

**SISTEMA DE SUPERVISIÓN PARA EL PROCESO DE MEDICIÓN
DINÁMICA DE HIDROCARBUROS**



**YENY CRISTINA ZEA YANZA
CRISTIAN ALFONSO CAMPO**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y
CONTROL
POPAYÁN
2012**

**SISTEMA DE SUPERVISIÓN PARA EL PROCESO DE MEDICIÓN
DINÁMICA DE HIDROCARBUROS**



**YENY CRISTINA ZEA YANZA
CRISTIAN ALFONSO CAMPO**

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero en Automática Industrial

**Director
Ingeniero. OSCAR AMAURY ROJAS A.**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y
CONTROL
POPAYÁN
2012**

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	9
RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN.....	11
1. GENERALIDADES	13
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MEDICIÓN DINÁMICA DE HIDROCARBUROS	13
1.1.1. Sistema de medición.....	13
1.1.2. Medición dinámica	14
1.1.2.1. Transferencia en custodia	15
1.1.3. Variables que afectan al proceso de medición dinámica.....	15
1.1.3.1. Gravedad API.....	15
1.2. CONCEPTOS GENERALES DE LAS NORMAS API.....	16
1.2.1. Normas API.....	17
1.2.2. Alcance de la norma API	17
1.2.2.1. Capítulo 1: Vocabulario del manual de estándares de medición de petróleo.....	17
1.2.2.2. Capítulo 2: Calibración de tanques	18
1.2.2.3. Capítulo 3: Medición de tanques.....	18
1.2.2.4. Capítulo 4: Sistemas de probadores.....	18
1.2.2.5. Capítulo 5: Medición de hidrocarburos líquidos en transferencia de custodia	18
1.2.2.6. Capítulo 6: Ensamble de medidores	19
1.2.2.7. Capítulo 7: Determinación de temperatura	21
1.2.2.8. Capítulo 8: Muestreo	21
1.2.2.9. Capítulo 9: determinación de densidad.....	21
1.2.2.10. Capítulo 10: Agua y sedimento	21
1.2.2.11. Capítulo 11: Datos de propiedades físicas.....	22
1.2.2.12. Capítulo 12: Cálculo de cantidades de petróleo.....	22
1.2.2.13. Capítulo 13: Aspectos estadísticos de medición y muestreo	22
1.2.2.14. Capítulo 15: Guías para la utilización del SI (sistema internacional de unidades) en la industria petrolera y afines.....	22
1.2.2.15. Capítulo 19: Medición de pérdidas por evaporación	22
1.3. CONCEPTOS GENERALES DE SISTEMAS DE EVENTOS DISCRETOS Y REDES DE PETRI.....	23
1.3.1. Sistemas de eventos discretos	23
1.3.2. Redes de Petri	24
1.3.3. Representación de las Redes de Petri	24
1.3.3.1. Representación gráfica	24
1.3.3.2. Representación matricial.....	26
1.3.3.3. Definición formal.....	27
1.4. CONTROL SUPERVISORIO.....	27
1.4.1. Definición control supervisorio.....	27
1.4.2. Supervisor basado en Redes de Petri	29
1.4.2.1. Supervisor basado en invariantes de lugar.....	29
1.4.2.2. Restricciones que incluyen vector de disparo	31
2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MEDICIÓN DINÁMICA DE HIDROCARBUROS EN LA EMPRESA SWCOL LTDA.....	32
2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MEDICIÓN DINÁMICA DE HIDROCARBUROS PARA LA EMPRESA SWCOL LTDA.....	32
FUENTE: PROPIA, DIAGRAMA BASADO EN EL DIAGRAMA DE INSTRUMENTOS SEGÚN LA NORMA API, CAPÍTULO 5 [7]	35
2.2.1. Operaciones	38

2.2.1.1.	Proceso de Filtrado	39
2.2.1.2.	Proceso de medición de la presión diferencial.....	39
2.2.1.3.	Proceso de medición del flujo	39
2.2.1.4.	Proceso de Medición de la presión	40
2.2.1.5.	Proceso de medición de la temperatura.....	40
2.3.	ESPECIFICACIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN CON REFERENCIA A LA NORMA API	41
2.3.1.	<i>Características del combustible</i>	41
2.3.1.1.	Densidad relativa o específica	41
2.3.1.2.	Gravedad API.....	41
2.3.2.	<i>Condiciones de operación</i>	42
2.3.2.1.	Temperatura.....	42
2.3.2.2.	Presión	43
2.3.3.	<i>Exigencias del proceso</i>	43
2.4.	ARQUITECTURA DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DINÁMICA	45
2.4.1.	<i>Arquitectura de tecnologías de instrumentación, información y comunicaciones, bajo el Modelo Referencial de Automatización Industrial (MRAI).</i>	46
2.4.2.	Arquitectura de gestión	47
2.4.2.1.	Arquitectura de tecnologías de información y comunicaciones (TIC's)	48
2.4.2.2.	Sistemas de comunicación.....	53
2.5.	DISEÑO DEL SUPERVISOR PARA LA EMPRESA SWCOL LTDA.....	56
2.5.1.	<i>Dinámica del proceso.</i>	56
2.5.2.	<i>Representación en Redes de Petri</i>	57
2.5.3.	<i>Supervisor del proceso basado en el método de invariantes de lugar</i>	67
2.5.3.1.	Restricciones físicas del proceso	68
2.5.3.2.	Supervisor con restricciones de disparo	71
3.	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE SUPERVISIÓN.....	77
3.1.	<i>Condiciones de diseño</i>	77
3.1.1.	<i>Pantalla de Acceso</i>	78
3.1.2.	<i>Pantalla de Menú principal</i>	78
3.1.3.	<i>Pantalla Inicio del Batch</i>	79
3.1.4.	<i>Pantalla del Proceso</i>	79
3.1.5.	<i>Pantalla de Históricos en Tiempo real</i>	80
3.1.6.	<i>Pantalla de Históricos</i>	81
3.1.7.	<i>Pantalla de alarmas</i>	81
3.1.8.	<i>Pantalla de Reportes</i>	82
3.2.	COMUNICACIÓN DE I/O.....	82
3.2.1.	<i>Estándar de intouch para direcciones I/O</i>	82
3.2.2.	<i>Comunicación DDE (intercambio dinámico de datos)</i>	83
3.2.3.	<i>Comunicación RsLogix 500 e Intouch</i>	83
4.	VALIDACIÓN DEL SUPERVISOR	84
4.1.	HERRAMIENTAS UTILIZADAS PARA EL DESARROLLO DEL SUPERVISOR.....	84
4.1.1.	<i>PIPE V4 (Platform Independent Petri Net Editor)</i>	84
4.1.2.	<i>Matlab ®</i>	85
4.1.3.	<i>Herramienta CRP (Control de Redes de Petri)</i>	85
4.2.	DISEÑO DE CÓDIGO LADDER A PARTIR DE REDES DE PETRI	86
4.2.1.	<i>Generación de código ladder</i>	86
4.2.2.	<i>Configuración del driver</i>	87
4.2.3.	<i>RsLogix 500</i>	87

4.2.4.	Micrologix 1500.....	87
4.3.	VALIDACIÓN DEL SUPERVISOR DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DINÁMICA	87
4.3.1.	Validación de la restricción 1	88
4.3.2.	Validación de la restricción 2	90
4.3.3.	Validación de la restricción 3	93
4.3.4.	Validación de la restricción 4	95
4.3.5.	Validación de la restricción 5	97
4.3.6.	Validación de la restricción 6	98
4.3.7.	Validación del disparo 1	100
4.3.8.	Validación del disparo 2	101
4.3.9.	Validación del disparo 3	101
4.3.10.	Validación del disparo 4	102
4.3.11.	Validación del disparo 5	103
4.3.12.	Validación del disparo 6	104
4.3.13.	Validación del disparo 7	105
4.3.14.	Validación del disparo 8	106
4.3.15.	Validación del disparo 9	106
5.	CONCLUSIONES TRABAJOS FUTUROS Y LIMITACIONES	108
5.1.	CONCLUSIONES	108
5.2.	TRABAJOS FUTUROS	109
5.3.	LIMITACIONES	110
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1. DIAGRAMA DE INSTALACIÓN PARA EL PROCESO DE MEDICIÓN DINÁMICA DE HIDROCARBUROS SEGÚN LA NORMA API	19
FIGURA 1.3. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS DIFERENTES ELEMENTOS DE UNA RDP.....	24
FIGURA 1.4. CONEXIONES VÁLIDAS Y NO VÁLIDAS ENTRE LUGARES Y TRANSICIONES	25
FIGURA 1.5. LUGAR ACTIVO.....	25
FIGURA 1.6. TRANSICIÓN SENSIBILIZADA	26
FIGURA 1.7. TRANSICIÓN VALIDADA Y OCURRENCIA DEL DISPARO PARA LA MARCACIÓN DE LA FIGURA 1.6.....	26
FIGURA 2.2. CADENA DE VALOR DE LA EMPRESA SWCOL LTDA.....	38
FIGURA 2.11. RED DE PETRI DE LA VÁLVULA MANUAL	61
FIGURA 2.12. RED DE PETRI DE LA VÁLVULA GLOBO	62
FIGURA 2.13. RED DE PETRI DEL FILTRO	62
FIGURA 2.14. RED DE PETRI DE LA VÁLVULA DE ELIMINACIÓN DE PARTÍCULAS	63
FIGURA 2.15. RED DE PETRI DE LA VÁLVULA DEL DESAIRADOR.....	63
FIGURA 2.16. RED DE PETRI DEL MEDIDOR DE FLUJO.....	63
FIGURA 2.17. RED DE PETRI DEL MEDIDOR DE PRESIÓN.....	64
FIGURA 2.18. RED DE PETRI DEL MEDIDOR DE TEMPERATURA.....	64
FIGURA 2.19.. RED DE PETRI DE LA VÁLVULA DE CONTROL	64
FIGURA 2.20. RED DE PETRI DE LA VÁLVULA CHECK	65
FIGURA 2.21. RED DE PETRI DE LA VÁLVULA DE ALIVIO	65
FIGURA 2.22. RED DE PETRI DEL MEDIDOR DE PRESIÓN DEL FILTRO	65
FIGURA 2.23. SIMULACIÓN DE LA RED DE PETRI DEL PROCESO	67
FIGURA 2.24. RED DE PETRI SUPERVISADA BASADA EN INVARIANTE DE LUGAR.....	71
FIGURA 2.25.. TRANSFORMACIÓN DE LA RDP DEL FILTRO	73
FIGURA 2.26. RDP SUPERVISADA DEL DISPARO 6.22.....	75
FIGURA 2.27. SUPERVISOR CON TODAS LAS RESTRICCIONES DE DISPARO	75
FIGURA 2.28. SUPERVISOR RESULTANTE COMPLETO	76
FIGURA 3.1. PANTALLA DE ACCESO.....	78
FIGURA 3.2. PANTALLA DE MENÚ PRINCIPAL	78
FIGURA 3.3. PANTALLA INICIO DEL BATCH.....	79
FIGURA 3.4. PANTALLA DEL BATCH	80
FIGURA 3.5. VENTANA DEL ESTADO DEL FILTRO.....	80
FIGURA 3.6. PANTALLA DE HISTÓRICOS EN TIEMPO REAL	80
FIGURA 3.7. PANTALLA DE HISTÓRICOS	81
FIGURA 3.8. PANTALLA DE ALARMAS	82
FIGURA 3.9. PANTALLA DE REPORTES	82
FIGURA 4.1 INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO PIPE V4.....	84
FIGURA 4.2. INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO MATLAB.....	85
FIGURA 4.3. INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO CRP	85
FIGURA 4.4. SUPERVISOR CON MARCADO INICIAL DE LA RESTRICCIÓN 1	88
FIGURA 4.5. ENTRADAS DEL LADDER CON MARCADO INICIAL PARA LA RESTRICCIÓN 1	88
FIGURA 4.6. SALIDAS DEL LADDER CON MARCADO INICIAL PARA LA RESTRICCIÓN 1 ..	89
FIGURA 4.7. SUPERVISOR MARCADO DOS DE LA RESTRICCIÓN 1	89
FIGURA 4.8. ENTRADAS DEL LADDER CON MARCADO DOS PARA LA RESTRICCIÓN 1 ..	89
FIGURA 4.9. SALIDAS DEL LADDER CON MARCADO DOS PARA LA RESTRICCIÓN 1.....	90
FIGURA 4.10. SUPERVISOR MARCADO TRES DE LA RESTRICCIÓN 1	90
FIGURA 4.11. SUPERVISOR MARCADO TRES DE LA RESTRICCIÓN 1	91

FIGURA 4.12. ENTRADAS DEL LADDER CON MARCADO INICIAL PARA LA RESTRICCIÓN 2	91
FIGURA 4.13. SALIDAS DEL LADDER CON MARCADO INICIAL PARA LA RESTRICCIÓN 291	
FIGURA 4.14. SUPERVISOR MARCADO DOS DE LA RESTRICCIÓN 2	92
FIGURA 4.15. ENTRADAS DEL LADDER CON MARCADO DOS PARA LA RESTRICCIÓN 2	92
FIGURA 4.16. SALIDAS DEL LADDER CON MARCADO DOS PARA LA RESTRICCIÓN 2....	92
FIGURA 4.17. SUPERVISOR MARCADO TRES DE LA RESTRICCIÓN 2	92
FIGURA 4.18. SUPERVISOR MARCADO INICIAL DE LA RESTRICCIÓN 3	93
FIGURA 4.19. SUPERVISOR MARCADO DOS DE LA RESTRICCIÓN 3	93
FIGURA 4.20. ENTRADAS DEL LADDER CON MARCADO DOS PARA LA RESTRICCIÓN 394	
FIGURA 4.21. SALIDAS DEL LADDER CON MARCADO DOS PARA LA RESTRICCIÓN 3... 94	
FIGURA 4.22. SUPERVISOR CON MARCADO TRES PARA LA RESTRICCIÓN 3.....	94
FIGURA 4.23. ENTRADAS CON MARCADO CUATRO PARA LA RESTRICCIÓN 3	95
FIGURA 4.24. SUPERVISOR CON MARCADO INICIAL PARA LA RESTRICCIÓN 4	95
FIGURA 4.25. SUPERVISOR CON MARCADO DOS PARA LA RESTRICCIÓN 4	95
FIGURA 4.26. ENTRADAS DEL LADDER CON MARCADO DOS PARA LA RESTRICCIÓN 4	96
FIGURA 4.27. SALIDAS DEL LADDER CON MARCADO DOS PARA LA RESTRICCIÓN 4....	96
FIGURA 4.28. SUPERVISOR CON MARCADO TRES PARA LA RESTRICCIÓN 4.....	96
FIGURA 4.29. SUPERVISOR CON MARCADO CUATRO PARA LA RESTRICCIÓN 4	97
FIGURA 4.30. SUPERVISOR CON MARCADO INICIAL PARA LA RESTRICCIÓN 5	97
FIGURA 4.31. SUPERVISOR CON MARCADO INICIAL PARA LA RESTRICCIÓN 5	97
FIGURA 4.32. ENTRADAS DEL LADDER CON MARCADO INICIAL PARA LA RESTRICCIÓN 5	98
FIGURA 4.33. SALIDAS DEL LADDER CON MARCADO INICIAL PARA LA RESTRICCIÓN 5	98
FIGURA 4.34. SUPERVISOR CON MARCADO DOS PARA LA RESTRICCIÓN 5	98
FIGURA 4.35. SUPERVISOR CON MARCADO INICIAL PARA LA RESTRICCIÓN 6	99
FIGURA 4.36. SUPERVISOR CON MARCADO DOS PARA LA RESTRICCIÓN 6	99
FIGURA 4.37. ENTRADAS DEL LADDER CON MARCADO DOS PARA LA RESTRICCIÓN 6	99
FIGURA 4.38. SALIDAS DEL LADDER CON MARCADO DOS PARA LA RESTRICCIÓN 6..	100
FIGURA 4.39. SUPERVISOR CON MARCADO TRES PARA LA RESTRICCIÓN 6.....	100
FIGURA 4.40. SUPERVISOR CON MARCADO INICIAL PARA EL DISPARO 1	100
FIGURA 4.41. SUPERVISOR CON MARCADO DOS PARA EL DISPARO 1	101
FIGURA 4.42. SUPERVISOR CON MARCADO INICIAL PARA EL DISPARO 2	101
FIGURA 4.43. SUPERVISOR CON MARCADO DOS PARA EL DISPARO 2	101
FIGURA 4.44. SUPERVISOR CON MARCADO INICIAL PARA EL DISPARO 3	102
FIGURA 4.45. SUPERVISOR CON MARCADO DOS PARA EL DISPARO 3	102
FIGURA 4.46. SUPERVISOR CON MARCADO INICIAL PARA EL DISPARO 4	102
FIGURA 4.47. SUPERVISOR CON MARCADO DOS PARA EL DISPARO 4	103
FIGURA 4.48. SUPERVISOR CON MARCADO TRES PARA EL DISPARO 4.....	103
FIGURA 4.49. SUPERVISOR CON MARCADO INICIAL PARA EL DISPARO 5	103
FIGURA 4.50. SUPERVISOR CON MARCADO INICIAL PARA EL DISPARO 5	103
FIGURA 4.51. SUPERVISOR CON MARCADO INICIAL PARA EL DISPARO 6	104
FIGURA 4.52. SUPERVISOR CON MARCADO DOS PARA EL DISPARO 6	104
FIGURA 4.53. SUPERVISOR CON MARCADO TRES PARA EL DISPARO 6	104
FIGURA 4.54. SUPERVISOR CON MARCADO INICIAL PARA EL DISPARO 7	105
FIGURA 4.55. SUPERVISOR CON MARCADO DOS PARA EL DISPARO 7	105
FIGURA 4.56. SUPERVISOR CON MARCADO TRES PARA EL DISPARO 7.....	105
FIGURA 4.57. SUPERVISOR CON MARCADO INICIAL PARA EL DISPARO 8	106
FIGURA 4.58. SUPERVISOR CON MARCADO DOS PARA EL DISPARO 8	106
FIGURA 4.59. SUPERVISOR CON MARCADO TRES PARA EL DISPARO 8.....	106
FIGURA 4.60. SUPERVISOR CON MARCADO INICIAL PARA EL DISPARO 9	107
FIGURA 4.61. SUPERVISOR CON MARCADO DOS PARA EL DISPARO 9	107

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Clasificación del crudo según su la gravedad API y su densidad.....	21
Tabla 2.2. Incidencia de la temperatura sobre otras variables de medición del crudo... ..	23
Tabla 3.1. Variables físicas del crudo dependiendo sus grados API.....	27
Tabla 4.1. Instrumentos pertenecientes al brazo de medición 350401.....	45
Tabla 6.1. Estados y eventos asociados a la válvula manual.....	62
Tabla 6.2. Estados y eventos asociados a la válvula globo.....	62
Tabla 6.3. Estados y eventos asociados al filtro.....	62
Tabla 6.4. Estados y eventos asociados a la válvula de eliminación de partícul.....	62
Tabla 6.5. Estados y eventos asociados a la válvula del desairador.....	63
Tabla 6.6. Estados y eventos asociados al medidor de flujo.....	63
Tabla 6.7. Estados y eventos asociados al sensor de presión.....	63
Tabla 6.8. Estados y eventos asociados al sensor de temperatura.....	63
Tabla 6.8. Estados y eventos asociados a la válvula de control.....	63
Tabla 6.9. Estados y eventos asociados a la válvula de check.....	63
Tabla 3.11. Estados y eventos asociados al sensor de presión del filtro.....	64
Tabla 9.1. Opciones menú <i>File</i>	85
Tabla 9.2. Opciones menú <i>Edit</i>	86
Tabla 9.3. Opciones menú <i>View</i>	86

AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría que estas líneas sirvan para expresar nuestros más profundos y sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente proyecto, en especial al Ingeniero Oscar Amaury Roja, director de este proyecto, por la orientación, el seguimiento y la supervisión continúa del mismo.

De igual manera agradecer a la empresa SWCOL Ltda. por brindarnos la oportunidad de desarrollar este proyecto y por facilitarnos las herramientas necesarias.

Queremos expresar también un sincero agradecimiento a nuestros compañeros Cristhian David Buchely y Fausto Ruiz que con la facilitación de su proyecto de grado ayudaron al desarrollo del nuestro.

Son muchas las personas que han formado parte de nuestra vida profesional a las que nos encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de nuestras vidas. Algunas están aquí con nosotros y otras en nuestros recuerdos y nuestros corazones, sin importar en donde estén queremos darles las gracias por todo lo que nos han brindado y por todas sus bendiciones.

RESUMEN

En el presente proyecto, se da a conocer las especificaciones que plantea la norma API (Instituto Americano de Petróleo), para el diseño de un sistema de medición dinámica de hidrocarburos en la empresa SWCOL Ltda. Se describen las propiedades ideales del hidrocarburo y se define el proceso de medición dinámica, mediante la cadena de valor de dicha empresa; se detalla además, la arquitectura de instrumentación y control del sistema de medición dinámica.

Para garantizar el correcto funcionamiento del proceso de medición dinámica, se debe hacer supervisión, por medio de un sistema que permita a sus operarios supervisar, monitorear y observar el estado del sistema y controlar un número de actividades específicas.

Lo anterior, lleva a definir como meta específica, el desarrollo de un supervisor y su metodología de diseño, el cual, debe permitir realizar los cálculos algebraicos y el modelamiento en Redes de Petri para su implementación en PLC (Controlador Lógico Programable). El supervisor debe permitir condiciones adicionales para que el sistema funcione eficientemente, además de cumplir con los objetivos de flexibilidad y agilidad, para luego implementar la supervisión del proceso de medición dinámica usando el software Intouch 10.1 de Wonderware.

Adicionalmente, los anexos presentan el manual de usuario del software PIPE V4, el desarrollo completo del supervisor caso de estudio, el código ladder obtenido y un manual de usuario del software Intouch 10.1. Esta información conjuntamente será útil para la implementación del sistema de medición dinámica.

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto, se ha planteado como objetivo fundamental implementar un sistema de supervisión para el proceso de medición dinámica de hidrocarburos, se pretende entonces, hacer que el proceso y el control, sean entes dinámicos e integrados; donde el flujo de la información no sea unidireccional, y así, mediante la teoría de control supervisorio poder modelar Redes de Petri enfocadas a los procesos de decisión discreta. Todo proceso involucra la modelación a partir de una serie de eventos y acciones que ocurren durante determinado tiempo, y que hacen posible localizar los estados donde sea factible que el sistema presente bloqueo o situaciones donde no se cumpla con la dinámica del marcaje. La técnica de cálculos y modelación permiten despejar estos estados indeseables.

Es imprescindible tomar formalismos que permitan modelar, analizar y simular el sistema. Dentro de los formalismos de representación de sistemas a eventos discretos se encuentran las Redes de petri, las cuales son sencillas, fácilmente extensibles y muy útiles en la actualidad, la simulación de estas permite ver la dinámica y funcionamiento del proceso.

Para la implementación del sistema de supervisión para el proceso de medición dinámica se cuenta con el software Intouch 10.1, que constituye una plataforma de desarrollo que facilita el diseño de las HMI en computadoras. Algunos de estos paquetes de desarrollo incluyen muchas herramientas poderosas que permiten el desarrollo de HMIs de mucho potencial de procesamiento.

Por otro lado, hoy en día, no es posible concebir un sistema de medición de hidrocarburos sin considerar el empleo de normas que regulen su manufactura, diseño, calibración, prueba, operación y mantenimiento; un ejemplo de éstas es la norma API (Instituto Americano del Petróleo). La importancia del empleo de los estándares que intervienen en la concepción de un sistema de medición, se fundamenta en el trabajo experimental que antecede a su publicación ya que la medición de hidrocarburos representa un gran reto para la comunidad metrológica, dada la gran cantidad de magnitudes de influencia que tienen que ser consideradas durante el proceso.

Para cumplir con los objetivos tanto generales como el específico, el presente proyecto consta de 5 capítulos, los cuales en una forma resumida contiene la siguiente información.

En el capítulo 1, se dan los conceptos generales de la norma API, una descripción del proceso de medición dinámica de hidrocarburos, una

introducción a los sistemas de eventos discretos y Redes de Petri y por último se brinda información acerca de la teoría de control supervisorio.

En el capítulo 2 se diseña el supervisor para la empresa SWCOL Ltda donde se puede encontrar la cadena de valor necesaria para el modelado en Redes de Petri, la arquitectura de instrumentación control propuesta para la empresa SWCOL Ltda, basada en la cadena de valor, las especificaciones del sistema de medición dinámica con referencia a la norma API y por último el diseño del supervisor para la dicha empresa.

En el capítulo 3 se muestra la implementación del sistema supervisorio usando Intouch 10.1, por último en el capítulo 4 se detalla el software implementado para la simulación, el diseño del código ladder y la validación del modelado en Redes de Petri.

1. GENERALIDADES

En este capítulo se abordan definiciones formales con el objetivo de brindar al lector los conceptos básicos teóricos, que establece la norma API (Instituto Americano del Petróleo), la cual propone pautas en el diseño, calibración, prueba, operación y mantenimiento que debe tener el complejo industrial.

Además para familiarizar al lector sobre la temática del proyecto se presenta el concepto de sistemas de eventos discretos, que sirve como base para el desarrollo del supervisor del sistema de medición dinámica. Se da una definición formal de las Redes de Petri, ya que son una alternativa para modelar sistemas, aplicados principalmente hacia el control de proceso.

A continuación se describirá el proceso de medición dinámica de hidrocarburos.

1.1. Descripción del proceso de medición dinámica de hidrocarburos

Actualmente, existen dos tipos de medición que se llevan a cabo en la producción y extracción de hidrocarburos desde los yacimientos ubicados en el subsuelo; uno de ellos, es la medición estática, que se utiliza para medir cantidades volumétricas de crudo en estado estático. Esta medición busca establecer el nivel de la materia prima que se encuentra depositada en silos y tanques de almacenamiento. El segundo tipo de medición, es la medición dinámica, la cual, se utiliza para establecer el caudal del crudo que pasa sobre la tubería en una unidad de tiempo; este tipo de medición es mucho más difícil de realizar con precisión que la medición estática, ya que la medición dinámica se puede ver afectada ante cambios de temperatura y presión del crudo dentro de la tubería o por la posibilidad de aumentos o caídas drásticas del caudal circulante [5] [7].

1.1.1. Sistema de medición

El sistema de medición, es el conjunto de instrumentos estándar, operaciones, métodos, dispositivos, software, personal, medio ambiente y supuestos utilizados para determinar numéricamente la cantidad o magnitud de una propiedad física [19].

Los instrumentos asociados al sistema de medición de combustible dependen de la forma y método de medición, sea estática o dinámica. Dependiendo de la mecánica del fluido existen dos formas de medición de combustible:

- Estática (Medición del nivel de crudo en el interior de tanques, para establecer el volumen contenido).
- Dinámica (Medición de flujo en tuberías) [7].

En este proyecto se profundizará en la medición dinámica de hidrocarburos.

1.1.2. Medición dinámica

La medición dinámica, es aquel proceso que determina la cantidad de fluido que circula a través de una tubería de transporte de hidrocarburos. Se realiza por medio de dispositivos electrónicos instalados sobre tuberías con fluido en movimiento. Las mediciones de las tres variables (temperatura, presión, flujo) son llevadas por medio de señales eléctricas a un computador de flujo donde se determina el volumen estándar correspondiente [19].

La medición dinámica es utilizada para certificar los volúmenes de producto que se recibe o se entrega en custodia, ya sea para ser procesado y/o transportado, mediante la utilización de medidores instalados en línea. Dichos medidores se clasifican según su principio de operación en dos grupos: Volumétricos y Másicos.

Cabe resaltar que en el complejo industrial de nuestro caso de estudio, se utiliza el sensor de flujo de desplazamiento positivo, el cual, se encuentra directamente instalado en planta. Este tipo de sensor, es utilizado constantemente en la industria petrolera, ya que permite medir de forma exacta el hidrocarburo que circula a través de la tubería del proceso. Aunque su condición de operación preferiblemente se realiza sobre la dinámica de fluidos constantes, la medición suele ser afectada cuando la temperatura y presión del fluido dentro de la tubería varía, estableciéndose muchas veces errores significativos en la medición, a menos que se introduzcan factores de corrección necesarios, basándose en las condiciones reales propias del proceso. Otra condición que se debe analizar y tener en cuenta, es que el sensor de desplazamiento positivo es muy sensible ante fluidos sucios, es por esto que previamente a su ubicación en la tubería, debe existir un filtro que sea capaz de eliminar las partículas adheridas al fluido circulante (hidrocarburo líquido) y el aire presente en éste para evitar daños en el instrumento de medición, esta recomendación la hace la norma API 5 [7].

La medición dinámica es un proceso que requiere de una serie de condiciones mínimas para que la incertidumbre sea la menor posible. Las actividades incluidas en el proceso se detallan a continuación:

- ✓ El diseño del SMD (Sistema de Medición Dinámica), debe cumplir con los estándares internacionales; contiene el medidor, equipos, accesorios y la instrumentación asociada, tal como: válvulas de corte

de acción rápida, filtros con sus respectivos switches de presión diferencial, desairadores incorporados al filtro o independientes si se requieren, los medidores de flujo, instrumentación de temperatura y presión (transmisores e indicadores), válvulas de doble sello y purga para el corte y desvío hacia y desde el probador, válvulas de corte de cierre rápido, entre otros.

- ✓ Los SMD deben operarse a un flujo constante y mantener un estricto cumplimiento de programas de control metrológico, fundamentado en un mantenimiento preventivo y/o por condición, independiente de las tasas de flujo; los medidores deben estar en capacidad de hacer mediciones adecuadas (liberalización).

1.1.2.1. Transferencia en custodia

La transferencia en custodia es el hecho a través del cual, es trasladado el crudo de un punto a otro, o hacia otra área. El diseño e implementación de un sistema dedicado a la transferencia en custodia se debe establecer bajo los aspectos recomendados por la norma API, específicamente, el que se establece en el ítem API 5.2 [7].

El capítulo 5 de la norma API [7], se dedica a la definición de todo lo relevante a la medición de hidrocarburos a nivel de transferencia de custodia, donde abarca las mediciones dinámicas de los hidrocarburos; se basa en la gran variedad de tecnologías aceptadas e implementadas a nivel de transferencia de custodia, haciendo énfasis en los distintos tipos de mediciones y equipamiento de la instrumentación y accesorios.

En consecuencia, la transferencia de custodia se debe realizar en el marco de la metrología legal, lo que implica que sistemas de medición utilizados para este propósito sigan la normativa nacional e internacional.

1.1.3. Variables que afectan al proceso de medición dinámica

Una de las principales formas de conocer las especificaciones de los hidrocarburos, es a través de la evaluación y estudio de sus diversas propiedades, las cuales, en conjunto determinan las características esenciales del fluido. Estas propiedades son: gravedad API, gravedad específica, densidad, presión y temperatura. Estas propiedades determinan la fluidez del crudo a través de la tubería dentro del complejo industrial. A continuación, se explicará detalladamente la descripción de estas propiedades.

1.1.3.1. Gravedad API.

La gravedad API, es una medida de densidad que describe qué tan pesado o liviano es el petróleo comparándolo con el agua. Esta escala de medición fue desarrollada por el Instituto Americano del Petróleo y se expresa en grados API; se mide con un hidrómetro diseñado para medir

en grados API y su rango se encuentra entre los 10° y 70°. Si los grados API son mayores a 20°, es más liviano que el agua y por lo tanto flotaría en ésta. La gravedad API es también usada para comparar densidades de fracciones extraídas del petróleo [11]; por ejemplo, si una fracción de petróleo flota en otra, significa que es más liviana y por lo tanto su gravedad API es mayor. Matemáticamente la gravedad API no tiene unidades (ver ecuación 1.1), sin embargo, siempre al número se le coloca la denominación grado API.

$$\text{Gravedad API} = \frac{141.5}{\text{SGU}_{\frac{60}{60^{\circ}\text{F}}}} - 131.5 \quad (1.1)$$

En donde SGU, equivale a la gravedad específica del fluido:

$$\text{SGU} = \frac{\text{Densidad del liquido}}{\text{Densidad H}_2\text{O}} \quad (1.2)$$

De acuerdo a la gravedad API, el crudo se clasifica en: extra pesado, pesado, mediano, ligero, súper ligero. En la tabla 1.1, se muestran los rangos correspondientes para la clasificación del crudo:

Tabla 1.1. Clasificación del crudo según su densidad y gravedad API.

Aceite crudo	Densidad (g/cm³)	Gravedad API
Extra pesado	>1.0	1°-10°
Pesado	1.0 – 0.92	10°-22.3°
Mediano	0.92 – 0.87	22.3°- 31.1°
Ligero	0.87 – 0.83	31.1°-39°
Súper ligero	<0.83	>39°

Fuente: Sistema integrado de gestión, Noviembre de 2010 [21].

Las propiedades de densidad, presión y temperatura, el tipo de volumen tales como volumen indicado, volumen bruto, volumen estándar, volumen neto y caudal se encuentran definidas en el anexo A.

1.2. Conceptos generales de las normas API

Una de las más grandes industrias de producción, son las que se relacionan con la explotación racional del petróleo y el gas natural desde los yacimientos, así como su producción. Este tipo de producción tiene como fin extraer los hidrocarburos que se encuentran en los yacimientos subterráneos, dicha extracción, debe cumplir determinadas normas que buscan proteger el medio ambiente, el personal que labora en la industria y la población aledaña a esta, además del control racional de la extracción [1].

1.2.1. Normas API

El Instituto Americano del Petróleo (API), es una asociación estadounidense dedicada a la industria petrolera y el gas natural. Este instituto tiene publicaciones importantes con respecto a aspectos técnicos de la industria, los cuales, ayudan a aumentar la eficiencia de las operaciones, cumplir legislaciones nacionales e internacionales, garantizar la seguridad y la salud del trabajador, y cuidar el ambiente [2].

Esta norma se usa específicamente en la industria petrolera y petroquímica, ya que cubren el diseño, definición de procedimientos, especificación de dimensiones, fabricación, inspección, seguridad, prevenciones ambientales, medición, calibración, transporte, montaje y mantenimiento de la instrumentación necesaria para el proceso de producción del petróleo a través de materias primas [2].

Existe un gran número de participantes, que aportan sus ideas con el fin de desarrollar y mejorar este estándar, entre ellos:

- Compañías petroleras a nivel mundial.
- Fabricantes de equipo e instrumentación.
- Personal operativo.
- Compañías prestadoras de servicios.

La norma API, está diseñada para cumplir con una gran variedad de especificaciones y llevar a cabo los objetivos más importantes en la producción, medición y transferencia de custodia del crudo. A continuación, se especificarán algunos capítulos relacionados con la medición dinámica

1.2.2. Alcance de la norma API

1.2.2.1. Capítulo 1: Vocabulario del manual de estándares de medición de petróleo

El capítulo 1, establece las definiciones en cuanto a la terminología utilizada en la industria petrolera, asociada con la transferencia de custodia del crudo, control de pérdidas, y actividades de protección que se deben ejercer en el medio ambiente [3].

Las palabras o términos contenidos en este vocabulario son definidos y descritos para ayudar a entender su uso a lo largo del MPMS (Manual de Estándares de Medición del Petróleo). Se incluyen secciones adicionales basadas en las definiciones encontradas en el vocabulario [3].

1.2.2.2. Capítulo 2: Calibración de tanques

El propósito del capítulo 2, es describir los procedimientos para la calibración de tanques cilíndricos verticales utilizados principalmente para el almacenamiento de líquidos derivados del petróleo [4].

1.2.2.3. Capítulo 3: Medición de tanques

El capítulo 3 de la norma, establece los procedimientos para hacer las mediciones necesarias al momento de determinar el volumen total del tanque [5].

1.2.2.4. Capítulo 4: Sistemas de probadores

En este capítulo, se abordan los distintos probadores de desplazamiento que aún se encuentran en uso. Algunos probadores son instalados de forma tal que el líquido que está dentro de la tubería se puede desplazar en cualquier dirección, permitiendo así la dinámica del flujo de forma ininterrumpida. También son muy utilizados los probadores de desplazamiento, los cuales, establecen si el sensor de desplazamiento positivo capaz de medir caudal está realizando de forma óptima su trabajo [6].

1.2.2.5. Capítulo 5: Medición de hidrocarburos líquidos en transferencia de custodia

El capítulo 5, ofrece recomendaciones para la medición de transferencia de custodia de hidrocarburos. En este capítulo, se establecen los criterios de operación y recomendaciones de mantenimiento usados en sistemas de medición dinámica para el aseguramiento metrológico en transferencia de custodia para hidrocarburos líquidos, gas y biocombustibles [7].

Este tipo de medición puede generar grandes ventajas, tales como:

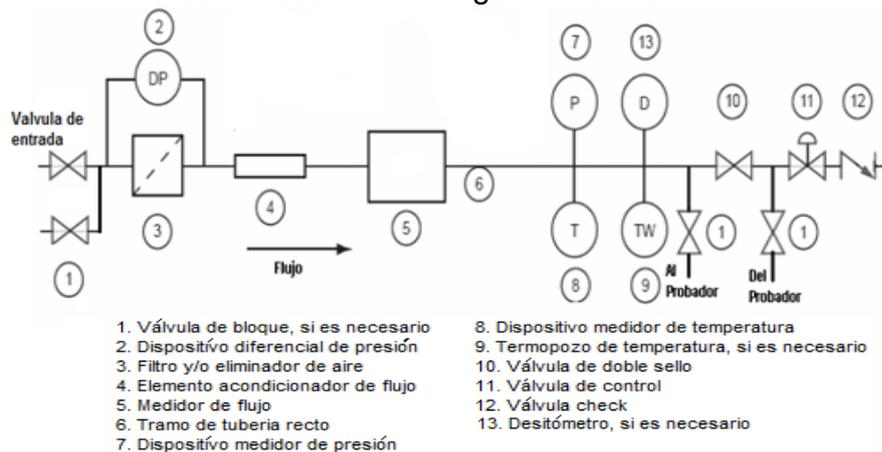
- Aumentar la disponibilidad de tanques.
- Facilitar el correcto manejo de tanques, de acuerdo a los volúmenes de flujo que se encuentran actualmente en la tubería de producción.
- Disminuir el costo de la mano de obra.

En este capítulo, se expresan además, la distintas especificaciones que se deben tener en cuenta durante la instalación de los distintos equipos e instrumentos pertenecientes al sistema de medición dinámica de hidrocarburos, haciendo hincapié en el sensor de flujo que se debe utilizar y su forma de operar, con el fin de obtener una lectura exacta del flujo circulante por la tubería de producción.

Para el caso de estudio, se recomienda utilizar y llevar a cabo el diseño impuesto por la norma API en el numeral 5.3 [Norma API capítulo 5

numera 3 pagina 12], el cual establece los distintos instrumentos y su respectivo orden que se deben instalar en campo, con el fin de obtener una medida exacta de la dinámica del crudo a través de la tubería de producción. En la figura 1.1 se muestra el diagrama tal y como lo expresa la norma.

Figura 11. Diagrama de instalación para el proceso de medición dinámica de hidrocarburos según la norma API



Fuente: Norma API [7].

El diseño que se encuentra representado en la figura 1.1, es el diagrama de instrumentación que se utilizará como recomendación de la norma API en su capítulo número 5, para el caso de estudio perteneciente al proceso de medición dinámica de hidrocarburos, este proceso será explicado de forma detallada en el capítulo número 2 [7].

Así, estableciendo posteriormente algunos cambios y la utilización de algunos instrumentos por el hecho de no ser estrictamente necesario como lo expresa la norma. Por ejemplo el instrumento número cuatro (elemento acondicionador de flujo) es necesario solo si se utiliza un medidor de flujo indirecto como: tipo turbina o un medidor de flujo ultrasónico. En el caso de que este medidor sea de tipo directo como el de desplazamiento positivo, no es necesario utilizar dicho instrumento acondicionador de flujo. Es por eso que en este diseño se permite incorporar una serie de cambios si se considera necesario, ya que la norma API es muy flexible ante esta situación.

1.2.2.6. Capítulo 6: Ensamble de medidores

En este capítulo, se establece específicamente una guía para el diseño, instalación, calibración y operación automática de los distintos medidores a ser utilizados para determinar el flujo dentro de la tubería de producción y sus propiedades físicas [8].

Se describe además, la función de cada medidor (sensor), ya sea de flujo, temperatura y presión al momento de operar dentro de la dinámica

del sistema de medición de hidrocarburos y transferencia de custodia [8]. También hace parte de este capítulo, las condiciones en las cuales, debe estar el líquido para poder ser medido de forma óptima, algunas recomendaciones impartidas por este son:

- Cuando los volúmenes de hidrocarburos son medidos y transferidos, el fluido debe ser estable para permitir una correcta medición y un adecuado almacenamiento durante el transporte, evitado así su máxima evaporación y posibles pérdidas significativas de volúmenes.
- Durante la transferencia de custodia, se adoptarán las disposiciones para determinar el volumen estándar neto.
- Obtener una muestra del crudo con el fin de determinar su densidad, entre otras propiedades físicas, estableciendo su sedimentos y contenidos de agua.

En cuanto al medidor para el caso de estudio, Medidor directo: Medidor de desplazamiento positivo, la norma establece las siguientes recomendaciones establecidas bajo las mejores prácticas, para tener en cuenta al momento de realizar su instalación y principio de operación:

- El medidor y sus accesorios son instrumentos de precisión y deben ser tratados como tales. Antes de su instalación, deben estar protegidos los equipos contra las condiciones climáticas adversas y del abuso casual.
- La exactitud de este medidor depende de los siguientes factores:
 - Todo el líquido a medir debe entrar a la cámara del medidor
 - El flujo transferido pase por el medidor solo una vez (evitar el reflujo)
 - La instalación debe incluir protección contra arena, polvo, lluvia etc., si existen condiciones climáticas extremadamente adversas
 - El medidor debe ser montado sobre una base o plataforma adecuada, a fin de que no se apoye en la tubería de producción.
 - Instalar el medidor de tal manera que no sea posible drenar el producto accidentalmente, sin embargo, se aconseja vaciar periódicamente el agua y sedimento del mismo
 - La tubería de producción no deberá ejercer ninguna fuerza indebida sobre el medidor
 - Proteger el medidor y el sistema contra efectos de la expansión térmica, mediante la instalación de una válvula de alivio.
 - De ser necesario, se debe colocar un desairador o eliminador de aire, a fin de evitar el ingreso de aire o vapor al medidor.
 - Limpiar el interior de la tubería antes de ser instalado el medidor, hay que eliminar completamente el óxido, tierra, bolas de soldadura u otros materiales extraños.
 - Estar completamente seguro de la dirección del flujo, el cual debe ser de izquierda a derecha.
 - Instalar una válvula de control aguas abajo del medidor de flujo

- Lavar el medidor con aceite lubricante liviano, si va a ser almacenado o permanecer fuera de servicio.

1.2.2.7. Capítulo 7: Determinación de temperatura

El propósito de este capítulo, consiste en describir los distintos métodos y prácticas que se pueden utilizar, para obtener mediciones exactas de la temperatura, tanto en condiciones estáticas como dinámicas del petróleo y productos derivados de éste, ya sea, en oleoductos, tanques de almacenamiento, tanques de recolección, barcos, entre otros [9].

Hay tres métodos disponibles para la determinación de la temperatura del hidrocarburo en la transferencia de custodia:

- Método automático, por medio de sensores electrónicos.
- Método manual, mediante la utilización de un termómetro electrónico portátil.
- Método manual, mediante la utilización de termómetros de mercurio (tradicional).

Las temperaturas de los líquidos de hidrocarburos bajo condiciones dinámicas, se pueden determinar mediante la medición de la temperatura del líquido a medida que fluye a través de una tubería.

Este capítulo establece además, una serie de condiciones que debe tener un instrumento de medición instalado en campo, con el fin de dar un valor real y confiable de la temperatura del crudo. Es por esto que se han desarrollado distintos métodos para la medición de la temperatura del crudo, ya que el volumen depende directamente del comportamiento de ésta.

1.2.2.8. Capítulo 8: Muestreo

Este capítulo de la norma, describe los métodos y equipos utilizados para obtener de forma manual y automática, muestras representativas de petróleo y productos derivados de éste [10].

1.2.2.9. Capítulo 9: determinación de densidad

El propósito de este capítulo es describir el método para determinar la densidad, densidad relativa (gravedad específica) o gravedad API del hidrocarburo mediante el método del hidrómetro [11].

1.2.2.10. Capítulo 10: Agua y sedimento

Este capítulo, establece los distintos métodos y procedimientos que se deben llevar a cabo, para realizar la medición de elementos no asociados con las propiedades de los hidrocarburos. Esto se hace realizando una

muestra de forma automática, por medio de una sonda, la cual, succiona una determinada cantidad de petróleo para poder establecer la cantidad de agua, sedimentos, sal, entre otros componentes, ajenos al hidrocarburo [12].

1.2.2.11. Capítulo 11: Datos de propiedades físicas

El propósito de este capítulo, consiste en definir y establecer los distintos métodos para la corrección y adecuación de las variables físicas que intervienen de forma directa en el proceso de medición dinámica de hidrocarburos, generando así, datos precisos del volumen medido [13].

1.2.2.12. Capítulo 12: Cálculo de cantidades de petróleo

Los procedimientos descritos en este capítulo, están destinados a estandarizar el cálculo estático del hidrocarburo presente en tanques de almacenamiento y dar un enfoque uniforme para los cálculos volumétricos y de la masa del crudo. Esta norma especifica las ecuaciones, secuencias de cálculo y la discriminación a ser empleados en estos cálculos, con el objetivo de que los operadores puedan llegar a resultados idénticos, con los mismos datos de entrada previamente normalizados [14].

1.2.2.13. Capítulo 13: Aspectos estadísticos de medición y muestreo

El objetivo que presenta este capítulo, es poder reducir al mínimo los errores de medición, diseñando así, pautas por medio de estudios estadísticos que permitan mejorar el estado final de la medición y así ayudar a los entes encargados de realizar la distribución del crudo, apoyándose en datos confiables [15].

1.2.2.14. Capítulo 15: Guías para la utilización del SI (sistema internacional de unidades) en la industria petrolera y afines

En este capítulo, se especifican las distintas unidades de medida según el SI (sistema internacional de unidades), en donde se establece, que la temperatura puede ser medida en Fahrenheit y grados Centígrados, la presión en PSI y el caudal del crudo se establece como la cantidad de barriles en una unidad de tiempo [16].

1.2.2.15. Capítulo 19: Medición de pérdidas por evaporación

Este capítulo, contiene un método mejorado para estimar el total de las pérdidas causadas por la evaporación, o su equivalente a emisiones a la atmósfera de hidrocarburos provenientes de los tanques de techo fijo que contienen componentes de múltiples mezclas de hidrocarburos de distintas zonas naturales (tales como existencias de líquidos derivados del petróleo, como los aceites crudos) [18].

Con los capítulos de la norma API expuestos, se concluye que esta sirve de apoyo en la realización del diseño de un complejo industrial, regulación de la extracción de crudo, determinación de las distintas propiedades físicas que debe tener el petróleo, para que éste sea de la mejor calidad y por consiguiente aprovechar de la mejor forma su composición como combustible.

Es de vital importancia conocer sobre esta norma al momento de trabajar en la producción de hidrocarburos, ya que describe de forma detallada los distintos pasos y recomendaciones que se deben tener en cuenta al momento del diseño de la tubería de producción, estableciendo así los distintos dispositivos que deben ser instalados en planta para tener una medición exacta y con el mínimo error de incertidumbre. Cabe notar que estas recomendaciones que plantea la norma API, se han establecido previamente bajo la reunión de distintos resultados obtenidos bajo las buenas prácticas de la producción de hidrocarburos en las distintas industrias petroleras a nivel mundial las cuales reúnen ideas y datos específicos, resumidos en esta norma para ser tenidos en cuenta al momento de la producción de hidrocarburos. Es por esto que se propone trabajar con el diseño representado en la figura 1.1.

1.3. Conceptos generales de Sistemas de Eventos Discretos y Redes de Petri

Durante las últimas décadas, la rápida evolución de la tecnología ha producido una proliferación de nuevos sistemas dinámicos, generalmente hechos por el hombre y de gran complejidad; ejemplos de ellos, son las redes de computadoras, sistemas de producción automatizados, sistemas en general de comando, de control, de comunicaciones y de información. Todas las actividades en estos sistemas se deben a la ocurrencia asincrónica de eventos discretos, algunos controlados (tales como el pulsado de una tecla) y otros no (como la falla espontánea de un equipo); esta característica lleva a definir el término de Sistemas de Eventos Discretos.

1.3.1. Sistemas de eventos discretos

Los SED (Sistemas de Eventos Discretos), permiten representar sistemas, en los cuales, el comportamiento de entrada y salida se encuentra descrito en secuencias de eventos, sujetos al estado que tenga un número finito de cambios dentro de un intervalo finito de tiempo [22]. Dentro de los formalismos matemáticos para representar sistemas de eventos discretos se contemplan las Redes de Petri [22].

1.3.2. Redes de Petri

Las RDP (Redes de Petri), son un formalismo muy utilizado en el modelado y análisis de SED. Esta popularidad se debe a que combina, con un sólido fundamento matemático, la representación gráfica y la capacidad de modelar procesos paralelos y distribuidos.

Matemáticamente, una RDP puede ser descrita por un conjunto de ecuaciones que reflejan el comportamiento del sistema; esto permite realizar un análisis formal del sistema, que consiste en examinar dichas ecuaciones y sus propiedades, relacionándolas con eventos tangibles, como son: operaciones concurrentes, liberaciones de bloqueo, apropiada sincronización, actividades repetitivas, exclusiones mutuas, etc. Gráficamente, las RDP ofrecen un excelente medio de comunicación entre clientes y usuarios, esto se debe a que su interpretación es sencilla, lo que la diferencia de descripciones textuales, eventualmente ambiguas y notaciones matemáticas, que no son fáciles de entender [21].

La versatilidad gráfica y matemática de las Redes de Petri, combinada con la ayuda de sistemas computacionales, permiten una simulación gráfica. Tal ventaja, pone en manos de los ingenieros desarrolladores, una poderosa herramienta de apoyo en el diseño y control de sistemas complejos [21].

1.3.3. Representación de las Redes de Petri

Toda herramienta de modelado, tiene una o más formas de ser representada. En el caso de las RDP, existe una representación gráfica y otra matricial.

1.3.3.1. Representación gráfica

Una RDP, es un grafo orientado en el que interviene cuatro tipos de componentes: los lugares (representados por circunferencias), que pueden contener un número nulo o positivo de marcas y las transiciones (representadas por segmentos rectilíneos), unidos alternativamente por arcos (representados por flechas). Un arco une un lugar a una transición, o viceversa, pero no dos transiciones o lugares [23]. La Figura 1.3, muestra las representaciones gráficas de los diferentes elementos y la Figura 1.4, muestra las uniones permitidas en la elaboración de una Red de Petri.

Figura 12. Representación gráfica de los diferentes elementos de una RDP.



Fuente: Propia, Octubre de 2012.

Figura 13. Conexiones válidas y no válidas entre lugares y transiciones



Fuente: Propia, Octubre de 2012.

Un lugar, puede contener un número positivo de marcas, o bien, no poseer ninguna marca. Una marca se representa por un punto en el interior del círculo correspondiente al lugar que la contiene. El conjunto de marcas asociadas en un instante dado, a cada uno de los lugares constituyen un marcado de la RDP [23].

En general, se pueden establecer los siguientes principios básicos:

- A cada lugar se le asocia una acción o salida del sistema que se desea modelar.
- A cada transición se le asocia un evento.
- Un lugar P es entrada de una transición T, si existe un arco orientado desde P hacia T.
- Un lugar P es salida de una transición T, si existe un arco orientado desde T hacia P.
- Una marca puede representar una condición o estado dentro del sistema, o bien puede representar valores físicos. Como condición, una marca significa que un subsistema del proyecto ha concluido sus tareas y está listo para que en conjunto con otro subsistema, un evento futuro pueda ser llevado a cabo.
- A cada arco se le asocia un valor conocido como peso de arco. El peso del arco es una propiedad que involucra el número de marcas que la transición quita a un lugar de entrada o que agrega a un lugar de salida, cuando una transición es disparada [23].
- Los lugares que contienen marcas se consideran lugares activos, tal y como se muestra en la Figura 1.5 [24].

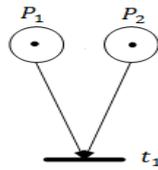
Figura 14. Lugar Activo



Fuente: Teoría de Redes de Petri [24].

A las transiciones, se les asocia eventos (funciones lógicas de las variables de entrada). Una transición se dice que está sensibilizada si todos los lugares de entrada están marcados.

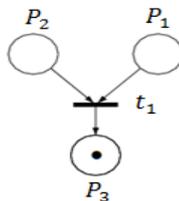
Figura 15. Transición sensibilizada



Fuente: Teoría de Redes de Petri [24].

Cuando ocurre un evento asociado a una transición, se dice que la transición está validada. Cuando una transición sensibilizada se valida, se produce el disparo de la transición que implica un cambio en el marcado de la RDP; esta situación se muestra en la Figura 1.7.

Figura 16. Transición validada y ocurrencia del disparo para la marcación de la Figura 1.6



Fuente: Teoría de Redes de Petri [24].

1.3.3.2. Representación matricial

Una Red de Petri con m transiciones y n lugares, puede ser representada por dos matrices de incidencia, C^- y C^+ , que representan las conexiones entre los nodos de la red.

C^- representa las entradas a las transiciones y C^+ las salidas. Cada matriz tiene m filas (una por cada transición) y n columnas (una por cada lugar) [24].

Se puede decir que una RDP N , se encuentra definida matricialmente por medio de dos matrices:

Matriz de incidencia de N :

$$C = C^+ - C^- \quad (1.15)$$

La matriz de incidencia define para cada lugar, el balance de marcas resultante del disparo de una transición.

$$C_{n \times m} = Post_{n \times m} - Pre_{n \times m} \quad (1.16)$$

Donde m representa las transiciones y n los lugares.

De modo que sus componentes son:

$$C_{i,j} = b_{i,j} - a_{i,j} \quad (1.17)$$

Donde $a_{ij} = Pre(p_i, t_j)$ que indica el número de marcas que se retiran del lugar p_i al dispararse la transición t_j y $b_{ij} = Post(p_i, t_j)$ como el número de marcas que se depositan en el lugar p_i al dispararse la transición t_j [24].

1.3.3.3. Definición formal

Una Red de Petri N , puede representarse como una función [24]:

$$N = \langle P, T; C^-, C^+; M_0; W \rangle$$

Donde:

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$, es un conjunto finito y no vacío de lugares.
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, es un conjunto finito no vacío de transiciones. Tales que $P \cap T = \emptyset$ y $P \cap T \neq \emptyset$
- C^- : es la matriz de incidencia previa, representa los arcos dirigidos de los lugares a las transiciones.
- C^+ : es la matriz de incidencia posterior, representa los arcos dirigidos de las transiciones a los lugares.
- M_0 : es la marcación inicial.
- W : es la función que asigna un peso a cada arco.

Con la teoría de Redes de Petri se puede decir que proporcionan una herramienta para el diseño del control, debido a que es un método dinámico-gráfico, lo cual permite el análisis y validación del modelo, que mediante otros métodos sería mucho más compleja.

1.4. Control Supervisorio

Se prosigue a definir el concepto de control supervisorio, se muestra la técnica utilizada para el cálculo del supervisor basado en invariantes de lugar. Posteriormente, se aborda el caso de las restricciones que incluyen vector de disparo. Dicha teoría expuesta sirve como base para el desarrollo del proyecto.

1.4.1. Definición control supervisorio

El control supervisorio pretende lograr la coordinación de los diferentes niveles de jerarquía que implican las actividades de control y programación de operaciones, así como la notificación de los estados de encendido, apagado y/o emergencia del sistema. El proceso normalmente cuenta con diversas unidades de operación y control denominados PLC, en cuyo caso, el control supervisorio permitirá desarrollar modelos con

propiedades deseables a partir de especificaciones adicionales del sistema [25].

La teoría de control supervisorio, es un enfoque general que se le da a los sistemas de control a eventos discretos, con el que se pretende integrar los sistemas a eventos discretos, las especificaciones de control y la síntesis automática del proceso a controlar, y así, generar los estados y eventos deseados. Esta teoría propone representar el comportamiento del sistema a controlar con un lenguaje formal que debe ser generado por un SED [25].

La teoría de control supervisorio, fue desarrollada gracias a los trabajos de Ramadge y Wonham en 1989, en los cuales, el término supervisor es empleado con la intención de controlar eventos a partir de la especificación del funcionamiento del sistema y que hacen del supervisor una técnica que garantiza que en el proceso no se presenten estados específicos fuera de alcance, para ello, éste debe seleccionar entre el conjunto de eventos controlables (aquellos cuya ocurrencia puede forzarse a voluntad), los que eviten llegar a estados prohibidos, pero teniendo en cuenta que en cualquier momento pueden ocurrir eventos no controlables (dictados por la naturaleza física del problema, tal como el daño de una máquina o disturbio en cualquier parte del proceso), cuya ocurrencia no se puede impedir [25].

En este punto, es necesario definir y diferenciar una serie de conceptos relacionados con el proyecto.

1. Monitorear: Observar mediante aparatos especiales el curso de uno o varios parámetros de un proceso para detectar posibles cambios o variaciones [26].
2. Supervisión: Consiste en un conjunto de acciones desempeñadas con el propósito de asegurar el correcto funcionamiento del proceso incluso en condiciones anómalas. En la supervisión es necesario cumplir con una fase previa, el monitoreo [26].
3. Sistema de supervisión: Está conformado por componentes interactivos que razonan acerca del comportamiento del proceso, para proponer y ejecutar las acciones apropiadas con el objetivo de mantener el proceso de producción en operación normal [26].
4. Sistema SCADA (*Supervisory control and data acquisition*): Corresponde a la tecnología encargada de adquirir datos del proceso por medio de dispositivos que se encuentran en la planta (estos dispositivos tiene memoria y capacidad de almacenar información). Con los datos adquiridos y basados en un comportamiento deseado para el proceso, se realiza la supervisión del sistema. Las acciones que se están llevando a cabo, deben concordar con las acciones requeridas en el proceso productivo. Posteriormente, los lazos de control son cerrados por el operador. El sistema sugiere al operador, la ejecución de ciertas acciones de control sobre el proceso en base a

los datos obtenidos y los análisis realizados. Será el operador, quien en base a su experticia, decida cuáles acciones de control serán efectuadas sobre el proceso [26].

5. Software de supervisión: Es una aplicación software diseñada para la generación de aplicaciones de interfaz hombre-máquina, destinadas a la supervisión, control de procesos, sub-procesos, equipos o sistemas completos. Un software de supervisión registra la evolución del proceso [26].

1.4.2. Supervisor basado en Redes de Petri

1.4.2.1. Supervisor basado en invariantes de lugar

El procedimiento sistemático a seguir en el desarrollo del supervisor, está sustentado en el análisis y descripción del proceso, la identificación de los eventos discretos y su posterior modelado con RDP. La planta o procesos a controlar son modelados bajo el concepto de Redes de Petri de invariante de lugar introducido por Moody y Antsaklis [27].

Inicialmente, se parte del objetivo al cual se quiere llegar con el control supervisorio, es decir, las restricciones que permitan que el proceso despeje esos marcajes inalcanzables, tal que:

$$L\mu_p \leq b \quad (1.18)$$

Donde,

μ_p : Es el vector de marcaje del proceso.

L : Es una matriz de enteros de orden $n_c \times n$, donde n_c es el número de restricciones de los lugares a controlar y n es el número de estados o lugares del proceso.

b : Es un vector de restricciones, es decir, aquellos estados o lugares donde el marcaje es inalcanzable, cuyo valor es de 1, si hay presencia de marca en el lugar o cero en caso contrario [27].

Una vez obtenido el modelo en Redes de Petri del proceso, se procede a analizar el sistema a partir del método de invariantes de lugar. Inicialmente, se parte de una serie de restricciones o condiciones adicionales (n_c) que se le impondrán al sistema, con el objeto de despejar estados no deseados del proceso, como lo son marcajes inalcanzables. En este punto, los marcajes en cada uno de los lugares del proceso, serán denotados por μ_p .

Los estados del proceso son representados por un vector $n \times 1$ componentes enteros no negativos, donde cada componente del vector es igual al marcaje del lugar correspondiente en la RDP del proceso, como fue denotado inicialmente.

Las restricciones se expresan de acuerdo a la ecuación 1.18, siendo L una matriz de enteros de orden $n_c \times n$ y cuya desigualdad es leída con respecto a cada elemento del lado izquierdo y derecho de la misma. Luego, si el marcaje inicial no viola las restricciones dadas en la desigualdad anterior, entonces, puede hacerse cumplir mediante un supervisor D_c , que es una matriz de incidencia controlada, que combinaría la matriz de incidencia D_p del proceso original con los controladores (restricciones). En consecuencia,

$$D_c = -LD_p \quad (1.18)$$

Ahora, reconociendo que la meta principal del supervisor es de hacer cumplir las restricciones del proceso, podría darse el caso en que la restricción a cumplir sea de tipo $\mu_1 + \mu_2 \leq 1$, dicho de otra forma, ambos lugares no pueden tener marca al mismo tiempo; dado que el supervisor no ejecutará dos acciones simultáneamente iguales que involucren el uso compartido de recursos idénticos para ambos casos. Por tanto, la desigualdad de la restricción puede ser transformada en una igualdad, al introducir una variable de referencia slack, denotada como μ_c , que hará las veces de controlador o conjunto de restricciones impuestas en el proceso, tal que la restricción se convierte en $\mu_1 + \mu_2 + \mu_c = 1$. En este caso, la variable slack representa un nuevo lugar c , que espera los marcajes extras necesarios para hacer cumplir la igualdad, teniendo presente que las reglas de marcaje en la evolución de las RDP, aseguran que μ_c es por definición no negativo [27].

Es importante aclarar, que en el caso en donde las restricciones sean mayores a uno, el número de slack aumenta por cada restricción que se le adicione al proceso, es decir, que el número de variables de referencia es proporcional a la cantidad de restricciones que se tengan. En forma genérica,

$$L\mu_p \leq b \quad (1.19)$$

$$L\mu_p + \mu_c = b \quad (1.20)$$

Una vez se tiene calculadas e identificadas: la matriz del supervisor, la matriz de incidencia y los marcajes con control y sin control del proceso, se puede decir de manera generalizada, que la técnica de control supervisorio, diseña un tipo de matriz de incidencia tal que:

$$D = \begin{bmatrix} D_p \\ D_c \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

Donde, $D \in \mathbb{Z}^{(n+n_c) \times m}$ y un tipo de vector de marcas $\mu \in \mathbb{Z}^{n_c}$ representada por:

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_p \\ \mu_c \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

Si bien, el supervisor y el marcaje controlado sustituyen la parte fundamental de la teoría de control de supervisorio, es necesario para el análisis de todo proceso, disponer de condiciones iniciales que den puntos de partida en el sistema; lo cual, lleva a definir el marcaje inicial como:

$$\mu_0 = \begin{bmatrix} \mu_{p_0} \\ \mu_{c_0} \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

Donde:

μ_{p_0} : Corresponde al marcaje inicial del proceso a controlar

μ_{c_0} : Corresponde al marcaje inicial del proceso controlado, es decir, al marcaje con el que iniciará el supervisor una vez hallado y que se calcula como:

$$\mu_0 = b - L\mu_{p_0} \quad (1.24)$$

1.4.2.2. Restricciones que incluyen vector de disparo

Si se necesita que dos transiciones no se disparen simultáneamente, o que una transición no pueda dispararse cuando unos determinados lugares tengan marcas, estas restricciones pueden ser descritas de la siguiente forma [27].

$$\mu_i - q_j \leq 1 \quad (1.25)$$

Para escribir esta restricción de forma que solo contenga elementos del vector de disparo diríjase al anexo A.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MEDICIÓN DINÁMICA DE HIDROCARBUROS EN LA EMPRESA SWCOL LTDA.

En este capítulo, se establecerá detalladamente la descripción del proceso de medición dinámica de hidrocarburos, donde se especificará la descripción de la planta, instrumentación, las variables manipuladas, las controladas y los disturbios propios del proceso.

Posteriormente se propondrá una arquitectura de instrumentación y control para lo cual se realizará previamente la descripción de la cadena de valor de la empresa SWCOL Ltda., ya que esta permite estudiar dicha empresa, dividiéndola en unidades de producción, que son conformadas por recursos elementales organizados y configurados, permitiendo así realizar los procesos de transformación en el proceso de medición dinámica de hidrocarburos, con el objetivo de adquirir los productos exigidos con las características especificadas, a fin de obtener una medición con un mínimo error de incertidumbre acerca del flujo de hidrocarburos dentro de la tubería de producción.

Una vez detallado el concepto de unidad de producción bajo la cadena de valor, se propone trabajar con el Modelo Referencial de Automatización Industrial (MRAI), desarrollado en el Laboratorio de Sistemas Distribuidos y Automatización Industrial (LasDAI) de la universidad de los Andes de Venezuela, para establecer la arquitectura propuesta a la empresa SWCOL Ltda. [29].

Posteriormente se hará una descripción de las propiedades físicas reales del hidrocarburo.

A continuación se realizará la descripción del proceso de medición dinámica de hidrocarburos para la empresa SWCOL Ltda.

2.1. Descripción del proceso de medición dinámica de hidrocarburos para la empresa SWCOL Ltda.

- **Planta:**

Este proceso consiste en realizar la medición dinámica de hidrocarburos sobre una tubería de producción, en la cual se encuentra una serie de instrumentos conectados de forma ordenada como se puede apreciar en el P&ID representado en la figura 2.1. Este diseño de implementación como se mencionó en el capítulo número 1, es el que propone la norma API en su numeral 5, referido a la medición dinámica de hidrocarburos [7].

El propósito de esta planta consiste en obtener una medición del flujo de crudo que atraviesa la sección transversal de la tubería de producción por unidad de tiempo.

- **Variable controlada:** Estado actual del filtro
 - **Variable manipulada:** Apertura y cierre de válvulas del filtro
 - **Disturbios:** Variación en el caudal de entrada del hidrocarburo en el filtro
-
- **Esquema de control:**

En el esquema representado en la figura 2.1, el instrumento número 2 (Válvula de globo, normalmente cerrada), toma una acción correctiva cuando se genera un aumento de caudal hacia la entrada del filtro, este aumento de caudal se puede reflejar en el aumento de presión en la tubería. Cuando la presión en la tubería supera los 10 PSI, esta válvula que se encuentra normalmente cerrada, cambia su estado de cerrado a abierto, permitiendo que el flujo (crudo) retorne hacia su parte inicial, y así mantener el flujo constante que llega al filtro.

Del proceso de medición dinámica de hidrocarburos, se adquiere las variables de temperatura presión y caudal, estas tres variables propias del proceso serían enviadas hacia el computador de flujo Omni 3000, el cual realiza una serie de cálculos matemáticos para establecer el caudal actual en un instante de tiempo presente en la tubería de producción.

El control como tal se realizará mediante el enfoque de los sistemas a eventos discretos, mediante el modelado de un supervisor el cual evitará que el sistema de medición dinámica se encuentre en lugares no deseados o inalcanzables, los cuales se definen mediante una serie de restricciones para que el sistema evite llegar a ellos y así el supervisor mediante la apertura de las válvulas pertenecientes al filtro (Válvula desairadora, válvula de eliminación de partículas) pueda mantener la presión del filtro constante e inferior a un valor de 20 PSI. El modelado del supervisor y las restricciones impuestas para que el sistema de medición dinámica de hidrocarburos no se encuentre en lugares no deseados, se establecerá detalladamente en el transcurso de este capítulo.

- **Descripción de la instrumentación:**

En la figura 2.1, se puede observar el diseño según la norma API V[7] de la instrumentación referente a la medición dinámica de hidrocarburos, en donde dichos instrumentos se encuentran instalados de forma ordenada.

El crudo ingresa hacia la tubería de producción en sentido horizontal de izquierda a derecha, atravesando la válvula de entrada, esta presenta dos

estados abierto-cerrado, este instrumento se encuentra marcado con el número 1 en la figura 2.1.

Continuando con la dinámica del proceso se puede observar el instrumento número 2 (Ver figura 2.1), el cual hace referencia a una válvula de globo normalmente cerrada, lo ideal es que el flujo que circula a través de la tubería sea constante, si ocurre un aumento de caudal, la presión en la tubería aumenta, haciendo que esta válvula se abra y devuelva parte del flujo de crudo hacia la parte inicial del proceso, con el fin de mantener un flujo constante a través de la tubería, principalmente hacia el ingreso del filtro.

En instrumento número 3, hace referencia a una electroválvula, funciona con un voltaje de 0 y 5 volts, la cual permite la eliminación de la fase gaseosa del hidrocarburo, evitando así que estas burbujas de aire se desplacen hacia el medidor de flujo de desplazamiento positivo y causen un daño sobre este. Siguiendo con la dinámica del proceso, se puede observar el instrumento número 5, este instrumento hace referencia a una electroválvula ubicada en la parte inferior del filtro, opera sobre dos estados (abierto-cerrado), permitiendo así la eliminación de partículas sólidas y líquidas que puede contener el hidrocarburo debido al proceso de extracción.

El instrumento número 6, es un transmisor e indicador de presión diferencial con su respectivo sensor, ubicado aguas arriba y aguas abajo del filtro, este instrumento de medición envía hacia el computador de flujo una señal de 4-20 miliamperios, tiene como fin establecer el estado actual del filtro, si la presión dentro de este supera los 20 PSI, la dinámica del proceso se detiene ya que el filtro se encuentra lleno de partículas ajenas al crudo, impidiendo que el sistema siga con su dinámica.

El instrumento número 7, es un transmisor indicador de flujo con su respectivo sensor, ubicado entre el filtro y la válvula de control anti retorno como lo expresa la norma API en su capítulo número 5. Este instrumento de medición, envía una señal de pulsos hacia el computador de flujo Omni 3000. El flujo medido sobre la tubería de producción corresponde al volumen bruto de que atraviesa la sección transversal de la tubería en una unidad de tiempo.

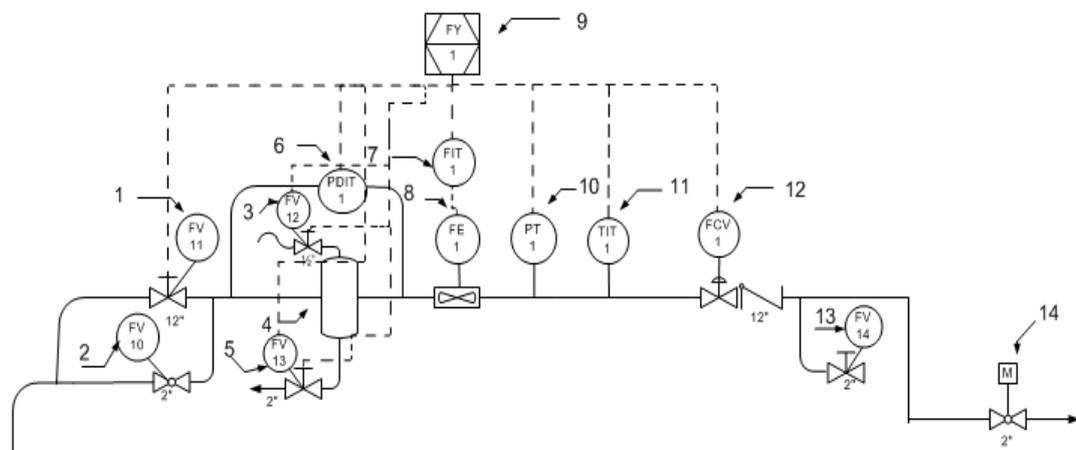
El número 9, hace referencia a un computador de flujo marca Omni 3000, a este computador llegarán las señales enviadas desde planta correspondientes a volumen bruto de crudo, temperatura y presión dentro de la tubería de producción. El computador Omni 3000 opera esas variables y establece el flujo real que circula por la tubería de producción en una unidad de tiempo. La especificación del computador Omni 3000 como tal, se encuentra en el anexo A.

El instrumento número 10 hace referencia a un transmisor de presión con su respectivo sensor, este se encarga de establecer la presión dentro de la tubería de producción, enviando una señal de 4-20 miliamperios hacia el computador de flujo. Así como el instrumento número 11 referente a un transmisor indicador de temperatura con su respectivo sensor, también se comunicará con el computador de flujo mediante una señal eléctrica de 4-20 miliamperios. Cabe resaltar que estos dos últimos instrumentos de medición (Temperatura, Presión), su ubicación en ese orden sobre la tubería de producción tienen como fin realizar una acción de compensación sobre la densidad del crudo, haciendo que este sea de mayor calidad.

El instrumento número 12, hace referencia a una válvula check, está destinada a impedir una inversión de la circulación del crudo. La circulación del líquido en el sentido deseado abre la válvula y al invertirse la circulación se cierra.

Por último el instrumento número 13 referente a una válvula de alivio, que tiene como fin dejar pasar flujo y disminuir la presión dentro de la tubería, solo si es necesario, y el instrumento número 14 es una motobomba que se encarga de impulsar el crudo a una siguiente etapa.

Figura 2.1. Diagrama P&ID para el proceso de medición dinámica de hidrocarburos



Fuente: Propia, diagrama basado en el diagrama de instrumentos según la norma API, Capítulo 5 [7]

Cabe resaltar que el diagrama representado en la figura 2.1, solo hace referencia a la instrumentación en un patín de medición, aun así en la empresa caso de estudio se cuenta con dos patines totalmente idénticos en cuanto a funcionamiento, orden y composición de la instrumentación.

A continuación se realizará una breve descripción del proceso de medición dinámica de hidrocarburos mediante la cadena de valor, esto con el fin de establecer los estados de los recursos (instrumentos). El desarrollo completo de la cadena de valor se encuentra en el anexo B.

2.2. Cadena de valor de la empresa SWCOL Ltda.

El uso de la cadena de valor sirve fundamentalmente, para la descripción del modo en cómo se desarrollan la dinámica de las acciones dentro de una empresa, iniciando desde la recepción y manejo de materias primas, pasando por la producción de un determinado producto, hasta llegar a su distribución y venta [40].

La cadena de valor genérica se constituye por dos elementos básicos:

- Las actividades primarias. Estas actividades tienen que ver con la logística interna, operaciones, logística externa, mercadotecnia, comercialización y los servicios post-venta.
- Las actividades de soporte a las actividades primarias. Estas actividades tienen que ver con la infraestructura de la empresa, administración de recursos humanos, desarrollo tecnológico, abastecimiento, actividades de compras y bienes de servicios.

En este caso, para la medición dinámica de hidrocarburos, se debe optimizar y hacer énfasis en el eslabón de **OPERACIONES**, ubicado en las actividades de materias primas, estableciéndose desde el punto de vista de producción. Esto permitirá obtener un producto final con mejor calidad, es este caso, el hidrocarburo estará limpio y exento de partículas que puedan afectar su adecuada funcionalidad como combustible; además de esto, se obtiene disminución de costos y mejora de la productividad mediante la generación de una medida precisa de caudal del crudo que circula a través de la tubería, con el fin de que la empresa sea más competitiva en el mercado [41].

Con los conceptos previamente establecidos, se realizará a continuación, el modelo de la cadena de valor para la empresa SWCOL Ltda.

SWCOL Ltda., es una empresa Colombiana de ingeniería al servicio de la industria energética, petróleo, gas, minería y biocombustible, con reconocida experiencia en la generación de soluciones integrales a la medida de las necesidades del cliente. La empresa SWCOL Ltda., ofrece variados servicios a sus respectivos clientes, entre ellos:

- Soporte de mantenimiento.
- Consultoría e interventora en cuanto a la estructuración de proyectos.
- Manejo de biocombustibles.
- Desarrollo de offshore.
- Capacitación e ingeniería, siendo esta última actividad a la que se remonta el desarrollo del presente proyecto.

Para este proyecto en particular, se toman dos líneas de producción, las cuales, son idénticas y cumplen el mismo objetivo: medir el flujo dinámico del hidrocarburo. Cada línea de producción se denomina:

- Patín de medición 350401
- Patín de medición 360401

Los dos patines de medición, cuentan con el mismo diseño e instrumentación. El objetivo final es brindar una aplicación y diseño de un sistema capaz de medir la dinámica del hidrocarburo circulante a través de la tubería, obteniendo un producto previamente filtrado y medido con precisión y exactitud.

La Tabla 2.1, muestra la capacidad de medición que se puede obtener mediante los dos patines y se expresan las características físicas que tiene el crudo circulante por una tubería de 24 pulgadas de diámetro, donde se puede observar claramente que las variables físicas de viscosidad y gravedad específica a 60 °F depende de los grados API que posee el crudo. Se puede apreciar que la relación entre grados API y gravedad específica son inversamente proporcionales, al igual que la viscosidad [3].

Tabla 2.1. Variables físicas del crudo dependiendo sus grados API

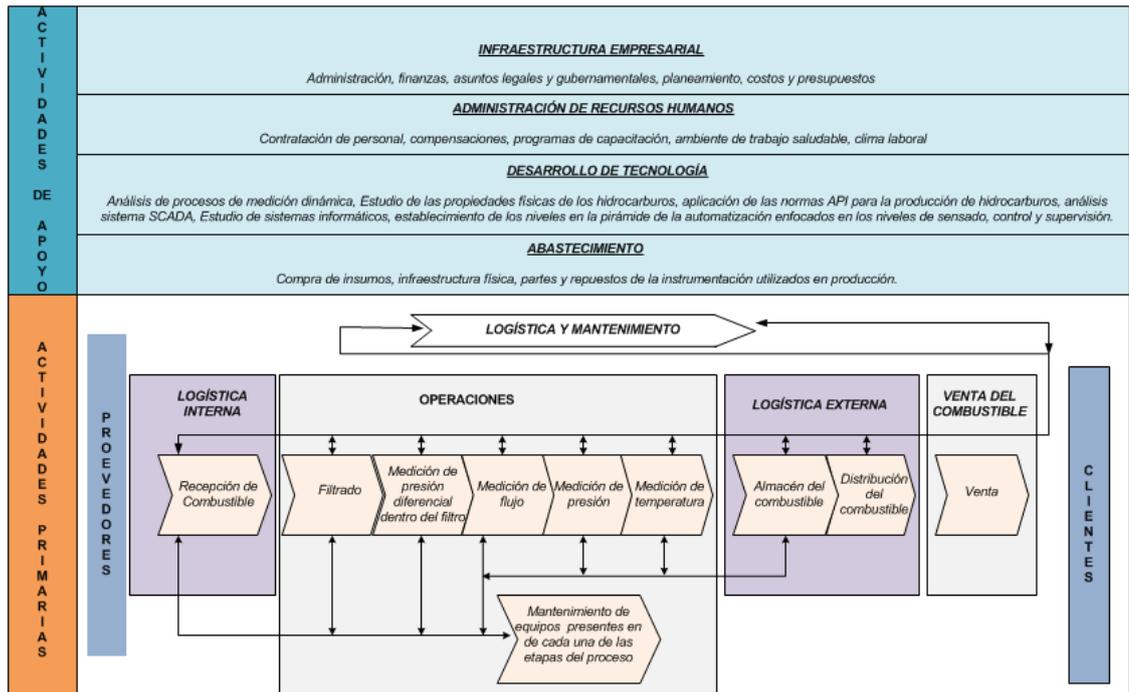
VARIABLE	Ø= 24" Line
Producto	Crudo 18° API
Presión máxima de trabajo (PSI)	20
Temperatura de diseño °F	140
Gravedad específica a 60 °F	0.957
Viscosidad a 60 °F	300 cSt

Fuente: Sistema integrado de gestión, Noviembre de 2010 [21]

En la Figura 2.2, se muestra la cadena de valor para la empresa SWCOL Ltda., seguido de una descripción detallada de los distintos componentes que hacen parte de esta.

Como ya se había establecido previamente, la cadena de valor para la empresa SWCOL Ltda., se centrará en el eslabón perteneciente a las operaciones. Es aquí donde se puede definir y especificar todo lo relacionado con el proceso de medición dinámica. Esta temática (Cadena de valor) sirve básicamente para poder definir los estados actuales como tal de cada unidad de producción establecida en el eslabón de operaciones, los estados actuales de los recursos son especificados en el anexo B mediante los objetos de negocio de cada unidad de producción, al igual que la definición formal de unidad de producción.

Figura 21. Cadena de valor de la empresa SWCOL Ltda.



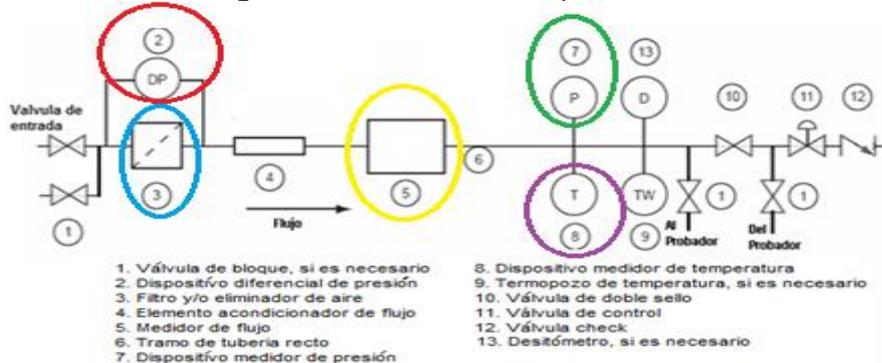
Fuente: Propia, Octubre de 2012

A continuación, se describirá lo respectivo al eslabón de operaciones, este eslabón permitió fragmentar el sistema de medición de dinámica de hidrocarburos en unidades de producción, con el fin de establecer el estado de cada recurso de cada unidad y así poder realizar posteriormente el supervisor, con el fin de ver en que afecta el estado de una unidad en otra, ver figura 2.2, los demás eslabones serán explicados en el anexo B.

2.2.1. Operaciones

Las operaciones, hacen parte de las actividades primarias de la cadena de valor, en éstas, se realizan actividades relacionadas con la transformación y manejo de insumos en la forma final del producto.

Figura 2.3. Unidades de producción



Fuente: Norma API [7]

2.2.1.1. Proceso de Filtrado

El proceso de medición dinámica comienza con la recepción del crudo y posteriormente con el filtrado, como se puede observar en la figura 2.3 se representa el diagrama de instrumentos del sistema de medición dinámica, haciendo énfasis en la unidad de filtrado marcado con el ovalo azul. El crudo es recibido por una tubería de entrada de 24 pulgadas de diámetro. La tubería de producción y el diseño de la ubicación de cada instrumento sobre dicha tubería están diseñados de acuerdo con las normas ANSI #150 y con la norma API.

La caída de presión máxima permisible para el filtrado y el brazo de medición de la brida de entrada, a la brida de salida en condiciones de flujo máximo no serán superiores a 20 PSI. El sistema de filtrado y medición están compuestos por un filtro y un medidor de desplazamiento positivo, el cual, es el encargado de enviar una señal eléctrica al computador de flujo para establecer la cantidad de crudo que pasa en un determinado tiempo por la tubería.

El proceso de filtrado tiene como objetivo capturar partículas en suspensión en el crudo que pudieran ocasionar daños en el medidor de desplazamiento positivo, esta etapa del proceso es una de las más importantes, ya que el valor del crudo depende directamente de su composición y entre más limpio, será mejor su comportamiento al momento de ser utilizado como combustible aumentando enormemente su precio y calidad.

En el proceso de filtrado se encuentra un desairador, el cual, contiene una válvula manual para poder evacuar la fase gaseosa del fluido, evitando la cavitación y error en la medición. Además, se encuentra una válvula manual para poder evacuar el 100% de las partículas sólidas capturadas por el filtro, esta etapa ocurre gracias al efecto de la gravedad, cayendo las partículas más pesadas al fondo del recipiente para su efectiva eliminación.

2.2.1.2. Proceso de medición de la presión diferencial

El transmisor indicador de presión diferencial permite evaluar el estado del filtro, cuanto más lleno de partículas se encuentre el filtro, mayor presión diferencial existirá. Entonces, por medio del indicador se podrá determinar la limpieza del filtro y establecer un adecuado control para evitar un posible daño de dicho elemento. Ver figura 2.3, ovalo color rojo.

2.2.1.3. Proceso de medición del flujo

La medición del crudo desempeña un papel importante en el proceso de medición dinámica, en esta etapa como su nombre lo indica se mide el flujo que atraviesa el sistema de medición (tubería de producción). Este

proceso se realiza mediante un medidor de desplazamiento positivo que mide el flujo directamente, el cual, opera atrapando el volumen unitario, desplazándolo desde la entrada hasta la salida y contando el número de volúmenes desplazados en un tiempo determinado. . Ver figura 2.3, ovalo color amarillo.

2.2.1.4. Proceso de Medición de la presión

En los dos brazos de medición, se encuentra el transmisor indicador de presión (manométrica y diferencial) de tipo SMART, con protocolo HART, ROSEMOUNT, con una precisión de $\pm 0.075\%$, el cual, contiene una pantalla de cristal líquido para la indicación del valor de presión dentro de la tubería de producción. Ver figura 2.3, ovalo color verde.

2.2.1.5. Proceso de medición de la temperatura.

El transmisor indicador de temperatura es calibrado desde 50 hasta 150 °F, el cual, contiene una pantalla de cristal líquido para indicación local. El transmisor se encuentra instalado aguas abajo del sistema de medición, directamente en la línea del proceso, en cada uno de los brazos. Las variables de temperatura y presión son indispensables para el cálculo del caudal que atraviesa por la tubería de 24 pulgadas de diámetro. Ver figura 2.3, ovalo color morado.

Luego de la medición de la temperatura, el crudo sigue su curso hasta llegar a la válvula de control (FVC), la cual, juega un papel importante, ya que varía el caudal del fluido de control que modifica a su vez el valor de la variable de medida comportándose como un orificio de área continuamente variable.

La tubería posee una válvula check o válvula de retención, éstas son instaladas para no dejar regresar el crudo dentro de la tubería. Este tipo de válvula se cierra instantáneamente dejando pasar sólo el crudo que corre hacia la dirección correcta.

La tubería posee una válvula de alivio o de seguridad en la parte baja, la cual, fue diseñada para liberar el crudo hacia una tubería de escape cuando existe una sobre presión en la tubería, que puede ser provocada por la temperatura del fluido. Dicha válvula de alivio debe ser de un tamaño de acuerdo a la norma API RP 520.

El proceso de medición dinámica, cuenta con un sistema de control para los dos brazos de medición por medio de un computador de flujo (OMNI 6000), con pantalla alfanumérica diseñado y desarrollado para realizar todos los procedimientos y cálculos requeridos para la medición dinámica, el cual, recolecta las señales enviadas por los transmisores de flujo, temperatura y presión para realizar el cálculo respectivo del volumen.

Un computador de flujo debe poseer las certificaciones respectivas en cuanto a seguridad de los datos procesados y el dominio de los cálculos para la estandarización del volumen medido según la API MPMS 12. Dicho computador de flujo cuenta con una batería a bordo mínima de 30 días de corte de energía.

Una vez explicado el concepto de unidades de producción y la cadena de valor propuesta para la empresa SWCOL Ltda., se realizará a continuación los aspectos más relevantes sobre las características del combustible y las exigencias del proceso de medición dinámica de hidrocarburos fundamentada bajo una serie de recomendaciones propuestas por la norma API.

2.3. Especificación del sistema de medición con referencia a la norma API

2.3.1. Características del combustible

Cada tipo de combustible es manejado de diferentes maneras según sus características físico-químicas, por ello, es necesario hacer un análisis de las características del combustible para especificar sus cualidades. La determinación de las características físico-químicas del combustible es realizada mediante las pruebas descritas en la norma API. Las características a evaluar son las siguientes:

- Densidad
- Gravedad API

2.3.1.1. Densidad relativa o específica

El valor de la gravedad API y densidad relativa (gravedad específica) se realiza por medio del método del hidrómetro (densímetro), el cual, es el método más adecuado según la norma API 9.1 (Método del hidrómetro para calcular la densidad relativa y gravedad API de petróleo crudo y productos derivados del petróleo).

La densidad se expresa normalmente, por convenio, a la temperatura de 15 °C, según la norma API 9.1 y la norma ASMT 1298 [9]. Su exactitud y precisión dependerá principalmente de la calidad de los densímetros empleados, así como de las condiciones de ensayo. La densidad relativa de la mezcla, para el caso de estudio es de 22.1 a 34 API.

2.3.1.2. Gravedad API

De acuerdo a los estándares dados por el API, para el cálculo de la gravedad API, la gravedad específica del producto debe ser medida a

60°F. De lo anterior, se puede deducir que un producto cuyo grado API es 10, tiene a la temperatura de 60°F la misma densidad que el agua a 4°C.

La gravedad API para este caso es 18 a 22 API. Haciendo uso de la densidad relativa del producto medido a 60°F, de acuerdo al estándar API y de la fórmula que permite hallar los grado API, el crudo se puede clasificar como pesado que no fluye con facilidad.

Un mayor valor de gravedad API en un producto de refinería representa que este combustible tiene mayor valor comercial, debido a la facilidad de manejo y los altos rendimientos que poseen. Esta regla es válida hasta los 45 grados API y más allá de este valor pierde su valor comercial debido a las condiciones de manejo (mayor volatilidad) y características propias.

2.3.2. Condiciones de operación

A lo largo de la tubería del sistema de medición dinámica, se tiene los siguientes datos:

- Temperatura.
- Presión en tubería.

2.3.2.1. Temperatura

La temperatura tiene un efecto significativo en la determinación precisa de las cantidades del líquido para la transferencia de custodia y el control de inventario. La temperatura del crudo es necesaria para calcular el volumen a temperatura estándar. Bajo condiciones dinámicas, esta variable se determina midiendo la temperatura a medida que fluye el líquido a través de la tubería según la norma API MPMS 7: Determinación de la temperatura [7].

La temperatura del proceso caso de estudio, es obtenida a través de una PT100 tipo (100 Platinum OHM), puesta a tierra, 4 hilos; el instrumento es de acero inoxidable, como especifica la norma. La PT100, se utiliza normalmente para medir la variable temperatura en la transferencia de custodia según las normas API 7.2, API 12 y API 551. Son capaces de resistir la presión, altas temperaturas y la corrosión para evitar la contaminación del crudo y otras condiciones ambientales que se especifican en la norma, para obtener una medición exacta de la variable [7]. La norma establece que las PT100 deben instalarse cerca de una válvula de vapor.

Es conveniente indicar que los sistemas de medición dinámica son diseñados para trabajar por debajo de la temperatura de inflamación, es decir, en ninguna parte del proceso de transporte o de acondicionamiento del combustible se debe sobrepasar la temperatura mencionada, ya que

si sucede, el manejo del combustible es peligroso. De lo mencionado, se puede concluir que la temperatura de inflamación, será la temperatura máxima del proceso, que en este caso equivale a 150°F.

2.3.2.2. Presión

La presión es una de las variables más medidas en la industria. La unidad de medida preferente para este proyecto es el PSI (libras por pulgada cuadrada). La caída de presión máxima permisible para el filtrado y el brazo de medición de la brida de entrada, a la brida de salida, en condiciones de flujo máximo no serán superiores a 20 PSI, ya que si sobrepasa este límite la válvula de control de flujo colapsará.

La instalación del sistema de medición dinámica, debe mantener la presión adecuada sobre el crudo a todas las temperaturas, para asegurar que el fluido que está siendo medido tenga el volumen correcto, según la norma API 5 [5]. La medición de la presión, debe ser siempre entre el medidor de desplazamiento positivo y la válvula de control de flujo, como lo especifica la norma API 6.2 [6]. Una válvula de contrapresión es instalada aguas abajo del medidor de desplazamiento positivo para mantener la presión en el sistema y garantizar el no retorno del crudo. Dicha válvula resiste el flujo a medida que disminuye o aumenta la presión en el crudo como lo define la norma API 6.2. La presión con que el hidrocarburo viaja por la tubería del sistema de medición dinámica se obtiene a través de los manómetros instalados en campo.

2.3.3. Exigencias del proceso

Los sistemas son diseñados y fabricados bajo las condiciones operacionales del tipo de crudo que se esté trabajando; de acuerdo al estándar de la API y de la fórmula que permite hallar el grado API, se concluye que para el proceso caso de estudio, el crudo se clasifica como pesado que no fluye con facilidad.

A continuación, se listan las exigencias del proceso según el tipo de crudo especificado, las recomendaciones de la norma API RP-540 y la norma API RP-500¹ [21].

- Todos los equipos del brazo que requieran mantenimiento en línea se encuentran en los lugares y posiciones accesibles al personal de mantenimiento.
- Cada brazo tiene todas las escaleras, plataformas, barandillas y las formas de tráfico necesarias para la operación y mantenimiento de los equipos y cada piso cuenta con antideslizante cubierto con rejillas.

¹ Recomendaciones prácticas para instalaciones prácticas en plantas de procesamiento de petróleo y clasificación de áreas para instalaciones eléctricas en plantas de procesamiento de petróleo, respectivamente.

- Todas las tuberías son diseñadas, fabricadas, instaladas, inspeccionadas de acuerdo con los requisitos de ANSI B 31.3.
- La tubería de cada brazo, es seleccionada por la duración, redondez y la uniformidad de la sección transversal.
- La soldadura de la instrumentación y/o tubería debe ser de penetración completa y su superficie se pule hasta que quede totalmente liso.
- Cada junta de soldadura de tubería que tiene diámetro igual o superior a 2", se inspecciona visualmente y por radiografía de acuerdo con la norma ANSI 31.3.
- El diseño y dimensionamiento de las tuberías cumplen con los requisitos de la norma ANSI 31.3.
- Ninguna tubería de diámetro igual a $\frac{3}{4}$ se utiliza, a excepción de la tubería de ventilación y drenaje.
- Las bridas son diseñadas de acuerdo a la norma ANSI 16.5.
- Nuevos patines o brazos deberán incluir un sistema de ventilación, drenaje y emisiones térmicas con una cabeza de conexión de diámetro de 2".
- El diseño de las tuberías debe soportar las variaciones de temperatura y de presión.
- En general las válvulas que se utilizan en el proceso de medición dinámica debe cumplir con la norma ANSI B16.34 y los requisitos de la API 6D [8].
- Cada brida de la válvula debe cumplir con los requisitos de la norma ANSI B16.5.
- Si las válvulas tienen conexión para el drenaje y/o bypass, estos deberán ajustarse a la norma API 6D.
- Las válvulas de control de flujo, son instaladas aguas abajo de cada medidor para equilibrar y estabilizar el flujo durante la medición.
- La seguridad de las válvulas de alivio, es de un tamaño de acuerdo a la norma API RP 520.
- Los actuadores de las válvulas se cierran en dirección a las manecillas del reloj.
- Cada instrumento es diseñado e instalado para su funcionamiento en las zonas clasificadas de acuerdo a API RP 500.
- Todos los componentes en contacto con el producto deberán ser de acero inoxidable.
- Cada sensor de temperatura PT100, es puesto a tierra como lo específica la API MPMS 7.
- Los medidores de flujo deben cumplir con los requisitos establecidos en la norma API STD 1101.
- En términos generales, el cable para las señales del instrumento, deberá ser de cobre con 600 V de aislamiento termoplástico resistente al calor a 90 °C, constituido por pares, triadas o cuatro alambres trenzados. El aislamiento es resistente a la humedad, el desgaste mecánico y retardante de llama. Los cables de los múltiples hilos tienen una identificación por código de colores.

- Los cables de alimentación son de cobre, calibre 12 AWG como mínimo, 600 V a 90 °C, con un aislamiento termoplástico resistente al calor, humedad, desgaste mecánico y retardante de llama.
- Los conductos eléctricos son de acero galvanizado para protegerlos de condiciones ambientales.
- Todos los equipos, accesorios, instrumentos y tubería son fabricados e instalados en una unidad autónoma.
- Los tubos estructurales satisfacen la norma API 5L.
- Los tornillos de las conexiones de la estructura principal son de $\frac{3}{4}$ ", de alta resistencia según la norma ASTM A325.
- Las superficies metálicas no deben tener adherido grasa, suciedad o cualquier otro contaminante.

En esta parte del capítulo podemos concluir que se pudieron establecer las distintas unidades de producción propuestas para la empresa SWCOL Ltda., dichas unidades de producción permitieron segmentar el proceso de medición dinámica de hidrocarburos, y así abordar la problemática en cuanto a este proceso de forma específica en cada unidad de producción para luego ser modelado cada recurso de cada unidad de producción mediante el enfoque a eventos discretos. También se pudo especificar el sistema de medición dinámica de hidrocarburos con referencia a la norma API mediante la utilización de la cadena de valor la cual permitió estudiar la organización desde diferentes puntos de vista (Actividades primarias y Actividades de apoyo). Mediante este método de estudio se pudo dividir la empresa en diferentes eslabones tal y como lo expresa su creador Michael Porter, a fin de conocer detalladamente toda la estructura, desde producción hasta las actividades a nivel gerencial, pero lo principal no es solo conocer la estructura de dicha empresa, sino que se debe ejecutar una acción para que las unidades de producción trabajen conjuntamente y así evitar las llamadas islas de automatización. Cabe resaltar que se le dio más énfasis a las actividades primarias de la cadena de valor, en especial a el eslabón de las operaciones donde se definió cada unidad de producción con su respectivos objetos de negocio o estados de los recursos, los cuales son de vital importancia para establecer el estado de cada recurso perteneciente a la unidad y por consiguiente hacer posible la comunicación entre dichas unidades que conforman la empresa para realizar y cumplir un objetivo general, para este caso obtener la medición del flujo del hidrocarburo sobre la tubería de producción.

2.4. Arquitectura de instrumentación y control del sistema de medición dinámica

Se propone la arquitectura de instrumentación y control del sistema de medición dinámica, definiendo los distintos instrumentos electrónicos, el tipo de red utilizado para la conexión e interacción de la instrumentación y el computador de flujo.

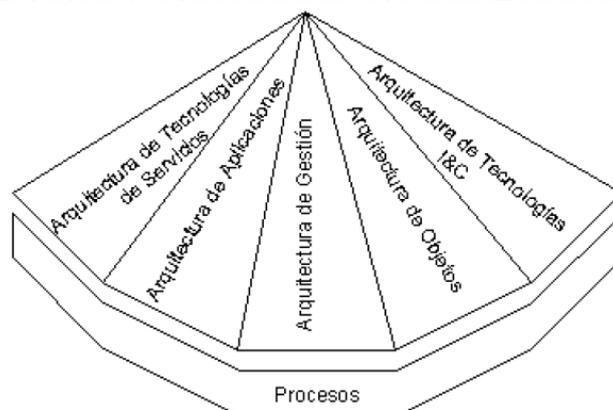
En el sistema de medición dinámica del crudo, intervienen una gran variedad de instrumentos, los cuales, tienen como fin determinar numéricamente la cantidad o magnitud de una propiedad física (presión, temperatura y caudal), especificando de forma detallada el volumen del crudo que se entrega y se recibe en custodia. La medición dinámica, se realiza por medio de dispositivos electrónicos, ubicados directamente en la tubería de producción que contiene el fluido en movimiento.

2.4.1. Arquitectura de tecnologías de instrumentación, información y comunicaciones, bajo el Modelo Referencial de Automatización Industrial (MRAI).

Una vez establecidos los procesos de negocios y la definición de los objetos de negocios de la cadena de valor de producción y de gestión de la empresa SWCOL Ltda., se procede a realizar el “Modelo referencial de Automatización Industrial”, con el fin de especificar las diferentes arquitecturas necesarias para la descripción de los distintos niveles de la automatización de la empresa.

El modelo de integración escogido para la representación del proceso caso de estudio, mostrado en la Figura 2.4, muestra de forma gráfica la interacción de los distintos elementos que conforman la pirámide de automatización, la cual, constituye la arquitectura de referencia que describe los elementos tecnológicos y de gestión esenciales para alcanzar un alto nivel de automatización e integración.

Figura 24. Modelo Referencial de Automatización Industrial



Fuente: Integración de arquitectura [29].

El Modelo Referencial de Automatización Industrial, establecido en la figura 2.4, específicamente en la arquitectura de información y comunicaciones, permite estudiar la empresa SWCOL Ltda., desde los cuatro niveles pertenecientes a la pirámide de la automatización industrial haciendo énfasis en los niveles 1 y 2.

A continuación, se realizará una breve descripción de dos de las caras de la pirámide que conforman la arquitectura de referencia y su aplicación a la empresa SWCOL Ltda, enfatizándose en el área correspondiente a la arquitectura de tecnologías de información y comunicaciones, debido a que ésta está ligada de forma directa con el desarrollo del proyecto.

2.4.2. Arquitectura de gestión

En este componente de la pirámide de integración, se definen los procedimientos de toma de decisiones en los diferentes niveles jerárquicos de la empresa que conforman la organización gerencial, los cuales, se orientan a cumplir su visión y misión. Estos procedimientos se encuentran asociados directamente con las funciones de soporte administrativo de la empresa, las cuales, han sido identificadas como procesos de soporte en la definición de la cadena de valor de la empresa

- **Nivel de planificación y control estratégico:** En este nivel, se debe llevar un adecuado manejo de los indicadores generales que permiten evaluar el desempeño de la empresa, con el fin de obtener y analizar de forma precisa: el estado financiero de la empresa, la calidad del producto, la satisfacción y aceptación de los clientes, la capacidad, condición y desempeño de las unidades de producción, el reporte y registro de la existencia de materias primas y productos. Un buen manejo y estudio de estos indicadores, permite a la empresa acercarse más a lo planteado en su misión y visión ante los clientes.
- **Nivel de planificación y control operativo:** En este nivel se establece la misión de producción propia de la empresa, definiendo sus distintas operaciones y actividades de producción, especificadas dentro de un periodo previamente definido. Además, se describe y se lleva un manejo de los recursos y materias primas disponibles.
- **Nivel de Planta:** En el nivel de planta, las decisiones se encuentran mucho más fundamentadas y estructuradas; dichas decisiones deben realizarse de una forma más rápida que en los otros niveles, ya que en este nivel se desarrolla el producto y se deben tener planes de acción eficaces y rápidos ante una posible eventualidad

En este nivel, los procesos controlados por la empresa caso de estudio son físicos o químicos. SWCOL Ltda. busca brindar soluciones a terceros para hacer una medición de forma exacta del crudo en movimiento dentro de la tubería de producción, analizando, controlando y llevando un registro detallado de las variables que influyen directamente sobre el proceso: temperatura, presión y caudal.

Es de vital importancia que la arquitectura de gestión de la empresa tenga un adecuado comportamiento dinámico, en el cual, cada nivel debe trabajar conjuntamente con los otros, con el fin de obtener los resultados

esperados y cumplir con los objetivos previamente establecidos. Es por esto que la arquitectura, se propuso bajo el Modelo referencial de Automatización Industrial (MRAI), donde concibe la infraestructura informática como un medio o recurso que está estrechamente ligado y alineado a los procesos de la empresa (Medición dinámica de hidrocarburos). La empresa debe ser concebida como un conjunto de procesos diseñados para alcanzar fines y objetivos preestablecidos, donde se definió mediante la cadena de valor: actividades primarias (Procesos de producción) y actividades de apoyo (Procesos de apoyo y gestión) [29].

2.4.2.1. Arquitectura de tecnologías de información y comunicaciones (TIC's)

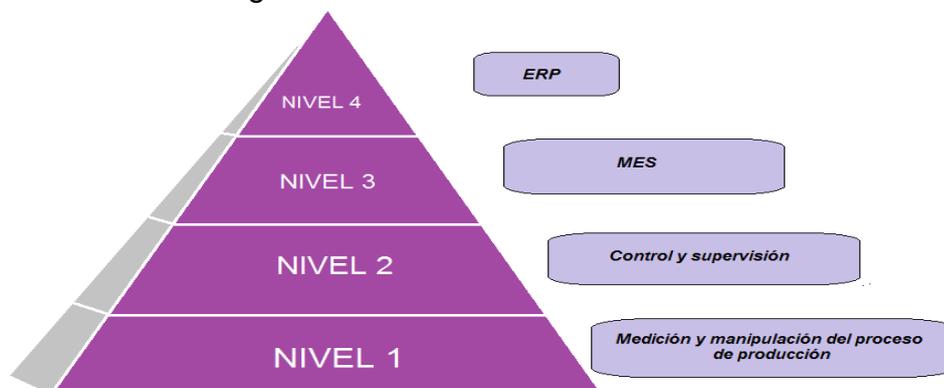
En esta parte de la pirámide del Modelo Referencial de Automatización Industrial, se definen:

- Arquitecturas de redes de comunicaciones.
- Equipos necesarios para los sistemas de almacenamiento y transferencia de información.
- Instrumentos que permiten la ejecución de aplicaciones y procedimientos de tomas de decisiones del proceso [29].

Los recursos definidos en este componente de la arquitectura de referencia, se conocen como los activos de la empresa, los cuales, tienen una correspondencia directa con los objetos de negocios, previamente identificados en la explicación de la cadena de valor de la empresa SWCOL Ltda.

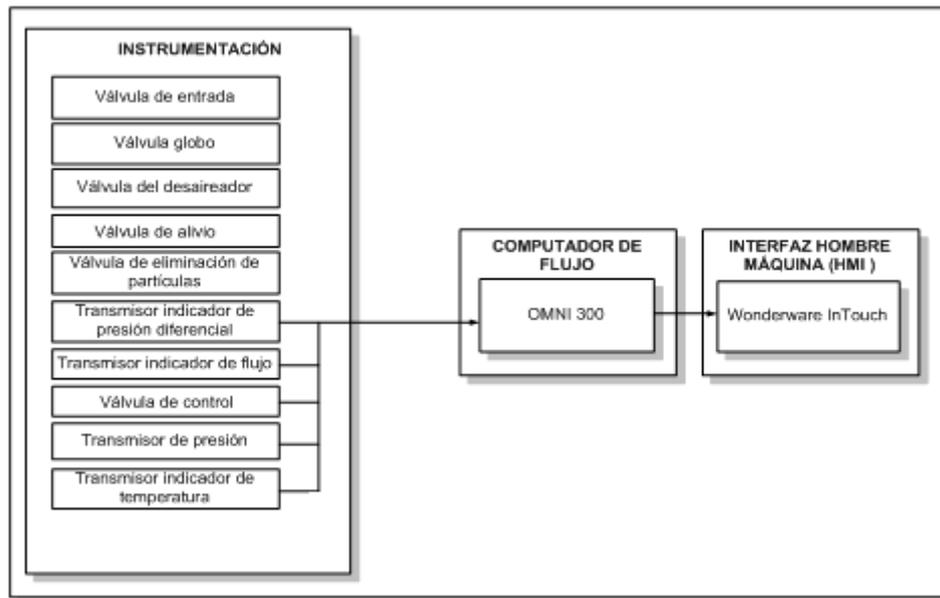
La arquitectura de tecnologías de información y comunicaciones propuestas para la automatización de la empresa SWCOL Ltda., se basa en la estructura y composición que establece la pirámide de la automatización, como lo muestra la Figura 2.5.

Figura 2 Pirámide de Automatización



Fuente: Modelo teórico CIM [34]

Figura 2 Instrumentos y dispositivos en la medición dinámica



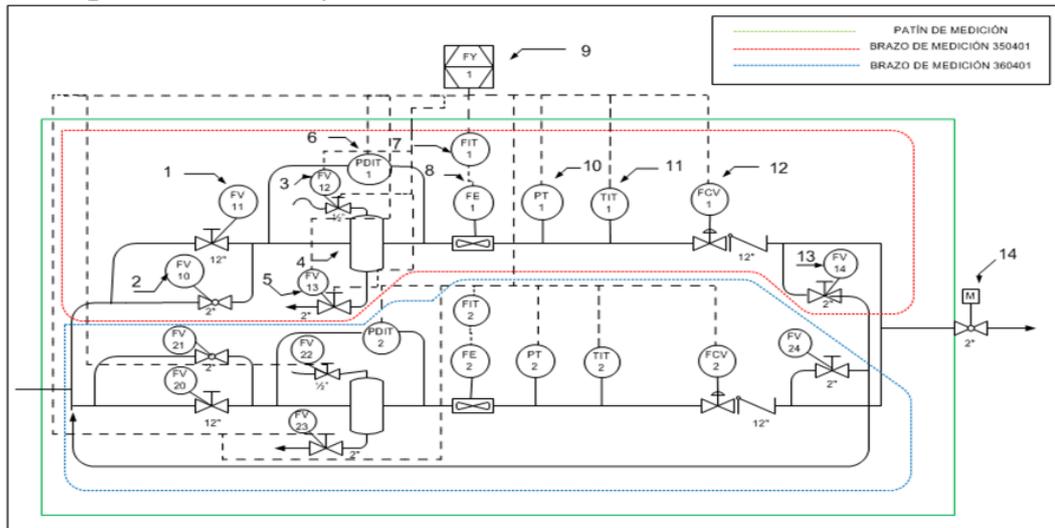
Fuente: Propia, Octubre de 2012

En la Figura 2.6, se observa la composición de los distintos elementos e instrumentos correspondientes al proceso de medición dinámica de hidrocarburos, basado en la norma API [7], además del software Intouch HIM que se utilizará posteriormente para crear la interfaz hombre maquina. Estos instrumentos se utilizarán conjuntamente para obtener una lectura ideal del flujo del crudo en la tubería industrial y ver su dinámica mediante una interfaz gráfica.

- **Nivel 1: Medición y manipulación del proceso de producción**

En el nivel inferior (NIVEL 1), se encuentran distribuidos los diversos equipos y dispositivos que hacen parte del proceso de producción en el complejo industrial; estos fueron establecidos bajo la concepción y establecimiento de la norma API. Estos equipos se encuentran a nivel de planta y corresponden a sensores, actuadores propios del proceso. El sistema de medición dinámica del crudo en custodia, está conformado por los equipos e instrumentos mostrados en el P&ID de la Figura 2.7. Cabe resaltar que el patín de medición, está conformado por dos brazos de medición idénticos, con los mismos equipos e instrumentos, esto con el fin de poder medir grandes cantidades de flujo. Esta composición es óptima, al momento de ocurrir una falla en cualquiera de los dos brazos de medición, ya que a través del relevo se evita la interrupción de la medición. La Tabla 2.2, especifica los instrumentos pertenecientes al brazo de medición 350401

Figura 2 P&ID del proceso de medición dinámica de hidrocarburos



Fuente: Norma API, Capítulo 5 [7]

Tabla 2.2. Instrumentos pertenecientes al brazo de medición 350401 [7].

#	TAG	INSTRUMENTO	OPERACIÓN
1	FV 11	Válvula de entrada	Permite la entrada del flujo de entrada (Crudo).
2	FV 10	Válvula globo	Se encuentra normalmente cerrada, manteniendo constante el flujo de entrada, abriéndose cuando la presión en la tubería es mayor a 10 PSI.
3	FV 12	Válvula del desairador	Permite la salida de gases dentro del filtro. Siempre se encuentra abierta.
4		Filtro	En este instrumento se establece la eliminación de impurezas que trae el crudo (sales, arena, partículas sólidas). Tiene el objetivo de capturar partículas en suspensión en el fluido que pudieran ocasionar daños al medidor de flujo.
5	FV 13	Válvula de eliminación de partículas	Permite la decantación de las partículas que han sido filtradas. Este proceso se ejecuta por efecto y acción de la gravedad.
6	PDIT 1	Transmisor indicador de presión diferencial	Permite evaluar el estado del filtro, cuanto más lleno de partículas se encuentre el filtro, mayor presión diferencial existirá, entonces, por medio del indicador se podrá determinar la limpieza del filtro.
7	FIT 1	Transmisor indicador de flujo	Muestra el flujo que circula por la tubería de producción en un instante de tiempo.
8	FE 1	Medidor de flujo	Mide el flujo que circula por la tubería aguas abajo del filtro

9	FY 1	Computador de flujo	La medición del medidor de flujo es una medida bruta del volumen que atraviesa el sistema de medición; el computador de flujo recoge las mediciones de temperatura, presión y el volumen bruto, para determinar el volumen estándar.
10	PT 1	Transmisor de presión	Envía una señal correspondiente a la presión que existe en la tubería de producción hacia el computador del flujo.
11	PI 1	Indicador de presión	Manómetro, muestra la presión que existe en la tubería de producción en un instante de tiempo.
12	FCV 1	Válvula de control	Se comporta como una placa de orificio cuya sección de paso varía continuamente con la finalidad de controlar un caudal en una forma determinada.
		Válvula Check	Permite el paso de flujo en una sola dirección, es una válvula anti retorno.
13	FV 14	Válvula de alivio	Está diseñada para liberar fluido hacia una tubería de escape cuando existe una sobrepresión en la tubería. Esta sobrepresión puede ser ocasionada por la presión de la electrobomba o por la temperatura en el fluido.

El flujo de crudo pasa por la válvula manual de entrada, junto a ésta se encuentra una válvula de globo normalmente cerrada, la cual, regula el caudal de entrada, si la presión en la tubería es mayor a 10 PSI, la válvula globo inmediatamente se abre por efecto de la presión que ocasiona el fluido sobre la tubería, permitiendo así, devolver a la parte inicial del proceso el crudo y manteniendo un caudal constante.

Luego se encuentra el filtro que se compone de dos válvulas (siempre abiertas), una superior, que permite la eliminación de gases dentro del filtro, evitando una posible explosión, la otra válvula se encuentra en la parte inferior del filtro y permite la salida de impureza extraídas del crudo mediante la acción de la gravedad. Es de vital importancia que el crudo llegue hacia el sensor de flujo lo más limpio posible, ya que éste se compone de unas aspas giratorias que son frágiles ante partículas sólidas. Este sensor transmite e indica por medio de una señal eléctrica la cantidad de flujo que atraviesa la tubería de producción, estos datos van hacia el computador de flujo, donde también llegan las señales enviadas por los sensores posteriores de presión y temperatura. En la parte final del proceso, se encuentra la válvula check anti retorno, la cual, no permite la devolución del flujo que ha pasado por ésta.

Cabe aclarar, que la instrumentación en cada brazo de medición es la misma.

- **Nivel 2: Control y supervisión**

En el nivel 2, se ejecuta el control y la supervisión del proceso de medición dinámica de hidrocarburos. En este nivel, se obtiene un registro de la dinámica y funcionamiento del proceso; este registro llega al computador de flujo, donde se controlan las variables medidas, tales como, temperatura y presión.

El computador de flujo es uno de los equipos que se utiliza para certificar los volúmenes de producto que se recibe o se entrega en custodia, ya sea para ser procesado y/o transportado; básicamente, puede operar como un controlador lógico programable ya que posee un SLOT y este a su vez cuenta con canales discretos tanto de salida como de entrada (Ver anexo A), con el fin de cumplir con la tarea específica de realizar la medición dinámica de hidrocarburos, obteniendo de planta las variables continuas (Temperatura, presión, caudal), y tomando acciones correctivas mediante el manejo de electroválvulas instaladas en planta permitiendo el cambio de estado abierto-cerrado y viceversa, según sea el caso.

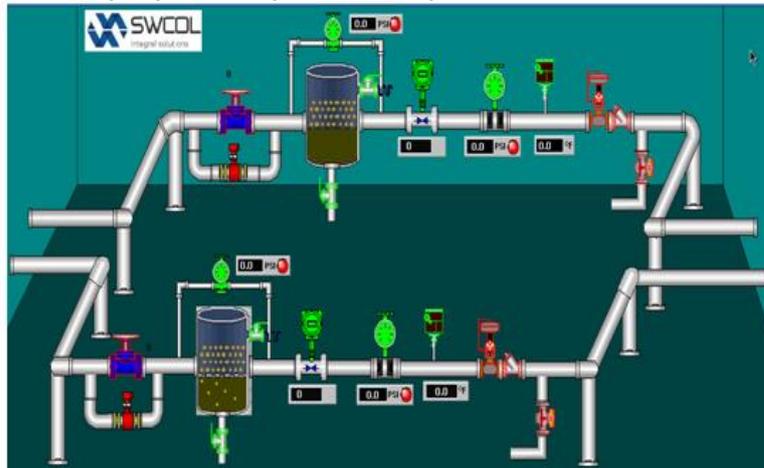
La empresa SWCOL Ltda., recomienda el computador de flujo OMNI 3000; éste es programado, para poder tener una configuración de uno o varios patines de medición y dependiendo de su programación puede medir diferentes productos como: crudos, refinados, gas natural, GLP, entre otros.

El control supervisorio del proceso, se realizaría mediante la utilización de sistemas a eventos discretos; esto será explicado detalladamente el trascurso de este capítulo.

Se propone que la supervisión y control del proceso se realice y ejecute mediante el software HMI de Intouch, que permite realizar de forma gráfica la composición física del proceso en planta, permitiendo así examinar y ver en tiempo real la dinámica del proceso, obteniendo los valores de las distintas variables medidas que afectan directamente la medición del flujo del hidrocarburo dentro de la tubería de producción (Temperatura, presión).

En la Figura 2.8, se muestra la imagen de la interfaz hombre máquina propuesta para la medición dinámica de hidrocarburos en el software de Intouch. La parte correspondiente al HMI, será detallada posteriormente en el capítulo 3.

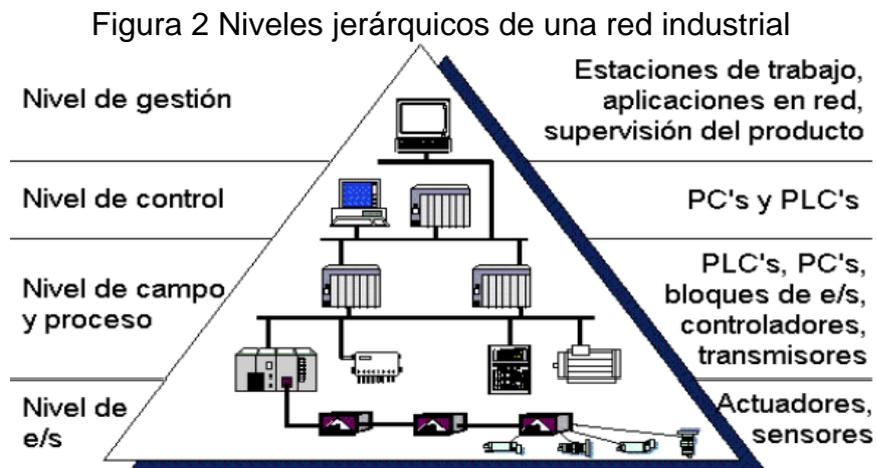
Figura 2 Interfaz propuesta que será implementada en el HMI de Intouch.



Fuente: Propia, Octubre de 2012

2.4.2.2. Sistemas de comunicación.

Los sistemas de comunicación que se propone para SWCOL Ltda., para dar solución a la medición dinámica de hidrocarburos, se basan específicamente en los niveles jerárquicos de una red industrial, tal como se muestra en la Figura 2.9.



Fuente: Modelo teórico CIM [34]

- **Nivel E/S:** Para este nivel, donde se encuentran los instrumentos tales como sensores y actuadores, se recomienda utilizar el protocolo de comunicación HART (Transductor Remoto Direccional en Red) de tipo maestro/esclavo digital simultánea con la señal analógica de 4-20 ma, ya que es una de las tecnologías más comunes y utilizadas actualmente y mejor posicionadas debido a su eficiencia de operación, bajo costo, fácil implementación e instalación (cable único) y la existencia de una gran variedad de instrumentos que operan bajo esta comunicación ofrecidos por diversos fabricantes [31].

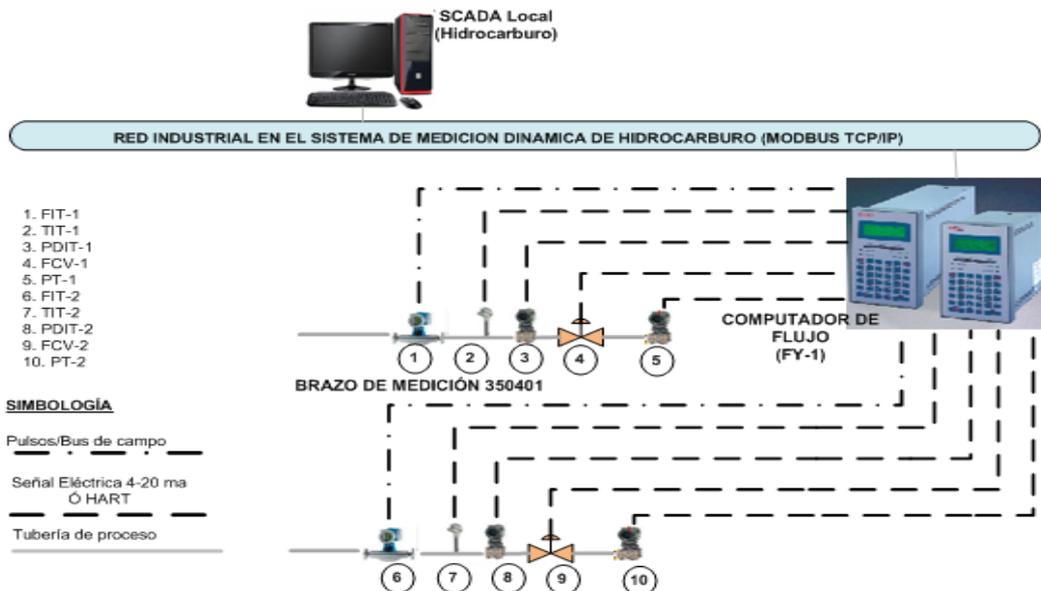
- **Nivel de campo y proceso:** Integración de pequeños automatismos dentro de sub-redes. En este nivel se emplean los buses de campo.
- **Nivel de control:** Es el encargado de administrar los procesos productivos con base en las políticas del nivel de gestión. Se suele emplear una red de tipo LAN.
- **Nivel de gestión:** Es el encargado de la administración operativa de la empresa. LAN o WAN Sistema Ethernet con protocolo TCP/IP [34].

Actualmente, los sistemas de comunicaciones para el soporte de la interoperabilidad de los equipos e instrumentos ubicados en planta, corresponden a protocolos de buses de campo con un amplio soporte y nivel de desarrollo en ambientes colaborativos de control distribuido, soportando las funciones de operación, control, y mantenimiento.

En la Figura 2.10, se muestra el tipo de comunicación que tienen los distintos instrumentos ubicados en planta con el computador de flujo y el tipo de comunicación entre éste y el computador local, donde se ejecutaría la aplicación HMI.

Esta arquitectura de comunicación, se encuentra diseñada básicamente bajo la configuración Master/Slave (Maestro/Esclavo), ya que existe sólo un dispositivo maestro (computador de flujo) y múltiples esclavos operando en planta. Cabe notar que los esclavos (sensores y actuadores) sólo pueden intercambiar datos con el maestro.

Figura 2 Arquitectura de comunicaciones para el sistema de medición dinámica de hidrocarburos en la empresa SWCOL Ltda.



Fuente: Propia, Noviembre de 2012

Una vez definida la arquitectura de los niveles más bajos pertenecientes a la pirámide de la automatización, se debe analizar aquellos niveles superiores encargados de la gestión de producción.

A continuación se establecerá una propuesta de implementación de MES Y ERP para que esta compañía cuente con estos sistemas, y así obtener flujo de información adecuado desde el nivel donde se ejecuta la producción hasta el nivel donde se realiza la planificación, a fin de posicionarse como una compañía competitiva y organizada cumpliendo con las exigencias del cliente en el tiempo estipulado.

- **Nivel 3: MES**

En el nivel MES se deben llevar a cabo las operaciones de programación, supervisión y coordinación de los procedimientos, órdenes de trabajo, planes de producción que deben realizarse en la cadena de valor de la empresa integradora SWCOL Ltda.

Dado que los equipos que pueden pertenecer a este nivel, son computadores que ejecutan procesos de negociación, con el objetivo de conformar un sistema articulado e integrado, deberían de responder a las dinámicas presentes en el comportamiento de las unidades de producción, permitiendo así establecerse un comportamiento similar entre dichos computadores que conforman el nivel MES. Para que esta comunicación se realice de la mejor forma posible, se podría implementar el uso de protocolos de comunicación abiertos basados en servicios TCP/IP, soportados sobre una red Ethernet.

- **Nivel 4: ERP**

En el nivel ERP se deben encontrar los computadores, capaces de soportar las aplicaciones de los sistemas de negocio de la empresa SWCOL Ltda. De igual forma que el nivel anterior, la propuesta de integración se basa en que los equipos pertenecientes a este nivel deben ejecutar procesos de negociación capaces de conformar un sistema articulado e integrado. A fin de satisfacer las respuestas a los requerimientos de los clientes y a las condiciones impuestas del entorno de negocio, las cuales, en este nivel, no tienen compromisos de respuesta en el tiempo.

En el mercado mundial existen diferentes empresas proveedoras de soluciones ERP, algunas son:

- Oracle
- SAP
- SSA
- IBM
- PeopleSoft

La elección sobre alguna de estas, depende de los presupuestos económicos con que se cuente, ya que resultan ser costosas, y del desempeño que la empresa espere al momento de realizar una elección sobre alguna de estas.

Proponer el Modelo Referencial de Automatización Industrial para la arquitectura de la empresa SWCOL Ltda., sirvió de gran ayuda, ya que mediante este se pudo establecer las distintas arquitecturas de cómo la empresa debería estar conformada, para tener un alto grado de automatización y por consiguiente cumplir eficazmente con los objetivos propuestos para posicionarla como una compañía altamente competitiva.

Mediante el modelo MRAI, se pudo desglosar la empresa desde su nivel de producción más bajo, hasta llega a proponer una solución de sistema ERP y MES con la cual no cuenta, a fin de integrar y articular la empresa desde los niveles inferiores hasta los más altos encargados de la gestión, frente a algún problema teniendo una vista en tiempo real de toda la compañía.

El enfoque establecido bajo la arquitectura mediante el modelo MRAI, se propuso para modelar la empresa de una manera vertical, asociando los distintos niveles que la conforman, mediante la abstracción de los procesos de más bajo nivel que conforman la solución completa de cada unidad de producción y su respectiva interacción para obtener la solución en los problemas existentes de coordinación en los niveles superiores.

2.5. Diseño del supervisor para la empresa SWCOL Ltda.

Luego de haber detallado los pasos y formalismos necesarios para calcular el supervisor en el capítulo1, resulta pertinente, desarrollar y calcular el supervisor del caso de estudio, que ponga en práctica la teoría de control supervisorio.

El caso de estudio, se basa en el control supervisorio de un sistema de medición dinámica de hidrocarburos, el cual, se amplía a dos brazos de medición (patín de medición).

2.5.1. Dinámica del proceso.

Como lo muestra Figura 1.1, el sistema de medición dinámica posee una serie de elementos tanto mecánicos como electrónicos, La dinámica del proceso se explica de la siguiente manera:

1. Si la presión en el filtro es mayor o igual a 10 PSI la válvula globo debe abrirse para mantener constante el flujo que entra en la tubería.

2. Dentro del proceso de medición, se cuenta con la presencia de un filtro que captura las partículas en suspensión del crudo que pudieran ocasionar daños en el medidor de desplazamiento positivo o dar una medición errónea. Es importante recalcar que el filtro no puede llenarse, esto quiere decir, que la presión no puede ser mayor o igual a 20 PSI, si esto sucede, el proceso de medición no puede seguir su curso. Para ello, se debe garantizar que la válvula del desairador y la válvula de eliminación de partículas estén abiertas mientras la válvula manual de entrada está abierta y/o hay crudo circulando por el filtro.
3. El transmisor de presión diferencial del filtro indica el estado y la limpieza de este, por tal razón, dicho sensor no puede estar apagado si hay crudo circulando por el filtro.
4. En el proceso de medición dinámica, se debe garantizar que el medidor de desplazamiento positivo, el sensor de presión del sistema y el sensor de temperatura estén siempre funcionando si hay crudo circulando por la tubería.
5. Para garantizar que el crudo no se devuelve dentro de la tubería y corra hacia la dirección correcta, la válvula check debe permanecer cerrada, mientras la válvula de entrada está abierta y el crudo está en circulación.
6. La válvula de alivio o de seguridad está diseñada para liberar el fluido hacia una tubería de escape cuando la presión en la tubería es mayor o igual a 10 PSI. Se debe tener en cuenta que esta sobrepresión puede ser ocasionada por la temperatura en el fluido.

2.5.2. Representación en Redes de Petri

Los lugares corresponden a las variables de estado del sistema y las transiciones a sus transformaciones.

- Para dar inicio al proceso de medición dinámica, la válvula de entrada se debe abrir y así por medio de este evento permitir que el crudo ingrese en la tubería, una vez finalizado el proceso de medición el estado de la válvula de entrada debe *estar cerrada*, los estados y eventos asociados a la válvula de entrada se muestran en la tabla 2.3.
- Una vez definidos los estados y eventos de la válvula de entrada es conveniente especificar los de la válvula de globo, ya que con ella se mantiene el flujo constante en la tubería, para ello si la presión en la tubería es mayor o igual a 10 PSI la válvula globo cambiará su estado de *válvula cerrada a válvula abierta*. Los estados y eventos de dicha válvula se describen en la tabla 2.4.
- Siguiendo con el filtro, si la presión dentro de este es menor a 10 PSI, el estado de este instrumento indicará que el *crudo circula normalmente por el filtro*. Si la presión es mayor o igual a 10 PSI el filtro cambiará su estado a *filtro llenándose*. Ahora si la presión es mayor o igual a 20 PSI el estado de este instrumento será *filtro lleno*. Los estados y eventos se pueden encontrar en la tabla 2.5.

- La válvula de eliminación de partículas y la válvula del desairador juegan un papel importante dentro del proceso de medición dinámica, debido a que si se encuentran en el estado de *válvula abierta* se puede evacuar la fase gaseosa y las partículas del crudo. Una vez finalizado el proceso de medición el estado de estas dos válvulas se podrá cambiar de *válvula abierta a válvula cerrada*, los estados y eventos asociados se muestran en la tabla 2.6 y 2.7 respectivamente.
- En el proceso de medición dinámica, se debe garantizar que el medidor de desplazamiento positivo, el sensor de presión del sistema, el sensor de temperatura y el sensor de presión en el filtro estén siempre funcionando si hay crudo circulando por la tubería, por lo tanto los estados de estos medidores deben indicar que los *medidores están operando normalmente*. Si ocurriera un evento de falla los medidores entrarían en el estado de *sistema corrigiendo falla*, una vez la falla corregida el estado de estos medidores cambiaría a *medidor apagado*. Los estados y eventos asociados se muestran en las tablas 2.8, 2.9, 2.10 y 2.14 respectivamente.
- En la tubería del proceso de medición dinámica, para que el flujo no se devuelva, la válvula check debe permanecer en el estado de *válvula cerrada*, la válvula check podrá cambiar su estado a *válvula abierta* si no hay crudo circulando por la tubería. Los estados y eventos asociados se muestran en la tabla 2.12. También se puede encontrar los estados y eventos de la válvula de alivio que libera el fluido hacia una tubería si el estado de esta es *válvula abierta* (Ver tabla 2.13).

El problema puede ser analizado a partir de estados y eventos del proceso, tal y como se aprecia en las siguientes tablas:

Tabla 2.3. Estados y eventos asociados a la válvula de entrada

Válvula manual			
Estados (Lugares)		Eventos (Transiciones)	
P1	Válvula cerrada	T1	Abrir válvula
P2	Válvula abierta	T2	Cerrar válvula

Fuente: Propia, Septiembre del 2012

Tabla 2.4. Estados y eventos asociados a la válvula globo

Válvula globo			
Estados (Lugares)		Eventos (Transiciones)	
P3	Válvula cerrada	T3	$P \geq 10$ PSI
P4	Válvula abierta	T4	$P < 10$ PSI

Fuente: Propia, Septiembre del 2012

Tabla 2.5. Estados y eventos asociados al filtro

Filtro			
Estados (Lugares)		Eventos (Transiciones)	
P5	Crudo circulando normalmente por el filtro	T5	$P \geq 10$ PSI
P6	Filtro llenándose	T6	$P < 10$ PSI

P7	Filtro lleno	T7	P≥20 PSI
		T8	P<20 PSI

Fuente: Propia, Septiembre del 2012

Tabla 2.6. Estados y eventos asociados a la válvula de eliminación de partículas

Válvula de eliminación de partículas			
Estados (Lugares)		Eventos (Transiciones)	
P8	Válvula cerrada	T9	Abrir válvula
P9	Válvula abierta	T10	Cerrar válvula

Fuente: Propia, Septiembre del 2012

Tabla 2.7. Estados y eventos asociados a la válvula del desairador

Válvula del desairador			
Estados (Lugares)		Eventos (Transiciones)	
P10	Válvula cerrada	T11	Abrir válvula
P11	Válvula abierta	T12	Cerrar válvula

Fuente: Propia, Septiembre del 2012

Tabla 2.8. Estados y eventos asociados al medidor de flujo

Medidor de flujo			
Estados (Lugares)		Eventos (Transiciones)	
P12	Medidor apagado	T13	Apagar medidor
P13	Medidor operando normalmente	T14	Encender medidor
P14	Sistema corrigiendo falla	T15	Falla
		T16	Falla corregida

Fuente: Propia, Septiembre del 2012

Tabla 2.9. Estados y eventos asociados al sensor de presión

Sensor de presión			
Estados (Lugares)		Eventos (Transiciones)	
P15	Medidor apagado	T17	Apagar medidor
P16	Medidor operando normalmente	T18	Encender medidor
P17	Sistema corrigiendo falla	T19	Falla
		T20	Falla corregida

Fuente: Propia, Septiembre del 2012

Tabla 2.10. Estados y eventos asociados al sensor de temperatura

Sensor de temperatura			
Estados (Lugares)		Eventos (Transiciones)	
P18	Medidor apagado	T21	Apagar medidor
P19	Medidor operando normalmente	T22	Encender medidor
P20	Sistema corrigiendo falla	T23	Falla
		T24	Falla corregida

Fuente: Propia, Septiembre del 2012

Tabla 2.11. Estados y eventos asociados a la válvula de control

Válvula de control			
Estados (Lugares)		Eventos (Transiciones)	
P21	Válvula cerrada	T24	Abrir válvula
P22	Válvula abierta	T26	Cerrar válvula

Fuente: Propia, Septiembre del 2012

Tabla 2.12. Estados y eventos asociados a la válvula de check

Válvula check			
Estados (Lugares)		Eventos (Transiciones)	
P23	Válvula cerrada	T27	Abrir válvula
P24	Válvula abierta	T28	Cerrar válvula

Fuente: Propia, Septiembre del 2012

Tabla 2.13. Estados y eventos asociados a la válvula de alivio

Válvula de alivio			
Estados (Lugares)		Eventos (Transiciones)	
P25	Válvula cerrada	T29	Abrir válvula
P26	Válvula abierta	T30	Cerrar válvula

Fuente: Propia, Septiembre del 2012

Tabla 2.14. Estados y eventos asociados al sensor de presión del filtro

Sensor de presión del filtro			
Estados (Lugares)		Eventos (Transiciones)	
P27	Medidor apagado	T31	Apagar medidor
P28	Medidor operando normalmente	T32	Encender medidor
P29	Sistema corrigiendo falla	T33	Falla
		T34	Falla corregida

Fuente: Propia, Septiembre del 2012

Asumiendo que la conducta de un sistema puede ser descrito en términos del estado y sus cambios, la dinámica sobre una estructura de red es creada al definir su estado inicial y las reglas de evolución del estado. El marcado inicial de una RDP es un vector que representa las condiciones iniciales del sistema, es decir, el punto de partida del proceso de medición dinámica. Las marcas residen en los lugares y controlan la ejecución de las transiciones de la red, determinando el estado de la RDP, dichas marcas pueden ser representados gráficamente como pequeños puntos negros y pueden encontrarse cero o más en un mismo lugar, debido a la flexibilidad ilimitada en el número (entero positivo) de marcas en el lugar correspondiente.

Inicialmente en el proceso de medición dinámica de hidrocarburos la válvula de entrada está cerrada y por tanto no hay ingreso de crudo en la tubería, la válvula globo permanece cerrada ya que la presión es menor a 10 PSI debido a que no hay crudo circulando. Al estar la válvula manual de entrada cerrada el filtro opera normalmente, lo que significa que el filtro no está llenándose ni está lleno.

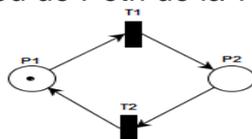
Las válvulas de eliminación de partículas y la del desairador inician su estado en válvulas abiertas, esperando la apertura de la válvula de entrada que permita el ingreso del crudo, y así por medio de este estado poder eliminar las partículas capturadas por el filtro y evacuar la fase gaseosa manteniendo el crudo circulando normalmente. Los estados iniciales del medidor de flujo, sensor de presión, sensor de temperatura y sensor de presión del filtro se encuentran marcados en los lugares que tienen asociado el estado medidor operando normalmente, esperando que el crudo circule por la tubería para poder ser sensado y medido. Por otro parte la válvula controladora de flujo inicia su estado en el lugar válvula cerrada, esperando el paso del crudo para variarlo continuamente con la finalidad de controlar el caudal. Para asegurar el no retorno del crudo en la tubería, la válvula check no debe estar abierta, ya que si ingresa el crudo, este circulará en dirección contraria, por tanto su estado inicial debe marcarse en válvula cerrada. Finalmente la válvula de alivio debe liberar el fluido hacia una tubería de escape cuando existe una sobrepresión, dicha válvula permanece cerrada ya que la presión es menor a 10 PSI debido a que no hay crudo corriendo y la válvula de entrada inicialmente está cerrada.

Una vez identificados los estados, eventos y el marcado inicial del proceso de medición, se procede al modelado en Redes de Petri de la planta cuyo objetivo será impedir el llenado del filtro. Para la adición de las RDP se implementó la herramienta PIPE V4.

- Red de Petri de la válvula manual

Una red de Petri está formada por lugares, transiciones, arcos dirigidos y marcas que ocupan posiciones dentro de los lugares. Una transición tiene un determinado número de lugares de entrada y de lugares de salida. Inicialmente a la RDP de la válvula de entrada, al lugar P_1 se le asocia el estado *válvula cerrada*, para que este lugar pueda marcarse previamente se debe sensibilizar la transición T_2 que asocia el evento *cerrar válvula*. Para el ingreso del crudo por la tubería se le debe asignar al lugar P_2 el estado *válvula abierta* que se marca si se produce el disparo de una transición T_1 que asocia el evento *abrir válvula*.

Figura 22. Red de Petri de la válvula manual

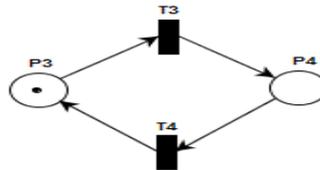


Fuente: Propia, Septiembre del 2012

- Red de Petri de la válvula globo

En la válvula globo se necesita un lugar P_4 que tenga asociado el estado *válvula abierta* para mantener constante el caudal que entra en la tubería. Este lugar previamente debe tener una transición T_{11} que tenga asociado el evento *presión mayor o igual a 10 PSI*. Cuando la presión es menor a 10 PSI esta válvula debe cambiar su estado a *válvula cerrada* y se le asigna el lugar P_3 .

Figura 23. Red de Petri de la válvula globo

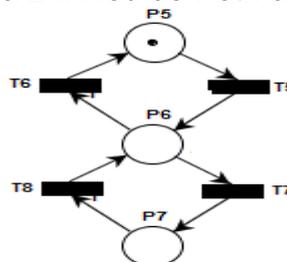


Fuente: Propia, Septiembre del 2012

- **Red de Petri del filtro**

Inicialmente el filtro está funcionando normalmente que corresponde a que el lugar P_5 tiene asociado el estado *crudo circulando por el filtro*. Si la transición T_5 que tiene asociado el evento *presión mayor o igual a 10 PSI* se dispara, se produce el marcado del lugar P_6 que asocia el estado *filtro llenándose*. Ahora si ocurre el evento asociado a la transición T_7 se dice que la transición está validada, cuando esta transición se sensibiliza se valida y se produce el disparo que implica un cambio en el marcado del lugar P_6 al lugar P_7 que tiene asociado el estado *filtro lleno*.

Figura 24. Red de Petri del filtro

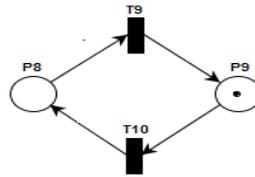


Fuente: Propia, Septiembre del 2012

- **Red de Petri de la válvula de eliminación de partículas**

Si la transición T_9 cuyo evento asociado corresponde a *abrir válvula* está sensibilizada, esta se valida y se produce el disparo de dicha transición que implica que la RDP cambie el estado del lugar P_8 de *válvula cerrada* al estado del lugar P_9 de *válvula abierta*. Por medio del cambio del marcado de los lugares de la Red de Petri se puede evacuar las partículas que se encuentran en el filtro.

Figura 25. Red de petri de la válvula de eliminación de partículas

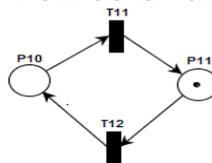


Fuente: Propia, Septiembre del 2012

- **Red de Petri de la válvula del desairador**

Igualmente que en la válvula de eliminación de partículas si en la válvula del desairador la transición T_{11} cuyo evento asociado corresponde a *abrir válvula* está sensibilizada, esta se valida y se produce el disparo de dicha transición que implica que la RDP cambie el estado del lugar P_{10} de *válvula cerrada* al estado del lugar P_{11} de *válvula abierta*. Por medio del cambio del marcado de los lugares de la Red de Petri se puede evacuar la fase gaseosa que se encuentra en el filtro.

Figura 26. Red de Petri de la válvula del desairador

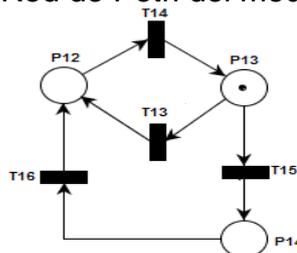


Fuente: Propia, Septiembre del 2012

- **Red de Petri del medidor de flujo**

Los eventos son las acciones que se dan en el sistema y nos llevan a un estado. El medidor de flujo y los medidores de presión y temperatura se encuentran en el estado de *medidor operando normalmente* que corresponden a los lugares P_{13} , P_{16} , P_{19} respectivamente. Si la transición T_{13} , T_{15} , T_{19} que tiene asociado el evento *falla* se dispara, se produce el marcado del lugar P_{14} , P_{17} , P_{20} respectivamente que asocia el estado *sistema corrigiendo falla*. Ahora si ocurre el evento asociado a las transiciones T_{16} , T_{20} y T_{24} se dice que las transiciones están validadas, cuando estas transiciones se sensibilizan se validan y se produce el disparo que implica un cambio en el marcado del lugar P_{12} , P_{15} , P_{18} respectivamente que tiene asociado el estado *medidor apagado*.

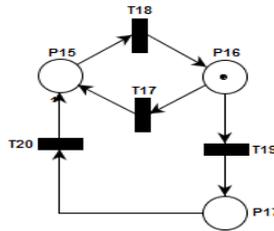
Figura 27. Red de Petri del medidor de flujo



Fuente: Propia, Septiembre del 2012

- **Red de Petri del medidor de presión**

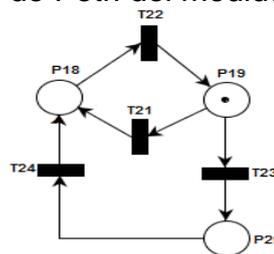
Figura 28. Red de Petri del medidor de presión



Fuente: Propia, Septiembre del 2012

- **Red de Petri del medidor de temperatura**

Figura 298. Red de Petri del medidor de temperatura

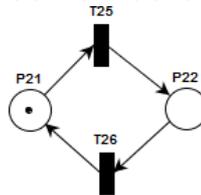


Fuente: Propia, Septiembre del 2012

- **Red de Petri de la válvula de control**

Inicialmente a la RDP de la válvula de control al lugar P_{21} se le asocia el estado de *válvula cerrada*, para que este lugar pueda marcarse, previamente se debe sensibilizar la transición T_{26} que asocia el evento *cerrar válvula*. Para que el lugar P_{22} pueda marcarse y presentarse el evento *válvula abierta*, la transición T_{24} que tiene asociado el evento *abrir válvula* debe sensibilizarse.

Figura 210.. Red de Petri de la válvula de control



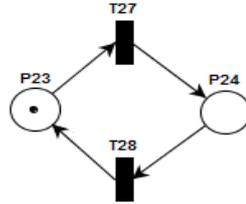
Fuente: Propia, Septiembre del 2012

- **Red de Petri de la válvula check**

Una forma de impedir que el flujo dentro de la tubería no se devuelva se requiere que el lugar P_{23} tenga asociado el estado *válvula cerrada*. Para que P_{23} pueda estar activo este lugar previamente debe tener una transición T_{28} que tenga asociado el evento *cerrar válvula*. Si no hay crudo circulando por la tubería el estado *válvula cerrada* puede cambiar su estado a *válvula abierta*, pero antes de esto, la transición T_{27} que tiene

asociado el evento *abrir válvula* debe estar sensibilizada para que se produzca el cambio del marcaje en la RDP.

Figura 211. Red de Petri de la válvula check

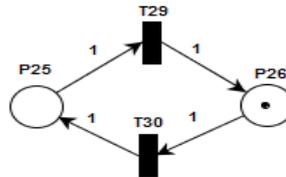


Fuente: Propia, Septiembre del 2012

- **Red de Petri de la válvula de alivio**

La transición T_{29} tiene asociado el evento *abrir válvula*, dicha transición tiene un lugares de entrada y un lugar de salida. Si la transición T_{29} se dispara, el evento *válvula abierta* (lugar P_{26}) se marcará y la transición T_{30} se podrá sensibilizar para poder permitir el marcado del lugar P_{25} el cual tiene asociado el estado *válvula cerrada*.

Figura 212. Red de Petri de la válvula de alivio

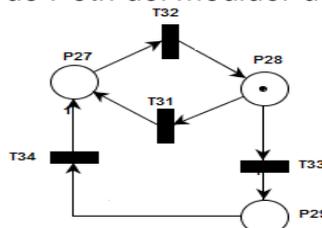


Fuente: Propia, Septiembre del 2012

- **Red de Petri del medidor de presión del filtro**

Anteriormente se especificó que los eventos son las acciones que se dan en el sistema y nos llevan a un estado. El medidor de presión del filtro se encuentra en el estado de *medidor operando normalmente* que corresponde al lugar P_{28} . Si la transición T_{33} que tiene asociado el evento *falla* se dispara, se produce el marcado del lugar P_{29} que asocia el estado *sistema corrigiendo falla*. Ahora si ocurre el evento asociado a las transiciones T_{34} se dice que la transición está validada, cuando esta transición se sensibiliza se validan y se produce el disparo que implica un cambio en el marcado del lugar P_{27} que tiene asociado el estado *medidor apagado*.

Figura 213. Red de Petri del medidor de presión del filtro

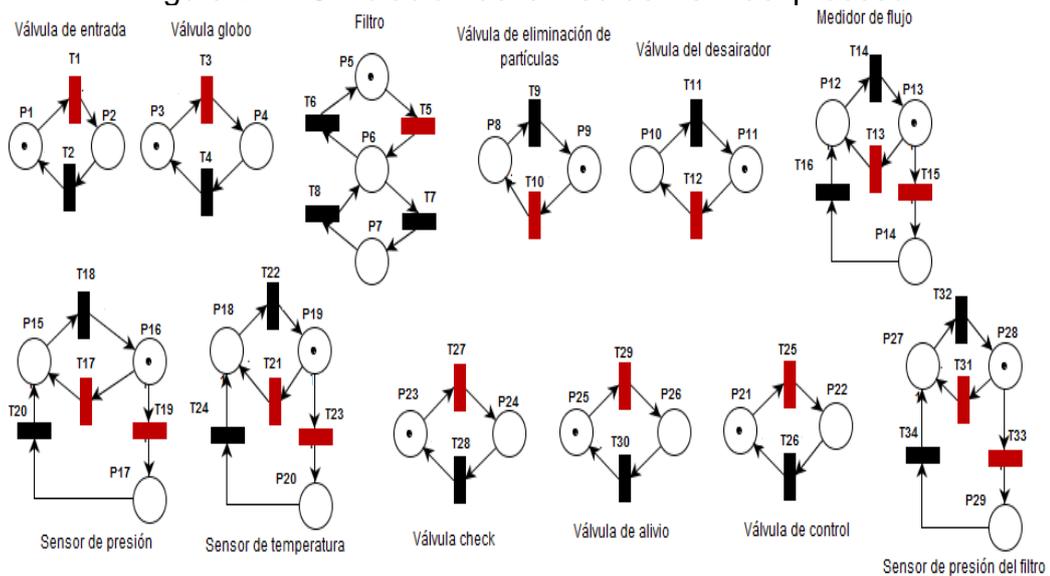


Fuente: Propia, Septiembre del 2012

Después de tener la RDP de la planta en PIPE se procede a hacer la simulación que permita ver la evolución de las marcas de la RDP del proceso, sin adicionar las restricciones que se le imponen al sistema, seleccionando las transiciones que se desean disparar y ver la evolución del marcado. En la simulación de la RDP del proceso (Ver figura 2.23) se muestra la red de la válvula de entrada, en donde el marcado inicial comienza en el lugar P_1 , T_1 está sensibilizada pues P_1 contiene una marca, debido a que esta transición está sensibilizada la RDP puede cambiar su estado de *válvula cerrada* a *válvula abierta* para poder dejar ingresar el crudo en la tubería. En la RDP de la válvula globo, T_3 está sensibilizada, si el evento asociado a esta transición se valida se dispara para permitir el cambio de estado de *válvula cerrada* a *válvula abierta* siempre y cuando haya crudo circulando por la tubería. En el filtro el marcado inicial está en el lugar P_5 , permitiendo que la transición T_5 pueda ser disparada y pueda seguir la evolución de las marcas en la red. Igualmente se puede apreciar que en la RDP de la válvula de eliminación de partículas y en la red de la válvula del desairador los lugares T_{10} y T_{12} están sensibilizados para poder producir el cambio del marcado, pero este cambio al adicionar las restricciones solo se podrá dar si no hay crudo circulando por la tubería. El medidor de flujo, el sensor de presión, el sensor de temperatura y el sensor de presión en el filtro operan de igual forma, la transición que tienen asociado el estado *medidor operando normalmente* puede sensibilizar dos transiciones al mismo tiempo, al dispararse una de ellas el estado de la red puede cambiar de *medidor operando normalmente* a *sistema corrigiendo falla* o puede cambiar de *medidor operando normalmente* a *medidor apagado*, este último estado no se daría si las restricciones se adicionan al sistema. Se puede apreciar en la simulación de la RDP del proceso que la válvula check tiene sensibilizada la transición T_{27} que tiene asociado el evento *abrir válvula*, pero esto no sería posible si las restricciones se le adicionaran al sistema, debido a que si esta transición se dispara la válvula se abre permitiendo que el crudo en la tubería se devuelva. La válvula de alivio también tiene libertad en el marcado de sus lugares, la transición T_{29} puede sensibilizarse y por lo tanto dispararse para hacer el cambio de estado de *válvula cerrada* a *válvula abierta* cuando se desee, sin tener en cuenta la dinámica del proceso. Finalmente la válvula de control de flujo no cumpliría su función de regulación del caudal ya que esta puede cambiar su estado cuando desee siempre que las transiciones asociadas se disparen.

Se puede apreciar en la simulación que todas las transiciones se pueden disparar libremente si los lugares de entrada están marcados debido a que no hay ninguna restricción que impida el marcado de estos.

Figura 214. Simulación de la Red de Petri del proceso



Fuente: Propia, febrero del 2013

2.5.3. Supervisor del proceso basado en el método de invariantes de lugar

Una vez se obtiene el modelo en Redes de Petri de la planta, se procede a analizar el sistema a partir del método de invariantes de lugar. Se emplea la herramienta PIPE V4, que además de proporcionar el cálculo de la matriz de incidencia del sistema de medición dinámica que es la representación matricial del proceso, facilita el marcado inicial del sistema requerido para el cálculo del supervisor. Dichos cálculos se pueden almacenar en un archivo con extensión *.html* como indica el anexo C.

Para la lectura de la matriz de incidencia, el marcado inicial del sistema y el cálculo del supervisor, se utilizó la herramienta Matlab; para llevar a cabo la lectura de la matriz se toma la función *lectura.m*, creada y descrita en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, con la que se obtienen las matrices de incidencia posterior, la matriz de incidencia previa y el marcado inicial, calculadas en PIPE. La función tiene por argumento el nombre del archivo *.html* que debe estar ubicado en la carpeta de Matlab, en este caso se toma el nombre de "*matriz_de_incidencia_modelo.html*".

La matriz de incidencia que describe el proceso está dada por:

	T1	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T2	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27	T28	T29	T3	T30	T31	T32	T33	T34	T4	T5	T6	T7	T8	T9				
P1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
P10	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
P11	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
P12	0	0	0	0	1	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
P13	0	0	0	0	-1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
P14	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
P15	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
P16	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
P17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
P18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
P19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
P19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
P2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
P20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
P21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
P22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
P23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
P24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
P25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
P26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
P27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	1	0	0	0	0	0	0		
P28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0		
P29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0		
P3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0			
P4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0		
P5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0		
P6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
P6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	1	0	0	0		
P7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0
P8	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
P9	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Y el marcaje inicial por:

P1	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P19	P2	P20	P21	P22	P23	P24	P25	P26	P27	P28	P29	P3	P4	P5	P6	P6	P7	P8	P9			
0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1

La herramienta PIPE, ordena el archivo de lugares y transiciones del sistema de la siguiente manera:

$$P = [P_1 P_{10} P_{11} P_{12} P_{13} P_{14} P_{15} P_{16} P_{17} P_{18} P_{19} P_2 P_{20} P_{21} P_{22} P_{23} P_{24} P_{25} P_{26} P_{27} P_{28} P_{29} P_3 P_4 P_5 P_6 P_7 P_8 P_9]$$

$$T = \begin{bmatrix} T_1 T_{10} T_{11} T_{12} T_{13} T_{14} T_{15} T_{16} T_{17} T_{18} T_{19} T_2 T_{20} T_{21} T_{22} T_{23} T_{24} T_{25} T_{26} T_{27} T_{28} T_{29} T_3 T_{30} T_{31} T_{32} T_{33} T_{34} \\ T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 \end{bmatrix}$$

2.5.3.1. Restricciones físicas del proceso

Para calcular el supervisor inicialmente se parte de las restricciones o condiciones que se le impondrán al sistema, con el objeto de despejar esos estados no deseados del proceso, como lo son marcajes inalcanzables

El objetivo del supervisor es asegurar que el filtro no se llene, ya que si esto sucede se detiene el paso del crudo en la tubería impidiendo la medición dinámica, lo cual, se convierte en las siguientes restricciones, que se encargarán de que el proceso evite alcanzar aquellos estados no deseados, a partir de las variables de referencia o slacks que se introducen.

1. No puede estar el crudo circulando por el filtro y/o el filtro llenándose y la válvula del desairador cerrada al mismo tiempo.

$$u_5 + u_6 + u_{10} \leq 1 \quad \longrightarrow \quad u_1 + u_6 + u_{10} + u_{c1} \leq 1 \quad (2.1)$$

2. No puede estar el crudo circulando por el filtro y/o el filtro llenándose y la válvula de eliminación de partículas cerrada al mismo tiempo.

$$u_5 + u_6 + u_8 \leq 1 \longrightarrow u_5 + u_6 + u_8 + u_{c2} \leq 1 \quad (2.2)$$

3. No puede estar filtro lleno y la válvula de eliminación de partículas abierta al mismo tiempo.

$$u_7 + u_9 \leq 1 \longrightarrow u_7 + u_9 + u_{c3} \leq 1 \quad (2.3)$$

4. No puede estar filtro lleno y la válvula del desairador abierta al mismo tiempo.

$$u_7 + u_{11} \leq 1 \longrightarrow u_7 + u_{11} + u_{c4} \leq 1 \quad (2.4)$$

5. No puede estar la válvula manual de entrada abierta y la válvula de eliminación de partículas cerrada al mismo tiempo.

$$u_2 + u_8 \leq 1 \longrightarrow u_2 + u_8 + u_{c5} \leq 1 \quad (2.5)$$

6. No puede estar la válvula manual de entrada abierta y la válvula del desairador cerrada al mismo tiempo.

$$u_2 + u_{10} \leq 1 \longrightarrow u_2 + u_{10} + u_{c6} \leq 1 \quad (2.6)$$

Las 6 variables slack corresponden a los seis lugares de control, en otras palabras, constituyen los estados necesarios para que el proceso inicial pueda cumplir con las restricciones.

$$u_c = [u_{c1} \quad u_{c2} \quad u_{c3} \quad u_{c4} \quad u_{c5} \quad u_{c6}]$$

A continuación se presentará la solución de la primera restricción; el supervisor completo se encuentra desarrollado en el anexo D.

Se desea que el supervisor fuerce al sistema a cumplir con la siguiente restricción:

$$u_5 + u_6 + u_{10} \leq 1 \quad (2.1)$$

Siguiendo la metodología que se introdujo en el literal 1.4.2 del capítulo 1, se tiene que:

$$b = [1]$$

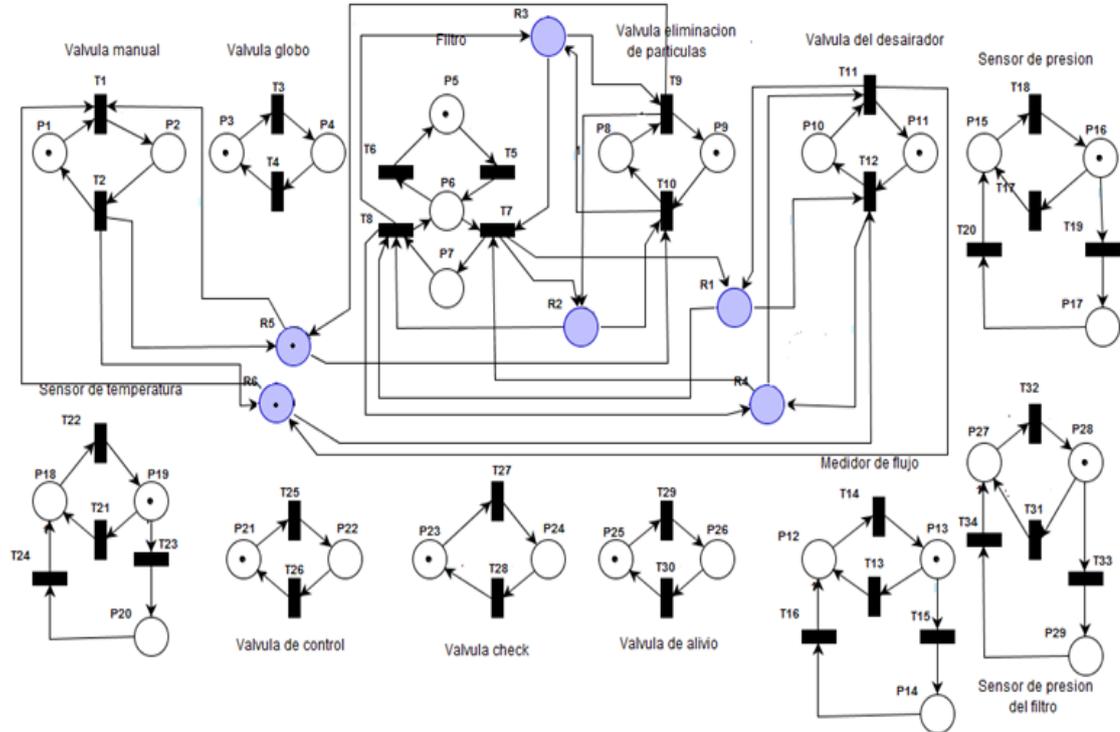
Y

$$L = [0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

Después de tener la matriz de incidencia del modelo calculada en PIPE V4, y guardarla en un archivo con extensión *.html*, llamado para este caso *matriz_de_incidencia_modelo.html* se puede calcular en Matlab las ecuaciones del controlador 1.18 y 1.24

restringido, de acuerdo a ciertas condiciones que se le imponga o se añadan al proceso.

Figura 215.Red de Petri supervisada basada en invariante de lugar.



Fuente: Propia, Septiembre del 2012

2.5.3.2. Supervisor con restricciones de disparo

Se agregó al sistema de medición dinámica, las siguientes restricciones de disparo:

1. Si la válvula de entrada está cerrada, la presión en el filtro no puede ser mayor o igual a 10 PSI ($P \geq 10$ PSI). Esta restricción es equivalente a decir que no se puede disparar la transición T_5 si el lugar P_1 tiene marcas.

$$u_1 + q_5 \leq 1 \quad (2.8)$$

Es errado afirmar que la presión en el filtro es mayor o igual a 10 PSI y la válvula de entrada está cerrada, ya que no hay crudo circulando por la tubería que produzca esa sobrepresión.

2. Si la válvula de entrada está cerrada, la presión en el filtro no puede ser menor a 10 PSI ($P \leq 10$ PSI). Esta restricción es equivalente a decir que no se puede disparar la transición T_6 si el lugar P_1 contiene marcas.

$$u_1 + q_6 \leq 1 \quad (2.9)$$

Es errado afirmar que la presión es menor a 10 PSI y la válvula de entrada está cerrada, ya que nuevamente no hay crudo circulando por la tubería que pueda determinar dicha presión.

3. Si la válvula de entrada está cerrada, la presión del filtro no puede ser o igual a 20 PSI ($P \geq 20$ PSI). Esta restricción es equivalente a decir que no se puede disparar la transición t_7 si el lugar P_1 contiene marcas.

$$u_1 + q_7 \leq 1 \quad (2.10)$$

Nuevamente si la válvula de entrada está cerrada no puede haber crudo circulando por la tubería por tanto no se produce una sobrepresión en la tubería.

4. Si la válvula de entrada está cerrada, la presión del filtro no puede ser menor a 20 PSI ($P \leq 20$ PSI). Esta restricción es equivalente a decir que no se puede disparar la transición T_8 si el lugar P_1 contiene marcas.

$$u_1 + q_8 \leq 1 \quad (2.11)$$

5. Si la válvula de entrada está abierta, no se puede abrir válvula check. Esta restricción es equivalente a decir que no se puede disparar la transición T_{27} si el lugar P_2 contiene marcas.

$$u_2 + q_{27} \leq 1 \quad (2.12)$$

Si se permite que la válvula check se abra cuando hay crudo circulando por la tubería este correrá en la dirección incorrecta.

6. Si la válvula de entrada está abierta, no se puede apagar medidor de flujo. Esta restricción es equivalente a decir que no se puede disparar la transición T_{13} si el lugar P_2 contiene marcas.

$$u_2 + q_{13} \leq 1 \quad (2.13)$$

Si hay crudo circulando por la tubería, el medidor de flujo no se puede apagar a menos que haya una falla en el medidor. Si el medidor está operando normalmente no puede tener un cambio brusco como sería apagar el medidor si hay crudo corriendo por la tubería. Pero si la válvula de entrada está cerrada significa que no hay crudo circulando por tanto el medidor puede ser apagado. Igualmente sucedería con el sensor de presión, sensor de temperatura y sensor de presión en el filtro.

7. Si la válvula de entrada está abierta, no se puede apagar sensor de presión. Esta restricción es equivalente a decir que no se puede disparar la transición T_{17} si el lugar P_2 contiene marcas.

$$u_2 + q_{17} \leq 1 \quad (2.14)$$

8. Si la válvula de entrada está abierta, no se puede apagar sensor de flujo. Esta restricción es equivalente a decir que no se puede disparar la transición T_{21} si el lugar P_2 contiene marcas.

$$u_2 + q_{21} \leq 1 \quad (2.15)$$

9. Si la válvula de entrada está abierta, no se puede apagar sensor de presión en el filtro. Esta restricción es equivalente a decir que no se puede disparar la transición T_{31} si el lugar P_2 contiene marcas.

$$u_2 + q_{31} \leq 1 \quad (2.16)$$

A continuación, se presentará la solución de la transformación de la restricción de disparo de la ecuación 2.8; el supervisor completo con restricciones de disparo está desarrollado en el anexo D.

Al agregar al caso de estudio la siguiente restricción de disparo:

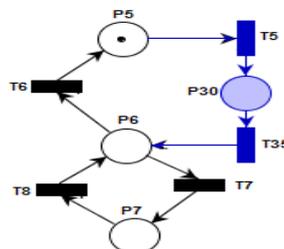
$$u_1 + q_5 \leq 1 \quad (2.8)$$

Y al aplicar la transformación descrita en la ecuación 1.25 del capítulo 1, se obtiene la siguiente restricción, la cual, sólo incluirá el vector de marcados de la RDP ampliada.

$$u_1 + u_{30} \leq 1 \quad (2.17)$$

La transición T_5 , es reemplazada por dos transiciones y un lugar entre ellas, como se muestra en la Figura 2.25; esta transformación es artificial y no afecta el modelo de la Red de Petri del sistema. Su único propósito es introducir un lugar u_{30} que almacenará el disparo de la transición T_5 ; luego de que el supervisor sea calculado por el método de invariantes de lugar, el sistema volverá a ser transformado a su estado original.

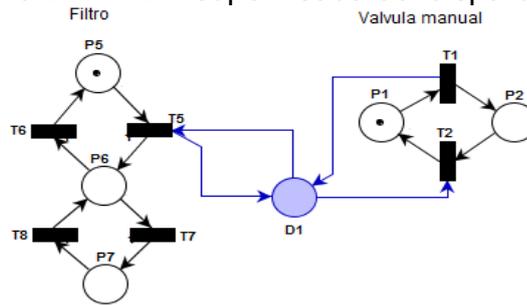
Figura 216.. Transformación de la RDP del filtro



Fuente: Propia, Septiembre del 2012

Cabe notar que esta transformación debe dibujarse en la Red de Petri original sobre la herramienta PIPE, para obtener la matriz de incidencia del sistema ampliado como se describió en el literal 1.4.2 del capítulo 1.

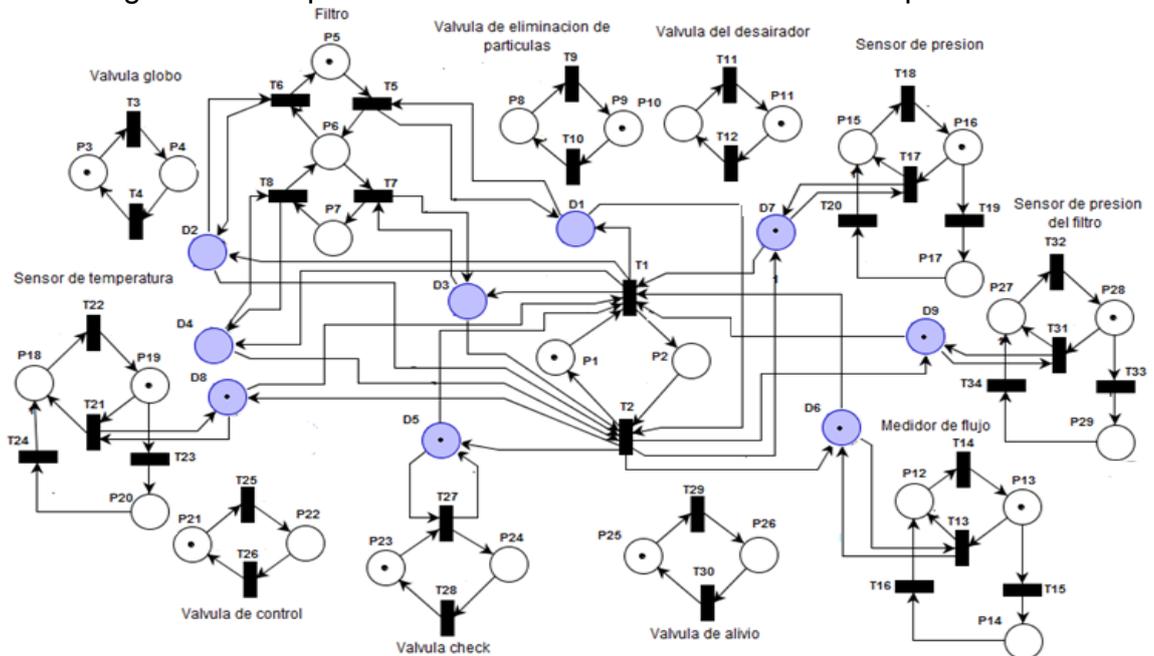
Figura 217. RDP supervisada del disparo 6.22



Fuente: Propia, Septiembre del 2012

El esquema del supervisor supervisado y contraído con todas las restricciones de disparo anteriormente definidas, se observa en la Figura 2.27.

Figura 218. Supervisor con todas las restricciones de disparo

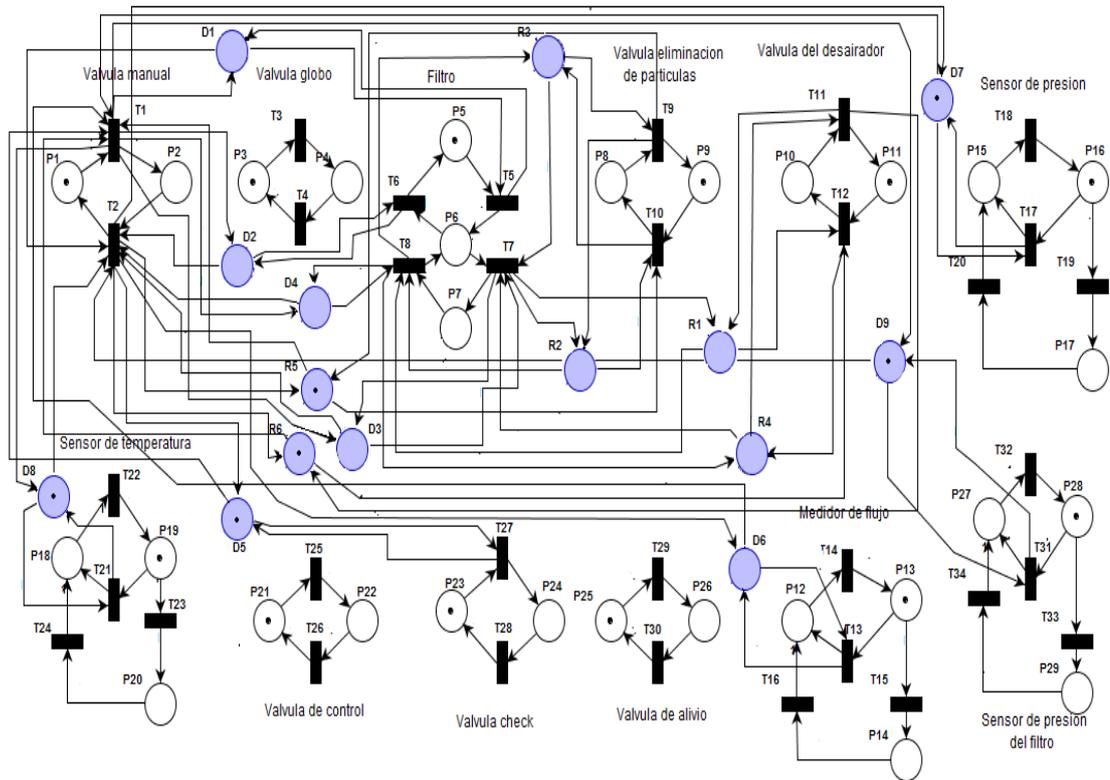


Fuente: Propia, Septiembre del 2012

En este punto cabe precisar, que en el proyecto no se obtuvieron transiciones no controlables y no observables, por tal razón, la teoría de la transformación de dichas transiciones no se desarrolla y no se aplica.

En la Figura 2.28, se muestra el supervisor completo, con las restricciones de invariante de lugar y las restricciones de disparo; para observar los cálculos y la definición de las restricciones ver anexo D.

Figura 219. Supervisor resultante completo



Fuente: Propia, Septiembre del 2012

Se puede concluir que el conjunto de eventos y acciones que se desarrollan a partir de las interacciones de las unidades operacionales de la planta, permiten modelar todo a partir de la discretización de eventos y llevarlo a las Redes de Petri, sin olvidar que la optimización del sistema exige que la síntesis del proceso y su modelamiento a eventos discretos, permita que la planta guíe el proceso a partir de condiciones que garanticen la alcanzabilidad de los estados deseados para el tráfico de la información y el producto.

Modelar el proceso de medición dinámica de hidrocarburos con Redes de Petri, permite identificar las características básicas que componen todo el proceso de medición y garantiza que el supervisor hallado no viole las restricciones impuestas, llevando los cálculos algebraicos y el modelamiento en Redes de Petri a la implementación de un sistema de supervisión del proceso que en nuestro proyecto se realiza en el software Intouch 10.1.

3. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE SUPERVISIÓN

Para la implementación del sistema de supervisión del sistema de medición dinámica se cuenta con el software Intouch 10.1, que constituye una plataforma de desarrollo que facilita el diseño de HMI en computadoras.

El software Intouch Wonderware es un software de visualización que permite crear aplicaciones de interfaz entre hombre maquina (HMI) para la automatización industrial.

Los requerimientos del sistema son los siguientes:

- Mínimo 500 Mb de disco duro
- Mínimo 64 MB de RAM
- Microsoft Windows W95/98 SE o NT.

Para que un HMI sea una herramienta de control supervisorio se requiere: Adquirir datos, visualizar y supervisar la secuencia del proceso, todo esto se realizará desde el monitor de un computador. Para el desarrollo de este proyecto se utilizó:

- Inouch 10.1. de Wonderware: Creación de la interfaz Hombre-Máquina (HMI).
- Wonderware I/O server: Comunicación entre el PLC e Intouch.
- Rslogix 500: Programación del PLC

Un manual de usuario del software intouch 10.1 se encuentra en el anexo G.

3.1. Condiciones de diseño

El HMI desarrollado consta básicamente de ocho pantallas, las mismas que aparecen de acuerdo a los requerimientos del usuario y a las condiciones en que se encuentra la planta, éstas son:

- Pantalla de acceso.
- Pantalla de menú principal.
- Pantalla inicio del Batch.
- Pantalla del Batch.
- Pantalla de históricos en tiempo real.
- Pantalla de históricos.
- Pantalla de alarmas.

- Pantalla de reportes.
A continuación, se describen cada una de las pantallas.

3.1.1. Pantalla de Acceso

Figura 31. Pantalla de acceso

Fuente: Propia, Noviembre de 2012

Esta pantalla permite al usuario identificarse. Consta de un campo *Usuario* para digitar el nombre de usuario y un campo *Contraseña* para introducir la contraseña. Dependiendo el tipo de usuario y contraseña, se tiene acceso a limitadas ventanas del HMI. Cabe notar, que si el usuario digita una clave errada, no puede ingresar a ninguna ventana del HMI.

3.1.2. Pantalla de Menú principal

Una de las formas para acceder a las diferentes pantallas de la aplicación, es a través de la ventana de menú principal como se observa en la Figura 3.3, en la que se indica las opciones existentes en el HMI y por las que el usuario puede navegar. Esta pantalla es de acceso común para todos los usuarios y siempre permanecerá visible.

Figura 3.2. Pantalla de menú principal



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

3.1.3. Pantalla Inicio del Batch

Figura 3.3. Pantalla inicio del batch

The screenshot shows a teal-colored interface for starting a batch. At the top center is the SWCOL logo with the tagline 'integrated solutions'. Below the logo, the text 'INGRESE LOS SIGUIENTES DATOS' is displayed in blue. The form contains six input fields with labels to their left: 'NUMERO DEL BATCH:' with the value '0', 'PRODUCTO:', 'DESTINO:', 'ORIGEN:', 'GRAVEDAD API:', and 'VOLUMEN PREESTABLECIDO:' with the value '30'. At the bottom center is a button with a green checkmark and the text 'OK'.

Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

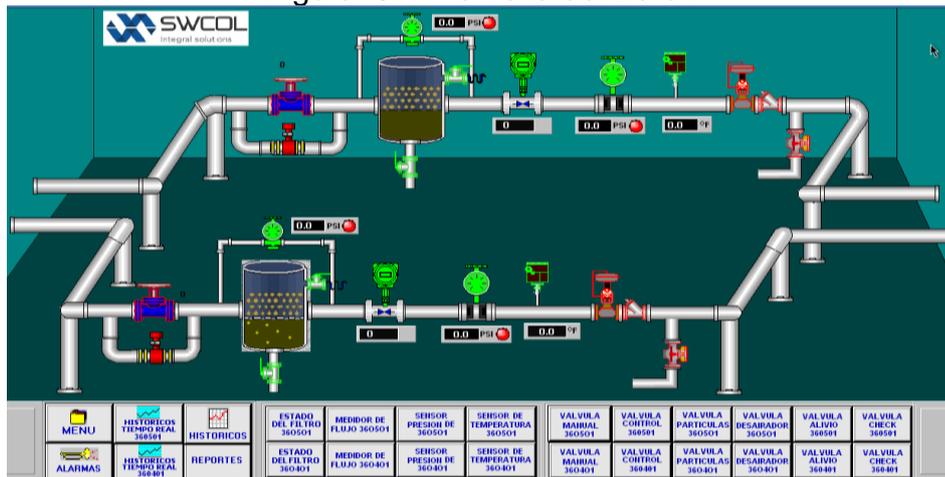
La pantalla de inicio del batch, brinda la opción de ingresar: el número del batch, producto, destino, origen y volumen establecido; además, da la posibilidad de visualizar la gravedad API, que es un valor previamente determinado. Al dar click en **OK** el HMI conduce a la pantalla del menú principal.

3.1.4. Pantalla del Proceso

Es la pantalla de trabajo, en la que el operador puede realizar actividades de visualización del estado de los actuadores y sensores y hacer sus respectivos cambios. Tiene la posibilidad de acceder a las ventanas de gráficos del proceso, históricos, reportes, visualizar alarmas de presión y temperatura, manipular la apertura y cierre de las diferentes válvulas que se encuentran en el proceso y hacer cambio de parámetros, tal como se muestra en la Figura 3.3.

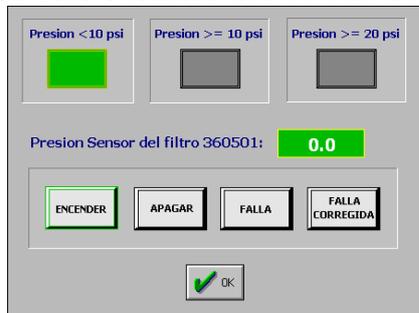
Al acceder a cada icono de la pantalla del Batch, se puede encender o apagar los diferentes sensores del proceso. Por ejemplo, si se accede al icono de estado del filtro se puede visualizar el llenado de éste, como se muestra en la Figura 3.4. Si la presión es menor a 10 PSI, se muestra una alarma de color verde, indicando que el crudo circula normalmente y que el filtro no está lleno, si la presión es mayor o igual a 10 PSI se visualiza una alarma de color rojo indicando que filtro está a punto de llenarse, si la presión es mayor o igual a 20 PSI se podría visualizar una alarma de color azul, la cual, no ocurre, ya que el objetivo del supervisor es no permitir que el filtro se llene y por tanto la presión no puede ser mayor a 20 PSI.

Figura 3.4. Pantalla del Batch



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

Figura 3.5. Ventana del estado del filtro

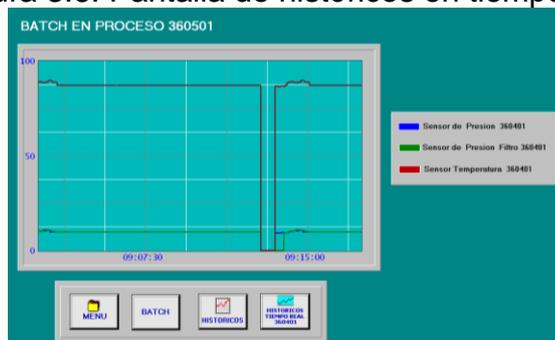


Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

3.1.5. Pantalla de Históricos en Tiempo real

La pantalla de históricos en tiempo real, permite visualizar y registrar en un fichero (y visualizarlo cuando se desee), cualquier evento que cambie de valor. La línea azul indica la presión del sensor de presión, la línea de color verde indica la presión del sensor de presión del filtro y el color rojo indica la temperatura del sensor de temperatura. Además, esta ventana sirve de enlace con la ventana Históricos de Tiempo Real, Históricos, Menú y el Batch, como se muestra en la Figura 3.6.

Figura 3.6. Pantalla de históricos en tiempo real

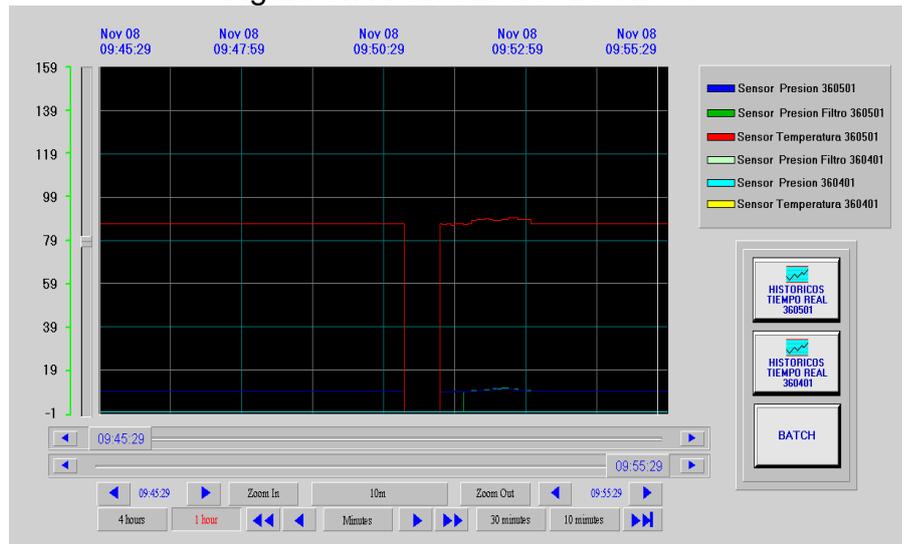


Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

3.1.6. Pantalla de Históricos

Esta pantalla (ver Figura 3.7), registra toda la información correspondiente a presión y temperatura con respecto al tiempo, estos datos se almacenan en una base de datos. Esta ventana es de mucha utilidad pues presenta la presión y temperatura de forma gráfica, para una rápida comprensión y así poder tomar una acción correctiva ante alguna falla.

Figura 3.7. Pantalla de Históricos



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

La gráfica de históricos, cuenta con los controles de desplazamiento en el tiempo que permiten ver los datos gráficos en cualquier tiempo en el que estuvo operando el sistema, además, en el costado izquierdo se puede cambiar la escala para mejor visualización de los valores de cada variable. Esta ventana sirve de enlace con la ventana Históricos de Tiempo Real y el Batch.

3.1.7. Pantalla de alarmas

En esta pantalla de alarmas, se muestran de una forma visual, las alarmas actuales e históricas producidas para cada sensor de presión y temperatura, debido a una sobrepresión o sobre temperatura de una forma más detallada, es decir, se indica la fecha, hora, tipo prioridad, nombre, valor y límite, tal como se muestra en la Figura 3.8.

El reconocimiento de alarmas se puede realizar de dos formas:

- Individual: Seleccionar la alarma que se desea reconocer y dar click en el botón *ACK* del respectivo sensor.
- Global: Dar click en el botón *ACK*

Figura 3.8. Pantalla de alarmas

TABLA DE ALARMAS ACTUALES:

Date	Time	State	Class	Type	Priority	Name	Group	Provider	Value	Limit
08 Nov	09:01	UNACK	VALUE	HI	2	temperatures	\$System	Intouch	86.8	0
08 Nov	09:52	UNACK	VALUE	HI	1	pressionens...	\$System	Intouch	9.8	0
08 Nov	09:52	UNACK	VALUE	HI	1	pressionfiro3	\$System	Intouch	9.9	0

Update Successful Default Query

TABLA DE ALARMAS HISTORICAS:

Date	Time	State	Class	Type	Priority	Name	Group	Provider	Value	Limit
08 Nov	07:46		EVENT	SYSTEM	999	\$Operator	\$System	Intouch	None	
08 Nov	07:46		EVENT	SYSTEM	999	\$HistoricalLo	\$System	Intouch	ON	OFF
08 Nov	07:46		EVENT	SYSTEM	999	\$OperatorNA	\$System	Intouch	None	
08 Nov	07:46		EVENT	SYSTEM	999	\$AccessLevel	\$System	Intouch	9999	0
08 Nov	07:46		EVENT	SYSTEM	999	\$OperatorDa	\$System	Intouch	None	
08 Nov	07:46		EVENT	SYSTEM	999	\$LogicRunni	\$System	Intouch	ON	OFF
08 Nov	09:01	UNACK	VALUE	HI	2	temperatures	\$System	Intouch	86.8	0
08 Nov	09:01	UNACK	VALUE	HI	1	pressionens...	\$System	Intouch	9.2	0

Update Successful Default Query

ACK OK

Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

3.1.8. Pantalla de Reportes

La pantalla de reportes presenta datos relevantes del proceso, como el número del batch, producto, destino, origen, gravedad API y volumen.

Figura 3.9. Pantalla de Reportes



DATOS DEL PATIN 360501

NUMERO DEL BATCH	PRODUCTO	DESTINO:	ORIGEN:	GRAVEDAD API:	VOLUMEN:
0					2000

DATOS DEL PATIN 360401

NUMERO DEL BATCH	PRODUCTO	DESTINO:	ORIGEN:	GRAVEDAD API:	VOLUMEN:
0					0

OK

Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

3.2. Comunicación de I/O

Las comunicaciones dentro de cualquier sistema industrial juegan un papel primordial en el momento de su implementación y funcionamiento, principalmente, si sus componentes se encuentran dispersos dentro de la planta o geográficamente distantes.

3.2.1. Estándar de intouch para direcciones I/O

Intouch identifica un elemento de datos en un programa servidor I/O que incluyen: el nombre de la aplicación (*Application name*) que proporciona los datos y el nombre del tema (*Topic name*). Para obtener datos de otra

aplicación, el programa cliente (Intouch) abre un canal al programa servidor (KEPServerEX) especificando estos nombres.

Además, Intouch necesita saber el tipo de datos, discreto, entero, real (punto flotante) o mensaje (arreglo). Esta información, determina el tipo de I/O para el *tagname* cuando es definido en la base de datos de intouch. Cuando WindowViewer está corriendo, automáticamente actualizará todos los valores y ejecutará las acciones según el problema (Ver anexo H).

3.2.2. Comunicación DDE (intercambio dinámico de datos)

La comunicación interna de este proyecto, se establece mediante el protocolo DDE, el cual, es un protocolo de comunicación desarrollado por Microsoft para el intercambio de datos entre las aplicaciones Windows [34]. Es un sistema estándar en Windows de fácil utilización, en el que la comunicación se establece automáticamente entre programas que contemplan la estructura DDE (cliente servidor).

Un programa que puede mandar datos al bus DDE es un programa servidor; un programa cliente puede recibir datos DDE lo que permite crear programas con gestiones especiales en Vbasic, Excel, etc., y pasar los datos a Intouch sin necesidad de crear programas de comunicaciones.

DDE, permite direccionar un servidor DDE a un puerto de comunicaciones y otro servidor a otro puerto, con lo que se puede compartir información que venga de distintos PLCs o sistemas de campo.

3.2.3. Comunicación RsLogix 500 e Intouch

En este proyecto, se cuenta con dos brazos de medición; cada brazo tiene un respectivo PLC. Para el brazo número 350501 se tomó el nodo 1, para brazo número 350601 se tomó el nodo 2. Después de obtener el ladder del sistema de medición dinámica, se verifica que todas las direcciones de las marcas auxiliares coincidan con las direcciones utilizadas en los *tagnames* introducidas en Intouch. En el proyecto, la comunicación interna se establece mediante DDE. La configuración de comunicación Intouch y Rslogix 500 se encuentra explicada y desarrollada en el anexo H.

4. VALIDACIÓN DEL SUPERVISOR

La simulación que se hace, permite corroborar aquellas restricciones que se imponen al sistema, con el objeto de despejar estados no deseados del proceso, como lo son los marcajes inalcanzables.

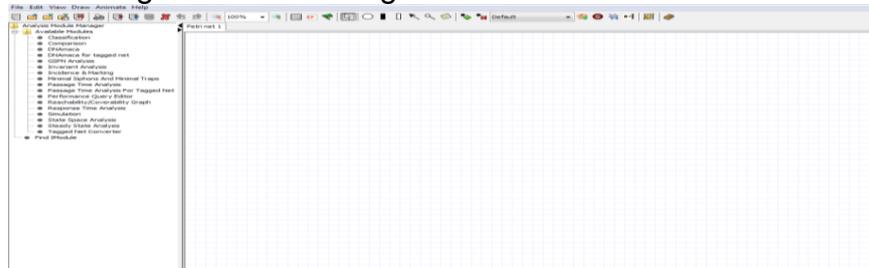
Ahora, reconociendo que la meta principal del supervisor es de hacer cumplir las restricciones del proceso, se utiliza la herramienta PIPE V4 para realizar la simulación de la evolución de las marcas, seleccionando la transición que se desea disparar y rectificando que no viole las restricciones que se impusieron al principio. Por tanto, el objeto de este capítulo es asegurar que el modelo se comporta como se planeó.

4.1. Herramientas utilizadas para el desarrollo del supervisor

4.1.1. PIPE V4 (Platform Independent Petri Net Editor)

Teniendo en cuenta las necesidades y requerimientos de este proyecto, el software utilizado para la simulación de los modelos en RDP y su control supervisorio es la herramienta PIPE V4.

Figura 4.1 Interfaz gráfica de usuario PIPE V4.



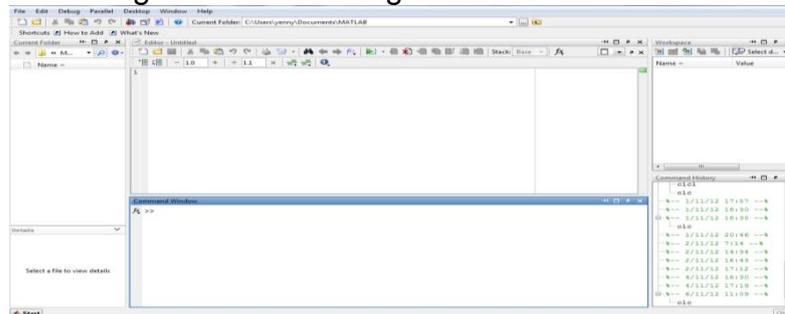
Fuente: Propia, Octubre de 2012

PIPE es un software libre, su interfaz gráfica es mostrada en la Figura 4.1; es una herramienta independiente para crear y analizar Redes de Petri. PIPE está implementado completamente en *Java* para asegurar independencia de la plataforma. Esta herramienta ha sido diseñada con el objetivo de proporcionar una interfaz intuitiva y fácil de usar para la adición de las Redes de Petri [35].

El editor, utiliza la representación estándar para los diferentes elementos que constituyen una Red de Petri como se describe en el capítulo 1. Además, genera grafos reutilizables, permite ver la red simulada de forma animada con la característica de que se puede seleccionar el disparo de transiciones a conveniencia [36]. Finalmente, es posible obtener la matriz de incidencia, que puede ser exportada a Matlab para un posterior análisis a través de la extensión *HTML*.

4.1.2. Matlab ®

Figura 4.2. Interfaz gráfica de usuario Matlab



Fuente: Propia, Octubre de 2012

Matlab ® es un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo, para cálculo numérico, visualización y programación. Usando Matlab, se puede analizar los datos, desarrollo de algoritmos, crear modelos y aplicaciones. El lenguaje, las herramientas y funciones incorporadas de matemáticas permiten explorar múltiples enfoques y llegar a una solución más rápida que con las hojas de cálculo o lenguajes de programación tradicionales, tales como C/C++ o Java™.

Matlab es ampliamente usado por ingenieros de control, para el análisis y diseño, posee una extraordinaria versatilidad y capacidad para resolver problemas en matemática aplicada, ingeniería, entre otras. Está basado en un sofisticado software de matrices para el análisis de sistemas de ecuaciones. Permite resolver complicados problemas numéricos sin necesidad de escribir un programa. La interfaz gráfica se puede apreciar en la Figura 4.2 [37].

4.1.3. Herramienta CRP (Control de Redes de Petri)

Figura 4.3. Interfaz gráfica de usuario CRP



Fuente: Propia, Octubre de 2012

CRP es una herramienta que puede generar código ladder desde cualquier Red de Petri creada en PIPE y está basada en Win 32 [38]. Su interfaz gráfica se muestra en la Figura 4.3.

4.2. Diseño de código ladder a partir de Redes de Petri

El estándar IEC 61131[39], es un recurso de programación estándar, cuya finalidad es brindar una colección completa de estándares diferentes a controladores programables y sus periféricos asociados, de tal forma que no se cree vinculo de dependencia entre los proveedores y compradores, al existir gran cantidad de lenguajes de programación diseñados por un gran número de fabricantes diferentes [39].

De acuerdo al estándar, se definen cuatro lenguajes para la programación de PLCs, lo que significa que su sintaxis y semántica ya han sido establecidas y definidas, permitiendo su uso en diversos sistemas basados en esta norma. Los lenguajes consisten en dos de tipo literal y dos de tipo gráfico, para este proyecto se hará uso de los lenguajes de tipo gráfico, específicamente diagrama escalera más conocido como diagrama ladder.

4.2.1. Generación de código ladder

Para convertir el supervisor del proceso mostrado en la Figura 2.28, en una aplicación de lenguaje ladder de un PLC, es necesario determinar la ocurrencia de eventos en la Red de Petri, basándose en la evolución de las señales lógicas en el sistema real. La generación de eventos en la Red de Petri está asociada directamente a la activación de una señal lógica.

La asociación de eventos a un sistema de eventos discretos, se realiza por medio de las transiciones, en las cuales, la ocurrencia de un evento equivale al disparo de una transición. Una transición indica la ocurrencia del evento (entrada del PLC). La transición debe estar habilitada y el evento debe estar activo para que pueda dispararse. Ahora bien, la forma de asociar una acción a un sistema de eventos discretos es por medio de los lugares, los cuales, se asignan como las salidas del PLC.

Después de haber diseñado el supervisor como se especificó en el capítulo 2 y de definir la configuración física del PLC (ver anexo F), se continua con la implementación en un PLC, haciendo uso de la herramienta CRP. El software CRP calcula automáticamente el ladder del supervisor mediante una teoría expuesta en [38], el resultado de esta operación es un archivo “.SLC” para el software RsLogix 500. Antes de generar ladder del supervisor, es necesario crear una especificación para el PLC que se utilizará. Para realizar este procedimiento se hace uso de la aplicación PLC Detector, desarrollada en [38], la cual, adecua la configuración del RsLogix 500, después de esto se guarda la configuración en un archivo .SLC. PLC Detector toma este archivo y lo

convierte a uno con extensión *.PLC*, el cual, se puede utilizar para la generación del ladder.

El archivo *.PLC* se debe cargar en el CRP y se debe asignar las entradas y salidas del controlador como se especificó anteriormente. Una vez realizada la asignación de las E/S a los lugares y transiciones se puede generar el ladder y guardarlo en la ubicación que se desee para posteriormente ejecutarlo en Rslogix 500. La generación paso a paso del ladder del proyecto y un manual de usuario se pueden encontrar en el anexo F. El código ladder generado se muestra en el anexo I.

4.2.2. Configuración del driver

Un controlador es la interfaz de software para el dispositivo de hardware que se utilizará para establecer la comunicación entre RsLinx y el procesador. RsLinx provee la comunicación entre el PLC y la computadora en un ambiente Windows.

Para configurar el driver en RSLinxClassic diríjase al anexo H, donde se agrega, edita o elimina el controlador, para el caso de estudio se eligió el EMU500-1 SLC 500 (DH 485) Emulator. El Emulator permite probar el proyecto mediante la ejecución de un PLC virtual; con dicho PLC, se puede descargar el programa ladder y ejecutarlo de manera muy similar a un PLC real, pues no se está en planta para poder contar con uno.

4.2.3. RsLogix 500

El software RsLogix 500 se utiliza para programar PLCs de la marca Allen Bradley de la familia de los SLC 500 y micrologix. RSLogix 500 permite crear y editar un nuevo programa de control en lenguaje de programación de PLCs Ladder del autómeta. Para configurar RsLogix 500 ver anexoH.

4.2.4. Micrologix 1500

Para empezar, se ha de configurar el autómeta que se usará, en este caso se trata de un MicroLogix 1500 LSP serie A, ya que es compatible con el driver EMU500-1 SLC 500 (DH 485) Emulator. Ver anexo H.

4.3. Validación del supervisor del sistema de medición dinámica

La simulación que se hace permite corroborar que aquellas restricciones que se imponen al sistema, con el objeto de despejar estados no deseados del proceso se cumplan, como lo son marcajes inalcanzables.

Ahora reconociendo que la meta principal del supervisor es de hacer cumplir las restricciones del proceso, se utiliza la herramienta PIPE V4 para realizar la simulación de la evolución de las marcas seleccionando la

transición que se desea disparar y rectificando que no viole con las restricciones que se impusieron al principio. Por tanto el objeto de este capítulo es asegurar que el modelo se comporta como se planeo.

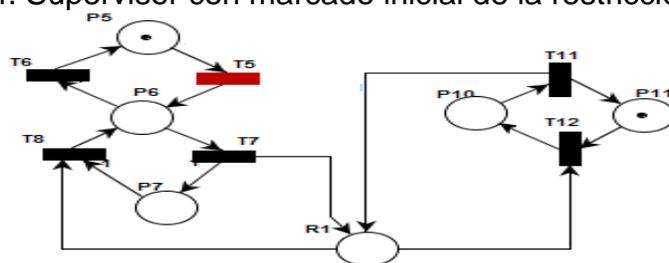
4.3.1. Validación de la restricción 1

$$u_5 + u_6 + u_{10} \leq 1 \quad (2.1)$$

Con esta restricción se garantiza, que si hay una marca en el lugar P_5 , no puede haber una marca en el lugar P_6 ni en el lugar P_{10} al mismo tiempo, esto significa que si el crudo circula por el filtro normalmente, no puede estar el filtro llenándose, ni la válvula del desairador estar cerrada al mismo tiempo, ya que si esto sucede, el filtro se llenaría, lo cual, contradice el objetivo del supervisor.

Como se puede ver en la Figura 4.4, hay una marca en el lugar P_5 y la transición T_5 esta sensibilizada. La transición T_{12} debería estar sensibilizada pues el lugar P_{11} está marcado, pero por la restricción impuesta, esta transición no se sensibiliza y por tanto no se dispara impidiendo que el lugar P_{10} contenga marca.

Figura 4.4. Supervisor con marcado inicial de la restricción 1

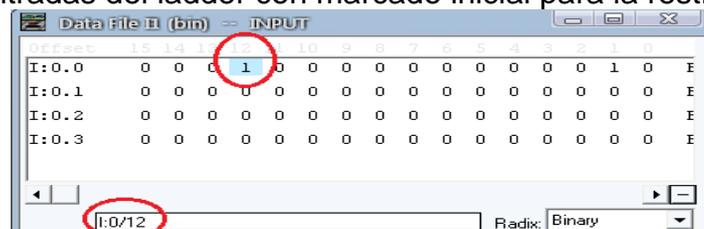


Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

Lo dicho anteriormente, se puede verificar en el ladder; en la Figura4.6, se muestra que el marcado inicial comienza en el salida O:0.0/5 (lugar P5). En la Figura 4.5., se muestra que al cambiar el estado de la entrada I:0.0/12 (transición T12) de 0 a 1, la salida O:0.0/10 (lugar 10) debería cambiar su estado 1, pero gracias a la restricción 1, esta salida se mantiene en 0, ratificando que el lugar P10 no se marca.

Entradas lógicas (Transiciones):

Figura 4.5. Entradas del ladder con marcado inicial para la restricción 1



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

Salidas lógicas (Lugares):

Figura 4.6. Salidas del ladder con marcado inicial para la restricción 1

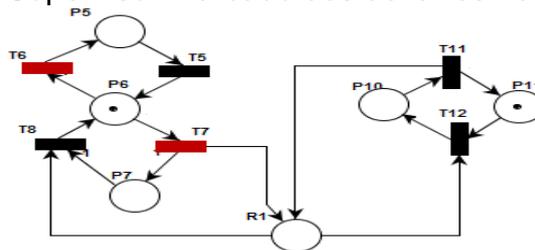
Offset	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	
O:0.0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	E
O:0.1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	E
O:0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	E
O:0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	E

Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

Siguiendo con la evolución de las marcas en la Figura 4.7, el lugar P6 contiene una marca y la transición T6 y T7 están sensibilizadas.

Nuevamente, la transición T12 debería estar sensibilizada pues el lugar P11 está marcado, pero por la restricción impuesta, ésta transición no lo está, ya que al validarse se produce el disparo y se marcaría el lugar P10, violando la restricción. Lo cual implicaría que P6 y P10 contengan marcas al mismo tiempo y no sería válido.

Figura 4.7. Supervisor marcado dos de la restricción 1



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

Lo dicho anteriormente, se ratifica en el ladder; en la Figura 4.8 y 4.9. En la Figura 4.9, se muestra que el estado de la salida O:0.0/6 (lugar P6) es 1. En la Figura 4.8 se muestra que al cambiar el estado de la entrada I:0.0/12 (transición T12) de 0 a 1, la salida O:0.0/10 (lugar P10) debería cambiar su estado a 1, pero gracias a la restricción 1, esta salida se mantiene en 0, confirmando que el lugar P10 no se marca.

Entradas lógicas (Transiciones):

Figura 4.8. Entradas del ladder con marcado dos para la restricción 1

Offset	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	
I:0.0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	E
I:0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	E
I:0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	E
I:0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	E

Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

Salidas lógicas (Lugares):

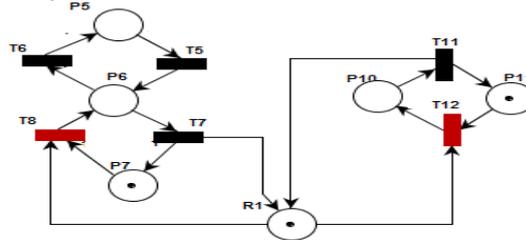
Figura 4.9. Salidas del ladder con marcado dos para la restricción 1

Address	P5	P4	P3	P2	P1	P0	T8	T7	T6	T5	T4	T3	T2	T1	T0
0:0.0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
0:0.1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0
0:0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0:0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

Como se puede apreciar en la Figura 4.10, el lugar P7 contiene una marca y la transición T8 está sensibilizada. En este caso, la transición T12 está sensibilizada ya que el lugar P11 contiene una marca, lo cual, significa que no viola con la restricción, pues ésta no impide que P7 y P10 contengan marcas al mismo tiempo. Pero esta red nunca se dará luego de adicionarle la restricción $u_7 + u_{11} \leq 1$, por tanto P7 nunca va a contener una marca, evitando el llenado del filtro.

Figura 4.10. Supervisor marcado tres de la restricción 1



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

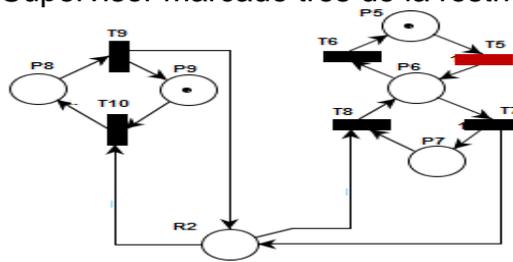
4.3.2. Validación de la restricción 2

$$u_5 + u_6 + u_8 \leq 1 \quad (2.2)$$

Con esta restricción, se garantiza que si hay una marca en el lugar P5 no puede haber una marca en el lugar P6 ni en el lugar P8 al mismo tiempo, esto quiere decir que si el crudo circula normalmente por el filtro, no puede estar el filtro llenándose, ni la válvula de eliminación de partículas estar cerrada al mismo tiempo, pues si esto sucede, el filtro se llenaría, lo cual, sería contradictorio con el objetivo del supervisor.

En la Figura 4.11, se puede ver que el lugar P5 contiene una marca y la transición T5 está sensibilizada. La transición T10, debería estar sensibilizada porque el lugar P9 contiene una marca, pero por la restricción 2 la T10 no se sensibiliza impidiendo el marcado del lugar P8.

Figura 4.11. Supervisor marcado tres de la restricción 1

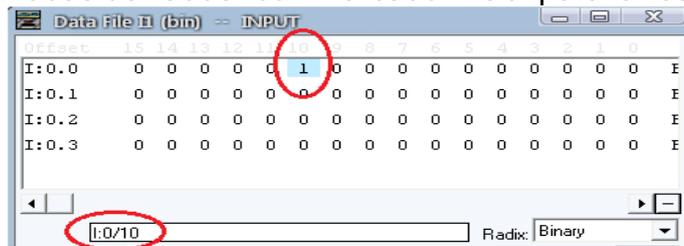


Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

Lo anterior, se refleja en las figuras 4.12 y 4.13. En la Figura 4.13, se muestra que el estado de la salida O:0.0/5 (lugar P5) es 1. En la Figura 4.12, se muestra que el cambio de estado de la entrada I:0.0/10 (transición T10) de 0 a 1, debería forzar el cambio de estado de la salida O:0.0/8 a 1 (lugar P8), pero debido a la restricción 2, esta salida se mantiene en 0, ratificando que el lugar P8 no se marca.

Entradas lógicas (Transiciones):

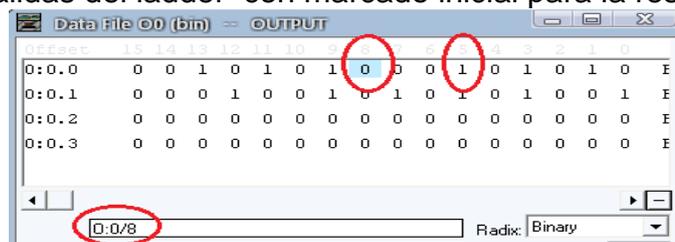
Figura 4.12. Entradas del ladder con marcado inicial para la restricción 2



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

Salidas lógicas (Lugares):

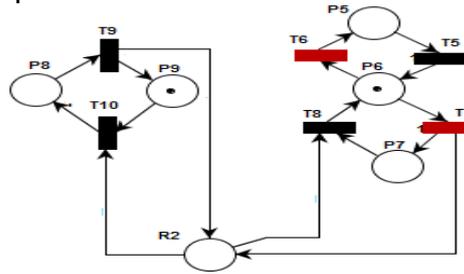
Figura 4.13. Salidas del ladder con marcado inicial para la restricción 2



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

Con la evolución de las marcas en la RDP, se puede ver que en la Figura 4.14 el lugar P6 contiene una marca y la transición T6 y T7 están sensibilizadas. Nuevamente, la transición T10 debería estar sensibilizada, pues el lugar P9 está marcado, pero por la restricción impuesta, esta transición no lo está, ya que al validarse, se produce el disparo que implicaría que el lugar P8 contenga una marca, violando la restricción 2.

Figura 4.14. Supervisor marcado dos de la restricción 2



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

Se puede comprobar lo anterior en el ladder. En la Figura 4.16, se muestra que el estado de la salida O:0.0/6 (lugar P6) es 1. En la Figura 4.15, se muestra que al cambiar el estado de la entrada I:0.0/10 (transición T10) de 0 a 1, la salida O:0.0/8 (lugar P8) debería cambiar su estado a 1, pero gracias a la restricción 2, esta salida se mantiene en 0, ratificando que el lugar P8 no se marca.

Entradas lógicas (Transiciones):

Figura 4.15. Entradas del ladder con marcado dos para la restricción 2

Address	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
I:0.0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
I:0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I:0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I:0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

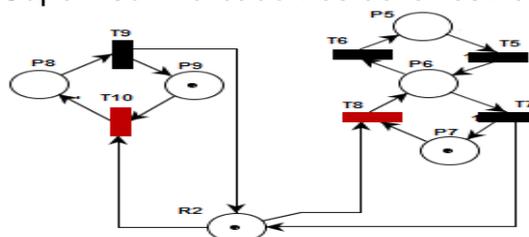
Salidas lógicas (Lugares):

Figura 4.16. Salidas del ladder con marcado dos para la restricción 2

Address	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
O:0.0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0
O:0.1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1
O:0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O:0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

Figura 4.17. Supervisor marcado tres de la restricción 2



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

En la Figura 4.17, el lugar P9 contiene una marca y la transición T10 está sensibilizada, lo cual, significa que al dispararse esta transición se marcaría el lugar P8. El lugar P7, contiene una marca, pero al adicionar la restricción $u_7 + u_9 \leq 1$ al supervisor, este lugar nunca se va a marcar evitando nuevamente el llenado del filtro, por tanto esta red nunca se dará.

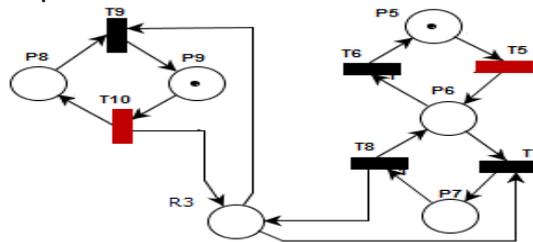
4.3.3. Validación de la restricción 3

$$u_7 + u_9 \leq 1 \quad (2.3)$$

Esta restricción, garantiza que P7 y P9 no pueden tener marcas al mismo tiempo, esto indica que el filtro no puede estar lleno si la válvula de eliminación de partículas está abierta.

En la Figura 4.18, se muestra que el lugar P5 contiene una marca y que la transición T5 está sensibilizada, el lugar P9, contiene marca y la transición T10 está sensibilizada, pero el marcaje de dichos lugares al mismo no viola la restricción, permitiendo el cambio en el marcaje de la RDP.

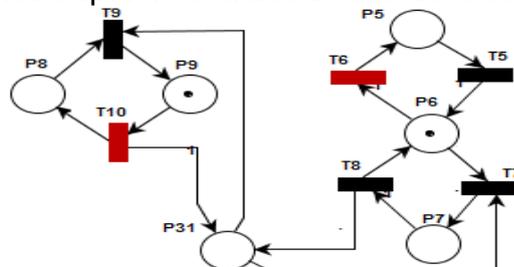
Figura 4.18. Supervisor marcado inicial de la restricción 3



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

El cambio del marcaje de los lugares de la RDP, se muestra en la Figura 4.19; el lugar P6 contiene una marca y la transición T6 está sensibilizada; la transición T7 debería estar sensibilizada, pero por la restricción impuesta ésta no puede ser disparada, impidiendo el marcaje de P7 y garantizando que P9 y P7 no contengan marcas al mismo tiempo.

Figura 4.19. Supervisor marcado dos de la restricción 3



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

Se puede comprobar lo anterior en el ladder. En la Figura 4.21, se muestra que el estado de la salida O:0.0/6 (lugar P6) es 1. En la Figura

4.20, se muestra que al cambiar el estado de la entrada I:0.0/7 (transición T7) de 0 a 1, la salida O:0.0/7 (lugar P7) debería cambiar su estado a 1, pero por la restricción 3, esta salida se mantiene en 0, ratificando que el lugar P7 no se marca.

Entradas lógicas (Transiciones):

Figura 4.20. Entradas del ladder con marcado dos para la restricción 3

Offset	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	E	
I:0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	E
I:0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	E
I:0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	E
I:0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	E

Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

Salidas lógicas (Lugares):

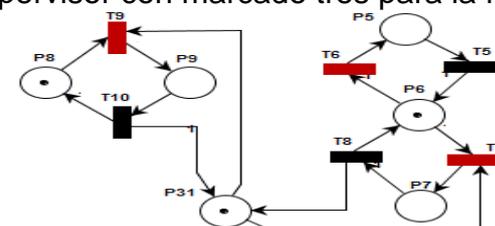
Figura 4.21. Salidas del ladder con marcado dos para la restricción 3

Offset	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	E
O:0.0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	E
O:0.1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	E
O:0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	E
O:0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	E

Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

En la Red de Petri de la Figura 4.22, el lugar P6 contiene una marca y que la transición T6 y T7 están sensibilizadas, el lugar P8 contiene marca y la transición T9 está sensibilizada, pero el marcaje de dichos lugares no viola la restricción, permitiendo el cambio en el marcaje de la RDP.

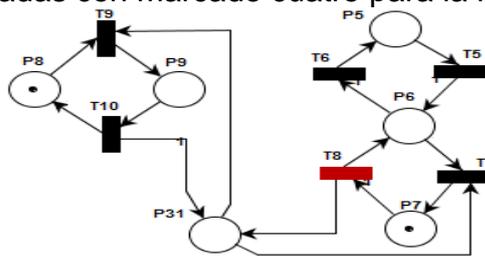
Figura 4.22. Supervisor con marcado tres para la restricción 3



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

En la Red de Petri de la Figura 4.23, el lugar P7 tiene una marca, lo que impide que la transición T9 sea sensibilizada para que pueda ser disparada y se produzca el cambio de la marca cumpliendo con la restricción 3. Pero al adicionar la restricción 2 a la RDP y siguiendo con el orden de disparos de la red de la Figura 10.19, P6 tiene una marca impidiendo el marcaje de P8, forzando a la red a marcar sólo el lugar P9 y no permitir el marcaje de P7, por tanto, esta red nunca se dará.

Figura 4.23. Entradas con marcado cuatro para la restricción 3



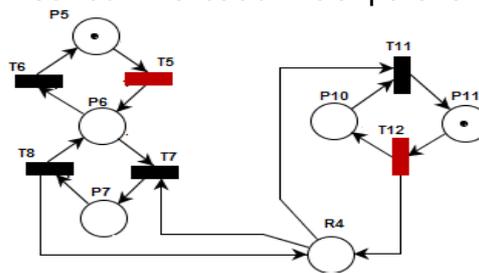
Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

4.3.4. Validación de la restricción 4

$$u_7 + u_{11} \leq 1 \quad (2.4)$$

Esta restricción garantiza que P7 y P9 no pueden tener marcas al mismo tiempo, esto significa que el filtro no puede estar lleno si la válvula del desairador está abierta. La red (Figura 4.25) muestra que P5 y P11 contiene marcas, pero el marcaje de estos lugares no viola con la restricción 4, permitiendo el cambio en el marcaje de la Red de Petri.

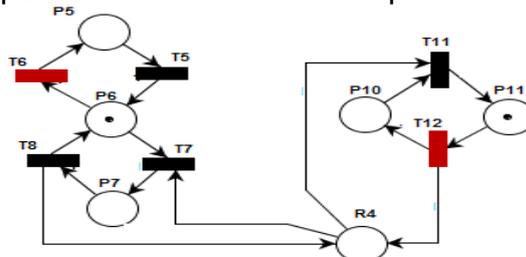
Figura4.24. Supervisor con marcado inicial para la restricción 4



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

Después del cambio del marcaje de la RDP, se muestra en la Figura 4.25 que el lugar P6 contiene una marca y la transición T6 está sensibilizada, la transición T7 debería estar sensibilizada, pero gracias a la restricción 4 esta transición no puede ser disparada y mucho menos estar sensibilizada, impidiendo el marcaje del lugar P7 y cumpliendo con la restricción

Figura 4.25. Supervisor con marcado dos para la restricción 4

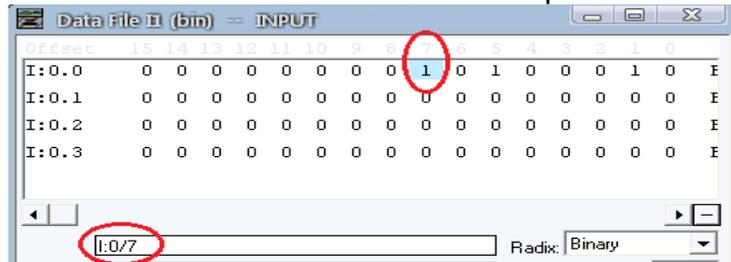


Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

Lo anterior se refleja en la Figura 4.26 y 4.27. En la Figura 10.24, se muestra que el estado de la salida O:0.0/6 es 1 (lugar P6). En la Figura 10.23, se muestra que el cambio de estado de la entrada I:0.0/7 (transición T7) de 0 a 1, debería forzar el cambio de estado de la salida I:0.0/7 a 1 (lugar P7), pero debido a la restricción 4, esta salida se mantiene en 0, confirmando que el lugar P7 no se marca.

Entradas lógicas (Transiciones):

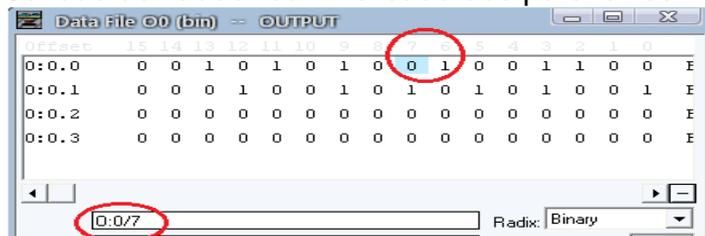
Figura 4.26. Entradas del ladder con marcado dos para la restricción 4



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

Salidas lógicas (Lugares):

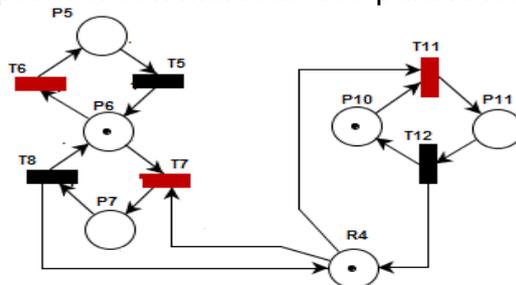
Figura 4.27. Salidas del ladder con marcado dos para la restricción 4



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

En la Red de Petri de la Figura 4.28, el lugar P6 contiene una marca y la transición T6 y T7 están sensibilizadas, el lugar P10 contiene marca y la transición T11 está sensibilizada, pero la red de la Figura 4.28, nunca se dará al adicionar la restricción 1, pues P10 nunca contendrá marca y T7 nunca será sensibilizada.

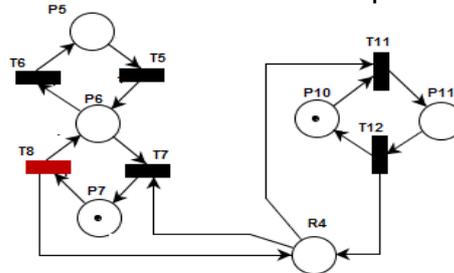
Figura 4.28. Supervisor con marcado tres para la restricción 4



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

En la Figura 4.29, P7 contiene marca y la transición T8 está sensibilizada pero esta red nunca se podrá dar al adicionar la restricción 1, pues al seguir el orden de disparos de la Figura 10.25, P6 tiene una marca impidiendo el marcado de P10 y forzando a marcar sólo el lugar P11 y no permitir el marcado de P7.

Figura 4.29. Supervisor con marcado cuatro para la restricción 4



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

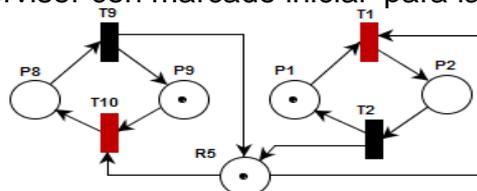
4.3.5. Validación de la restricción 5

$$u_2 + u_8 \leq 1 \quad (2.5)$$

Esta restricción impide que P2 Y P8 contengan marcas al mismo tiempo, significa que si la válvula manual está abierta, la válvula de eliminación de partículas no puede estar cerrada, por tanto, si la válvula manual está abierta entonces la válvula de eliminación de partículas debe permanecer abierta también.

En la Figura 4.30, P1 y P9 contienen marcas, pero el marcaje de estos lugares no contradice la restricción número 5, permitiendo el cambio en el marcado de la RDP.

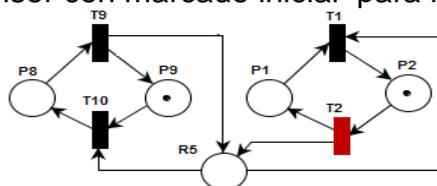
Figura 4.30. Supervisor con marcado inicial para la restricción 5



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

Como P2 contiene una marca, T10 no está sensibilizada, por tanto, P8 no puede marcarse, cumpliendo con la restricción 5 (ver Figura 4.31)

Figura 4.31. Supervisor con marcado inicial para la restricción 5



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

En la Figura 4.33, se muestra que el estado de la salida O:0.0/2 es 1 (lugar P2). En la Figura 4.32, se muestra que al cambiar el estado de la entrada I:0.0/10 (transición T10) de 0 a 1, la salida O:0.0/8 (lugar P8) debería cambiar su estado a 1, pero por la restricción 5, esta salida se mantiene en el estado 0, ratificando que el lugar P8 nunca se marca.

Entradas lógicas (Transiciones):

Figura 4.32. Entradas del ladder con marcado inicial para la restricción 5

Offset	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
I:0.0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
I:0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I:0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I:0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

Salidas lógicas (Lugares):

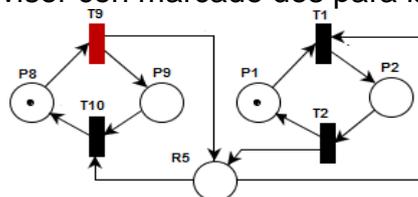
Figura 4.33. Salidas del ladder con marcado inicial para la restricción 5

Offset	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
O:0.0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0
O:0.1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0
O:0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O:0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

En la Figura 4.34, el lugar P8 contiene una marca por ende la transición T1 no está sensibilizada ya que P2 no se puede marcar, cumpliendo con que P8 y P2 no pueden tener marcas al mismo tiempo.

Figura 4.34. Supervisor con marcado dos para la restricción 5



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

4.3.6. Validación de la restricción 6

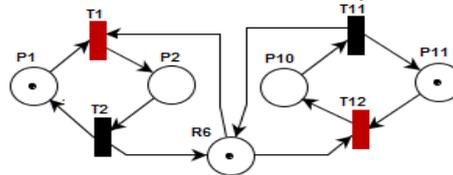
$$u_2 + u_{10} \leq 1 \tag{2.6}$$

Con esta restricción se impide que el lugar P2 y el lugar P10 contengan marcas al mismo tiempo. Esto quiere decir que si la válvula manual está abierta entonces la válvula del desairador no puede estar cerrada,

significa que si la válvula manual está abierta necesariamente la válvula del desairador debe estar abierta.

El lugar P1 y el lugar P11, contienen marcas al mismo tiempo, pero este marcado de la RDP no contradice a la restricción 6 y permite el cambio en el marcado de la red (ver Figura 4.35).

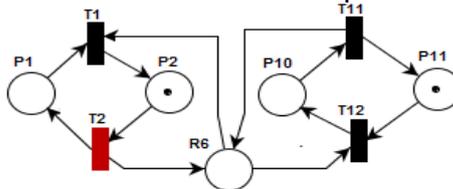
Figura 4.35. Supervisor con marcado inicial para la restricción 6



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

En la Figura 4.36, P2 contiene una marca, T12 no está sensibilizada por lo que el lugar P10 no puede marcarse, cumpliendo con la restricción 6.

Figura 4.36. Supervisor con marcado dos para la restricción 6



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

En la Figura 4.38, se muestra que el estado de la salida O:0.0/2 es 1 (lugar P2). En la Figura 4.37, se muestra que al cambiar el estado de la entrada I:0.0/12 (transición T12) de 0 a 1, la salida O:0.0/10 (lugar P10) debería cambiar su estado a 1, pero por la restricción 6, esta salida se mantiene en el estado 0, confirmando que el lugar P10 no se puede marcar.

Entradas lógicas (Transiciones):

Figura 4.37. Entradas del ladder con marcado dos para la restricción 6

Offset	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	
I:0.0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
I:0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I:0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I:0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

Salidas lógicas (Lugares):

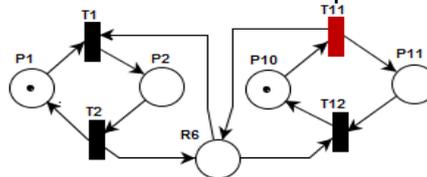
Figura 4.38. Salidas del ladder con marcado dos para la restricción 6

Offset	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0:0.0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0
0:0.1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1
0:0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0:0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

En la Figura 4.39, el lugar P10 contiene una marca por ende la transición T1 no está sensibilizada ya que P2 no se puede marcar, cumpliendo con que P2 y P10 no pueden tener marcas al mismo tiempo.

Figura 4.39. Supervisor con marcado tres para la restricción 6



Fuente: Propia, Noviembre de 2012

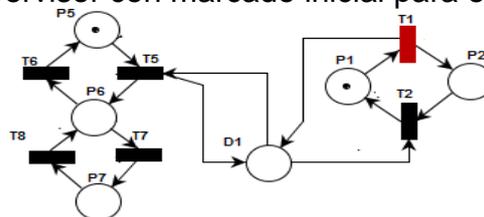
4.3.7. Validación del disparo 1

$$u_1 + q_5 \leq 1 \quad (2.8)$$

Con esta restricción de disparo, se garantiza que si hay una marca en el lugar P1 no puede dispararse la restricción T5. Esto quiere decir, que si la válvula manual está cerrada entonces la presión del filtro no puede ser mayor o igual a 10 PSI.

En la Figura 4.40, se muestra que la restricción de disparo 1 sí se cumple, pues el lugar P1 está marcado y la transición T5 no está sensibilizada al tener el lugar de entrada P5 marcado.

Figura 4.40. Supervisor con marcado inicial para el disparo 1

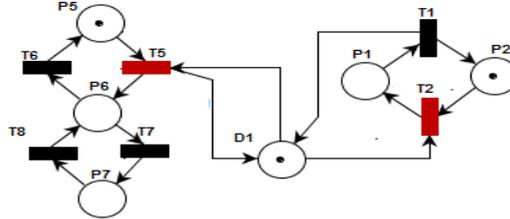


Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

La red de la Figura 4.41, sigue con el cambio de marcado de la red, la transición T1 es disparada y la marca cambia al lugar P2; P5 contiene

marca y T5 esta sensibilizada, pero como se puede observar, este cambio de marcado no viola la restricción de disparo 1.

Figura 4.41. Supervisor con marcado dos para el disparo 1



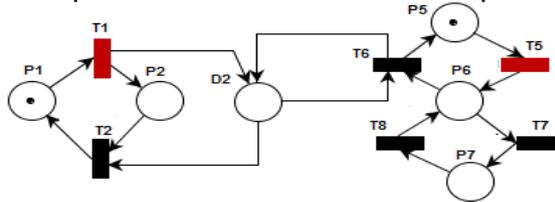
Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

4.3.8. Validación del disparo 2

$$u_1 + q_6 \leq 1 \quad (2.9)$$

Esta restricción, impide que T6 se dispare si el lugar P1 contiene marca. En la Figura 4.42, la red está en el marcado inicial por lo que no viola esta restricción y P5 y P1 pueden contener marcas al mismo tiempo.

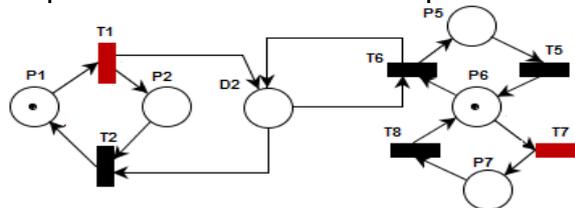
Figura 4.42. Supervisor con marcado inicial para el disparo 2



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

Efectivamente, en la Figura 4.43, se puede comprobar que la restricción de disparo 2 ($u_1 + q_6 \leq 1$) impide que la transición T6 este sensibilizada si el lugar de entrada P6 está marcado ya que existe una marca en el lugar P1.

Figura 4.43. Supervisor con marcado dos para el disparo 2



Fuente: Propia, Noviembre de 2012

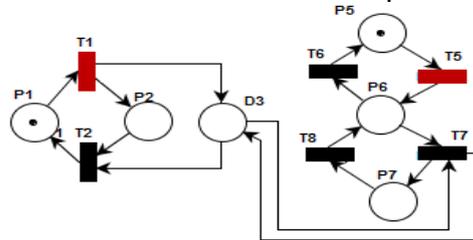
4.3.9. Validación del disparo 3

$$u_1 + q_7 \leq 1 \quad (2.10)$$

Con esta restricción, se impide que la transición T7 se dispare si el lugar P1 contiene una marca. Esto quiere decir, que si la válvula manual está cerrada la presión del filtro no puede ser mayor a o igual a 20 PSI. Se

muestra en la Figura 4.44 el marcado inicial de la red y se puede apreciar que no viola la restricción pues P1 y P5 pueden contener marcas al mismo tiempo.

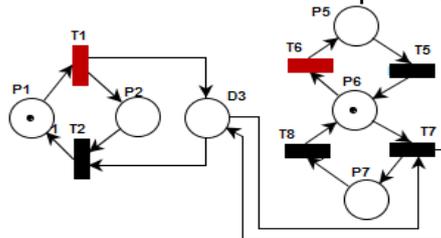
Figura 4.44. Supervisor con marcado inicial para el disparo 3



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

Evidentemente, en la Figura 4.45, se puede comprobar que la restricción de disparo 3 ($u_1 + q_7 \leq 1$) impide que la transición T7 este sensibilizada si el lugar de entrada P6 está marcado ya que existe una marca en el lugar P1.

Figura 4.45. Supervisor con marcado dos para el disparo 3



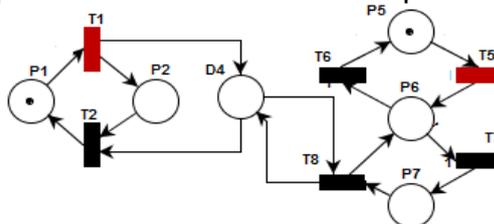
Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

4.3.10. Validación del disparo 4

$$u_1 + q_8 \leq 1 \quad (2.11)$$

Esta restricción de disparo, impide que la transición T8 se dispare si el lugar P1 contiene una marca. Se puede apreciar en la Figura 4.46 que P1 y P5 tienen marcas al mismo tiempo, lo cual, es válido ya que no viola la restricción.

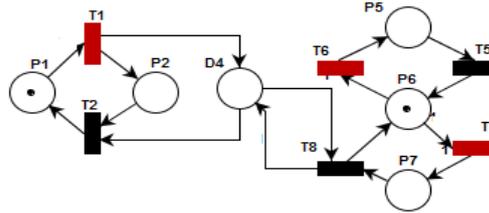
Figura 4.46. Supervisor con marcado inicial para el disparo 4



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

Se puede apreciar en la Figura 4.47 que P1 y P6 tienen marcas al mismo tiempo, lo cual, es válido ya que no viola la restricción.

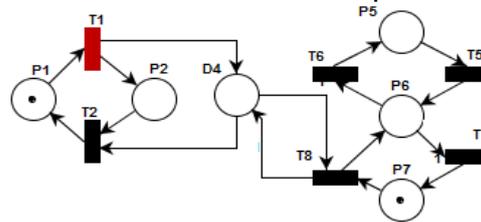
Figura 4.47. Supervisor con marcado dos para el disparo 4



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

En la Figura 4.48, se puede observar que se cumple con la restricción, pues T8 no está sensibilizada si P1 está marcado.

Figura 4.48. Supervisor con marcado tres para el disparo 4



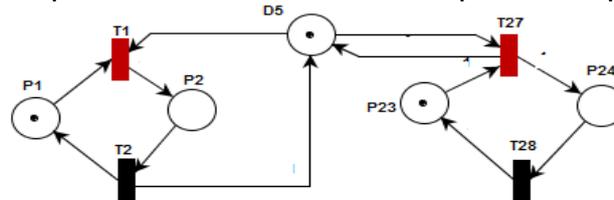
Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

4.3.11. Validación del disparo 5

$$u_2 + q_{27} \leq 1 \quad (2.12)$$

Con esta restricción si el lugar P2 contiene una marca T27 no puede dispararse. En la Figura 4.49, se muestra que no se viola esta restricción pues T27 puede estar sensibilizada si P1 contiene una marca.

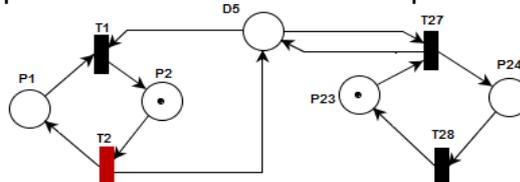
Figura 4.49. Supervisor con marcado inicial para el disparo 5



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

Con la Figura 4.50 se puede probar que si el lugar P2 contiene una marca, la transición T27 no puede estar sensibilizada si el lugar de entrada P23 está marcado, pues hay una marca en el lugar P2.

Figura 4.50. Supervisor con marcado inicial para el disparo 5



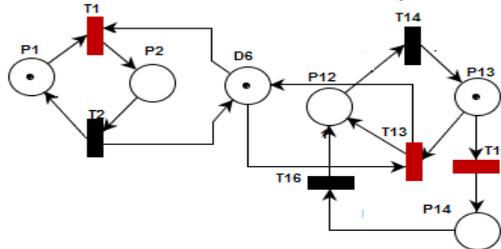
Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

4.3.12. Validación del disparo 6

$$u_2 + q_{13} \leq 1 \quad (2.13)$$

Esta restricción imposibilita que la transición T13 se dispare si el lugar P2 contiene una marca. En la Figura 4.51, P1 y P13 contienen marca, pero no violan la restricción, pues estos dos lugares pueden tener marcas al mismo tiempo.

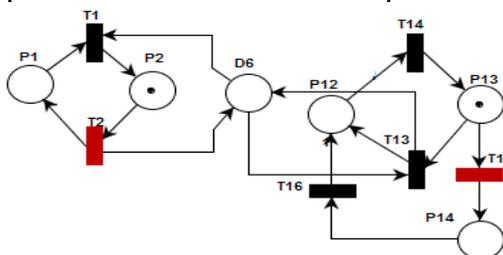
Figura 4.51. Supervisor con marcado inicial para el disparo 6



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

En la Figura 4.52, se puede mostrar que la restricción de disparo 6 no se viola, pues la transición T13 no está sensibilizada si el lugar de entrada P13 está marcado, ya que existe una marca en el lugar P2.

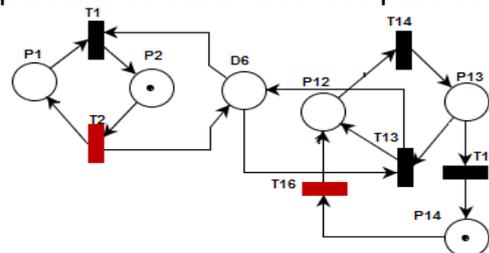
Figura 4.52. Supervisor con marcado dos para el disparo 6



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

En esta Figura 4.53, se muestra que la transición T15 se disparó y el lugar P14 se marcó, lo cual, no contradice a la restricción pues los lugares P2 y P14 pueden estar marcados al mismo tiempo permitiendo el cambio en el marcado de la RDP.

Figura 4.53. Supervisor con marcado tres para el disparo 6



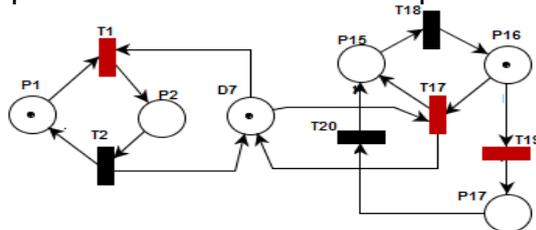
Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

4.3.13. Validación del disparo 7

$$u_2 + q_{17} \leq 1 \quad (2.14)$$

Esta restricción, imposibilita que la transición T17 se dispare si el lugar P2 contiene una marca. En la Figura 4.54, P1 y P16 contienen marca, pero no violan la restricción, pues estos dos lugares pueden tener marcas al mismo tiempo cediendo el cambio en el marcado de la RDP.

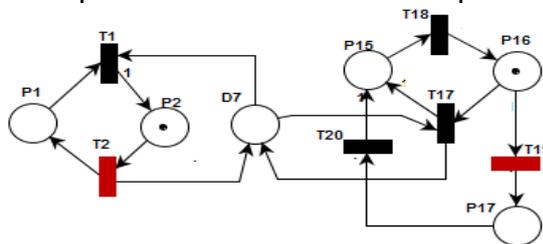
Figura 4.54. Supervisor con marcado inicial para el disparo 7



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

En la Figura 4.55, la restricción de disparo 7 se cumple, pues la transición T17 no está sensibilizada si el lugar de entrada P16 está marcado, ya que existe una marca en el lugar P2.

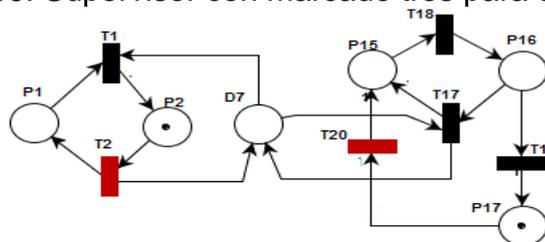
Figura 4.55. Supervisor con marcado dos para el disparo 7



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

En esta Figura 4.56, se muestra que la transición T19 se disparó y el lugar P17 se marcó, lo cual, no contradice a la restricción pues el lugar P2 y P17 pueden estar marcados al mismo tiempo, permitiendo el cambio en el marcado de la RDP.

Figura 4.56. Supervisor con marcado tres para el disparo 7



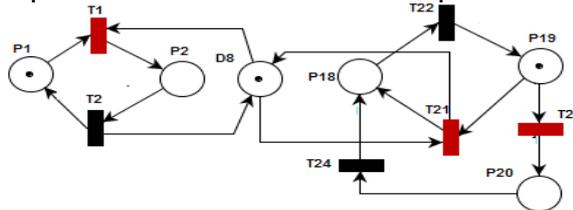
Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

4.3.14. Validación del disparo 8

$$u_2 + q_{21} \leq 1 \quad (2.15)$$

Esta restricción, impide que la transición T21 se dispare si el lugar P2 contiene una marca. En la Figura 4.57, no se viola la restricción de disparo 8 ya que T21 puede estar sensibilizada si P1 contiene una marca, permitiendo el cambio en el marcado de la Red de Petri.

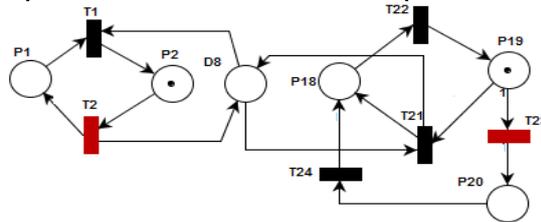
Figura 4.57. Supervisor con marcado inicial para el disparo 8



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

La Figura 4.58, efectivamente muestra que la restricción $u_2 + q_{21} \leq 1$ impide que se sensibilice la transición T21 al tener P2 una marca.

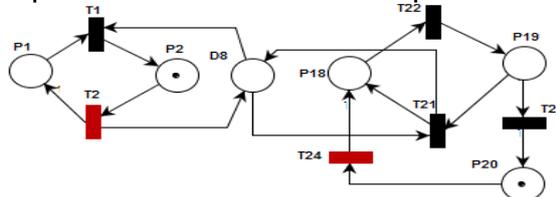
Figura 4.58. Supervisor con marcado dos para el disparo 8



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

En esta Figura 4.59, se muestra que la transición T23 se disparó y el lugar P20 se marcó, lo cual, no contradice a la restricción pues el lugar P2 y P20 pueden estar marcados al mismo tiempo permitiendo el cambio en el marcado de la RDP.

Figura 4.59. Supervisor con marcado tres para el disparo 8



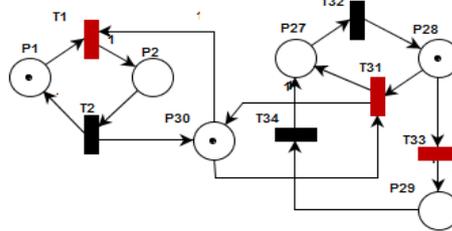
Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

4.3.15. Validación del disparo 9

$$u_2 + q_{31} \leq 1 \quad (2.16)$$

Esta restricción, imposibilita que la transición T31 se dispare si el lugar P2 contiene una marca. En la Figura 4.60, no se viola la restricción de disparo 9, ya que, T21 puede estar sensibilizada si P1 contiene una marca, permitiendo el cambio en el marcado de la Red de Petri.

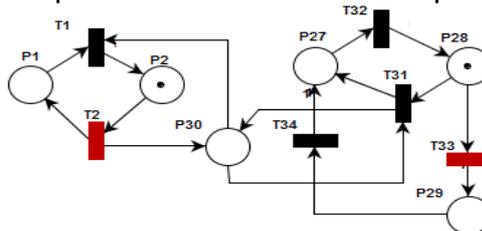
Figura 4.60. Supervisor con marcado inicial para el disparo 9



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

En el cambio de marcado de la red de la Figura 4.61, se cumple con la restricción de disparo 9, por tanto, la transición T31 no se sensibiliza si el lugar de entrada P28 está marcado ya que existe una marca en el lugar P2.

Figura 4.61. Supervisor con marcado dos para el disparo 9



Fuente: Propia, Noviembre de 2012.

Así podemos concluir que la validación de las restricciones del marcado de la Red de Petri se puede hacer mediante la comparación del marcado de la RDP en PIPE, y el estado de los bits del PLC que representan el marcado de los lugares de la RDP mapeada a código *ladder*, permitiendo corroborar que no se viola las restricciones impuestas, logrando que el proceso este bajo parámetros permitidos.

5. CONCLUSIONES TRABAJOS FUTUROS Y LIMITACIONES

5.1. Conclusiones

Gracias a la medición dinámica se puede certificar los volúmenes de producto que se recibe o se entrega en custodia, ya sea, para ser procesado y/o transportado utilizando medidores instalados en línea.

Las razones para hacer medición dinámica, se debe a que este sistema entrega altos volúmenes, ya sea, que se midan en forma volumétrica o másica, hay un control de calidad, control de inventarios, transferencia de productos en custodia y seguridad. Por ello, para garantizar el correcto funcionamiento del proceso de medición se desarrolló un sistema de supervisión basado en el software Intouch 10.1, que permite a sus operarios monitorear y observar el estado del sistema y controlar un número de actividades específicas.

Lo anterior, muestra que el supervisor es una herramienta importante, que permite la dinámica del proceso, pero a nivel controlado y restringido, de acuerdo a ciertas condiciones que se le impongan o se añadan al proceso. El supervisor permite llevar los cálculos algebraicos y el modelamiento en Redes de Petri a la implementación de PLCs y hacer que las condiciones adicionales permitan cumplir con los objetivos de flexibilidad y agilidad.

Entre las ventajas de manipular la teoría de control supervisorio, se encuentra la facilidad de analizar el proceso y el control como entes independientes, que luego serán fusionados en uno sólo, que involucrará las dinámicas de un proceso supervisado. Además, la posibilidad de trabajar el cálculo del supervisor a partir del método de los lugares invariantes, permite que a la hora de implementarlo, se facilite su programación, al contar con un supervisor modelado en Redes de Petri que no implique complejidades en la programación del lenguaje ladder.

Además, es trascendental resaltar la importancia que tiene la representación gráfica de las Redes de Petri, pues el modelado de los sistemas de eventos discretos es mucho más práctico y sencillo, que al realizarlo con otro formalismo ya que el modelo del sistema en lazo abierto puede ser generado directamente a partir del conocimiento de los estados que puede alcanzar cada componente que afecta la evolución del sistema, sin la necesidad de realizar operaciones previas. Lo anterior, permite obtener un modelo más compacto y visualmente más comprensivo, sin dejar de lado, el soporte matemático que lo respalda y sus propiedades estructurales y dinámicas que ayudan a analizar el comportamiento de los sistemas de eventos discretos.

El emplear la herramienta PIPE V4 nos permitió crear, analizar y simular Redes de Petri, además nos facilitó el cálculo de la matriz de incidencia, que pudo ser exportada a Matlab para el cálculo matricial del supervisor. Esta herramienta fue de gran utilidad a la hora de adicionar las Redes de Petri ya que podemos ver la evolución de las marcas y la dinámica del proceso. También se utilizó la herramienta CRP que nos generó código ladder desde cualquier Red de Petri creada en PIPE, ahorrándonos tiempo debido a que si no fuera por esta tendríamos que hacerlo manualmente.

Por otro lado, el sistema SCADA desarrollado, permite tener control y supervisión del sistema de medición dinámica desde el PLC y las pantallas diseñadas. Además, permite simular todo el funcionamiento del sistema solamente utilizando la aplicación en el software Intouch 10.1 de Wonderware. Las pantallas diseñadas en el programa InTouch son muy sencillas y fáciles de operar, por lo que la persona que maneje el sistema no tendrá dificultad alguna. El sistema de supervisión diseñado e implementado, cumple a cabalidad los objetivos propuestos sin violar estados no deseados y permitiendo el adecuado funcionamiento del sistema de medición dinámica.

Por último el software Intouch, es capaz de trabajar en ambientes industriales, en los que se requiere monitorear varios equipos involucrados y que son capaces de enviar y recibir información a través de algún protocolo de comunicación industrial; para ello, Intouch, utiliza un I/O Server, el cual, tiene como tarea principal la comunicación entre los principales equipos involucrados en el proceso y el computador.

5.2. Trabajos futuros

Para un profesional con el perfil de un ingeniero en Automática Industrial, es importante incluir en su formación académica información acerca de la medición dinámica de hidrocarburos, ya que constituye una opción interesante en el desarrollo de las empresas petroleras en nuestro país.

Sería interesante como trabajo futuro en la facultad, el desarrollo de un HMI para las plantas del laboratorio de procesos haciendo uso del software Intouch, que permita a sus operarios monitorear y observar el estado del sistema y controlar un número de actividades específicas de forma más didáctica y fácil.

Por otro lado se espera entonces, que este proyecto sirva como herramienta para conocer que la iteración del proceso y el control no son condiciones aisladas, sino por el contrario, son un conjunto de estados y eventos que pueden ser integrados y coordinados a partir de supervisores

que involucren las necesidades del administrador del proceso, sin que este pierda de vista las tareas programadas inicialmente.

5.3. Limitaciones

La mayor limitante para trabajos futuros en la universidad del Cauca está dada por las licencias del software ya que Intouch no es un software libre. Es por eso que limita las funciones gráficas que llevan a capacidades de gestión de operaciones, control y optimización a un nivel completamente nuevo. Ningún otro HMI en el mercado puede compararse con Intouch en término de innovación, integridad de arquitectura, conectividad e integración de dispositivos, ruta de migración de versiones de software sin interrupciones y facilidad de uso

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

Ley del 99, fundamentada mediante el decreto 1753/94 artículo 8, Ministerio de medio ambiente

¡Error! No se encuentran el origen de la referencia.

Norma API, [Consultado en noviembre de 2012], disponible en <http://www.api.org/>

¡Error! No se encuentran el origen de la referencia.

Instituto Americano de Petróleo. Calibración de tanques. Cuarta edición. Washington, D.C. 2005

¡Error! No se encuentran el origen de la referencia.

Instituto Americano de Petróleo. Calibración de tanques. Cuarta edición. Washington, D.C. 2005

orig
en
de
la
refe
ren
cia.

¡Err
or!

No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.

Instituto Americano de Petróleo. Medición de tanques. Segunda edición. Washington, D.C. 2001

¡Err
or!

No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.

Instituto Americano de Petróleo. Sistemas de probadores. Tercera edición. Washington, D.C. 2005

¡Err
or!

No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.

Instituto Americano de Petróleo. Medición de hidrocarburos en transferencia de custodia. Cuarta edición. Washington, D.C. 2005

¡Err

Instituto Americano de Petróleo. Ensamble de medidores. Tercera

or! edición. Washington, D.C. 2004

**No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.**

¡Err Instituto Americano de Petróleo. Determinación de la temperatura.
or! Primera edición. Washington, D.C. 2001

**No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.**

¡Err Instituto Americano de Petróleo. Muestreo. Primera edición. Washington,
or! D.C. 1995

**No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.**

¡Err Instituto Americano de Petróleo. Determinación de la densidad. Primera
or! edición. Washington, D.C. 2003

**No
se
enc
uen
tra
el
orig**

en
de
la
refe
ren
cia.

¡Err
or!

No
se

enc
uen

tra
el

orig
en

de
la

refe
ren

cia.

¡Err
or!

No
se

enc
uen

tra
el

orig
en

de
la

refe
ren

cia.

¡Err
or!

No
se

enc
uen

tra
el

orig
en

de
la

refe
ren

cia.

¡Err
or!

Instituto Americano de Petróleo. Agua y sedimento. Primera edición. Washington, D.C. 2004

Instituto Americano de Petróleo. Datos de propiedades físicas. Primera edición. Washington, D.C. 2004

Instituto Americano de Petróleo. Cálculo de cantidades de petróleo. Segunda edición. Washington, D.C. 1995

Instituto Americano de Petróleo. Aspectos estadísticos de medición y muestreo. Primera edición, Washington, D.C. 2006

No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.

¡Err
or!
No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.

Instituto Americano de Petróleo. Guías para la utilización del sistema de internacional de unidades (SI) en la industria petrolera y afines. Primera edición, Washington, D.C

¡Err
or!
No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.

Instituto Americano de Petróleo. Mediciones marítimas. Primera edición, Washington, D.C.

¡Err
or!
No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.

Instituto Americano de Petróleo. Medición de pérdidas por evaporación. Primera edición, Washington, D.C.

¡Err
or!
No
se
enc
uen
tra
el
orig
en

de
la
refe
ren
cia.
¡Err
or!
No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.
¡Err
or!
No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.
¡Err
or!
No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.
¡Err
or!
No

Mota. Eduardo. Manual de medición de hidrocarburos. 1a Edición. Medición dinámica de hidrocarburos: Ecopetrol. 2008.

“Archivos de conducción” [Consultado en Noviembre de 2012], Disponible en http://www.ingenieria.unam.mx/~jagomezc/materias/ARCHIVOS_COND UCCION/CAPITULO%20VIII.pdf

OCENSA Y SWCOL. Sistema integrado de gestión. Modulo de sistemas de medición. Primera edición. 2010

Castellanos. J y Solaque. L, “Modelado con Redes de Petri e implementación con grafcet de un sistema de manufactura flexible con procesos concurrentes y recursos compartidos”. Tesis de pregrado.

se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.
¡Err
or!
No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.
¡Err
or!
No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.
¡Err
or!
No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de

Colombia. 2010.

Martínez. José. "Diseño de un gestor de Redes de Petri". Tesis de pregrado. Universidad de Colima 2003

"Teoría de Redes de Petri" [Consultado en Septiembre de 2012], Disponible en <http://freedownload.is/doc/apunte-de-redes-de-petri-7353670.html>

Murat. Uzam. "Petri-Net-Based Supervisory Control of Discrete Event Systems And Their Ladder Logic Diagram Implementation". Tesis de pregrado. Universidad de Salford. Reino Unido. 1998

la
refe
ren
cia.
¡Err
or!
No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.
¡Err
or!
No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.
¡Err
or!
No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.
¡Err
or!
No
se

Rendón M. Ibelsy V. "Desarrollo de un Sistema SCADA para el proceso de producción de un Central Azucarero basado en el estándar ISA 88". Tesis pregrado. Universidad de los Andes. Colombia 2009.

Moody. Jhon O, Anstsaklis. Panos J. "Petri Net Supervisors for DES with Uncontrollable and Unobservable Transitions". Universidad de Notre Dame. 1998

Cárdenas. M Teresa, Sandoval. Víctor G. "Supervisores de secuencia de eventos discretos diseñados con Redes de Petri bajo el software Arena". Tesis pregrado. Universidad del Cauca. Colombia. 2012

Chacón, E; Besembel, I.; Narciso, F; Montilva, J and Colina, E. "An integration architecture for the automation of continous production complexes. ISA Transactions" Tesis pregrado. Universidad de los andes. 2002

enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.

¡Err
or!
No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.

“Modelo teórico CIM”. Propuesto por NationalInstitute of standard and technology

No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.

¡Err
or!
No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.

¡Err
or!
No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de

“Comunicación de una red industrial”. [Consultado en Septiembre de 2012], Disponible en <http://sp.hartcomm.org/protocol/about/aboutprotocol.html>

la
refe
ren
cia.

¡Err
or!
No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.

Pazos. Edilson. "Implementación de un sistema de monitoreo local remoto para generadores de la central hidroeléctrica ALAO utilizando Intouch". Tesis pregrado. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Ecuador. 2011

¡Err
or!
No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.

Andrade. Rogger y Macas. Walter, "Diseño y construcción de un módulo didáctico para medir y controlar caudal y nivel", Tesis de pregrado. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, 2010.

¡Err
or!
No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.

"Comunicación Intouch". [Consultado en Noviembre de 2012], Disponible en <http://es.scribd.com/doc/95050432/Comunicacion-del-INTOUCH-DDE>

¡Err
or!
No

Acerca de Pipe, [Consultado en Noviembre de 2012], Disponible en <http://pipe2.sourceforge.net/about.html>

se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.
¡Err
or!
No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.
¡Err
or!
No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.
¡Err
or!
No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de

Pere. Catalina, Knottenbelt. William. "PIPE V5: Petri Net Tool for Performance Modeling". Tesis de grado.

"Matlab",[Consultado en Noviembre de 2012], Disponible en <http://www.mathworks.com/products/matlab/>

Buchely. Cristhian, Ruiz. Fausto. "Herramienta basada en Redes de Petri para diseño de supervisores de sistemas de eventos discretos". Monografía de grado. Universidad del Cauca. Colombia. 2012

la
refe
ren
cia.
¡Err
or!
No
se
enc
uen
tra
el
orig
en
de
la
refe
ren
cia.

“estándar IEC 61131”, [Consultado en Noviembre de 2012], Disponible en <http://isa.uniovi.es/docencia/IngdeAutom/transparencias/iec1131-3%20espa%F1ol.pdf> .

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. Cadena de valor”. [Consultado en febrero de 2013], disponible en http://www.ecopetrol.com.co/especiales/ReporteGestion2012/nuestra_cadena_01.html

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. “Estrategia cadena de valor”. [Consultado en febrero 2013], disponible en <http://inn-edu.com/Estrategia/EstrategiaCadenaValor.html>