

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Escuela de Postgrado



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

DISEÑO DE LA AUTOMATIZACIÓN PARA UNA
PLANTA PILOTO DE EXTRACCIÓN POR FLUIDO
SUPERCRÍTICO UTILIZANDO CO₂ COMO SOLVENTE

Tesis para optar al grado de Magister en Ingeniería Mecatrónica

Autor:

Ruben Cuellar Aquino

Asesor:

Ph.D. Julio Cesar Tafur Sotelo

2017

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y por las bendiciones para lograr mis objetivos.

A mi Mamá Brigida, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación tanto académica, como de la vida.

A Leydi Melissa, por su inmenso amor y paciencia.

A mi asesor el Ph.D., Ing. Julio C. Tafur, por las enseñanzas y experiencias dadas durante la maestría.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer primeramente a Dios por bendecirme con las oportunidades que se me presenta. A la virgen María por su amor infinito hacia nosotros, pues su amor de madre hace que ella olvide nuestros errores y nos acoja con los brazos abiertos para protegernos.

También quiero agradecer a mi mamá Brigida, por su apoyo incondicional, su sacrificio por brindarme siempre lo mejor, sus enseñanzas y los ánimos que me da día a día para seguir adelante, pues ella para mi siempre es mi ejemplo de vida y sólo ruego a Dios que siempre la bendiga. A mi hermano José a quién le agradezco bastante por su amor y el cuidado que siempre tiene conmigo. A mi papá Julián allá en el cielo que siempre cuida de mis pasos.

Esta tesis no hubiera sido posible sin el apoyo de la Srta. Leydi Melissa pues es una persona muy especial que siempre la tengo presente en el corazón; con su amor, paciencia y fortaleza en los momentos más difíciles ha sabido aconsejarme y apoyarme incondicionalmente. Al Ing. Cesar Bueno por confiar en mi gracias por su apoyo desde el inicio de mi carrera, siempre tendré presente su amistad y sus enseñanzas. A la Sra. Delia quiero agradecer por abrirme las puertas de su hogar con amor y alegría para formar parte ella.

A todos mis amigos de la maestría, por las experiencias y conocimientos compartidos pues he aprendido mucho de ellos que son grandes personas, a mi gran amigo Alex que siempre me alentó a seguir adelante con su sincera amistad y humildad. A todos los profesores por compartir sus conocimientos y experiencias. A los miembros del CONCYTEC y de la PUCP que confiaron en mi persona e hicieron posible el cumplir este sueño.

Resumen

En los últimos años en el territorio peruano, la importación de productos agropecuarios con valor agregado ha ido incrementando y de la misma forma la exportación de materia prima vegetal y esto genera que los productos importados resulten más caros que los productos exportados. Esto se debe a que en el Perú no se ha difundido tecnologías que permitan dar un valor agregado a los productos agrícolas. Una de las tecnologías que ha demostrado tener un buen rendimiento en la obtención de productos con valor agregado, es la llamada Extracción por fluido Supercrítico (SFE).

La presente tesis es un aporte para el desarrollo de tecnología en extracción por fluido supercrítico, para esto se ha echo el diseño de la automatización de una planta piloto de extracción por fluido supercrítico utilizando CO₂ como solvente. El CO₂ es el elemento que debe llegar al estado supercrítico del cual se aprovechan las propiedades de disolvente y alta penetrabilidad, se ha trazado el circuito termodinámico en forma circular para conseguir reutilizar el CO₂, el punto de operación del fluido en estado supercrítico se ha definido en 145 bares y 40°C. Con el ciclo termodinámico definido se diseñó la parte eléctrica e de instrumentación considerando el diseño mecánico de los trabajos realizados en la Universidad Guelph de Canadá y la Pontificia Universidad Católica del Perú.

La planta piloto está diseñada para operar de forma automática por medio del controlador industrial PLC-1200 de Siemens. el proceso inicia en el tanque que almacena CO₂ líquido el cuál sirve de fuente para la bomba de presurización, luego a su salida existe un intercambiador de calor que incrementa la temperatura del CO₂ para alcanzar el estado supercrítico, con esto se realiza extracción del extracto de la materia prima, luego atraviesa el tanque de separación donde se obtiene el extracto libre del solvente y finalmente se recupera el CO₂ gaseoso mediante un condensador que lo lleva al estado líquido.

Finalmente se ha diseñado una interfaz hombre maquina para que el personal especializado pueda definir los diferentes puntos de operación de forma segura, el diseño contempla la seguridad funcional del programa y del entorno.

Índice general

Resumen	III
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	IX
1. Antecedentes	2
1.1. Estado del Arte en el Contexto Mundial	2
1.1.1. Plantas de extracción por fluido supercrítico en la actualidad	3
1.1.1.1. Plantas Pilotos	3
1.1.1.2. Plantas industriales	7
1.2. Antecedentes y problemática en el Territorio Peruano	9
1.3. Objetivos de la Tesis	10
2. Estructura y Modelo de la Planta Piloto	12
2.1. Introducción	12
2.2. Proceso de Extracción por Fluido Supercrítico utilizando CO ₂ como solvente	12
2.3. Estructura de la planta piloto	16
2.3.1. Diagrama de la planta piloto SFE	17
2.3.2. Lazos de Control del sistema	21
2.4. Dinámica de los lazos de Control	21
2.4.1. Dinámica del extractor	22
2.4.2. Dinámica de la Bomba de Presión	27
2.4.3. Dinámica del intercambiador de calor	29
2.5. Estructura P&ID	29
2.6. Plano P&ID	32
3. Diseño de la parte eléctrica y configuración de los sensores y actuadores	35
3.1. Introducción	35
3.2. Diseño Eléctrico	36
3.3. Diseño del Diagrama Unifilar	36
3.3.1. Cálculo de la carga por los equipos de la planta piloto . . .	37
3.3.2. Cálculo de la carga por la instrumentación de la planta piloto	40
3.3.3. Consumo de corriente del controlador	43
3.3.4. Cálculo del consumo total de la planta piloto	47
3.4. Diseño del Plano Eléctrico	48
3.4.1. Software Eplan Electric P8	49

4. Control de los Lazos Identificados y Diseño de la Lógica del Proceso	54
4.1. Introducción	54
4.2. Control de los Lazos	54
4.2.1. Control de Flujo	56
4.2.2. Control de Temperatura	58
4.2.3. Control de Presión	61
4.3. Lógica de la secuencia de Control	63
4.3.1. Fase 1: Posición Inicial	65
4.3.2. Fase 2: Inundación de líneas con CO ₂	66
4.3.2.1. Llenado de CO ₂ en el Tanque Pulmón	66
4.3.2.2. Inundación de líneas con CO ₂	66
4.3.2.3. Inundación del Extractor con CO ₂	67
4.3.3. Fase 3: Presurizar CO ₂	68
4.3.3.1. Flujo y presión	68
4.3.3.2. Calentar CO ₂ Presurizado	68
4.3.3.3. Extracción y Separación del Sustrato	69
4.3.4. Fase 4: Producción del Proceso	69
4.3.5. Fase 5: Detener Proceso	70
4.3.5.1. Parada de la Bomba Principal	70
4.3.5.2. Cerrado de las Válvulas	70
4.3.5.3. Despresurizar tanque extractor	70
4.3.6. Fase 6: Fin de Proceso	71
4.4. Aspectos a Considerar	71
5. Simulación y Desarrollo del HMI	73
5.1. Introducción	73
5.2. Programación del PLC	73
5.2.1. Lectura de Sensores	74
5.2.2. Accionamientos	75
5.2.3. Controladores para los lazos	75
5.2.4. Secuencia del Programa	76
5.3. Simulación y Desarrollo del sistema SCADA	76
5.4. Puesta en Marcha de la Planta Piloto SFE	78
5.5. Presupuesto Estimado	79
Conclusiones	81
Recomendaciones	83
Bibliografía	84
Anexo A. Curva Termodinámica del Proceso	87
Anexo B. Plano P&ID de la Planta Piloto SFE	89
Anexo C. Plano Unifilar de la planta piloto SFE utilizando CO₂ como solvente	91

Anexo D. Planos Eléctricos de la Planta SFE utilizando CO2 como solvente	93
Anexo E. Cotización de Equipos Eléctricos	117



Índice de figuras

1.1. Vista Frontal del Equipo SFT-NPX, (Supercritical Fluid Technologies, 2015)	4
1.2. Vista Frontal del Equipo SFT-NPX, (ENGTECH, 2015)	5
1.3. Planta piloto de 20L, (SEPARECO, 2016)	6
1.4. SF 2x2 reactores de 2 litros, (Technology, 2016)	7
1.5. Separador 5000 x 5 litros (Technology, 2016)	8
1.6. Equipo de extracción de 5 litros (Waters)	9
2.1. Diagrama de fases Solido/liquido/gas/fluido Supercrítico. PT: punto triple; Punto Crítico (PC); Presión Crítica (Pc); Temperatura Crítica (Tc)	13
2.2. Diagrama de fase densidad y presión del dióxido de carbono	14
2.3. Diagrama de fase presión y temperatura del dióxido de carbono	14
2.4. Diagrama de bloques del proceso (Towler and Sinnott, 2012).	16
2.5. Estructura de la planta piloto Extracción por Fluido Supercrítico (SFE)	17
2.6. Bomba de desplazamiento positivo para CO ₂ (Rosenthal, 2012).	18
2.7. Columna de Extracción (Rosenthal, 2012).	19
2.8. Columna de separación (Rosenthal, 2012).	20
2.9. Tanque de extracción (Smith and Corripio, 1985).	22
2.10. Función de transferencia del extractor.	26
2.11. Respuesta al escalón solo con la bomba de presión.	27
2.12. Respuesta al escalón en condiciones estacionarias.	27
2.13. Función de la bomba de presión.	28
2.14. Función de la bomba de presión.	29
2.15. Función de transferencia para la temperatura.	29
2.16. Representación de sensores y controladores Meier and Meier (2004).	30
2.17. Identificación de instrumentos Meier and Meier (2004)..	30
2.18. Tipos de líneas Meier and Meier (2004).	32
3.1. Aplicaciones y tipos de controladores industriales	52
4.1. Arquitectura de los niveles para la automatización (Mehta and Reddy, 2014).	55
4.2. Lazo realimentado para el control de flujo.	56
4.3. Respuesta al escalón del sistema realimentado	57
4.4. Caracterización de la pendiente en el método de la respuesta a un escalón de Ziegler-Nichols	58

4.5. Diagrama de bloques del lazo de control de flujo de CO2 simulado en el Simulink de Matlab	58
4.6. Curva de respuesta del sistema de flujo controlado	59
4.7. Curva de respuesta en lazo cerrado de temperatura sin el controlador	59
4.8. Diagrama de bloques del lazo de control para el intercambiador de calor de la planta SFE	60
4.9. Curva de respuesta en lazo cerrado del intercambiador de calor de la planta SFE controlado por PID	60
4.10. Respuesta del lazo de presión en l cerrado sin el controlador	61
4.11. Diagrama de bloques del tanque TK-5000 en lazo cerrado con el controlador PID.	62
4.13. Diagrama de Bloques de los lazos entre enlazados directamente de la planta piloto SFE.	62
4.12. Respuesta del lazo de control de presión en el tanque TK-5000, con el controlador PID.	63
4.14. Estructura propuesta de control para la planta piloto SFE.	63
4.15. Diagrama de flujo para el Control de la planta piloto SFE.	65
5.1. Estructura básico de un controlador PLC	73
5.2. Bloque para la lectura de sensores	75
5.3. Bloque de accionamiento para una válvula.	75
5.4. Bloque que hace el control PID.	76
5.5. Bloque que realiza la secuencia del control tipo Batch.	76
5.6. Scada de la planta piloto SFE.	78

Índice de tablas

2.1. Tabla de especificaciones técnicas del tanque de CO ₂ (Olsson, 2014).	17
2.2. Tabla de especificaciones técnicas de la bomba de desplazamiento positivo (Rosenthal, 2012).	18
2.3. Tabla de especificaciones técnicas del intercambiador de calor (Amar, 2016).	19
2.4. Tabla de especificaciones técnicas de la columna de extracción (Amar, 2016).	20
2.5. Tabla de especificaciones técnicas de la columna de separación (Amar, 2016).	20
2.6. Lazos de control identificados en el sistema	21
2.7. Relación de moles en el tanque extractor	23
2.8. Identificación de instrumentos Meier and Meier (2004).	31
3.1. Tabla de factores de corrección	38
3.2. Dimensionamiento de equipos para el Motor M3000	38
3.3. Datos técnicos del VDF (Variador de Frecuencia)	39
3.4. Datos técnicos del intercambiador ,(Chromalox, 2016)	39
3.5. Consideraciones para el intercambiador de calor	40
3.6. Lista de válvulas en la planta piloto SFE.	41
3.7. Lista de instrumentos en la Planta pilotoSFE.	43
3.8. Lista de entradas al PLC	45
3.9. Salidas del PLC	46
3.10. Consumo del controlador	47
3.11. Calculo de la potencia Consumida por la Planta piloto SFE	48
4.1. Parámetros del controlador según Ziegler-Nichols ((Åström and Hägglund, 2009))	57
5.1. Presupuesto del diseño e implementación de la planta piloto SFE	79

Lista de Abreviaturas

SFE Extracción por Fluido Supercrítico

PLC Controlador Lógico Programable

ISA International Society of Automation

PC Punto Crítico

Pc Presión Crítica

Tc Temperatura Crítica

P& ID Piping and Instrumentation Drawing

IEC International Electrotechnical Commission

fdp Factor De Potencia

Pe Potencia Eléctrica

VL Voltaje de Línea

FPGA Field Programmable Gate Array

ASIC Application Specific Integrated Circuit

PLC Controlador Lógico Programable

DCS Sistemas de Control Distribuido

PAS Sistema Automatizado de Procesos

xx Número Asignado por el Operador

SP Set Point

Introducción

En la actualidad en el Perú la exportación de productos agropecuarios tradicionales tales como espárragos, paltas, mandarinas y otros frutos frescos han ido creciendo considerablemente según los últimos reportes del Banco Central de Reserva del Perú (BCRP) mediante una nota de prensa de Junio del 2015 (PromPerú, 2015). Por otra parte el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) muestra un crecimiento del 9.3 % de la demanda de bienes de consumo no duraderos, lo que significa que el Perú deberá producir en mayor cantidad productos agropecuarios no tradicionales, para satisfacer la demanda de la población y la demanda de debido a la exportación (INEI, 2015).

Algunos bienes de consumo no duradero con valor agregado son por ejemplo aceites vegetales, café natural, te descafeinado, arroz y vegetales de larga duración, alimentos funcionales, perfumes, síntesis de polímeros funcionales y entre otros (M.M.R. de Melo, 2014). Existen varios métodos de obtener estos productos con valor agregado, uno de los métodos mas eficientes sin causar daño al medio ambiente es el método llamado extracción por fluido supercrítico (Kiran, 2013). El método de extracción por fluido supercrítico tuvo sus inicios en Europa en el año 1990 y en el Perú inició el año 2001 en la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana (UNAP), La facultad de Química montó un equipo de Extracción por fluido supercrítico de origen brasilero, el cuál se utilizó para hacer investigaciones con el derivado del achiote, este es un buen punto de partida para la investigación de bienes no duraderos con valor agregado (Abel del Castillo, 2001). La automatización de este proceso permitirá investigar y experimentar para obtener nuevos productos de valor agregado y así fomentar una nueva línea de investigación.

Capítulo 1

Antecedentes

En el presente capítulo se desarrollará el estado del arte de la SFE utilizando CO_2 como solvente. En la primera parte se hace una revisión de la tecnología SFE a nivel mundial luego se prosigue con la descripción de los avances en este método de extracción en el territorio local y finalmente se describen los objetivos de la tesis.

1.1. Estado del Arte en el Contexto Mundial

La aplicación de tecnologías de fluidos en estado supercrítico es una opción viable y un método científico de alta calidad para la obtención de materiales, aislamiento y extracciones. Por lo que estas tecnologías se utilizan en aplicaciones que se centran en la obtención de sustratos de alta calidad y su aplicabilidad en diversos sectores industriales (Lindy, 2015). Las primeras aplicaciones industriales datan de la década de 1970, en el año 1978 se logra la primera extracción por fluido supercrítico satisfactoria, el resultado obtenido fue la cafeína del café y posteriormente se realizaron experimentos con diferentes productos agropecuarios (Dominguez, 2011). La importancia de investigar estos temas a nivel industrial, es encontrar la mejor alternativa del proceso que pueda minimizar el impacto ambiental, minimizar los residuos tóxicos, ser más eficiente y obtener productos de alta calidad.

La extracción por fluido supercrítico llamada SFE por sus siglas en inglés (Supercritical Fluid Extraction) emergió en las últimas décadas como una propuesta de una tecnología verde y una buena alternativa en los alimentos y en el procesamiento de productos naturales. La SFE ha probado ser técnicamente y económicamente viable sobre los otros métodos tradicionales con solventes orgánicos, como el nombre lo indica este método utiliza solventes en condiciones supercríticas lo cual antes no era conocida. El uso de dióxido de carbono (CO_2) como solvente para la extracción por fluido supercrítico brinda varias ventajas

como por ejemplo el CO₂ es amigable con el medio ambiente, está libre de componentes tóxicos, se encuentra en gran cantidad en el medio, los puntos críticos no afectan al extracto, la polaridad de sus átomos permite hacer la separación selectiva, etc.

Los productos derivados o de valor agregado aún son materia de investigación debido a la enorme cantidad de materia prima botánica existente. Los trabajos e investigaciones que se hicieron llegan a calificar a la SFE como el método más eficaz de separación en comparación de los métodos tradicionales (Lindy, 2015). Los trabajos realizados a la fecha concluyen que con un buen control de temperatura y presión en el proceso de extracción asegurará un extracto de buena calidad y la cantidad dependerá de la automatización del proceso en su conjunto (Jokić et al., 2014).

Hoy en día más de un centenar de plantas comerciales en el mundo utilizan el proceso de la extracción por fluido supercrítico, empresas como Waters Corporation (USA), AINIA (Valencia), Supercritical Fluid Technologies, Inc (USA), Amar Equipments PVT (India) y otras empresas Europeas. Las tecnologías en SFE constantemente incrementan sus aplicaciones en los distintos campos (Textiles, alimentos, esencias, etc) bajo diferentes puntos de operación del solvente, para conseguir distintos puntos de operación del solvente es necesario el uso de plantas automatizadas con un buen control de las variables comprometidas en el proceso (Jokić, 2015) (Miguel Herrero, 2009).

1.1.1. Plantas de extracción por fluido supercrítico en la actualidad

En la actualidad existen plantas pilotos y plantas industriales para la extracción con CO₂ como fluido supercrítico, estas se describen a continuación.

1.1.1.1. Plantas Pilotos

Las plantas pilotos se centran en la investigación y en la comodidad de poder trabajar en diferentes condiciones a fin de conseguir nuevos extractos o productos derivados. Además de la capacidad de almacenar datos o registros de las variables en todo el proceso para su posterior análisis, estas plantas son indispensables si se investiga en nuevos productos con valor agregado.

- **Extractor de Productos naturales SFT-NPX.**

La planta está diseñada para llevar a cabo extracciones por fluidos supercríticos incorporando recipientes de 5 Litros. El sistema incluye ya sea uno o dos recipientes separadores de 10 Litros, una bomba neumática de CO₂ con un pre enfriador integrado sin agua para maximizar la eficiencia de la bomba. La presión y la temperatura se controlan en los recipientes de extracción y separadores con válvulas de control e intercambiadores de calor, Figura 1.1 modelo de la planta piloto.

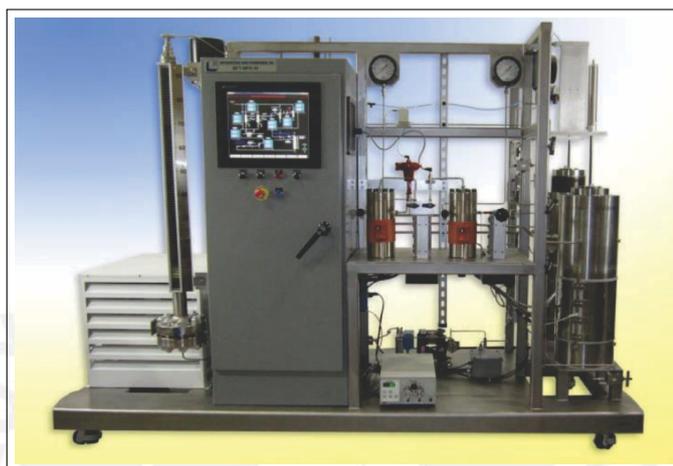


Figura 1.1: Vista Frontal del Equipo SFT-NPX, (Supercritical Fluid Technologies, 2015)

Como principales características se tiene:

Materia prima	Materia botánica, hierbas y especias
Tipo de Matriz	Sólidos
Cosolvente	si
Operación Máxima	689 Bar y 120°C
Flujo CO ₂	0.1 - 100 kg/min
Capacidad	5,10 y 20 L

- **Planta piloto de extracción supercrítica PID ENGTECH - EEUU**

La planta está diseñada en tres módulos: módulo de alimentación, extracción y unidad de control. La empresa PID Eng&Tech tiene 4 modelos de plantas y la única diferencia entre estos cuatro modelos es la capacidad de extracción, tiene un control computarizado de temperatura y presión independiente, a la fecha tiene más de 15 unidades en operación en diferentes países. Una de sus unidades se aprecia en la Figura 1.2.

Como principales características se tiene:

Materia prima	Materia botánica
---------------	------------------



Figura 1.2: Vista Frontal del Equipo SFT-NPX, (ENGTECH, 2015)

Tipo de Matriz	Sólidos y líquidos
Cosolvente	si
Operación Máxima	380 Bar y 120°C
Flujo CO ₂	5 l/h
Capacidad	350cc - 2L

- **Plantas Piloto de extracción por fluido supercrítico SEPARECO - Italia**

La empresa SEPARECO produce plantas pilotos de 2 a 200 litros. La utilización de esta planta piloto permite obtener extractos de gran calidad y/o productos refinados, en la cual se pueden realizar múltiples pruebas, en la figura 1.3 se aprecia una planta piloto de 20 litros de capacidad y el sistema de control lo realiza un Controlador Lógico Programable (PLC) con el computador.

Como principales características se tiene:



Figura 1.3: Planta piloto de 20L, (SEPARECO, 2016)

Materia prima	Materia botánica
Tipo de Matriz	Sólidos y líquidos
Cosolvente	si
Operación Máxima	300 -600 Bar a 120°C
Flujo CO ₂	36-300 Kg/h
Capacidad	2L - 200L

- **Plantas Pilotos de SEPAREX Supercritical Fluid Technology - Francia**

Las plantas pilotos realizadas por esta empresa son diseñados para una gran variedad de procesos de fluidos supercríticos y altas presiones, los rango de reactores que maneja son de 1 a 100 litros dependiendo de la aplicación y proyecto del cliente. Los tanques pueden ser estándar o diseñados a medida. Con respecto a los separadores pueden adecuarse al tipo de extracto que se obtendrá. Las altas presiones se solucionan con el tipo de bombas que se ofrece pudiendo variar desde flujos de 20ml/min hasta los 60Kg/h. En la figura 1.4 se aprecia un modelo de planta piloto con 2 reactores para la extracción y dos separadores del extracto final.

Como principales características se tiene:

Materia prima	Materia botánica
Tipo de Matriz	Sólidos y líquidos
Cosolvente	si
Operación Máxima	1 -1000 Bar a 120°C
Flujo CO ₂	20ml/min-300 Kg/h
Capacidad	5ml - 50L



Figura 1.4: SF 2x2 reactores de 2 litros, (Technology, 2016)

1.1.1.2. Plantas industriales

A diferencia de las plantas piloto de SFE, las plantas industriales se centran en la obtención de un sustrato en especial. Los equipos de este sector se especializan en la obtención de la mayor cantidad de sustrato y la optimización del tiempo de proceso, las plantas industriales no son herramientas para desarrollar investigación porque están diseñadas para trabajar con materias primas específicas. A continuación se da a conocer algunas empresas que venden estas plantas al sector industrial.

- **NATEX Prezesstechnologie ,Austria**

Este fabricante viene realizando investigaciones desde 1982, aparte de hacer equipos a medida para productos específicos, desarrolla también equipos multi-funcionales. Usualmente sus plantas están equipadas con 2 separadores por fraccionador y todas las plantas tienen la posibilidad de adicionar co-solvente. El control de calentado y enfriamiento es de forma individual, pueden llegar hasta los 1000 bar. lo que hace que la presión no sea una limitación para estos fabricantes (NATEX prozesstechnologie).

Estas son algunas de la características que dan los fabricantes.

Materia prima	Según el cliente
Tipo de Matriz	Sólidos y líquidos
Cosolvente	si
Operación Máxima	1000 Bar a 150°C
Flujo CO ₂	30 Kg/h
Capacidad	2- 3500 Litros

- **APEKS supercritical - 5000 PSI System, USA**

Esta planta está diseñada para extraer aceites botánicos con bajo consumo

de energía total en un diseño compacto. Está equipada con un sistema de bombeo de diafragma monofásico 220 V. Utiliza un sistema patentado (Patent No. 9132363) de expansión sin válvulas. Los sensores del sistema están controlados por un PLC que a su vez está conectado con una interfaz de usuario de pantalla táctil como muestra la figura 1.5.



Figura 1.5: Separador 5000 x 5 litros (Technology, 2016)

Como principales características se tiene:

Materia prima	Materia botánica
Tipo de Matriz	Especias
Cosolvente	si
Operación Máxima	5000 Psi a 71°C
Flujo CO ₂	30 Kg/h
Capacidad	5L
Costo	Desde 36850 Dolares

- **Extracción Botánica WATERS, USA**

El sistema de extracción SFE Bio-Botanical de Waters es un sistema de extracción por fluido supercrítico de CO₂ con múltiples extractores que permite extraer rápida y automáticamente grandes cantidades de componentes deseados de diversas matrices botánicas. Está compuesto por una bomba de CO₂, un medidor de flujo de masa, dos extractores, un sistema automatizado de regulación de presión, dos intercambiadores de calor y tres recipientes de separación. Adicionalmente, el sistema puede incluir una bomba y un mezclador de co-solvente 1.6. .

Como principales características se tiene:



Figura 1.6: Equipo de extracción de 5 litros (Waters)

Materia prima	Materia botánica
Tipo de Matriz	sólidos
Cosolvente	si
Operación Máxima	600 bar 120°C
Flujo CO ₂	200 g/min
Capacidad	5L

Así como estas empresas dedicadas a investigar y fabricar equipos de extracción por fluido supercrítico existen muchas alrededor del mundo, existen aún muchos productos en los cuales investigar, especialmente en productos que sean del territorio peruano y para ser posible esto se debe desarrollar este tipo de tecnologías y no solo depender de la importación de estas.

1.2. Antecedentes y problemática en el Territorio Peruano

En el territorio Peruano en el año 2001, se iniciaron las investigaciones en la extracción por fluidos supercríticos utilizando el CO₂ como solvente. La primera evidencia es el ensamble de una planta piloto importada de Brasil realizada por la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana (UNAP), esta investigación da a conocer que se puede dar un valor agregado a los productos botánicos, en este caso al achiote, además de que su eficiencia depende del control de las variables de presión y temperatura, (Abel del Castillo, 2001). Por otra parte en el año 2013 la Pontificia Universidad Católica (PUCP) hace el primer diseño mecánico para la extracción por fluido supercrítico utilizando CO₂ como solvente y paprika como materia prima, en este trabajo se concluye que este tipo de tecnologías sólo permite extraer productos orgánicos y las óptimas condiciones de trabajo sólo

puede ser calculada de forma experimental (Vivar, 2013).

Frente a las complicaciones de la ausencia de investigación en este método de extracción las empresas peruanas se ven obligadas a importar dichas tecnológicas de empresas como *APEK (USA)*, *ApeKs Supercritical (USA)*, *AMAR Equipments PVT (India)* y *Waters (USA)*, que ofrecen plantas de extracción por fluidos supercrítico utilizando CO_2 ; estos equipos están desarrollados para extraer un producto específico con diferentes capacidades. Como bien se sabe el territorio peruano tiene mucha materia prima orgánica llámese productos agrícolas, de los cuáles no se pueden obtener productos derivados ya que esta línea de investigación no se ha desarrollado aún. Esto es un problema puesto que el diseño mecánico necesita ser automatizado para controlar adecuadamente las variables de temperatura, presión y flujo.

1.3. **Objetivos de la Tesis**

Para resolver el problema el presente trabajo tiene como objetivo general el diseño de la automatización para la planta piloto de extracción por fluido supercrítico utilizando CO_2 como solvente. Esto conlleva a diseñar el diagrama del proceso a partir del ciclo termodinámico, el diseño de un plano P&ID haciendo un énfasis en la parte eléctrica, se hará una selección adecuada de los componentes de instrumentación, se diseñará el plano eléctrico bajo las normativas IEC, se desarrollará el control para el proceso tipo Batch, se desarrollará el sistema de supervisión para la operación del proceso de Extracción por Fluido Supercrítico CO_2 y se diseñará un plan de puesta en marcha de la planta piloto de extracción por fluido supercrítico utilizando CO_2 como solvente.

El diseño de la automatización se desarrollará para una planta piloto SFE, por tanto este diseño servirá para la adecuada selección de instrumentación y controladores sujetos a las condiciones físicas y de campo. Todo el diseño se rige en la normativa ISA (International Society of Automation). Con el diseño concluido se podrá tener la referencia para automatizar la planta piloto y tener la estrategia de control para las variables que afectan directamente el proceso logrando así tener productos de alta calidad y además de la operación remota de la planta para la seguridad en el proceso.



Capítulo 2

Estructura y Modelo de la Planta Piloto

2.1. Introducción

A continuación se presenta los elementos básicos que conforman una planta piloto de extracción por fluido supercrítico, los datos mecánicos de estos elementos se tomaron de una planta piloto realizada por la universidad de Alberta de Canadá (?) cabe recalcar que estos datos son de referencia pudiendo adecuarse a cualquier otro buen diseño mecánico. Estos datos ayudarán a desarrollar el modelo matemático que se requiere para modelar el sistema o cualquier otro sistema de referencia.

El modelo matemático permitirá hallar las funciones de transferencias lineales para poder observar el comportamiento de los elementos básicos de la planta piloto y los lazos de control que se observaron. Las funciones de transferencia obtenidas serán de gran ayuda para realizar simulaciones y proponer un estrategia de control, controlador y la instrumentación necesaria.

2.2. Proceso de Extracción por Fluido Supercrítico utilizando CO₂ como solvente

Para comenzar con la descripción del proceso se debe tener en claro que una sustancia pura se encuentra en estado supercrítico si la temperatura y presión son superiores a los valores críticos como se muestra en la figura 2.1. Esta sustancia se comporta como un gas, llena y toma la forma del depósito que lo contiene, características que no tiene cuando se encuentra en estado líquido (fluido no compresible que ocupa el fondo del depósito). No obstante el CO₂ en estado supercrítico tiene la densidad de un líquido (0.1 a 1.0 g/ml) y por tanto su poder disolvente. Dife-

rentes autores lo definen como un gas denso de alto poder disolvente controlable, de una manera sencilla es el estado de la materia en la que los estados líquido y gaseoso son indistinguibles entre si (Brunner, 1994), (de Castro, 1994).

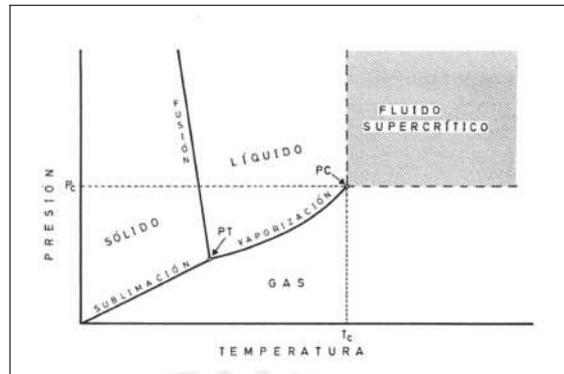


Figura 2.1: Diagrama de fases Solido/líquido/gas/fluido Supercrítico. PT: punto triple; PC; P_c; T_c

El interés se ahonda en la aplicación del dióxido de carbono supercrítico, porque tiene una temperatura crítica de 31°C, esto hace que se pueda trabajar con los materiales biológicos sin alterar las propiedades, que generalmente no se alteran hasta los 35°C. La presión alrededor de los 200 Bar corresponde a una densidad cercana a la del hexano, el cual actúa como un solvente no polar en estado supercrítico. Pero se puede experimentar con presiones a partir de los 74°C que es el punto crítico del CO_2 . Esto hace que con diferentes presiones y temperaturas se logra obtener diferentes extractos de manera que este método es mas selectivo. El CO_2 puede disolver triglicéridos en concentraciones hasta de 1% en masa. Pero la principal ventaja surge de una reducción de la temperatura de extracción y una reducción mas grande de presión se traduce en la precipitación del soluto extraído, por tanto no arrastrará residuos de la matriz ni del co-solvente en caso de ser utilizado (Brunner, 1994), (G. N. SAPKALE and BHATBHAGE, 2010), (M. Bocevska, 2006), (M. Solana, 2015).

A continuación se tiene las propiedades de los fluido supercrítico CO_2 (G. N. SAPKALE and BHATBHAGE, 2010), (M. Bocevska, 2006):

- El CO_2 supercrítico tiene propiedades combinadas de los gases y líquidos, esto se debe a las propiedades de presión y temperatura.
- El CO_2 supercrítico puede provocar reacciones, que son difíciles o incluso imposibles de lograr en disolventes convencionales.
- La solubilidad aumenta proporcionalmente con la densidad (es decir con el

aumento de la presión). La rápida expansión de las soluciones supercríticas conduce a la precipitación de un sólido finamente dividido; ver figura 2.2.

- Las condiciones de presión y temperatura del fluido supercrítico CO₂ son óptimas para la extracción de compuestos orgánicos, se muestra en la figura 2.3.
- Su no polaridad en condiciones críticas hacen selectiva la extracción del sustrato.

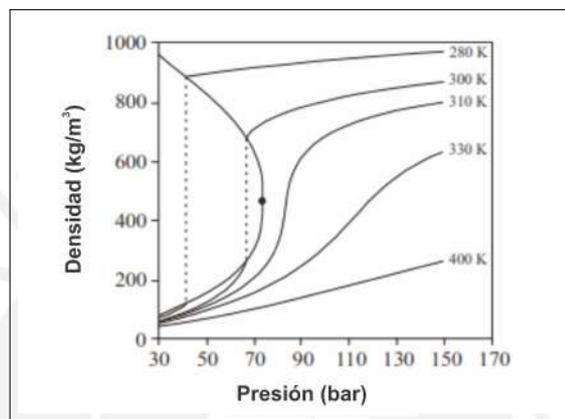


Figura 2.2: Diagrama de fase densidad y presión del dióxido de carbono

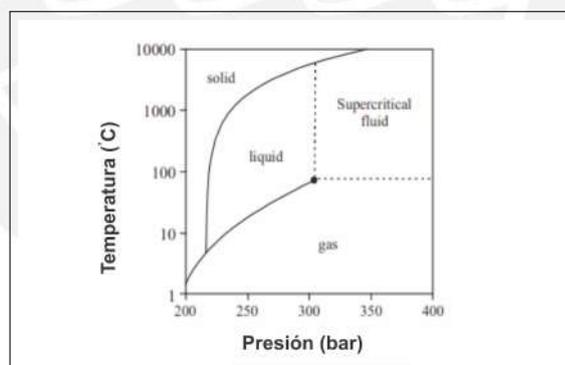


Figura 2.3: Diagrama de fase presión y temperatura del dióxido de carbono

En el proceso termodinámico la mayoría de los autores reconocen 5 etapas bien marcadas para llegar al punto crítico del solvente y poder extraer el material deseado de una matriz que viene a ser la materia prima. Estos procesos deben cumplir la termodinámica del CO₂ y son los siguientes:

1. Estado líquido: Este es el punto de partida para el proceso, el CO₂ debe estar dentro del rango de presión y temperatura según la curva termodinámica, ver Anexo A.

2. Presurización hasta Pc: La Presión del CO₂ se incrementa hasta llegar al valor supercrítico deseado, la cual deberá mantenerse constante durante el proceso a un flujo deseado.
3. Calentamiento hasta Tc: Luego de incrementar la presión se procede a incrementar la temperatura para asegurar que se encuentre en el estado supercrítico.
4. Expansión isoentápica: Una vez el solvente que es CO₂ ha estado en contacto con la matriz y a penetrado extrayendo el sustrato deseado, se continua a la separación. Para poder realizar esta operación es necesario llevar al estado gaseoso disminuyendo la presión.
5. Condensado: En esta etapa es muy importante puesto que se recupera el CO₂ mediante la condensación del CO₂, esto asegura que el CO₂ vuelva al punto de inicio en estado líquido.

Como se ha descrito antes, el proceso de SFE consta del calentamiento y presurización del CO₂ para llegar al estado supercrítico el cual actúa como solvente que extrae los componentes deseados de la materia prima. En este proceso es necesario un control preciso de temperaturas, presiones y flujo del solvente, para obtener un único extracto y evitar la posibilidad de que se adhieran otros componentes no deseados, por otra parte para separar el sustrato obtenido se debe tener cuidado con el solvente al regresar al estado gaseoso. Es por tanto los principios básicos de la automatización industrial podría aplicarse con el fin de controlar los parámetros de temperatura y presión (Lindy, 2015). Para desarrollar e implementar una planta piloto SFE y que cumpla con las condiciones de presión alta y temperaturas en estado supercrítico es necesario tomar en consideración algunas recomendaciones (Clavier and Perrut, 1996):

- Peligros mecánicos.- explosión/ruptura por alta presión, corrosión, empaques dañados y fatiga del metal.
- Peligros químicos.- co-solvente, N₂O, corrosión y productos inflamables.
- Peligros biológicos.- asfixia e intoxicación química y bioquímica.
- Peligros externos.- fuego, corto circuito, falla de tensión y falla del control.

La tecnología con fluidos supercríticos tiene peligros potenciales los cuales deben ser considerados al momento de diseñar y al momento de operar de forma automática. En cuanto a los tiempos de producción mediante esta tecnología es importante destacar que requiere menos tiempo si se compara con otras técnicas

de extracción, como son destilación o aplicación de solventes orgánicos; ya que demanda un menor número de operaciones, principalmente porque no se dejan residuos en los extractos, evitando una posterior operación de separación y/o purificación.

2.3. Estructura de la planta piloto

Un diseño experimental o piloto puede ser definido como una aproximación para resolver un problema sistemáticamente. Esto aplicado a una colección de datos para ser analizados y mejorar los resultados (Sharif et al., 2014), mediante el control y el monitoreo del sistema. El ciclo termodinámico que debe cumplir esta planta piloto se explicó en el capítulo 1.

Los tipos de procesos pueden dividirse en:

- **Continuo:** En este tipo de procesos el material entra y sale al mismo tiempo.
- **Batch:** En este tipo de procesos el material que ingresa se modifica y se termina uno tras otro.
- **Manufactura:** En este tipo de proceso discreto un claro ejemplo vendría a ser la manufactura de automóviles.

En esta tesis se desarrolló el diseño de una planta piloto de tipo Batch; primero se realizó un diagrama de bloques que incluyan los componentes básicos para cumplir con el ciclo termodinámico que también se ve en el anexo A. Los componentes principales de una planta piloto a condiciones estándares que son vistas como una caja negra tal como muestra la figura 2.4 (Towler and Sinnott, 2012).

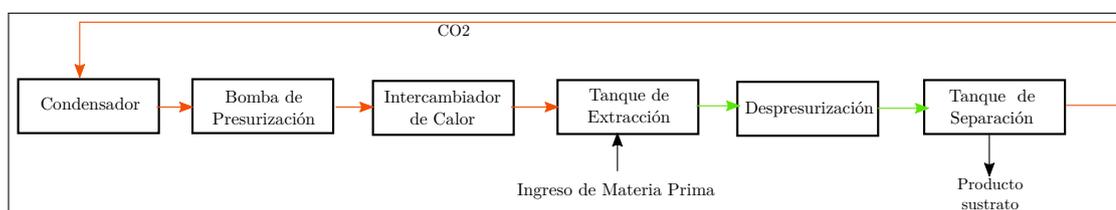


Figura 2.4: Diagrama de bloques del proceso (Towler and Sinnott, 2012).

Las unidades pilotos para SFE tienen características estándares de presión que van alrededor de los 300 Bar, temperaturas alrededor de 80°C y flujos de 12 l/h. Para objetos de estudio e investigación se hace referencia al grupo de trabajo de la Universidad de Guelph y la Universidad de Alberta quienes realizaron el diseño

mecánico e implementado por M-I SWACO (Empresa de Apoyo). El principal objetivo de este grupo de trabajo fue tener un sistema continuo SFE partiendo del diseño de una planta piloto, para tener consideración en la identificación y reducción de los riesgos que conllevan el proceso de SFE, (Casas et al., 2009).

2.3.1. Diagrama de la planta piloto SFE

La principal diferencia entre la estructura de un sistema SFE tipo continuo y un sistema tipo Batch es la entrada continua de la materia prima. El sistema a escala tipo planta piloto cumple con el proceso SFE del capítulo 1. La estructura definida para la tesis se aprecia en la figura 2.5. Esta estructura contiene los elementos básicos de una planta piloto SFE; como el tanque de almacenamiento de CO₂ (1), bomba de presurización (2), intercambiador de calor (3), Columna de extracción (4), válvula moduladora (5), columna de separación (6) y un equipo de condensación (7).

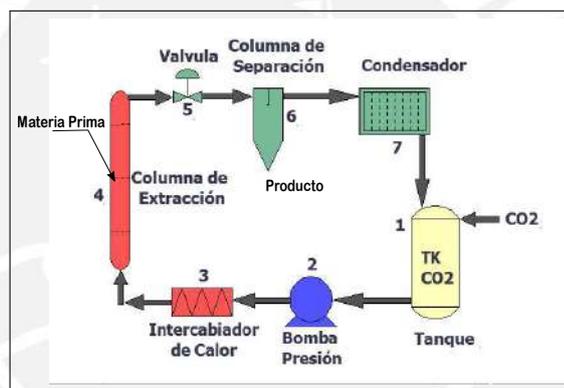


Figura 2.5: Estructura de la planta piloto SFE

Los datos de construcción de los estos sistemas son los siguientes:

Tanque de Almacenamiento (1): Este tanque sirve de alimentador de de solvente que en este caso viene a ser el CO₂ en estado liquido, las características del diseño se aprecian en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Tabla de especificaciones técnicas del tanque de CO₂ (Olsson, 2014).

Tanque de CO ₂	
Material	316 Acero Inoxidable
Diámetro interior (m)	0.3
Diámetro exterior (m)	0.33
Altura (m)	1.2
Volumen (m)	0.27

Bomba de Presurización : Esta bomba es de desplazamiento positivo que extrae el CO₂ líquido del tanque de almacenamiento y bombea en dirección de la columna de extracción el ingreso lo hace por la parte inferior del tanque de extracción. Esta bomba puede generar una presión de 345 Bar y puede ser operada por un variador de frecuencia el cual controla los RPM del motor para influir sobre el flujo del CO₂. los detalles técnicos se ven en la Tabla 2.2 también se puede apreciar una imagen de la bomba en la figura 2.6

Tabla 2.2: Tabla de especificaciones técnicas de la bomba de desplazamiento positivo (Rosenthal, 2012).

Bomba de CO ₂	
Manufactura	CAT Bombas
Modelo	781 K Triplex, Ceramic Plunger
Masa (Kg)	22
Dimensiones	13.15 x 9.25 x 6.06"
Carrera, Diámetro	0.551", 0.945"
Velocidad de flujo máximo (L/min)	17
Máximo RPM	1700
Máxima presión de entrada (bar)	28
Máxima presión de salida (bar)	345
Máxima temperatura de operación (°C)	71
Motor	
Manufactura	Brook Compton
Modelo	CC4N003-2, 3 HP, belt drive
Alimentación	220V, 3Ph, 8.4A
RPM	1740
Factor de servicio	1.15



Figura 2.6: Bomba de desplazamiento positivo para CO₂ (Rosenthal, 2012).

Intercambiador de Calor: Este intercambiador incrementa la temperatura del CO₂ hasta llegar a su punto crítico puesto que en un tramo anterior el CO₂ alcanzó su presión crítica y el solvente ya se encuentra en estado supercrítico para

ser utilizado en la extracción SFE. Las características principales se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3: Tabla de especificaciones técnicas del intercambiador de calor (Amar, 2016).

Intercambiador de calor	
Rango de Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	0 - 200
Capacidad de calor (Kw)	3
Roscas de entrada y salida (BSP male)	1/2"
Dimensiones (WxDxH) (mm)	375x475x550

Columna de extracción (4): La principal unidad del sistema es la columna de extracción, en donde ocurre la extracción de los componentes deseados de la materia prima, las características se pueden observar en el siguiente Tabla 2.4 y la imagen real del extractor se puede apreciar en la figura 2.7.



Figura 2.7: Columna de Extracción (Rosenthal, 2012).

Columna de separación (6): El tanque de separación está previsto para extraer el sustrato y separar el CO_2 para ser recuperado. Antes de ingresar a este tanque el sistema está provisto de una válvula que limita una presión máxima en este tanque. Este diseño permite un flujo de entrada y salida de CO_2 , el compartimento de suficiente volumen permite que no se condense el CO_2 , el tanque puede trabajar en un sistema tipo batch o continuo. Las características técnicas se muestran en la Tabla 2.5 y en la figura 2.8 se tiene una fotografía del tanque de separación.

Equipo de condensación (7): El equipo de condensado permite cambiar el estado gaseoso del CO_2 a estado líquido. Este CO_2 líquido es almacenado en el tanque de almacenamiento para volver a utilizarlo con este se cierra el ciclo de

Tabla 2.4: Tabla de especificaciones técnicas de la columna de extracción (Amar, 2016).

Columna de extracción	
Material	316 acero inoxidable
Diámetro interno, ID (m)	0.08
Diámetro exterior, OD (m)	0.13
Altura (m)	2.5
Volumen (m ³)	0.013
Masa(Kg)	581
Capa Final	doble enchaquetado
Roscas superiores	5 x NPT
Roscas inferiores	5 x NPT
Presión (bar)	400
Índice de Temperatura (°C)	200
Número de deflectores	60-65
Material del deflector	316 Acero inoxidable
Ángulo del deflector	60

Tabla 2.5: Tabla de especificaciones técnicas de la columna de separación (Amar, 2016).

Columna de separación	
Material	316 acero inoxidable
Diámetro interno, ID (m)	0.12
Diámetro exterior, OD (m)	0.15
Altura (m)	1.52
Volumen (m ³)	0.005
Masa(Kg)	243
Capa Final	Simple enchaquetado
Roscas superiores	5 x NPT
Presión (bar)	300
Índice de Temperatura (°C)	200



Figura 2.8: Columna de separación (Rosenthal, 2012).

este solvente.

2.3.2. Lazos de Control del sistema

En el esquema mostrado en la figura 2.4 las principales variables a controlar son la presión, temperatura y flujo del solvente en el tanque extractor. partiendo de esa premisa, se procede a identificar las variables medidas que son aquellas que muestran el estado de una magnitud física. Luego se procede a identificar las variables de proceso que son aquellas que modifican el valor de la variable medida. En la tabla 2.6 se tiene que los lazos de control que se lograron identificar en el sistema y la lógica de realimentación para el control.

Tabla 2.6: Lazos de control identificados en el sistema

Lazo	Variable Medida	Variable de Proceso	Realimentación
1	Nivel del Tanque de CO ₂ .	Válvula de ingreso del suministro de CO ₂ .	Re-alimentación negativa, si el nivel del tanque de CO ₂ disminuye se activa la válvula de suministro.
2	Flujo de salida de la bomba.	Velocidad en RPM del motor de la bomba.	Re-alimentación negativa, si el flujo de salida disminuye la velocidad del motor incrementa.
3	Temperatura del CO ₂ presurizado.	Potencia calorífica del intercambiador.	Re-alimentación negativa, si la temperatura disminuye la potencia calorífica debe incrementar.
4	Presión del tanque.	Válvula moduladora para control de presión.	Realimentación positiva, si la presión incrementa la válvula se abre proporcionalmente-

2.4. Dinámica de los lazos de Control

Para poder hallar y precisar un modelo matemático que represente el comportamiento del sistema se analiza a detalle tres lazos de control y dos lazos de control On/Off identificado en la estructura base del sistema de extracción por fluido supercritico.

2.4.1. Dinámica del extractor

Para el modelado se debe tomar en cuenta la variable medida como sensor de realimentación y como variable de proceso el porcentaje de apertura de la válvula, se considera que la variable medida es la principal variable a controlar. En la figura 2.9 se muestra el esquema para el modelado del tanque de extracción y los elementos que influyen en la variable medida los cuales constan de un tanque, una bomba de presurización y una válvula moduladora.

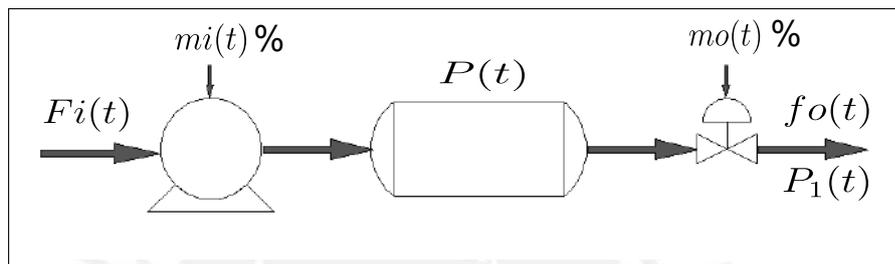


Figura 2.9: Tanque de extracción (Smith and Corripio, 1985).

De la hoja de datos de la bomba de desplazamiento positivo se tiene la siguiente relación:

$$\frac{I_{\text{indiceG.P.M}}}{I_{\text{indiceRPM}}} = \frac{D_{\text{eseadoG.P.M}}}{D_{\text{eseadoRPM}}} \quad (2.1)$$

$$\frac{17(L/min)}{1700} = \frac{fi(t)}{RPM}$$

Donde los valores de índice G.P.M que para este diseño es considerado 17 L/min y RPM de 1700 son los valores máximos permitidos por la bomba, la frecuencia mínima según el fabricante del motor es de 15 Hz, $fi(t)$ representa el flujo de entrada en litros por minuto. Luego se representa el valor de los RPM's como una señal de porcentaje:

$$RPM = \frac{1700}{100} * mi(t)$$

De la ecuación (2.1) y la ecuación de los RPM's, se tiene el flujo del fluido (L/min) en condiciones estándares en función del porcentaje de RPM's de la Bomba, esto se aprecia en la ecuación (2.3)

$$f_i(t) = 0.17 * m_i(t) \quad (2.3)$$

El flujo que atraviesa la válvula está dada por:

$$f_o(t) = 0.1432832 m_o(t) * \sqrt{P(t) * (P(t) - P_1(t))} \quad (2.4)$$

Donde:

$f_o(t)$ Es el flujo de salida del gas, L/min.

$m_o(t)$ Porcentaje de la apertura de la válvula.

$P(t)$ Presión en el tanque, Bar.

$P_1(t)$ Caída de presión, Bar.

Las condiciones de estado estacionario se tomaron en base a las presión y flujo que mayormente trabaja la planta piloto SFE.

$$\bar{f}_i = \bar{f}_o = 17 \text{ L/min}, \bar{P} = 350 \text{ Bar}, \bar{P}_1 = 60 \text{ Bar}, m_o = m_i = 50$$

Se desarrolla el modelo matemático que relacione la presión en el tanque al cambio de la señal de la bomba $m_i(t)$, la señal de la válvula $m_o(t)$ y la variación de la descarga después de la válvula moduladora $P_1(t)$.

Para empezar con el modelado partimos de la siguiente relación 2.7.

Tabla 2.7: Relación de moles en el tanque extractor

$$\frac{\text{Indice de moles al ingreso del tanque}}{\text{Indice de moles a la salida de tanque}} = \frac{\text{Indice de moles acumulados en el tanque}}{\text{tanque}}$$

O en forma de ecuación (2.5):

$$\bar{P} f_i(t) - \bar{\rho} * f_o(t) = \frac{\partial n(t)}{\partial t} \quad (2.5)$$

$\bar{\rho}$ =Densidad molar del gas 0.000113 mol/L.

$n(t)$ =Moles de gas en el tanque.

Para la válvula moduladora se tiene la siguiente relación en la ecuación (2.4.1)

$$f_o(t) = 0.143283 * m_o(t) * \sqrt{P(t)(P(t) - P_1(t))} \quad (2.6)$$

La señal $mi(t)$ de la ecuación (2.3) y la caída de presión $P_1(t)$ son otras señales de entrada por lo que no se deben considerar como desconocidos. Para condiciones supercríticas se puede aplicar la ley de los gases ideales (de Castro, 1994), bajo esta concepción se complementa el modelamiento de la planta piloto SFE, la ley de los gases ideales esta dado por :

$$P(t) = n(t) * R * T \quad (2.7)$$

Para continuar con el siguiente paso se debe realizar una expresión para $f_o(t)$, La ecuación (2.4.1) es una ecuación no lineal por tanto la transformada de Laplace no puede ser aplicada. Debido a esto se debe linealizar todos los términos no lineales usando la expansión de las series de Taylor. De las ecuación (2.5) y la ecuación (2.7) se puede construir la serie:

$$f_o(t) = f [m_o(t), P(t), P_1(t)] \quad (2.8)$$

Luego se hace la linealización alrededor de los puntos de equilibrio \bar{m}_o , \bar{P} y \bar{P}_1 .

$$f_o(t) = \bar{f}_o + \frac{\partial f_o(t)}{\partial m_o(t)} [m_o(t) - \bar{m}_o] + \frac{\partial f_o(t)}{\partial P(t)} [P(t) - \bar{P}] + \frac{\partial f_o(t)}{\partial P_1(t)} * [P_1(t) - \bar{P}_1] \quad (2.9)$$

También se puede representar de la forma:

$$f_o(t) \approx \bar{f}_o + C1 [m_o(t) - \bar{m}_o] + C2 [P(t) - \bar{P}] + C3 [P_1(t) - \bar{P}_1] \quad (2.10)$$

Donde las constantes C1, C2 y C3 se deducen de la siguiente forma:

$$C1 = \frac{\partial f_o(t)}{\partial m_o(t)} = 0.143283 * \sqrt{P(t)(P(t) - P_1(t))} \quad (2.11)$$

$$C2 = 0.143283 * (1/2) * [\bar{P} * (\bar{P} - \bar{P}_1)]^{-1/2} * (2 * \bar{P} - \bar{P}_1) \quad (2.12)$$

$$C3 = 0.143283 * (1/2) * \bar{m}_o * [\bar{P} * (\bar{P} - \bar{P}_1)]^{-1/2} * (-\bar{P}) \quad (2.13)$$

Por lo que el flujo de salida en estado estacionario quedará de la siguiente forma:

$$\bar{f}_o = f_o [\bar{m}_o, \bar{P}, \bar{P}_1] \quad (2.14)$$

Las ecuaciones (2.11), (2.4.1), (2.13) y (2.14) representan el conjunto de ecuaciones lineales del sistema alrededor de los puntos de equilibrio \bar{m}_o , \bar{P} , \bar{P}_1 . Para

simplificar este conjunto de ecuaciones se resuelve la ecuación de los gases ideales:

$$\bar{\rho} * f_1(t) - \bar{\rho} * f_o(t) = \frac{V}{R * T} \frac{\partial P(t)}{\partial t} \quad (2.15)$$

Con la sustitución del conjunto de ecuaciones se tiene solamente tres ecuaciones con tres variables $f_i(t), f_o(t), P(t)$. En condiciones de estado estacionario se deduce la siguiente relación:

$$\bar{\rho} * f_i - \bar{\rho} * f_o = 0 \quad (2.16)$$

De las ecuación (2.14) y la ecuación (2.17) se tiene lo siguiente:

$$\bar{\rho} * [f_i(t) - \bar{f}_i] - \bar{\rho} [f_o(t) - \bar{f}_o] = \frac{V}{R * T} \frac{\partial [P(t) - \bar{P}]}{\partial t} \quad (2.17)$$

Sustituyendo las variables se tiene:

$$F_i(t) = f_i(t) - \bar{f}_i \quad (2.18)$$

$$F_o(t) = f_o(t) - \bar{f}_o \quad (2.19)$$

$$P(t) = p(t) - \bar{p} \quad (2.20)$$

Sustituyendo finalmente queda la ecuación:

$$\bar{\rho} * F_i(t) - \bar{\rho} * F_o(t) = \frac{V}{R * T} \frac{\partial P(t)}{\partial t} \quad (2.21)$$

De la ecuación de la bomba en donde se muestra el flujo en relación con el porcentaje de apertura se tiene:

$$F_i(t) = 0.17 * M_i(t) \quad (2.22)$$

donde: $M_i(t) = m_1(t) - \bar{m}_i$

Después de la diferencia de las ecuaciones (2.20) y (2.21), se tiene el siguiente resultado:

$$F_o(t) = C1 * M_o(t) + C2 * P(t) + C3P_1(t) \quad (2.23)$$

Donde: $M_o(t) = m_o(t) - \bar{m}_o$ y $P_1(t) = p_1(t) - \bar{P}_1$

Reescribiendo la ecuación (2.23) se tiene lo siguiente:

$$C2 * P(t) = F_o(t) - C1 * M_o(t) - C3 * P_1(t) \quad (2.24)$$

$$P(t) = \frac{0.17}{C2} M1(t) - \frac{C1}{C2} Mo(t) - \frac{C3}{C2} P1(t)$$

$$P(t) = \frac{0.17}{C2} M1(t) - \frac{C1}{C2} Mo(t) - \frac{C3}{C2} P1(t)$$

$$P(s) = \frac{K1}{\tau s + 1} M1(s) - \frac{K2}{\tau s + 1} Mo(s) - \frac{K3}{\tau s + 1} P1(s) \quad (2.27)$$

De la ecuación los cálculos de tiempo se calculan con las ecuaciones obtenidas de los cuales se tiene las siguientes contantes calculadas:

$$\tau = \frac{V}{RT\rho C2} = 5.242min \quad (2.28)$$

$$K1 = 3.569Bar/\% , K2 = 0.619Bar/\% , K3 = 3.569Bar/\%$$

Con esta función de transferencia se puede representar en un diagrama de bloques los cuales se observa en la figura 2.10 , como se muestra la presión del tanque es afectada por tres variables principales como el porcentaje de apertura de la válvula moduladora, la caída de presión y el flujo otorgado por la bomba. Este tanque de extracción es elemento principal de la planta piloto por lo que se profundizó en su análisis.

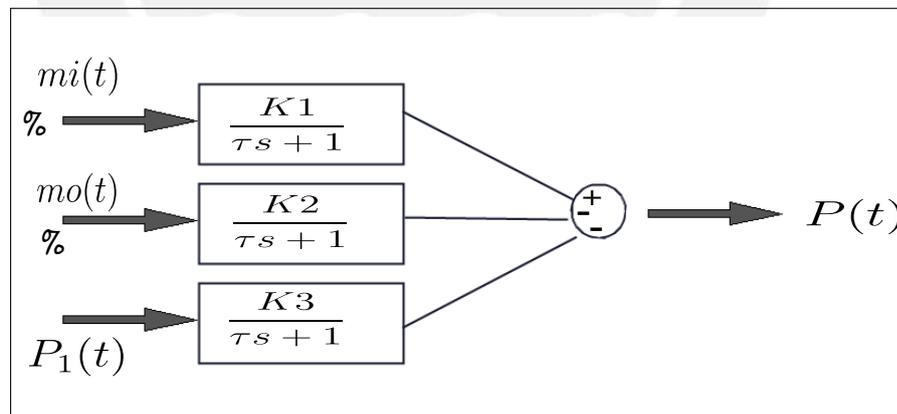


Figura 2.10: Función de transferencia del extractor.

A continuación se muestra las simulaciones echas en Simulink, en la figura 2.11 se muestra la repuesta al escalón donde primero se considera con la presión de descarga cero y el porcentaje de apertura de la válvula moduladora en 0%. En la figura 2.12 se muestra la respuesta al escalón con las condiciones estacionarias en la que se puede apreciar que el sistema responde a las exigencias ya que son sistemas de primer orden que solo se verán afectadas por la variación de algunas

de las señales de entradas, la estrategia de control será desarrollado en el capítulo IV.

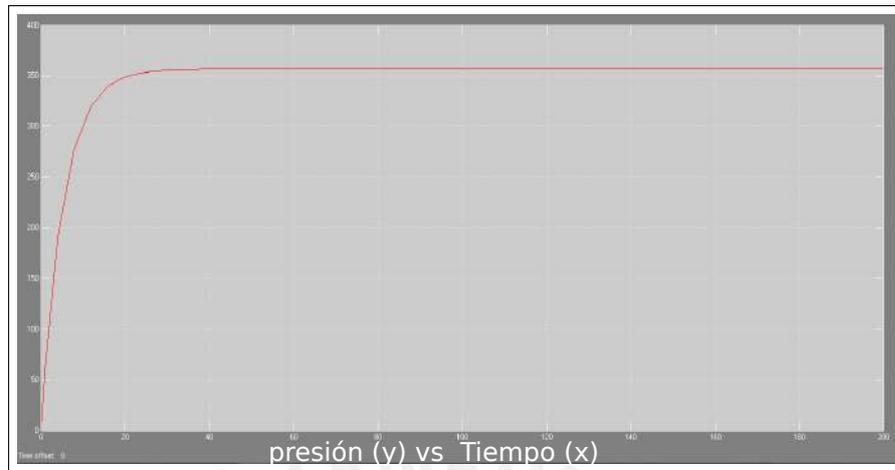


Figura 2.11: Respuesta al escalón solo con la bomba de presión.

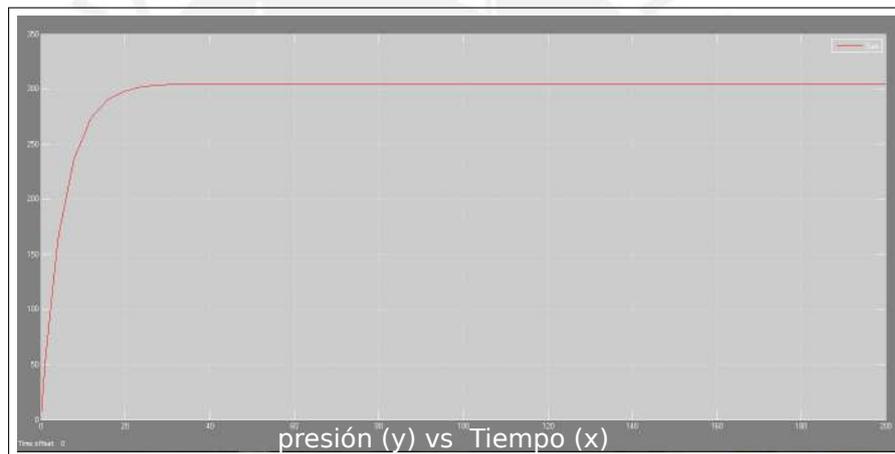


Figura 2.12: Respuesta al escalón en condiciones estacionarias.

2.4.2. Dinámica de la Bomba de Presión

En este lazo la variable medida es el flujo de salida de la bomba de presión, en este caso el tipo de bomba es el de desplazamiento positivo, estas bombas tienen la característica de tener el mismo volumen del fluido a la salida, por lo que el índice de flujo es dependiente de la velocidad o la frecuencia del pistón y de la geometría interna. La presión ejercida por la bomba de desplazamiento positivo visto desde la salida depende de los valores críticos de velocidad, la vida útil se ve afectada por este valor crítico de la velocidad, sin embargo es afectada por la carga, pero para estas condiciones se toma en cuenta los valores máximos de operación. Las bombas de desplazamiento positivo se han diseñado para trabajar

en condiciones adversas de altas presiones y por encima de las velocidades predefinidas.

Para determinar el flujo de la bomba a las salidas únicamente se debe obtener el producto del barrido de volumen por golpe por el índice de golpes por minuto que hace referencia a la velocidad del motor cuya variable de proceso son los rpm's del motor. el flujo o caudal viene determinado por la siguiente ecuación (2.29).

$$Q = \frac{A_{pl} * L_{st} * N_{cy}}{60} \quad (2.29)$$

Donde:

L_{st} = Carrera del pistón.

A_{pl} = Área del pistón con Diámetro D_{pl} .

N_{cy} = Numero de golpes por minuto.

Debido a que este es un sistema de primer orden este tiene una función de transferencia de la siguiente forma:

$$Q(s) = \frac{K1}{\tau s + 1} M1(s) \quad (2.30)$$

Donde K1 representa la ganancia que se ya modelo en la anterior sección el flujo de la salida en función de la M1 que es el porcentaje de la velocidad de la bomba. La ganancia esta representada en la ecuación (2.3), y el tiempo de retardo será definido por el motor y el tiempo que demore en alcanzar la velocidad deseada. La función de transferencia se define en la figura 2.13.

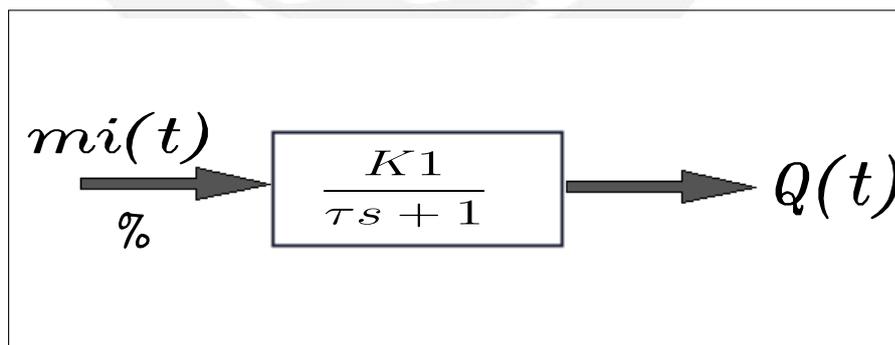


Figura 2.13: Función de la bomba de presión.

La respuesta al escalón se muestra en la figura 2.14, la cual se tomo como una señal de retraso de 10 segundos, este tiempo deberá identificarse según a la respuesta del variador de frecuencia del motor.

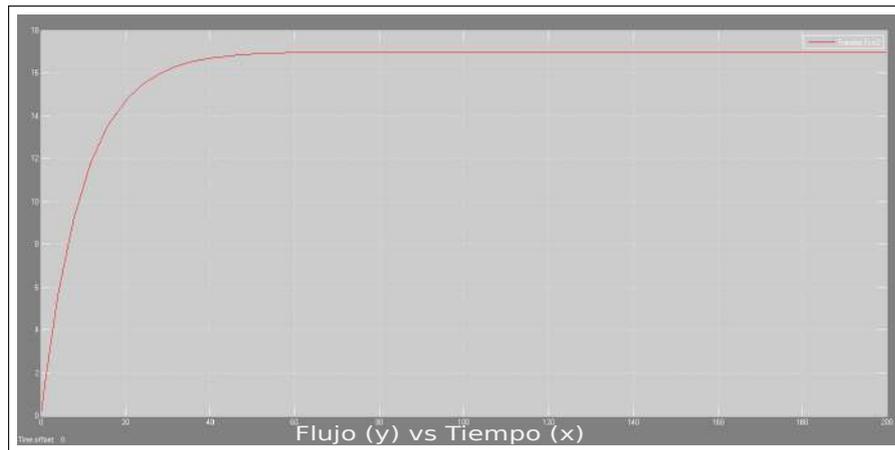


Figura 2.14: Función de la bomba de presión.

2.4.3. Dinámica del intercambiador de calor

La dinámica del intercambiador se reduce a un sistema de primer orden conocido con una ganancia y tiempo de retardo conocido, para la planta piloto SFE se considera un intercambiador de calor eléctrico en donde a variable medida es la temperatura del CO₂ en estado supercrítico y la variable proceso es la corriente que alimenta al intercambiador, un sistema de primer orden se define como:

$$T(s) = \frac{K1}{\tau s + 1} I(s) \quad (2.31)$$

Donde:

$T(s)$ = Temperatura a la salida del intercambiador.

$I(s)$ = Porcentaje de corriente suministrada al intercambiador.

El diagrama de bloques se muestra en la figura 2.15. Para hallar los valores de la capacidad calorífica se recurre a los datos técnicos los cuales están afectados por la diferencia de temperatura de entrada-salida y la resistencia del material.

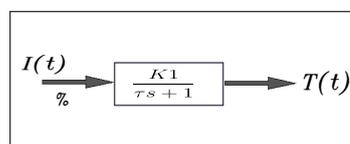


Figura 2.15: Función de transferencia para la temperatura.

2.5. Estructura P&ID

En esta sección se describe los estándares utilizados en el diseño de la instrumentación para indicación y control de variables de control. La lista de símbolos

son utilizados para nombrar a los equipos mecánicos, tuberías, válvulas, equipos eléctricos, la instrumentación y lazos de control. El diagrama P&ID ("Piping and Instrumentation Drawing") muestra la interconexión de los equipos de proceso y la instrumentación utilizada para el control del proceso; se diseñan respetando el estándar "Instrument Symbols and Identification" ISA-5.1 y al estándar ISA-5.3. Meier and Meier (2004)

Representación de Sensores y controladores.- Para la representación de los instrumentos como los sensores y controladores se debe tener en cuenta la normativa ISA, los símbolos y gráficos que se utilizan son una concesión para la mejor interpretación de los planos y las lógicas de control, estos símbolos se dan según la tabla de la figura 2.16.

	UBICACIÓN PRIMARIA (ACCESIBLE AL OPERADOR)	UBICACIÓN PRIMARIA (NO ACCESIBLE AL OPERADOR)	EN TERRENO	UBICACIÓN AUXILIAR (ACCESIBLE AL OPERADOR)
INSTRUMENTOS	○	○	○	○
CONTROL/DESPLIEGE FUNCION DEL SISTEMA CONTROL	◻	◻	◻	◻
EQUIPO DE CONTROL ESPECIAL	◻	◻	◻	◻
CONTROL EN PLC	◻	◻	◻	◻

Figura 2.16: Representación de sensores y controladores Meier and Meier (2004).

Identificación de instrumentos.- Para representar los símbolos y elementos se recurre a una codificación alfa numérica, los números representan la ubicación y establecen el lazo de identidad de control. La codificación alfabética identifica al instrumento y las acciones a realizar, la forma de realizar las codificaciones se muestran en la figura 2.17.

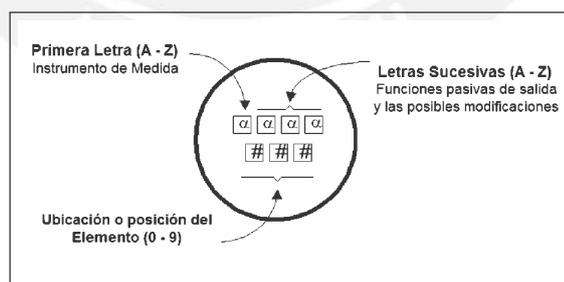


Figura 2.17: Identificación de instrumentos Meier and Meier (2004)..

Cada instrumento se identifica con una serie de letras que dan a conocer algunas características importantes, este código consta de cuatro letras que van en función de la tabla 2.8 donde se detalla el significado asociado a cada palabra.

Representación de señales.- En estos diagramas es importante dar un énfasis en la representación de las líneas para el envío de señales o conexiones de los sistemas de control. Estas líneas están normalizadas según la nomenclatura de la

Tabla 2.8: Identificación de instrumentos Meier and Meier (2004).

Letra	Primera letra	Modificado	Letra Sucesiva	
			Funciones pasivas o Lecturas de salida	Funciones de salida
A	Análisis (Composición)	Alarma, incluye Inter-look y Emergencia		
B	Combustión			
C	Conductividad Concentración		Regulación (ON – OFF)	Control
D	Densidad, Peso Especifico	Diferencial		
E	Voltaje		Sensor	
F	Flujo	Fracción		
G			Dispositivo de visión	
H	Mano (acción manual)			
I	Corriente Eléctrica		Indicación (indicador)	
K	Tiempo	Razón del cambio de tiempo		
L	Nivel		Luz	
M	Humedad			
O			Orificio, restricción	
P	Presión		Punto de prueba ó conexión	
Q	Cantidad	Integrado, Totalizado		
R	Radiación		Registro	
S	Velocidad, Frecuencia	Seguridad		Interruptor
T	Temperatura		Transmisor	
W	Peso (fuerza)		Pozo	
V	Vibración o Análisis Mecánico			Válvula
X	Libre a elección	Eje X	Libre a elección	Libre a elección
Y	Evento, Estado Presencia	Eje Y		Relé, Computadora
Z	Posición Dimensionamiento	Eje Z		Actuador, Manejador

figura 2.18.

Conexión de proceso o suministro	
Señal Neumática	
Señal Eléctrica	
Tubo Capilar	
Señal Indefinida	
Línea de Software	
Línea Mecánica	
Señal electromagnética o de sonido	
Señal Hidráulica	
El símbolo de señal neumática es usado de esta forma cuando se trata de aire.	AS aire suministrado ES Suministro eléctrico GS Suministro de Gas HS Suministro Hidráulico NS Suministro de Nitrógeno SS Suministro de vapor WS Suministro de agua

Figura 2.18: Tipos de líneas Meier and Meier (2004).

Selección de tuberías.- En la selección de tuberías es importante tener en consideración los siguientes criterios:

1. Resistencia a la presión de trabajo.
2. Costo de la tubería.
3. Pérdidas energéticas en las tuberías.

Los datos para el diseño de las tuberías de material ASTM 316 se obtienen del catalogo del fabricante en este caso de Atlas Steel (Megyesy and Buthod, 2001), donde se puede encontrar las características específicas para una determinada presión y temperatura. Para el cálculo de las pérdidas se recurre a la ecuación de Darcy-Weisback. Con estos datos se seleccionó la tubería de 1/2 pulgada, por tener menor pérdida a un costo considerado.

Las pérdidas se calculan utilizando la siguiente fórmula:

$$h_f = f * \frac{(L/D_h) * V}{2g} \quad (2.32)$$

Donde f es el coeficiente de fricción obtenido del diagrama de Moody en Función de Reynolds y la rugosidad relativa (0,0002mm).

2.6. Plano P&ID

Para desarrollar el plano P&ID se toma en consideración todas las normas técnicas ISA, herramientas con el software Autocad P&ID son de gran ayuda al diseñar estos planos puesto que los símbolos están según la norma correspondiente a la cual se se referencia. Este plano P&ID se desarrolló en base a la planta

sugerida por Hazop descrita en la referencia (Rosenthal, 2012), En el plano desarrollado se muestran todos los componentes que debe contener una planta piloto de extracción por fluido supercrítico.

En el plano diseñado del anexo B, se muestran los equipos descritos en el presente capítulo, las válvulas, dispositivos de protección y la instrumentación requerida en cada lazo de control. Este es el primer paso para el diseño de la automatización de la planta piloto ya en el siguiente capítulo se diseñará la parte eléctrica para luego realizar la lógica de control del sistema para su mejor desempeño.





Capítulo 3

Diseño de la parte eléctrica y configuración de los sensores y actuadores

3.1. Introducción

El propósito del presente capítulo consiste en realizar el diseño de la parte eléctrica así como el desarrollo de los planos eléctricos, la distribución de los componentes de campo y el diseño de protección para los actuadores. también se toma en consideración el flujo de corriente eléctrica. Como se ha mencionado en el anterior capítulo el diseño mecánico se referencia a la desarrollada por la universidad de Guelph de Canadá, ya que el diseño mecánico se encuentra diseñado e implementado del cual se aprovecho para poder hallar las funciones de transferencia y hallar un modelo aproximado de la planta piloto.

Este capítulo se divide en 3 partes, diseño del diagrama unifilar de cargas de la planta SFE, diseño de los planos eléctricos y la distribución del tablero eléctrico y la determinación de las redes de comunicación. En la primera parte se da a conocer el cálculo potencia consumida por el sistema, representado en un diagrama unifilar detallando lo componentes principales entre actuadores y sensores. Se realiza un equilibrio de fase para que no exista un descompesación al momento de introducirla en la red de tensión, se calcula los dispositivos de protección según el consumo de los elementos eléctricos.

En la segunda parte, se presenta el diseño de los planos eléctricos detallando la conexión y configuración de los componentes eléctricos y sensores. La distribución de las borneras el tipo de cable que se utilizará en cada conexión, se diseñará la distribución de los componentes de campo y dentro del tablero eléctrico.

En la tercera parte, se determinará el tipo de comunicación que tendrá el sistema y también se determinará el tipo de protocolo utilizado para las comunicaciones.

3.2. Diseño Eléctrico

El diseño eléctrico es una clave para el desarrollo de la planta piloto **FSE!** (**FSE!**). Este diseño cumple un rol extremadamente importante ya que es la primera disciplina que se responsabiliza del funcionamiento adecuado del proceso o manufactura, este diseño además de cumplir con las normas de diseño IEC (International Electrotechnical Commission) es importante tener en consideración lo siguiente (DiLouie, 1998):

1. Determinar el tipo de proceso las condiciones de temperatura, humedad, presión y otros parámetros a las cuáles estará sometido la planta y que afecten directamente al producto final obtenido.
2. El diseño eléctrico debe tener en consideración el tamaño de los tanques y equipos como intercambiadores, enfriadores, bombas, compresores, etc. Además de eso se debe determinar la distancia de separación que existe entre los diversos componentes.
3. Se debe asegurar la seguridad en la operación de la planta piloto, identificar y clasificar las áreas peligrosas o equipos en los cuales existe un riesgo alta de provocar algún incidente.
4. Desarrollar requerimientos útiles como el diagrama unifilar y luego hacer un detalle de las conexiones de los componentes del diagrama planteado.

Teniendo en consideración los aspectos que se deben tomar en cuenta para el diseño eléctrico de la planta piloto se procede a realizar la memoria de cálculo.

3.3. Diseño del Diagrama Unifilar

Antes de realizar el diagrama unifilar se debe calcular la corriente necesaria para alimentar a la planta piloto SFE, lo cual resulta de la demanda de corriente de cada uno de los equipos como la bomba de presurización, el intercambiador de calor, el condensador y del total de los actuadores de baja potencia. Dada las recomendaciones anteriores para iniciar el cálculo se ha dispuesto que las condiciones ambientales de temperatura y humedad en las cuales la planta estará sometida son:

- Temperatura de 30°C.
- Humedad de de 85 %.
- Los cables estarán en ductos.

3.3.1. Cálculo de la carga por los equipos de la planta piloto

Motor de la Bomba de presurización: Esta bomba tiene un motor de 1700 RPM (Revoluciones por minuto), de alimentación trifásica de 220 Vac, el motor debe contener un variador de velocidad y dispositivos de protección tales como un guarda-motor u otros dispositivos.

Es necesario hallar la corriente nominal, y la corriente de diseño para dimensionar los dispositivos que se utilizarán, con la potencia de placa y con el Factor De Potencia (f_{dp}) se hallará la corriente nominal consumida por el motor:

$$f_{dp} = 0.87$$

$$P_e = 2.2371 Kw$$

P_e es la potencia eléctrica del motor que se requiere, en seguida se procede a calcular la corriente nominal del motor trifásico:

$$I_n = \frac{P_e}{\sqrt{3} * VL * f_{dp}} \quad (3.1)$$

Donde VL viene a ser el voltaje de línea para este caso el voltaje de línea se considera 220 Vac, de acuerdo a las exigencias del proyecto se requiere:

$$VL = 0.22 Kv$$

$$I_n = 6.91 A$$

Ahora para el diseño es necesario hallar la corriente de diseño (I_d), esta corriente es necesaria para realizar los cálculos para el dimensionamiento de los equipos de protección. En la ecuación 3.2 se define la forma de hallar la corriente de diseño.

$$I_d = 1.25 * I_n = 8.64 A \quad (3.2)$$

Para la elección de los calibres de los cables, se debe considerar las condiciones ambientales y para esto se afecta un factor de corrección dada por la formula 3.7.

$$I_{adm} = \frac{I_d}{k_1} \quad (3.3)$$

k_1 representa el factor de corrección considerado en un ambiente crítico de 30°C, para obtener valores para otras condiciones ambientales se recurre a la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Tabla de factores de corrección

Temperatura Ambiente [C]	PVC		XLPE o EPR	
	Cables al aire	Cables en ducto	Cables al aire	Cables en ducto
10	1,22	1,10	1,15	1,07
15	1,17	1,05	1,12	1,04
20	1,12	1,00	1,08	1,00
25	1,06	0,95	1,04	0,96
30	1,00	0,89	1,00	0,93
35	0,94	0,84	0,96	0,89
40	0,87	0,77	0,91	0,85
45	0,79	0,71	0,87	0,76
50	0,71	0,63	0,76	0,71
55	0,61	0,55	0,71	0,65
60	0,50	0,45	0,65	0,60
65	-	-	0,58	0,53
70	-	-	0,50	0,46

Para una temperatura ambiente de 30°C, elegimos un tipo de cable XLPE o EPR los cuales deberán ir en ductos enterrados.

$$k_1 = 0.93$$

$$I_{adm} = 9.29A$$

Ahora bien con la corriente de diseño y con la corriente admisible se debe dimensionar los dispositivos de protección y conexión, para este caso el motor de la bomba de presurización se debe dimensionar teniendo en consideración la tabla 3.2.

Tabla 3.2: Dimensionamiento de equipos para el Motor M3000

Dispositivo	I(Amp)	V(Volt.)	Potencia
Guardamotor	>8.64	230	
Variador de Velocidad		230	3 HP
Cables	>9.29		

Con las especificaciones de los componentes se puede elegir la marca del variador que uno desee, en la presente tesis se ha elegido el variador de frecuencia Danfoss, el cuál tiene los siguientes datos técnicos:

Tabla 3.3: Datos técnicos del VDF (Variador de Frecuencia)

FC51 M3

Potencia requerida	2.2 a 3.7 Kw
Voltaje	200 - 240 Volt.
Motor	2.2 Kw / 3x220 Vac

Intercambiador de Calor: El intercambiador eléctrico que tiene una capacidad para calentar gases y fluidos de hasta 517 Bar de una temperatura de proceso de 200°C calentamiento indirecto con un control propio que se comanda por una señal analógica de 4-20 mA. Las características técnicas son las que se muestran a continuación en la tabla 3.4.

Tabla 3.4: Datos técnicos del intercambiador ,(Chromalox, 2016)

General

Potencia requerida	3 a 30 KW
Salida Térmica	10,236 a 102,360 Btu/h
Voltaje	230 Volt.
Presión máxima	517 Bar

Con los datos de potencia y voltaje podemos hacer el cálculo de la corriente que demanda el intercambiador de calor eléctrico en condiciones de operación nominal, para lo cual se procede a desarrollar la siguiente ecuación:

$$P = V * I_n \quad (3.4)$$

$$I_n = 15kw/230V$$

$$I_n = 65.21Amp.$$

Esta es la corriente nominal que consumirá el intercambiador de calor eléctrico, luego para el diseño se debe trabajar con la corriente de diseño I_d , el cual se halla multiplicando por el factor 1.25:

$$I_d = 1.25 * I_n$$

$$I_d = 81.52Amp$$

Con este valor de la corriente de diseño, se hace el dimensionamiento de los elementos de seguridad, en este equipo se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos:

La selección del calibre de los cables de fuerza se realiza de acuerdo a la corriente admisible, para este caso la corriente admisible obtenida en la ecuación 3.5 es de 86.58 Amperios, para la elección del tipo de cable los diferentes fabricantes

Tabla 3.5: Consideraciones para el intercambiador de calor

Intercambiador de Calor

Potencia requerida	3 a 30 KW
Llave automática	>81.21 Amp.
Contacor	>81.21 Amp.
Cables por ducto	>81.21 Amp.

muestran cuadros según a esta corriente de las cuales se selecciona el inmediato superior a la corriente admisible nunca uno igual o menor que esta corriente.

$$I_{adm} = \frac{Id}{k1} = \frac{81.52Amp}{0.93} = 86.58Amp \quad (3.5)$$

Condensador El condensador no demanda un consumo considerado de energía eléctrica porque su funcionamiento se basa en un refrigerante, el control es independiente y por lo que solo se activan o desactivan válvulas que serán consideradas en el siguiente apartado.

3.3.2. Cálculo de la carga por la instrumentación de la planta piloto

Actuadores de la planta piloto:

Los actuadores de la planta vienen a ser los dispositivos que son accionados por el controlador en la planta piloto SFE son considerados algunas electro válvulas que accionaran a las válvulas neumáticas, la válvula moduladora y los equipos que necesiten una señal eléctrica para su funcionamiento, los actuadores pueden ser de dos tipos:

- **Actuadores Digitales:** Estos actuadores vienen a ser todos los dispositivos que son accionados por una señal de ON/OFF, esta señal en los controladores industriales según las normativas se ha establecido en un señal digital de 24 VDC (Voltaje de corriente digital).
- **Actuadores Analógicos:** Estos actuadores vienen a ser todos los dispositivos que son accionados por una señal de corriente o voltaje continuo, según los estándares alcanzados por las normativas IEC, las señales analógicas son de 0-10 VDC o señal de corriente de 4-20 mA o 0-20 mA. Los controladores deben estar en la capacidad de satisfacer estos requerimientos.

Para el cálculo de la corriente consumida por los actuadores de la planta piloto, se debe identificar del diagrama P&ID la cantidad de actuadores digitales y la

cantidad de actuadores analógicos, en la tabla 3.6 se muestra la lista completa de las válvulas. En la cual que se puede apreciar que existen 9 válvulas de tipo bola según la lista de la figura 3.1 y se considerarán un adicional de 3 reservas por lo que se considera 11 señales ON/OFF, para lo cual se dispondrá de electroválvulas las cuales a su vez accionarán a las válvulas neumáticas.

Tabla 3.6: Lista de válvulas en la planta piloto SFE.

Lista de Válvulas						
Tag	Tipo	Función	Posición	Presión Mfima	Temperatura (°C)	Comentarios
BV1002	Bola	Ingreso CO2	NC	400 Bar	-50 - 100	Válvula con accionamiento neumático.
VC1003	Check	Restringir la dirección del CO2	---	400 Bar	-50 - 100	
BV1004	Bola	Ingreso de CO2 líquido	NC	400 Bar	-50 - 100	Accionamiento neumático.
1PSV1	Seguridad	Válvula de seguridad en TK1000	N	200 Bar	-50 - 100	Fijado en 100 Bar.
BV2002	Bola	Proveer CO2 líquido	NC	400 Bar	-50 - 100	Accionamiento neumático.
HA2007	Check	Restringir la dirección del CO2	---	400 Bar	-50 - 100	
BV3003	Bola	Bypass Bomba de CO2	NC	400 Bar	-50 - 100	De acción neumática para hacer un Bypass a la Bomba de presurización
3PSV2	Seguridad	seguridad a la salida de P3000	---	400 Bar	-50 - 100	Válvula de seguridad fijada en 340 Bar.
BV3004	Bola	Apertura el damper	NC	400 Bar	-40 - 100	Apertura el Dampener para las purgas.
HA4008	Check	Restringir la dirección del CO2	---	400 Bar	-40 - 100	Restringir el retorno de CO2 a la Bomba
BV4010	Bola	Ingreso de CO2 al intercambair de calor	NC	400 Bar	-40 - 100	Accionamiento neumático.
BV5002	Bola	Ingreso de CO2 al extractor	NC	400 Bar	0 - 100	Accionamiento neumático.
BV5003	Bola	Salida de CO2 del Extractor	NC	400 Bar	0-100	Accionamiento neumático.
BV5004	Bola	Bypass Extractor	NC	400 Bar	0 - 100	Accionamiento neumático.
1PSV4	Seguridad	Seguridad de presión alta en Extractor	---	400 Bar	0 -100	Fijado en 340 Bar.
VM5001	Globo	Control de presión en el extractor	---	414 Bar	-50 - 100	Válvula de control neumático.
1PSV5	Seguridad	Seguridad de presión alta en el Separador	---	400	-0 - 100	Fijado a 80 Bar.
VM6001	Globo	Mantener Presión en Extractor	---	400	0 - 100	Fijado en 78 Bar
HA6005	Check	Restringir la dirección del CO2	---	400	0 - 100	

La electroválvula según los datos técnicos consumen 11 Watts. de potencia a 24 VDC, con esto se puede calcular el consumo por los actuadores del controla-

dor. En todo diseño se debe considerar actuadores extras que este caso se han llamado reservas, por lo tanto se consideraran 3 reservas de accionamiento por electroválvula ON/OFF. El cálculo de potencia por los actuadores se realizó de la forma siguiente:

$$I_n = (\text{Numero de electroválvulas} * \text{Potencia Consumida}) / \text{Voltaje de alimentación} \quad (3.6)$$

$$I_n = (14 * 11) / 24$$

$$I_n = 6.41 \text{ Amp}$$

La corriente de diseño :

$$I_d = 6.41 * 1.25 = 8 \text{ Amp}$$

Las electroválvulas de control o analógicas consumen la corriente otorgada por la señal de control debido a que el actuador es de tipo neumático. Por tanto no se considera como una carga que demanda alta corriente.

Entradas de la planta piloto:

Las entradas de la planta piloto pueden ser digitales de 24 VDC por 500 mA. o bien entradas analógicas de 4-24 mA. Para hallar el cálculo del consumo que demanda las entradas de instrumentación en la planta piloto SFE se identifica en el plano P& ID los instrumentos, los cuales se muestran en la tabla 3.7.

Tabla 3.7: Lista de instrumentos en la Planta pilotoSFE.

Instrumentación						
Tag	Función	Interfaz de operación	Rango	Presión mínima	Rango de Temperatura °C	Comentarios
TT201	Medir temperatura a la salida del condensador	Computador 4-20mA	-50 - 50 °C	200 Bar	-50 - 100	Sensor transmisor a la salida de E7000
PIT101	Medir la presión en el tanque de CO2	Computador 4-20mA	0 - 200 Bar	200 Bar	-50 - 100	Interlock en el tanque del CO2.
TIT102	Medir la Temperatura de TK1000	Computador 4-20mA	-50 - 50 °C	200 Bar	-50 - 100	Interlock en el tanque del CO2.
LS201	Medir nivel del tanque	Computador 24VDC	On/Off	400 Bar	-50 - 100	Medir nivel del tanque de CO2.
LS202	Medir nivel del tanque	Computador 24VDC	On/Off	400 Bar	-50 - 100	Medir nivel del tanque de CO2.
LS203	Medir nivel del tanque	Computador 24VDC	On/Off	400 Bar	-50 - 100	Medir nivel del tanque de CO2.
LS204	Medir nivel del tanque	Computador 24VDC	On/Off	400 Bar	-50 - 100	Medir nivel del tanque de CO2.
FITC301	Medir Flujo del CO2	Computador 4-20mA	0 - 50 Lt/min	400 Bar	-50 - 100	Medidor de flujo másico.
TI401	Medir Temperatura a la entrada de E4000	En Línea	-50 - 50 °C	400 Bar	-50 - 100	
TTC402	Medir Temperatura ala	Computador 4-20mA	0 - 100 °C	400 Bar	0 - 100	Señal de referencia para el control de E4000
PIT502	Medir la presión de del extractor	Computador 4-20mA	0 - 400 Bar	400 Bar	0 - 100	
TT503	Medir la temperatura en el extractor	Computador 4-20mA	0 - 100 °C	400 Bar	0 - 100	
PI506	Medir la presión en TK5000	En Línea	-10 - 400 Bar	400 Bar	0 - 100	Tipo Manómetro
TI505	Medir la temperatura en el extractor	En Línea	0 - 100 °C	400 Bar	0 - 100	Tipo Manómetro
PIT601	Medir la presión en el separador	Computador 4-20mA	-10 - 200 Bar	300 Bar	0 - 100	
TT602	Medir la Temperatura en el separador	Computador 4-20mA	0 - 100 °C	300 Bar	0 - 100	
PT603	Medir la presión a la entrada del condensador	Computador 4-20mA	-10 - 200 Bar	300 Bar	0 - 100	

De la tabla 3.7 se puede apreciar que existen 4 entradas digitales y 10 entradas analógicas, para hallar el consumo total se realiza una suma aritmética de los consumos que demanda cada componente, al ser elementos industriales de categoría estándar se conoce la corriente que consume.

$$I_n = 4 * 0.5 + 10 * 0.2$$

$$I_n = 4.5Amp$$

Luego se calcula corriente de diseño con la siguiente ecuación:

$$I_d = 4.5 * 1.25 = 5.6Amp$$

3.3.3. Consumo de corriente del controlador

Antes de hacer una revisión de las entradas y salidas del controlador se debe definir el controlador a utilizar, para una adecuada selección del controlador se toma en consideración aspectos como el tiempo de respuesta requerido por el sistema, las condiciones a las cuales estará sometido, el tipo de señales que manejará, las redes de comunicación que se demandan, la capacidad de integrar una interfaz hombre maquina, capacidad de programa y memoria. Entre los principales controladores utilizados para estos sistemas se tienen los circuitos integrados programables, Field Programmable Gate Array (FPGA), Application Specific Integrated Circuit (ASIC) y los controladores industriales, a continuación se describen algunas ventajas y desventajas de estos controladores para una correcta selección que se ajuste a las necesidades de la planta piloto:

PIC, Arduino

- **Ventajas:** Son plataformas computacionales físicas de recursos abiertos, con entradas y salidas programables. Los sensores y actuadores pueden ser digitales. El software de programación para el lenguaje de programación es barato comparado con otros lenguajes de programación. El hardware es más barato ya que puede ser adquirido desde los \$35. Puede ser ejecutada desde el computador serialmente y tiene una memoria pequeña. Trabaja con lenguajes programación fáciles de manejar y poseen muchas librerías.
- **Desventajas:** Una de sus principales desventajas es que no ofrece seguridad en la operación. No puede realizar varios procesos en el mismo tiempo. No es muy sencillo agregar entradas y salidas después de la implementación. Es muy sensible a los ruidos eléctricos.

FPGA

- **Ventajas:** Son circuitos reprogramables que ofrecen grandes recursos de puertas lógicas y un bloque de RAM para implementar tareas de computo complejo. Tiene una respuesta rápida debido a la programación de puertas lógicas. Puede ser usado para implementar cualquier función lógica ASIC. Ofrece seguridad y rapidez de respuesta por lo que es usado en data center, equipos médicos, equipos industriales donde se requiera alta velocidad de procesamiento y en aplicaciones aeroespaciales y de defensa.
- **Desventajas:** Es mas caro en comparación de los circuitos integrados programables. Para desarrollar los protocolos de redes es necesario construir módulos y desarrollar las tramas de comunicación. La programación no es tan sencilla por lo que se requiere conceptos avanzados de programación.

Controladores Industriales, PLC

- **Ventajas:** Los controladores lógicos programables son ampliamente utilizados en la industria debido a su robustez y la seguridad en la operación. La modularidad que ofrece en cuanto a I/O hace que sea de fácil la ampliación de la capacidad del controlador. Maneja protocolos industriales regidos por las normas internacionales. La programación es sencilla a comparación de los FPGA, con la posibilidad de reprogramar en modo online. Tiene mayor capacidad de memoria para almacenar datos de procesos. Tiene la capacidad de realizar varias tareas a la vez. Tiene implementado librerías para las estrategias de control.
- **Desventajas:** Son caros desde 10 veces mas caro de los circuitos integrados programables. La gran cantidad de controladores industriales que existen en el mercado hace que se defina muy bien el proceso antes de elegir uno. No son tan rápidos en comparación de los FPGA'S.

Teniendo en cuenta lo anterior se concluye que en la automatización de la planta piloto debe ser un controlador industrial, debido a que se requiere seguridad en la operación, robustez en el funcionamiento, posibilidad de ampliar modularmente por ser una planta piloto, trabajo continuo en largos periodos de tiempo, soportar protocolos de comunicación industriales para un manejo remoto de la planta y se tiene que controlar mas de un lazo de control. Ahora se debe dimensionar el controlador industrial puesto que una sobre-dimensión de este incurre directamente en el costo del controlador, entre la diferente gamma de controladores industriales se tiene el PLC, los DCS(Sistemas de Control Distribuido) y PAS(Sistema automatizado de Procesos); estos dispositivos han probado

su robustez y confiabilidad en el control de procesos industriales. En la figura 3.1 se muestra las aplicaciones en las que se debe usar, en el caso de la planta piloto es una maquina de pruebas que trabajará con un proceso tipo batch, por lo que el PLC que se definió es de gamma baja.

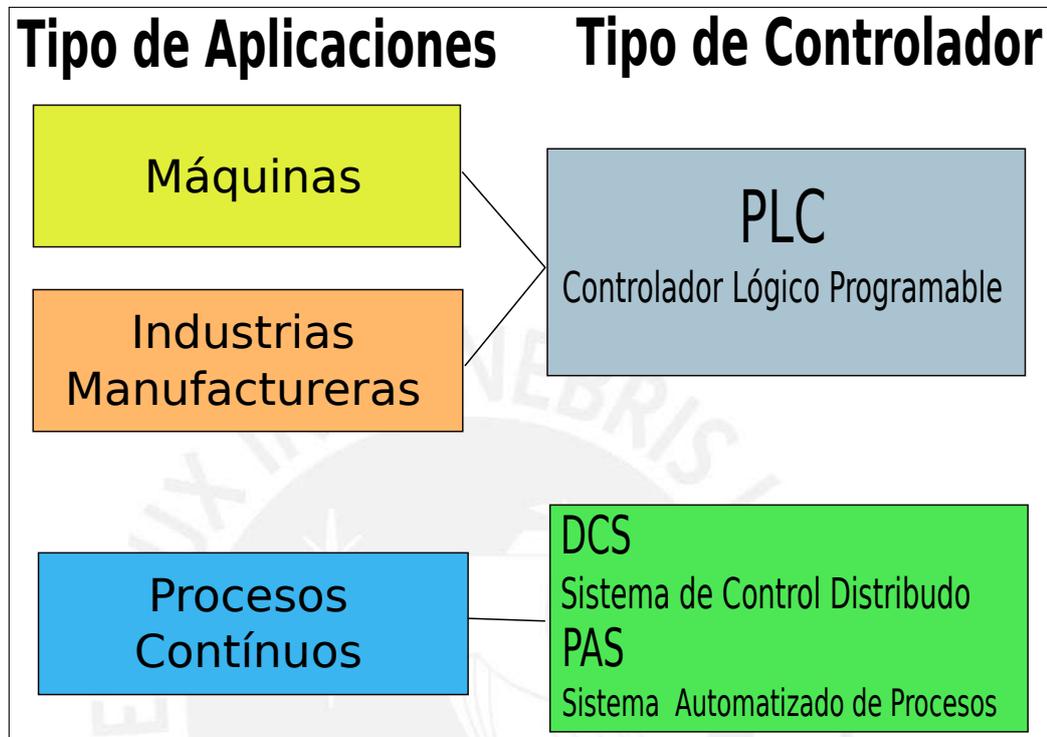


Figura 3.1: Aplicaciones y tipos de controladores industriales

El PLC debe tener los recursos necesarios para realizar el control adecuado bajo todas las exigencias de la planta piloto SFE. Para la elección de los módulos I/O (Entradas y Salidas), se debe clasificar todas las señales que se obtienen del diagrama PI&D, las señales identificadas se muestran en la tabla 3.8 y la tabla 3.9.

Tabla 3.8: Lista de entradas al PLC

TAG	Descripción	Tipo de entrada
PIT101	Presión en TK-1000	Analógico 4-20 mA
TIT102	Temperatura en TK-1000	Señal 4-20 mA
FITC301	Flujo de CO2	Analógico 4-20 mA
TITC402	Temperatura a la salida de E-4000	Analógico 4-20 mA
PIT502	Presión en TK-5000	Analógico 4-20 mA
TT503	Temperatura en TK-5000	Analógico 4-20 mA
PIT601	Presión en TK-6000	Analógico 4-20 mA
TT602	Temperatura en TK-6000	Analógico 4-20 mA
PT603	Presión a la entrada	Analógico 4-20 mA
	Reserva	Analógico 4-20 mA
	Reserva	Analógico 4-20 mA
	Reserva	Analógico 4-20 mA
LS201	Sensor Nivel Tanque CO2	Digital
LS202	Sensor Nivel Tanque CO2	Digital
LS203	Sensor Nivel Tanque CO2	Digital
LS204	Sensor Nivel Tanque CO2	Digital
PS201	Sensor de Presión	Digital

Tabla 3.9: Salidas del PLC

TAG	Descripción	Tipo de entrada
PVM5001	Válvula moduladora	Analógico 4-20 mA
VDF3002	Variador de Velocidad	Analógico 4-20 mA
E4000	Intercambiador de Calor	Analógico 4-20 mA
	Reserva	Analógico 4-20 mA
VY101	Electroválvula para HA1002	Digital
VY102	Electroválvula para BV1003	Digital
VY103	Electroválvula para BV1004	Digital
VY104	Electroválvula para BV2001	Digital
VY105	Electroválvula para BV3003	Digital
VY106	Electroválvula para BV3004	Digital
VY107	Electroválvula para BV4010	Digital
VY108	Electroválvula para BV5002	Digital
VY109	Electroválvula para BV5003	Digital
VY110	Electroválvula para BV5004	Digital
	Reserva	Digital
	Reserva	Digital

Con los instrumentación revisada se dimensiona la estructura del PLC, los requerimientos atienden a lo siguiente:

- 12 Entradas de analógicas.
- 5 Entradas digitales.
- 4 Salidas Analógicas.
- 10 Salidas digitales.
- Alimentación 24VDC.
- Controlador con capacidad de controlar 4 lazos.

El controlador elegido es el PLC-1214C DC/DC/DC de Siemens por sus excelentes prestaciones de velocidad de procesamiento (0.085us/instrucción booleana y 1.7 us/move-word) y capacidad de memoria de programa. En el Simatic S7-1214C destacan: Un puerto Profinet integrado, una memoria interna de hasta 2MB para almacenar simbólicos y comentarios del programa en la CPU, mayor modularidad para I/O y protocolos de comunicación además de funciones integradas para satisfacer el control de hasta 6 lazos PID. Dado que el CPU-1214C no satisface las entradas analógicas se debe adicionar los módulos de ampliación, los modelos seleccionados se muestran en la tabla 3.10.

Tabla 3.10: Consumo del controlador

Descripción	Cantidad de Módulos	Consumo en W.
CPU-6ES7214-1AG40-0XB0	CPU 12DI/10DO	12
6ES7223-0BD30-0XB0	SB 1223,2/2 DI/DO	1
6ES7231-4HF32-0XB0	SM 1231, 8 AI	2,6
6ES7234-4HE32-0XB0	SM 1234, 4 AI/2 AO	2,6
Total		18,2

De la tabla 3.10 el consumo total de potencia es de 18.2 W, por lo que la potencia de diseño será (P_d):

$$P_d = .25 * 18.2W = 2.75W \quad (3.7)$$

Luego se procede a calcular la corriente consumida para una fuente de tensión de 24 VDC.

$$I_n = \frac{22.75}{24} = 0.55A \quad (3.8)$$

Dispositivos de Protección

Cada uno de los módulos y la CPU se deberá proteger con fusibles de un amperio, por lo que debe considerarse a la entrada de la alimentación de cada uno de estos módulos.

Según recomendaciones del fabricante las salidas de los módulos están afectadas por las cargas sujetas a ella, por lo cual se recomienda incluir una fuente de alimentación 5 veces mayor a la corriente nominal lo cual corresponde a una fuente de 5 Amperios.

3.3.4. Cálculo del consumo total de la planta piloto

Con los valores de diseño hallados en los apartados anteriores se procede a sumar las potencias que consumen cada componente del sistema como muestra la siguiente tabla 3.11.

Tabla 3.11: Cálculo de la potencia Consumida por la Planta piloto SFE

Cálculo de Potencia en la Planta SFE		
Descripción	I*V	Potencia Kw
Bomba de Presurización	8.64*230	2.0
Intercambiador de Calor	81.52*230	18.75
Accionamientos	8*24	0.19
Instrumentación	5.6*24	0.13
Controlador	22.75*24	0.55
TOTAL		21.62

Con todos los valores de Corriente y potencia calculados se puede proceder a desarrollar el plano unifilar el cual se muestra en el anexo C.

3.4. Diseño del Plano Eléctrico

Los planos eléctricos son dibujos que constan de líneas, símbolos de dispositivos dimensionados y notaciones. Para el diseño del plano eléctrico se debe tener en base el diagrama unifilar desarrollado previamente, en estos planos se detallan las conexiones de los componentes eléctricos de fuerza y de control, en los planos diseñados se da a conocer lo siguiente:

- Alimentación: Se diseñó la forma de conexión de la alimentación eléctrica con los dispositivos de seguridad e interrupción correspondiente.
- Tipos de Corriente: Se diseñó el transformador de voltaje para filtrar las corrientes parásitas que podrían afectar al sistema de control, así mismo la fuente de poder para la alimentación de 24 VDC.
- Conexión de Sensores: Se diseñó como deben estar conectados los sensores y a que canales del controlador, se especifica también el tipo de cable que será usado.
- Conexión de Actuadores: Se diseñó el conexionado detallado con los dispositivos de seguridad y cables correspondientes.
- Distribución del Tablero: Se diseñó la distribución de los componentes eléctricos así como los pulsadores, señalizaciones luminosas y las balizas de emergencia.

Cuando se desarrolla y se diseña los planos eléctricos es muy importante considerar el estándar que se va utilizar. Un estándar o normativa es un documento que provee requerimientos, especificaciones y características que serán usados para que sus productos, procesos y servicios se ajusten a su propósito. Los estándares son aprobados por organizaciones internacionales, para tener uniformidad en la parte técnica debido a los estándares que se tienen en cada localidad o país. Los estándares se han establecido en tres niveles (Lebeitsuk, 2014):

1. Estándares Nacionales.
2. Estándares Regionales.
3. Estándares Internacionales.

La presente tesis toma en consideración los estándares nacionales peruanos denominados "Código Nacional de Electricidad" formulada por el ministerio de energía y minas, los estándares internacionales son desarrollados por diferentes organizaciones como la ISO (International Standardization Organization) y la IEC (International Electrotechnical Commission). En la presente se tomara de referencia el estándar IEC 60617 (Estándar de diagramas y símbolos).

3.4.1. Software Eplan Electric P8

Para el desarrollo de planos eléctricos existen software comúnmente llamados CAD (Diseño Asistido por Computador) esto es el uso de un computador para la

creación, modificación, análisis y optimización de diseño. El propósito del CAD es incrementar la productividad del diseñador y la calidad del diseño así como para crear una base de datos para la planta piloto. Esta herramienta es usada para conseguir un amplio rango de información en una sola base de datos. Un ejemplo es el Eplan Electric P8 Data Portal que da una reducción sistemática de errores, mejorando en la detección de fallas y cerca de eliminar los datos de redundancia que se dan en los proyectos eléctricos industriales.

Eplan electric P8 es un software de diseño gráfico que se usó para el planeamiento de la ingeniería eléctrica de la planta piloto SFE. ofrece un sin fin de posibilidades para el planeamiento, documentación y organización de los proyectos de automatización. El software está internacionalmente estandarizado y soporta estándares globales como IEC, NFPA, GOST y GB. Eplan trae consigo una plataforma online mediante la cual se puede descargar componentes de diferentes proveedores, entre las ventajas por las cuales se eligió trabajar en esta plataforma son las siguientes:

- Planificación gráfica orientada a dispositivos.
- Asignación automática e individual y numeración.
- Creación automática de referencias cruzadas entre Puntos de interrupción, contactos, símbolos y componentes de PLC.
- Representación unifilar, multifilar y layout de montaje.
- Diferentes subsistemas (E-technology, energía y I& C).
- Autoconexión y conexión inteligente.
- Variantes de macro, conjunto de valores y opciones de tecnología de todo el proyecto.
- Librería de símbolos integrada IEC, NFPA, GOST y GB.

Los planos diseñados en el software Eplan se muestran en el anexo D de la presente Tesis. Con los planos desarrollados en el presente capítulo se puede iniciar la implementación y montaje de la parte eléctrica, este diseño sienta las bases eléctricas si en caso se tenga otro diseño mecánico de la planta piloto, ya que los planos pueden modificarse por especialistas de implementación en campo e inclusive en la puesta en marcha.





Capítulo 4

Control de los Lazos Identificados y Diseño de la Lógica del Proceso

4.1. Introducción

En el presente capítulo se desarrolla el diseño del algoritmo de control a implementar en cada lazo, para cumplir con las exigencias de la planta piloto. Para cumplir con el ciclo termodinámico se desarrollará el algoritmo que junte los lazos de control. Para el control de las interfaces de la planta piloto se desarrollará teniendo en cuenta las variables que se necesitan visualizar y también se deberá tener en consideración las variables que se necesitan almacenar o tener un historial; para el análisis de datos que se tiene que hacer como planta piloto SFE.

Los objetivos de este capítulo son, primero optimizar los lazos de control y mejorar el proceso esto conlleva el análisis del proceso utilizando herramientas de modelamiento, el acceso total al proceso para un análisis profundo de los lazos. Seguidamente el sistema de control de proceso que deberá minimizar las entradas manuales y almacenar todas las medidas de las variables y decisiones de operación para minimizar los errores. Por último un amplio y flexible manejo de datos estructurados con gráficos y cálculos para comprender e identificar rápidamente los errores (Mehta and Reddy, 2014).

4.2. Control de los Lazos

Un sistema de automatización de cualquier planta en la industria o en el laboratorio está constituida por cinco niveles los cuales deben ser considerados antes de realizar el control del proceso en su totalidad estos niveles se muestran en la figura 4.2.



Figura 4.1: Arquitectura de los niveles para la automatización (Mehta and Reddy, 2014).

1. En este nivel son considerados los transmisores, control de válvulas, manipulación de lazos, activaciones de electroválvulas. La comunicación de la planta piloto SFE está basada en 4-20 mA. o tecnología de comunicación digital de 24 VDC.
2. En este nivel es considerado el controlador PLC S7-1200, el cual hará un control del tipo Batch con los lazos de control desarrollados.
3. Este nivel también conocido como el nivel de operación, donde se controla y monitorea el proceso de extracción por fluido supercrítico.
4. En este nivel se supervisa la operación de la planta piloto basado en historial de datos donde se debe analizar los errores que podría existir en la operación.
5. En este nivel se lleva la supervisión a nivel empresarial con datos estrictamente de producción, costes y tiempos de proceso.

Se empezó con el primer nivel analizando a profundidad los lazos de control simulando el control sugerido para cada lazo, los cuales se desarrollan a continuación.

4.2.1. Control de Flujo

Como se presento en el capítulo 2, el modelamiento de la bomba P3000, está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{Mi(s)}{Q(s)} = \frac{0.17}{5s + 1} \quad (4.1)$$

Si bien la respuesta que se obtuvo en lazo abierto es estable, es necesario tener el sistema en lazo cerrado y se evalúa la respuesta del sistema como muestra el diagrama en la figura 4.2, en la cual se muestra el sistema con una realimentación que representa al sensor que para este lazo se ha considerado un flujometro másico de salida 4-20 mA y escalado para que se pueda considerar como una realimentación unitaria, se realizó las prueba con una entrada del tipo escalón para observar si logra alcanzar la consigna de la entrada al sistema esto se puede observa en la figura 4.3. Debido a que no logra alcanzar la consigna se de procede a proponer un controlador.

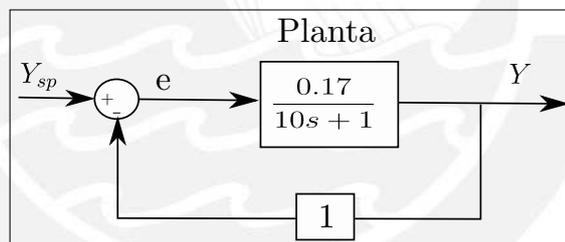


Figura 4.2: Lazo realimentado para el control de flujo.

El controlador que se propone en la presente tesis es el controlador PID compuesto de tres accionamientos como el nombre lo indica uno del tipo proporcional el cual es una ganancia en referencia con los valores actuales , el segundo la acción integral en referencia a valores pasados y la acción derivativa en referencia a los valores futuros. Este controlador por contener la acción integral asegura un error estacionario casi o igual a cero. Este controlador satisface a las condiciones de operación de la planta piloto SFE que trabaja en valores de consigna constantes durante el proceso. El controlador viene definido en la ecuación 4.2.

$$u(t) = k(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{\partial e(t)}{\partial t}) \quad (4.2)$$

Esta ecuación también se puede escribir de la siguiente forma:

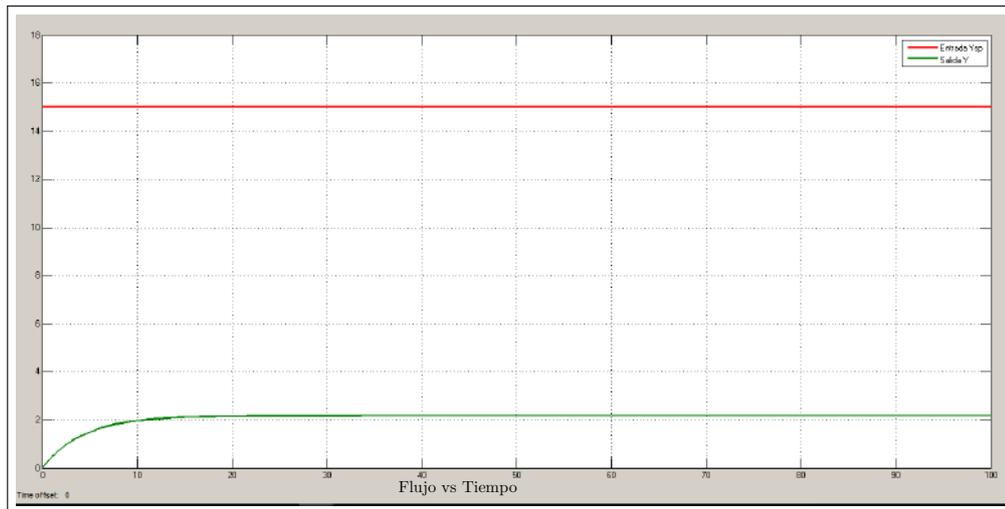


Figura 4.3: Respuesta al escalón del sistema realimentado

$$u(t) = Ke(t) + Ki\frac{1}{s} + Kds \quad (4.3)$$

Para diseñar el controlador se debe calcular los parámetros de la ecuación 4.2, para lo cual se cuenta con el método de diseño presentado por Ziegler y Nichols este método se basa en obtener información del proceso con una respuesta al escalón del sistema en lazo abierto, esta respuesta se caracteriza por sólo dos parámetros a y L , como se muestra en la figura 4.4, se determina el punto donde la pendiente de la respuesta a un escalón alcanza su punto máximo y se traza una tangente como muestra en la figura 4.4, luego se halla los valores de los parámetros según la tabla 4.1, debe recalarse que este al ser un método esta sujeto a modificaciones el momento de simular y de hacer la puesta en marcha, la mayoría de controladores son ajustados manualmente en la puesta en marcha (Åström and Hägglund, 2009).

Tabla 4.1: Parámetros del controlador según Ziegler-Nichols ((Åström and Hägglund, 2009))

Controlador	aK	Ti/L	Td/L	Tp/L
P	1			4
PI	0.9	3		5.7
PID	1,2	2	L/2	3.4

Los valores de los parámetros para el controlador diseñado son : $K = 216.12$, $Ki = 80.46$ y $Kd = -8.4$, estos valores se han probado inclusive bajo perturbaciones que podrían darse a causa de una diferencia de presión, en la figura 4.5 se muestra el diagrama de bloques simulado y seguidamente en la figura 4.6 se muestra la respuesta del sistema realimentado con el controlador PID, en el cual se

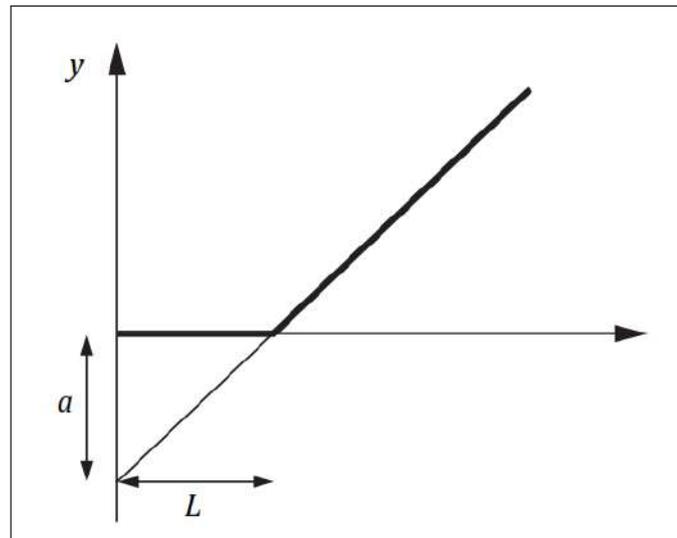


Figura 4.4: Caracterización de la pendiente en el método de la respuesta a un escalón de Ziegler-Nichols

puede observar que la variable controlada alcanza con un mínimo error a la señal de consigna ingresada al sistema, con esto se prueba que el control PID alcanza cubrir con las exigencias de la planta piloto SFE, el tiempo de establecimiento alrededor de los 6 segundos son óptimos para las condiciones del sistema puesto que depende del tiempo de arranque del motor, para la simulación se tomó 5 segundos de tiempo de arranque, los parámetros pueden sufrir ligeras modificaciones en la sintonización de los lazos debido a las condiciones ambientales, configuración del variador de frecuencia y condiciones en las cuales se instale los equipos.

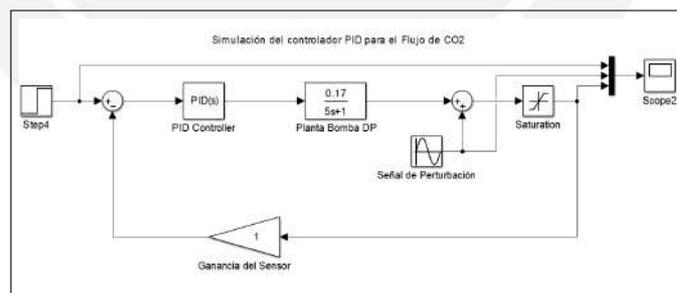


Figura 4.5: Diagrama de bloques del lazo de control de flujo de CO₂ simulado en el Simulink de Matlab

4.2.2. Control de Temperatura

Para el control de temperatura del intercambiador eléctrico, se inicia en observar el comportamiento del sistema en lazo cerrado para ver si el sistema es estable y alcanza a la consigna deseada de temperatura, para lo cual se tiene la función de transferencia hallada en el capítulo 2 de la presente tesis:

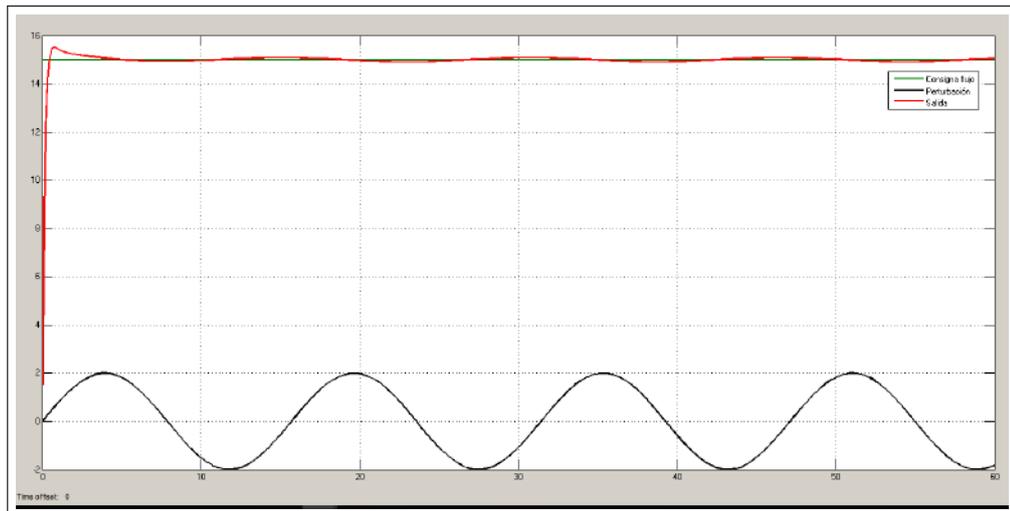


Figura 4.6: Curva de respuesta del sistema de flujo controlado

$$T(s) = \frac{7.43e^{-4.95}}{50.48s + 1} I(s) \quad (4.4)$$

De la ecuación 4.4 se halla la respuesta en lazo cerrado sin controlador el cual se muestra en la figura 4.7, como se puede apreciar en la figura la señal controlada no alcanza a la señal de consigna de temperatura, en la presente tesis se sugiere utilizar un controlador PID, para hallar los cálculos de los parámetros de este controlador se hace referencia al método propuesto por Ziegler y Nichols el cual se detallo en previamente, ayudado de la tabla 4.1, se halla los parámetros del controlador los cuales son los siguientes: $K = 0.812$, $Ki = 0.02$ y $Kd = 1.2$, con estos parámetros se puede describir el lazo de control del intercambiador de calor como se muestra en la figura 4.8 .

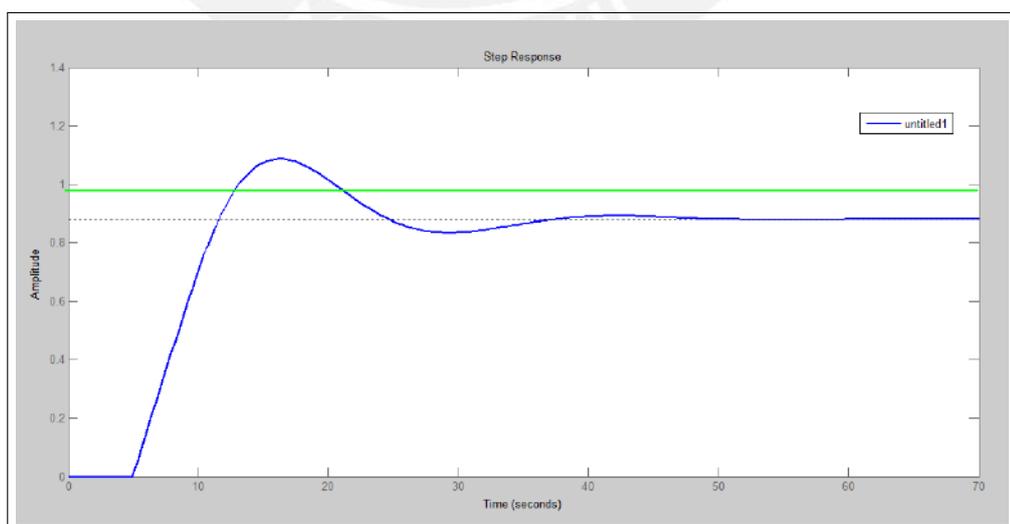


Figura 4.7: Curva de respuesta en lazo cerrado de temperatura sin el controlador

Del lazo propuesto de control se obtuvo la respuesta del sistema en lazo cerrado

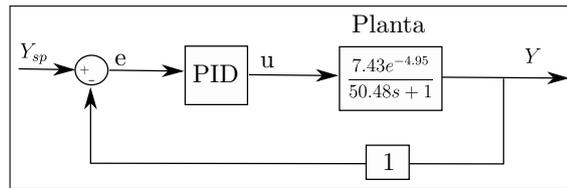


Figura 4.8: Diagrama de bloques del lazo de control para el intercambiador de calor de la planta SFE

do y se pudo apreciar que el tiempo de establecimiento están alrededor de los 50 segundos y sobre pico menor que 0.02 el error en estado estacionario es cero, con esto se cumple las exigencias que demanda la planta piloto SFE. La respuesta del sistema controlado se muestra en la figura 4.9. Con esta simulación se demuestra que el control PID para el sistema logra controlar en la consigna de temperatura deseada, los parámetros pueden sufrir alguna variación durante la puesta en marcha pero no en gran medida.

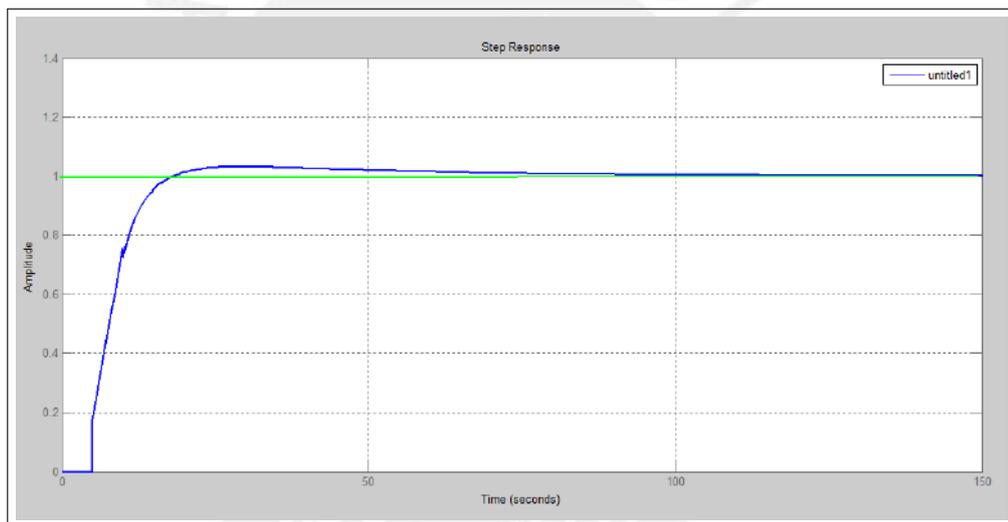


Figura 4.9: Curva de respuesta en lazo cerrado del intercambiador de calor de la planta SFE controlado por PID

4.2.3. Control de Presión

Para proponer el controlador para el lazo de presión se toma en consideración el modelo obtenido en el capítulo 2, la respuesta en lazo cerrado de dicho modelo se observa en la figura, Como se puede apreciar la variable controlada no alcanza al valor de la consigna, por lo que se propone un controlador PID, cuyos parámetros se hallan por el método desarrollado por Ziegler y Nichols.

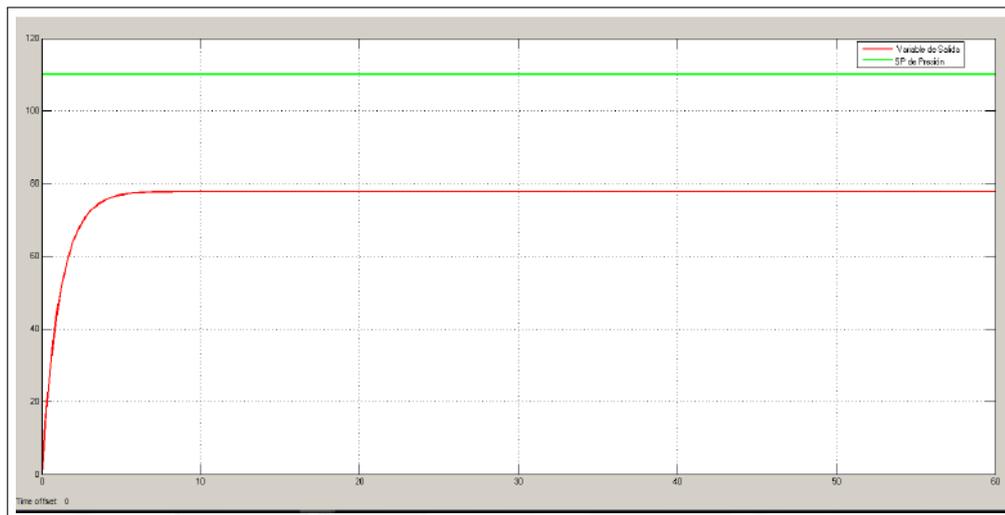


Figura 4.10: Respuesta del lazo de presión en l cerrado sin el controlador

Los valores obtenidos para los parámetros del controlador PID con la tabla 4.1, son los siguientes: $K = 5.1$, $K_i = 1.9$ y $K_d = 0$, se consideró un controlador tipo PI puesto que el sistema es rápido en comparación con los otros sistemas para lo cual se hace cero la ganancia derivativa del controlador PID. El diagrama de bloques que se muestra en la figura 4.11 se ha unido con el lazo de control de flujo ya que depende del flujo que ingresa al tanque de presurización de CO₂. La respuesta del sistema se muestra en la figura 4.12 donde se puede apreciar el control eficiente de la presión bajo condiciones reales a las cuales estará sometido el sistema, en la implementación los valores de los parámetros pueden sufrir una pequeña variación con el fin de mejorar el comportamiento según a las condiciones de operación de puesta en marcha.

Finalmente como se ha podido observar en cada lazo de control identificados en la planta piloto SFE utilizando CO₂ como solvente, las variables de proceso han sido satisfactoriamente controladas y además se ha podido unir los lazos de control que se encuentran directamente dependientes como es el caso del flujo de CO₂ y la presión, esto se puede apreciar en la figura 4.13.

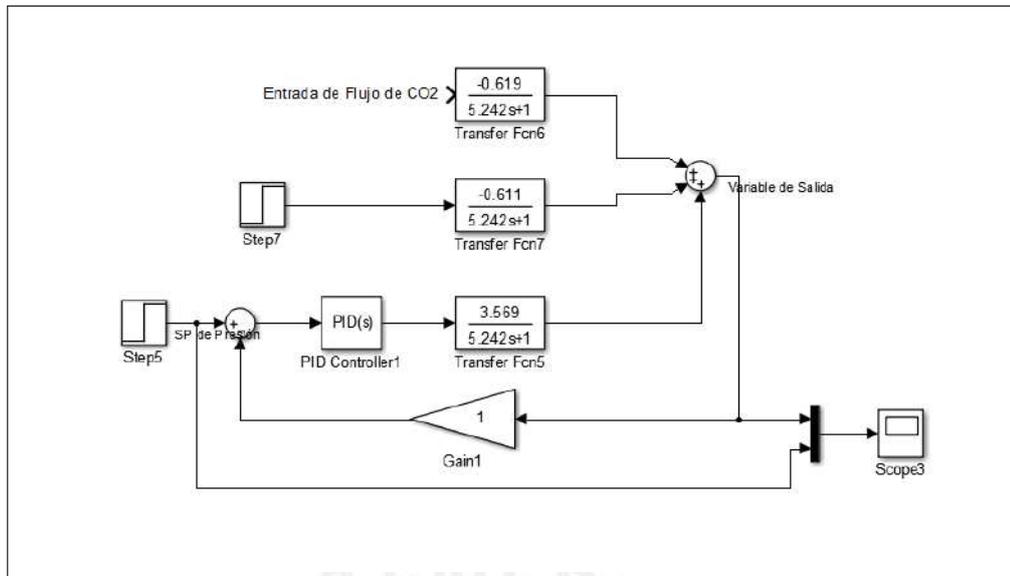


Figura 4.11: Diagrama de bloques del tanque TK-5000 en lazo cerrado con el controlador PID.

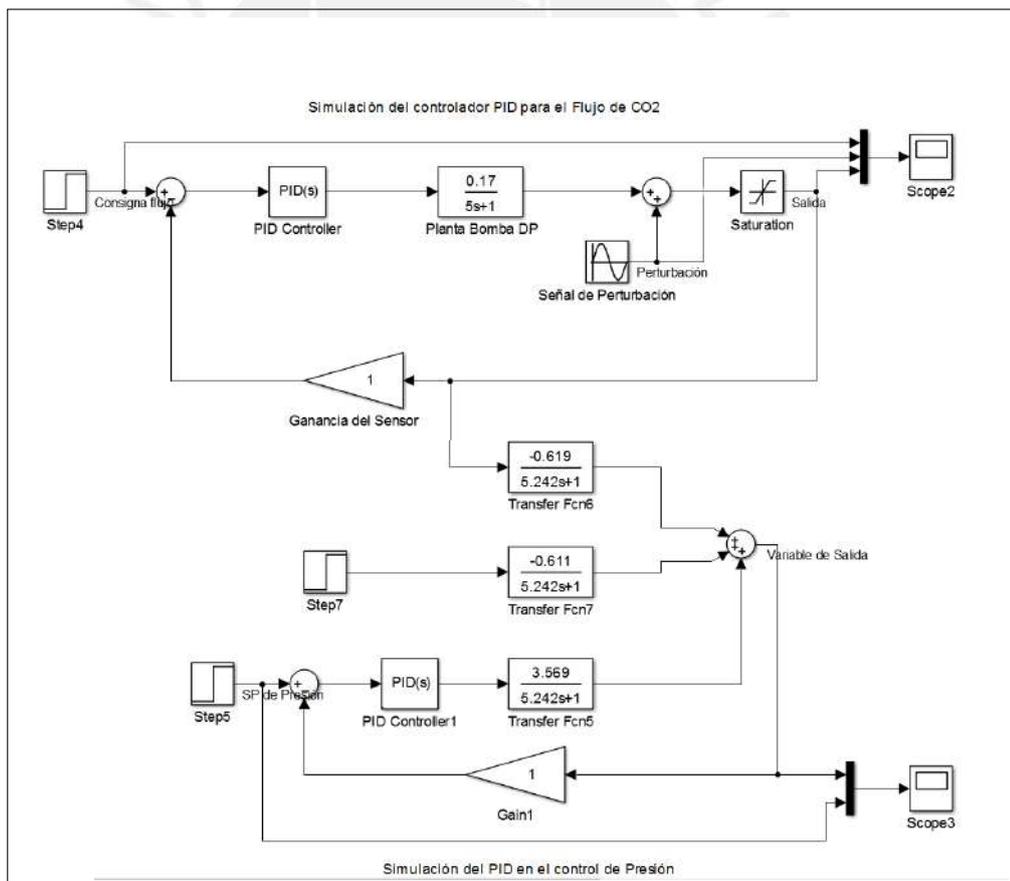


Figura 4.13: Diagrama de Bloques de los lazos entre enlazados directamente de la planta piloto SFE.

fases existirán pasos los cuales debe cumplir con las transiciones o condiciones y con los accionamientos correspondientes en cada paso, dicho esto se elabora un diagrama de flujo el cual se puede apreciar en la figura 4.15.

Para poder cumplir con el ciclo termodinámico que se determinó en el capítulo 2, se ha diseñado la lógica de control según el diagrama de flujo de la figura 4.15, el proceso empieza desde el almacenamiento de CO₂ en el tanque TK1000, este CO₂ líquido es llevado por la bomba de presurización al intercambiador de calor, con esto se asegura tener el flujo y la temperatura adecuada, una vez que el tanque está inundado de CO₂ la válvula VM5001 controla a la presión deseada para tener el CO₂ en estado supercrítico, es en este paso donde se inicia el proceso de extracción. Una vez junto el solvente con el soluto se lleva al tanque de separación a una temperatura ambiente y presión restringida por la válvula VM6001, luego de separar el soluto del solvente, luego el solvente pasa por el condensador que devuelve al CO₂ su estado líquido, con esto se retorna al tanque de almacenamiento, la duración del proceso dependerá de la programación del operador según el tipo de materia prima u otros factores que pueden darse debido a que esta es una planta piloto, los valores de tiempo de cada paso y valores de Set Point (SP) o de consigna se determinará por el equipo técnico y se representa ahora con el acrónimo Número Asignado por el Operador (xx). Las fases y los parámetros se han desarrollado según el diagrama de flujo y se desarrollan a continuación.

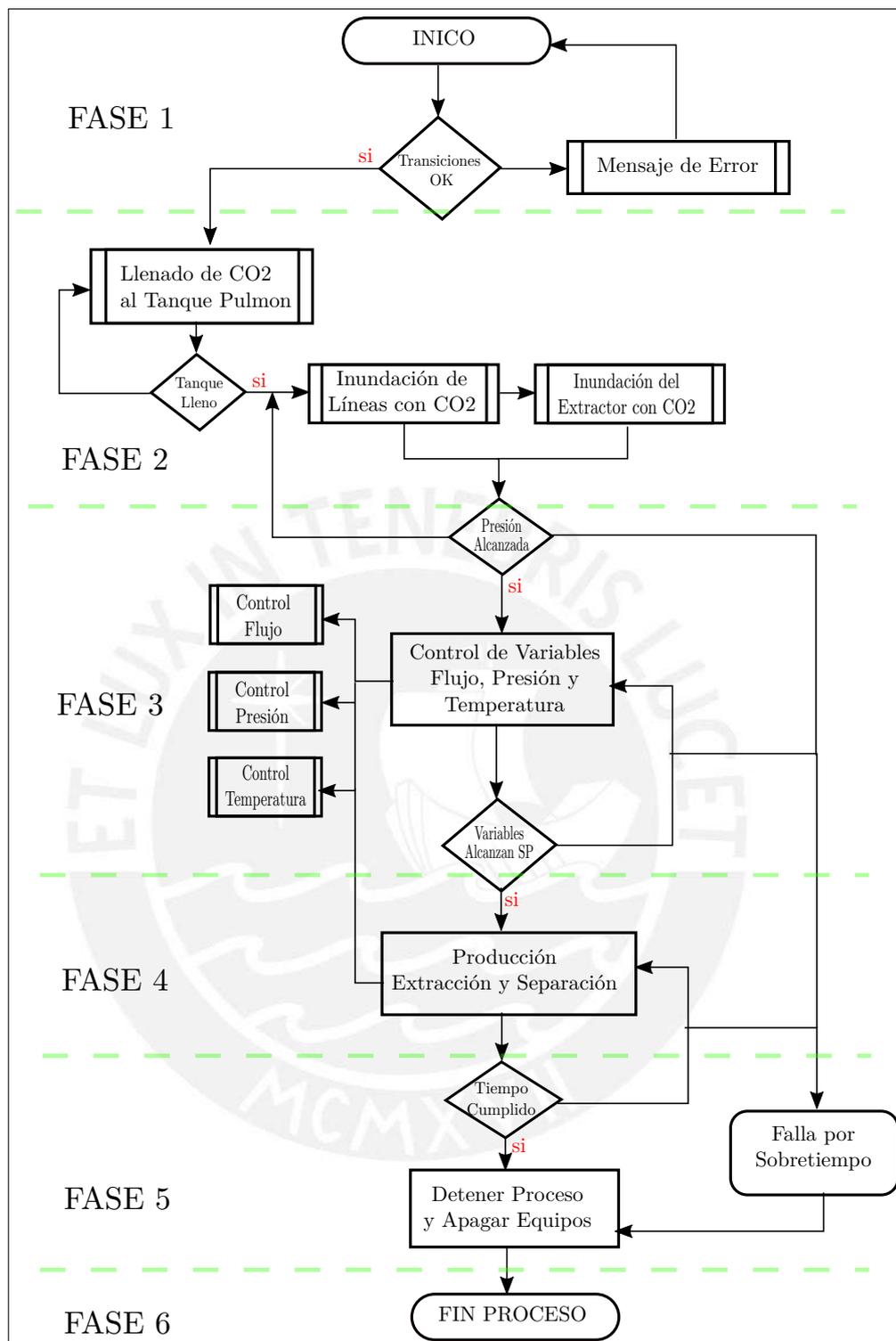


Figura 4.15: Diagrama de flujo para el Control de la planta piloto SFE.

4.3.1. Fase 1: Posición Inicial

En esta posición inicia la secuencia del programa tipo Batch, todos los actuadores permanecen cerrados, los estados de las señales de los sensores son verificados. Si hubiera alguna señal en falla el sistema lanza una alarma y no se podrá dar

- Tiempo alarma de Fase Seg. xx
- Tiempo de Sub-Fase Seg. xx
- Presión línea deseada PT750 Bar. xx
- Presión línea deseada PIT601 Bar. xx
- Posición de PCV601 % 100

Las siguientes válvulas/ motores son activados:

- BV1002 Válvula bypass a la salida del tanque pulmón.
- BV1003 Válvula Bypass de la Bomba.
- BV1004 Válvula a la entrada del Intercambiador .
- BV1005 Válvula a la entrada del Extractor.
- PCV601 Válvula a la salida del Extractor.
- BV5001 Válvula a la salida del Extractor.
- BV5002 Válvula Bypass del Extractor.
- BV5003 Válvula de desfogue de aire.

Transiciones:

- Presión deseada Alcanzada PT750.
- Tiempo de sub-fase alcanzado.

4.3.2.3. Inundación del Extractor con CO2

Es posible que una vez que se haya realizado más de un proceso; ya la línea está saturada, por ende se procederá a saturar de CO2 el extractor. Es por tal que la Válvula de despresurización se abre para poder evacuar el aire del medio que se quedó atrapado en la cámara de extracción.

Parámetros de Fase:

- Tiempo alarma de Fase Seg. xx
- Tiempo de Sub-Fase Seg. xx
- Presión línea deseada PT750 Bar. xx
- Presión línea deseada PIT601 Bar. xx
- Posición final de VP001 %. 100
- Posición de PCV601 % 0

Las siguientes válvulas/ motores son activados:

- BV1002 Válvula bypass a la salida del tanque pulmón.
- BV1003 Válvula bypass de la Bomba.
- BV1004 Válvula a la entrada del Intercambiador .
- BV1005 Válvula a la entrada del Extractor.

Transiciones:

- Presión deseada Alcanzada PIT502.
- Tiempo de sub-fase alcanzado.

4.3.3. Fase 3: Presurizar CO2

4.3.3.1. Flujo y presión

En esta fase se presuriza el CO2, para tener un flujo contante es necesario controlar la bomba accionado con la variación de la velocidad del motor. **Parámetros de Fase:**

- Tiempo alarma de Fase Seg. xx
- Tiempo de Sub-Fase Seg. xx
- Presión línea deseada PIT601 Bar. xx
- Presión línea deseada PT750 Bar. xx
- Flujo deseado en FIT201 L/min xx
- Temperatura Deseada TT401 °C xx

Las siguientes válvulas/ motores son activados:

- VC001 Válvula a la salida del tanque pulmón.
- M201 Válvula Bypass de la Bomba.
- VC004 Válvula a la entrada del Intercambiador.
- VC007 Válvula Bypass del Extractor.

Transiciones:

- Bomba ok.

4.3.3.2. Calentar CO2 Presurizado

En esta fase el CO2 presurizado se procede a calentar para llegar a fase supercrítica del CO2 para asegurar que este en dicha fase la válvula de bypass se mantiene abierta hasta que se haya alcanzado la temperatura deseada.

Parámetros de Fase:

- Tiempo alarma de Fase Seg. xx
- Tiempo de Sub-Fase Seg. xx
- Flujo deseado en FIT301 L/min xx
- Temperatura Deseada TT402 °C xx

Las siguientes válvulas/ motores son activados:

- VC001 Válvula a la salida del tanque pulmón.
- M201 Válvula Bypass de la Bomba.
- VC004 Válvula a la entrada del Intercambiador.
- VC007 Válvula Bypass del Extractor.

Transiciones:

- Temperatura alcanzada en TT501.

4.3.3.3. Extracción y Separación del Sustrato

En esta Fase se verifica la presión del extractor, puesto que tiene que llegar a la presión indicada en el Set Point de presión del Tanque extractor. Todas las válvulas de la línea principal están habilitadas y la válvula moduladora principal PCV601 está en Automático al igual que todos los lazos de control. Para poder separar el Extracto es necesario que la presión en el tanque separador esté regulada manualmente.

Parámetros de Fase:

- Tiempo alarma de Fase Seg. xx
- Tiempo de Sub-Fase Seg. xx
- Flujo deseado en FIT201 L/min xx
- Temperatura Deseada TT401 °C xx

Las siguientes válvulas/ motores son activados:

- VC001 Válvula a la salida del tanque pulmón.
- M201 Válvula Bypass de la Bomba.
- VC004 Válvula a la entrada del Intercambiador.
- VC007 Válvula Bypass del Extractor.

Transiciones:

- Temperatura alcanzada en TT501.
- Presión alcanzada por PIT601

4.3.4. Fase 4: Producción del Proceso

En esta fase todos los lazos de control están en modo automático y la Extracción con Fluido supercrítico esa en Proceso. Esto por un tiempo definido en los parámetros por el operador.

Parámetros de Fase:

- Tiempo alarma de Fase Seg. xx
- Tiempo de Sub-Fase Seg. xx
- Flujo deseado en FIT201 L/min xx
- Temperatura Deseada TT401 °C xx

Las siguientes válvulas/ motores son activados:

- VC001 Válvula a la salida del tanque pulmón.
- M201 Válvula Bypass de la Bomba.
- VC004 Válvula a la entrada del Intercambiador.
- VC007 Válvula Bypass del Extractor.

Transiciones:

- Tiempo de Fase Cumplido.

4.3.5. Fase 5: Detener Proceso

Cuando se está en esta fase es porque hubo una petición desde la interface, se puso en pausa el proceso o ya se cumplió el tiempo de extracción. Para lo finalizar el proceso es necesario seguir con las sub-fases de esa Fase.

4.3.5.1. Parada de la Bomba Principal

En esta Sub-Fase se procede a detener la bomba principal M201, se deshabilita el modo automático del enfriado, calentador, vaporizador y Condensador. Todos estos equipos deben estar apagados para poder pasar a la siguiente sub-Fase.

Parámetros de Fase:

- Tiempo alarma de Fase Seg. xx
- Presión del tanque deseado PIT601 Bar. xx

Las siguientes válvulas/ motores son activados:

- VC001 Válvula a la salida del tanque pulmón.
- VC004 Válvula a la entrada del Intercambiador.
- VC007 Válvula Bypass del Extractor.

Transiciones:

- Confirmación de parada de la bomba M201.

4.3.5.2. Cerrado de las Válvulas

En esta Sub-Fase se procede acerrar las válvulas del sistema para aislar cada lazo de control y los equipos, se realiza esta operación para no despresurizar la línea.

Parámetros de Fase:

- Tiempo alarma de Fase Seg. xx
- Presión del tanque deseado PIT601 Bar. xx

Las siguientes válvulas/ motores son activados:

- Todas las válvulas desactivadas.

Transiciones:

- Confirmación de cerrado de todas las Válvulas.

4.3.5.3. Despresurizar tanque extractor

En esta Sub-Fase se debe despresurizar el tanque del CO₂, la cual se deberá hacer en forma gradual para que no exista una descompensación de presión en el tanque.

Parámetros de Fase:

- Tiempo alarma de Fase Seg. xx
- Presión del tanque deseado PIT601 Bar. xx



Capítulo 5

Simulación y Desarrollo del HMI

5.1. Introducción

En el presente capítulo se desarrollará la simulación del proceso de extracción por fluido supercrítico utilizando CO₂ como solvente, para lo cual se desarrolla el programa del PLC S7-1200 en el software TIAPortal de Siemens, teniendo en consideración la seguridad funcional del programa y del entorno, luego se desarrolla la interface hombre maquina para operar la planta piloto , en esta interface se visualiza los parámetros de la secuencia, el estado de la instrumentación y avisos de advertencias y alarmas. Finalmente se concluye con el modo de operar la planta piloto una vez terminada la instalación.

5.2. Programación del PLC

Un controlador lógico programable(PLC) es un controlador basado en un microprocesador que tiene una memoria programable, una lista de instrucciones, capacidad de manejar secuencias y hacer el control de maquinas, tomando referencias de las señales de entrada haciendo un procesamiento para dar un respuesta a la salida, en la figura 5.1 se muestra el diagrama básico para un controlador PLC.

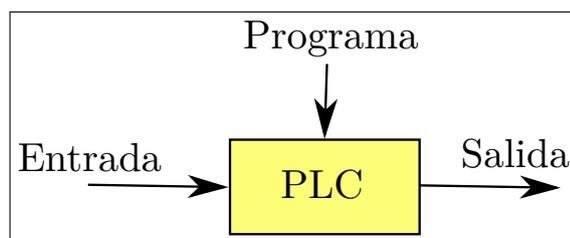


Figura 5.1: Estructura básica de un controlador PLC

La ventaja de los PLC es la utilización en un amplio rango de sistemas de

control, además que se puede modificar los programas que contienen para un mejor rendimiento del proceso. Los PLC son parecidos a los computadores solo que el computador está diseñado para atender cálculos y mostrarlos. Los PLC's en cambio están optimizados para el control de tareas en ambientes industriales, en consecuencia los PLC tienen las siguientes ventajas:

- Son robustos y diseñados para trabajar en condiciones de humedad, temperatura y ruido.
- Tienen una interface de entradas y salidas normadas por la IEC113, los cuales a su vez pueden ser modulares para cubrir toda escala de proceso.
- Tiene lenguajes de programación que no son muy complicadas para el desarrollo.

Los PLC's pueden ser programados usando un dispositivo portátil, una consola o un computador con algún software en específico. En la presente tesis se utilizó un el Software TIA Portal de Siemens para desarrollar el programa. Existen varios lenguajes de programación para el desarrollo, las que norma y propone la IEC 61131-3 son: Ladder, Diagrama de bloque de función, texto estructurado, lista de instrucciones y el cuadro de funciones secuenciales (SFE). El lenguaje que se ha utilizado para el desarrollo del programa es el llamado Ladder con el que se ha estructurado de la siguiente manera:

1. Lectura de Sensores y escalamiento.
2. Accionamientos de las electroválvulas con Interlocks.
3. Avisos, Advertencias y Fallas.
4. Controladores para los lazos.
5. Secuencia del Programa.

5.2.1. Lectura de Sensores

Para la lectura de sensores que se han estandarizado en un rango de 4-20 mA., se desarrollo un bloque del tipo instancia que sea capaz de reconocer si el sensor está correctamente funcionando o presenta alguna falla, esto se muestra en la figura .

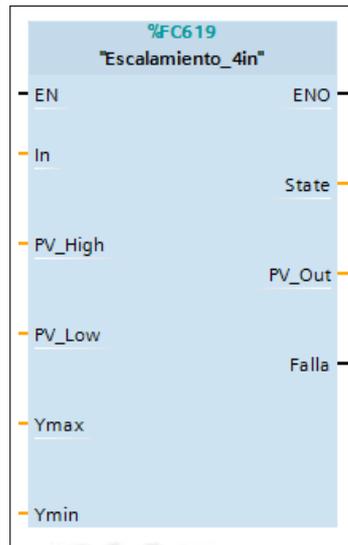


Figura 5.2: Bloque para la lectura de sensores

5.2.2. Accionamientos

Para activar los accionamientos se desarrollo un bloque en los que se considera los interlocks de seguridad para la operación en modo automático y modo manual, el bloque desarrollado se muestra en la figura 5.3.

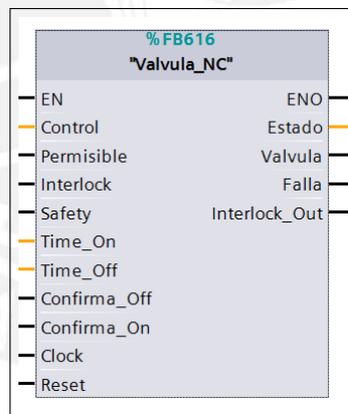


Figura 5.3: Bloque de accionamiento para una válvula.

5.2.3. Controladores para los lazos

El controlador tipo PID, ya viene implementado en el PLC, el cual se deja al programador ingresar los parámetros hallados en el anterior capítulo, en la figura 5.4 se muestra el controlador tipo PID.

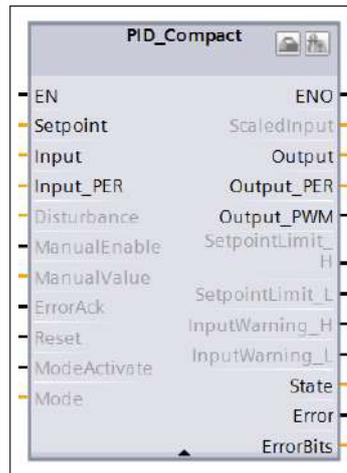


Figura 5.4: Bloque que hace el control PID.

5.2.4. Secuencia del Programa

Se ha desarrollado un bloque de programa en el cual se hace la secuencia de cualquier proceso tipo Batch, El bloque considera las condiciones de transiciones y parámetros del proceso, en la figura 5.5 se muestra el bloque desarrollado. La secuencia del programa cumple con todo lo propuesto en la filosofía de control con lo que asegura el cumplimiento del ciclo termodinámico del CO₂ para la extracción por fluido supercrítico.

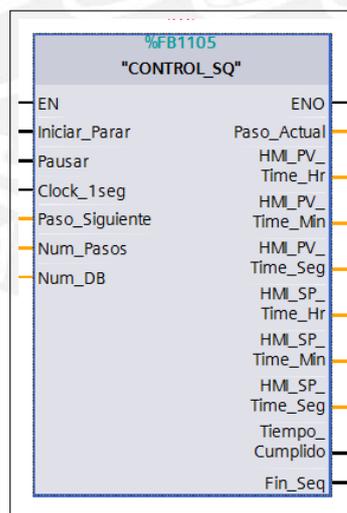


Figura 5.5: Bloque que realiza la secuencia del control tipo Batch.

5.3. Simulación y Desarrollo del sistema SCADA

Los sistemas SCADA son sistemas de adquisición de datos que son ampliamente usados para el monitoreo y el control remoto de los procesos industriales con fines de seguridad y visualización. Un sistema SCADA permite la operación

de un maquina desde una localización central es por eso que se combinan sistemas como: La computadora central, una unidad terminal remoto, una gran área de sistemas de comunicación entre protocolos y medios físicos y una interface de operación que provea al usuario la operación.

Para la planta piloto SFE se ha determinado que el sistema SCADA debe tener funcionalidades que permitan que el sistema cumpla con las exigencias de ser una planta piloto, para lo cual a continuación de muestran las funcionalidades del sistema Scada:

1. Adquisición de Datos de la instrumentación de la planta piloto, de los sensores así como de las confirmaciones de los actuadores.
2. Procesamiento del campo de datos para generar alarmas, avisos y otros cambios importantes en la planta piloto SFE.
3. Proveer una consistente base de datos, para el análisis de las correspondientes variables que son fundamentales en una planta piloto.
4. Presentar historiales gráficos para el rápido análisis en la identificación de fallas y análisis de comportamiento del sistema.
5. Buen desempeño en cuanto a tiempos de respuesta de los dispositivos de campo.
6. Monitoreo del sistema y diagnostico para tomar acciones apropiadas.
7. Transferencia en tiempo real de lo que realmente esta sucediendo en campo.
8. Proveer una localización similar a lo que se tiene en la planta piloto en físico.

Con todas las consideraciones que se ha detallado se ha desarrollado el sistema Scada que se muestra en la figura 5.6, se ha utilizado el software de desarrollo WINCC proporcionado por SIEMENS, para enlazar las variables que se necesita mostrar utiliza el protocolo de comunicación Profinet. El funcionamiento, estado de sensores, estado de actuadores y errores se muestran en la interfase hombre maquina que se ha desarrollado; También se ha desarrollado una ventana en la que se muestra la fase y subfase en la que se encuentra la planta piloto.

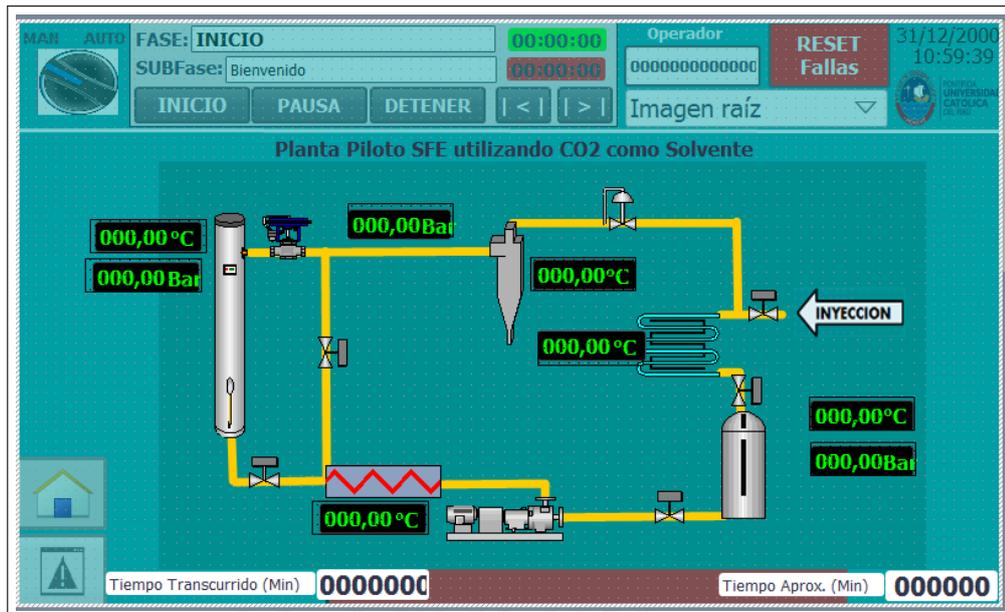


Figura 5.6: Scada de la planta piloto SFE.

Este sistema ha sido simulado en el software de TIA-PORTAL de Siemens, el programa del PLC se ha simulado con el PLCSIM y el Scada en el WINCC-RUNTIME se observó que cumple con la lógica de control al 100 %, teniendo el diseño de la automatización con todos los diseños terminados se puede iniciar la implementación de la planta piloto. Una vez terminada la implementación de la parte Mecánica, Instrumentación, Eléctrica y Control se debe realizar la puesta en marcha.

5.4. Puesta en Marcha de la Planta Piloto SFE

Para la puesta en Marcha del sistema se deben verificar todas las señales de instrumentación, el programa del PLC es capaz de identificar los sensores que están en error y no da inicio al sistema. Para un primer uso se purgan las líneas de la planta el cual se puede realizar desde el panel del operador manualmente. Para la sintonización de los controladores se inicia en determinar los parámetros PID desarrollados en el capítulo 4, estos valores se pueden variar para obtener una mejor respuesta según como se comporte en la primera prueba.

Si las instalaciones eléctricas e instrumentación han sido correctamente instaladas la puesta en marcha se realizará rápidamente bajo las siguientes consideraciones:

1. Realizar la verificación de las instalaciones.
2. Verificar manualmente cada uno de los actuadores.

3. Verificar las tensiones de alimentación.
4. Configuración del driver para el motor de la bomba de presurización.
5. Prender cada una de las llaves eléctricas de mayor carga a menor.
6. Ingresar CO₂ al tanque pulmón y purgar las líneas con CO₂.
7. Iniciar el proceso y verificar el control automático del proceso.

5.5. Presupuesto Estimado

Con el diseño de la automatización concluida, se puede realizar una estimación del presupuesto requerido para implementar la planta piloto, se ha considerado los costos de diseño, construcción y personal técnico. Los tiempos de entrega del diseño está a 30 días y la implementación está prevista a 30 días después del diseño.

El presupuesto para los materiales eléctricos para la planta piloto SFE se han cotizado con la empresa AIS Automation S.A.C. Tomando en cuenta el plano eléctrico desarrollado en el capítulo 3, haciendo un resumen se tiene la tabla 5.1 que muestra el costo total estimado para llevar a cabo la automatización de la planta piloto SFE el cual suma un monto de S/. 54,682.41 , este costo también se explica mejor en el anexo E.

Tabla 5.1: Presupuesto del diseño e implementación de la planta piloto SFE

Descripción	Cantidad	Costo
Ingeniero de Diseño	30 días	7,200.00
Ingeniero de Proyectos	30 días	9,600.00
Área Técnica	30 días	4,800.00
CPU 1214C	1	2,453.00
SB 1223	1	415.00
SM 1231	1	2,375.00
SM 1234	1	2,124.00
Conductive Level Probes	4	378.40
Hongo de emergencia	1	128.20
TMR31	7	3,151.40
MSB 1750	3	2,930.13
Modulo Rele	3	1,154.70
electroválvula + Válvula	11	6,928.68
VLT Micro Drive FC 51	1	1,967.90
SIMATIC HMI KTP700	1	9,076.00
Total Nuevos Soles		S/.54,682.41

En el presente capítulo se ha desarrollado el programa en ladder y lista de instrucciones para el PLC, que cuenta con una particularidad ya que se ha desarrollado un bloque que realiza n pasos con transiciones modificables la cuál es muy beneficiosa si se desearía modificar, aumentar o quitar pasos de la secuencia de funcionamiento de la planta piloto. Además se ha simulado el programa el cuál garantiza su funcionamiento ya que es primordial simular en todas las situaciones de falla para que al momento de hacer la puesta en marcha no exista peligros de operación y proceso. El control remoto de la planta piloto SFE se garantiza con el desarrollo de la interfase hombre maquina que además de brindar seguridad en la operación y monitoreo, tiene el registro de las variables que se desea en su base de datos para el análisis de los especialistas que buscarán nuevos productos de valor agregado en el Perú.



Conclusiones

- Se diseñó los aspectos importantes que conlleva la automatización de una planta piloto de extracción por fluido supercrítico, teniendo en consideración las normativas y recomendaciones International Electrotechnical Commission (IEC) para trabajos con gases en condiciones supercríticas. Este trabajo sienta las bases para el diseño de la automatización de plantas pilotos de SFE a diferentes escalas, ya que el objetivo de este trabajo es hacer cumplir que el solvente llegue al estado supercrítico puntos de operación programables.
- Se ha diseñado el proceso que debe cumplir el CO₂ para llegar a condiciones supercríticas a partir del ciclo termodinámico, esto con el fin de utilizarlo como solvente para el proceso de extracción.
- Se ha diseñado el plano P&ID considerando la instrumentación seleccionada para el control, visualización y dispositivos que son indispensables para la seguridad de la operación en consecuencia reducción de los riesgos y peligros que existen cuando se trabaja en estas condiciones. Por la parte eléctrica de la misma forma se ha diseñado el plano eléctrico considerando la carga que demanda la planta piloto, la distribución de los componentes eléctricos y los dispositivos de protección para los diferentes actuadores que se han considerado en el diseño.
- Se ha modelado y simulado los lazos de control identificados a partir de cada las ecuaciones dinámicas de cada lazo, se propuso controladores PID los cuales al ser simulados en el software de Matlab se observó un buen desempeño en el control de las variables controladas de cada lazo, esto se debe a que el tiempo de respuesta satisface a la planta piloto con los controladores que se ha propuesto.
- Se desarrolló la secuencia de control para el PLC 1214C de Siemens considerando el control de cada uno de los PID's que se propuso, así mismo el plan de puesta en marcha se ha descrito y considerado dentro de esta secuencia para que el equipo técnico pueda tener herramientas que le ayuden

a sintonizar los lazos de control. También se consideró las alarmas, avisos y advertencias durante el proceso de extracción.



Trabajos Futuros

- Con la automatización de la planta piloto SFE utilizando CO₂ como solvente, se debe realizar pruebas e investigaciones en la obtención de nuevos derivados de productos oriundos del país, esto es una herramienta para explorar tecnologías que aun no se han desarrollado su máximo potencial en el territorio peruano.
- Se debe realizar pruebas con diferentes SP de temperatura y presión con el fin de investigar el extracto obtenido y dar a conocer los resultados obtenidos para aprovechar la diversidad de productos biobotánicos que se tiene en el territorio peruano que hoy en día no se les da un valor agregado.
- La presente tesis describe todos los aspectos que se debe tomar en consideración al momento de realizar la automatización de una planta piloto SFE, por lo que el siguiente paso es implementar el diseño mecánico SFE.
- Se debe optimizar el control de Presión y temperatura una vez que se tenga construida la planta piloto.
- Se debe investigar en las perdidas de energía en la transmisión y circulación del CO₂ para asegurar el cumplimiento del circuito termodinámico que cumple el CO₂ en todo el proceso.
- Implementar detectores de impureza o restos de soluto en las líneas de CO₂, para poder ofrecer la máxima cantidad de extracto.

Bibliografía

- D. L. Abel del Castillo. Montaje de un extractor de fluidos presurizados, 2001.
- Amar. Cooling heating circulators. Technical report, Amar Equipments PVT.LTD., 2016.
- K. J. Åström and T. Hägglund. *Control PID avanzado*. Pearson, Madrid, 2009.
- G. Brunner. *Gas Extraction*. 1994.
- L. Casas, C. Mantell, M. Rodríguez, E. López, and E. Martínez De La Ossa. Industrial design of multifunctional supercritical extraction plant for agro-food raw materials. *Chemical Engineering Transactions*, 17:1585–1590, 2009.
- Chromalox. High pressure circulation heater. Technical report, Chromalox advance thermal technologies, 2016.
- J. Clavier and M. Perrut. Safety in supercritical operations. In *Process Technology Proceedings*, volume 12, pages 627–631. Elsevier, 1996.
- M. D. L. de Castro. *Analytical Supercritical Fluid Extraction*. Springer 1994, 1994.
- S. J. DiLouie, Craig; Marrano. *The electrical systems design specification handbook for industrial facilities*. Fairmont Press, 1998. ISBN 0-88173-194-3,9780881731941,9781628703337,1628703334,199-215-229-2.
- L. Dominguéz. *Tecnologías para la industria alimentaria*. 2011.
- P. I. D. ENGTECH. Microactivity reference catalytic reactor. www.pidengtech.com, Junio 2015.
- U. S. S. G. N. SAPKALE, S. M. PATIL and P. K. BHATBHAGE. Supercritical fluid extraction g. *Chemistry Science Journal*, 2010.

- INEI. Evolucion de las exporaciones e importaciones. Technical report, Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2015.
- S. Jokić. Design of sfe system using a holistic approach: Problems and challenges. *Nova Science Publishers*, 2015.
- S. Jokić, G. Horvat, and K. Aladić. Design of sfe system using a holistic approach-problems and challenges. In *Supercritical Fluid Extraction: Technology, Applications and Limitations*. Nova Publishers, 2014.
- E. Kiran. *Supercritical Fluid Science and Technology*. British Library Cataloguing, 2013.
- M. Lebeitsuk. Eplan electric p8-layout, single-line and multiline drawings and pilot project: development of layout, single-line and multiline drawings for e-cae tool and its implementation in project documentation. 2014.
- J. Lindy. *Supercritical Fluid Extraction Technology, Applications and Limitations*. Nova Science Publishers, 2015.
- H. M. Bocevaska. Supercritical co2 extraction of essential oil from yarrow. *Supercritical Fluids*, 2006.
- S. D. A. A. B. M. Solana, I. Boschierob. A comparison between supercritical fluid and pressurized liquid extraction methods for obtaining phenolic compounds from asparagus officinalis l. *Supercritical Fluids*, 2015.
- E. F. Megyesy and P. Buthod. *Pressure vessel handbook*. Pressure Vessel Publishing, 2001.
- B. R. Mehta and Y. J. Reddy. *Industrial Process Automation Systems: Design and Implementation*. Butterworth-Heinemann, 2014.
- F. A. Meier and C. A. Meier. *Instrumentation and control systems documentation*. ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2004.
- A. C. E. I. Miguel Herrero, Jose A. Mendiola. Supercritical uid extraction: Recent advances and applications. *Journal of Chromatography*, 2009.
- C. S. M.M.R. de Melo, A.J.D. Silvesttre. Supercritical fuid extraction of vegetable matrices: Applications,trends andfuture perspectives of a convincing green technology. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2014.
- NATEX prozesstechnologie. <http://www.natex.at/>, Abril 2016.

- T. Olsson. Pressure vessel and method of heating a gas in a pressurised pipe, July 10 2014. URL <https://www.google.com/patents/W02014107132A1?cl=en>. WO Patent App. PCT/SE2013/051,622.
- PromPerú. Nota de prensa mensual. Technical report, BCRP, 2015.
- A. Rosenthal. Safe desig of a continuous supercritical extraction system for the extraction of drilling fluid from drill cuttings. Master's thesis, The University of Guelph, 2012.
- S. F. A. SEPARECO. Pilot plants. <http://http://www.separeco.com/index.php/pilot-plant>, Abril 2016.
- K. Sharif, M. Rahman, J. Azmir, A. Mohamed, M. Jahurul, F. Sahena, and I. Zaidul. Experimental design of supercritical fluid extraction—a review. *Journal of Food Engineering*, 124:105–116, 2014.
- C. A. Smith and A. B. Corripio. *Principles and practice of automatic process control*, volume 2. Wiley New York, 1985.
- I. Supercritical Fluid Technologies. Extractor de productos naturales sft-npx-10. www.supercriticalfluids.com, Junio 2015.
- S. F. Technology. Rd multi-purpose lab and pilot plants. <http://www.separex.fr>, Abril 2016.
- G. Towler and R. K. Sinnott. *Chemical engineering design: principles, practice and economics of plant and process design*. Elsevier, 2012.
- J. J. O. Vivar. Diseño de una planta piloto de extracción de oleorresina de paprica usando co2 como fluido supercrıtico, 2013.
- Waters. <http://www.waters.com/waters/esPE/For-SFE-extraction-and-CO2-extraction/nav.htm?locale=esPEcid=134826287>, Abril 2016.