

# **Sistema de Supervisión para el Proceso de Medición Dinámica de Hidrocarburos**

**Oscar Amaury Rojas A.**

Grupo de I+D en Automática Industrial, Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, orojas@unicauca.edu.co

**Yeny Cristina Zea Yanza**

Grupo de I+D en Automática Industrial, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, yczea@unicauca.edu.co

**Cristian Campo Guzman**

Grupo de I+D en Automática Industrial, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, cristiancampo56042@hotmail.com

## **RESUMEN**

En el presente artículo se presenta la metodología de diseño y el desarrollo de un supervisor basado en sistemas a eventos discretos con Redes de Petri que permita determinar la cantidad de fluido que circula a través de una tubería de transporte de hidrocarburos, cumpliendo los requisitos exigidos por la norma API y restringiendo condiciones de anomalía y fallas en el proceso para finalmente realizar la implementación bajo una plataforma tecnológica existente en el proceso de producción.

**Palabras Clave:** Control supervisorio, Redes de Petri, Norma API, Medición Dinámica, Sistema SCADA.

## **ABSTRACT**

Design methodology and the development of a supervisor based on discrete event systems with Petri nets that allows to determine the amount of fluid flowing through an oil pipeline, fulfilling the requirements is presented in this article API standard and restricting conditions anomaly and flaws in the process and finally to deploy on an existing technology platform in the production process.

**Keywords:** Supervisory Control, Petri Nets, API Standard, Dynamic Measurement, SCADA System.

## **1. INTRODUCCIÓN**

El petróleo es un producto esencial para muchas industrias, y es de vital importancia para el mantenimiento de la misma civilización industrializada. En las grandes industrias petroleras a nivel mundial, es común que haya diferencias entre los inventarios físicos y contables, debido a errores de redondeo realizados en conversiones entre diferentes unidades de medición, o debido a la poca precisión de los instrumentos de medición, para dar solución a esta grave problemática, las petroleras utilizan sistema de medición dinámica para realizar transferencia de custodia de hidrocarburos, básicamente "se utiliza para certificar los volúmenes de producto que se reciben o se entregan en custodia ya sea para ser procesado y/o transportado a través de equipos diseñados para esta función, llamados medidores, los cuales toman la medida de la variable temperatura y presión para el cálculo del caudal que atraviesa la tubería" (Mota, E. 2008).

Es por ello que la realización con éxito de la medición de cantidad y calidad de los productos, mejora la competencia, obteniéndose resultados confiables en los sistemas, disminuyendo las inconsistencias y el reporte de volúmenes con baja incertidumbre, exigiendo a las empresas desarrollar ventajas competitivas y mejorar el desarrollo tecnológico.

Para realizar el diseño e implementación de un sistema de supervisión para el proceso de medición dinámica de hidrocarburos, se pretende hacer que el proceso y el control, sean entes dinámicos e integrados; donde el flujo de información no sea unidireccional, y así, mediante la teoría de control supervisorio poder modelar Redes de Petri. Todo proceso involucra el modelado 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 estos 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 permiten ver la dinámica y funcionamiento del proceso.

De igual manera, hoy en día, no es posible concebir un sistema de medición dinámica sin considerar el empleo de normas que regulen su manufactura, diseño, calibración, mantenimiento un ejemplo de estas es la norma del American Petroleum Institute (API,2012). Así pues, este documento muestra principalmente los resultados obtenidos en el cálculo del supervisor para el modelado del sistema de medición dinámica de hidrocarburos sin dejar a un lado la norma API, la obtención del sistema a eventos discretos del supervisor y la arquitectura implementada.

## **2. CONCEPTUALIZACIÓN**

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 la temperatura, la presión, y el flujo son llevadas por medio de señales eléctricas a un computador de flujo donde se determina el volumen estándar correspondiente.

Para cumplir este propósito es relevante estudiar la normativa internacional, por lo tanto se encuentra como referencia la norma API que es usada específicamente en la industria petrolera y petroquímica, ya que cubre 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 (OCENSA, 2010).

Las Redes de Petri (RDP), 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. 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. 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. (Murata, 1989).

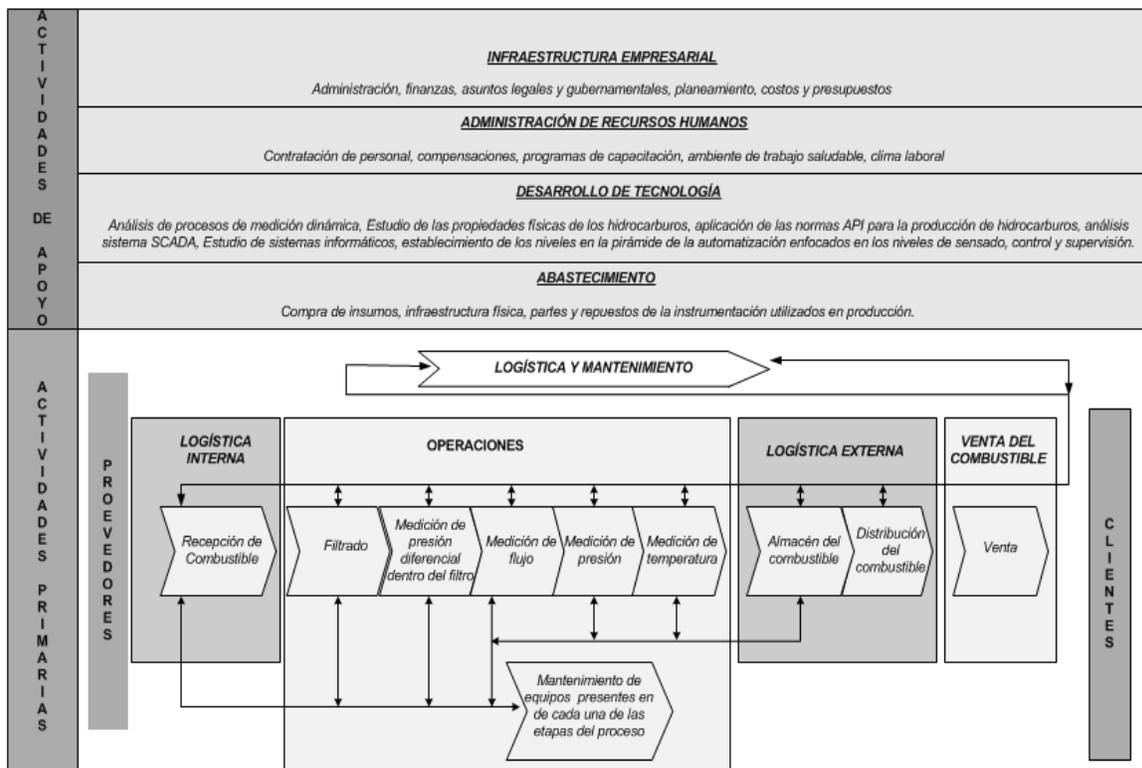
La teoría de control supervisorio, es un enfoque general que se le da a los sistemas de control a eventos discretos, con el que se pretende integrar los sistemas a eventos discretos, las especificaciones de control y la síntesis automática del proceso a controlar, y así, generar los estados y eventos deseados. Esta teoría propone representar el comportamiento del sistema a controlar con un lenguaje formal que debe ser generado por un SED. 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 (Murat, U. 1998).

### 3. MODELADO DEL PROCESO DE MEDICIÓN DINÁMICA DE HIDROCARBUROS.

#### 3.1 CADENA DE VALOR

El modelo de proceso basado en la cadena de valor toma en cuenta el flujo de información, conocimientos y productos que deben existir entre los distintos componentes del proceso con el fin de acrecentar el valor del producto y de la información del sistema de producción. Este flujo dinámico de información y de productos existente en la cadena de valor producirá cambios en el estado del sistema de medición dinámica de hidrocarburos. El modelo basado en la cadena de valor se muestra en la figura 1, en nuestro caso se hace énfasis en el eslabón de operaciones dentro de las actividades primarias del proceso.



**Figura 1. Cadena de valor de la empresa SWCOL Ltda.**

En el eslabón de operaciones se describe detalladamente el proceso de medición dinámica, en donde se encuentra el proceso de filtrado que tiene como objetivo capturar las partículas del crudo, el proceso de medición de presión diferencial del filtro permite evaluar el estado del filtro, el proceso de medición de flujo, el proceso de medición de la presión y por último el proceso de medición de temperatura.

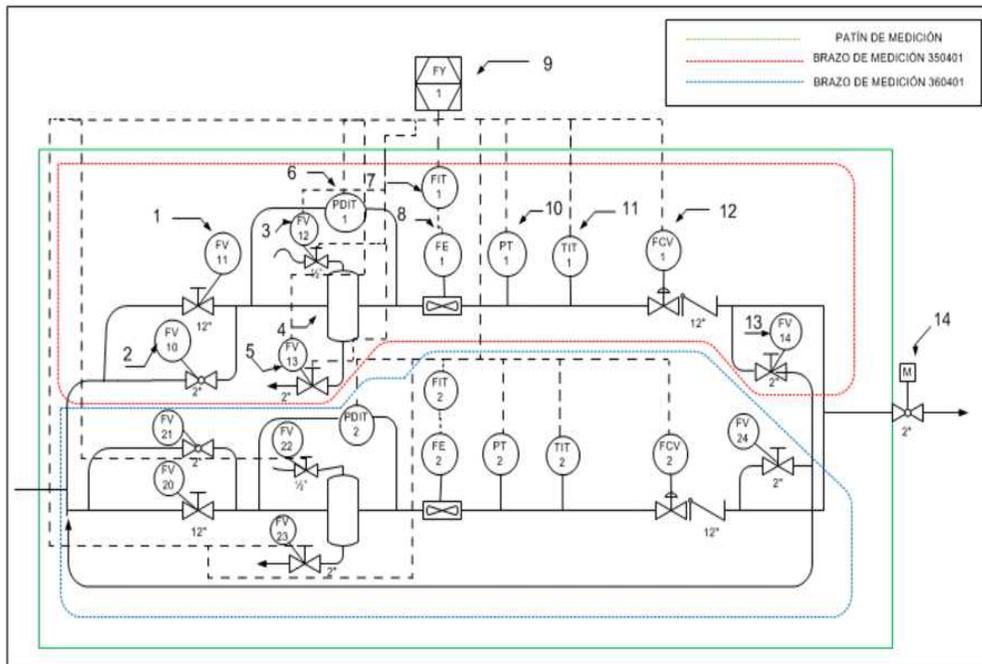
De igual manera, se logró definir las especificaciones de medición con referencia a la norma API, en donde la densidad relativa varía entre 22.1 y 34 °API, el valor de la gravedad API está dentro del rango de 18 a 22 °API. A lo largo de la tubería del sistema de medición dinámica se tiene la temperatura, la cual no puede ser mayor a 150 °F, la presión en el filtro y en el brazo de medición no será superior a 20 PSI.

### 3.2 ARQUITECTURA DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DINÁMICA

Se propone 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. El modelo de referencia para automatización industrial (Chacón, E.; Cardillo, J; Chacón, R; Gutierrez, D y Rojas, O. 2008) escogido para la representación del proceso caso de estudio, presenta 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 global del proceso.

En el proyecto se enfatizó en el área en el área correspondiente a la arquitectura de tecnologías de información y comunicaciones, debido a que ésta ligada de forma directa con el desarrollo del proyecto. En esta parte de la pirámide del Modelo Referencial de Automatización Industrial, se definen las arquitecturas de redes de comunicaciones, los equipos necesarios para los sistemas de almacenamiento y transferencia de información, y los instrumentos que permiten la ejecución de aplicaciones y procedimientos de tomas de decisiones del proceso (Chacón, E; Besembel, I.; Narciso, F; Montilva, J and Colina, E. 2002).

En el nivel 1 se encuentra distribuido 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.



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

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 control supervisorio del proceso, se realizaría mediante la utilización de sistemas a eventos discretos.

### 3.3 MODELADO DINÁMICO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DINÁMICA

Los lugares corresponden a las variables de estado del sistema y las transiciones a sus transformaciones. El problema puede ser analizado a partir de estados y eventos del proceso. Para la adición de las Redes de Petri se recurren a herramientas software de simulación de las dinámicas del sistema, 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. El modelo del sistema de cada uno de los instrumentos de la figura 2 en Redes de Petri se muestra en la figura 3.

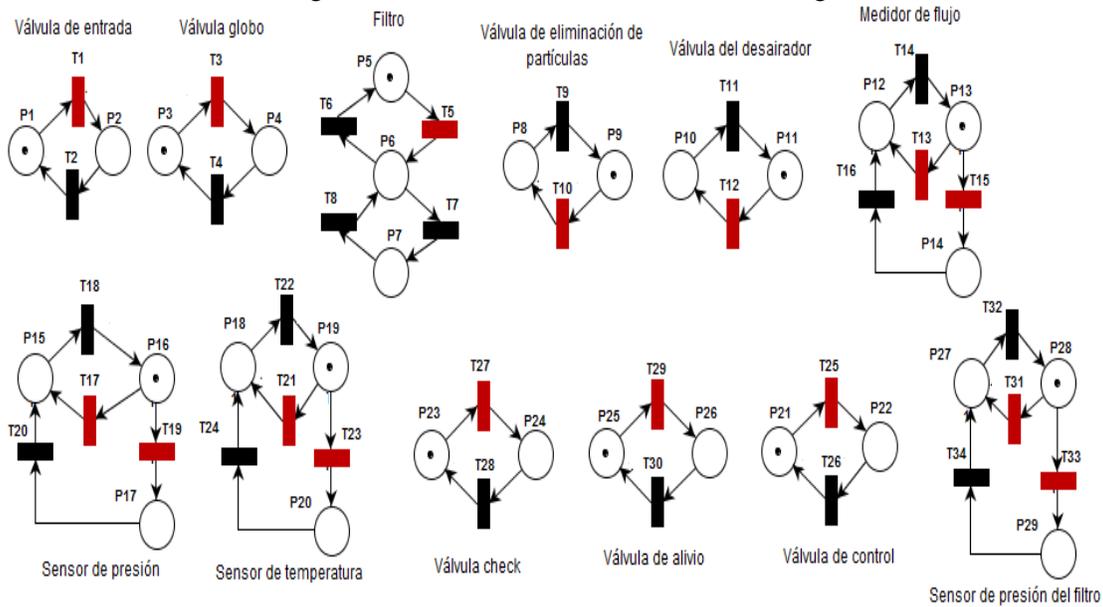


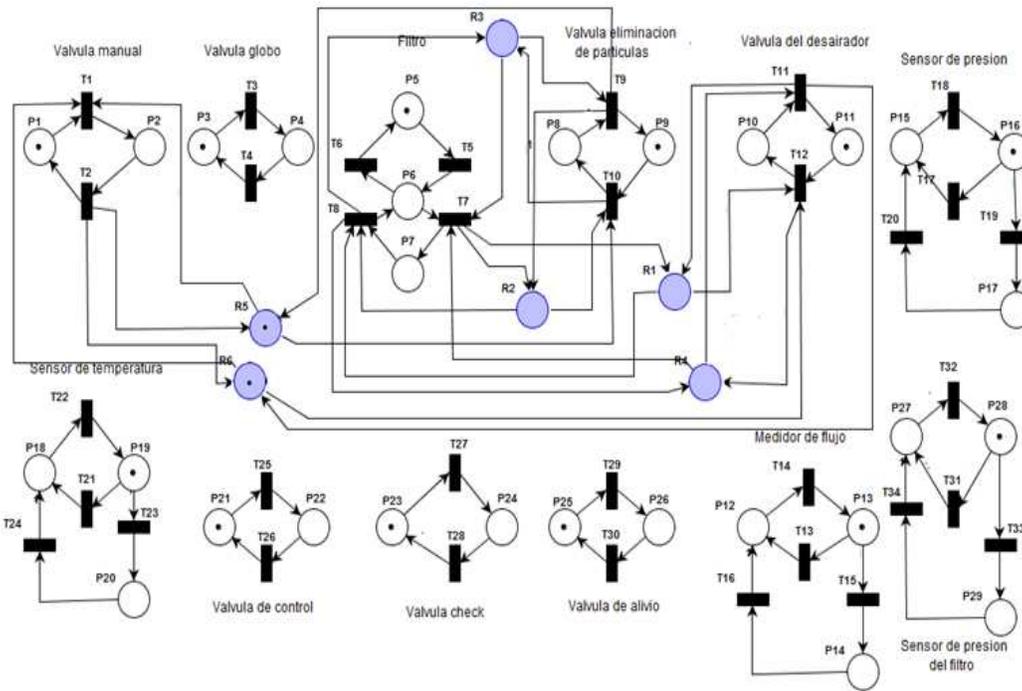
Figura 3. Modelo del sistema de medición dinámica en Redes de Petri

### 3.4 MODELADO DINÁMICO DE CONTROL SUPERVISORIO PARA DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DINÁMICA

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. 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.

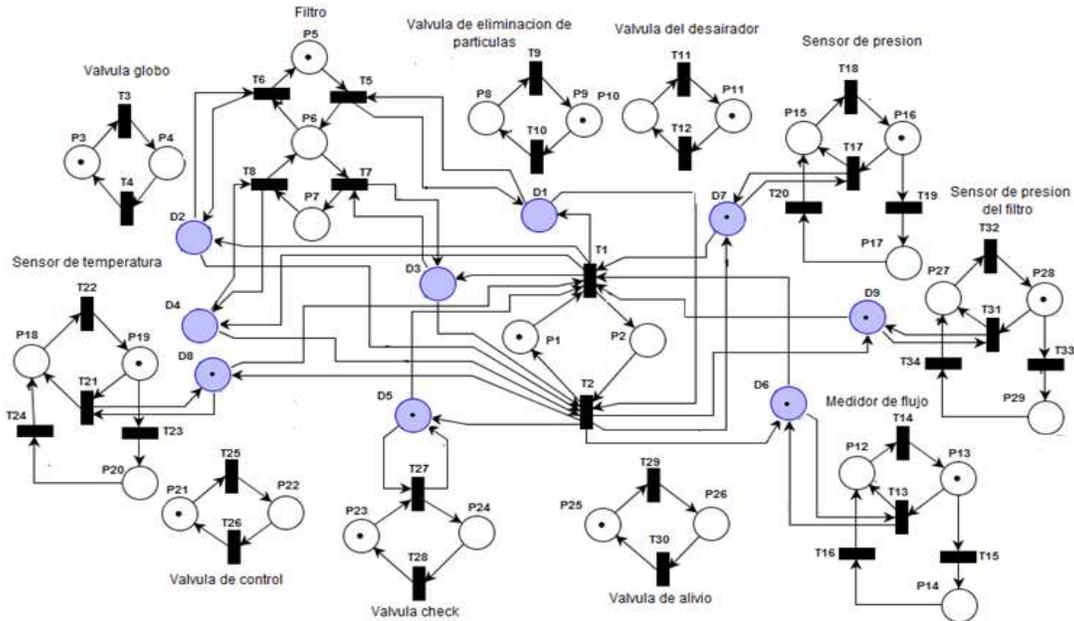
En enfoque de la supervisión del sistema de medición dinámica de hidrocarburos se basa en un sistema de eventos discretos, el cual se encargará de forzar una combinación de predicados compuestos de variables continuas y variables discretas dependiendo del estado en el que se encuentre el proceso. Esta combinación de predicados corresponde a una activación de transiciones que deben ser disparadas en los tiempos de respuesta esperados por el sistema como respuesta a las situaciones ante las cuales el supervisor está diseñado (Moody, J and Anstsaklis, P., 1998)

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 6 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. El esquema del supervisor que se observa en la Figura 4, muestra la dinámica del proceso de medición, de tal forma que la habilitación de las transiciones deseadas sea dada a partir de su debida sensibilización. Los círculos en azul son los 6 slacks que corresponden a los seis lugares de control adicionales por cada restricción que se le impuso al sistema.



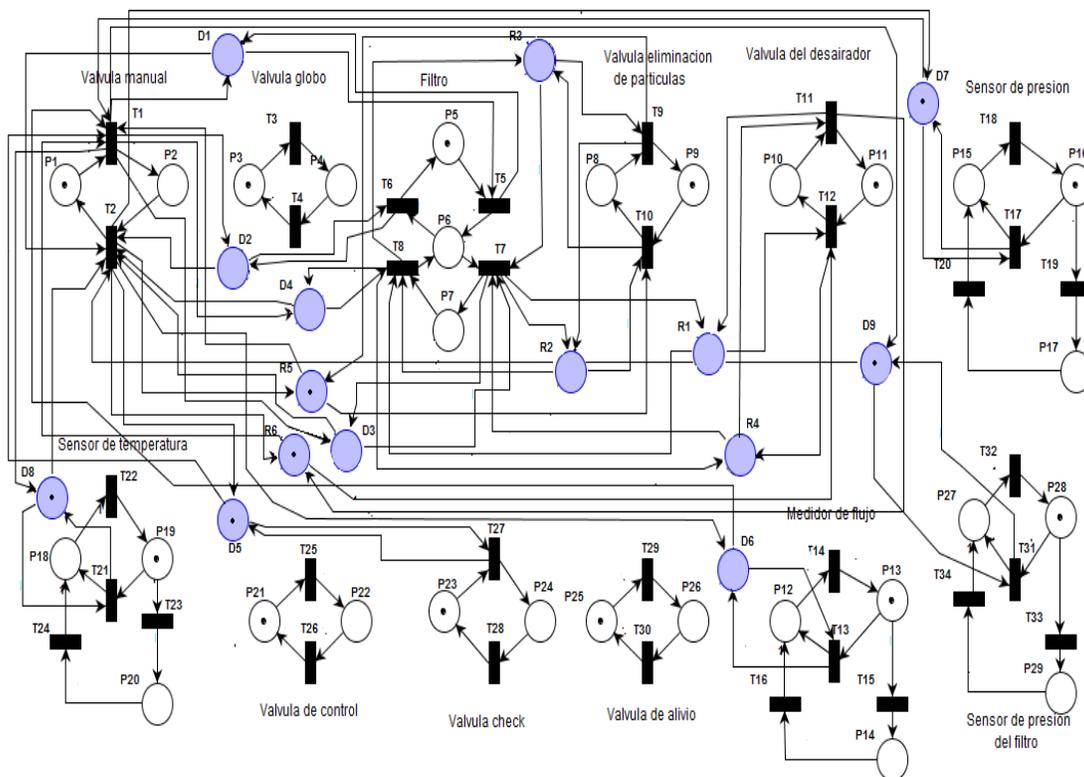
**Figura 4. Red de Petri supervisada basada en invariantes de lugar**

Para una correcta operación del sistema se agregaron al sistema 10 restricciones que incluye vector de disparo, estas se emplean si se necesita que una transición no se dispare si ciertos lugares contienen marcas. El esquema del supervisor con las 10 restricciones que incluyen vector de disparo se observa en la figura 5. Los círculos en azul son los 10 slacks que corresponden a los diez lugares de control adicionales que se le impuso al sistema.



**Figura 5. Supervisor con todas las restricciones que incluyen vector de disparo**

En la figura 6, se muestra el modelo del sistema de medición dinámica que incluye todas las restricciones de invariante de lugar y las restricciones de disparo y las dinámicas propias del proceso.



**Figura 6. Modelo Dinámico del Supervisor Resultante**

### 3.5 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DINÁMICA

Para convertir el supervisor del proceso mostrado en la Figura 6, 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. Después de haber diseñado el supervisor y de definir la configuración física del PLC, se continúa 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 (Bucheli, C and Ruiz, F. 2012), el resultado de esta operación es un archivo “.SLC” para el software de programación. 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 (Bucheli, C and Ruiz, F. 2012), la cual, adecua la configuración del PLC, 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.

La interfaz hombre-máquina desarrollada se ha implementado en un software de supervisión comercial en el cual se han definido 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 (Figura 7), Pantalla de menú principal (Figura 7), Pantalla de programación del proceso (Figura 8), Pantalla del proceso (Figura 9), Pantalla de históricos en tiempo real (Figura 10), Pantalla de alarmas (Figura 10), y la Pantalla de reportes (Figura 10).

**Usuario actual**

USUARIO

PASSWORD

INICIO BATCH PATIN 360501	INICIO BATCH PATIN 360401	BATCH	REPORTE DE MEDICION
HISTORICOS	TIEMPO REAL PATIN 360501	TIEMPO REAL PATIN 360401	ALARMAS PATIN 36050

Figura 7. Pantalla de acceso y de menú principal

**INGRESE LOS SIGUIENTES DATOS**

NUMERO DEL BATCH:

PRODUCTO:

DESTINO:

ORIGEN:

GRAVEDAD API:

VOLUMEN  
PREESTABLECIDO:

Figura 8. Pantalla de Programación del Proceso

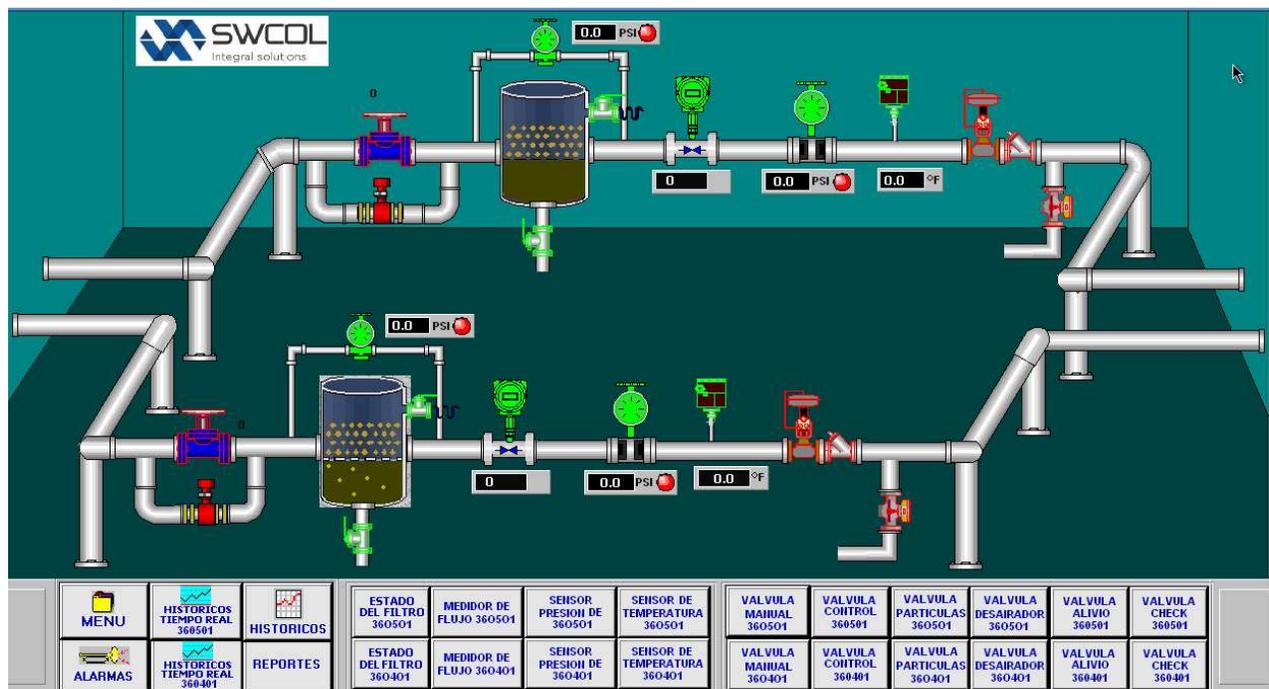


Figura 9. Pantalla del proceso

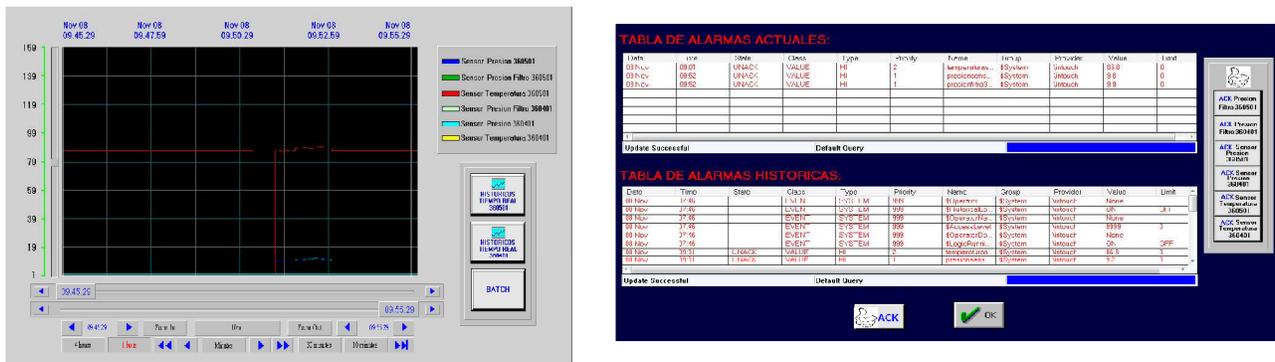


Figura 10. Pantalla de históricos, Pantalla de alarmas y pantalla de reportes.

4. CONCLUSIONES.

En el artículo presentado se 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. 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.

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 sistema SCADA desarrollado, permite tener control y supervisión del sistema de medición dinámica desde el PLC y las pantallas diseñadas. 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.

## REFERENCIAS

- API. (2012). Norma API. Disponible en [www.api.org](http://www.api.org).
- Buchely, C and Ruiz. F. (2012). Herramienta basada en Redes de Petri para diseño de supervisores de sistemas de eventos discretos. Tesis de pregrado. Universidad del Cauca. Colombia.
- Chacón, E; Cardillo, J; Chacón, R; Gutierrez, D y Rojas, O. (2008) Metodología para la automatización integrada de procesos de producción basada en el enfoque holónico. *Memorias del XIII Latin American Congress on Automation Control*, Mérida, Venezuela.
- Chacón, E; Besembel, I; Narciso, F; Montilva, J and Colina, E. (2002). An integration architecture for the automation of continuous production complexes. ISA Transactions. Tesis pregrado. Universidad de los andes. Venezuela.
- OCENSA (2010). Modulo de sistemas de medición con computadores de flujo. Primera edición.
- Moody. J. and Anstaklis. P. (1998). Petri Net Supervisors for DES with Uncontrollable and Unobservable Transitions. Universidad de Notre Dame.
- Mota, E. (2008). Medición dinámica de hidrocarburos. Manual de medición de hidrocarburos. Ecopetrol Ediciones. 1a edición, página 8.
- Murata, T. (1989). *Petri Nets: Properties, Analysis and Applications*. Proceedings of the IEEE. Vol. 77, No. 4.
- Murat. U. (1998). Petri-Net-Based Supervisory Control of Discrete Event Systems And Their Ladder Logic Diagram Implementation. Tesis de pregrado. Universidad de Salford. Reino Unido.

### ***Authorization and Disclaimer***

*Authors authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.*