>DONE</i></p>	<p>Es un estado de finalización de la secuencia de fase. Indica al operador los datos finales de la dosificación si la secuencia finalizó correctamente.</p> <p>Lectura de <i>Interlocks</i>: parcialmente activada.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Off 	<p>Mostrar en pantalla los datos de la dosificación realizada. No causa ningún cambio en los equipos, ya que todos se configurarán en el estado de <i>RUN</i> para retornar a los valores requeridos al finalizar la secuencia de fase. El estado <i>DONE</i> representa una dosificación dentro de especificación y una correcta ejecución de la secuencia de fase.</p>
<p><i>HOLD</i></p>	<p>La fase estará en espera ocasionada por la activación de una falla, la reactivación es manual y prosigue con la última etapa de la secuencia de fase que ejecutó. Este estado solo puede ser activado si no se ha iniciado la etapa de adición de material o si ya finalizó.</p> <p>Lectura de <i>Interlocks</i>: parcialmente activada.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>FlowDrift</i> • <i>LowTankLevel</i> • <i>HighPressure</i> • <i>EmergencyStop</i> • Abort 	<ul style="list-style-type: none"> • CR-VBA-01: abierta. • CR-PMP-01: apagada. • CR-VBA-02: cerrada. • CR-PIT-01: activo, tomando datos. • CR-LVLT-01: activo, tomando datos. • CD-VBA-01: cerrada. • CD-FIT-01: activo, tomando datos. • CD-FIT-02: activo, tomando datos. • Sistemas de control de fase: todos desactivados.
<p><i>ABORT</i></p>	<p>Se aborta la fase por activación de una falla. El sistema es incapaz de finalizar la secuencia de fase por la activación de un <i>interlock</i> crítico. Después de realizar las correcciones en los equipos, es necesario reiniciar todo el proceso y la secuencia comenzará desde cero. Las válvulas y la bomba tomarán el valor que les configure la fase de adición si esta se encuentra activa, en caso contrario se encontrarán cerradas y apagada la bomba.</p> <p>Lectura de <i>Interlocks</i>: parcialmente activada.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Off 	<ul style="list-style-type: none"> • CR-VBA-01: abierta. • CR-PMP-01: apagada. • CR-VBA-02: abierta. • CR-PIT-01: activo, tomando datos. • CR-LVLT-01: activo, tomando datos. • CD-VBA-01: cerrada. • CD-FIT-01: desactivado. • CD-FIT-02: desactivado. • Sistemas de control de fase: todos desactivados.

Continuación de la tabla XVII.

Estado	Descripción	Acción efectuada
OFF	Fase desactivada, no realiza cambios en el sistema ni se ve afectada por las condiciones del proceso. Mientras la fase se encuentre en este estado, es invisible para el controlador. El operador puede mandar a llamar la fase nuevamente para activarla y efectuar una transición al estado <i>READY</i> .	<p>Apaga la señal encargada de activar el <i>interlock.DosingPhase</i> en las fases de recirculación y alimentación.</p> <p>No efectúa cambios adicionales en el sistema ni en la configuración de los equipos.</p>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

Es necesaria la creación de botones que serán mostrados en pantalla al momento de entrar en el estado específico.

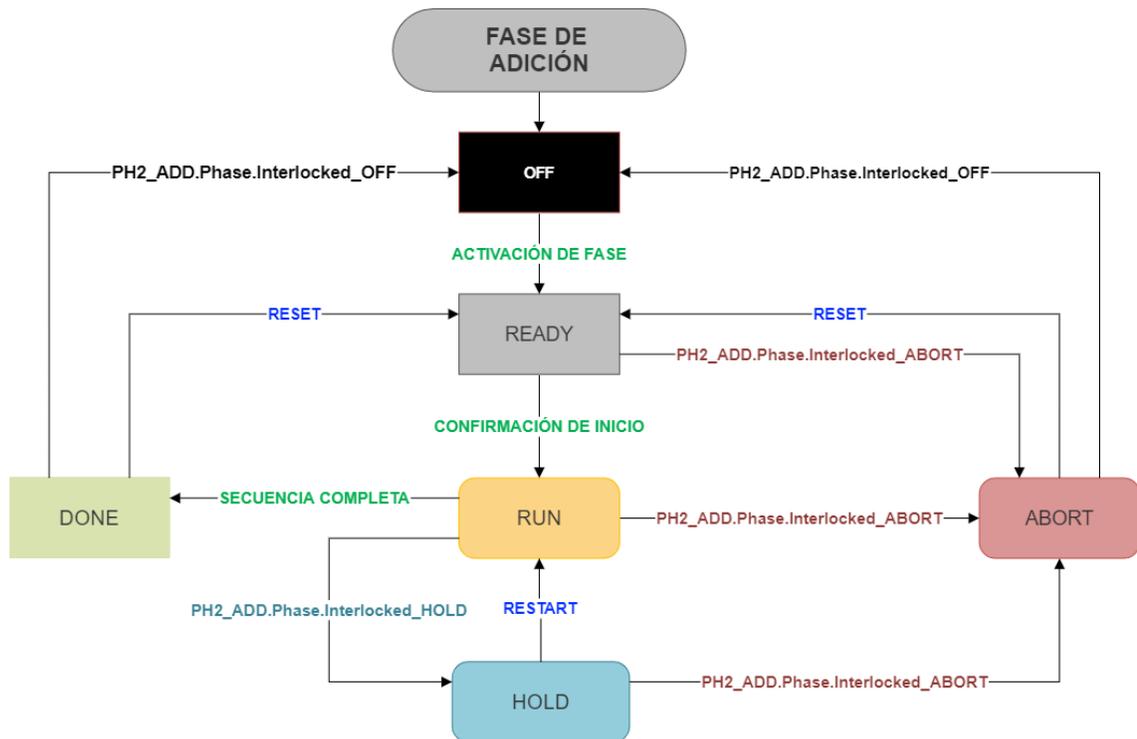
- Botón *RESET*: aparecerá en pantalla únicamente al estar en los estados *ABORT* y *DONE*. Reinicia la fase.
- Botón *RESTART*: aparecerá en pantalla únicamente al estar en el estado de *HOLD*. Retorna a la secuencia de fase.
- Botón *ABORT*: activa el *interlock PH2_ADD.Interlock.Abort*. Aparecerá en pantalla en los estados *RUN* y *HOLD*.
- Botón *OFF*: activa el *interlock PH2_ADD.Interlock.Off*. Aparecerá en la pantalla de los estados *ABORT* y *DONE*.

Tabla XVIII. **Condiciones de transición de estados**

Estado Actual	Posibles transiciones	Causa de Activación
<i>OFF</i>	<i>READY</i>	Activación manual de la fase solicitada por el operador.
<i>READY</i>	<i>RUN</i>	Confirmación de inicio de secuencia por parte del operador.
	<i>ABORT</i>	Activación de falla: <i>PH2_ADD.Phase.Interlocked_ABORT</i> .
<i>RUN</i>	<i>DONE</i>	Transición automática al completar la secuencia de fase.
	<i>HOLD</i>	Activación de falla: <i>PH2_ADD.Phase.Interlocked_HOLD</i> .
	<i>ABORT</i>	Activación de falla: <i>PH2_ADD.Phase.Interlocked_ABORT</i> .
<i>DONE</i>	<i>READY</i>	Activación manual de <i>RESET</i> por parte del operador.
	<i>OFF</i>	Activación de falla: <i>PH2_ADD.Phase.Interlocked_OFF</i> .
<i>HOLD</i>	<i>RUN</i>	Activación manual de <i>RESTART</i> por parte del operador.
	<i>ABORT</i>	Activación de falla: <i>PH2_ADD.Phase.Interlocked_ABORT</i> .
<i>ABORT</i>	<i>READY</i>	Activación manual de <i>RESET</i> por parte del operador.
	<i>OFF</i>	Activación de falla: <i>PH2_ADD.Phase.Interlocked_OFF</i> .

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

Figura 38. Diagrama de transición de estados



Fuente: elaboración propia, empleando Smartdraw.

2.2.3.3. Secuencia de fase

Al momento de la activación de la fase de adición, el controlador ejecutará la secuencia propuesta:

- Etapa # 1: desactivación de bomba de recirculación CR-PMP-01.
- Etapa # 2: solicitud al operador de la cantidad de material a dosificar.

- Etapa # 3: activación de lectura de *interlocks* de fase.
- Etapa # 4: cierre de válvula de retorno CR-VBA-02.
- Etapa # 5: verificación previa de *interlocks* iniciales.
 - *HighPreact*
 - *FlowDrift*
 - *LowTankLevel*
 - *HighPressure*
- Etapa # 6: activación de sistema de control de regulación de presión.
- Etapa # 7: desactivación del *interlock* PH2_ADD.*Interlock.LowTankLevel*. Este *interlock* es útil para verificar que la cantidad de material en el tanque sea la suficiente para completar la dosificación solicitada. Sin embargo, al momento que se adicione material, se disminuirá la cantidad en el tanque, esto puede originar la activación del *interlock* innecesariamente. Por esta razón, se realiza la verificación antes de iniciar la dosificación y después se desactiva hasta que se solicite una nueva dosificación.
- Etapa # 8: activación del sistema de control para regulación de apertura de válvula. Este sistema abre la válvula CD-VBA-01 e inicia la dosificación en el tanque de proceso.
- Etapa # 9: activación de bomba de recirculación CR-PMP-01.

- Etapa # 10 (ejecución en bucle): verificación de recepción de la señal de finalización de dosificación. Al momento que sea recibida, se dará por terminada la dosificación de material.
- Etapa # 11: al finalizar la dosificación, el sistema de control de apertura cierra la válvula CD-VBA-01. Posteriormente, sale del ciclo de dosificación y se apertura la válvula CR-VBA-02.
- Etapa # 12: verificación de *interlocks* posteriores a la dosificación. Se compara el valor real de la dosificación con las tolerancias permitidas configuradas en los *interlocks* de baja adición y alta adición. Esto puede activar el estado *HOLD* para que el operador tome una decisión respecto a la dosificación realizada, por ejemplo, si es una baja adición, puede volver a correr la fase de adición con un *set point* de dosificación más bajo para complementar el valor faltante.
 - PH2_ADD.Interlock.LowAddition
 - PH2_ADD.Interlock.HighAddition
- Etapa # 13: desactivación de sistemas de control.
- Etapa # 14: desactivación de bomba CR-PMP-01. La bomba se desactivará para que la fase de recirculación la controle.
- Etapa # 15: desactivación de la señal encargada de activar el *interlock.DosingPhase* en las fases de recirculación y alimentación. Esto para poder mandar a llamar a la fase de recirculación posterior a la dosificación de material.

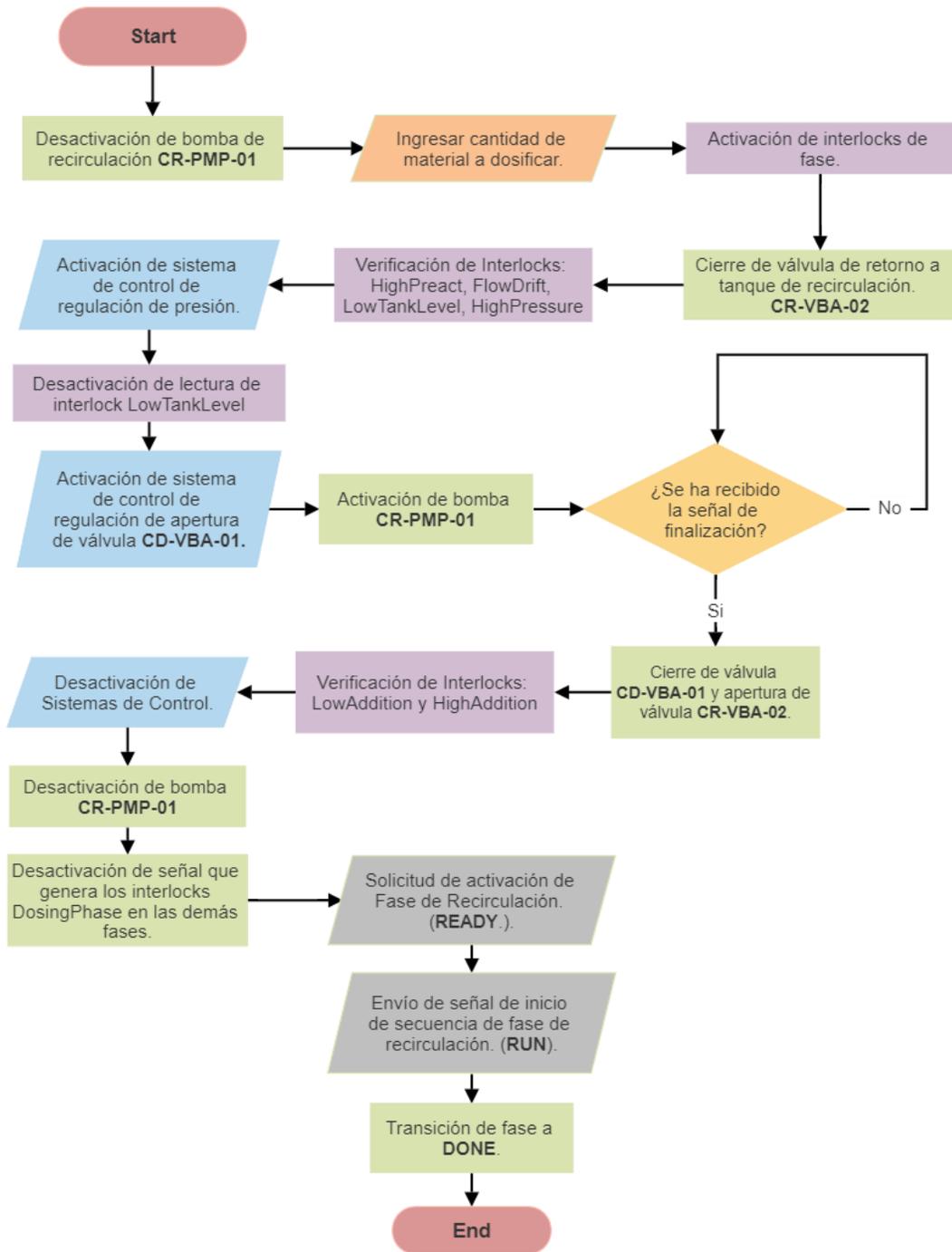
- Etapa # 16: solicitud de activación de fase de recirculación. La fase de recirculación se encontrará en *READY* en esta etapa.
- Etapa # 17: confirmación de inicio de la secuencia de fase de recirculación. Se efectúa una transición automática al estado *RUN* de la fase de recirculación.
- Etapa # 18: transición automática al estado *DONE* en la fase de adición.

La etapa # 10 se ejecuta en bucle, realiza una medición en tiempo real de los valores dosificados, con el totalizador del flujómetro, para que los sistemas de control de apertura de válvula y adición se ajusten continuamente hasta alcanzar el valor *set point* de la dosificación solicitada.

Al momento de alcanzar el valor final, se levantará una señal de finalización de dosificación, la cual prosigue con las siguientes etapas de la secuencia de fase, iniciando por el cierre de la válvula de dosificación CD-VBA-01 y la apertura de la válvula de retorno a tanque de recirculación CR-VBA-02 para la reactivación de la fase de recirculación.

El diagrama de flujo de la secuencia de fase puede observarse en la figura 39.

Figura 39. **Secuencia de fase de adición**



Fuente: elaboración propia, empleando Smartdraw.

2.3. Lógica de los sistemas de control

Los algoritmos y sistemas de control se activan durante las secuencias de fase, sin embargo, su ejecución será en paralelo a las etapas de las fases y son capaces de interactuar con ellas.

2.3.1. Control de presión con bomba de recirculación

El control de presión en el circuito es indispensable para garantizar las condiciones al momento de dosificar material en el tanque de proceso. Este sistema hace uso de la bomba de recirculación para modificar la presión en el interior de las tuberías a través de un control PID.

Tabla XIX. TAG ID del sistema de control

TAG ID
CTRL_SYS_PRESSURE01

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

2.3.1.1. Instrumentos y equipos involucrados

- CR-FV-01: el controlador definirá los valores del variador de frecuencia con el sistema de control para controlar la velocidad de la bomba. Esto generará cambios en la presión de la tubería.
- CR-PMP-01: la bomba modificará su velocidad debido al variador de frecuencia CR-FV-01. Las variaciones en el comportamiento de este equipo afectan directamente la presión en la tubería.

- CR-PIT-01: el sensor de presión le enviará los datos del estado actual al controlador para que éste calcule las variaciones a provocar en los equipos para regular la presión al *set point* deseado.

2.3.1.2. Señales del sistema de control

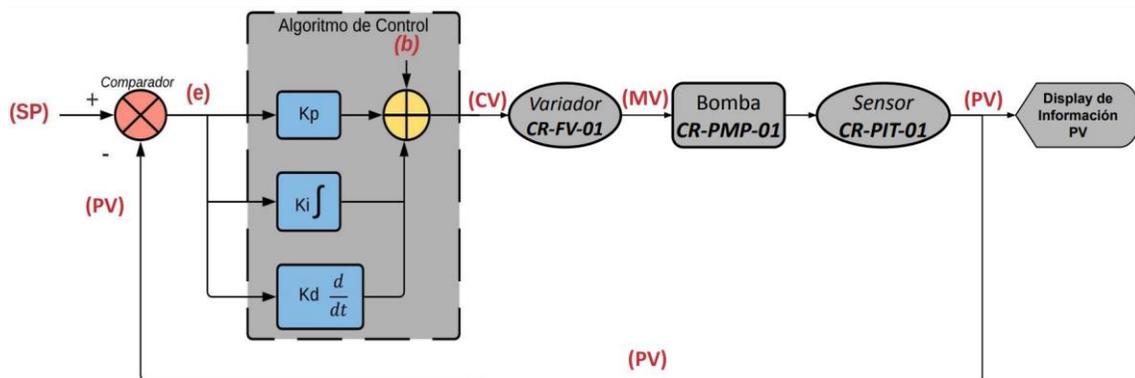
- *Process variable (PV)*: la variable de proceso es la presión enviada periódicamente al controlador a través del sensor CR-PIT-01. Este dato debe ser captado y transmitido en tiempo real para poder realizar los ajustes a tiempo.
- *Set point (SP)*: la señal de referencia será un valor de presión constante para mantener en la tubería. Este puede ser, por ejemplo 30 psi, sin embargo, dependerá de las condiciones que desea el usuario mantener en las tuberías.
- *Error (e)*: es la diferencia entre la variable de proceso y la señal de referencia. El controlador tomará el valor recibido del sensor CR-PIT-01 y lo comparará con el valor *set point* para obtener el valor del error.

$$Error = Set Point - Process Variable$$

- *Control variable (CV)*: es el valor resultante después de realizar los cálculos del algoritmo de control, en este caso, PID. Este valor se enviará como señal de control para el variador de frecuencia CR-FV-01 y este modificará sus configuraciones.

- *Manipulated variable (MV)*: después que el variador de frecuencia sea modificado, la bomba CR-PMP-01 cambiará su velocidad y la presión en la tubería se alterará (*process variable*). Estas modificaciones en el funcionamiento de la bomba son efecto de la variable manipulada.

Figura 40. Elementos del sistema de control PID



Fuente: elaboración propia, empleando Google Drawing.

2.3.1.3. Diagrama P&ID

Para mostrar el funcionamiento del sistema de control para regulación de presión CTRL_SYS_PRESSURE01 en el diagrama de tuberías e instrumentación, se utiliza el identificador de sistema de control 001.

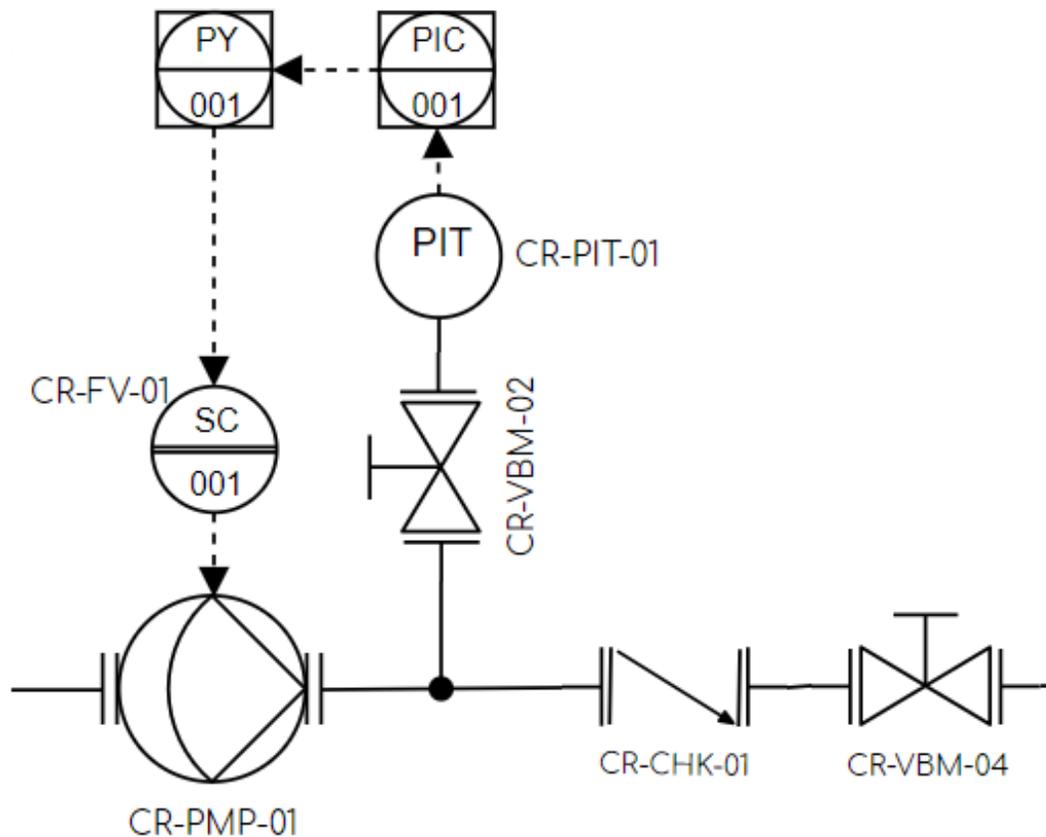
Tabla XX. Identificación de sistema de control en P&ID

Identificador P&ID
001

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

Se muestra en la figura 41 la relación entre los equipos e instrumentos, siendo el CR-PIT-01 el sensor y transmisor de presión que envía los datos al control PIC 001 que representa al sistema de control de presión con identificación 001. Posteriormente, se analizan los datos y se realizan cálculos en el PY 001, al obtener el valor calculado, se envía al SC 001 que representa al variador de frecuencia CR-FV-01 que interactúa directamente con el funcionamiento de la bomba.

Figura 41. **Diagrama P&ID con sistema de control 001**



Fuente: elaboración propia, empleando Visual Paradigm.

2.3.1.4. Condiciones de activación

Las condiciones de activación y desactivación del sistema de control dependen tanto de la secuencia de la fase como del estado en la que se encuentre.

Tabla XXI. **Condiciones de activación del sistema de control**

Fase	Estado de fase	Estado de sistema de control
Fase de Alimentación	Todos los estados	No relevante. La fase de alimentación no interfiere con la activación o desactivación del sistema de control.
Fase de Recirculación	<i>RUN</i>	Activado. Etapa # 7 de la secuencia de fase: activación de sistemas de control para regulación de presión y del algoritmo de intercalación de sistemas. En el estado <i>RUN</i> de la fase de recirculación, el algoritmo de intercalación de sistemas también posee los permisos para activar o desactivar el sistema de control.
	<i>READY</i> <i>HOLD</i> <i>ABORT</i> <i>OFF</i>	Desactivación del Sistema de control si esto no interfiere con la fase de adición.
Fase de Adición	<i>READY</i>	Activado. Simula una fase similar a la recirculación.
	<i>RUN</i>	Activado. Etapa # 6 de la secuencia de fase: activación de sistema de control de regulación de presión.
	<i>HOLD</i> <i>ABORT</i>	Desactivado.
	<i>DONE</i> <i>OFF</i>	No relevante. Los estados <i>DONE</i> y <i>OFF</i> de la fase de adición no interfieren en la configuración de ningún equipo ni con la activación o desactivación de sistemas de control.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

2.3.2. Control de presión con válvula de retorno a tanque

Para una estabilización más rápida de la presión en las tuberías de recirculación, la válvula proporcional de retorno al tanque funciona como una válvula de *back pressure*, con un sistema de control PID que regula la apertura de la válvula proporcional, modificando así la presión en la tubería. Es importante comprender que el asignar dos sistemas de control para la regulación de presión en un mismo circuito, es una forma de acelerar la respuesta y la regulación, pero ello tiene implicaciones en la estabilidad de ambos sistemas si no se sincronizan y se ajustan correctamente.

Tabla XXII. **TAG ID del sistema de control**

TAG ID
CTRL_SYS_PRESSURE02

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

2.3.2.1. Instrumentos y equipos involucrados

- CR-VBA-02: la válvula proporcional de retorno a tanque de recirculación modificará su apertura afectando las condiciones de presión dentro de las tuberías de recirculación. La presión es inversamente proporcional al porcentaje de apertura de la válvula.
- CR-PIT-01: el sensor de presión enviará los datos de presión al controlador para que el sistema de control seleccione el porcentaje de apertura de la válvula proporcional y la presión dentro de la tubería sea modificada.

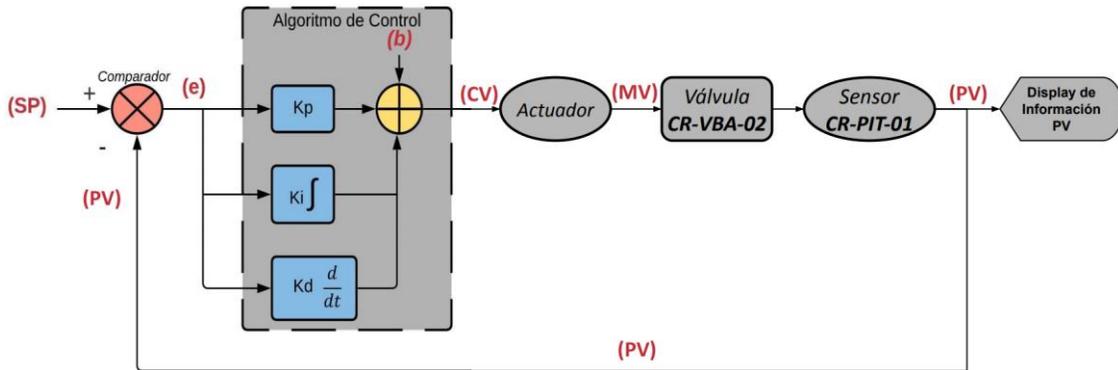
2.3.2.2. Señales del sistema de control

- *Process variable*: la variable de proceso es la presión captada por el sensor CR-PIT-01 y enviada periódicamente al controlador. Se transmite en tiempo real para hacer los ajustes respectivos al momento de registrar el cambio de presión.
- *Set point*: la señal de referencia será el valor de presión deseado en la tubería. Debe ser igual al valor registrado para el sistema de control CTRL_SYS_PRESSURE01, si existe una diferencia, ambos sistemas alterarán las condiciones del otro y ninguno alcanzará la estabilidad.
- *Error*: es la diferencia entre la variable de proceso y la señal de referencia. El controlador tomará el valor recibido del sensor CR-PIT-01 y lo comparará con el valor *set point* para obtener el valor del error.

$$\text{Error} = \text{Set Point} - \text{Process Variable}$$

- *Control variable*: es la señal calculada después de procesar la data en el algoritmo de control. Esta señal será enviada al actuador de la válvula para que ésta efectúe su apertura al valor solicitado por el sistema de control.
- *Manipulated variable*: el actuador de la válvula modificará mecánicamente la apertura de la válvula. Esto conlleva a una diferencia del área superficial a la salida de la válvula y por consiguiente una modificación en la presión interna de la tubería de recirculación. La variable manipulada es la enviada del actuador al accionamiento mecánico de la válvula y la apertura deseada.

Figura 42. Elementos del sistema de control PID



Fuente: elaboración propia, empleando Google Drawing.

2.3.2.3. Diagrama P&ID

Para mostrar el funcionamiento del sistema de control para regulación de presión *CTRL_SYS_PRESSURE02* en el diagrama de tuberías e instrumentación, se utiliza el identificador de sistema de control 002.

Tabla XXIII. Identificación de sistema de control en P&ID

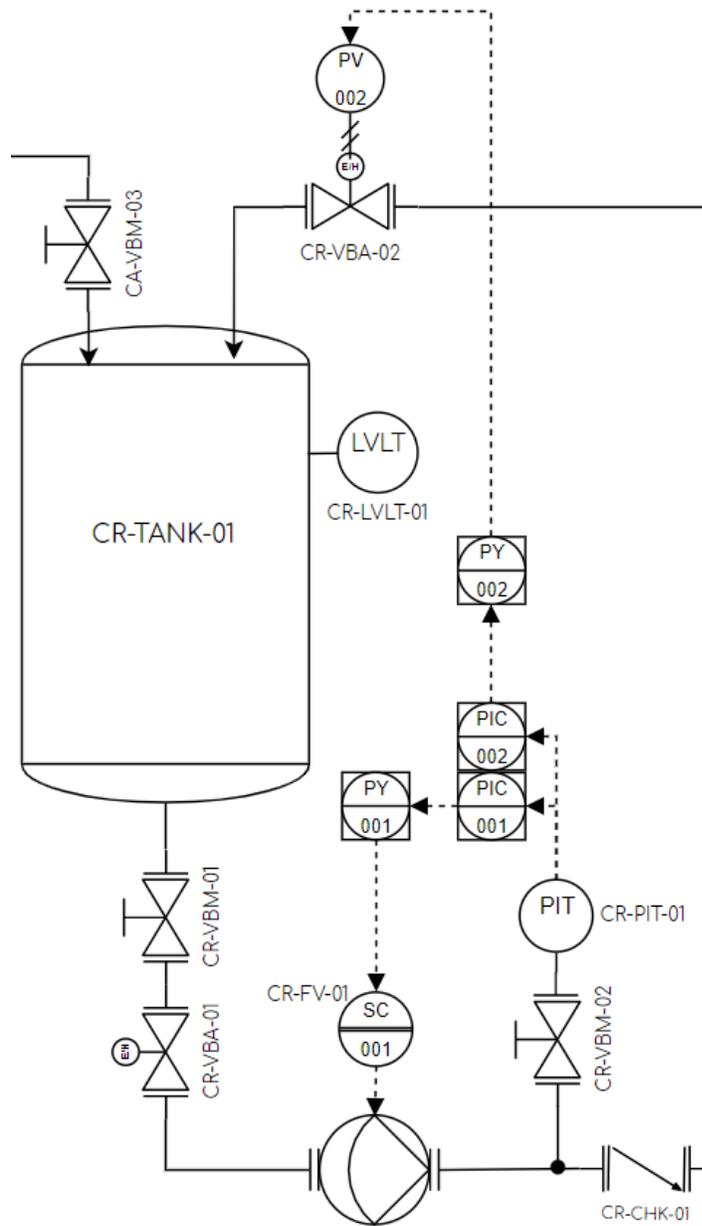
Identificador P&ID
002

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

Se muestra en la figura 43 la relación entre los equipos e instrumentos, siendo el CR-PIT-01 el sensor y transmisor de presión que envía los datos al control PIC 002 que representa al sistema de control de presión identificado como 002. Posteriormente se analizan los datos y se realizan los cálculos PY 002, al obtener el valor calculado, se envía al PV 002 que representa al

actuador de la válvula CR-VBA-02, variando su apertura y por consiguiente regulando la presión en la tubería.

Figura 43. **Diagrama P&ID con sistema de control 002**



Fuente: elaboración propia, empleando Visual Paradigm.

2.3.2.4. Condiciones de activación

Las condiciones de activación del sistema de control se presentan en la tabla XXIV, depende de la secuencia de la fase, así como el estado en el cual se encuentre la fase.

Tabla XXIV. **Condiciones de activación del sistema de control**

Fase	Estado de fase	Estado de sistema de control
Fase de Alimentación	Todos los estados	No relevante. La fase de alimentación no interfiere con la activación o desactivación del sistema de control.
Fase de Recirculación	<i>RUN</i>	Activado. Etapa # 7 de la secuencia de fase: Activación de sistemas de control para regulación de presión y del algoritmo de intercalación de sistemas. En el estado <i>RUN</i> de la fase de recirculación, el algoritmo de intercalación de sistemas también posee los permisos para activar o desactivar el sistema de control.
	<i>READY</i> <i>HOLD</i> <i>ABORT</i> <i>OFF</i>	Desactivación del Sistema de control.
Fase de Adición	Todos los estados	No relevante. La fase de adición no utiliza el sistema de regulación de presión con válvula de retorno a tanque (<i>back pressure</i>).

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

2.3.3. Regulación de apertura de válvula de dosificación

El sistema de control para la apertura de la válvula de dosificación permite regular la apertura de la válvula dependiendo de la cantidad de material que aún falta dosificar en el tanque de proceso. Este sistema disminuye los errores

de dosificación a diferencia de un sistema con apertura o cierre total de la válvula. Este sistema no hace uso de un PID sino de un modelo matemático más sencillo para describir el comportamiento de la válvula.

Tabla XXV. **TAG ID del sistema de control**

TAG ID
CTRL_SYS_DOSAGE

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

2.3.3.1. Instrumentos y equipos involucrados

- CD-VBA-01: la válvula proporcional de dosificación modificará su apertura para permitir mayor o menor paso de material al tanque de proceso. La cantidad faltante de material será directamente proporcional a la apertura de la válvula.
- CD-FIT-01: el flujómetro primario enviará los datos del totalizador al controlador para el cálculo de la apertura de la válvula CD-VBA-01. El dato es capturado en tiempo real y contiene la información de la cantidad de material que ha pasado por el flujómetro desde el inicio de la fase de adición.

2.3.3.2. Señales del sistema de control

- *Process variable*: la variable de proceso es el valor del totalizador del flujómetro primario CD-FIT-01. Este dato debe ser captado y transmitido en tiempo real para poder realizar los ajustes a tiempo.

- *Set point*: la señal de referencia será el valor ingresado por el operador en la etapa 2 de la secuencia de la fase de adición. Debe ser mayor al preactuado de la válvula o se activará el *interlock* PH2_ADD.Interlock.HighPreact.
- *Error*: es la diferencia entre la variable de proceso y la señal de referencia. El controlador tomará el valor del totalizador del flujómetro CD-FIT-01 y lo comparará con el valor *set point* ingresado por el usuario para obtener el valor del error.

$$Error = Set Point - Process Variable$$

- *Control variable*: es el valor resultante después de realizar los cálculos del algoritmo de control. Esta señal será enviada al actuador de la válvula para que ésta efectúe su apertura al valor solicitado por el sistema de control.
- *Manipulated variable*: la variable manipulada es la enviada del actuador al accionamiento mecánico de la válvula y la apertura deseada.

2.3.3.3. Algoritmo de control

La lógica de programación del algoritmo de control dependerá del usuario y de las características físicas de la válvula. Para propósitos de este trabajo se asume la selección de una válvula proporcional de bola y se describe la lógica de programación aplicable a este tipo de equipo. El algoritmo de control calculará el porcentaje de material que hace falta dosificar para cumplir con el objetivo de adición a través de la ecuación:

$$x = \left(\frac{SP - PV}{SP} \right) * 100$$

El numerador corresponde a la diferencia entre la señal de referencia y la variable de proceso, lo cual se sustituye por el error del sistema:

$$x = \left(\frac{e}{SP} \right) * 100$$

Donde x es el porcentaje de material que aún falta dosificar en el tanque de proceso. Para determinar el porcentaje de apertura de la válvula de dosificación, se utiliza la función:

$$f(x) = \begin{cases} 100, & a < x \leq 100 \\ x, & b < x \leq a \\ b, & c < x \leq b \\ 0, & x \leq c \end{cases}$$

Donde $f(x)$ es el porcentaje de apertura de la válvula de dosificación. Pueden observarse otras variables cuyo valor dependerá de la selección del usuario después de realizar los ajustes y considerar las condiciones de operación de su sistema en particular. En la tabla XXVI se describen las variables:

Tabla XXVI. **Variables del algoritmo de control propuesto**

Variable	Descripción	Recomendaciones
a	Límite inferior del primer rango de la función a tramos para el porcentaje de apertura de válvula.	El cierre y la apertura de las válvulas de bola no presentan un comportamiento lineal, por lo tanto, para acelerar la dosificación se define un rango para el cual la válvula se mantendrá abierta en un 100%. Se recomienda que este valor sea mayor al 50%, puesto que, a valores muy pequeños se acelera la dosificación, pero se pierde el control del sistema.

Continuación de la tabla XXVI.

Variable	Descripción	Recomendaciones
<i>b</i>	Límite inferior del segundo rango de la función a tramos y el valor tomado por la apertura de la válvula para el tercer rango de la función.	Similar a lo explicado en el inciso anterior, cuando una válvula de bola tiene una apertura del 15%, es difícil el flujo de material a través de ella, puesto que, por la forma física de la válvula y el tipo de cierre que efectúa, el área superficial se limita rápidamente. A un porcentaje pequeño de diferencia de dosificación, es necesario mantenerla abierta lo suficiente para permitir el flujo de material. Esto puede ser un 20% o un valor cercano, sin embargo, puede variar por el diámetro utilizado y el tipo de material a dosificar.
<i>c</i>	Límite inferior del tercer rango y límite máximo para el cual el valor de la función será 0.	El preactuado de la válvula detiene la dosificación aún antes de llegar al <i>target</i> , esto se debe a que existe material en el tramo de la tubería entre el flujómetro y la válvula desde antes de iniciar la dosificación y no es incluido en el totalizador del flujómetro. Todo este material remanente y todo aquel que pueda llegar a caer al tanque de proceso al momento de cerrar la válvula deben ser cuantificados para determinar el preactuado de la válvula y ajustar el sistema.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

2.3.3.4. Diagrama P&ID

Para mostrar el funcionamiento del sistema de control para regulación de apertura de la válvula de dosificación CTRL_SYS_DOSAGE en el diagrama de tuberías e instrumentación, se utiliza el identificador de sistema de control 003.

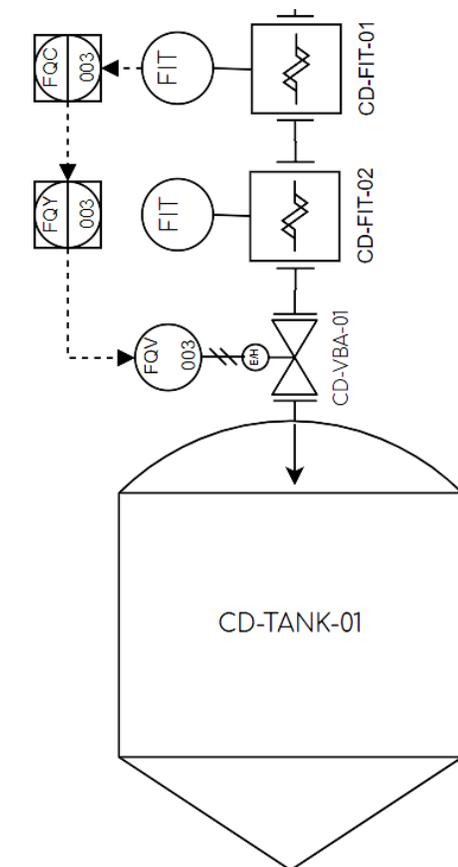
Tabla XXVII. Identificación de sistema de control en P&ID

Identificador P&ID
003

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

Se muestra en la figura 44 la relación entre los equipos e instrumentos, siendo el CD-FIT-01 el flujómetro con totalizador que transmitirá la cantidad de material que ha sido dosificado al control FQC 003 que representa al sistema de control identificado como 003. Posteriormente se analizan los datos y se realizan los cálculos FQY 003, al obtener el resultado, éste se envía al FQV 003 que representa el actuador de la válvula CD-VBA-01, variando su apertura durante la dosificación.

Figura 44. **Diagrama P&ID con sistema de control 003**



Fuente: elaboración propia, empleando Visual Paradigm.

2.3.3.5. Condiciones de activación

Las condiciones de activación del sistema de control se presentan en la tabla XXVIII, depende de la secuencia de la fase, así como el estado en el cual se encuentre la fase.

Tabla XXVIII. Condiciones de activación del sistema de control

Fase	Estado de fase	Estado de sistema de control
Fase de Alimentación	Todos los estados	No relevante. La fase de alimentación no interfiere con la activación o desactivación del sistema de control.
Fase de Recirculación	Todos los estados	No relevante. La fase de alimentación no interfiere con la activación o desactivación del sistema de control.
Fase de Adición	<i>RUN</i>	Activado. Etapa # 8 de la secuencia de adición: Activación del sistema de control para regulación de apertura de válvula. Este sistema abre la válvula CD-VBA-01 e inicia la dosificación en el tanque de proceso.
	<i>READY HOLD ABORT DONE OFF</i>	Desactivación del Sistema de control.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

2.3.4. Algoritmo de intercalación de sistemas de control

El control de apertura de la válvula de entrada a tanque de recirculación funciona intercalado con el control de presión de la bomba de recirculación. Esto quiere decir que sólo uno de los controles puede tomar datos y efectuar acciones a la vez. El accionamiento de cada sistema se ve efectuado por una señal síncrona de modulación por ancho de pulso (*PWM*). Es necesario evaluar:

- Frecuencia: definirá el ciclo de reactivación de los sistemas de control. Ambos sistemas están intercalados lo que imposibilita el accionamiento en paralelo.
- Ciclo de trabajo: representa la proporción de la anchura de la señal *PWM* en su parte positiva, en relación con el periodo de la señal. El ciclo de trabajo permite mantener un sistema de control activo durante más tiempo que el otro, si fuese necesario, o la misma cantidad de tiempo.

El comportamiento de la señal *PWM* en el primer ciclo puede describirse con la siguiente ecuación:

$$Out(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t \leq T_a \\ 0, & T_a < t \leq T \end{cases}$$

Siendo " T_a " el tiempo que se mantendrá la señal en estado alto en cada ciclo y " T " el periodo total de la señal. El ciclo de trabajo y la frecuencia son:

$$Ciclo\ de\ Trabajo = D = \frac{T_a}{T}$$

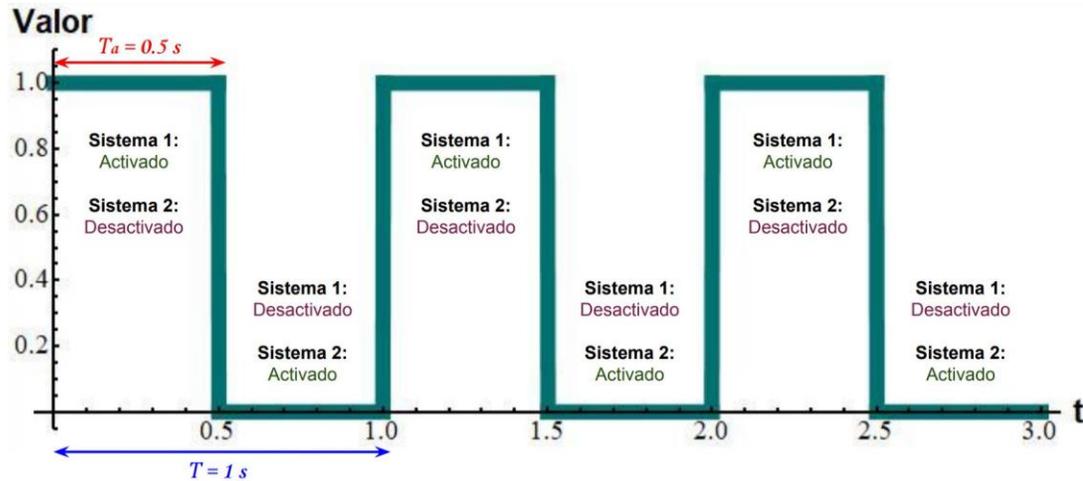
$$Frecuencia = f = \frac{1}{T}$$

Para el ejemplo de la figura 45, se definió un periodo T de un segundo y un tiempo en alto T_a de medio segundo. Los valores de ciclo de trabajo y frecuencia se obtienen con las ecuaciones:

$$D = \frac{T_a}{T} = \frac{0,5}{1} = 50 \%$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1} = 1 \text{ Hz}$$

Figura 45. Ejemplo de señal de control



Fuente: elaboración propia, empleando Wolfram Mathematica 8.0.

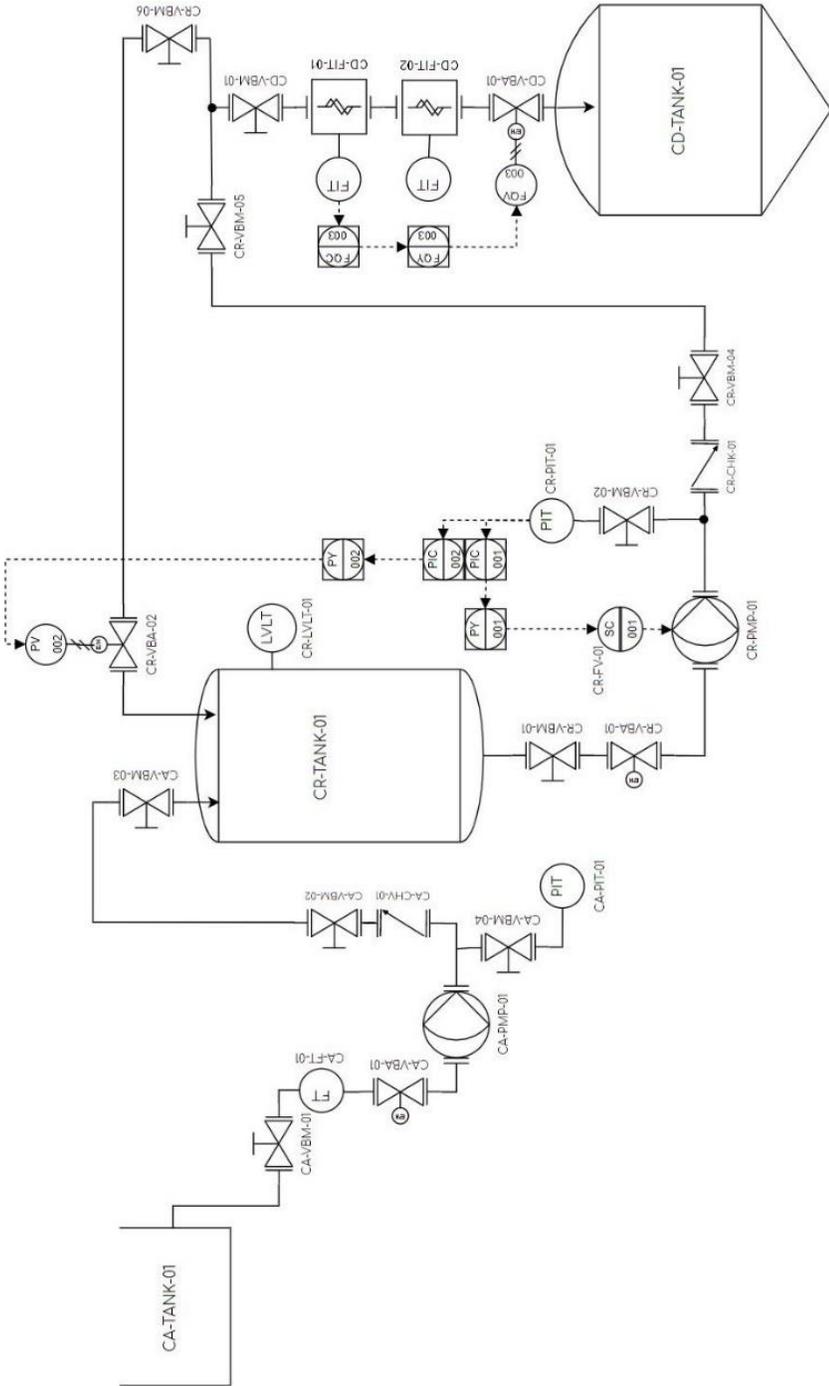
Como puede observarse, el sistema de control 001 se mantendrá activo cuando la señal esté en estado alto y el sistema de control 002 cuando la señal esté en estado bajo. El ciclo de trabajo al 50% ocasiona que ambos sistemas de control funcionen la misma cantidad de tiempo en su propio ciclo de activación.

2.4. Diagrama final del sistema de dosificación

En la figura 46 se observa el diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) del sistema de dosificación, integrando los circuitos de alimentación, recirculación y dosificación.

El diagrama incluye los equipos, instrumentos y las conexiones con los sistemas de control.

Figura 46. P&ID - Sistema de dosificación para procesos no sanitarios



Fuente: elaboración propia, empleando Visual Paradigm.

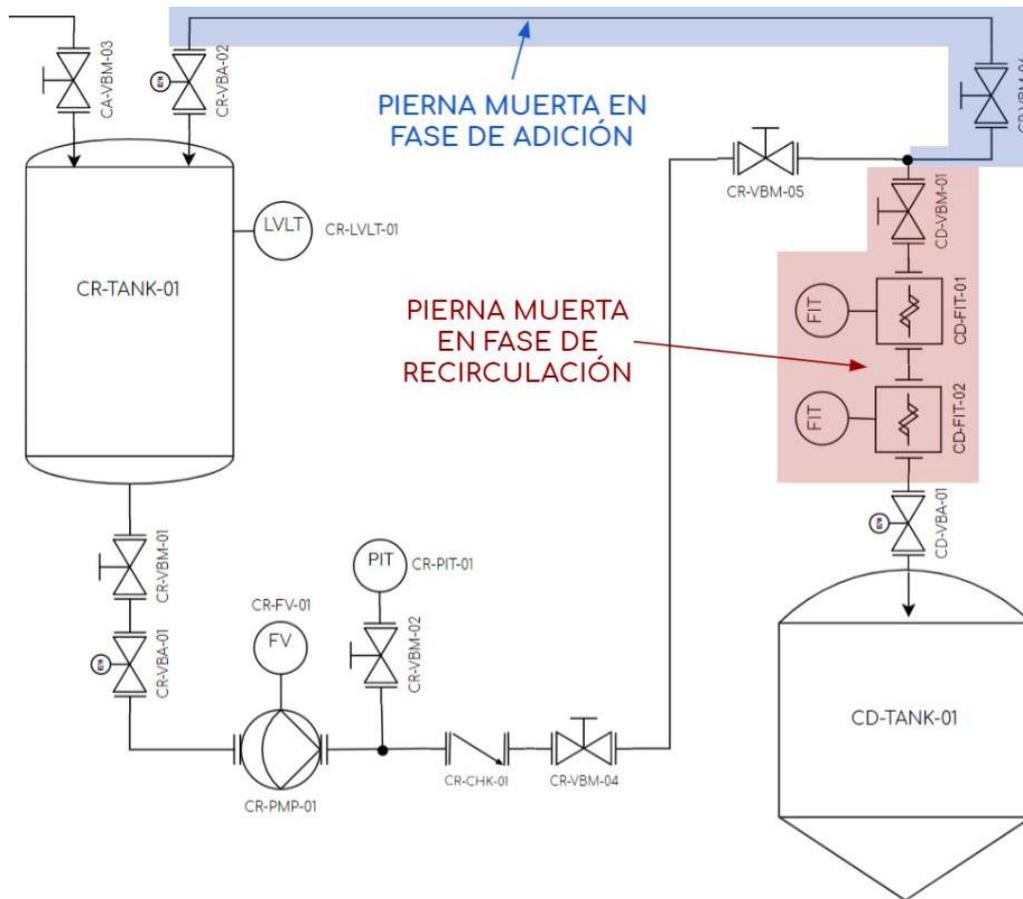
3. ARQUITECTURA Y LÓGICA DE CONTROL DEL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN PARA PROCESOS SANITARIOS

En las industrias farmacéuticas, alimenticias, de productos de consumo, entre otros, algunos de los procesos poseen requerimientos sanitarios para evitar la proliferación de microorganismos en el sistema. Por ejemplo, los sistemas de tratamiento de agua requieren que se encuentre en constante circulación y que no existan puntos de estancamiento, también conocidos como “pierna muerta”.

Una pierna muerta es una sección de una tubería que puede contener un fluido estancado, puede ser la consecuencia de una conexión no sanitaria, del diseño del circuito, de los instrumentos colocados o de la nula inclinación de la tubería para permitir un flujo constante. Por lo general, el diseño sanitario de los equipos exige utilizar materiales como acero inoxidable 316L o similar, tipos de conexiones sanitarias entre tuberías, largo permisible de tubería para conexiones de instrumentos, equipos sanitarios, entre otros, aunque finalmente dependerá de los requerimientos microbiológicos de cada planta industrial.

Al analizar el diseño propuesto en el capítulo anterior, se pueden observar dos puntos de estancamiento. El primer punto es durante la fase de recirculación, siendo todo el circuito de dosificación una pierna muerta ya que se estancará el material en esa sección del circuito al momento de activar la recirculación. El segundo punto es toda la tubería de recirculación posterior al circuito de dosificación, al momento de realizar una dosificación se cerrará la válvula CR-VBA-02 y el material en la tubería de retorno al tanque de recirculación se estancará. Ver figura 47.

Figura 47. **Piernas muertas en sistema de dosificación no sanitario**



Fuente: elaboración propia, empleando Visual Paradigm.

La corrección de los estancamientos se realizará modificando el circuito de recirculación y las fases de adición y recirculación. El circuito de alimentación requiere agregar puntos para drenar el material remanente en tuberías después de efectuar la alimentación al tanque de recirculación. Así mismo, el circuito de dosificación será eliminado y combinado con el circuito de recirculación para evitar ese punto de estancamiento. En este trabajo no se incluirán los requerimientos de inclinación de tubería ni la selección de materiales.

3.1. Integración de equipos e instrumentos

Se definen los equipos e instrumentos que serán utilizados en cada uno de los circuitos del sistema de dosificación para procesos sanitarios.

3.1.1. Circuito de alimentación

El circuito de alimentación será muy similar al propuesto en el capítulo anterior, por lo tanto, se recomienda utilizar de base el contenido anteriormente definido. La única modificación por realizar en el circuito de alimentación es la adición de salidas para drenar el material remanente en la tubería posterior a realizar la alimentación.

3.1.1.1. Instrumentos adicionales

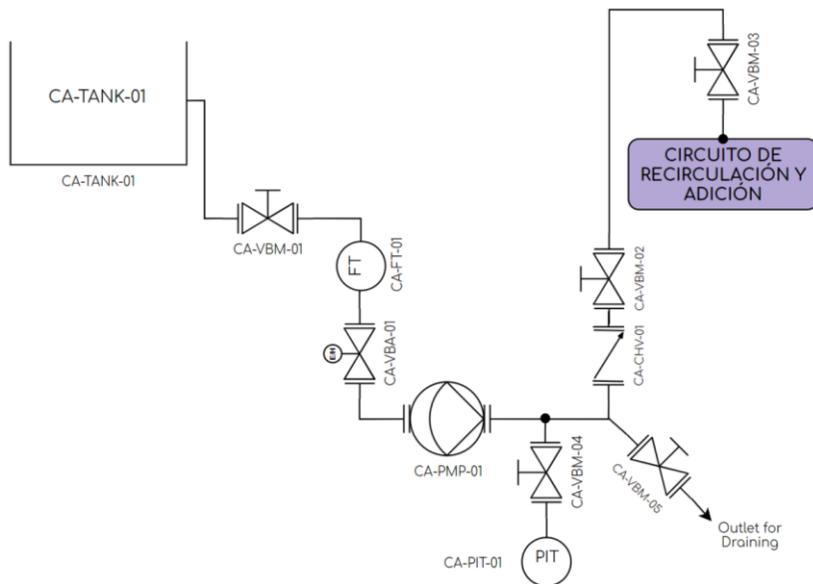
- Válvula para drenar (CA-VBM-05): es indispensable que en un sistema sanitario pueda drenarse el material remanente en tubería para evitar estancamientos. Esto se realizará después de hacer la alimentación al tanque de recirculación.

3.1.1.2. Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID)

Los equipos, instrumentos y otros elementos físicos se ven incluidos en el diagrama P&ID de la figura 48 con sus respectivos códigos de identificación. Para el circuito de alimentación, todos los códigos iniciarán con las letras CA. Todos los instrumentos y equipos no definidos en este capítulo fueron desarrollados en el capítulo anterior, los circuitos de alimentación para procesos sanitarios y no sanitarios guardan muchas similitudes.

En el diagrama de la figura 48 aún no se incluirán los sistemas de control asociados al sistema.

Figura 48. **P&ID de circuito de alimentación para sistemas sanitarios**



Fuente: elaboración propia, empleando Visual Paradigm.

3.1.2. Circuito de recirculación y adición

En el caso de los sistemas sanitarios, se solicita recirculación de material a través de la tubería a una velocidad mínima incluso en los momentos que se realiza la adición. A diferencia del sistema propuesto en el capítulo anterior, el circuito de adición no debe provocar una pierna muerta, por lo tanto, se combina con el sistema de recirculación y se hace uso de un sifón para el punto de uso. Un sifón no produce una pata muerta siempre y cuando se garantice la circulación del material a través de él a una velocidad mínima, en algunos casos la velocidad equivale a 1,5 m/s, pero puede variar dependiendo de los requerimientos microbiológicos del proceso.

Figura 49. **Ejemplo de sifón**



Fuente: Fricosmos. *Sifón de PVC acabado cromado*. <https://www.fricosmos.com/es/p1691/sifon-de-pvc-acabado-cromado-1-12>. Consulta: 15 de marzo de 2022.

3.1.2.1. Equipos involucrados

Similar al sistema del capítulo anterior, el tanque de recirculación y la bomba de recirculación se mantienen en este circuito. Adicional, se agrega el tanque de proceso del circuito de dosificación. Las definiciones de estos equipos se encuentran en el contenido del capítulo anterior.

- Tanque de recirculación (CR-TANK-01): funciona como un tanque pulmón, almacena el material suficiente para realizar las dosificaciones y permite la recirculación.
- Bomba de recirculación (CR-PMP-01): bombea el líquido a través del bucle de recirculación y para la dosificación del material al tanque de proceso.
- Tanque de proceso (CD-TANK-01): punto final de dosificación, puede ser un tanque mezclador, paila o similar.

3.1.2.2. Selección de Instrumentos

- Válvulas
 - De apertura y cierre manual
 - Válvula manual (CR-VBM-01): a la descarga del tanque de recirculación
 - Válvula manual (CR-VBM-02): para transmisor de presión CR-PIT-01.
 - Válvula manual (CR-VBM-03): posterior a la válvula de cheque.
 - Válvula manual (CR-VBM-04): previa a punto de uso.
 - Válvula manual (CR-VBM-05): posterior a punto de uso.
 - Válvula manual (CR-VBM-06): para drenar material posterior a tanque de recirculación y previo a la bomba de recirculación.
 - Válvula manual (CR-VBM-07): para drenar material posterior a bomba de recirculación y válvula de cheque.
 - Válvula manual (CR-VBM-08): para transmisor de presión CR-PIT-02.

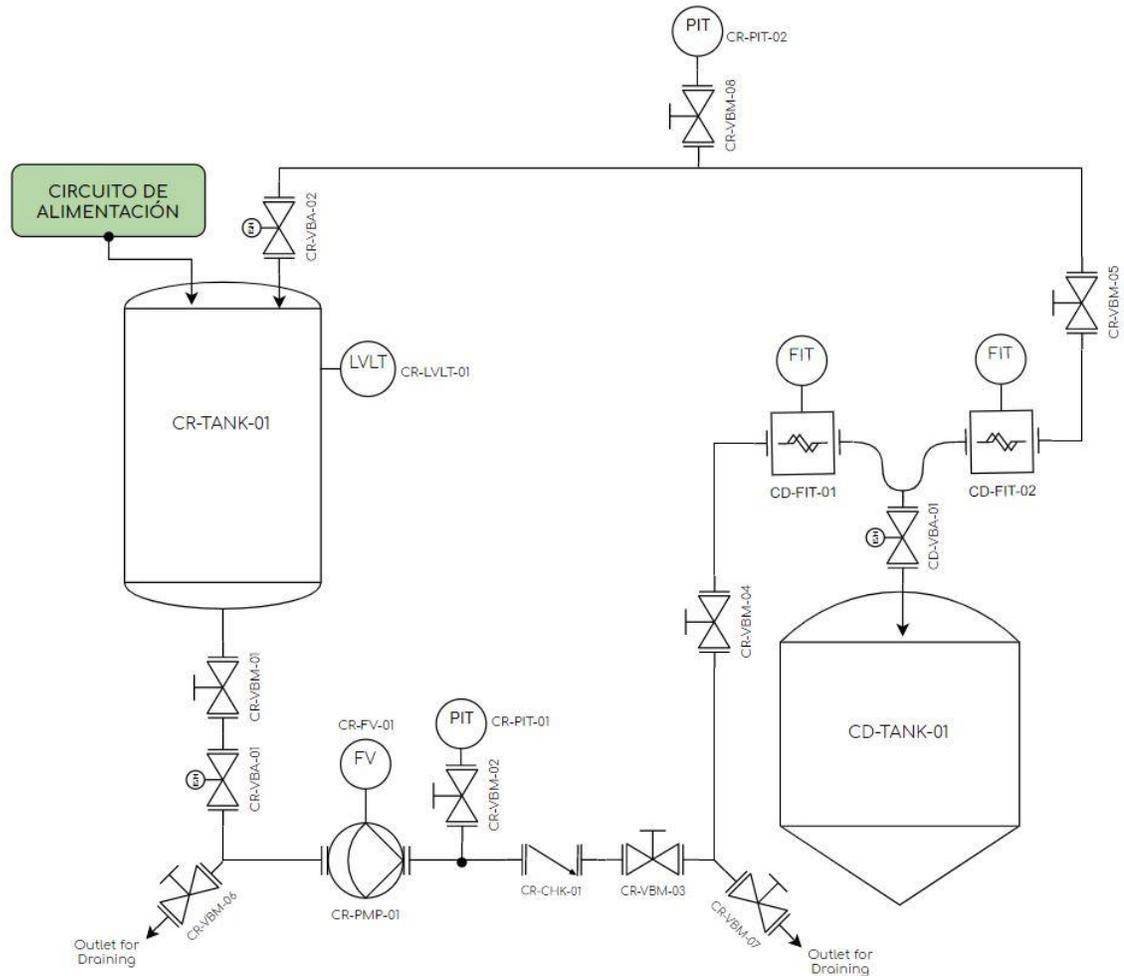
- De apertura y cierre controlado
 - Válvula de control (CR-VBA-01): a la descarga del tanque de recirculación. Activación o desactivación de la recirculación.
 - Válvula de control (CR-VBA-02): de retorno al tanque de recirculación. Funciona como una válvula reguladora de presión, por lo tanto, debe ser de apertura proporcional.
 - Válvula de dosificación (CD-VBA-01): habilita el paso de material al tanque de proceso, se ubica en la parte más baja del punto de uso.
- Antirretorno
 - Válvula de cheque (CR-CHK-01): posterior a bomba de recirculación.
- Sensores
 - Transmisor de presión (CR-PIT-01): transmite al controlador el valor de presión en la tubería de recirculación previo al punto de uso para dosificación. Evita la sobrepresión en la línea.
 - Transmisor de presión (CR-PIT-02): transmite al controlador el valor de presión en la tubería de recirculación posterior al punto de uso para dosificación. Con la información de este sensor se controla la válvula de retorno al tanque de recirculación.

- Transmisor de nivel (CR-LVLT-01): enviará el valor del nivel dentro del tanque de recirculación al controlador para que éste pueda ejecutar la lógica necesaria para evitar derrames o evitar la activación del proceso de dosificación a niveles bajos de material.
 - Flujómetro inicial (CD-FIT-01): medirá la cantidad de material que fluye previo al punto de uso para dosificación. El flujómetro inicial también forma parte del sistema de control de regulación de flujo, como el transmisor de la variable de proceso.
 - Flujómetro final (CD-FIT-02): medirá la cantidad de material que fluye posterior al punto de uso para dosificación. La dosificación se determina por una diferencia entre el valor de ambos flujómetros y un ajuste por aforos.
- Variadores de frecuencia
 - Variador de frecuencia de bomba de recirculación (CR-FV-01): controla la velocidad de bombeo de la bomba de recirculación lo que regula el flujo de material que pasa a través de la tubería.

3.1.2.3. Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID)

Los equipos, instrumentos y otros elementos físicos se ven incluidos en el diagrama P&ID de la figura 50 con sus respectivos códigos de identificación. Para el circuito de recirculación y adición, los códigos iniciarán con las letras CR y CD.

Figura 50. P&ID de circuito de recirculación y adición



Fuente: elaboración propia, empleando Visual Paradigm.

Puede observarse la conexión con el circuito de alimentación en el recuadro verde.

Se presenta la tabla XXIX para la visualización de los equipos.

Tabla XXIX. Equipos del circuito de recirculación y adición

Categoría	Tipo	Tag ID	Descripción
Equipo	Tanque	CR-TANK-01	Tanque de recirculación
		CD-TANK-01	Tanque de proceso. Puede ser un mezclador, paila, pre-mezclador, entre otros.
	Bomba	CR-PMP-01	Bomba para transferir el fluido a través de todo el circuito de recirculación y al circuito de dosificación.
Instrumento	Válvula manual	CR-VBM-01	Válvula de descarga de tanque.
		CR-VBM-02	Válvula para transmisor de presión 1.
		CR-VBM-03	Válvula posterior al cheque.
		CR-VBM-04	Válvula previa a conexión con punto de uso de dosificación.
		CR-VBM-05	Válvula posterior a conexión con punto de uso de dosificación.
		CR-VBM-06	Válvula de drenaje posterior a tanque de recirculación y previo a la bomba de recirculación.
		CR-VBM-07	Válvula de drenaje posterior a la válvula de cheque y previo al punto de uso de dosificación.
		CR-VBM-08	Válvula para transmisor de presión 2.
	Válvula de control	CR-VBA-01	Válvula automática en descarga de tanque.
		CR-VBA-02	Válvula automática para regulación de presión.
		CD-VBA-01	Válvula automática de dosificación.

Continuación de la tabla XXIX.

Categoría	Tipo	Tag ID	Descripción
	Válvula de Cheque	CR-CHK-01	Válvula antirretorno posterior a bomba de recirculación.
	Transmisor de Presión	CR-PIT-01	Transmisor de presión 1.
		CR-PIT-02	Transmisor de presión 2.
	Sensor de Nivel	CR-LVLT-01	Transmisor de nivel.
	Variador de Frecuencia	CR-FV-01	Variador de frecuencia para bomba de recirculación.
	Flujómetro	CD-FIT-01	Flujómetro inicial. Mide el flujo de material en la tubería al momento de la recirculación. Adicional, está presente en el cálculo de material dosificado.
CD-FIT-02		Flujómetro final. En conjunto con el flujómetro inicial, permite calcular la cantidad de material dosificado a través de su totalizador, por una diferencia con el totalizador del flujómetro inicial.	

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

3.2. Definición de fases del proceso

Se definen tres fases de funcionamiento del sistema de dosificación para procesos sanitarios.

3.2.1. Fase de alimentación a tanque pulmón

No existe ninguna modificación en la definición de la fase de proceso para la alimentación a tanque pulmón. La fase compartirá los mismos estados, *interlocks*, transiciones, condiciones y secuencia descritos en el capítulo anterior (inciso 2.2.1.).

3.2.2. Fase de recirculación

La recirculación en un sistema con requerimiento sanitario es indispensable para evitar el estancamiento de material, la fase de recirculación mantendrá el fluido en constante movimiento, verificando que se cumpla con la velocidad mínima de movimiento del material en la tubería.

Tabla XXX. **TAG ID de fase de recirculación**

TAG ID
PH1_LOOP

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

3.2.2.1. Interlocks

La habilitación de lectura de los *interlocks* se realiza al momento de activar la secuencia de fase. Los *interlocks* propuestos se definen en la tabla XXXI.

Tabla XXXI. **Interlocks de la fase de recirculación**

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
PH1_LOOP. <i>Interlock.LowTankLevel</i>	CR-LVLT-01	<p>El sensor de nivel enviará al controlador la información del nivel de material en el interior del tanque, se ajustará un mínimo de material en el tanque, el suficiente para inundar completamente las tuberías de recirculación y sobrepasar el valor de la dosificación requerida.</p> <p>Si esto no se cumple, se activará el <i>interlock</i> por bajo nivel de material en tanque de recirculación.</p>

Continuación de la tabla XXXI.

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
		<p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 1, & x \leq L_{Low} \\ 0, & x > L_{Low} \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Nivel de material en Tanque CR – LVLT – 01. <i>L_{Low}</i> = Nivel mínimo de material permitido en tanque.</p>
PH1_LOOP.Interlock.HighTankLevel	CR-LVLT-01	<p>Similar a la fase de alimentación, el instrumento CR-LVLT-01 medirá el nivel de material en el tanque. El nivel máximo para la activación de este <i>interlock</i> deberá ser ligeramente superior al valor ajustado en la fase anterior.</p> <p>Utilizar un límite del 90% de la capacidad del tanque en esta fase y un 85% en la fase de alimentación puede ser efectivo. Para evitar el derrame debe tomarse en cuenta el volumen de material que se encuentra en las tuberías de recirculación. Si se sobrepasa el nivel, se solicitará al operador que drene material fuera del circuito para evitar derrames al momento de activar la recirculación.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 0, & x < 0.90 * (C_{Tank} - C_{Tub}) \\ 1, & x \geq 0.90 * (C_{Tank} - C_{Tub}) \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Nivel de material en Tanque CR – LVLT – 01. <i>C_{Tank}</i> = Capacidad operativa en CR – TANK – 01. <i>C_{Tub}</i> = Capacidad operativa en tubería de recirculación.</p>

Continuación de la tabla XXXI.

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
PH1_LOOP.Interlock.Drift	CD-FIT-01 CD-FIT-02	<p>Si existe una variación muy grande entre los datos de ambos flujómetros, es posible que alguno de los dos tenga un fallo o que exista una pérdida de material en el punto de descarga de la válvula de dosificación. Si esto sucede, se activará el <i>interlock</i> por desviación de datos entre flujómetros.</p> <p>Ambos flujómetros se encuentran en serie y con distintas condiciones físicas, por lo que, el flujo medido puede variar en ciertos puntos de la secuencia, sin embargo, esto no significa que exista un fallo de medición de alguno de los dos instrumentos.</p> <p>La correcta selección de la tolerancia de desviación entre flujómetros evita activaciones innecesarias del <i>interlock</i>, para ello hay que tomar en cuenta que entre ambos flujómetros existe una derivación hacia la descarga de material, por lo que los datos medidos por ambos son susceptibles a variaciones, sin embargo, si la válvula de descarga se encuentra cerrada, los datos serán similares en un periodo de tiempo medible.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 0, & (F_2 - T) \leq x \leq (F_2 + T) \\ 1, & (F_2 + T) \leq x \\ 1, & (F_2 - T) \geq x \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del <i>interlock</i> en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Valor de flujo medido por CD - FIT - 01. <i>F₂</i> = Valor de flujo medido por CD - FIT - 02. <i>T</i> = Tolerancia de desviación entre flujómetros.</p>

Continuación de la tabla XXXI.

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
PH1_LOOP.Interlock.LowFlow	CD-FIT-02	<p>Si el sistema no alcanza un flujo mínimo en un periodo de tiempo después de haber activado la fase de recirculación y sus sistemas de control, se activará el <i>interlock</i> por bajo flujo.</p> <p>Esto puede suceder si no existe material suficiente en las tuberías o si la bomba de recirculación no responde correctamente para aumentar la velocidad de bombeo. Una velocidad mínima de circulación de material es necesaria para cumplir con las especificaciones microbiológicas.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 1, & x < F_{Min} \\ 0, & x \geq F_{Min} \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Medición de flujo en tubería por CD – FIT – 02. <i>F_{Min}</i> = Flujo mínimo.</p>
PH1_LOOP.Interlock.HighPressure	CR-PIT-01	<p>Si la tubería del circuito de recirculación experimenta una sobrepresión, los valores captados por el transmisor de presión CR-PIT-01 sobrepasará el umbral máximo permitido.</p> <p>Para ello, un <i>interlock</i> debe activarse a valores superiores de presión que las tolerables en el sistema. Idealmente todas las válvulas manuales del circuito de recirculación deben estar abiertas, sin embargo, si se diera el caso en que una de las válvulas se encuentre cerrada, se generará sobrepresión al momento de activar la recirculación de material.</p>

Continuación de la tabla XXXI.

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
		<p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 0, & x < P_{Max} \\ 1, & x \geq P_{Max} \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Medición de presión en tubería por CR – PIT – 01. <i>P_{Max}</i> = Presión máxima permitida en tubería.</p>
<p><i>PH1_LOOP.Interlock.LowPressure</i></p>	<p>CR-PIT-01 CR-PMP-01</p>	<p>Se ajustará un nivel mínimo de presión en la tubería de recirculación. Si la bomba CR-PMP-01 se encuentra activa y la presión no sobrepasa el nivel mínimo, entonces se activará el <i>interlock</i> por baja presión de tubería. Esto puede suceder si al activar la bomba, la válvula manual de descarga del tanque se encuentra cerrada, debido a ello, no logrará succionar material y la presión en la tubería de recirculación no se elevará lo suficiente como para generar cambio de presión en la tubería de recirculación posterior a la bomba.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 1, & x \leq P_{Min} \\ 0, & x > P_{Min} \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Medición de presión en tubería por CR – PIT – 01. <i>P_{Min}</i> = Presión mínima para detectar bombeo en tubería.</p>
<p><i>PH1_LOOP.Interlock.Wait</i></p>	<p>Todos los aplicables</p>	<p>Si el sistema se encuentra detenido o en espera por un tiempo lo suficientemente largo, se activará el <i>interlock</i> de espera. Si existe alguna latencia en la respuesta del sistema o si alguna de las etapas de la fase entra en conflicto con el resto de la secuencia, el sistema podría detenerse durante un tiempo y activará el <i>interlock</i>.</p>

Continuación de la tabla XXXI.

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
<i>PH1_LOOP.Interlock.Abort</i>	Todos los aplicables	Si el operador activa manualmente el botón para abortar la fase, se activará el <i>interlock</i> de aborto de fase.
<i>PH1_LOOP.Interlock.NoConnection</i>	Todos los aplicables	Si el controlador detecta falta de conexión con alguno de los dispositivos de la fase, se activará el <i>interlock</i> por falta de conexión.
<i>PH1_LOOP.Interlock Confirmation01</i>	CR-VBA-01	Si se solicita la apertura o cierre de la válvula y no se recibe una confirmación con el mismo estado, se activará el <i>interlock</i> por falta de confirmación de válvula.
<i>PH1_LOOP.Interlock Confirmation02</i>	CR-VBA-02	Si se solicita la apertura o cierre de la válvula y no se recibe una confirmación con el mismo estado, se activará el <i>interlock</i> por falta de confirmación de válvula.
<i>PH1_LOOP.Interlock Confirmation03</i>	CD-VBA-01	Si se solicita la apertura o cierre de la válvula y no se recibe una confirmación con el mismo estado, se activará el <i>interlock</i> por falta de confirmación de válvula.
<i>PH1_LOOP.Interlock.EmergencyStop</i>	Todos los aplicables	Si el operador presiona manualmente el paro de emergencia del circuito, se activará el <i>interlock</i> .
<i>PH1_LOOP.Interlock.DosingPhase</i>	Detección de Fase	Si se llamó a la fase de adición o ya se encuentra habilitada, se activará el <i>interlock</i> por fase de adición. La fase de recirculación no podrá correr si se necesita realizar una dosificación, esto se plantea para que las condiciones del proceso sean reguladas completamente por la fase de adición y no exista conflicto en los valores configurados para los equipos que ambas fases utilizan, por

Continuación de la tabla XXXI.

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
		ejemplo, la bomba de recirculación CR-PMP-01, la cual bombea material para recirculación y para dosificación. La activación de este <i>interlock</i> involucra un apagado inmediato de la fase de recirculación, ya que interfiere con la ejecución de la fase de adición y en las condiciones generadas para la dosificación de material.
PH1_LOOP.Interlock.Off	Todos los aplicables	Se activa el <i>interlock</i> si el operador presiona el botón de desactivación de fase.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

La activación de cualquiera de los *interlocks* hace que el sistema entre en falla, existen tres tipos de falla para la fase de recirculación. En la tabla XXXII se muestran las fallas de sistema y los *interlocks* que las generan.

Tabla XXXII. **Fallas de sistema en fase de recirculación**

TAG ID de Falla	<i>Interlocks</i> que generan la activación
PH1_LOOP.Phase.Interlocked_ABORT	<ol style="list-style-type: none"> 1. PH1_LOOP.Interlock.Abort 2. PH1_LOOP.Interlock.HighTankLevel 3. PH1_LOOP.Interlock.LowTankLevel 4. PH1_LOOP.Interlock.Wait 5. PH1_LOOP.Interlock.HighPressure 6. PH1_LOOP.Interlock.LowPressure 7. PH1_LOOP.Interlock.Confirmation03 8. PH1_LOOP.Interlock.LowFlow 9. PH1_LOOP.Interlock.Drift

Continuación de la tabla XXXII.

TAG ID de Falla	Interlocks que generan la activación
<i>PH1_LOOP.Phase.Interlocked_HOLD</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>PH1_LOOP.Interlock.NoConnection</i> 2. <i>PH1_LOOP.Interlock.Confirmation01</i> 3. <i>PH1_LOOP.Interlock.Confirmation02</i> 4. <i>PH1_LOOP.Interlock.EmergencyStop</i>
<i>PH1_FEED.Phase.Interlocked_OFF</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>PH1_LOOP.Interlock.DosingPhase</i> 2. <i>PH1_LOOP.Interlock.Off</i>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

La falla *PH1_LOOP.Phase.Interlocked_OFF* es superior en jerarquía y ejecutará su transición, sin importar que existan otras fallas al mismo tiempo. La segunda en jerarquía de ejecución es la falla *PH1_LOOP.Phase.Interlocked_ABORT*.

3.2.2.2. Estados y transiciones

Los estados existentes para la fase de recirculación con sus respectivas acciones a efectuar al momento de su transición se observan en la tabla XXXIII.

Tabla XXXIII. Estados de la fase de recirculación

Estado	Descripción	Acción efectuada
<i>READY</i>	<p>El sistema se encuentra listo para la activación de la fase. Este estado representa las condiciones iniciales de la fase y configura los equipos en modo de preparación.</p> <p>Las válvulas y la bomba tomarán el valor que les configure la fase de adición si esta se encuentra activa, en caso contrario se encontrarán cerradas y apagada la bomba.</p> <p>Lectura de Interlocks: parcialmente habilitada. (Presión, nivel, fase de adición).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • CD-VBA-01: cerrada. • CR-VBA-01: valor de fase de adición o cerrada. • CR-PMP-01: valor de fase de adición o apagada. • CR-VBA-02: valor de fase de adición o cerrada. • CR-PIT-01: activo, tomando datos. • CR-LVLT-01: activo, tomando datos. • Sistemas de control de regulación de presión y flujo: desactivados.
<i>RUN</i>	<p>La fase se encuentra en ejecución y seguirá la secuencia de fase programada.</p> <p>Lectura de <i>Interlocks</i>: habilitada totalmente.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • CR-VBA-01: abierta. • CR-PMP-01: encendida. • CR-VBA-02: abierta. • CR-PIT-01: activo, tomando datos. • CR-LVLT-01: activo, tomando datos. • CD-FIT-02: activo, tomando datos. • CD-FIT-01: activo, tomando datos. • Sistema de control de regulación de presión: activado. • Sistema de control de regulación de flujo: activado.
<i>HOLD</i>	<p>La fase estará en espera ocasionada por la activación de una falla, la reactivación es manual y prosigue con la última etapa de la secuencia de fase que ejecutó.</p> <p>En este estado, la fase puede continuar su secuencia si el operador logra corregir los errores captados en los <i>interlocks</i> activos.</p> <p>Lectura de <i>interlocks</i>: parcialmente activada. (Presión, nivel, abort, fase de adición).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • CR-VBA-01: abierta. • CR-PMP-01: apagada. • CR-VBA-02: abierta. • CD-VBA-01: cerrada. • CR-PIT-01: activo, tomando datos. • CR-LVLT-01: activo, tomando datos. • Sistemas de control de regulación de presión y flujo: desactivados para fase de recirculación.

Continuación de la tabla XXXIII.

Estado	Descripción	Acción efectuada
<p style="text-align: center;"><i>ABORT</i></p>	<p>Se aborta la fase por activación de una falla. El sistema es incapaz de finalizar la secuencia de fase por la activación de un <i>interlock</i> crítico. Es necesario reiniciar todo el proceso y la secuencia comenzará desde cero. Las válvulas y la bomba tomarán el valor que les configure la fase de adición si esta se encuentra activa, en caso contrario se encontrarán cerradas y apagada la bomba.</p> <p>Lectura de <i>interlocks</i>: desactivada.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • CR-VBA-01: valor de fase de adición o cerrada. • CR-PMP-01: apagada. • CR-VBA-02: valor de fase de adición o cerrada. • CR-PIT-01: activo, tomando datos. • CR-LVLT-01: activo, tomando datos. • Sistemas de control de regulación de presión y flujo: desactivados.
<p style="text-align: center;"><i>OFF</i></p>	<p>Fase desactivada, no realiza cambios en el sistema ni se ve afectada por las condiciones del proceso. Mientras la fase se encuentre en este estado, es invisible para el controlador. El operador puede mandar a llamar la fase para activarla y efectuar una transición al estado <i>READY</i>.</p>	<p>Desactivación de todos los controles y procesos de la fase de recirculación. Si la fase de adición está en proceso de ejecución, mantiene prioridad de ejecución y realiza las configuraciones a los equipos del circuito de recirculación.</p>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

La activación de la fase de adición se sobrepone a la fase de recirculación por la existencia del *interlock* PH1_LOOP.*Interlock.DosingPhase*, esto obliga a que la fase de recirculación se detenga y pase temporalmente a un estado apagado mientras se ejecuta la fase de adición.

Es necesaria la creación de botones que serán mostrados en pantalla al momento de entrar en el estado específico.

- Botón *RESET*: aparecerá en pantalla únicamente al estar en el estado de *ABORT*. Reinicia la fase.

- Botón *RESTART*: aparecerá en pantalla únicamente al estar en el estado de *HOLD*. Retorna a la secuencia de fase en la última etapa ejecutada.
- Botón *ABORT*: activa el *interlock PH1_LOOP.Interlock.Abort*. Aparecerá en pantalla en los estados *RUN* y *HOLD*.
- Botón *OFF*: activa el *interlock PH1_LOOP.Interlock.Off*. Aparecerá en la pantalla de los estados *RUN* y *ABORT*.

Los botones se generarán en la pantalla al momento de la activación del estado que los contiene. Las condiciones de transición entre estados se ligan al valor de las fallas de sistema y a la activación de botones, el comportamiento es igual al especificado en el inciso 2.2.2.2. Ver tabla XIII.

El diagrama de transición de estados se define en la figura 36, ya que es igual al propuesto para procesos no sanitarios.

3.2.2.3. Secuencia de fase

Al momento de la activación de la fase de recirculación, el comportamiento del sistema se verá reflejado siguiendo la secuencia:

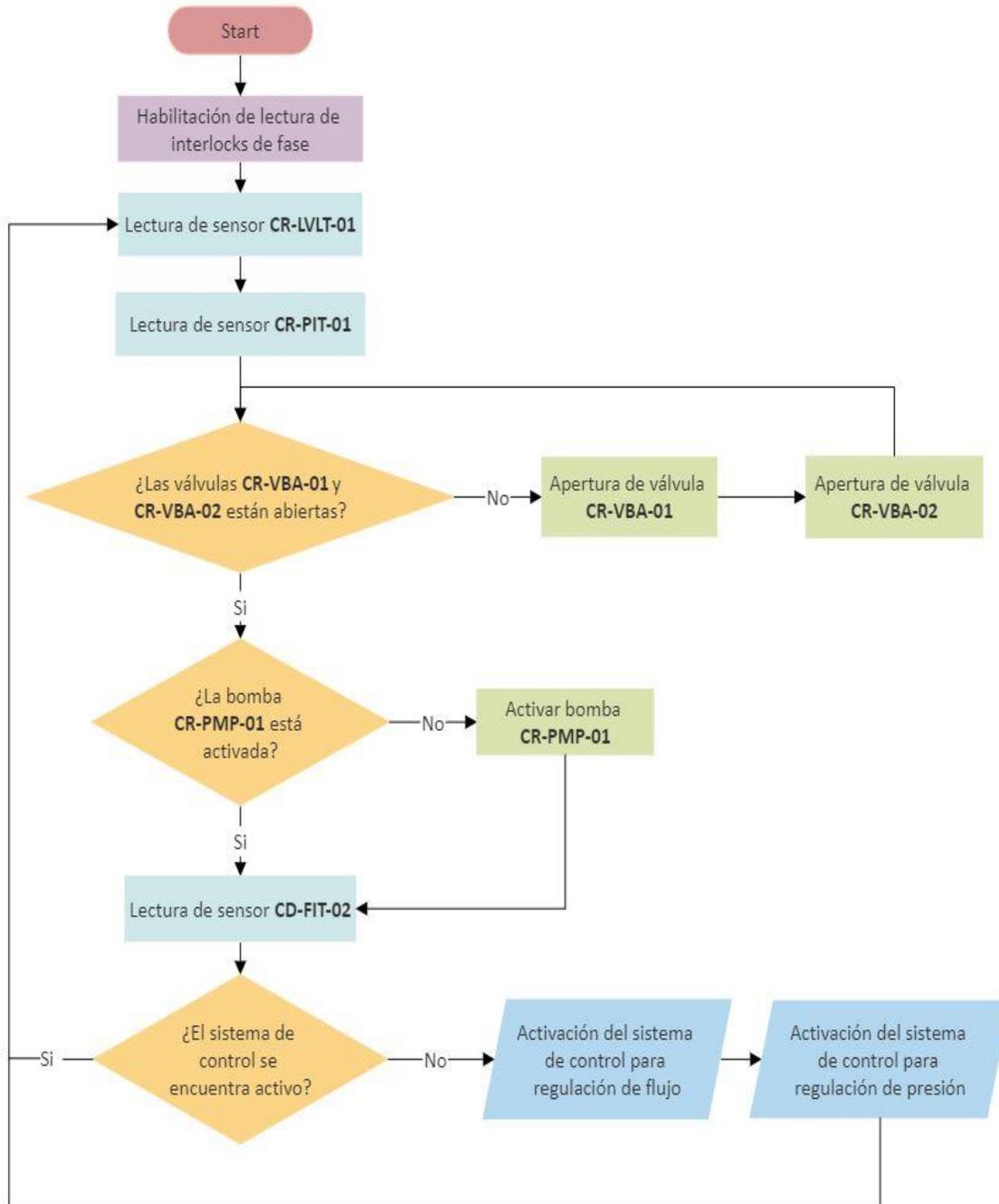
- Etapa # 1: activación de lectura de *interlocks*.
- Etapa # 2 (ejecución en bucle): evaluación del nivel de material en el tanque de recirculación (CR-TANK-01) por medición entregada por el sensor CR-LVLT-01.

- Etapa # 3 (ejecución en bucle): evaluación de la presión al interior de las tuberías en el circuito de recirculación. Medidas de presión entregadas por el transmisor CR-PIT-01.
- Etapa # 4: apertura de válvula de descarga CR-VBA-01.
- Etapa # 5: apertura de válvula de control de retorno al tanque de recirculación CR-VBA-02.
- Etapa # 6: espera de un par de segundos después de la activación de la válvula de control CR-VBA-02. Activación de bomba de recirculación CR-PMP-01.
- Etapa # 7 (ejecución en bucle): evaluación del flujo tomado por sensor CD-FIT-02.
- Etapa # 8: activación de sistema de control para regulación de presión y regulación de flujo.

Se ejecutarán periódicamente las etapas 2, 3 y 7 para la toma de datos de los sensores de nivel, presión y flujo. Estas mediciones alimentan la base del controlador, el cual realiza las comparaciones especificadas en los *interlocks* para determinar la activación o desactivación de estos. Así mismo, las mediciones de presión periódicas alimentan las entradas de los sistemas de control de regulación de presión.

El diagrama de flujo de la secuencia de fase puede observarse en la figura 51.

Figura 51. **Secuencia de fase de recirculación**



Fuente: elaboración propia, empleando Smartdraw.

3.2.3. Fase de adición con recirculación perpetua

La fase de adición de material toma el puesto de mayor prioridad entre todas las fases, tanto la fase de recirculación como la de alimentación cuentan con un *interlock* para interrupción si se activa la adición en cualquier momento del proceso. Esto lleva a las demás fases a efectuar una transición al estado de *OFF* para dar lugar a la ejecución de la fase de adición.

Se propone la lógica de proceso para la fase de adición considerando una recirculación perpetua en un proceso de dosificación con requerimientos sanitarios.

Como puede observarse en los diagramas de tuberías e instrumentación, toda la tubería se encontrará inundada de material desde antes de iniciar la fase y el flujo será continuo.

Tabla XXXIV. **TAG ID de fase de adición**

TAG ID
PH2_ADD

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

3.2.3.1. Interlocks

La habilitación de lectura de los *interlocks* se realiza al momento de activar la secuencia de fase, antes de iniciar con los ajustes de los dispositivos.

Los *interlocks* propuestos para la fase de adición se definen en la tabla XXXV.

Tabla XXXV. **Interlocks de la fase de adición**

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
PH2_ADD.Interlock.ActiveLowFlow	CD-FIT-01	<p>Si durante la dosificación de material, deja de detectarse un flujo continuo a través del flujómetro CD-FIT-01 se generará el <i>interlock</i> por bajo flujo durante adición de material. Si se detecta ausencia de material se generará un <i>ABORT</i> de la fase con la activación de este <i>interlock</i>.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 1, & x < F_{Min} \\ 0, & x \geq F_{Min} \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Medición de flujo en tubería por CD – FIT – 01. <i>F_{Min}</i> = Flujo mínimo.</p>
PH2_ADD.Interlock.LowAddition	CD-FIT-01 CD-FIT-02	<p>Al finalizar la secuencia de dosificación, se realiza una comparación entre la cantidad de material dosificado y el <i>target</i> de dosificación. Si la dosificación real tiene un valor menor al solicitado, se activará el <i>interlock</i> por baja adición. Se ajusta una tolerancia permitida para la dosificación. La selección de la tolerancia se ve ligada al proceso industrial y al rango de dosificación en la receta.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 1, & x < D - T \\ 0, & x \geq D - T \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Material dosificado medido por ambos flujómetros. <i>D</i> = Target de Dosificación solicitada por el operador. <i>T</i> = Tolerancia de dosificación permitida.</p>

Continuación de la tabla XXXV.

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
PH2_ADD.Interlock.HighAddition	CD-FIT-01 CD-FIT-02	<p>Al finalizar la secuencia de dosificación, se realiza una comparación entre la cantidad de material dosificado y el <i>target</i> de dosificación. Si la dosificación real tiene un valor mayor al solicitado, se activará el <i>interlock</i> por alta adición. Se ajusta una tolerancia permitida para la dosificación. La selección de la tolerancia se ve ligada al proceso industrial y al rango de dosificación en la receta.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 0, & x < D + T \\ 1, & x \geq D + T \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Material dosificado medido por ambos flujómetros. <i>D</i> = Target de Dosificación solicitada por el operador. <i>T</i> = Tolerancia de dosificación permitida.</p>
PH2_ADD.Interlock.HighPreact	CD-VBA-01	<p>Si se solicita una dosificación menor al valor del preactuado, configurado en la válvula de dosificación, se activará el <i>interlock</i> por preactuado alto.</p> <p>Un valor muy bajo para el <i>target</i> de dosificación, comparado con el ajuste de preactuado de válvula, es imposible para el sistema de lograr, ya que la instalación física no es la adecuada.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 1, & x \leq V_{Preact} \\ 0, & x > V_{Preact} \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Target de dosificación solicitado. <i>V_{preact}</i> = Valor de preactuado configurado.</p>

Continuación de la tabla XXXV.

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
PH2_ADD.Interlock.LowTankLevel	CR-LVLT-01	<p>El sensor de nivel enviará al controlador la información del nivel de material en el interior del tanque, se ajustará un mínimo de material en el tanque, el suficiente para inundar completamente las tuberías de recirculación y sobrepasar el valor de la dosificación requerida. Si esto no se cumple, se activará el <i>interlock</i> por bajo nivel de material en tanque de recirculación.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 1, & x \leq L_{Low} \\ 0, & x > L_{Low} \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Nivel de material en Tanque CR – LVLT – 01. <i>L_{Low}</i> = Nivel mínimo de material permitido en tanque.</p>
PH2_ADD.Interlock.HighPressure01	CR-PIT-01	<p>Si la tubería del circuito de recirculación experimenta una sobrepresión, los valores captados por el transmisor de presión CR-PIT-01 sobrepasarán el umbral máximo permitido. Para ello, un <i>interlock</i> debe activarse a valores superiores de presión que las tolerables en el sistema. Si una de las válvulas manuales previas a la derivación de dosificación se encuentra cerrada, se generará sobrepresión al activar la recirculación de material.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 0, & x < P_{Max} \\ 1, & x \geq P_{Max} \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Medición de presión en tubería por CR – PIT – 01. <i>P_{Max}</i> = Presión máxima permitida en tubería.</p>

Continuación de la tabla XXXV.

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
PH2_ADD.Interlock.LowPressure01	CR-PIT-01	<p>Se ajustará un nivel mínimo de presión en la tubería de recirculación previo a la derivación de dosificación. Si la bomba CR-PMP-01 se encuentra activa y la presión no sobrepasa el nivel mínimo, se activará el <i>interlock</i> por baja presión de tubería. Si al activar la bomba, la válvula CR-VBM-01 se encuentra cerrada, la presión en la tubería de recirculación no se elevará lo suficiente.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 1, & x \leq P_{Min} \\ 0, & x > P_{Min} \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Medición de presión en tubería por CR – PIT – 01. <i>P_{Min}</i> = Presión mínima para detectar bombeo en tubería.</p>
PH2_ADD.Interlock.HighPressure02	CR-PIT-02	<p>Si la tubería del circuito de recirculación experimenta una sobrepresión, los valores captados por el transmisor de presión CR-PIT-02 sobrepasarán el umbral máximo permitido. Para ello, un <i>interlock</i> debe activarse a valores superiores de presión que las tolerables en el sistema. Si la válvula de descarga a tanque de recirculación se encuentra cerrada, se elevará la presión en el tramo de la tubería posterior al punto de dosificación.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 0, & x < P_{Max} \\ 1, & x \geq P_{Max} \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Medición de presión en tubería por CR – PIT – 02. <i>P_{Max}</i> = Presión máxima permitida en tubería.</p>

Continuación de la tabla XXXV.

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
PH2_ADD.Interlock.LowPressure02	CR-PIT-02	<p>Se ajustará un nivel mínimo de presión en la tubería de recirculación posterior a la derivación de dosificación. Si la bomba CR-PMP-01 se encuentra activa y la presión no sobrepasa el nivel mínimo, se activará el <i>interlock</i> por baja presión de tubería. Al momento de activar la dosificación, decaerá la presión en el tramo posterior a la derivación, sin embargo, un sistema de control de regulación de presión deberá activarse para nivelar nuevamente la presión en el tramo final de la tubería de recirculación, si la presión no se eleva después de un periodo de tiempo se activará el <i>interlock</i>.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 1, & x \leq P_{Min} \\ 0, & x > P_{Min} \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Medición de presión en tubería por CR – PIT – 02. <i>P_{Min}</i> = Presión mínima requerida.</p>
PH2_ADD.Interlock.LowFlow01	CD-FIT-01	<p>Al momento de la dosificación el flujo debe ser continuo y estable, los sistemas de control regularán la presión y la selección de la bomba permitirá un flujo continuo a través de la tubería. Si el sistema no detecta flujo en un periodo de tiempo después de haber activado la fase de adición, se activará el <i>interlock</i> por bajo flujo. Una de las razones por las cuales podría suceder este evento es cuando se cierran manualmente las válvulas CR-VBM-01, CR-VBM-03, CR-VBM-04 y se llama a la fase de adición, el material no logrará fluir a través de la tubería de dosificación y el flujómetro no detectará variaciones. Debido a que no ha iniciado la dosificación del producto en este punto, este tipo de <i>interlocks</i> no generan un <i>ABORT</i> de la fase.</p>

Continuación de la tabla XXXV.

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
		<p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 1, & x < F_{Min} \\ 0, & x \geq F_{Min} \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Medición de flujo en tubería por CD – FIT – 01. <i>F_{Min}</i> = Flujo mínimo.</p>
PH2_ADD.Interlock.LowFlow02	CD-FIT-02	<p>La velocidad del material dentro de la tubería debe ser estable para garantizar la medición de la cantidad de material dosificada en un periodo de tiempo. Para ello, el flujómetro CD-FIT-02 debe medir un flujo mínimo de material que será controlado con la bomba de recirculación. Los diámetros de las tuberías y sus posiciones deben de ser seleccionadas cuidadosamente para garantizar que una apertura máxima de la válvula de descarga a dosificación permita que exista flujo de material a través de la recirculación del sistema sin que la totalidad del material caiga hacia el tanque de proceso.</p> <p>Cálculo matemático:</p> $f(x) = \begin{cases} 1, & x < F_{Min} \\ 0, & x \geq F_{Min} \end{cases}$ <p>Donde:</p> <p><i>f(x)</i> = Valor del interlock en el controlador. Activado: <i>f(x)</i> = 1 Desactivado: <i>f(x)</i> = 0</p> <p><i>x</i> = Medición de flujo en tubería por CD – FIT – 02. <i>F_{Min}</i> = Flujo mínimo.</p>
PH2_ADD.Interlock.Confirmation01	CD-VBA-01	<p>Si se solicita la apertura o cierre de la válvula de dosificación CD-VBA-01 y no se recibe una confirmación con el mismo estado, se activará el <i>interlock</i> por falta de confirmación de válvula.</p>

Continuación de la tabla XXXV.

TAG ID	Equipo asociado	Descripción y condiciones de activación
<i>PH2_ADD.Interlock Confirmation02</i>	CR-VBA-01	Si se solicita la apertura o cierre de la válvula de descarga de tanque de recirculación CR-VBA-01 y no se recibe una confirmación con el mismo estado, se activará el <i>interlock</i> por falta de confirmación de válvula.
<i>PH2_ADD.Interlock Confirmation03</i>	CR-VBA-02	Si se solicita la apertura o cierre de la válvula de retorno a tanque de recirculación CR-VBA-02 y no se recibe una confirmación con el mismo estado, se activará el <i>interlock</i> por falta de confirmación de válvula.
<i>PH2_ADD.Interlock.Wait</i>	Todos los aplicables	Si el sistema se encuentra detenido o en espera por un tiempo lo suficientemente largo, se activará el <i>interlock</i> de espera. Si existe alguna latencia en la respuesta del sistema o si alguna de las etapas de la fase entra en conflicto con el resto de la secuencia, el sistema podría detenerse durante un tiempo y activará el <i>interlock</i> .
<i>PH2_ADD.Interlock.NoConnection</i>	Todos los aplicables	Si el controlador detecta falta de conexión con alguno de los dispositivos de la fase, se activará el <i>interlock</i> por falta de conexión.
<i>PH2_ADD.Interlock.EmergencyStop</i>	Todos los aplicables	Si el operador presiona manualmente el paro de emergencia del circuito, se activará el <i>interlock</i> .
<i>PH2_ADD.Interlock.Abort</i>	Todos los aplicables	Si el operador activa manualmente el botón para abortar la fase, se activará el <i>interlock</i> de aborto de fase.
<i>PH2_ADD.Interlock.Off</i>	Todos los aplicables	Se activa el interlock si el operador presiona el botón de desactivación de fase.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

Los *interlocks* que generen una falla de *HOLD* solo podrán ser activados previos a la dosificación o posterior a ella, en caso contrario, se abortará la fase.

Tabla XXXVI. Fallos de sistema en fase de adición

TAG ID de Falla	Interlocks que generan la activación
<i>PH2_ADD.Phase.Interlocked_HOLD</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. PH2_ADD.Interlock.LowAddition 2. PH2_ADD.Interlock.HighAddition 3. PH2_ADD.Interlock.LowFlow01 4. PH2_ADD.Interlock.LowFlow02 5. PH2_ADD.Interlock.NoConnection 6. PH2_ADD.Interlock.Confirmation02 7. PH2_ADD.Interlock.Confirmation03 8. PH2_ADD.Interlock.HighPreact
<i>PH2_ADD.Phase.Interlocked_ABORT</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. PH2_ADD.Interlock.ActiveLowFlow 2. PH2_ADD.Interlock.Confirmation01 3. PH2_ADD.Interlock.LowTankLevel 4. PH2_ADD.Interlock.HighPressure01 5. PH2_ADD.Interlock.HighPressure02 6. PH2_ADD.Interlock.Wait 7. PH2_ADD.Interlock.EmergencyStop 8. PH2_ADD.Interlock.LowPressure01 9. PH2_ADD.Interlock.LowPressure02 10. PH2_ADD.Interlock.Abort
<i>PH2_ADD.Phase.Interlocked_OFF</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. PH2_ADD.Interlock.Off

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

3.2.3.2. Estados y transiciones

Los estados existentes para la fase de adición con sus respectivas acciones al momento de su transición se observan en la tabla XXXVII.

Tabla XXXVII. Estados de la fase de adición

Estado	Descripción	Acción efectuada
READY	<p>En esta fase se prepara el sistema para iniciar con la activación de secuencia de fase. Configura los equipos para garantizar la recirculación de material previo a iniciar la dosificación. Lectura de Interlocks: parcialmente activada.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>LowFlow01</i> • <i>LowFlow02</i> • <i>LowTankLevel</i> • <i>HighPressure01</i> • <i>HighPressure02</i> • <i>ValvesConfirmation</i> • <i>EmergencyStop</i> • <i>Abort</i> <p>El sistema enciende la señal encargada de activar el interlock. <i>DosingPhase</i> en las fases de recirculación y alimentación.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • CR-VBA-01: abierta. • CR-PMP-01: encendida. • CR-VBA-02: abierta • CR-PIT-01 / CR-PIT-02: activos, tomando datos. • CR-LVLT-01: activo, tomando datos. • CD-VBA-01: cerrada. • CD-FIT-01: activo, tomando datos. • CD-FIT-02: activo, tomando datos. • Sistemas de control de fase: activa regulación de flujo.
RUN	<p>La fase se encuentra en ejecución y seguirá la secuencia de fase programada.</p> <p>Lectura de <i>Interlocks</i>: habilitada totalmente.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • CR-VBA-01: abierta. • CR-PMP-01: encendida. • CR-VBA-02: abierta. • CR-PIT-01 / CR-PIT-02: activos, tomando datos. • CR-LVLT-01: activo, tomando datos. • CD-VBA-01: abierta. • CD-FIT-01: activo, tomando datos. • CD-FIT-02: activo, tomando datos. • Sistemas de control de fase: todos activos.

Continuación de la tabla XXXVII.

Estado	Descripción	Acción efectuada
<p><i>DONE</i></p>	<p>Es un estado de finalización de la secuencia de fase. Indica al operador los datos finales de la dosificación si la secuencia finalizó correctamente.</p> <p>Lectura de <i>Interlocks</i>: parcialmente activada.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Off</i> 	<p>Mostrar en pantalla los datos de la dosificación realizada. No causa ningún cambio en los equipos, ya que todos se configurarán en el estado de <i>RUN</i> para retornar a los valores requeridos al finalizar la secuencia de fase. El estado <i>DONE</i> representa una dosificación dentro de especificación y una correcta ejecución de la secuencia de fase.</p>
<p><i>HOLD</i></p>	<p>La fase estará en espera ocasionada por la activación de una falla, la reactivación es manual y prosigue con la última etapa de la secuencia de fase que ejecutó. Este estado solo puede ser activado si no se ha iniciado la etapa de adición de material o si ya finalizó. Durante la etapa <i>HOLD</i>, se mantendrá la recirculación de material a través del circuito y se cerrará la válvula de descarga.</p> <p>Lectura de <i>Interlocks</i>: parcialmente activada.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>LowTankLevel</i> • <i>HighPressure01</i> • <i>HighPressure02</i> • <i>EmergencyStop</i> • <i>ValvesConfirmation</i> • <i>LowPressure01</i> • <i>LowPressure02</i> • <i>Abort</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • CR-VBA-01: abierta. • CR-PMP-01: encendida. • CR-VBA-02: abierta. • CR-PIT-01 / CR-PIT-02: activos, tomando datos. • CR-LVLT-01: activo, tomando datos. • CD-VBA-01: cerrada. • CD-FIT-01: activo, tomando datos. • CD-FIT-02: activo, tomando datos. • Sistemas de control de fase: sistema de control para regulación de flujo activado.
<p><i>ABORT</i></p>	<p>Se aborta la fase por activación de una falla. El sistema es incapaz de finalizar la secuencia de fase por la activación de un <i>interlock</i> crítico. Después de realizar las correcciones en los equipos, es necesario reiniciar todo el proceso y la secuencia comenzará desde cero. Si se aborta la fase de adición, es probable que la dosificación realizada se encuentre fuera de especificaciones. Las válvulas y la bomba tomarán el valor que les configure la fase de adición si esta se encuentra activa, en caso contrario se encontrarán cerradas y apagada la bomba.</p> <p>Lectura de <i>Interlocks</i>: parcialmente activada.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Off</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • CR-VBA-01: abierta. • CR-PMP-01: apagada. • CR-VBA-02: abierta. • CR-PIT-01 / CR-PIT-02: activos, tomando datos. • CR-LVLT-01: activo, tomando datos. • CD-VBA-01: cerrada. • CD-FIT-01: desactivado. • CD-FIT-02: desactivado. • Sistemas de control de fase: todos desactivados.

Continuación de la tabla XXXVII.

Estado	Descripción	Acción efectuada
OFF	Fase desactivada, no realiza cambios en el sistema ni se ve afectada por las condiciones del proceso. Mientras la fase se encuentre en este estado, es invisible para el controlador. El operador puede mandar a llamar la fase nuevamente para activarla y efectuar una transición al estado <i>READY</i> .	Apaga la señal encargada de activar el interlock.DosingPhase en las fases de recirculación y alimentación. No efectúa cambios adicionales en el sistema ni en la configuración de los equipos.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

La creación de botones debe cumplir con los especificados en el inciso 2.2.3.2 Estados y transiciones en la fase de adición de procesos no sanitarios. Las condiciones de transición entre estados se ligan al valor de las fallas de sistema y a la activación de los botones, ver tabla XVIII. El diagrama de transición de estados para la fase de adición se encuentra en la figura 38.

3.2.3.3. Secuencia de fase

- Etapa # 1: solicitud al operador de la cantidad de material a dosificar.
- Etapa # 2: activación de lectura de *interlocks* de fase.
- Etapa # 3: activación del sistema de regulación de flujo.
- Etapa # 4: verificación previa de *interlocks* previos a dosificación:
 - *HighPreact*
 - *LowTankLevel*
 - *HighPressure01*
 - *HighPressure02*

- *LowPressure01*
- *LowPressure02*

- Etapa # 5: activación del sistema de regulación de presión.

- Etapa # 6: desactivación del *interlock* PH2_ADD.Interlock.LowTankLevel. Este *interlock* es útil para verificar que la cantidad de material en el tanque sea la suficiente para completar la dosificación solicitada. Sin embargo, al momento que se adicione material, se disminuirá la cantidad en el tanque, esto puede originar la activación del *interlock* innecesariamente. Por este motivo, se realiza la revisión del nivel de material previo a iniciar la dosificación.

- Etapa # 7: activación del sistema de control para regulación de apertura de válvula de dosificación. Este sistema abre la válvula CD-VBA-01 e inicia la dosificación en el tanque de proceso, requiere los valores medidos por ambos flujómetros para responder con la apertura de la válvula de descarga. Al momento de la apertura de la válvula de dosificación existirá una disminución de presión en el tramo de la tubería después del punto de uso y el sistema de control para regulación de presión responderá nivelando nuevamente la presión en este tramo.

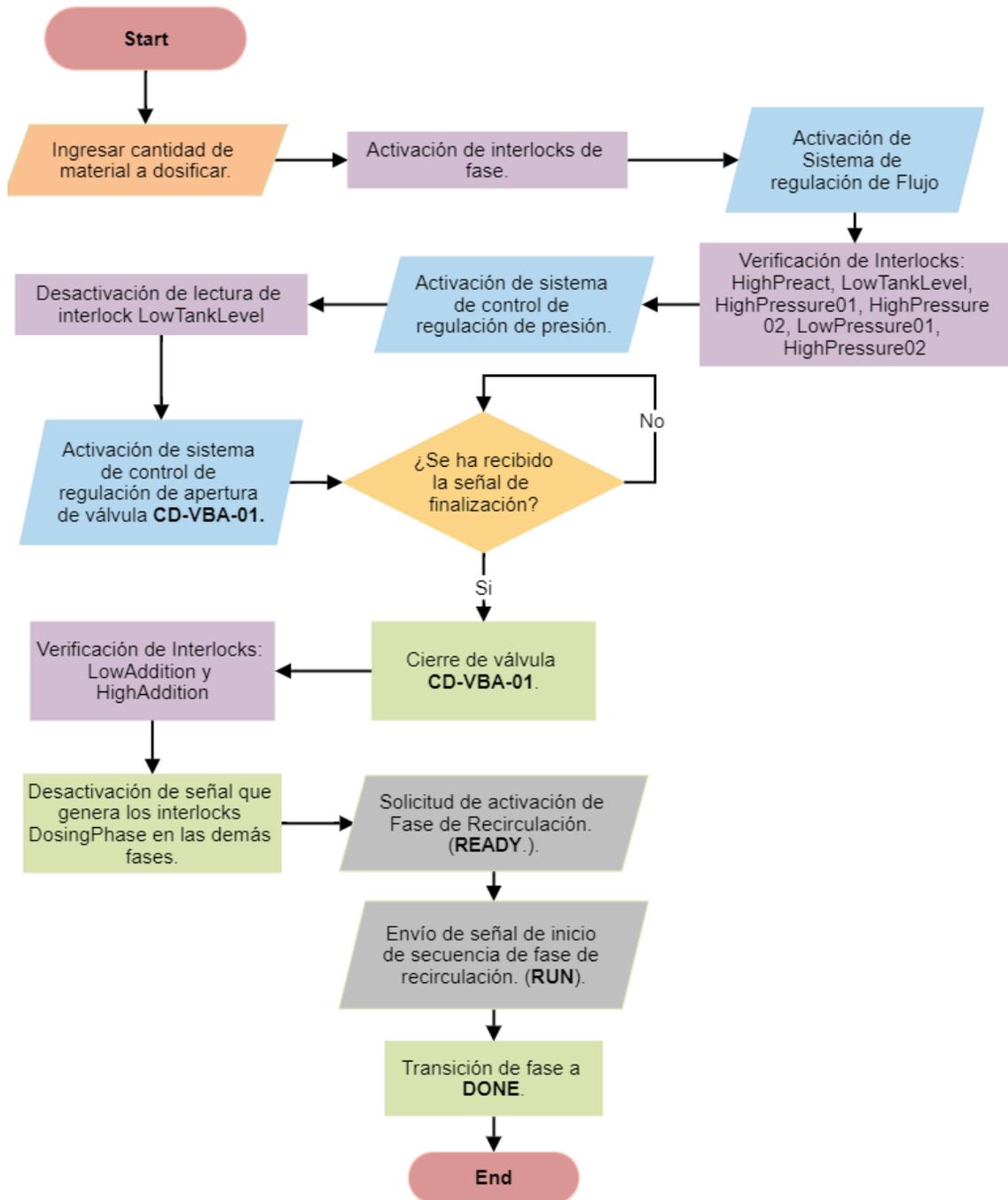
- Etapa # 8 (ejecución en bucle): comparación de dosificación solicitada contra la real para activar la señal de dosificación finalizada al terminar la adición de material.

- Etapa # 9: al finalizar la dosificación, se efectúa el cierre de la válvula CD-VBA-01.

- Etapa # 10: verificación de *interlocks* posteriores a la dosificación. Se compara el valor real de la dosificación con las tolerancias permitidas configuradas en los *interlocks* de baja adición y alta adición. Esto puede activar el estado *HOLD* para que el operador tome una decisión respecto a la dosificación realizada, por ejemplo, si es una baja adición, puede volver a correr la fase de adición con un *set point* de dosificación más bajo para complementar el valor faltante. La fase *HOLD* mantiene la recirculación de material a diferencia de la fase *ABORT*, esto permite al operador tomar un tiempo para decidir sin mantener estancado el material en las tuberías.
 - *PH2_ADD.Interlock.LowAddition*
 - *PH2_ADD.Interlock.HighAddition*
- Etapa # 11: desactivación de la señal encargada de activar el *interlock.DosingPhase* en las fases de recirculación y alimentación. Esto para poder mandar a llamar a la fase de recirculación posterior a la dosificación de material.
- Etapa # 12: solicitud de activación de fase de recirculación. La fase de recirculación se encontrará en *READY* en esta etapa.
- Etapa # 13: confirmación de inicio de la secuencia de fase de recirculación. Se efectúa una transición automática al estado *RUN* de la fase de recirculación.
- Etapa # 14: transición automática al estado *DONE* en la fase de adición.

El diagrama de flujo de la secuencia de fase puede observarse en la figura 52.

Figura 52. **Secuencia de fase de adición**



Fuente: elaboración propia, empleando Smartdraw.

3.3. Lógica de los sistemas de control

En el sistema de dosificación para procesos sanitarios, los algoritmos y sistemas de control se activan durante las secuencias de fase, sin embargo, su ejecución debe ser en paralelo a las etapas de las fases y son capaces de interactuar con ellas. Para los procesos sanitarios, la circulación continua de material se mantendrá a pesar de encontrarse en la fase de adición.

3.3.1. Control de presión con válvula de retorno a tanque

El control de presión con la válvula de retorno a tanque se activará en la fase de adición, durante la secuencia de fase. Esto se debe a que en el momento en que se abra la válvula de dosificación existirá una caída de presión que debe compensarse rápidamente con la válvula de retorno a tanque. El funcionamiento de la válvula es similar a una *back pressure*. Para la regulación de presión, se utilizará un sistema de control de tipo *PID*.

Tabla XXXVIII. **TAG ID del sistema de control**

TAG ID
SAN_CTRL_SYS_PRESSURE

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

3.3.1.1. Instrumentos y equipos involucrados

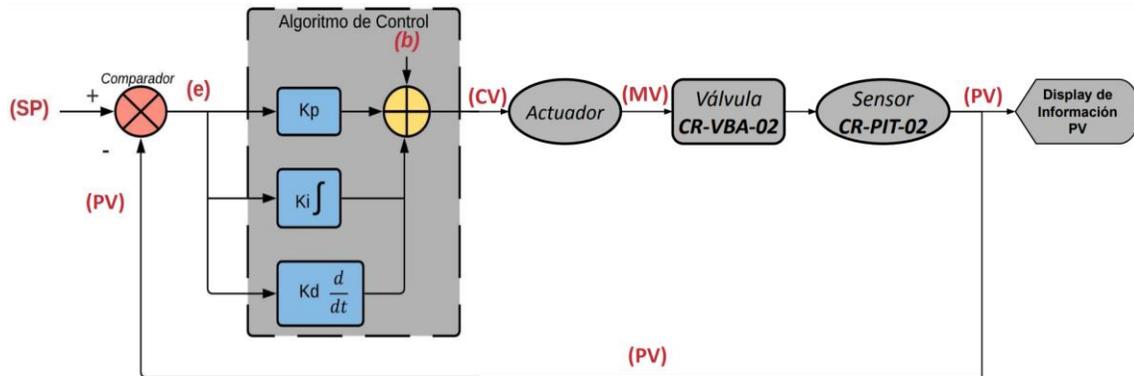
- CR-VBA-02: la válvula proporcional de retorno a tanque de recirculación variará la apertura afectando las condiciones de presión dentro de la tubería de recirculación.

- CR-PIT-02: el sensor de presión ubicado en el último tramo de la tubería previo al retorno al tanque de recirculación enviará los datos de presión al controlador para que el sistema seleccione el porcentaje de apertura de la válvula proporcional.

3.3.1.2. Señales del sistema de control

- *Process variable*: la variable de proceso es la presión captada por el sensor CR-PIT-02 y enviada periódicamente al controlador. La transmisión se hace en tiempo real para ajustar la apertura de la válvula al momento de registrar cambios de presión.
- *Set point*: la señal de referencia será el valor de presión deseado en la tubería. Mientras no se dosifique la presión se mantendrá estable en el *set point*, sin embargo, al momento de la apertura de la válvula de dosificación, se dará una caída de presión instantánea.
- *Error*: es la diferencia entre la variable de proceso y la señal de referencia. La señal de error es la utilizada por el controlador para efectuar los cálculos proporcional, integral, derivativa y obtener como resultado la variable de control.
- *Control variable*: es la señal calculada por el controlador después de procesar los datos. Esta señal se enviará al actuador de la válvula para modificar su apertura.
- *Manipulated variable*: el actuador modificará la apertura de la válvula CR-VBA-02. La variable manipulada es la enviada del actuador al accionamiento mecánico de la válvula y la apertura deseada.

Figura 53. Elementos del sistema de control PID



Fuente: elaboración propia, empleando Google Drawing.

3.3.1.3. Diagrama P&ID

Para mostrar el funcionamiento del sistema de control para regulación de presión SAN_CTRL_SYS_PRESSURE en el diagrama de tuberías e instrumentación, se utiliza el identificador de sistema de control 001.

Tabla XXXIX. Identificación de sistema de control en P&ID

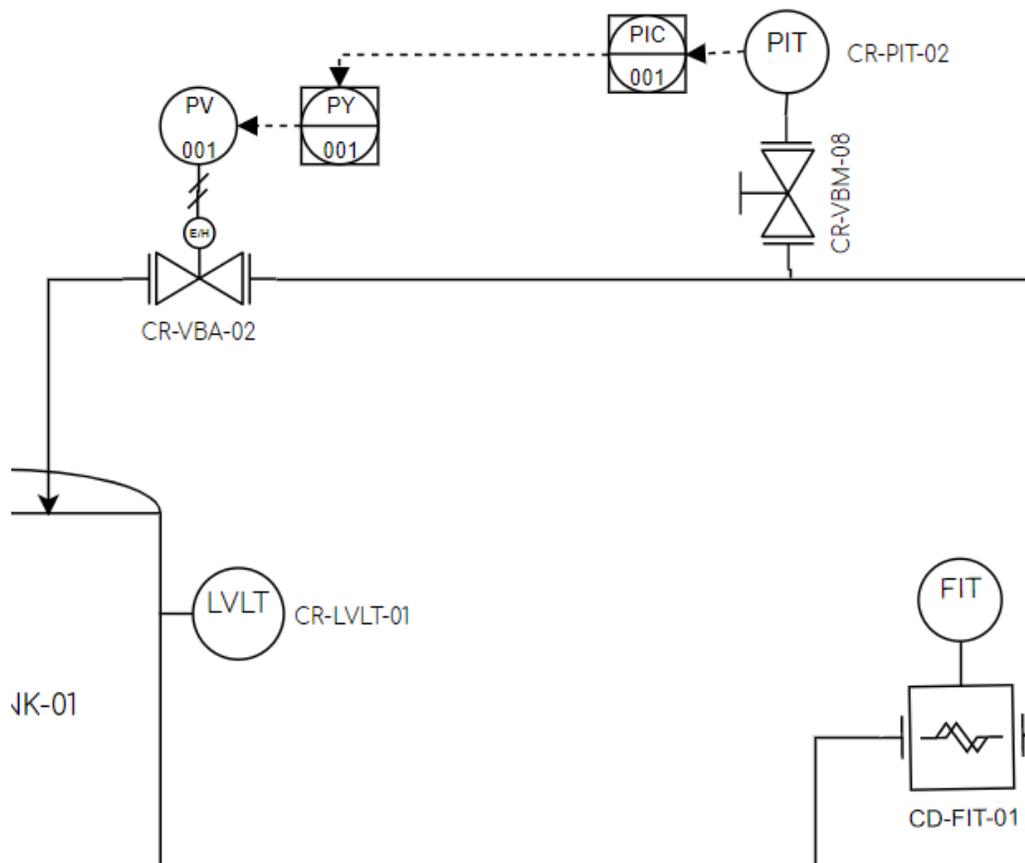
Identificador P&ID
001

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

Se muestra en la figura 54 la relación entre los equipos e instrumentos, siendo el CR-PIT-02 el sensor y transmisor de presión que envía los datos al control PIC 001 que representa al sistema de control de presión identificado

como 001. Posteriormente se analizan los datos y se realizan los cálculos PY 001, al obtener el valor calculado, se envía al PV 001 que representa al actuador de la válvula CR-VBA-02, variando su apertura y por consiguiente regulando la presión en la tubería.

Figura 54. **Diagrama P&ID con sistema de control 001**



Fuente: elaboración propia, empleando Visual Paradigm.

3.3.1.4. Condiciones de activación

Las condiciones de activación del sistema de control dependen de la secuencia de fase y del estado en el cual se encuentre la fase.

Tabla XL. **Condiciones de activación del sistema de control**

Fase	Estado de fase	Estado de sistema de control
Fase de Alimentación	Todos los estados	No relevante. La fase de alimentación no interfiere con la activación o desactivación del sistema de control.
Fase de Recirculación	<i>RUN</i>	Activado. Etapa # 8 de la secuencia de fase: activación de sistema de control para regulación de presión.
	<i>READY HOLD ABORT OFF</i>	Desactivación del Sistema de control.
Fase de Adición	<i>RUN</i>	Activado. Etapa # 5 de la secuencia de fase: activación de sistema de control para regulación de presión.
	<i>READY HOLD ABORT OFF</i>	Desactivación del Sistema de control.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

3.3.2. Control de flujo con bomba de recirculación

El control de flujo en un sistema sanitario es necesario para recircular el material a una velocidad mínima y evitar el estancamiento. El funcionamiento de la bomba de recirculación lo controla un variador de frecuencia que aumenta o disminuye la velocidad de bombeo con base al valor del flujómetro.

Tabla XLI. **TAG ID del sistema de control**

TAG ID
SAN_CTRL_SYS_FLOW

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

3.3.2.1. Instrumentos y equipos involucrados

- CD-FIT-01: el flujómetro registrará los datos de flujo previos al punto de dosificación. Al momento de la apertura de la válvula, existirá un decaimiento en el flujo posterior, sin embargo, se mantendrá el flujo constante previo a la dosificación para garantizar las condiciones necesarias en la adición de material.
- CR-PMP-01: la bomba de recirculación modificará su velocidad de bombeo según lo indicado por el variador de frecuencia CR-FV-01. Las variaciones en el comportamiento de este equipo afectan directamente el flujo en la tubería de recirculación.
- CR-FV-01: el controlador determinará los valores del variador de frecuencia a través del sistema de control de flujo. Esto permitirá aumentar o disminuir el flujo en la tubería de recirculación.

3.3.2.2. Señales del sistema de control

- *Process variable (PV)*: la variable de proceso es el flujo captado por el flujómetro CD-FIT-01. Este dato debe transmitido en tiempo real para poder realizar los ajustes a tiempo.

- *Set point (SP)*: la señal de referencia será un valor mínimo de flujo en la tubería, esto se calculará conociendo el diámetro de la tubería (d) y el valor de la velocidad mínima (v_{min}) que tendrá el material en la recirculación. El flujo mínimo (Q_{min}) se calcula con la ecuación:

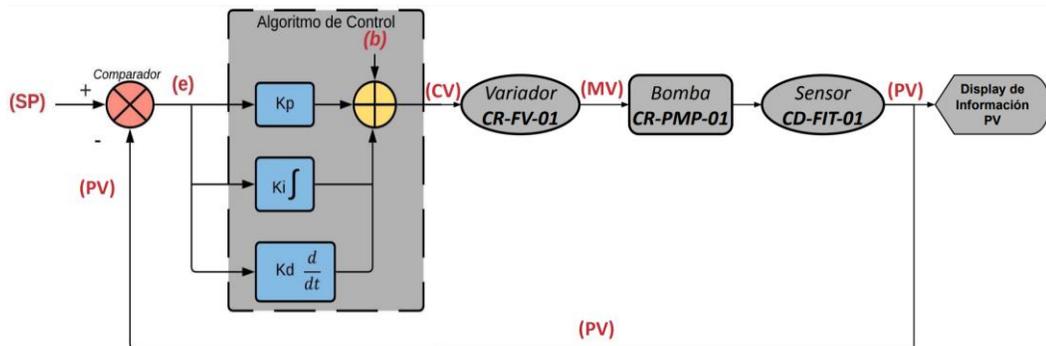
$$Q_{min} = \pi \frac{d^2}{4} * v_{min}$$

- *Error (e)*: es la diferencia entre la variable de proceso y la señal de referencia. El controlador tomará el valor recibido del sensor CD-FIT-01 y lo comparará con el valor *set point* para obtener el valor del error. Ambas variables deben poseer la misma dimensional, una discrepancia generaría datos erróneos y un sistema de control inestable. Por ejemplo, si el *set point* se calcula con velocidades mínimas de recirculación, el valor entregado por el flujómetro debe acondicionarse para tener la misma dimensional, en ese caso, una conversión de flujo a velocidad.

$$Error = Set Point - Process Variable$$

- *Control variable (CV)*: es el valor resultante después de realizar los cálculos del algoritmo de control, en este caso, PID. Este valor se enviará como señal de control para el variador de frecuencia CR-FV-01 y este modificará sus configuraciones.
- *Manipulated variable (MV)*: después que el variador de frecuencia sea modificado, la bomba CR-PMP-01 cambiará su velocidad y el flujo variará (*process variable*). Estas modificaciones en el funcionamiento de la bomba son efecto de la variable manipulada.

Figura 55. Elementos del sistema de control PID



Fuente: elaboración propia, empleando Google Drawing.

3.3.2.3. Diagrama P&ID

Para mostrar el funcionamiento del sistema de control para regulación de flujo SAN_CTRL_SYS_FLOW en el diagrama de tuberías e instrumentación, se utiliza el identificador de sistema de control 002.

Tabla XLII. Identificación de sistema de control en P&ID

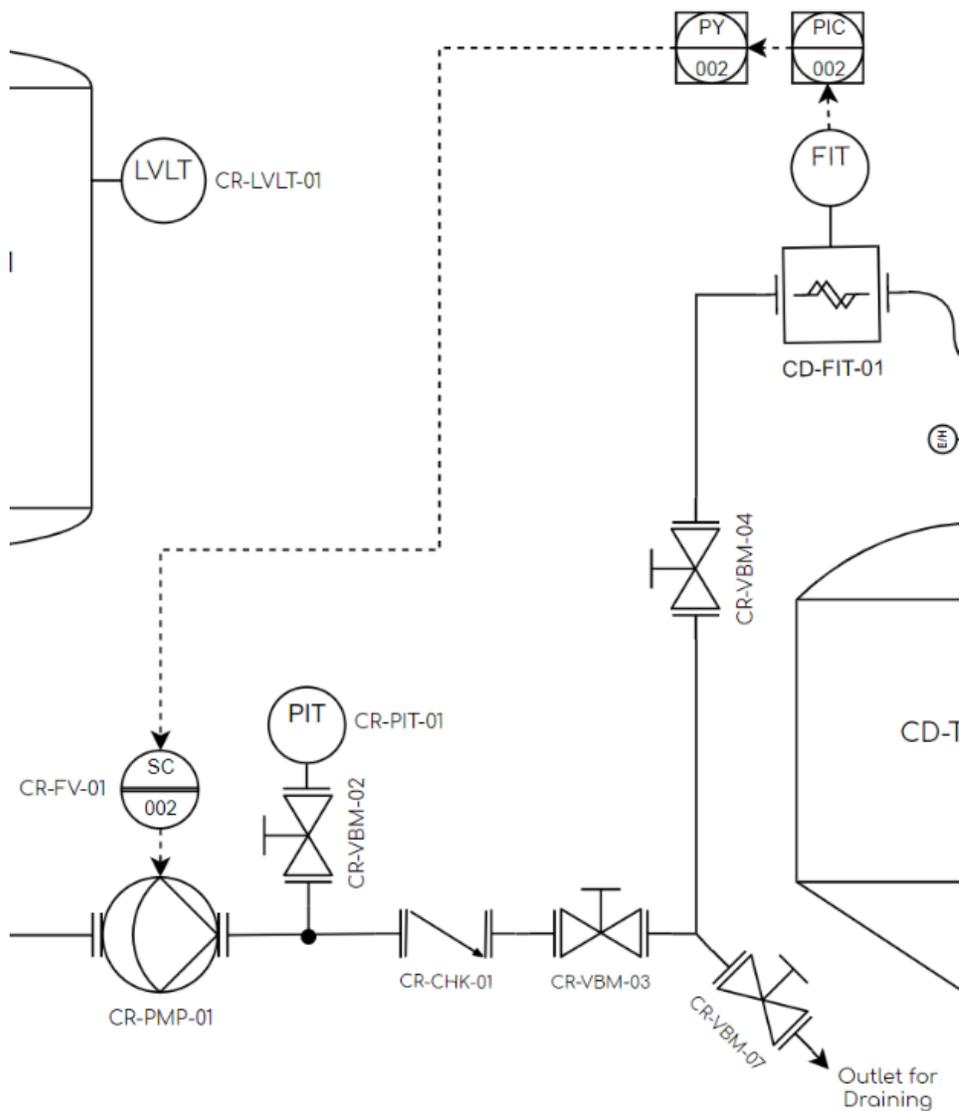
Identificador P&ID
002

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

Se muestra en la figura 56 la relación entre los equipos e instrumentos, siendo el CD-FIT-01 el sensor y transmisor de flujo que enviará los datos al control PIC 002, el cual representa al sistema de control de flujo con identificación 002. Posteriormente, se analizan los datos y se realizan los cálculos pertinentes en el PY 002, al obtener el valor calculado, se envía al SC 002 que representa al variador de frecuencia CR-FV-01, el cual interactúa

directamente con el funcionamiento de la bomba. Las variaciones de velocidad de bombeo afectan el nivel de flujo en la tubería y el sistema se reacondiciona hasta alcanzar el *set point*.

Figura 56. Diagrama P&ID con sistema de control 002



Fuente: elaboración propia, empleando Visual Paradigm.

3.3.2.4. Condiciones de activación

En la tabla XLIII se muestran las condiciones de activación para el sistema de control de flujo en procesos sanitarios.

Tabla XLIII. Condiciones de activación del sistema de control

Fase	Estado de fase	Estado de sistema de control
Fase de Alimentación	Todos los estados	No relevante. La fase de alimentación no interfiere con la activación o desactivación del sistema de control.
Fase de Recirculación	<i>RUN</i>	Activado. Etapa # 8 de la secuencia de fase: activación de sistema de control para regulación de flujo.
	<i>READY</i> <i>HOLD</i> <i>ABORT</i> <i>OFF</i>	Desactivación del Sistema de control.
Fase de Adición	<i>HOLD</i> <i>READY</i>	Activado.
	<i>RUN</i>	Activado. Etapa # 3 de la secuencia de fase: activación de sistema de control para regulación de flujo.
	<i>ABORT</i>	Desactivación del Sistema de control.
	<i>OFF</i>	No efectúa cambios en el estado del sistema de control.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

3.3.3. Regulación de apertura de válvula de dosificación

Este sistema de control regula el porcentaje de apertura de la válvula proporcional de dosificación con base a la cantidad de material que aún falta

dosificar en el punto de uso. No utiliza un sistema de control de tipo PID sino un modelo matemático simple para describir el comportamiento de la válvula. Debido a la conexión física de los dispositivos y equipos en el sistema de dosificación para procesos sanitarios, se requiere de ambos flujómetros para calcular el valor de material dosificado.

Tabla XLIV. **TAG ID del sistema de control**

TAG ID
SAN_CTRL_SYS_DOSAGE

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

3.3.3.1. Instrumentos y equipos involucrados

- CD-VBA-01: la válvula proporcional de dosificación modificará su apertura para aumentar o disminuir el paso de material al tanque de proceso.
- CD-FIT-01: el flujómetro inicial enviará los datos del totalizador al controlador para verificar la cantidad de material que ha llegado hasta el punto de uso. El dato del totalizador se tomará en tiempo real y se reiniciará cada vez que se active la fase de adición.
- CD-FIT-02: el flujómetro final enviará los datos del totalizador al controlador para verificar la cantidad de material que ha pasado el punto de uso y que continúa su trayecto por la tubería de recirculación. Lo capturado por el totalizador del flujómetro final equivale al material que no ha sido dosificado. El dato del totalizador se tomará en tiempo real y se reiniciará cada vez que se active la fase de adición.

3.3.3.2. Señales del sistema de control

- *Process variable*: la variable de proceso (*PV*) es la diferencia entre el totalizador del flujómetro final CD-FIT-02 (T_2) y el totalizador del flujómetro inicial CD-FIT-01 (T_1). Este dato debe ser captado y transmitido en tiempo real para poder realizar los ajustes adecuados.

$$PV = T_2 - T_1$$

- *Set point*: la señal de referencia será el valor ingresado por el operador en la etapa 1 de la secuencia de la fase de adición. Debe ser mayor al preactuado de la válvula o se activará el *interlock* PH2_ADD.Interlock.HighPreact.
- *Error*: es la diferencia entre la variable de proceso y la señal de referencia. El controlador tomará el valor de la variable de proceso y lo comparará con el valor *set point* ingresado por el usuario para obtener el valor del error.

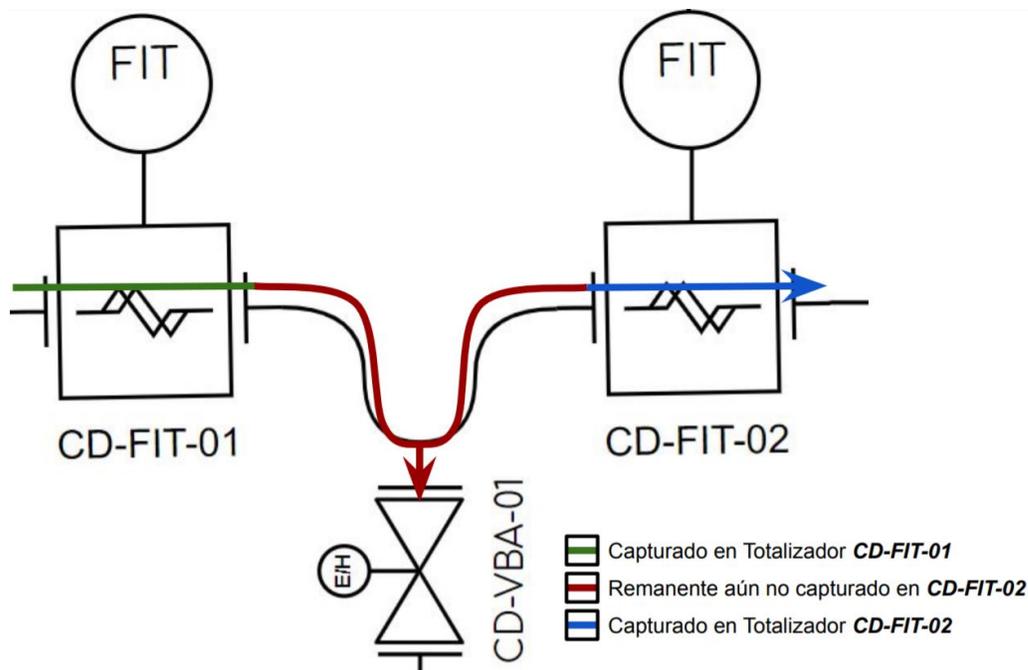
$$Error = Set Point - Process Variable$$

- *Control variable*: es el valor resultante después de realizar los cálculos del algoritmo de control. Esta señal será enviada al actuador de la válvula para que efectúe su apertura al valor solicitado por el sistema de control.
- *Manipulated variable*: la variable manipulada es la enviada del actuador al accionamiento mecánico de la válvula y la apertura deseada.

3.3.3.3. Algoritmo de control

La lógica de programación del sistema de control se aplicará a las condiciones de apertura de una válvula proporcional de bola, sin embargo, deberá adaptarse si la válvula de dosificación posee otras características. El algoritmo de control se encargará de calcular el porcentaje de material que hace falta dosificar para cumplir con la adición solicitada. Para ello, debe tomarse en cuenta que la diferencia entre los totalizadores de ambos flujómetros posee un retardo, debido a la separación entre ellos y al tamaño del sifón en el punto de uso, esto provoca una sobre adición de material debido a la transición inicial y reinicio de los totalizadores.

Figura 57. Comportamiento de totalizadores en un instante de tiempo



Fuente: elaboración propia, empleando Google Drawing.

La variación entre los totalizadores puede corregirse al realizar pruebas de aforo y asegurar que el flujo en CD-FIT-01 y la presión en la tubería se mantengan constantes. Las variables de flujo y presión se estabilizan con los sistemas de control SAN_CTRL_SYS_FLOW y SAN_CTRL_SYS_PRESSURE.

El algoritmo de control reiniciará los totalizadores de los flujómetros al iniciar la dosificación y calculará el porcentaje de material (x) que hace falta dosificar a través de la siguiente ecuación:

$$x = \left(\frac{SP - PV}{SP} \right) * 100$$

El numerador corresponde a la diferencia entre la señal de referencia y la variable de proceso, lo cual se sustituye por el error del sistema:

$$x = \left(\frac{e}{SP} \right) * 100$$

Donde x es el porcentaje de material que aún falta dosificar en el tanque de proceso. La apertura de la válvula se define con la función:

$$f(x) = \begin{cases} 100, & a < x \leq 100 \\ x, & b < x \leq a \\ b, & c < x \leq b \\ 0, & x \leq c \end{cases}$$

Donde $f(x)$ es el porcentaje de apertura de la válvula de dosificación. Pueden observarse otras variables cuyo valor dependerá de la selección del usuario después de realizar los ajustes y considerar las condiciones de operación de su sistema en particular. En la tabla XLV se presenta la descripción de las variables:

Tabla XLV. Descripción de variables de apertura de válvula

Var.	Descripción	Recomendaciones
<i>a</i>	Límite inferior del primer rango de la función a tramos para el porcentaje de apertura de válvula.	Tal como se presentó en el capítulo anterior, la apertura de la válvula de bola no es lineal, por lo cual se selecciona un valor de material faltante mayor al 50% para mantener la válvula completamente abierta. Para valores faltantes de material menores al 50% es necesario tener un mejor control del sistema para evitar sobre adiciones.
<i>b</i>	Límite inferior del segundo rango de la función a tramos y el valor tomado por la apertura de la válvula para el tercer rango de la función.	Por la forma física de la válvula de bola, es necesario mantener un porcentaje mayor en la apertura final, ya que a una apertura menor al 15% es muy difícil que el material fluya a través del espacio y el sistema se vuelve lento. Por lo general, puede utilizarse un valor mayor al 20%, sin embargo, es necesario realizar aforos para determinar el valor más adecuado.
<i>c</i>	Límite inferior del tercer rango y límite máximo para el cual el valor de la función será 0.	El preactuado de la válvula detiene la dosificación aún antes de llegar al <i>target</i> , para el caso de este sistema, las variaciones existen debido a la diferencia de captura en el tiempo entre los totalizadores de los flujómetros u otras variaciones. El preactuado ajusta el algoritmo de control a las condiciones del sistema y las variaciones que pueden llegar a existir durante la ejecución de la fase de dosificación.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

3.3.3.4. Diagrama P&ID

Para mostrar el funcionamiento del sistema de control para regulación de apertura de la válvula de dosificación SAN_CTRL_SYS_DOSAGE en el diagrama de tuberías e instrumentación, se utiliza el identificador de sistema de control 003.

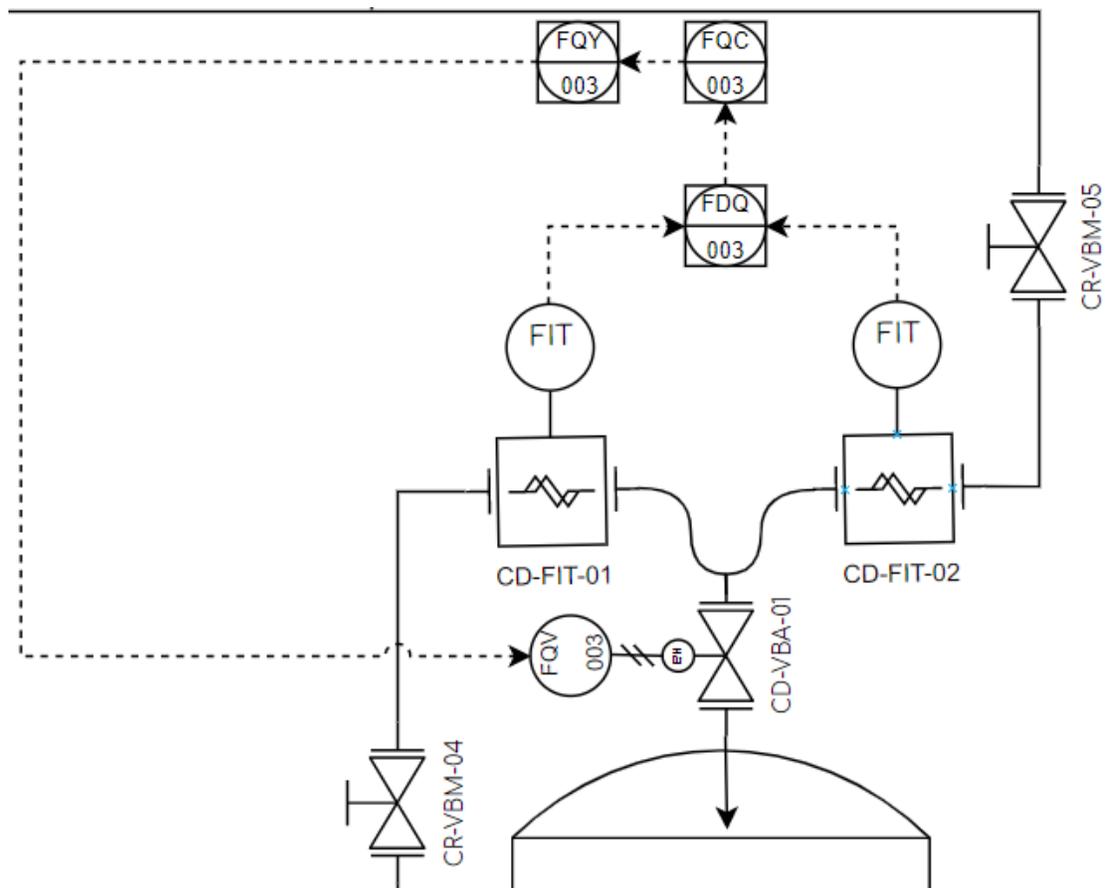
Tabla XLVI. Identificación de sistema de control en P&ID

Identificador P&ID
003

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

Se muestra en la figura 58 la relación entre los equipos e instrumentos, los totalizadores de los flujómetros CD-FIT-01 y CD-FIT-02 se comparan con el cálculo FDQ 003 esto transmitirá la cantidad de material que ha sido dosificado al control FQC 003 que representa al sistema de control identificado como 003. Posteriormente se analizan los datos y se realizan los cálculos FQY 003, al obtener el resultado, éste se envía al FQV 003 que representa al actuador de la válvula CD-VBA-01, variando su apertura durante la dosificación.

Figura 58. **Diagrama P&ID con sistema de control 003**



Fuente: elaboración propia, empleando Visual Paradigm.

3.3.3.5. Condiciones de activación

Las condiciones de activación para el sistema de control de regulación de apertura de válvula de dosificación dependen de la fase y del estado. Ver tabla XLVII.

Tabla XLVII. **Condiciones de activación del sistema de control**

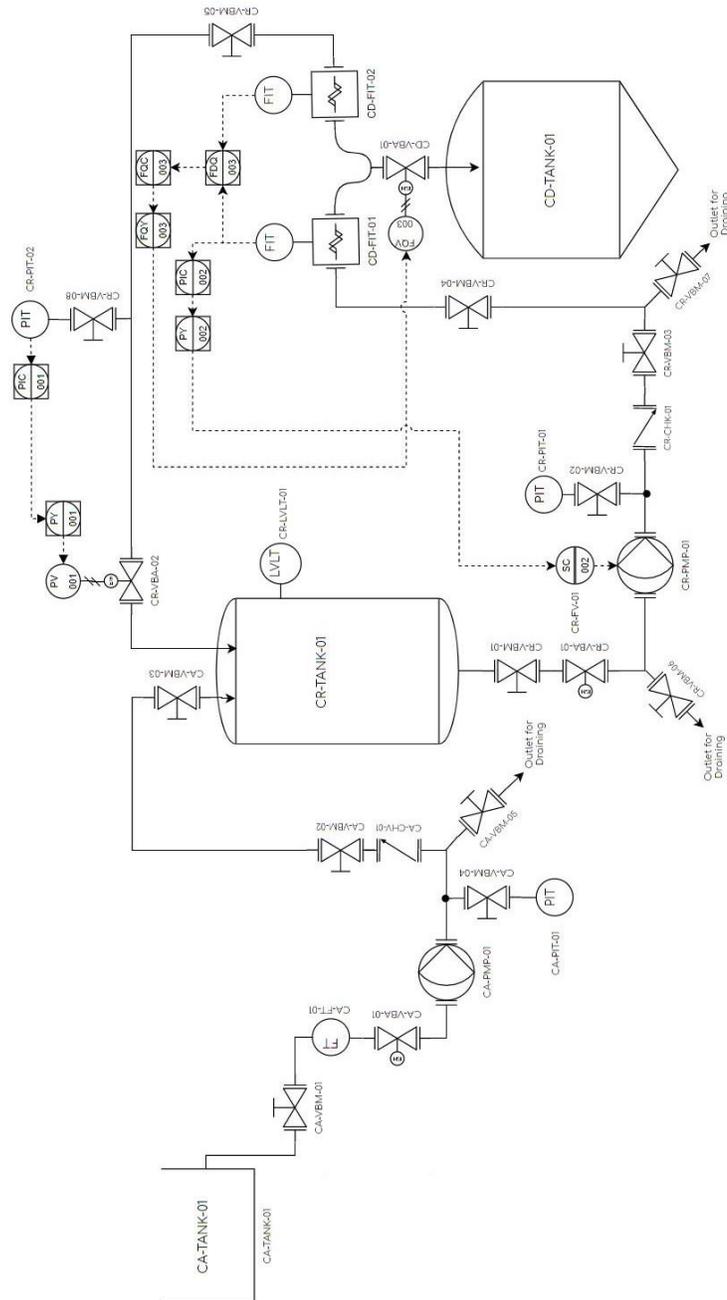
Fase	Estado de fase	Estado de sistema de control
Fase de Alimentación	Todos los estados	No relevante. La fase de alimentación no interfiere con la activación o desactivación del sistema de control.
Fase de Recirculación	Todos los estados	No relevante. La fase de alimentación no interfiere con la activación o desactivación del sistema de control.
Fase de Adición	<i>RUN</i>	Activado. Etapa # 7 de la secuencia de adición: Activación del sistema de control para regulación de apertura de válvula. Este sistema abre la válvula CD-VBA-01 e inicia la dosificación en el tanque de proceso.
	<i>READY HOLD ABORT DONE OFF</i>	Desactivación del Sistema de control.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

3.4. Diagrama final del sistema de dosificación

En la figura 59 se presenta el diagrama de tuberías e instrumentación (*P&ID*) del sistema de dosificación para procesos sanitarios. Integra el circuito de alimentación, y el circuito de recirculación y adición. El diagrama presenta los equipos, instrumentos y las conexiones de los sistemas de control.

Figura 59. **P&ID - Sistema de dosificación para procesos sanitarios**



Fuente: elaboración propia, empleando Visual Paradigm.

4. AJUSTE DE SISTEMAS DE CONTROL

Antes de realizar cualquier ajuste en los sistemas de control, es indispensable asegurar la calibración de todos los instrumentos y garantizar el correcto funcionamiento de los equipos del sistema de dosificación.

4.1. Ajuste de sistemas de control PID

Existen varias formas de sintonizar un PID, desde softwares diseñados, ecuaciones de sintonización y métodos como Ziegler-Nichols o sus variantes, como el método de Chien, Hrones y Reswick, o el método de Cohen-coon¹⁰.

Para propósitos de este trabajo de investigación, se mostrará el método de prueba y error¹¹ experimental para el ajuste del PID de los sistemas de regulación de presión y flujo. Sin embargo, cualquier otro método, como los anteriormente mencionados, son aplicables para realizar la sintonización de un PID.

4.1.1. Sintonización de PID por método heurístico

Es importante disponer de los datos de la variable de proceso en los periodos de tiempo en que se realizarán los ajustes. Una herramienta útil y ampliamente utilizada en la industria es *Wonderware Historian*, la cual

¹⁰ MANDADO, Enrique, et al. *Autómatas programables y sistemas de automatización*. p. 396.

¹¹ *Ibid.* 403.

almacena los valores de las variables de un proceso, tales como flujo, presión, temperatura, corriente, entre otros.

Si no se dispone de *Wonderware Historian*, también pueden sincronizarse los valores entregados por los flujómetros o los transmisores de presión a alguna base de datos.

Figura 60. **Logo de Aveva Historian**



Fuente: Eurotherm. *AVEVA Historian*. <https://www.eurotherm.com/solutions/engineered-systems-projects/hybrid-industries/wonderware-historian/>. Consulta: 16 de abril de 2022.

Los pasos para sintonizar un PID por el método heurístico son:

- Comprender el objetivo de control: el primer paso para sintonizar un sistema de control es reconocer cuál es la variable que se requiere controlar y los componentes que la modifican. Para el caso de los sistemas de dosificación propuestos en procesos no sanitarios y procesos sanitarios, se definen los siguientes datos:

- Procesos no sanitarios:
 - Regulación de presión 1: regulación de velocidad de la bomba CR-PMP-01 a través del variador de frecuencia CR-FV-01. La variable de proceso es la presión capturada por el instrumento CR-PIT-01. La modificación del valor en el variador de frecuencia aumentará o disminuirá la velocidad de bombeo y esto repercute en la presión del sistema. El *set point* es un valor fijo.
 - Regulación de presión 2: regulación de apertura de válvula “*back pressure*” CR-VBA-02. La variable de proceso es la presión capturada por el instrumento CR-PIT-01. La modificación en la apertura de la válvula aumentará o disminuirá la presión en el sistema. El *set point* es un valor fijo.
- Procesos sanitarios:
 - Regulación de presión: regulación de apertura de válvula “*back pressure*” CR-VBA-02. La variable de proceso es la presión capturada por el instrumento CR-PIT-02. La modificación en la apertura de la válvula aumentará o disminuirá la presión en el sistema. El *set point* es un valor fijo.
 - Regulación de flujo: regulación de velocidad de la bomba CR-PMP-01 a través del variador de frecuencia CR-FV-01. La variable de proceso es el flujo capturado por el

flujómetro CD-FIT-01. La modificación en el variador de frecuencia aumentará o disminuirá el flujo en el sistema. El *set point* es un valor fijo.

- Identificación de límites en la variable de proceso: en la sintonización, se requiere alterar la variable de proceso y observar el comportamiento del PID. Esto no tiene ningún inconveniente si se hace una sintonización simulada, sin embargo, si se sintoniza de forma experimental, se deben identificar los límites mínimos y máximos en que puede trabajar la variable de proceso para evitar un accidente. En el caso de los sistemas de regulación de presión, por ejemplo, no se puede llevar la variable de proceso (presión) a un nivel muy elevado, ya que esto podría ocasionar que las tuberías o empaques se desprendieran o algún componente se arruinara. Algunos *interlocks* del sistema evitan este tipo de inconvenientes, sin embargo, lo mejor es asegurarse que el sistema de control sea incapaz de llegar a valores muy altos o bajos de presión y flujo para no arruinar los equipos o poner en riesgo al personal.
- Pruebas experimentales en lazo abierto: para comprender el efecto de la variable de control en el sistema, se efectúan modificaciones directas de la variable de control en lazo abierto. Es importante tomar los datos de los efectos de la variable de proceso a ciertas modificaciones en la variable de control, siempre manteniéndose en el rango seguro especificado en el paso 2. Esto da un mejor reconocimiento de qué tanta variación se requiere en la variable de control para efectuar un cambio en la variable de proceso.
- Reconocimiento de las características del proceso: es necesario entender cuál es el comportamiento del proceso que se regulará para

definir qué tipo de sistema de control aplicar. La regulación de presión y de flujo requieren de un sistema de respuesta rápida. Los retardos en estos procesos pueden ocasionar perturbaciones de alta frecuencia y desestabilizar el sistema. Por este motivo, los reguladores tipo proporcional – integral (PI) son los más adecuados, ya que la acción derivativa inyecta retardos y desestabiliza este tipo de procesos.

- *Asignación del set point:* asignar el *set point* según el valor deseado en la variable de proceso. El *set point* debe pertenecer en el rango de valores permitidos para la variable de proceso según lo identificado en el paso 2. Como se puede observar, el *set point* será un valor fijo en el sistema, ya que la presión y el flujo deben mantenerse constantes.
- *Inicializar las variables del PID:* se iniciará el ajuste únicamente con la variable proporcional, asignando un valor pequeño (dentro de los límites estipulados en el paso 2) e igualando a 0 las acciones integral y derivativa, para ello, debe modificarse la constante de tiempo de integración (τ_i) a un valor muy alto y la constante de tiempo derivativa (τ_d) debe ser igualada a 0. Tal como se mencionó en el paso 4, la acción derivativa del PID se mantendrá siempre en 0 ya que no aporta estabilidad a los sistemas de regulación de presión y flujo.

$$\tau_i \rightarrow \infty$$

$$\tau_d \rightarrow 0$$

$$K_p = \text{Valor mínimo}$$

- Aumento gradual de la acción proporcional: con los datos almacenados del sensor de presión y del flujómetro, se realizarán modificaciones y aumentos graduales de la constante proporcional K_p hasta obtener una señal PV cercana al SP . Puede existir el error estacionario en este punto. El aumento de la acción proporcional aumenta la velocidad de respuesta del sistema, pero puede ocasionar inestabilidad. Graficar los datos de la variable de proceso es de mucha utilidad para entender la reacción que tiene el sistema ante cada uno de los ajustes realizados. Ya que se requiere de una respuesta rápida, la constante proporcional debe incrementarse lo suficiente, siempre y cuando el sistema se observe estable.
- Disminución gradual del tiempo de integración: para eliminar el error en estado estacionario, debe disminuirse el tiempo de integración τ_i . Valores muy pequeños del tiempo de integración producen que el sistema elimine el error estacionario mucho más rápido, sin embargo, pueden producirse oscilaciones. Debe de buscarse un valor que produzca una respuesta suficientemente rápida sin oscilaciones. Recordar que las oscilaciones se eliminan con la acción derivativa, sin embargo, no se utilizará la acción derivativa en el PID propuesto.
- Observación y reajustes: al finalizar los ajustes, debe observarse el comportamiento del sistema en periodos más prolongados para detectar variaciones inertes del proceso y la respuesta del sistema de control ante dichas variaciones. Si se observan sobre oscilaciones puede disminuirse la acción proporcional siempre y cuando se vuelva a analizar el comportamiento de la acción integral. Así mismo, si la respuesta es muy lenta pero estable, puede aumentarse el valor de la acción proporcional y reajustar la acción integral.

Por lo general, los sistemas de control PID se regulan con cambios en el valor del *set point*, sin embargo, para los PID propuestos en la regulación de presión y flujo, los valores del *set point* deben ser valores constantes. El entendimiento del proceso y del sistema de control PID son vitales para garantizar una sintonización con el método heurístico. En el método heurístico se efectúan acciones para ajustar y sintonizar el PID, sin embargo, es necesaria de la observación, comprobación y reajuste para obtener un sistema de control robusto ante perturbaciones.

4.2. Ajuste de sistemas de apertura de válvulas

Para realizar el ajuste del sistema de control de apertura de válvula de dosificación, es necesario tener sintonizados los sistemas de control PID y los instrumentos calibrados.

El primer paso para definir el sistema de control de apertura de la válvula de dosificación es realizar un reinicio de los valores de los totalizadores justo antes de realizar la apertura de válvula.

En el caso del circuito de dosificación para procesos no sanitarios, se debe descontar la cantidad de material que se encuentra en esa porción de tubería, ya que el flujómetro no podrá contabilizarlo al realizar la dosificación. Si observa la figura 28, existirá un remanente de material en la tubería entre el flujómetro y la válvula de dosificación, especialmente si el sistema se encuentra inundado. En el caso del circuito de dosificación para procesos sanitarios, existirá una diferencia por el valor descontado de ambos flujómetros, por lo que habrá un retardo entre lo que se ha dosificado y el valor contabilizado. Esto se puede observar en la figura 57.

El aforo es un método en el cual se realizarán dosificaciones con el *set point* requerido para ajustar esas porciones adicionales de material. Lo ideal es que la válvula de dosificación se cierre antes de llegar al *set point* para que el remanente que inunda la tubería antes de abrir la válvula complete la totalidad de la dosificación requerida. El cierre de la válvula siempre sucederá antes de llegar al *set point*, esto se conoce como preactuado de válvula. El preactuado ya se encuentra incluido en la ecuación propuesta para el sistema de apertura de válvula:

$$f(x) = \begin{cases} 100, & a < x \leq 100 \\ x, & b < x \leq a \\ b, & c < x \leq b \\ 0, & x \leq c \end{cases}$$

La condición en la selección de los valores de las variables a, b y c se observan en la tabla XLVIII.

Tabla XLVIII. **Condiciones de los valores de la función de apertura**

Variable	Efecto	Restricción
a	Define el límite inferior en el cual la válvula estará abierta al máximo posible.	$a \leq 100$
b	Define dos características: <ul style="list-style-type: none"> • El límite inferior en el cual la válvula se igualará al valor del porcentaje faltante en dosificación. • El porcentaje mínimo de apertura que tendrá la válvula en el último rango. 	$b < a$
c	Define el valor de preactuado de la válvula.	$0 \leq c < b$

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

Para realizar los aforos, se dosifica el material, se toman los valores del totalizador del flujómetro y también se hace una medición de la cantidad de material dosificada con otro instrumento, puede ser una balanza o una celda de carga. El *set point* no necesariamente debe ser el valor real del proceso, pueden ser valores más pequeños, siempre y cuando, el remanente de la tubería sea menor a la cantidad de material solicitada. Se presenta la tabla con los pasos y observaciones en los aforos para ajustar las variables del sistema de control.

Tabla XLIX. Pasos para ajustar el sistema con aforos

Paso	Observación	Descripción	Ajuste de Variable
Inicializar variables	No hay observaciones, primer aforo.	Se inicializarán las variables para ajustarlas conforme se afora.	Se recomiendan los siguientes valores iniciales en las variables: $a = 80$ $b = 40$ $c = 0$
Ajustar la variable c .	Observar la cantidad de material que se encuentra entre el flujómetro y la válvula. Al momento de realizar los aforos siempre caerá una cantidad mayor al solicitado.	La variable c inicialmente es 0, por ello, no se está capturando el remanente del sistema. Puede repetir el paso si sigue observando variaciones al final de la dosificación.	Aumentar el valor de la variable c de la siguiente forma: $c = \frac{v - SP}{SP} * 100$ Donde: v : Cantidad real de material dosificado al final del proceso. Medido con un instrumento externo. SP : <i>set point</i> solicitado.
Ajustar la variable b .	El sistema ya no dosifica material, aún hace falta para llegar a la cantidad deseada.	El porcentaje mínimo de apertura es muy bajo. Las válvulas de bola requieren al menos un 15% de apertura final para que exista flujo, sin embargo, esto dependerá de la densidad del material.	Aumentar gradualmente el valor de la variable b siempre y cuando sea menor a la variable a .

Continuación de la tabla XLIX.

Paso	Observación	Descripción	Ajuste de Variable
Ajustar la variable <i>b</i> .	El último tramo de dosificación es muy rápido y cae más material del que debería.	El porcentaje mínimo de apertura es muy alto. La válvula deja pasar demasiado material y el control es inestable.	Disminuir gradualmente el valor de la variable <i>b</i> siempre y cuando sea mayor al valor de preactuado <i>c</i> .
Ajustar la variable <i>a</i> .	El sistema dosifica muy rápido más de la mitad del material, la válvula responde muy lento en su cierre.	El porcentaje de apertura máxima es muy alto para los valores del <i>set point</i> .	Aumentar gradualmente el valor de la variable <i>a</i> siempre que sea menor a 100.
	El sistema es muy tardado en dosificar al menos la mitad del material.	El porcentaje de apertura máxima es muy bajo para los valores del <i>set point</i> .	Disminuir gradualmente el valor de la variable <i>a</i> siempre y cuando sea mayor al valor de <i>b</i> .

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

El ajuste de las variables según la tabla XLIX no necesariamente sucederá una vez. Al momento de modificar todas las variables, las condiciones del sistema cambiarán y deben realizarse nuevamente aforos para confirmar si se requieren nuevos ajustes.

5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL PROCESO PARA VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN

5.1. Control estadístico de procesos

El control estadístico de procesos¹² es la utilización de herramientas y técnicas estadísticas para determinar el control de un método o proceso de producción. Es utilizado en el área de control de calidad con el fin de garantizar el funcionamiento de sus sistemas y una producción que corresponda a los requerimientos y especificaciones necesarios para su liberación. En este trabajo se definirán superficialmente algunos de los análisis estadísticos de medición de capacidad y estabilidad de un proceso asumiendo una distribución normal, si requiere de un análisis más profundo o el proceso no corresponde a una distribución normal, se recomienda investigar sobre estadística de control de calidad.

En estadística, la variación es una medida de dispersión de los datos respecto a la media¹³. La capacidad de un proceso es el valor de la variabilidad de las salidas respecto a una característica de calidad específica. Dicha medida se categoriza para definir si la característica de calidad es satisfactoria o no. La variable de salida del sistema de dosificación es la cantidad de material adicionado en el tanque de proceso y la característica de calidad sobre la cual se realizará el análisis, es el peso del material adicionado. Para que el sistema

¹² PASCAL, Oscar, et al. *Introducción a la ingeniería de la calidad*. p. 165.

¹³ OAKLAND, John. *Statistical process control*. p. 85.

demuestre su funcionamiento de forma satisfactoria, debe cumplir con las especificaciones de tolerancia de la receta.

Para que un proceso sea apto a los análisis que se presentarán en el desarrollo del capítulo, debe cumplir con un nivel suficiente de estabilidad a lo largo del tiempo. Este tipo de procesos requieren una media y desviación típicas constantes o con variaciones bajas que puedan predecirse.

5.1.1. Muestreo de datos

Con el fin de analizar el proceso, se requieren de datos históricos que representen su comportamiento durante un lapso suficiente para que sea estadísticamente representativo. Según Oakland¹⁴, la selección del tamaño de la muestra y la frecuencia de muestreo no tiene una regla general, y depende mucho del tipo de proceso. Sin embargo, él recomienda que la frecuencia de toma de datos en el arranque del sistema sea alta para poder evaluar su funcionamiento, al confirmar que el proceso se encuentra en control, puede reducirse dicha frecuencia. Es preferible un mínimo de 4 datos para que sea estadísticamente representativo, sin embargo, si el tamaño de la muestra se incrementa, el análisis es más sensible y detectará variaciones más pequeñas en el proceso. En el caso del sistema de dosificación, siendo un proceso en etapa de arranque, se tendrá que definir la cantidad de muestras con base a las posibles dosificaciones que pueden hacerse en el proceso industrial. Si se modifica o ajusta alguno de los parámetros del sistema de dosificación, el análisis estadístico debe realizarse nuevamente ya que las condiciones han cambiado. Así mismo, aunque los resultados sean satisfactorios después de la etapa de arranque, el análisis de proceso debe ser recurrente para comprender

¹⁴ OAKLAND, John. *Statistical process control*. p. 123.

cualquier variación adicional o inconvenientes en el sistema que deban ser reajustados.

Para analizar el proceso, es de utilidad medir los datos de dosificación en subgrupos, tomando en periodos cortos de tiempo los datos. Por ejemplo, pueden hacerse subgrupos de datos diarios, tomando el valor que se dosificó en cada accionamiento del sistema en un día, ya que las condiciones son similares, en temperatura, presión, humedad, entre otros. En un mes podrían tenerse alrededor de 20 subgrupos de datos, útiles para entender el comportamiento del proceso a largo plazo.

5.1.2. Variabilidad de procesos a corto plazo

Para que un proceso se considere capaz de cumplir con las especificaciones de producto, la variación natural a corto plazo debe ser menor que la variación tolerada en producción.

En un sistema de dosificación, la variación natural del sistema es el resultado de la suma de los errores producidos por las configuraciones y ajustes de los sistemas de control, la calibración de instrumentos, el funcionamiento de las bombas, el trayecto del material a través de las tuberías, el accionamiento de válvulas, y muchos otros aspectos internos. Este error debe ser menor a los límites tolerables del material a dosificar según la receta del producto. Si la sumatoria de todas las variaciones intrínsecas del sistema de dosificación fuera mayor al rango límite de dosificación del material, entonces, el proceso es incapaz de cumplir con las especificaciones y requerirá de ajustes y calibraciones para disminuir su variabilidad, o bien, si fuera necesario, ampliar los rangos de tolerancia del proceso.

La variabilidad a corto plazo se puede calcular con datos tomados en periodos cortos de tiempo donde no existan alteraciones externas. Las muestras, por lo general, son los subgrupos que presentan condiciones similares entre los datos. Con este análisis se obtiene una captura de lo mejor que se puede esperar de un proceso analizando únicamente la variabilidad ocasionada por sus mismos componentes y ajustes. La capacidad de un proceso es una medida que representa su variabilidad natural e intrínseca.

El índice C_p es un indicador de la capacidad potencial de un proceso según sus resultados a corto plazo y se mide de la siguiente forma:

$$C_p = \frac{T_s - T_i}{6\hat{\sigma}}$$

Donde T_s y T_i son la tolerancia superior e inferior del proceso, $\hat{\sigma}$ es la desviación estándar estimada, la cual se calcula con la ecuación:

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2}$$

El dato d_2 es una constante cuyo valor se obtiene según la cantidad de muestras que posea el subgrupo de datos, ver tabla L:

Tabla L. **Valores de d_2**

N	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d_2	1.13	1.69	2.06	2.33	1.53	2.70	2.85	2.97	3.08

Fuente: PASCAL, Oscar; PELAYO, Marcelo; Serra, Diego; CASALINS, Marcos. *Introducción a la Ingeniería de la Calidad*. p. 183.

El índice de capacidad C_p solo efectúa una comparación de la variabilidad del proceso contra las tolerancias permitidas, sin embargo, no toma en cuenta qué tan centrado se encuentra en el punto objetivo. Por lo cual, es incapaz de detectar si los resultados estarán fuera de especificaciones por un desajuste del centro. La interpretación del índice de capacidad se muestra en la tabla LI:

Tabla LI. **Valores de C_p y su interpretación**

Valor de C_p	Categoría del Proceso	Acción (Si el proceso está centrado)
$C_p \geq 2$	Clase Mundial	Se tiene calidad 6 Sigma. Alto nivel de confiabilidad.
$C_p > 1.33$	Cat. 1	Proceso aceptable. Baja probabilidad de no conformidad en proceso.
$1 < C_p \leq 1.33$	Cat. 2	Parcialmente adecuado, requiere de un control estricto ya que cualquier variación adicional sobre el proceso puede producir un resultado fuera de especificación.
$0.67 < C_p \leq 1$	Cat. 3	Proceso no capaz. Es necesario un análisis del proceso y modificaciones para alcanzar la calidad satisfactoria.
$C_p \leq 0.67$	Cat. 4	Proceso no capaz. Indispensable realizar modificaciones serias al proceso.

Fuente: GUTIÉRREZ, Humberto; SALAZAR, Román. *Control estadístico de calidad y seis sigma*. p. 102.

Para incluir el centrado de datos en el análisis estadístico, se evalúa por separado el cumplimiento de la tolerancia inferior y la superior, a través de los índices C_{pi} y C_{ps} , involucrando la media aritmética de las muestras. Los índices de capacidad inferior y superior se calculan a través de las ecuaciones:

$$C_{pi} = \frac{\mu - T_i}{3\hat{\sigma}}$$

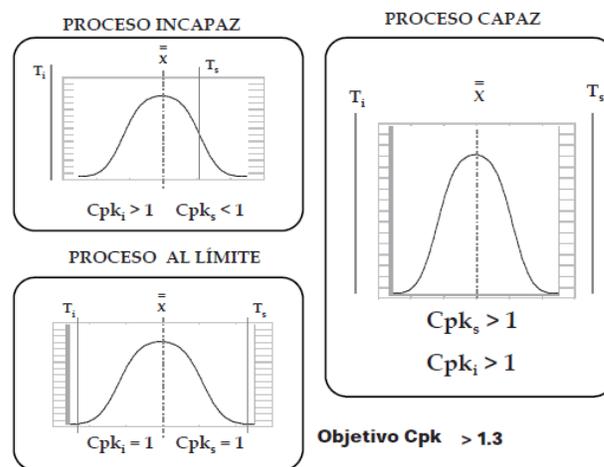
$$C_{ps} = \frac{T_s - \mu}{3\hat{\sigma}}$$

El índice C_{pk} se le conoce como “*índice de capacidad real del proceso*”¹⁵ y es la versión del índice de capacidad que toma en cuenta descentrados del proceso en el análisis. El índice C_{pk} se calcula tomando el mínimo de los valores resultantes de los índices de capacidad inferior y superior.

$$C_{pk} = \text{Min}[C_{pi}, C_{ps}]$$

El índice C_{pk} siempre es menor o igual al índice C_p . Si el valor de C_{pk} es mucho menor al valor de C_p , es necesario un ajuste del proceso por descentrado. Para valores de C_{pk} iguales o menores a 0, indica que la media del proceso está completamente fuera de especificaciones.

Figura 61. **Ejemplo de distribución normal con distintos valores C_{pk}**



Fuente: PASCAL, Oscar; PELAYO, Marcelo; SERRA, Diego; CASALINS, Marcos. *Introducción a la ingeniería de la calidad*. p. 199.

¹⁵ GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto; DE LA VARA SALAZAR, Román. *Control estadístico de calidad y Seis Sigma*. p. 104.

5.1.3. Variabilidad de procesos a largo plazo

La variabilidad de un proceso a largo plazo incluye todos aquellos errores inyectados al sistema por efectos externos a él. La variabilidad a largo plazo se calcula con los datos de todos los subgrupos de la muestra en periodos de tiempo largos para incluir todo aquello que pueda llegar a afectar el desempeño.

El índice P_p es un indicador del desempeño potencial del proceso según sus resultados a largo plazo y se mide de la siguiente forma:

$$P_p = \frac{T_s - T_i}{6\sigma_L}$$

Donde T_s y T_i son la tolerancia superior e inferior del proceso, σ_L es la desviación estándar de largo plazo. El índice P_p no considera el descentrado de los datos, por ello, similar a los índices de capacidad, existe el índice de desempeño real P_{pk} que se calcula tomando el valor mínimo de los índices P_{pi} y P_{ps} .

$$P_{pi} = \frac{\mu - T_i}{3\sigma_L}$$

$$P_{ps} = \frac{T_s - \mu}{3\sigma_L}$$

$$P_{pk} = \text{Min}[P_{pi}, P_{ps}]$$

Los índices de desempeño son similares a los índices de capacidad, tomando en cuenta una variación del proceso a largo plazo.

Tabla LII. **Utilización de índices de capacidad y desempeño**

Aplicación	Análisis estadístico	Descripción
Introducción de un nuevo sistema y/o modificación de parámetros y ajustes.	Capacidad de proceso: C_{pk}	El índice de capacidad permite analizar el comportamiento del proceso tomando en cuenta sus variaciones internas. Para realizar ajustes de parámetros y modificaciones, o al realizar el arranque del sistema de dosificación debe analizarse con base a los índices de capacidad.
Evaluación continua de desempeño de proceso	Desempeño de proceso: P_{pk}	El índice de desempeño es una herramienta que involucra el análisis del comportamiento del proceso incluyendo sus variaciones internas y externas. Es útil para evaluar a largo plazo el comportamiento del proceso y realizar mejoras dentro del sistema como por fuera. Se recomienda hacer un análisis continuo permanente para garantizar un correcto desempeño del sistema de dosificación a largo plazo.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word 2019.

CONCLUSIONES

1. Para que un sistema de dosificación sea robusto, es necesaria la intervención de instrumentos y equipos adecuadamente seleccionados, tales como, transmisores de presión, válvulas, bombas, tanques y flujómetros, entre otros. Adicional a ello, deben de incluirse sistemas de control para regular las condiciones internas del proceso y garantizar un funcionamiento confiable y preciso.
2. El sistema de dosificación propuesto para procesos no sanitarios posee suficientes controles para estabilizar las condiciones internas del proceso y garantizar una dosificación precisa y controlada. Esto se alcanzó al diseñar la arquitectura del sistema de dosificación incluyendo tres circuitos; alimentación, recirculación y dosificación, regulando la dosificación de material con flujómetros. Se definió la lógica de control del sistema en tres fases considerando una recirculación interrumpida de material e incluyendo dos sistemas de control de presión con funcionamiento intercalado y un sistema de control de dosificación de material, regulado por la apertura de la válvula.
3. El sistema de dosificación propuesto integra los controles adecuados para mantener un flujo mínimo de material dentro de las tuberías y para estabilizar las condiciones internas, garantizando una dosificación precisa, controlada y acorde a los requerimientos sanitarios del proceso. Esto se alcanzó al diseñar la arquitectura del sistema de dosificación incluyendo un circuito de alimentación y uno de recirculación, regulando la dosificación de material con flujómetros. Se definió la lógica de control

del sistema en tres fases considerando una recirculación perpetua para evitar el estancamiento y contaminación de material, se incluyó un sistema de control de presión con válvula de retorno, un sistema de control de flujo dentro de las tuberías y un sistema de control para la dosificación de material, regulado por la apertura de la válvula.

4. Se propuso los lineamientos para el ajuste de los sistemas de control PID a través del método heurístico, integrando los pasos necesarios para realizar modificaciones controladas de las constantes proporcional e integral hasta observar la estabilidad en la regulación de variables. Se determinó el método para realizar el ajuste de los sistemas de apertura de válvulas integrando pruebas de aforo, para definir el preactuado y porcentajes de apertura máxima y mínima, por medio de la observación directa.
5. Se propuso utilizar los índices de capacidad de proceso a corto y largo plazo como indicadores del rendimiento del sistema de dosificación. Se definió el tamaño de muestra mínimo de 4 datos para que los resultados sean estadísticamente representativos y puedan tomarse acciones correctivas en los ajustes del sistema de dosificación, sin embargo, la selección del tamaño de la muestra dependerá mayormente del proceso.

RECOMENDACIONES

1. Revisar los manuales de los equipos para determinar la frecuencia de lubricación y cambio de acoplamientos en la operación normal del sistema. Las bombas deben tener un plan de mantenimiento que garantice un buen funcionamiento a lo largo del tiempo.
2. Asegurar la calibración correcta de los instrumentos antes de realizar cualquier ajuste en los sistemas de control. La calibración también debe ejecutarse periódicamente según las hojas de especificación de los dispositivos.
3. Investigar cuál es el diámetro de la tubería óptimo para las condiciones del proceso de dosificación específico de su planta de producción.
4. Instalar un tanque de alimentación para el sistema de alimentación con un sistema de recirculación independiente, o utilizar un tonel o un tanque IBC que se vacíe completamente para alimentar el material al tanque de recirculación, esto para evitar la contaminación del material en procesos sanitarios. Lo ideal es no mantener el material estancado en ninguna parte del sistema.
5. Utilizar el índice de capacidad a corto plazo para realizar la validación del funcionamiento del sistema de dosificación después de efectuar cualquier ajuste o calibración de los equipos. El índice de capacidad a largo plazo es útil para llevar un control mensual de la variabilidad del proceso y definir si se requiere alguna corrección en el sistema.

6. Este trabajo está dirigido esencialmente al ingeniero encargado de diseñar un sistema de dosificación en una planta industrial, sin embargo, es indispensable involucrar a los proveedores e ingenieros encargados de la instalación y programación para su correcto funcionamiento.

7. Al realizar el diseño del sistema de dosificación, debe iniciar con la definición de todas las variables del proceso y entender las necesidades de su planta industrial. Definir el rango de dosificación, tipo de material, viscosidades y demás características para poder seleccionar adecuadamente los instrumentos, tuberías y equipos.

BIBLIOGRAFÍA

1. BALLESTEROS PANCHE, Jairo Alberto; AVELLA BELTRÁN, Miller Andrés. *Automatización del proceso de dosificación de materias primas en la co-extrusión de películas plásticas*. Trabajo de graduación de Especialización en Instrumentación Electrónica. Facultad de Ingeniería, Universidad de Santo Tomas, 2014. 105 p.
2. BELTRAN SÁNCHEZ, Jairo Andrés; CEPEDA SÁNCHEZ, José Luis. *Automatización de una máquina dosificadora para dosis pequeñas de líquidos en la empresa Fuller Pinto*. Trabajo de graduación de Ing. Electrónica. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Buenaventura, 2008. 82 p.
3. Control Real Español. *P&ID Diagramas de Tuberías e Instrumentación*. [en línea]. <<https://controlreal.com/es/diagramas-de-tuberias-e-instrumentacion-pid>>. [Consulta: febrero 2022].
4. COOPER, William; HELFRICK, Albert. *Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición*. 1a ed. México: Prentice Hall Hispanoamérica, S.A., 1991. 450 p.
5. CREUS, Antonio. *Instrumentación industrial*. 8a ed. México: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., 2011. 792 p.

6. DEL VALLE GUTIÉRREZ, Marllelis; ITURRALDE, Sadi. *Fundamentos básicos de instrumentación y control*. 1a ed. Ecuador: UPSE, 2017. 127 p.
7. FLOYD, Thomas. *Dispositivos electrónicos*. 8a ed. México: Pearson Prentice Hall, 2008. 1 008 p.
8. GRM Válvulas e Instrumentación. *¿Cómo funciona una válvula de aguja?* [en línea]. <<https://www.grm.com.es/es/project/como-funciona-una-valvula-de-aguja/>>. [Consulta: febrero 2022].
9. GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto; DE LA VARA SALAZAR, Román. *Control estadístico de calidad y seis Sigma*. 2a ed. México: McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A. de C.V., 2009. 502 p.
10. JÁCOME BRIONES, Gabriel Alejandro; SOLÍS RIVERA, Pedro José. *Automatización de dosificadora de químicos N2 aplicado a la empresa Dupocsa*. Trabajo de graduación Ing. Electrónica. Facultad de Ingeniería, Universidad Politécnica Salesiana, 2013. 176 p.
11. KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, Steven. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. 5a ed. México: Pearson Prentice Hall, 2008. 1 328 p.
12. KUO, Benjamín. *Sistemas de control automático*. 7a ed. México: Prentice Hall Hispanoamérica, S.A., 1997. 931 p.

13. LEDESMA HURTADO, Andrés Mauricio; ORTEGA DAZA, Jesús Hernando. *Automatización del proceso de dosificación, molienda y gestión de materias primas de alimentos balanceados*. Trabajo de graduación Ing. Mecatrónica. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Occidente, 2017. 127 p.
14. MANDADO, Enrique, et al. *Autómatas programables y sistemas de automatización*. 2a ed. España: Marcombo, S.A., 2009. 1085 p.
15. OAKLAND, John. *Statistical process control*. 5a ed. Inglaterra: Butterworth - Heinemann, 2003. 460 p.
16. PARRA ROSERO, Pablo. *Análisis descriptivo de procesos industriales en ingeniería industrial*. 1a ed. Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana, 2017. 259 p.
17. PASCAL, Oscar, et al. *Introducción a la ingeniería de la calidad*. 1a ed. Argentina: Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Facultad de Ingeniería, 2010. 282 p.
18. SAN JUAN, Danahé. *Golpe de Ariete. Consecuencias y prevenciones*. [en línea]. <<https://0grados.com.mx/golpe-de-ariete-consecuencias-y-prevenciones/>>. [Consulta: febrero 2022].
19. SILVA VÁSQUEZ, Wilson José. *Ingeniería y procesos de manufactura I*. 1a ed. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería Editorial Universitaria, 2012. 260 p.

20. SMITH, Steven. *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*. 2a ed. Estados Unidos: California Technical Publishing, 1999. 645 p.
21. *Válvulas de bloqueo y válvulas de caudal hidráulicas*. [en línea]. <<http://informefebrerotanquehidraulico828826.blogspot.com/2015/04/valvulas-de-bloqueo-y-valvulas-de.html>>. [Consulta: febrero 2022].
22. VELOZ VARGAS, Diego Enrique; VELOZ VARGAS, Reynaldo David. *Diseño e implementación de una estación de dosificación de productos a granel para prácticas de automatismo industrial*. Proyecto de titulación Ing. Electrónica. Facultad de Ingeniería, Universidad Politécnica Salesiana, 2015. 147 p.
23. VILLAJULCA, José Carlos. *Diferentes ecuaciones de controladores PID*. [en línea]. <<https://instrumentacionycontrol.net/diferentes-ecuaciones-de-controladores-pid/>>. [Consulta: abril 2022].
24. _____. *El caos en los controladores PID comerciales*. [en línea]. <<https://instrumentacionycontrol.net/el-caos-en-los-controladores-pid-comerciales/>>. [Consulta: abril 2022].
25. _____. *El control «perfecto» con un PID*. [en línea]. <<https://instrumentacionycontrol.net/el-control-perfecto-con-un-pid/>>. [Consulta: abril 2022].
26. _____. *El problema de offset en controladores proporcionales: Un análisis detallado*. [en línea]. <<https://instrumentacionycontrol.net/>>.

net/el-problema-de-offset-en-controladores-proporcionales-un-analisis-detallado/>. [Consulta: febrero 2022].

27. _____. *Herramientas y utilidades del “Sintonizador” de Lazos de Control (parte 1 de 2)*. [en línea]. <<https://instrumentacionycontrol.net/herramientas-y-utilidades-del-sintonizador-de-lazos-de-control-parte-1-de-2>>. [Consulta: abril 2022].
28. _____. *Herramientas y utilidades del “Sintonizador” de Lazos de Control (parte 2 de 2)*. [en línea]. <<https://instrumentacionycontrol.net/herramientas-y-utilidades-del-sintonizador-de-lazos-de-control-parte-2-de-2>>. [Consulta: abril 2022].
29. ZUBICARAY, Manuel. *Bombas. Teoría, diseño y aplicaciones*. 2a ed. México: Editorial Limusa, S.A. de C.V., 2000. 262 p.

