

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Departamento de Automática y Sistemas Computacionales**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**“Modelo matemático del proceso de recirculación de residuales a flotador en el tratamiento de aguas residuales”**

**Autor: Yaimara Rizo Ulacia**

**Tutor: Ing. Ariel A. Hernández Pérez**

**Dr.C. Boris Luis Martínez Jiménez**

**Santa Clara**

**2011-1012**

**"Año 54 de la Revolución"**

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Departamento de Automática y Sistemas Computacionales**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**“Modelo matemático del proceso de recirculación de residuales a flotador en el tratamiento de aguas residuales”**

**Autor: Yaimara Rizo Ulacia**

**Tutor: Ing. Ariel A. Hernández Pérez**

**Dr.C. Boris Luis Martínez Jiménez**

**Santa Clara**

**2011-1012**

**"Año 54 de la Revolución"**



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

---

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

---

Firma del Autor

---

Firma del Jefe de Departamento  
donde se defiende el trabajo

---

Firma del Responsable de  
Información Científico-Técnica

## **PENSAMIENTO**

*El éxito no se logra sólo con cualidades especiales. Es sobre todo un trabajo de constancia, de método y de organización.*

*J.P. Sergent*

## **DEDICATORIA**

A mi razón existencial y puntos vulnerables: MIS PADRES y HERMANA, amigos y fuentes portadoras de sabiduría y energía recuperadora; mi única debilidad y fortaleza.

A mis amigos, y a todos los que no lo son, pero me apoyaron para terminar el trabajo, a quienes me dieron la fuerza necesaria para no claudicar cuando no creía en mí.

A todo aquel que confió en mí, sin perder la paciencia, sabiéndome capaz de llegar al final.

## **AGRADECIMIENTOS**

**"Agradecer es el gran placer de reconocer en los demás, lo que constituye una ayuda para el que agradece".**

**A mi familia, TODA, por estar siempre a mi lado y por esas horas de compañía, que la tesis y mis estudios, sin querer, le han arrebatado; en especial a Regla, Rafael y Yaima que son mi razón de ser.**

**A todos mis profesores que me han acompañado estos 5 años.**

## RESUMEN

El presente trabajo está orientado a solucionar la dificultad que tiene la unidad empresarial Refinería “Camilo Cienfuegos”, de lograr un control adecuado en su planta de tratamientos de aguas residuales; lo que trae como consecuencia la emisión de carga contaminante a la bahía cienfueguera, constituyendo así un grave problema medioambiental.

Para darle solución a la situación problemática de la investigación, planteada anteriormente, se establece como **objetivo general**: Modelar el proceso de recirculación de efluentes a flotador en la planta de tratamiento residual para la síntesis de controladores. Para ello se realiza una revisión bibliográfica para adquirir los conocimientos necesarios sobre el tema en cuestión. Posteriormente, la investigación se centra en la obtención de los modelos necesarios que permitan el ajuste de controladores efectivos, mediante la identificación experimental aplicando los métodos paramétrico y no paramétrico, obteniéndose modelos que, por sus resultados, caracterizan lo suficiente a la planta correspondiente. Por último, se realiza un reajuste a los controladores pertenecientes a los lazos de flujo de aire y flujo de recirculación, a partir de los ya existentes, mostrando los primeros mejores resultados que los últimos.

## TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO .....	i
DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
RESUMEN .....	iv
INTRODUCCIÓN .....	1
Organización del informe .....	4
CAPÍTULO 1.    Aguas Residuales.....	5
1.1    Aguas residuales.....	5
1.1.1    Contaminantes .....	6
1.2    Tratamiento de aguas residuales .....	7
1.2.1    Tratamiento de aguas residuales en Cuba.....	9
1.2.2    Importancia del tratamiento de las aguas residuales.....	10
1.3    Tratamiento físico-químico.....	10
1.3.1    Flotación como proceso de remoción de contaminantes .....	12
1.3.2    Sistemas de flotación por aire disuelto. ....	13
1.3.2.1    Parámetros de control en el proceso de flotación por aire disuelto.....	16
1.4    Consideraciones parciales .....	18

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA REFINERÍA “CAMILO CIENFUEGOS” .....	19
2.1 Descripción del sistema de tratamiento de aguas residuales en la refinería .....	19
2.1.1 Filosofía de control en la recirculación de efluentes en la actualidad .....	22
2.2 Identificación experimental del proceso de recirculación de efluentes a flotador del tratamiento residual.....	24
2.3 Descripción del sistema de control propuesto.....	28
2.4 Consideraciones Parciales .....	34
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	35
3.1 Identificación experimental de los modelos.....	35
3.2 Cálculo de los controladores .....	53
3.3 Análisis económico .....	56
3.4 Consideraciones parciales .....	58
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	59
Conclusiones.....	59
Recomendaciones .....	60
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	61
ANEXOS .....	64

## **INTRODUCCIÓN**

En el desarrollo de la vida humana, por ser el agua un elemento indispensable para la vida e imprescindible como herramienta de trabajo, resulta de gran importancia el cuidado del abastecimiento de agua limpia y potable (García 2005), y el reconocimiento de los métodos a emplear para el tratamiento de ésta, a fin de que pueda ser reubicada y reutilizada. (BIWATER 2007)

Las aguas residuales son aquellas vertientes provenientes de procesos post-industriales o uso doméstico y que para ser desechadas necesitan ser tratadas previamente, de manera tal que presenten los parámetros adecuados para su ubicación en las respectivas redes de vertido o sistemas naturales (CALVO 1999; Carazo 2003; Hernández 2004; Díaz 2009).

Las aguas residuales presentan características físicas, químicas y biológicas especiales sobre las demás aguas, que es necesario comprender para optimizar su manejo y minimizar los efectos adversos de su vertimiento, obteniendo así un mejor tratamiento ambiental de los desechos y de la calidad del agua, lo que evita efectos drásticos sobre cualquier ecosistema (A.W.W.A 2002; Carazo 2003; BIWATER 2007; Rodier 2011).

Son varios los problemas de contaminación que afectan a las aguas. Entre ellos los relacionados con el exceso de materia orgánica y los provocados por el exceso de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, como la eutrofización y la contaminación de las aguas subterráneas (Carazo 2003). A partir de este gran inconveniente, unido al problema de escasez y contaminación creciente de las fuentes destinadas a la producción de agua potable o para otras utilidades, surge la necesidad de hacer un tratamiento adecuado a las aguas residuales para disminuir su impacto en el medio ambiente y para que puedan ser empleadas con fines de reúso; labor que se realiza en las plantas de tratamiento de aguas residuales.(BIWATER 2007)

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (en lo adelante PTAR) o estaciones depuradoras de aguas residuales (en lo adelante EDARs) han adquirido en los últimos años un gran auge; a pesar de que operar estas unidades exige un coste periódico de la sociedad, no generan ningún beneficio directo en términos económicos, sino ambientales y sociales. La legislación actual en los países industrializados impone límites estrictos en la calidad del agua vertida por las plantas depuradoras, siendo el objetivo de estas poder cumplirlos (Colombia 2002; Chamizo 2003; BIWATER 2007; Monteiro 2010).

La contaminación característica de la industria petrolera está constituida, principalmente, por aceites, materia orgánica, fenoles, amoníaco y sulfuros; por lo que para tratar el agua residual de este sector se utilizan procesos biológicos, físicos y químicos, y dentro de los dos últimos, la flotación por aire disuelto que permite una mayor separación entre el petróleo y el agua (Mijaylova 2002).

Actualmente la planta de tratamientos residuales de la unidad empresarial Refinería “Camilo Cienfuegos”, cuenta con la dificultad de lograr un control adecuado en la emisión de carga contaminante a la bahía de Cienfuegos, pues no se cuenta con un método o estrategia de control que permita el correcto funcionamiento del sistema de flotadores de la planta, constituyendo esta una **situación problemática** de gran envergadura, debido a la fuerte interacción que existe entre las variables asociadas a este proceso como son: nivel de la cámara de recepción, presión y nivel en el tanque de saturación, flujo de recirculación, así como los retardos inherentes a la propia estructura constructiva del proceso. Esta situación, a causa de las afectaciones irremediables que puede ocasionar al medio ambiente, puede conllevar al cierre de la refinería, lo que provocaría cuantísimas pérdidas económicas al país.

Motivo por el cual la autora asume el siguiente **problema de investigación**: carencia de un modelo matemático para el control adecuado del funcionamiento del sistema de flotadores de la planta de residuales de la Refinería “Camilo Cienfuegos”

A partir de lo cual la investigación se centrará en el proceso de tratamiento de aguas residuales constituyendo este su **objeto de investigación** y específicamente intervendrá en el modelado matemático del proceso de recirculación de residuales, constituyendo este su **campo de acción**.

A partir de estas determinaciones se establece como **objetivo general**: Modelar el proceso de recirculación de efluentes a flotador en la planta de tratamiento residual para la síntesis de controladores.

Con el fin de dar cumplimiento al objetivo general planteado se establecen los siguientes **objetivos específicos**:

- Realizar un análisis de la bibliografía relacionada con las plantas de tratamiento de aguas residuales.
- Identificar modelos matemáticos.
- Proponer estrategias de control.

La investigación sustenta la **hipótesis** de que la aplicación de técnicas de identificación de sistemas, permitirá obtener modelos representativos para el proceso de recirculación de residual al flotador, adecuados para sintetizar controladores eficientes para dicho proceso.

El **resultado de esta investigación** será el modelo matemático en tiempo real del proceso de recirculación de residual a flotador, que permitirá sintetizar controladores más adecuados y eficientes para dicho proceso. Para ello se utiliza la tecnología de Control de Procesos Abiertos (en lo adelante OPC) de *Matlab*, que permite la comunicación *on-line* y la identificación de la dinámica de los sistemas en tiempo real.

La **actualidad** y **novedad** de la investigación se circunscribe a actualizar y perfeccionar el control en el área de tratamiento de aguas residuales de la refinería “Camilo Cienfuegos”, mediante el uso de herramientas de computación modernas; evitando así, que los sistemas del tratamiento físico-químico de las aguas residuales continúen operando de forma ineficiente; por lo que aporta una mejora en la calidad del agua que se vierte a la bahía cienfueguera; permitiendo el cumplimiento con lo establecido en la NC: 521 que establece los límites permisibles de los parámetros regulados para su vertimiento en Zonas Costeras Clase A, con el fin de reducir el impacto ambiental que esta pudiera ocasionar por vías de un aumento de la carga contaminante, pudiendo afectar la vida acuática, la salud humana, la actividad comercial y recreativa de nuestra bahía.

### **Organización del informe**

El trabajo de diploma, luego de esta introducción cuenta con tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos. Los contenidos de los capítulos, son los siguientes:

**CAPITULO I:** Se realiza el análisis teórico de la literatura especializada, referente a los conceptos de aguas residuales, sus principales contaminantes y los métodos de tratamiento de la misma. Se enfatiza en el proceso de flotación perteneciente al tratamiento físico-químico y los principales parámetros a controlar en el mismo.

**CAPITULO II:** Primeramente, se describe el proceso del tratamiento residual de la refinería y el control implementado en esta área. Además, se detalla paso a paso la metodología empleada para la identificación experimental de los modelos matemáticos y se propone una nueva estrategia de control.

**CAPITULO III:** Se exponen los resultados de los pasos seguidos para la identificación experimental, constituyendo en todos los casos resultados satisfactorios y se presenta el modelo concluyente. Además, se muestran las mejoras obtenidas en las respuestas al paso de los lazos de flujo de aire y flujo de recirculación con el reajuste efectuado al controlador de cada lazo.

## CAPÍTULO 1. Aguas Residuales

En este capítulo se abordan algunos aspectos teóricos relacionados con las aguas residuales y el tratamiento de las mismas, dirigiendo el enfoque hacia la flotación por aire disuelto en el tratamiento físico-químico y los principales parámetros a controlar en la misma. Mediante este capítulo se pretende sentar las bases para poder realizar la investigación.

### 1.1 Aguas residuales

Las aguas residuales son materiales derivados de residuos (efluentes) domésticos o de procesos industriales, los cuales por razones de salud pública y por consideraciones de recreación económica y estética, no pueden desecharse vertiéndolas sin tratamiento en lagos o corrientes convencionales (Hernández 2004; Díaz 2009).

De acuerdo a su composición se pueden clasificar en (Ramalho 2003; Fernández-Alba 2006; LTDA 2009):

- *Aguas residuales domésticas*: Aquellas procedentes de zonas de vivienda y de servicios generadas, principalmente, por el metabolismo humano.
- *Aguas residuales industriales*: Todas las aguas residuales vertidas desde locales utilizados para efectuar cualquier actividad comercial o industrial, que no sean aguas residuales domésticas ni aguas de escorrentía pluvial.
- *Aguas urbanas*: Las aguas residuales domésticas o la mezcla de las mismas con aguas residuales industriales y/o aguas de escorrentía pluvial.

Y de acuerdo a su estado de descomposición se clasifican en (Pinas, 2009):

- *Frescas*: Contienen oxígeno en su interior con olor mohoso (húmedo), además de ser turbias y de color grisáceo.

- *Sépticas*: El oxígeno se termina completamente provocando una descomposición anaerobia, son de color negro debido al desprendimiento de ácido sulfhídrico y otros gases de olor fétido.
- *Estabilizadas*: Los sólidos se descomponen generando que el oxígeno se presente de nuevo estabilizando la materia orgánica, disminuyendo de ésta manera el olor fétido y turbidez.

El correcto conocimiento de la naturaleza del agua residual, fundamenta el correcto diseño y operación de las instalaciones de recolección, tratamiento y disposición de la misma (BIWATER 2007).

### 1.1.1 Contaminantes

Según la literatura, la contaminación del agua es aquella acción o efecto que se produce al introducir elementos, compuestos o formas de energía capaces de modificar las condiciones y propiedades del agua (ya sea superficial o subterránea), de manera que se altere su calidad en relación con los usos posteriores o con su función ecológica para el desarrollo de la vida.

Los residuos industriales le confieren al agua propiedades físicas, químicas y biológicas indeseables en dependencia de la composición, concentración y el tipo de industria que provenga. Los mismos presentan tipos y composiciones muy diferentes; pueden ser muy ácidos o alcalinos y a menudo requieren un detallado análisis de laboratorio. En algunos casos tienen que ser neutralizados antes de su vertido. La toxicidad es uno de los principales problemas de la evacuación de aguas industriales (LTDA 2009). Entre los residuos más representativos de este tipo se encuentran los procedentes de las industrias del papel, mataderos, cervezas, curtiduría, alimentación, conservas alimenticias, productos químicos, petróleo, textiles, azúcar, lavanderías, carnes, cría de cerdos, clarificación de aceites, etcétera (LTDA 2009; Russell 2012).

La naturaleza de los contaminantes presentes en las aguas residuales puede ser orgánica, inorgánica y biológica (Russell 2012).

Los contaminantes orgánicos son aquellos compuestos que en su estructura química poseen fundamentalmente carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno; tales como las proteínas,

carbohidratos, aceites y grasas y otros, donde se incluyen varios tipos de compuestos como los fenoles(SCRIBD 2010).

Los contaminantes inorgánicos son de origen mineral y de naturaleza variada como: sales, óxidos, bases y ácidos inorgánicos, metales, etcétera(SCRIBD 2010).

Los contaminantes de origen biológico son aquellos organismos que pueden provocar alguna enfermedad o desequilibrio en los seres vivos al ser ingeridos, tales como bacterias, algas, hongos, virus y organismos patógenos(SCRIBD 2010).

Los compuestos orgánicos e inorgánicos se encuentran en aguas residuales procedentes de instalaciones industriales diversas(SCRIBD 2010). A diferencia de las aguas residuales domésticas, los efluentes industriales contienen con frecuencia sustancias que no se eliminan por un tratamiento convencional, bien por estar en concentraciones elevadas, o bien por su naturaleza química. Muchos de los compuestos orgánicos e inorgánicos que se han identificado en aguas residuales industriales son objeto de regulación especial debido a su toxicidad o a sus efectos biológicos a largo plazo(Fernández-Alba 2006).

Los principales contaminantes del agua son: agua residual y otros residuos que demandan oxígeno (en su mayor parte materia orgánica, cuya descomposición produce la desoxigenación del agua), como: agentes infecciosos, nutrientes vegetales, productos químicos, petróleo, minerales inorgánicos y compuestos químicos, sustancias radiactivas, el calor y sedimentos formados por partículas del suelo y minerales arrastrados por las tormentas y escorrentías (SCRIBD 2010; Rodier 2011).

## **1.2 Tratamiento de aguas residuales**

El tratamiento de las aguas residuales consta de una serie de operaciones o procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes de naturaleza física, química y biológica presentes en las aguas resultantes de procesos domésticos e industriales. El objetivo del tratamiento es producir agua limpia o efluente tratado para ser reutilizado o devuelto a un cauce receptor y un residuo sólido o fango conveniente para su reutilización o disposición (A.W.W.A 2002; Aguilar 2002; Arundel 2002). La estación donde se realizan estas operaciones se denomina Planta de Tratamientos de Aguas Residuales (Colombia 2002; Hernández 2004; Juana 2005).

Para la depuración del agua existen diversos métodos, los cuales tienen que garantizar los requerimientos deseados en el proceso; por lo que la aplicación de un método u otro fundamentalmente dependen de las características del efluente y sus contaminantes. Estos métodos son (Arundel 2002; Ramalho 2003; Hernández 2004; Rodríguez and Pantoja 2004; Juana 2005):

*Pre tratamiento:* consiste en eliminar los sólidos de mayor tamaño que pueden ocasionar problemas de mantenimiento y funcionamiento a tratamientos posteriores, así como las gravas, grasas y arenas. Para ello se puede incluir operaciones tales como: separación de grandes sólidos (pozo de grueso), desbaste, tamizado, dilaceración, desarenado, desaceitado –desengrasado, etcétera.

*Tratamiento primario:* se elimina una parte importante de los sólidos suspendidos, alrededor del 60%, así como de la materia orgánica, 30%, y nutrientes asociados a ellos. En este tratamiento se pueden realizar técnicas, bajo principios físico-químicos, como: la precipitación, coagulación, floculación y sedimentación o flotación.

*Tratamiento secundario:* son procesos biológicos, en los que la depuración de la materia orgánica biodegradable del agua residual se efectúa por la actuación de microorganismos. Habitualmente los tratamientos secundarios constan de procesos biológicos seguidos de un proceso de sedimentación.

*Tratamiento terciario o avanzado:* tiene como objetivo principal la obtención de un efluente de alta calidad, mediante técnicas físico-químicas como la filtración, coagulación, nitrificación, desnitrificación, absorción por carbón, etcétera.

Para la selección de las técnicas y operaciones a utilizar en el sistema de tratamiento del residual, además de los parámetros económicos y técnicos, se debe analizar la concentración de los siguientes contaminantes: organismos patógenos, nitrógeno, detergentes, fenoles, pesticidas, metales pesados, demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sustancias inorgánicas disueltas y los sólidos suspendidos totales. La eficiencia del sistema de tratamiento se determina en términos del porcentaje de eliminación de estos contaminantes en el agua (Carmona 2000; LTDA 2009).

### 1.2.1 Tratamiento de aguas residuales en Cuba

En el tratamiento de aguas residuales el objetivo principal es eliminar su poder nocivo, de tal manera que su uso o disposición final, pueda ocurrir de acuerdo con las reglas y criterios establecidos por las autoridades legislativas correspondientes (ver Anexo no.1- tabla1) reflejados en las normas cubanas, con la finalidad de proteger la salud y promover el bienestar de los individuos de una sociedad, al reducir la concentración de los contaminantes más importantes (Normalización 1999).

El saneamiento urbano en Cuba se garantiza mediante los sistemas públicos de alcantarillados o la evacuación doméstica a través de fosas, tanques sépticos y letrinas (Díaz 2009). La estrategia que se desarrolla permite incorporar paulatinamente estos afluentes de las fosas de las ciudades y poblaciones importantes al alcantarillado existente.

Por su parte, en la industria los métodos de tratamiento más comúnmente empleados son las lagunas de estabilización, los lodos activados, filtros percoladores, tanques sépticos, la filtración y la desinfección.

Dentro de las industrias de mayores aportes de cargas contaminantes a los cuerpos receptores se destacan las siguientes: la azucarera y sus derivados, alimenticia, papelera, textil, minera, metalúrgica y la petrolera y sus derivados. Esto sucede, no solo por la concentración de los contaminantes sino también por el alto volumen de residuos que producen (Normalización 1999; Russell 2012).

La NC 27:1999 y NC 521:2007 son normas cubanas que respaldan y regulan lo referente a las aguas residuales. La primera se aplica a todas las aguas residuales generadas por las actividades sociales y económicas, constituye un instrumento legal para garantizar la calidad de las aguas terrestres mediante la regulación de las descargas de residuales a estas, lo que a su vez sirve de base para la elaboración de estrategias de saneamiento. Los residuales líquidos a verter al sistema de alcantarillado y a los cuerpos receptores deben cumplir con las concentraciones que se indican en ella (Normalización 1999). La segunda impone las reglamentaciones para el vertimiento de aguas residuales a las costas y aguas marinas (Normalización 2007).

*Infraestructura del tratamiento de aguas residuales en Cuba:*

- 476 lugares con alcantarillado
- 3996,0 km de redes de alcantarillado
- 126 Estaciones de bombeo
- 8 Plantas de tratamiento de aguas residuales
- 304 Sistemas de lagunas de estabilización
- 846 813 Fosas sépticas

**1.2.2 Importancia del tratamiento de las aguas residuales**

Debido al constante crecimiento demográfico y desarrollo industrial la naturaleza no es capaz, por si sola, de purificar los desechos existentes en las aguas (García 2011).

La contaminación seria del agua da lugar a la modificación de sus características propias como: aglomeración de sólidos en el fondo de los cauces, proliferación de microorganismos patógenos, aumento de compuestos tóxicos, eutrofización, muerte de flora/fauna, eliminación de oxígeno disuelto y producción de olores desagradables por la descomposición de materia orgánica, dando origen a condiciones insalubres que ocasionan enfermedades graves e incluso la muerte(Pinas 2009).

El adecuado tratamiento de aguas residuales industriales y su posterior reutilización para múltiples usos contribuye a un consumo sostenible del agua y a la regeneración ambiental del dominio público hidráulico y marítimo y de sus ecosistemas(Fernández-Alba 2006). Sin olvidar que el agua de calidad es una materia prima crítica para la industria (A.W.W.A 2002; García 2011).

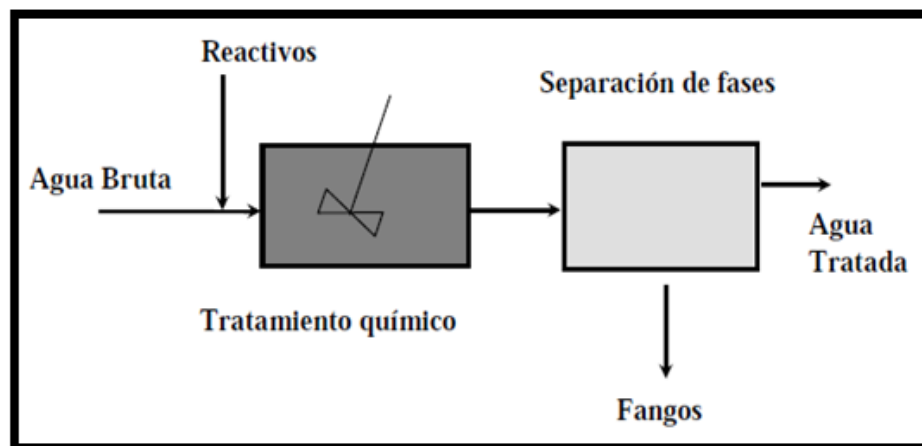
Por tal motivo, es de vital importancia tomar conciencia, contribuir y desarrollar el saneamiento ambiental, mediante soluciones y vías que permitan afrontar el problema en sus propias dimensiones.

**1.3 Tratamiento físico-químico**

En el tratamiento físico-químico se tiene por objeto modificar las propiedades de algunas sustancias presentes en el agua, con el fin de acelerar su separación de la fase líquida, mediante el efecto de reactivos químicos denominados precipitantes (para la materia

disuelta), coagulantes y/o floculantes (para la materia coloidal), y desemulsificadores (para eliminar emulsiones). Este tipo de tratamientos se ubica en ocasiones entre los tratamientos primarios, con el fin de proteger el tratamiento biológico de la entrada de tóxicos (Carmona 2000; SCRIBD 2010). En otras ocasiones se clasifica dentro de los tratamientos terciarios, posteriores al biológico. También puede constituir una única etapa dentro del tratamiento del agua residual (Aguilar 2002).

Se suele denominar de esta manera, al tratamiento constituido por operaciones químicas, en primer lugar, tales como la coagulación y floculación, seguidos de una operación básica de separación de fases (sólido-líquido ó líquido-líquido) como la sedimentación o flotación, principalmente, o filtración (LTDA 2009; SCRIBD 2010). (Figura 1.1).



**Figura 1.1 Diagrama de bloques del tratamiento físico-químico**

A continuación se explican brevemente las operaciones convencionales que se realizan en este tipo de tratamiento (A.W.W.A 2002; Aguilar 2002; Arundel 2002; Russell 2012):

*Coagulación:* consiste en la desestabilización de partículas coloidales por neutralización de sus cargas, mediante un producto químico llamado coagulante, dando lugar a la formación de un floculo o precipitado. Los principales coagulantes que se utilizan son las sales de hierro y aluminio. Los mecanismos básicos en este proceso son: la neutralización de la carga del coloide y la inmersión en un precipitado o flóculo de barrido.

*Floculación:* trata la unión entre los flóculos ya formados en el proceso de coagulación con el fin de aumentar su volumen y peso de forma que puedan decantar. Consiste en la captación mecánica de las partículas neutralizadas dando lugar a un entramado de sólidos

de mayor volumen. De esta forma, se consigue un aumento considerable del tamaño y densidad de las partículas coaguladas, aumentando por tanto la velocidad de sedimentación de los flóculos. La floculación es estimulada por una agitación lenta de la mezcla puesto que así se favorece la unión entre los flóculos. Un mezclado demasiado intenso provocaría la rotura de los flóculos ya formados. Los factores que permiten una floculación exitosa son: que la coagulación previa sea lo más perfecta posible y que la agitación sea lenta y homogénea.

*Sedimentación:* constituye la operación física en la que se aprovecha la fuerza de la gravedad, pues hace que una partícula más densa que el agua tenga una trayectoria descendente, depositándose en el fondo. Esta operación será más eficaz cuanto mayor sea el tamaño y la densidad de las partículas a separar del agua, es decir, cuanto mayor sea su velocidad de sedimentación. A esta operación de sedimentación también se le suele denominar decantación.

*Flotación:* consiste en generar pequeñas burbujas de gas (aire), que se asociarán a las partículas presentes en el agua y serán elevadas hasta la superficie, de donde son arrastradas y sacadas del sistema. Esta técnica será adecuada en los casos en que las partículas de la materia en suspensión tengan una densidad inferior o muy parecida a la del agua, como en el caso de emulsiones.

### **1.3.1 Flotación como proceso de remoción de contaminantes**

Desde el surgimiento del proceso de flotación para la remoción de contaminantes se han investigado varias técnicas a lo largo de los años, algunas de estas son (Básico 2000; Santander 2008):

*Flotación de Partículas Adsorbentes (FPA):* La base de este proceso es la selección de un material adsorbente adecuado, o sea, con elevada área superficial y alta reactividad con el elemento contaminante (alta capacidad de adsorción).

*Flotación de Agregados Coloidales (FAC):* La base de este proceso es la formación de agregados a partir de la adsorción/coprecipitación de los iones contaminantes en coloides con alta área superficial, baja toxicidad y buenas características de flotación, especialmente

con el empleo de microburbujas generadas. La cinética de levitación de las unidades burbujas-partículas puede ser incrementada con la adición de polímeros o hidrofobizantes.

*Flotación electrolítica:* La oxidación anódica del ion cloruro de una suspensión, con pH alrededor de 7,5 y con producción de ion hipoclorito y oxígeno, se utilizan como unidad de generación de las bolas en la flotación de suspensiones, en las que se usan cloruro férrico como coagulante primario y polímero orgánico como auxiliar de floculación.

La aplicación práctica de la flotación en las instalaciones de tratamiento de aguas residuales, en la actualidad, se distingue por el uso del aire como agente responsable del fenómeno y en función de cómo se introduce en el líquido se define la técnica de flotación utilizada (Básico 2000; Carmona 2000; Fernández-Alba 2006).

*Flotación por Aire Inducido:* El líquido a tratar es conducido a través de un tanque de sección rectangular o circular y forzado a atravesar una corriente de microburbujas de aire que adhiriéndose a la particular presentes las lleva a la superficie.

*Flotación por Cavitación o por Vacío:* En este caso la generación de burbujas ocurre por cavitación del aire directo en el efluente (succionado).

*Flotación por Aire Disuelto:* La flotación por aire disuelto (en lo adelante FAD) ha sido uno de los procesos más estudiados en el tratamiento de las aguas residuales. Este proceso tiene como objetivo disolver aire en agua a presión elevada para proveer, una vez reducida la presión, el gradiente de concentración de aire y energía necesario para la formación de las microburbujas.

### **1.3.2 Sistemas de flotación por aire disuelto.**

El proceso de flotación por aire disuelto surgió en 1924 en los países escandinavos y fue desarrollado para la recuperación de fibras en la industria del papel (Cadorin 2004). En ese propio año nace la primera generación de celdas FAD, denominadas *Pedersen*, con capacidad de aproximadamente 2-3 m<sup>3</sup>/h. Hacia 1960 aparece la segunda generación, llamadas “convencionales”, con un flujo de 5-7 m<sup>3</sup>/h; en la década del setenta surgieron con filtros en la parte inferior, en estas condiciones el flujo superficial aumenta y el flujo de líquido es direccionado hacia el sistema de filtración, la capacidad aumenta de 10-15 m<sup>3</sup>/h. La tercera generación tuvo su protagonismo en los años noventa y tenía como

características ser turbulenta con capacidades de procesamiento de hasta 40 m<sup>3</sup>/h, la zona de “captura” de sólidos por burbujas era horizontal y profunda y el filtro se substituyó por cilindros perforados. Hacia 1995 surge la cuarta generación, desaparece la zona de captura y el sistema de difusión (inyección) de las microburbujas se sitúa en el medio del estanque de separación.

Actualmente, se reconoce a la FAD como uno de los más económicos y efectivos métodos de recuperación-eliminación de sólidos e iones, en el tratamiento de agua de procesos y potable, la reducción de la DBO y DQO y en el espesamiento de lodos(Cadorin 2004). Este método se explota en muchos países en aplicaciones industriales debido a su gran efectividad al eliminar las partículas sólidas más finas conjuntamente con los elementos disueltos que pudieran existir en el agua (aceites, grasas) y a que es al menos cinco veces más rápida que una decantación convencional, como por ejemplo en: la Empresa Metropolitana S.A. en Criciúma-SC-Brasil, Refinería el Palito de PDVSA en Venezuela, en la Cervecería Guinness en Nigeria, Estación de Tratamiento de Agua Potable de Majadahonda en España, entre muchas otras.(Cadorin 2004; Works 2005; BIWATER 2007; Cadorin 2007; Infoenviro 2007)

La flotación por aire disuelto consiste en que: el agua no tratada entrante es pretratada con coagulantes y floculantes en la cámara de mezclado rápido y floculación, que permiten la optimización del proceso al promover la formación de partículas compuestas o flóculos. Luego el influente tratado químicamente ingresa a la cámara de flotación donde es mezclado con el agua supersaturada inyectada. La bomba del flotador recicla un porcentaje del agua tratada final y produce agua supersaturada al mezclar agua y aire a alta presión. Una válvula reductora de presión reduce la presión del flujo supersaturado reciclante a la presión atmosférica antes de entrar al tanque de flotación. El decremento repentino de presión genera burbujas de un tamaño de 10-50 micrones. Las burbujas microscópicas de aire se adhieren en las partículas sólidas compuestas en suspensión, las cuales son elevadas hacia la superficie debido a su poca densidad. En la superficie, se utiliza un dispositivo mecánico, rascador, para eliminar las partículas flotadas hacia el canal de recolección de espumas. El lodo más pesado es sedimentado hacia el fondo del tanque y se utiliza un tubo para remover el lodo intermitentemente. Seleccionar correctamente la frecuencia del mecanismo para la eliminación de espuma y la velocidad de traslado del rascador es muy

importante para conseguir el nivel de sólidos deseado en la espuma (Gross 1996; Básico 2000; Russell 2012).

La eficiencia del proceso mencionado depende de la relación existente entre la cantidad de sólidos presentes a la cantidad de aire liberado y el diámetro de las burbujas de gas (Fernández-Alba 2006). Mientras más pequeñas sean éstas últimas más eficiente es el proceso.

Existen tres tipos básicos de sistemas de flotación:

- Con presurización parcial del afluente
- Con presurización total del afluente
- Con presurización de la recirculación

De estos el más aconsejable, es el con presurización de la recirculación (figura 1.2), pues en los otros casos la bomba que transporta el afluente a la cámara de saturación podría romper los flóculos existentes.

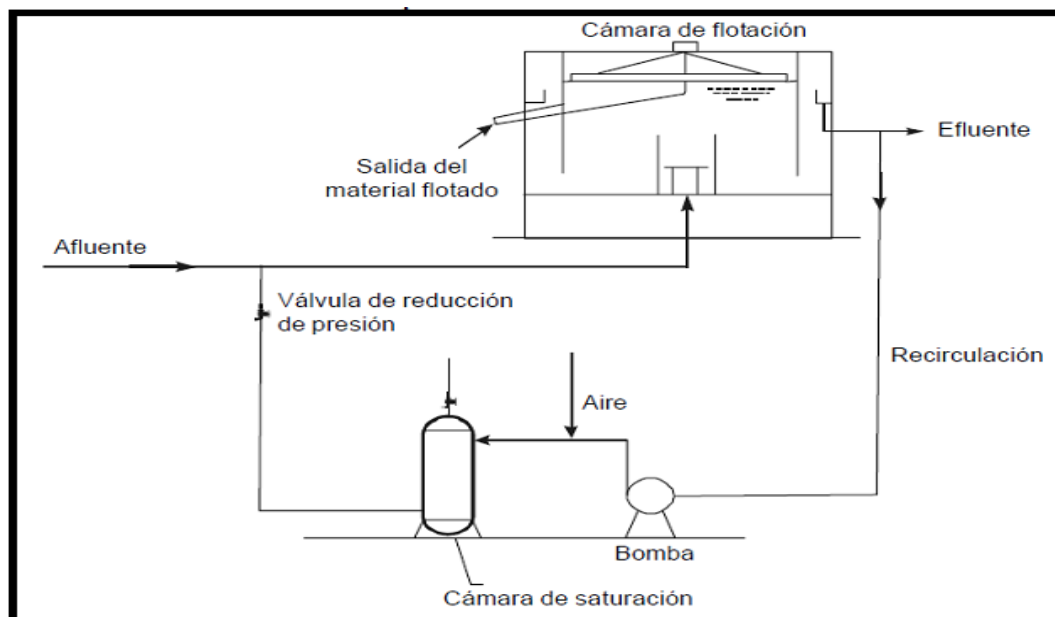


Figura 1.2 Sistema FAD con presurización en la recirculación

#### *Ventajas del sistema FAD*

La creciente utilización de la FAD en todos los campos, se debe a las diversas ventajas con relación al proceso de coagulación-sedimentación (Gross 1996).

- Alta eficiencia (incluyendo cinética) en la remoción de sólidos.
- Mayor eficiencia en la remoción de DBO que otros procesos de separación.
- Alta tasa de separación (o flujo superficial).
- Remoción de microorganismos y precipitados difíciles de sedimentar y filtrar.
- Sensible economía de productos químicos, con una reducción posible de hasta 20-30 % de coagulante, no siendo necesaria la adición de auxiliares de coagulación como polímeros para dar peso al flóculo.

*Desventajas:*

- Comparada con la sedimentación, la FAD es más sensible a variaciones de temperatura, concentración de sólidos en suspensión, recargas hidráulicas y principalmente a variaciones en las características químicas y fisicoquímicas de los sólidos en suspensión.
- Costos operacionales elevados, principalmente cuando existe necesidad de un riguroso control automático, de parámetros y dosis de reactivos.

*Aplicabilidad.*

- En el caso de incidencia importante de vertidos industriales no tratados (refinerías, papeleras, pinturas, conservas de carnes, laminación, etcétera)
- Cuando el vertido se realiza al mar puede llegar a cumplir las limitaciones del vertido sin necesidad de tratamiento biológico.
- Dada su gran versatilidad, puede ser muy útil en los casos de grandes variaciones de vertido según temporadas.
- El espesamiento del exceso de fangos activos del tratamiento biológico puede obviarse realizándose en el mismo FAD.

Las principales aplicaciones de la flotación por aire disuelto se centran en el tratamiento de vertidos industriales y en el espesado de fangos (Fernández-Alba 2006; Infoenviro 2007).

### **1.3.2.1 Parámetros de control en el proceso de flotación por aire disuelto**

Como se ha podido analizar la base del proceso de flotación se encuentra principalmente en el sistema de presurización (Infoenviro 2007), debido a que la eficiencia de este proceso se

debe, principalmente, a la saturación que se produzca en la mezcla del efluente recirculado y el aire inyectado (Básico 2000). Esto significa que es una prioridad mantener las consignas de operación para que el proceso ocurra con éxito, de aquí se desprende la importancia del control de la operación.

El tamaño de las bolas de aire o burbujas es muy importante en la flotación (Gross 1996; Fernández-Alba 2006). Estas dependen, principalmente, de la presión de disolución del aire en el agua y del pH.

En cuanto a la cantidad de aire que se inyecta, los estudios realizados en el tratamiento de vertidos industriales plantean que, es independiente de la concentración de sólidos pero sí depende del volumen de agua a ser clarificado; y que además para regular la presión del mismo es recomendable la instalación de una válvula reductora de presión, entre las cámaras de presurización y de flotación, que también permite ajustar el caudal de recirculación que va a ser mantenida en la cámara de presurización; pues se debe evitar que se produzca una turbulencia excesiva en la mezcla de las dos aguas ya que los flóculos podrían romperse; por lo que es necesario la instalación de un dispositivo para la medición de la cantidad de aire y de agua. Usualmente se plantea que: para una recirculación del 5-10% del caudal de entrada al flotador se presuriza hasta un valor de 4-5,5 bar (ECOMAC 2008).

Otro parámetro de control es el tiempo de retención del agua en el flotador, este independientemente de la forma que tenga, debe ser proyectado para un tiempo medio de retención comprendido entre 10 y 20 minutos con una profundidad entre 1-3 metros (Básico 2000).

Otros parámetros operacionales que hay que tener en cuenta para la eficiencia del proceso son: la óptima coagulación y floculación previa a la entrada de la FAD, la adhesión de flóculo y burbujas de aire, naturaleza y tamaño de las partículas, tipos de químicos adicionados, entre otros. (Básico 2000)

Estos factores, regionalmente, asumen diferentes criterio (ver Anexo No.2, tabla 2) (Gross 1996).

#### **1.4 Consideraciones parciales**

Luego de este estudio se concluyó que para diseñar un adecuado tratamiento al agua residual industrial, es preciso conocer las características de la industria, por lo que un mismo tratamiento no tiene porque funcionar eficiente, de forma simultánea, en dos procesos diferentes. Entre las industrias más contaminantes se encuentra la petrolera y debido a la naturaleza de sus contaminantes, resulta imprescindible utilizar un tratamiento físico-químico para la disminución de la carga de los mismos.

## **CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA REFINERÍA “CAMILO CIENFUEGOS”**

Este capítulo consta de tres epígrafes, donde se describen los materiales con que se cuenta para llevar a término la investigación y los métodos que se implementan en ella. El primer epígrafe describe el proceso tecnológico en el que se desarrolla el trabajo y los lazos de control implementados en él; mientras que el segundo refleja la metodología utilizada para realizar la identificación, y por último, en el tercer epígrafe se describen los sistemas de control propuestos.

### **2.1 Descripción del sistema de tratamiento de aguas residuales en la refinería**

El objetivo del sistema de tratamiento de aguas residuales de la entidad, es efectuar la limpieza y descontaminación de las aguas contaminadas con productos de petróleo que se generan en las diferentes plantas. Estas aguas presentan contaminantes de origen mineral como: arenas, arcillas, ácidos, álcalis y sales; así como también de origen orgánico representado fundamentalmente por el petróleo y los productos de su procesamiento; la cantidad de contaminantes depende de diversos factores tales como las impurezas mecánicas propias de las aguas de lavado y enfriamiento de equipos, los productos de petróleo que arrastran las aguas pluviales a su paso por las instalaciones tecnológicas, la contaminación en tanques que se lavan o drenan y el deslastre de barcos, entre otras (Puerto and Rodríguez 2008).

Con el fin de lograr eficiencia en el tratamiento y la calidad necesaria de las aguas resultantes el proceso se realiza en dos sistemas: un primer sistema en el que se tratan los efluentes industriales y pluviales menos contaminados y en el segundo se tratan los

drenajes de los tanques de crudo, las aguas sulfhídricas, los efluentes sulfurosos alcalinos, y las aguas de lastre; además de los efluentes pluviales e industriales contaminados provenientes de otras áreas (Puerto and Rodríguez 2008; Borrego 2010).

Actualmente el tratamiento de los residuales se realiza mediante dos etapas fundamentales: tratamiento mecánico y tratamiento físico-químico. Mediante el primero los efluentes industriales y pluviales son separados de la mayor cantidad de materias en suspensión y derivados del petróleo que arrastran consigo. Con el segundo tratamiento ocurre una separación más perfecta de la materia en suspensión y derivados del petróleo que aún persisten en el residual, esto se logra con la adición de  $Al_2(SO_4)_3$  (sulfato de alúmina) como reactivo coagulante (Borrego 2010).

Los parámetros que se establecen para la operación de la planta están basados en la antigua norma rusa, establecida desde la construcción de la Refinería en el año 1989. Aunque existen variaciones debido a la experiencia de los operadores y a los cambios tecnológicos producidos en post de lograr optimización y modernidad.

Previo a describir el proceso se mostrarán las características del agua residual industrial que llega a la planta de tratamiento (Tabla 2.1) (García 2011).

**Tabla 2.1 Caracterización del agua residual de la planta de tratamiento\***

Parámetro	U/M	Valor Mínimo	Valor Promedio	Valor Máximo
Fósforo Total	mg/l	0.13 +/- 0.03	0.75 +/- 0.5	5.3 +/- 1.2
Nitrógeno Total de K	mg/l	0.29 +/- 0.02	9.2 +/- 0.5	13.52 +/- 0.41
Sulfuro Total	mg/l	0.4 +/- 0.1	17.9 +/- 3.3	41.7 +/- 8.3
Ph	U	7.2 +/- 0.2	9.5 +/- 0.5	12.8 +/- 0.7
Materia en Suspensión	mg/l	3.66 +/- 2.2	25.8 +/- 4.3	42 +/- 6.76
Grasas y Aceites	mg/l	11.13 +/- 3.61	146.4 +/- 25	760 +/- 250
Hidrocarburos Totales	mg/l	15.36 +/- 7.06	105.48 +/- 32	600 +/- 270
Índice de Fenoles	mg/l	0.13 +/- 0.02	34.28 +/- 2.7	86.08 +/- 13.34
DQO	mg/l	20 +/- 7.2	409.45 +/- 65	920 +/- 165
DBO	mg/l	30 +/- 6	72.4 +/- 23	130 +/- 35
Cloruros	mg/l	224.64 +/- 3.3	545.95 +/- 12.5	932.66 +/- 21.4

\* Estos valores fueron tomados del resumen elaborado a partir del historial de análisis de laboratorio, realizados durante el año 2010 en la planta de tratamiento de residuales

Antes de que el operador arranque el sistema es necesario e imprescindible que tenga en cuenta los siguientes aspectos: nivel de Sulfato de Alúmina ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) en los tanques de almacenamiento, concentración de los reactivos, estado técnico de las bombas de recirculación y de dosificación de reactivo, correcto funcionamiento del compresor y/o presión adecuada de aire en la línea, estado operativo de los tanques de presión, operatividad de las válvulas implicadas en la operación y el estado técnico de los analizadores de pH. Además, de analizar los factores que propician una flotación exitosa, tales como: características del efluente que se está tratando, pH, aire de servicio, recorrido del pistón de la bomba dosificadora de alúmina y el buen funcionamiento de las bombas del primer y segundo sistema (Rodríguez 2008; García 2011).

El proceso comienza por un tratamiento mecánico mediante separadores de arena, separadores de aceite y sedimentación. Posteriormente, los efluentes se mezclan con el reactivo coagulante sulfato de aluminio (alúmina) en la canal mezcladora, donde comienza el tratamiento físico químico. En esta fase se tiene un control permanente del pH para mantenerlo en el rango de 7-8,5 (Puerto and Rodríguez 2008).

De la canal mezcladora, los efluentes son conducidos hacia uno de los dos flotadores circulares existentes, en dependencia del sistema en funcionamiento, diseñados para un tiempo de retención de 20 minutos y con ocho tubos distribuidores fijos por donde se inyecta la recirculación. El efluente tratado se evacúa a todo lo largo del perímetro del flotador por la parte de abajo y sube a través de las canales verticales formadas por los paneles nervados y la pared del flotador, rebosando a la canal circular de evacuación. A la salida del flotador se desvía la mitad del flujo de efluente a tratar (flujo de entrada al flotador) hacia una cámara de recepción, a través de una válvula de control y de ahí es bombeado hacia el tanque de presión, por una bomba, con el fin de homogenizar la mezcla de aire y agua que va a los flotadores (Puerto and Rodríguez 2008; Borrego 2010).

El tanque de saturación es un recipiente cerrado de  $10\text{m}^3$  de volumen y de 2m de diámetro y opera a una presión de 4-5  $\text{Kgf/cm}^2$ . A la entrada del tanque de presión se inyecta el aire a través de una válvula manual, dicho aire proviene de un compresor tipo AA-32 capaz de entregar de 160-280  $\text{m}^3/\text{h}$  de flujo de aire a una presión de 7-16  $\text{Kgf/cm}^2$ . El proceso de saturación permite que se desplace hacia la superficie los copos de hidróxido de aluminio

con materias en suspensión y petróleo emulsionado en forma de espuma que son recogidos por una pala mecánica y evacuados fácilmente mediante tubos colectores (Puerto and Rodríguez 2008).

El 50% del flujo restante continúa por el canal de hormigón armado a la cámara de mezcla, donde es conducido a un proceso de filtración antes de ser bombeado a la piscina de oxidación y permanecen por espacio de 10 o 15 días, posteriormente son vertidos a la bahía (Puerto and Rodríguez 2008).

Los parámetros operacionales del tratamiento físico-químico se muestran en la tabla 2.2 (Puerto and Rodríguez 2008; Rodríguez 2008).

**Tabla 2.2 Parámetros operacionales para tratamiento físico-químico**

<u>Parámetro</u>	<u>Valor Óptimo</u>
Cantidad de aire por m <sup>3</sup> de agua en tanque de presión	3 a 4% del flujo de residual a la entrada del tanque
Agua a recircular	50% del total de los efluentes a tratar
Tiempo de aireación	2 a 4 minutos
Presión en los tanques de presión	4-5 Kg/cm <sup>2</sup>
Dosis de Sulfato de Alúmina	50 a 100 mg/litros
Concentración de la alúmina en los tanques de presión.	1.5 a 2%

### 2.1.1 Filosofía de control en la recirculación de efluentes en la actualidad

En el acápite anterior se mostraron los valores óptimos de los parámetros operacionales a tener en cuenta para el tratamiento físico-químico, de ellos los correspondientes a la etapa de flotación son: flujo de aire, flujo de agua a recircular, presión en el tanque de saturación y el tiempo de aireación. El último de estos parámetros queda garantizado por el diseño del tanque, determinado por la razón del volumen del tanque y el flujo máximo de su operación. Por tanto, la garantía de una óptima regulación de la recirculación de efluentes tratados depende de los siguientes tres lazos de control, en lo fundamental (Borrego 2010):

1. Regulación de la cantidad de aire inyectado a la línea de recirculación, este lazo está compuesto por un flujómetro *Prowirl 73* que mide el flujo de aire a la entrada de los

tanques de presión del primer y segundo sistema y el elemento de control final, constituido por una válvula *Samson* de actuador neumático. Un controlador PI de acción inversa, abre la válvula de control en caso de que el flujo esté por debajo del valor deseado y viceversa. Este lazo de control es común a los dos sistemas por lo que solo es posible su funcionamiento con el primer ó segundo sistema, nunca con los dos sistemas operando de forma simultánea.

El valor deseado del flujo de aire en este lazo es una función del flujo de efluentes de recirculación (50%) que llega a los flotadores, o sea:

$$f_A = F (f_{\text{eff}}). \quad \text{Donde: } f_A: \text{Flujo de aire. (m}^3/\text{h)}$$

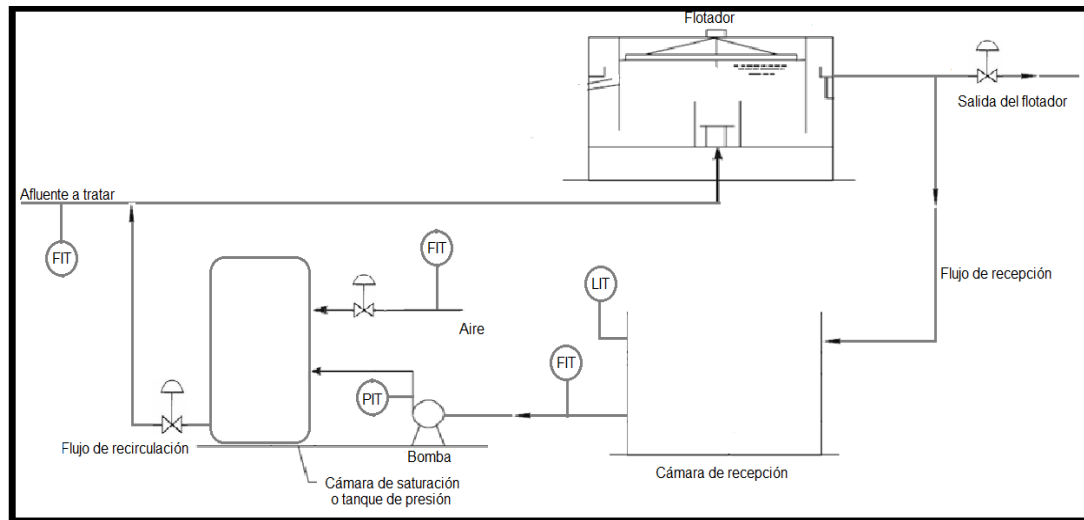
$$f_{\text{eff}}: \text{Flujo de efluentes tratados de recirculación hacia los flotadores. (m}^3/\text{h)}$$

2. Regulación del 50 % de recirculación de efluentes hacia el flotador, este lazo está compuesto por un flujómetro ultrasónico *Prosonic Flow 90W* que mide el flujo de efluentes de recirculación y el elemento de control final, constituido por una válvula *Samson* de actuador neumático. Un control PI de acción inversa se encarga de mantener el valor deseado del flujo de recirculación en el 50 % del flujo de efluentes que entra en los flotadores.

3. Regulación del nivel en la cámara de recepción de efluentes de recirculación del primer y segundo sistema. Este lazo está compuesto por un sensor de nivel *Prosonic M FMU 40* que mide el nivel de la cámara de recepción de efluentes de recirculación, y una válvula de control *Samson* de actuador neumático, ubicada en el canal de salida de los flotadores. Esta válvula es la encargada de desviar el 50% del flujo de efluentes a la salida de los flotadores hacia la cámara de recepción de efluentes para su posterior recirculación. En este lazo se quiere garantizar un nivel estable en la cámara de recepción y por ende la garantía de una recirculación del 50% de efluentes, además de garantizar que la cámara no se quede vacía estando la bomba en funcionamiento.

Como se puede distinguir en la filosofía implementada no se controla la presión en el tanque de saturación, que constituye un parámetro de importancia para que ocurra la flotación.

En la figura 2.1 se muestra el proceso FAD de la refinería, donde se indican la ubicación de los sensores que intervienen en los lazos de control explicados anteriormente.



**Figura 2.1 Proceso FAD de la refinería**

## 2.2 Identificación experimental del proceso de recirculación de efluentes a flotador del tratamiento residual

Para este proceso, se tomo como objetivo: el control del flujo de recirculación, del nivel de la cámara, la presión en el tanque de saturación y el flujo de aire, pues son las variables principales a controlar para que exista flotación, según lo establecido por los requisitos de operación de la planta y la normas por la que se rige.

Para determinar el controlador que optimice el funcionamiento de cada lazo, es necesario identificar un modelo para cada sistema, que caracterice su comportamiento dinámico y permita realizar y validar el ajuste de los parámetros de dicho controlador; por lo que se recurre a la experimentación de los sistemas y a la observación de sus salidas (Overschee 1996; Avilés 2002), esto no es más que la modelación experimental.

Es válido destacar que la experimentación que se realiza se basa en los métodos paramétrico y no paramétrico, dependiendo del tipo de modelo obtenido y en el método de identificación on-line o identificación recursiva, según la aplicación (López 2002; Kunusch 2003; Rubio 2010; Rubio 2010).

### *Identificación Experimental*

En esta investigación, la identificación experimental se auxilia de las herramientas computacionales *System Identification Toolbox* y *Simulink* del *software Matlab*, debido a las potencialidades de las mismas para la síntesis, estudio y diseño de sistemas de control y,

particularmente en lo referente a la estimación de parámetros, para la identificación experimental de sistemas. También se utilizan las plataformas, suministradas por *Endress Hauser*, *FieldCare* y *ControlCare* para configurar y gobernar los instrumentos, respectivamente.

La herramienta de identificación de sistemas *System Identification Toolbox*, es uno de los *softwares* más utilizados en el mundo de ingeniería para el diseño, simulación, prueba y producción final de sistemas de control, tiene el objetivo de construir fieles modelos simplificados de sistemas complejos, a partir de conjuntos de datos con ruido e imperfecciones. El *toolbox* provee herramientas para la creación de modelos matemáticos de sistemas dinámicos, basándose en la observación de señales de entrada y salida. Presenta, además, una interfaz gráfica flexible que ayuda en la organización de los datos y modelos(Ljung 2007).

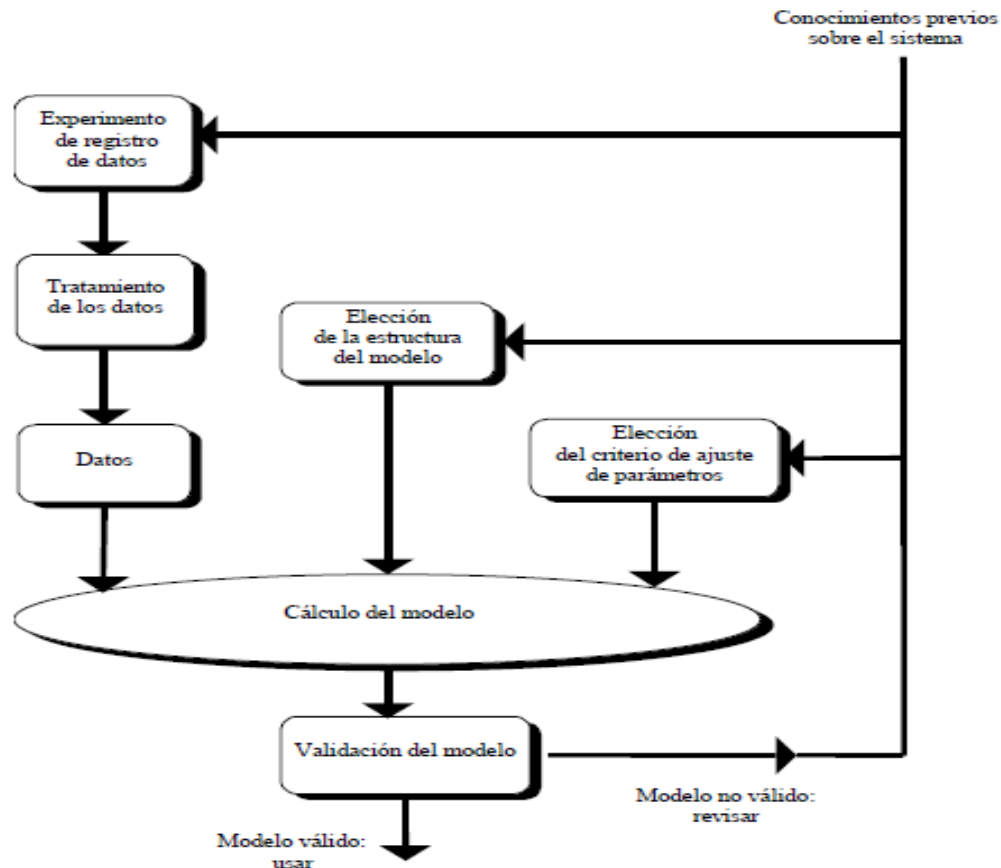
*Simulink* permite el modelado, la simulación y el análisis de sistemas cuyas salidas varían en el tiempo; puede ser usado para explorar el comportamiento de una amplia variedad de sistemas dinámicos del mundo real, incluyendo circuitos eléctricos, amortiguadores, sistemas de frenado y muchos otros sistemas eléctricos, mecánicos y termodinámicos.

El *software FieldCare* provee un rango de funcionalidades para la parametrización y la configuración de dispositivos automatizados de campo, además de un simple y efectivo chequeo de la salud de los mismos.

*ControlCare* permite la visualización y vigilancia del proceso de producción. Normalmente es un paquete que se ajusta perfectamente a los requerimientos del cliente. Es una plataforma de código abierto diseñada para redes ingenieriles, en la configuración de estrategias de control con bloques funcionales y programación de controles híbridos.

Toda la comunicación existente entre estas herramientas computacionales y las fuentes de datos, que en este caso controladores lógicos programables, se establece mediante la tecnología OPC, que además permite realizar la comunicación remota y el intercambio de datos en tiempo real.

En términos generales, el proceso de identificación comprende los pasos mostrados en la figura 2.2(López 2002).



**Figura 2.2 Diagrama de flujo del proceso de identificación**

Como se muestra en el diagrama, el primer paso es realizar la obtención de los datos de entrada-salida, para ello se excita el sistema mediante la aplicación de un paso en la señal de entrada (variable manipulada) y se grafica conjuntamente con el comportamiento de la salida (variable controlada); según la información provista por dicha gráfica del orden de la respuesta (si es de primer orden se analiza el tiempo al 28.3% y 63.2% de la variación de la salida y si es de segundo orden el tiempo de subida, el tiempo pico y el de establecimiento) se aproxima a un modelo de Primer Orden con Retardo de Tiempo (en lo adelante PORT) para hallar el ancho de banda del sistema y calcular el tiempo de muestreo (alrededor de diez veces el ancho de banda). Con esta información se genera una nueva señal de entrada que debe contener un espectro amplio de frecuencias para no limitar el experimento a una única frecuencia de señal, debido a que el sistema es lineal se utilizan dos niveles de entrada, por lo que se elige una señal pseudo-aleatoria del tipo PRBS. Luego de que esta señal es aplicada, tanto sus valores como los de la variable de salida son almacenados,

constituyendo así el juego de datos con que se confecciona el modelo(Ljung 1999; López 2002; Kunusch 2003; Izquierdo 2005; Rubio 2010).

Posteriormente se procede al tratamiento previo de los datos donde se eliminan los datos que no son representativos en la simulación(López 2002; Kunusch 2003; Rubio 2010).

Ahora bien, luego de que los datos son tratados se efectúa la identificación no paramétrica tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. Para la primera, se excita el juego de datos de entrada-salida con una señal impulso y otra tipo paso y, también, se realiza la representación de la fase y la magnitud de los mismos(López 2002; Kunusch 2003; Rubio 2010).

Debido a que los modelos no paramétricos no se pueden utilizar directamente para simulación se hace necesario aproximarlos a modelos paramétricos, que tienen como

estructura genérica la siguiente: 
$$A(q^{-1}) * y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} * u(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})} * e(t)$$

Donde  $u(t)$  es la entrada,  $y(t)$  la salida y  $e(t)$  el ruido del sistema; A,B,C,D,F son los polinomios en función del operador de retardo ( $q^{-1}$ )(López 2002).

Según los polinomios que intervienen en la estructura será el modelo paramétrico que resulte, las estructuras que aquí se analizan son: *Auto Regressive Moving Average* (en lo adelante ARMAX), *Auto Regressive with eXternal input* (en lo adelante ARX) y *Output Error* (en lo adelante OE)(López 2002; Izquierdo 2005).

Esta etapa del proceso se encuentra facilitada por la existencia del *toolbox* de identificación. La idea a seguir es probar cada estructura y asignarle varios órdenes, a modo de validación, hasta obtener el modelo que cumpla, de la mejor manera, con los requisitos establecidos por los métodos de validación utilizados(López 2002; Rubio 2010).

Como se plantea anteriormente, en la validación del modelo obtenido se determina si el mismo cumple con los requisitos establecidos, por lo que se hace necesario poner en vigor alguno criterios existentes para la validación, como: la comprobación de los parámetros físicos, al comparar el valor estimado de los parámetros obtenidos y el que se debía esperar según el conocimiento previo del funcionamiento que se tiene de la planta. La comparación entre la respuesta al paso, al impulso y la amplitud y fase del modelo no paramétrico con el

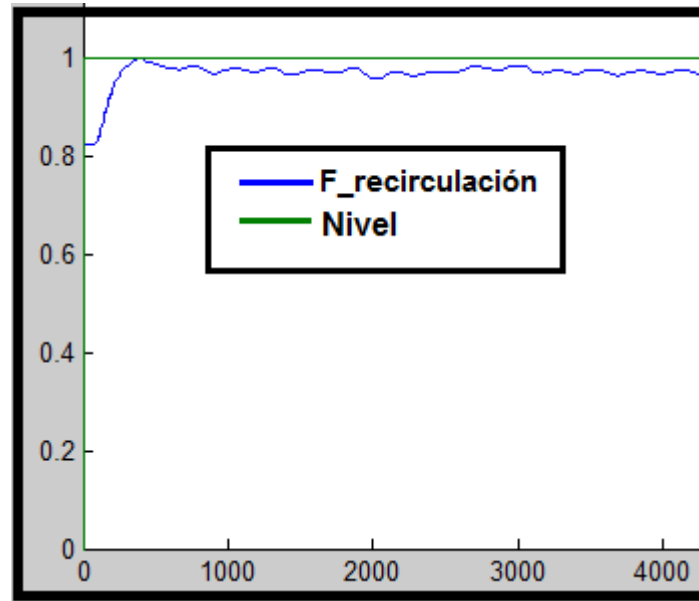
paramétrico estimado. El criterio de intervalos de fiabilidad de parámetros se aplica para determinar si el modelo contiene demasiados parámetros, consiste en comparar estos con su desviación estándar y si esta es mayor que el propio parámetro, se considera la posibilidad de eliminarlo. Otra manera de validar es a través del análisis de la correlación de los residuos, puesto que brindan una idea cuantitativa de la independencia entre el error del modelo y la señal de entrada; cuanto más próximos a cero sean estos términos y estén comprendidos en el margen de validez, más exacto es el modelo estimado. Otra técnica es la simulación, que no es más que aplicar una señal de entrada al modelo y al sistema real y comparar sus respuestas. También se utiliza la validación en base a la aplicación del modelo, comprobando que el controlador ajustado por este ofrece un buen resultado sobre el sistema real.

### **2.3 Descripción del sistema de control propuesto.**

Como ya se ha manejado los parámetros a controlar para este proceso son: el flujo de recirculación con el fin de garantizar una recirculación del 50%, el flujo de aire que debe ser del 3 al 4 % del valor del flujo de recirculación, la presión en el tanque de saturación para mantenerla en 4-5 kgf/cm<sup>2</sup> y el segundo entre el 50 y el 75 % de la altura del tanque (3m). Otro factor importante es el nivel de la cámara de recepción con el objetivo de que no se derrame y menos que se quede vacía para evitar dañar la bomba que succiona el flujo hasta el tanque de presión, por lo que se establece como parámetro de consigna un valor de 3 metros, de los cinco que tiene como altura.

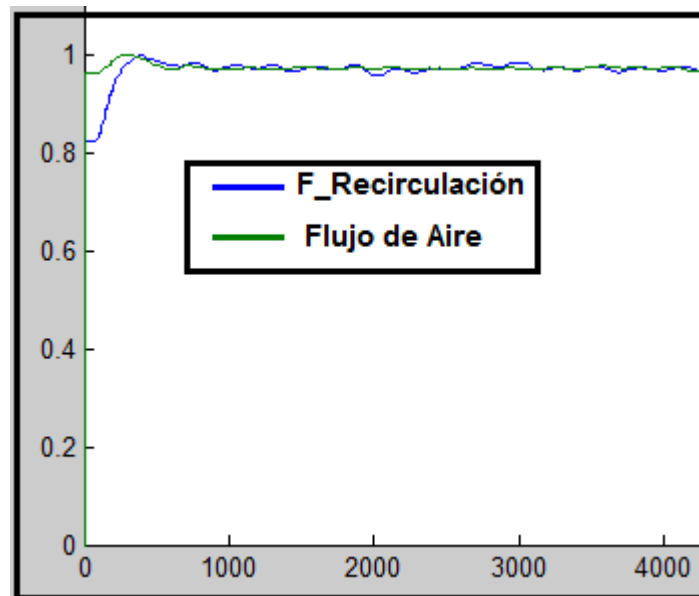
Para realizar el modelado de los procesos, primeramente se necesita conocer la interacción entre las diferentes variables existentes en el sistema, por lo que se excita mediante una entrada paso el flujo de recirculación y flujo de aire. Estas variables son manipuladas a través de sus válvulas correspondientes, a la misma vez que se registran como salida las variables con las que se presume que puedan guardar relación, ellas son: flujo de aire, presión y nivel en el tanque de saturación.

Como se puede apreciar en las figuras 2.3, 2.4 y 2.5, el flujo de recirculación se relaciona con el flujo de aire y la presión en el tanque de saturación pero no con el nivel del mismo (figura 2.3), lo que permite asegurar que en el tanque ocurre un proceso de autorregulación y que el flujo a la salida de la cámara de recepción es el mismo que el de recirculación.



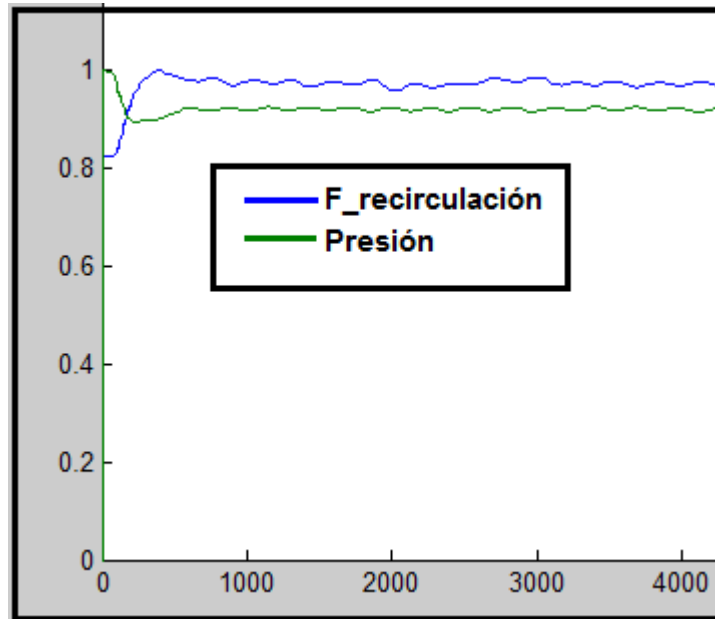
**Figura 2.3 Relación entre flujo de recirculación y nivel del tanque de saturación**

El comportamiento que muestra la gráfica de la figura 2.4, se explica debido a que el valor deseado del flujo de aire queda establecido por el valor real del flujo de recirculación, con una proporción entre 3-4%, por lo que al aumentar el último aumenta ligeramente el primero.



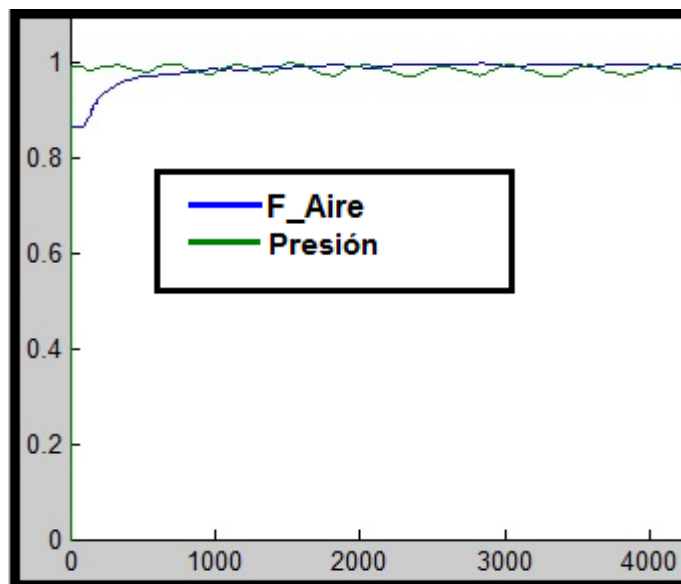
**Figura 2.4 Relación entre el flujo de recirculación y flujo de aire**

La conducta de la presión en el experimento es esperada, pues al abrir la válvula a la salida del tanque aumenta el flujo a través de ella y la presión en él tiende a disminuir, que es exactamente lo que evidencia la siguiente gráfica.



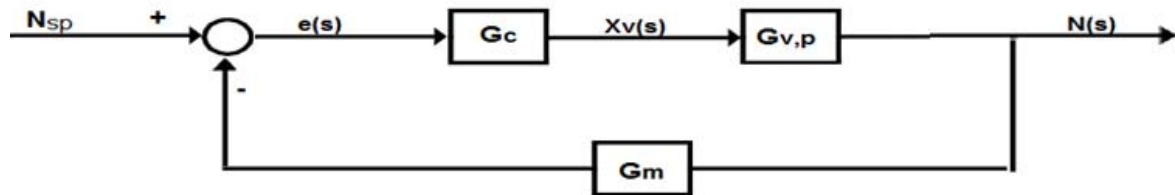
**Figura 2.5 Relación entre flujo de recirculación y presión del tanque de saturación**

El otro experimento que se muestra en la figura 2.6 presenta el comportamiento de la presión del interior del tanque de saturación ante un cambio producido en el flujo de aire y como se puede apreciar ambas variables no guardan relación.



**Figura 2.6 Relación entre flujo de aire y presión del tanque de saturación**

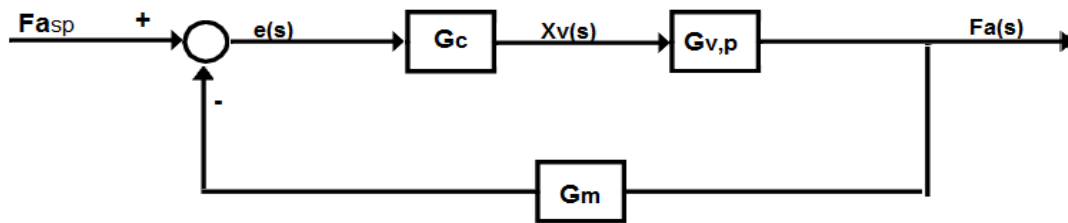
Luego de analizar el comportamiento de las variables se proponen los siguientes esquemas de control.



**Figura 2.7 Diagrama en bloques para lazo de nivel**

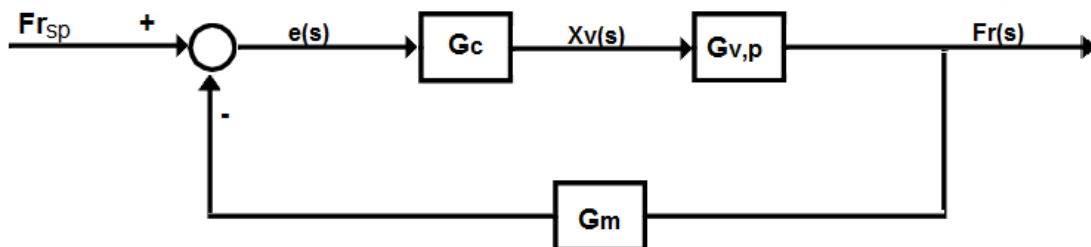
En el diagrama en bloques de la figura 2.7, la variable a controlar es el nivel de la cámara de recepción. El lazo está compuesto por tres bloques, el primero de ellos ( $G_c$ ) es un controlador promediante, cuya función es comparar el valor de consigna del nivel y el valor real, en función de su señal de entrada  $e(s)$ . El controlador devuelve la señal de mando  $X_v(s)$  y es recibida por el bloque  $G_{v,p}$  que corresponde a las funciones transferenciales del elemento de acción final (válvula) y del proceso, que se encuentran fusionadas; la función de este bloque es según el valor de posición de la válvula, esta abre o cierra, actuando sobre el proceso y por tanto corrigiendo el objetivo de control  $N(s)$ ; la variable manipulada es el flujo de recepción. El valor de la variable de proceso es proporcionado por el elemento de medición, bloque  $G_m$ .

La siguiente figura (figura 2.8) es el diagrama en bloques del flujo de aire, que consta de tres bloques funcionales: controlador (PI), sistema válvula-tubería y el elemento de medición. Fácilmente se puede distinguir que las señales implicadas son el error  $e(s)$ , resultado de la comparación entre la consigna (función del flujo de recirculación) y la variable real, la posición de la válvula  $X_v(s)$  que es la salida del controlador y que en dependencia de su valor actúa la válvula controlando la variable de proceso  $F_a(s)$ .



**Figura 2.8 Diagrama en bloques para lazo de flujo de aire**

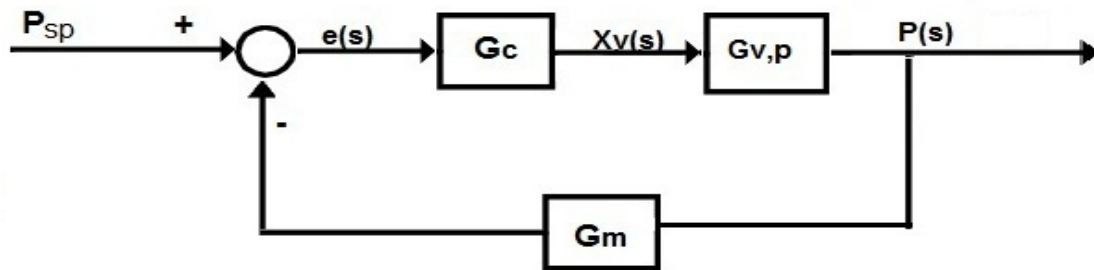
El diagrama de la figura 2.9 muestra el lazo de control del flujo de recirculación, que consta de cuatro bloques funcionales. El bloque  $G_c$  es el correspondiente a la función transferencial de un controlador PI, al cual le entra la señal  $e(s)$  que es el resultado de la comparación entre el valor deseado y la variable de proceso entregada por  $G_m$ , que constituye el elemento de medición. La salida del controlador  $X_v(s)$  es recibida por el bloque  $G_{v,p}$  que representa un sistema válvula-tubería y que tiene como señal de salida el nuevo flujo de recirculación causado por el cierre o apertura de la válvula, es válido destacar que como el proceso constituye un sistema válvula-tubería la variable manipulada es el propio flujo de recirculación.



**Figura 2.9 Diagrama en bloques para lazo de flujo de recirculación**

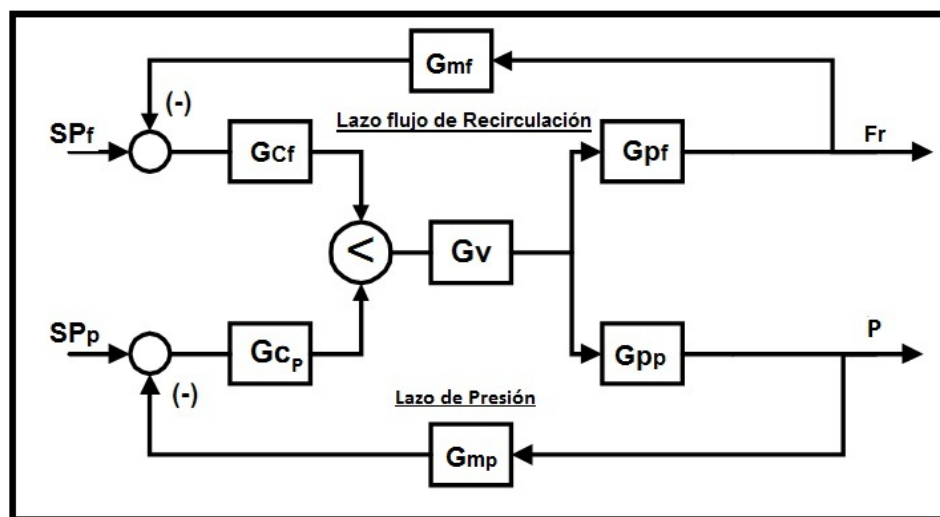
En el caso de la figura 2.10, el diagrama está compuesto por tres bloques funcionales, de ellos  $G_c$ ,  $G_m$  y  $G_{v,p}$  tienen la misma descripción que en los casos anteriores, con las particularidades de que la variable de proceso es la presión del tanque de saturación, que es controlada mediante la manipulación del flujo de recirculación y el control puede ser promediante. Las señales presentes son: el error, que es el resultado de la comparación entre la variable de proceso y el valor de consigna, la posición de la válvula

correspondiente a la variable manipulada como acción del controlador y  $P(s)$  variable de proceso que es el resultado del elemento de acción final sobre el proceso.



**Figura 2.10 Diagrama en bloques para lazo de presión**

Como se puede distinguir de lo expuesto anteriormente, los lazos de flujo de recirculación y de presión son necesarios manipularlos bajo la acción de la misma válvula, la correspondiente al flujo de recirculación. Por tanto, como una posible solución se propone un control selectivo (figura 2.11), a partir de los bloques funcionales del Control Care, configurando, mediante un control híbrido, el selector de manera tal que mientras que la presión del tanque de saturación se mantenga entre los valores de 4-5  $\text{Kgf/cm}^2$  la válvula en cuestión gobierne el flujo de recirculación manteniendo en la línea el 50 % del total de efluentes a tratar. En el caso, de que la presión salga de dicho rango entonces el lazo que predomina, en el control selectivo, es el de la presión y por tanto será sobre el cual, actúe la válvula.



**Figura 2.11 Diagrama en bloques del control selectivo**

## **2.4 Consideraciones parciales**

Según los experimentos realizados en el proceso de flotación de la refinería se definió que, la presión en el interior del tanque de saturación, lejos de lo esperado, depende del flujo de recirculación y no del flujo de aire.

En el sistema de control que actualmente se implementa en la refinería, no se tiene en cuenta el control de la presión del tanque de saturación, que constituye una variable importante para el proceso.

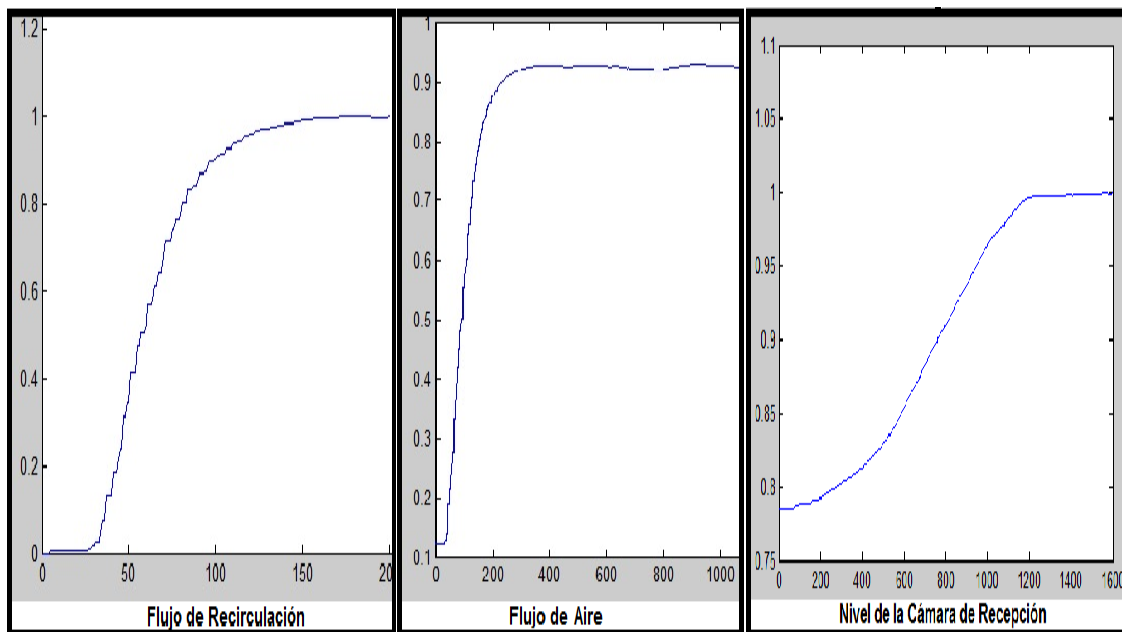
## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se muestra y analizan los resultados obtenidos del proceso de identificación para los cuatro subprocesos, pertenecientes al proceso de recirculación de efluentes del tratamiento físico-químico; además de los resultados obtenidos del sistema de control, cuyo alcance llega hasta el ajuste de los controladores del flujo de recirculación y el flujo de aire.

### 3.1 Identificación experimental de los modelos

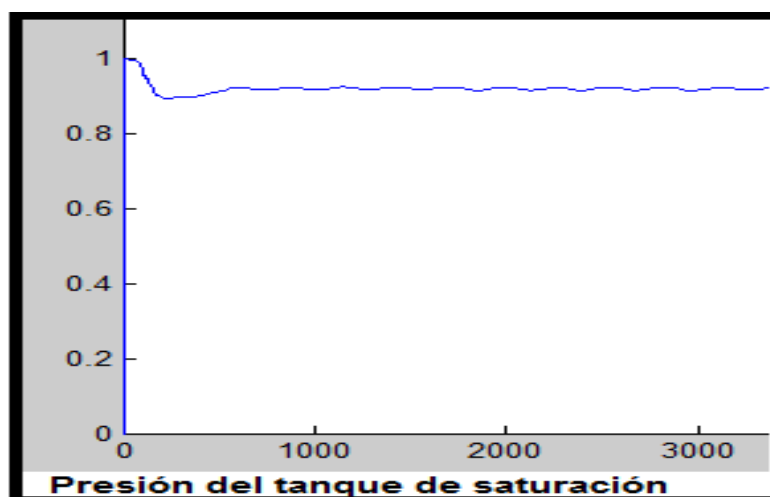
Para realizar la identificación experimental, la etapa tecnológica de la recirculación de efluentes se dividió en cuatro procesos: nivel de la cámara de recepción (salida)- flujo de recepción (entrada), flujo de recirculación (sistema válvula- tubería), presión en el tanque de saturación (salida)-flujo de recirculación (entrada) y flujo de aire (sistema válvula-tubería); donde la salida corresponde a la variable de control y la entrada a la variable manipulada.

Para el primer paso del experimento descrito en el acápite anterior, se establece la comunicación a través del servidor OPC, utilizando la estructura de los bloques del Simulink (ver Anexo no. 3 figura 1); la cual permite la recepción de los datos de salida de cada planta, los cuales brindan los parámetros necesarios para el diseño de una señal pseudo-aleatoria que excite totalmente a la misma, en cada caso. La respuesta al paso de cada proceso se muestra en las figuras 3.1 y 3.2.



**Figura 3.1 Respuestas al paso del flujo de recirculación, flujo de aire y nivel**

Como se puede observar el comportamiento de los sistemas válvula-tubería de flujo de recirculación y flujo de aire, además del sistema de nivel de la cámara de recepción, ante una entrada paso responden como un primer orden. Estos modelos se aproximan a sus respectivos modelos PORT, mediante los tiempos del 28% y 63% de la respuesta al paso, a fin de realizar los cálculos pertinentes para la generación de la señal PRBS.

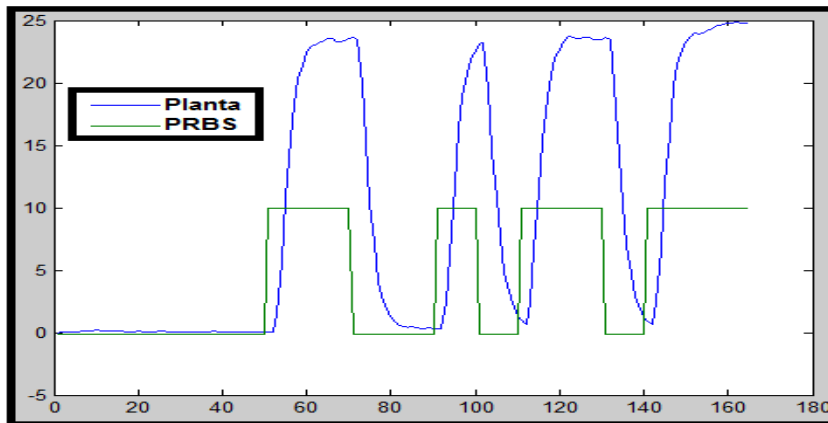


**Figura 3.2 Respuesta al paso de la presión**

En la figura anterior se muestra el comportamiento de la variable de salida del proceso, presión del tanque de saturación, ante una entrada paso provocada a la variable manipulada

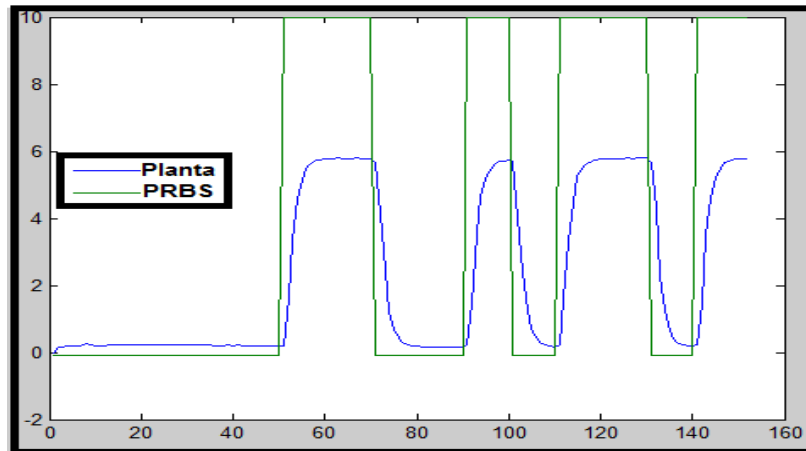
flujo de recirculación. Como se aprecia la respuesta corresponde a un sistema de segundo orden, por lo que a partir del tiempo pico, tiempo de subida y tiempo de establecimiento de la respuesta, se realizan los cálculos para generar la PRBS.

Para la captura de los datos, se utiliza la herramienta *Simulink* de *Matlab* (ver Anexo No.3 figura 2) y mediante el servidor OPC se va escribiendo la señal aleatoria a través del bloque de escritura y se lee el comportamiento de la variable de salida, mediante el bloque de lectura; definiendo los instrumentos en cada caso.



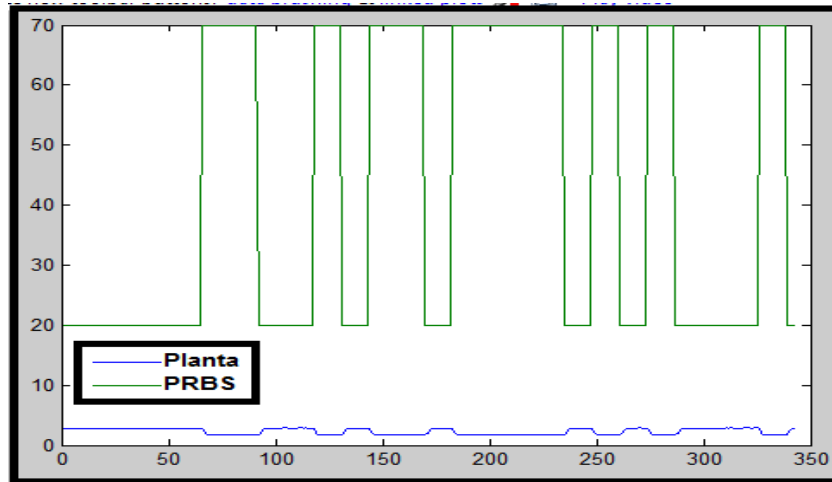
**Figura 3.3 Comportamiento del flujo de recirculación ante la señal PRBS**

Una vez obtenida la PRBS de cada sistema, esta es utilizada como entrada en un nuevo experimento.



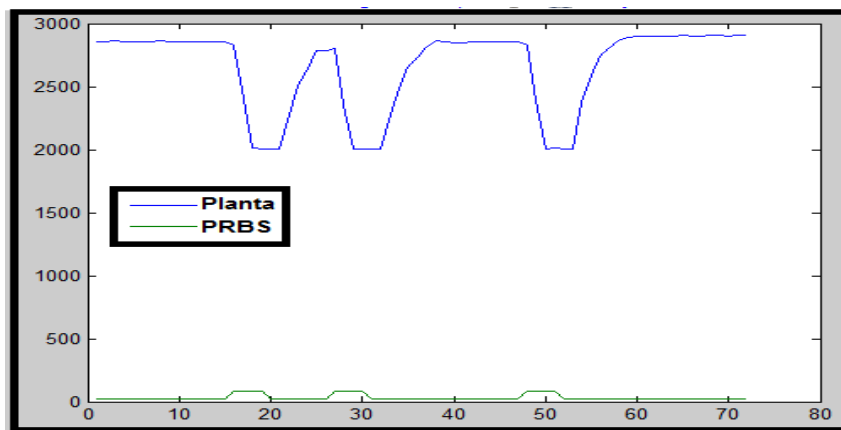
**Figura 3.4 Comportamiento del flujo de aire ante la señal PRBS**

Las señales generadas del tipo PRBS con sus correspondientes salidas excitadas se representan en las figuras 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6.



**Figura 3.5** Comportamiento de la presión ante la señal PRBS

Este nuevo experimento proporciona como salida un juego de datos más comprometidos con el proceso, con los que se realiza el cálculo del modelo.



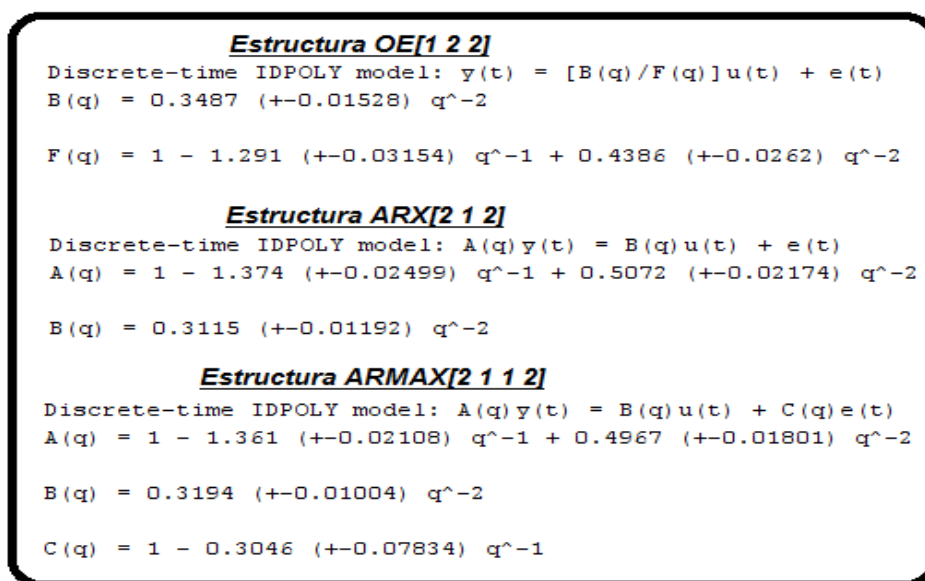
**Figura 3.6** Comportamiento del nivel ante la señal PRBS

Luego del tratamiento previo de los datos obtenidos, se procede a la estimación de los parámetros de las estructuras, que mejor ajustan la respuesta del modelo a los datos de entrada-salida obtenidos experimentalmente. De manera general, la elección del orden de las estructuras se realiza en un primer momento en el *Toolbox System Identification*. Posteriormente, según, el diagrama de polos y ceros, la comparación de los parámetros con su desviación estándar y la respuesta al paso se van corrigiendo los parámetros anteriormente definidos, hasta lograr los que proporcionen mejores resultados. El último paso es la validación de los modelos obtenidos, con el fin de determinar cual modelo satisface mejor el grado de exactitud requerido para la aplicación. Todos estos

procedimientos se realizan para las cuatro plantas en cuestión, lo que se muestra a continuación.

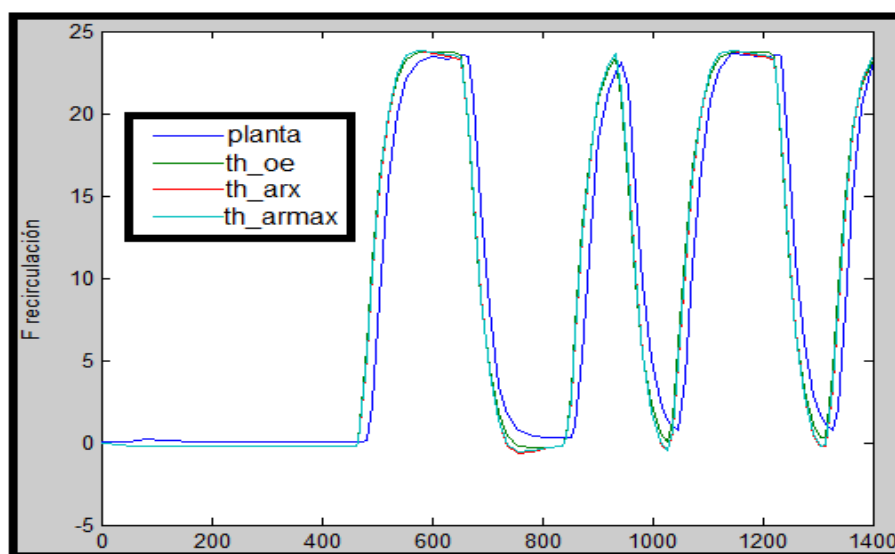
### Flujo de Recirculación (sistema válvula-tubería)

De acuerdo a la identificación paramétrica realizada, se obtienen los modelos representados por sus polinomios en la figura 3.7



**Figura 3.7 Polinomios correspondientes a las estructuras**

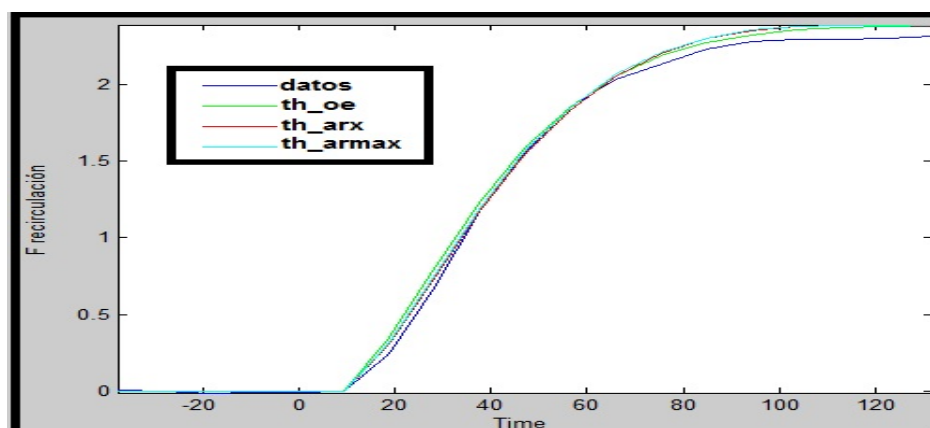
Estos modelos tienen buena concordancia con la planta real, lo que se demuestra en la figura 3.8.



**Figura 3.8 Simulación *off-line* de la planta real y los modelos obtenidos**

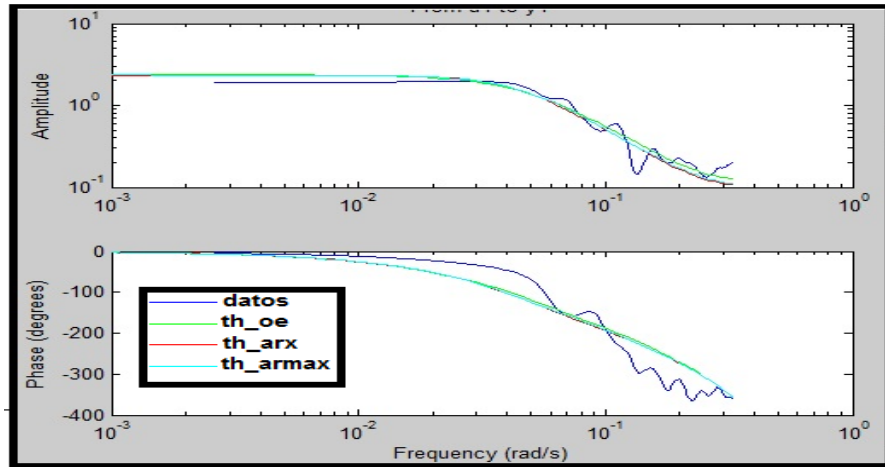
Para el análisis de la validación (ver Anexo no. 4 figura3) se comienza con la comparación de la respuesta al impulso (ver Anexo no. 5 figuras 4,5 y 6), entre el modelo no paramétrico y los paramétricos correspondientes a las estructuras. Las gráficas que representan la respuesta al impulso, muestran la respuesta obtenida por análisis de correlación a partir de los datos de entrada-salida (círculos) y la respuesta del sistema real (escalones). En cada una de ellas se comparan la respuesta del modelo no paramétrico con una de las estructuras y en todos los casos existe buena similitud entre cada modelo paramétrico y la identificación no paramétrica.

Otro proceso al realizar la identificación no paramétrica es hallar la respuesta al paso de los datos obtenidos mediante el experimento y la representación de la magnitud y fase correspondiente a los mismos; los que son comparados con la respuesta al paso y la fase y magnitud de los modelos paramétricos a modo de validación.



**Figura 3.9 Respuesta al paso del modelo no paramétrico y modelos paramétricos**

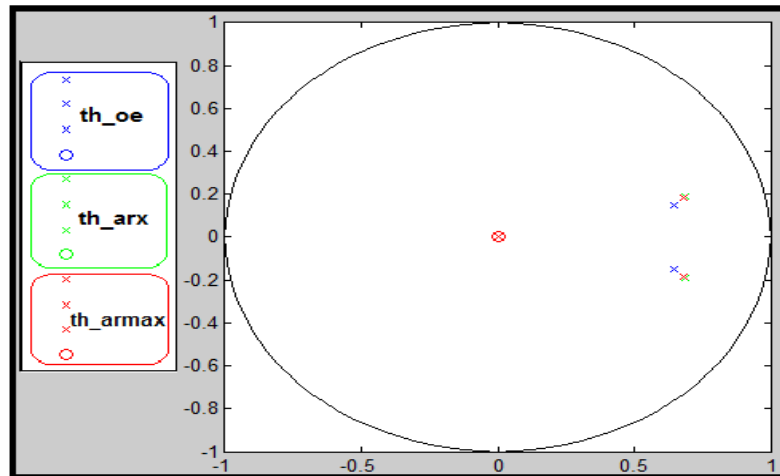
Como se puede discernir de las figuras 3.9 y 3.10, los tres modelos obtenidos como resultado presentan una dinámica similar entre ellos, en el caso de la respuesta al paso y el mismo rango de frecuencias de interés con respecto al diagrama de bode; lo que indica que ni el análisis en el dominio del tiempo ni en el dominio de la frecuencia conducen a una conclusión precisa sobre qué modelo aporta mejores características.



**Figura 3.10 Diagrama de bode**

La comparación realizada a partir de la figura 3.7 con relación a los parámetros y su desviación estándar, en cada estructura, permite arribar a la conclusión de que en ningún caso la desviación estándar resulta mayor que su parámetro correspondiente.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de polos y ceros. De lo que se puede percibir, los tres modelos tienen igual cantidad de polos y ceros, que coinciden en su ubicación y que en cada caso coincide la posición de un polo y un cero. Al examinar la posibilidad de la eliminación de ambos o de uno de ellos los resultados que arrojan las demás características de los modelos empeoran, por lo que no se efectúa la eliminación.



**Figura 3.11 Diagrama de polos y ceros**

El análisis de los residuos asegura que el modelo será más exacto cuanto más se acerquen a cero los términos de la correlación entre el error de predicción y la entrada del sistema.

En el análisis residual realizado (ver Anexo no. 5 figuras 7, 8 y 9), se observó que la estructura que mejor puede caracterizar la dinámica del sistema es la ARX. Con relación a la estructura OE en la función de autocorrelación los residuos se escapan significativamente del intervalo de confianza definido por *Matlab* y con la ARMAX sucede algo parecido, pero en menor medida.

Los siguientes parámetros de interés son la función de pérdida, la Predicción Final de Error de *Akaike* (en lo adelante FPE), que mientras menor sea el valor de ambas mejor es el modelo, y el por ciento de concordancia (FIT).

**Tabla 3.1 Comparación entre las estructuras**

<u>Estructura</u>	<u>Función Pérdida</u>	<u>FPE</u>	<u>FIT (%)</u>
OE	0.344685	0.35753	85.38
ARX	0.13212	0.136925	85.22
ARMAX	0.125375	0.131644	85.37

Según la tabla 3.1, estos parámetros tienen valores bastante aceptados. Con respecto a la función de pérdida y la FPE el mejor valor lo arroja el modelo ARMAX y en cuanto al FIT el mejor de ellos es el correspondiente a la estructura OE, aunque como se puede apreciar los valores de los tres modelos están muy próximos.

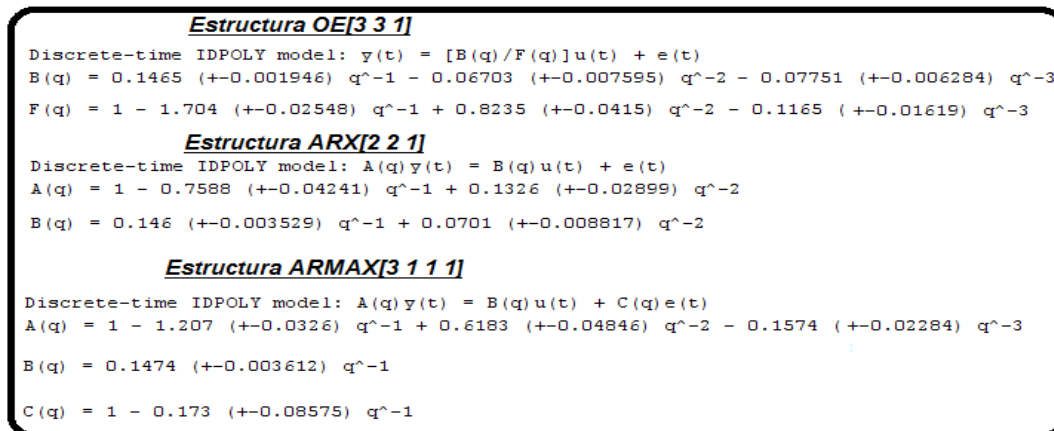
Según el análisis de todos los parámetros a validar, la estructura que cumple mejor con los requisitos es la ARX [2 1 2], por lo que el modelo seleccionado para el flujo de recirculación es:

$$\frac{0.02083 s + 0.0049062}{s^2 + 0.072036 s + 0.0020976}$$

**Figura 3.12 Función transferencial para flujo de recirculación**

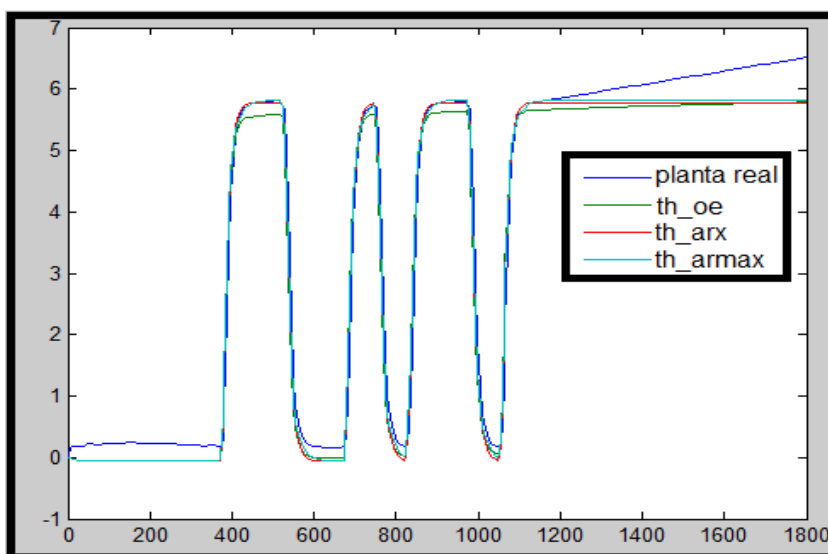
Flujo de Aire (sistema válvula-tubería)

Los modelos obtenidos para el sistema válvula-tubería del flujo de aire a partir de las tres estructuras definidas en este trabajo, se muestran a continuación, a través de sus polinomios.



**Figura 3.13** Polinomios correspondientes a las estructuras

En la figura siguiente se puede apreciar la similitud existente entre los modelos hallados y la planta real.



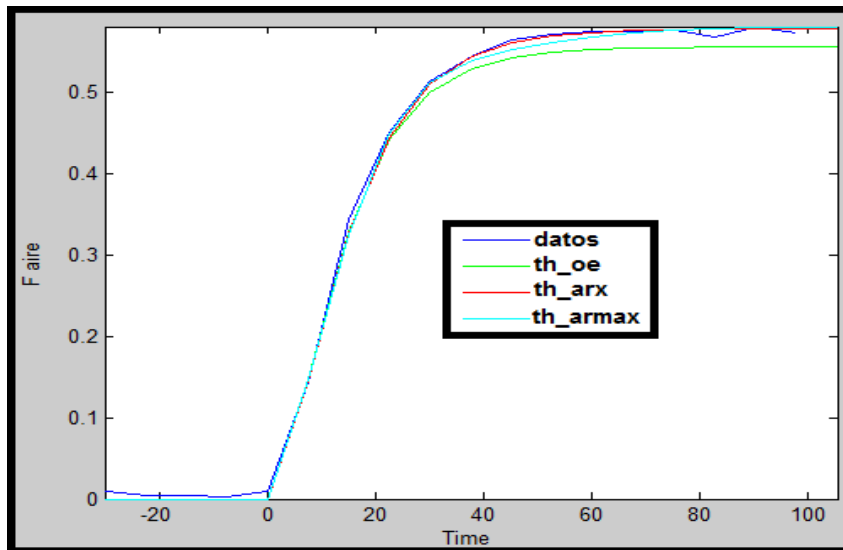
**Figura 3.14** Simulación *off-line* de la planta real y los modelos obtenidos

Para analizar la validación de cada una de las estructuras halladas, se comienza con la comparación de las respuestas obtenidas en la identificación no paramétrica y en la paramétrica.

Primeramente se comparan las respuestas al impulso (ver Anexo no.6 figuras 10, 11 y 12), del modelo no paramétrico con el modelo que brinda cada estructura y luego de este análisis se observa bastante semejanza entre ellos.

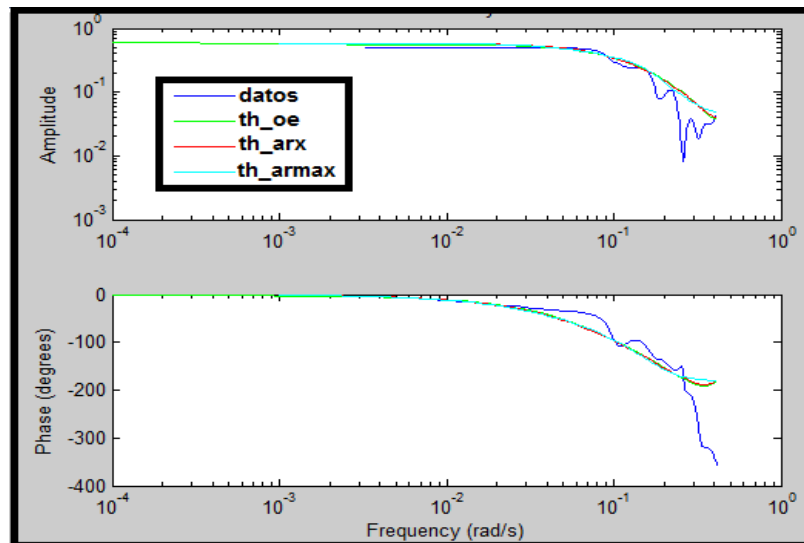
Un paso muy importante al validar un modelo, también lo constituye la comparación de la

respuesta al paso y la magnitud y fase de la identificación no paramétrica con los modelos obtenidos a partir del método paramétrico.



**Figura 3.15** Respuesta al paso del modelo no paramétrico y modelos paramétricos

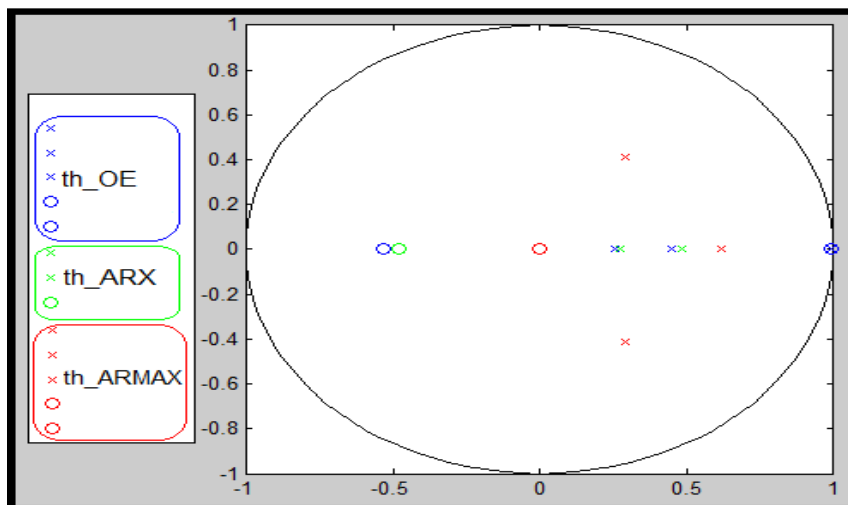
En la figura 3.15 se nota que la respuesta al paso de los modelos más próximos a la identificación no paramétrica son el ARX ( $th\_arx$ ) y el ARMAX ( $th\_armax$ ), pero que a pesar de que la estructura OE ( $th\_oe$ ) sea la de menor similitud eso no significa que su comportamiento sea inaceptable.



**Figura 3.16** Diagrama de bode

En el caso del diagrama de bode existe semejanza en los comportamientos, más en la magnitud que en la fase, a pesar del notable ruido que portan los datos de la identificación

no paramétrica.



**Figura 3.17 Diagrama de polos y ceros**

La información aportada por la figura 3.17 presume de que solo la estructura OE presenta una aproximación considerable en cuanto a la localización de un polo y un cero, pero no se considera la posibilidad de eliminar a uno de ellos o a ambos, porque esto conlleva a un empeoramiento de los resultados arrojados por la estructura. Además se puede distinguir que todos los polos y ceros, presente en el diagrama de bode se encuentra ubicados dentro del círculo de radio unidad.

A partir de la figura 3.13 se procede a la comparación de los parámetros de los polinomios de cada estructura con su error correspondiente y se arriba a la conclusión de que no existe ninguna imprecisión en este paso de validación, esto significa que cada parámetro de los polinomios es mayor que su desviación estándar correspondiente.

Otro método de validación es el análisis de los residuos (ver Anexo no. 6 figuras 13, 14 y 15), ante estos la estructura que mejor cumple con los requisitos es la OE, debido a que en la ARX algunos residuos, de la función de correlación de la salida, se salen del margen de validez y en la ARMAX sucede con un residuo.

Por último, se analizan la función de pérdida, la FPE y el por ciento de ajuste de cada estructura, mostrados en la tabla 3.2. La comparación analizada permite definir que los mejores resultados los arroja la estructura OE, pues presenta los menores valores de la función de pérdida y la FPE y el más alto porcentaje de concordancia.

**Tabla 3.2 Comparación entre las estructuras**

<u>Estructura</u>	<u>Función Pérdida</u>	<u>FPE</u>	<u>FIT (%)</u>
OE	0.00265376	0.00286748	97.37
ARX	0.00814153	0.00857003	91.45
ARMAX	0.00882153	0.00942991	91.55

Con relación a la validación realizada hasta el momento se considera que el modelo más fiable y que mejor describe al sistema, constituido por las variables: presión del tanque de saturación y flujo de recirculación, es el correspondiente a la estructura OE, cuya función de transferencia se muestra a continuación.

$$\frac{-0.0016763 s^2 + 0.010422 s + 1.1839e-005}{s^3 + 0.28517 s^2 + 0.01913 s + 2.0036e-005}$$

**Figura 3.18 Función transferencial para flujo de aire**

*Presión de la Cámara de Saturación (variable manipulada: F-recirculación)*

En la figura 3.19 se muestran, a partir de sus polinomios, las tres estructuras obtenidas para la planta conformada por la presión de la cámara y el flujo de recirculación.

```

Estructura OE[1 1 1]
Discrete-time IDPOLY model: y(t) = [B(q)/F(q)]u(t) + e(t)
B(q) = -0.01283 (+-0.0002298) q^-1

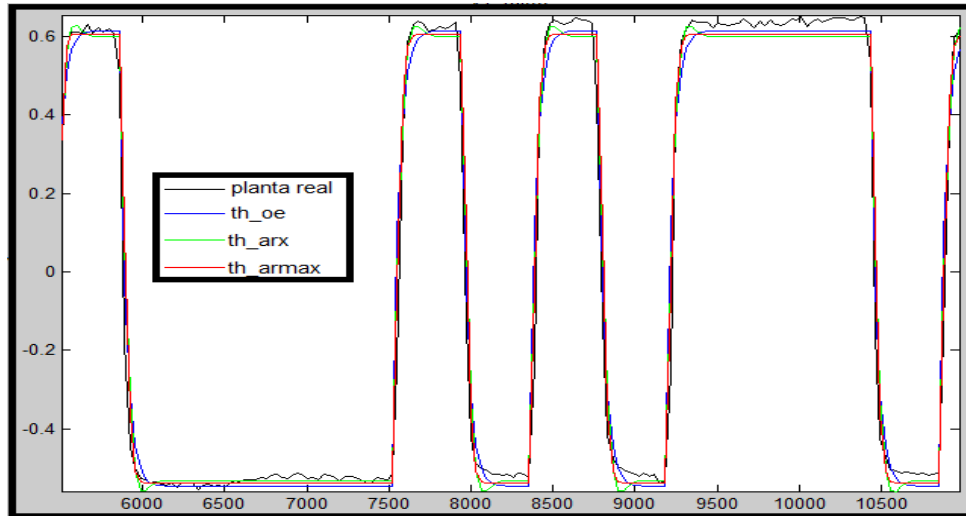
F(q) = 1 - 0.4477 (+-0.01013) q^-1

Estructura ARX[2 1 1]
Discrete-time IDPOLY model: A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t)
A(q) = 1 - 0.4981 (+-0.0461) q^-1 + 0.1182 (+-0.02517) q^-2
B(q) = -0.01 (+-0.0002687) q^-1 - 0.004141 (+-0.0005844) q^-2

Estructura Armax[2 2 1 1]
Discrete-time IDPOLY model: A(q)y(t) = B(q)u(t) + C(q)e(t)
A(q) = 1 - 0.3618 (+-0.07337) q^-1 + 0.05124 (+-0.03956) q^-2
B(q) = -0.009901 (+-0.0002705) q^-1 - 0.005841 (+-0.0008548) q^-2
C(q) = 1 + 0.2282 (+-0.0905) q^-1
    
```

**Figura 3.19 Polinomios correspondientes a las estructuras**

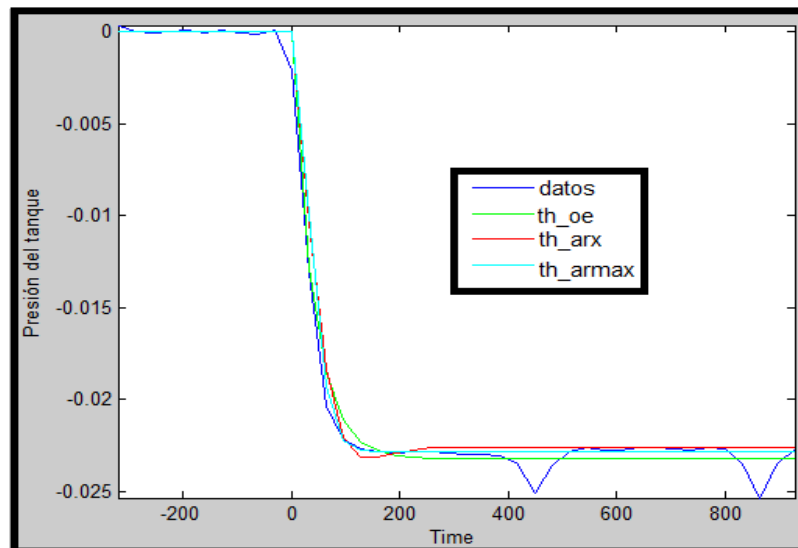
La aproximación existente entre los tres modelos presentados y la planta se muestra a continuación.



**Figura 3.20 Simulación *off-line* de la planta real y modelos obtenidos**

Siguiendo la filosofía anterior, se comienza la validación con la comparación de la respuesta al impulso de la identificación no paramétrica y las estructuras OE, ARX y ARMAX (ver Anexo no. 7 figuras 16, 17 y 18). De la comparación se puede afirmar que existe buena similitud entre la respuesta de los modelos correspondientes a las estructuras y al modelo no paramétrico.

Otro importante método de validación es la comparación de la respuesta al paso y la respuesta de frecuencia, determinados por el método no paramétrico y los obtenidos por la identificación paramétrica para las tres estructuras.



**Figura 3.21 Respuesta al paso del modelo no paramétrico y modelos paramétricos**

De la figura anterior, se puede observar que las respuestas al paso de las estructuras presentan una dinámica similar a la hallada, a partir de la identificación no paramétrica, al juego de datos obtenidos de la planta real.

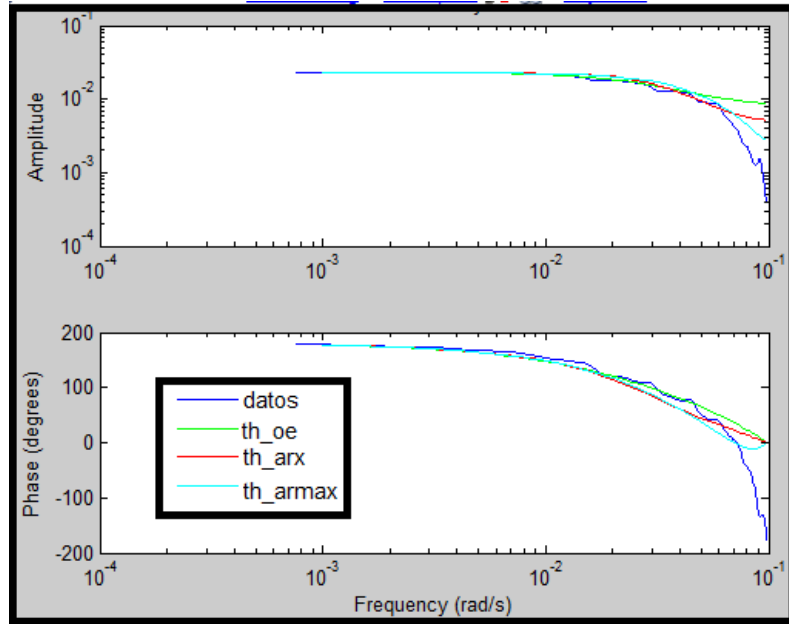


Figura 3.22 Diagrama de Bode

En el caso del diagrama de bode, mostrado en la figura anterior, se puede concluir que la margen y la fase de los modelos paramétricos tienen un comportamiento similar al de la respuesta de frecuencia del juego de datos de la planta real, hallada por la identificación no paramétrica.

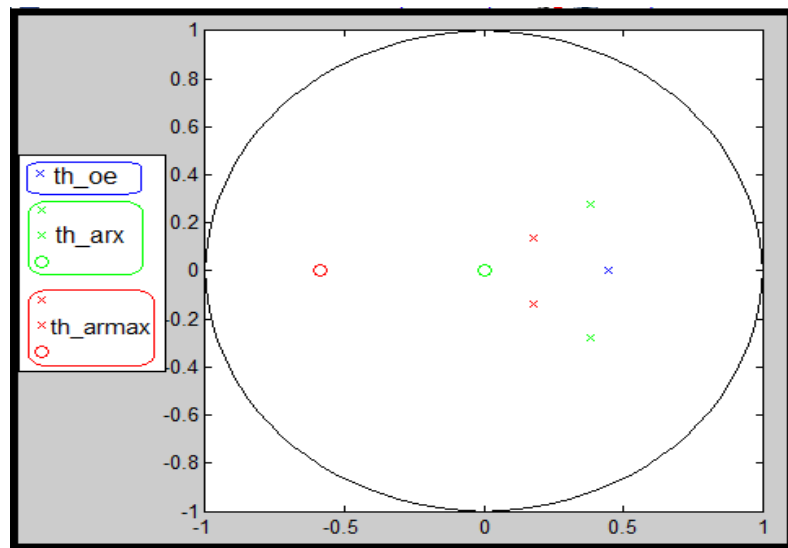


Figura 3.23 Diagrama de polos y ceros

La información aportada por el diagrama de polos y ceros supone que no existen aproximaciones considerables en cuanto a la localización de un polo y un cero de cualquiera de las estructuras y que todos ellos se encuentran dentro del círculo de radio unidad.

A partir de la figura 3.19 se puede comparar los parámetros de los polinomios de cada estructura con su error correspondiente y se arriba a la conclusión de que cada uno de los parámetros es mayor que su desviación estándar, lo que resulta satisfactorio.

En la representación de los residuos (ver Anexo no.7 figuras 19, 20 y 21), de la estructura OE se escapan algunos residuos del intervalo de confianza en su función de autocorrelación. Sin embargo las estructuras ARX y ARMAX cumplen mejor con los requisitos y de ellas la que puede caracterizar mejor la dinámica del sistema es la ARMAX.

Como último método de validación se analizan la función de pérdida, la FPE y el por ciento de ajuste.

**Tabla 3.3 Comparación entre las estructuras**

<u>Estructura</u>	<u>Función Pérdida</u>	<u>FPE</u>	<u>FIT (%)</u>
OE	0.00356364	0.00360544	88.35
ARX	0.00253495	0.00257929	89.32
AMAX	0.0021869	0.00225103	89.58

De la tabla anterior se distingue que las estructuras presentan resultados muy buenos, debido a que son muy pequeños los valores de la función de pérdida y la FPE. El mejor resultado con respecto a estos parámetros lo arroja la estructura ARMAX. En cuanto al FIT, los resultados son cercanos, sobre todo la estructura ARX y ARMAX, pero el mejor ajuste corresponde a esta última.

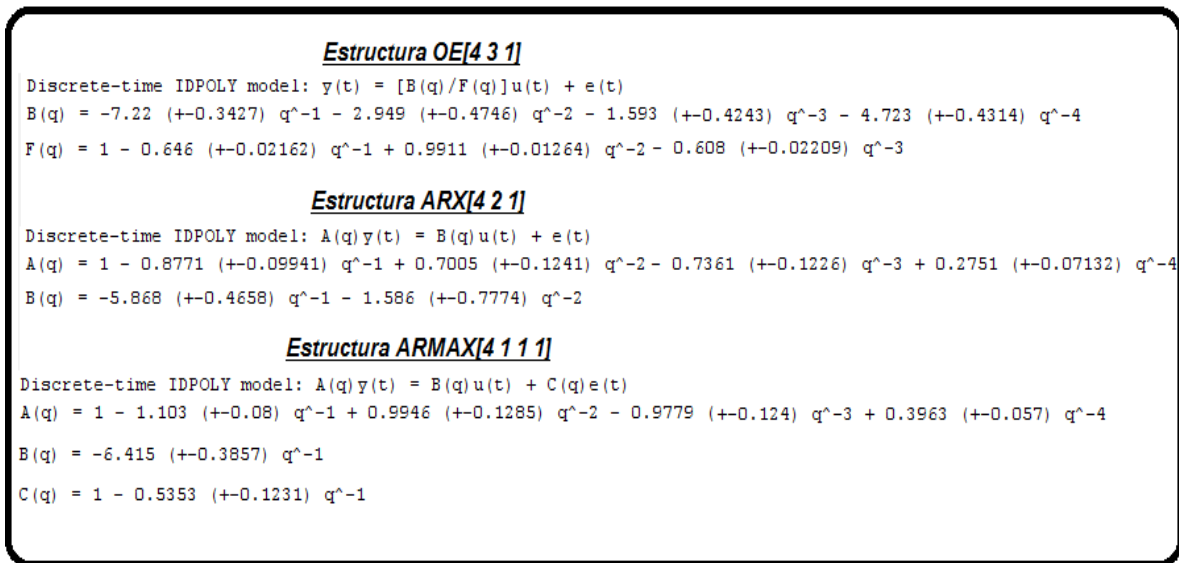
De acuerdo a todas las observaciones realizadas anteriormente, queda bien definido que, a pesar de ser el más complejo, el modelo más fiable es el proporcionado por la estructura ARMAX, cuya función transferencial se muestra a continuación.

$$\frac{0.00024356 s - 5.8485e-005}{s^2 + 0.092849 s + 0.0025613}$$

**Figura 3.24** Función transferencial para presión de la cámara de saturación

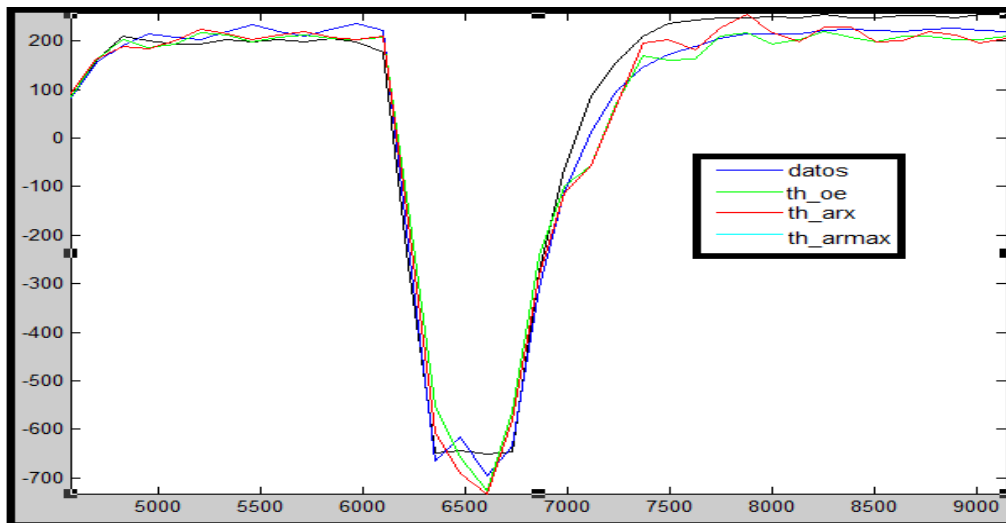
*Nivel del la Cámara de Recepción (variable manipulada: F-recepción).*

Los tres modelos obtenidos para la planta, constituida por el nivel de la cámara y el flujo de recepción, se muestran mediante sus polinomios, a continuación.



**Figura 3.25** Polinomios correspondientes a las estructuras

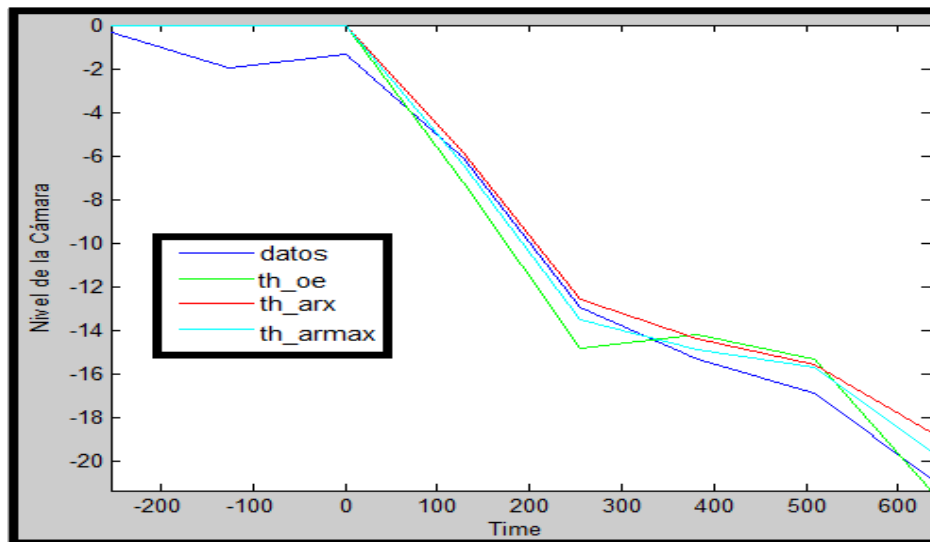
A continuación, se puede apreciar la analogía entre los modelos y planta real



**Figura 3.26** Simulación *off-line* de la planta real y los modelos obtenidos

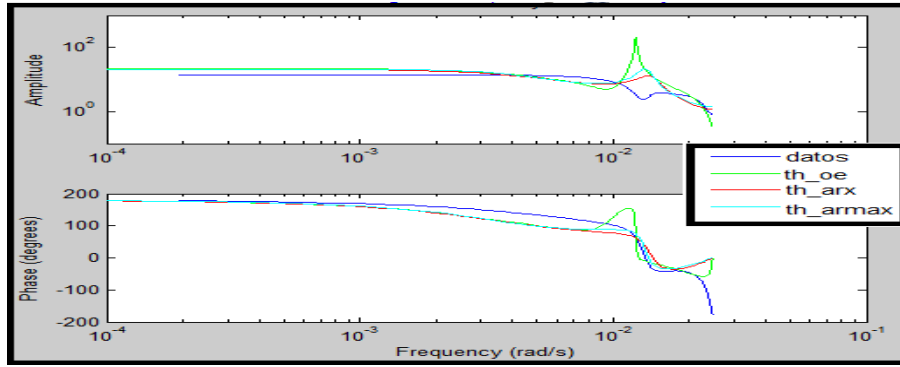
Como en los casos anteriores, la validación del modelo comienza con la comparación de la respuesta impulsiva de la identificación no paramétrica y la obtenida a partir de los modelos hallados (ver Anexo no. 8 figuras 22, 23 y 24). Del análisis realizado, se puede definir que las respuestas correspondientes a las estructuras muestran gran similitud con la identificación no paramétrica.

Otro método de validación en el dominio del tiempo es la comparación de las respuestas al paso de los modelos y el resultado obtenido por el método no paramétrico. Como se distingue las respuestas no son ciento por ciento semejantes, pero si tienen la misma dinámica con respecto a la respuesta de la identificación no paramétrica.



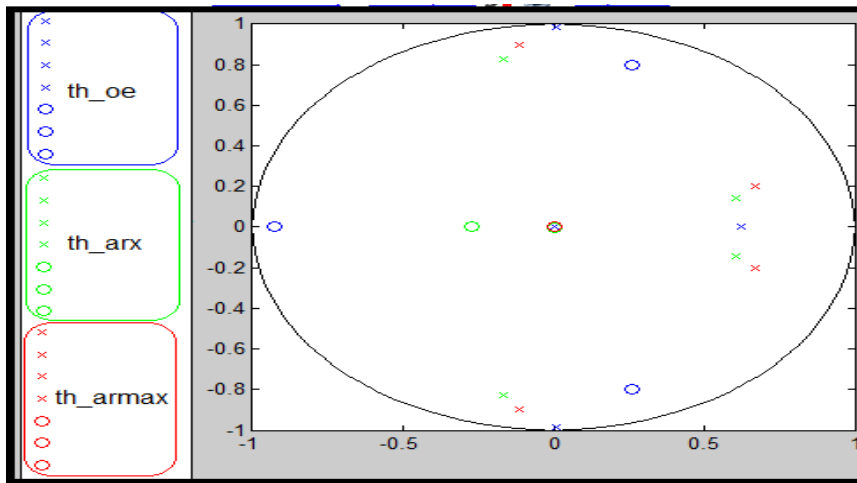
**Figura 3.27** Respuesta al paso del modelo no paramétrico y modelos paramétricos

La comparación realizada en el diagrama de bode, figura 3.28, muestra que los comportamientos son algo similar, sin embargo el que más se acepta es el de la estructura ARX.



**Figura 3.28 Diagrama de bode**

La información que aporta el diagrama de polos y ceros es que no existe coincidencia, con respecto a la ubicación, de un cero y un polo de la misma estructura, además todos los cero y polos del diagrama están dentro del círculo de radio unidad.



**Figura 3.29 Diagrama de polos y ceros**

A partir de la figura 3.25 se puede comparar los parámetros de los polinomios de cada estructura con su error correspondiente y se arriba a la conclusión de que en todos los casos los parámetros cumplen con la norma de ser mayor que su desviación estándar, lo que resulta satisfactorio.

El análisis de los residuos (ver Anexo no.8 figuras 25, 26 y 27) asegura que el modelo será más exacto, cuanto más se acerquen a cero los términos de la correlación entre el error de predicción y la entrada del sistema. Conforme el mismo, se puede ultimar que la dinámica del sistema queda mejor caracterizada por la estructuras ARX o ARMAX.

A continuación se realiza la validación en relación a la función de pérdida, la FPE y el mejor ajuste. De esta se puede apreciar que los resultados referentes a la función de pérdida

y la FPE son malos con respecto a los modelos obtenidos para los demás lazos, pero luego de realizar recursivamente el experimento en busca de mejores respuestas en función de estos resultados, los mejores que se obtuvieron fueron los aquí reflejados; a pesar de este inconveniente, como se puede apreciar los mejores valores son arrojados por la estructura ARMAX. En cuanto al FIT el mejor ajuste lo logra la estructura OE.

**Tabla 3.4 Comparación entre las estructuras**

<u>Estructura</u>	<u>Función Pérdida</u>	<u>FPE</u>	<u>FIT (%)</u>
OE	23.03	28.15	87.38
ARX	25.58	29.85	81.16
ARMAX	22.54	26.52	83.46

En función de la validación realizada, a pesar de ser el más complejo, el modelo más fiable para el nivel de la cámara de recepción es el proporcionado por la estructura ARMAX, cuya función transferencial se muestra a continuación.

$$\frac{-0.023719 s^3 - 0.00066736 s^2 - 9.0726e-006 s - 4.9885e-008}{s^4 + 0.0072888 s^3 + 0.00020203 s^2 + 1.0446e-006 s + 2.4119e-009}$$

**Figura 3.30 Función transferencial del modelo del nivel de la cámara**

### 3.2 Cálculo de los controladores

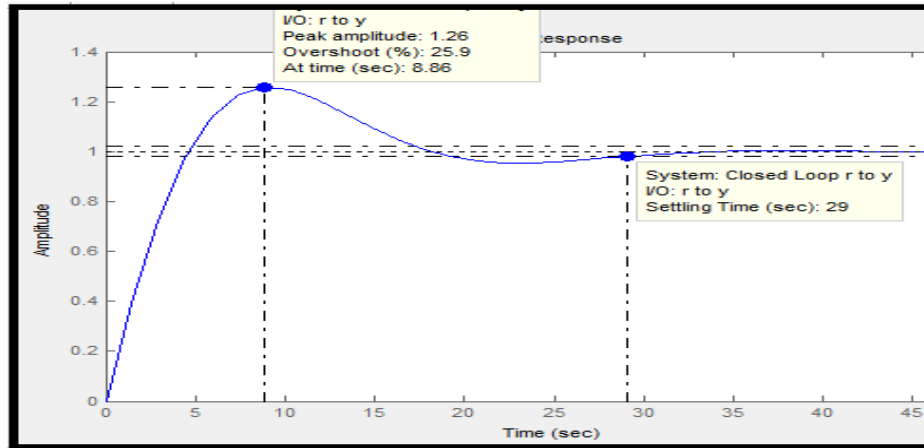
El alcance de este epígrafe llega hasta el ajuste de los controladores para los lazos de control de flujo de recirculación y flujo de aire.

El controlador que actualmente está implementado para el lazo de flujo de recirculación es un regulador Proporcional Integral (en lo adelante PI), cuya función transferencial se muestra en la figura siguiente.

$$\frac{13.3333 (s+0.075)}{s}$$

**Figura 3.31 Función transferencial del PI implementado (Kp=13.33; Ki=1)**

La respuesta al paso de la planta con el regulador anterior se puede observar en la figura 3.32.



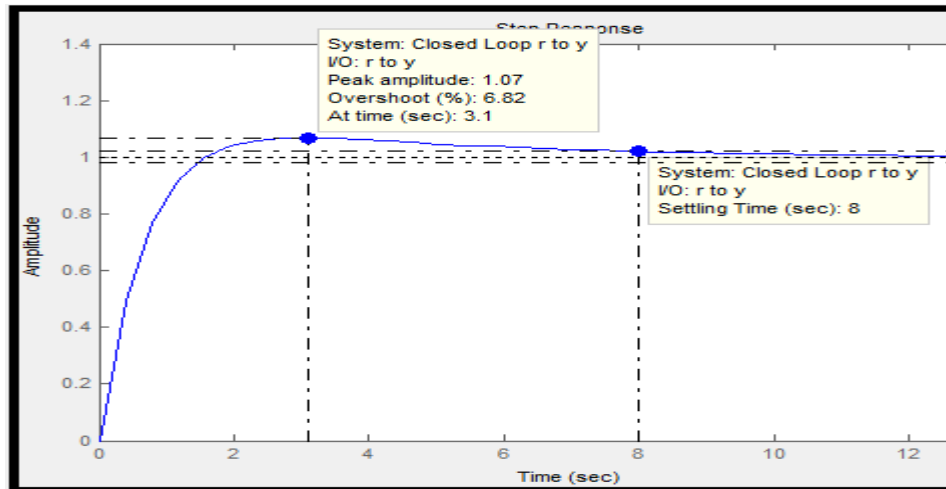
**Figura 3.32 Respuesta al paso con el PI actual en lazo de flujo de recirculación**

Como propuesta se diseña otro regulador PI debido a que la variable a controlar es flujo, que presenta la función transferencial mostrada en la figura 3.33.

$$\frac{80 (s+0.025)}{s}$$

**Figura 3.33 Función transferencial del PI propuesto ( $K_p=80$ ,  $K_i=2$ )**

Para el reajuste del controlador anterior se aumentó la ganancia proporcional a 80 y la ganancia integral a 2, lográndose una mejor respuesta, como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 3.34 Respuesta al paso con el PI propuesto**

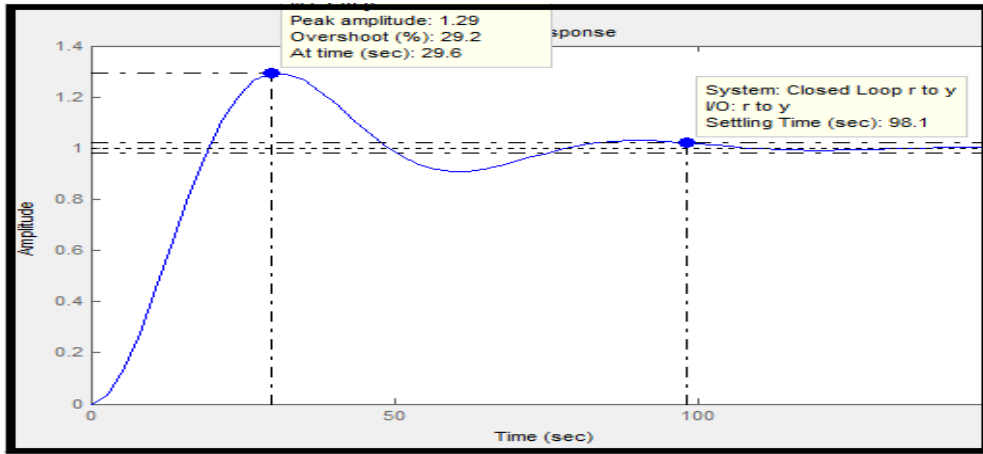
Los requisitos establecidos para el diseño del nuevo controlador fueron: lograr un menor sobreimpulso con el fin de que al producirse un cambio el flujo varíe lo menos posible y que se establezca en el menor tiempo posible; esto quiere decir que no se fijó un valor determinado para uno u otro parámetro; sin embargo se diseñó pensando que ambos debían ser bastante buenos.

En el caso del flujo de aire, actualmente, también se encuentra implementado un PI (figura 3.35).

$$\frac{(s+0.25)}{s}$$

**Figura 3.35** Función transferencial del PI implementado ( $K_p=1$ ,  $K_i=0.25$ )

En la figura mostrada a continuación, se puede ver la respuesta de la planta a un paso con el controlador anterior.



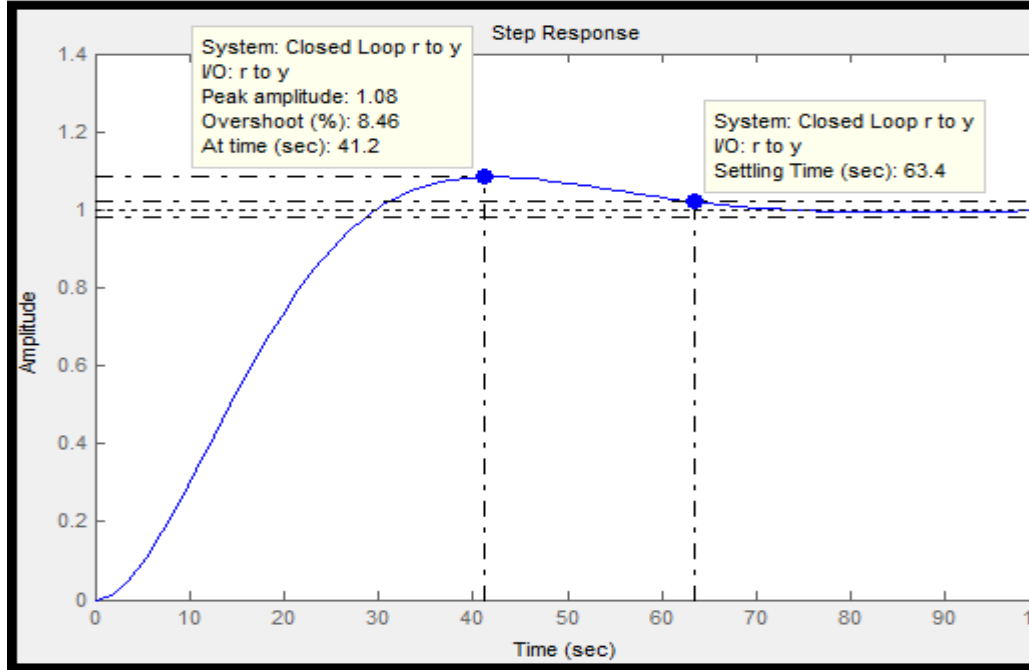
**Figura 3.36** Respuesta al paso con el PI actual en lazo de flujo de aire

De manera análoga al caso anterior, el controlador que se propone para este lazo (figura 3.37) se diseñó con la herramienta *Sisotool* de *Matlab*.

$$\frac{0.93333 (s+0.15)}{s}$$

**Figura 3.37** Función transferencial del PI propuesto ( $K_p=0.93$ ,  $K_i=0.13$ )

A partir de los valores actuales, tanto, la ganancias proporcional como la integral se fueron variando hasta lograr estos nuevos valores  $K_p=0.93$  y  $K_I=0.13$ , los cuáles proporcionan una mejor respuesta (figura 3.38).



**Figura 3.38 Respuesta al paso con el PI propuesto**

Como se puede observar en ambos casos, con el reajuste de los controladores se lograron mejorar los requisitos de la respuesta al paso, mostrando así que los controladores propuestos son más efectivos que los implementados.

### 3.3 Análisis económico

El análisis económico que se realiza en esta investigación, de manera general, parte primeramente de que con respecto a la instrumentación no es necesario invertir presupuestos, pues para implementar lo que se propone en este trabajo no es necesario ningún equipamiento o material adicional; más bien los gastos estarían encaminados a las horas de trabajo de los ingenieros. También es importante destacar que al no ocurrir el proceso de flotación adecuadamente y, por ende, el tratamiento del residual se vierte a la bahía el efluente aun contaminado y se tiran por la borda 1704000CUC anuales, que representa el gasto total de la planta en un año.

En lo particular, la valoración, se establece en los lazos de control. La misma se direcciona, fundamentalmente, hacia el flujo de aire; esto se debe a que en lo demás lazos el análisis que se realiza para cada uno de ellos no procede, como tal, a una valoración económica profunda.

Según los datos obtenidos del funcionamiento de la planta en el último mes, se tiene que: estuvo trabajando 596h que equivalen a aproximadamente 25 días, el flujo total de efluentes a tratar es aproximadamente  $260\text{m}^3/\text{h}$ , el flujo a recircular (50%) es de  $100\text{m}^3/\text{h}$ , el flujo de aire de unos  $13\text{m}^3/\text{h}$  y el tiempo de trabajo del compresor, según la frecuencia de arranque y parada debido a la demanda de aire para este y otros procesos es de 8h por día de trabajo.

Con el correcto funcionamiento de la planta, que pueden proporcionar los modelos y controladores aquí expuestos, los parámetros serían: flujo total de efluentes a tratar aproximadamente  $260\text{m}^3/\text{h}$ , flujo a recircular (50%) de  $130\text{m}^3$  y flujo de aire de hasta  $5\text{m}^3/\text{h}$ ; y de acuerdo a datos estimados por los especialistas, el tiempo de trabajo del compresor, según la frecuencia de arranque y parada definida por la demanda del aire sería de 6h.

Como se distingue con las propuestas planteadas en este trabajo se produce una disminución de las horas de trabajo del compresor, que se refleja en la energía demandada por el mismo, lo que se cuantificará a continuación, a modo de comparación.

La potencia del compresor, según datos técnicos, es de 26kw; este dato multiplicado por las horas de funcionamiento del mismo refleja el consumo energético de este y a su vez multiplicado por la tarifa industrial del kw-h, que es 0.21CUC promediando los tres horarios existentes en un día, cuantifica lo que hay que pagar por el consumo energético demandado por el compresor.

Funcionamiento actual:

En un día el consumo de energía es:

$$P_{\text{compresor}} * t_{\text{trabajo}} = \text{kwh}$$
$$26\text{w} * 8\text{h} = 208\text{kwh}$$

Por tanto el consumo mensual, para 25 días de trabajo del mes de mayo es: 5200kwh, que multiplicado por la tarifa define un gasto en electricidad de 1092CUC mensual, mientras que anualmente sería de 13104CUC.

Funcionamiento adecuado:

En un día el consumo de energía es:

$$P_{\text{compresor}} * t_{\text{trabajo}} = \text{kwh}$$
$$26\text{w} * 6\text{h} = 156\text{kwh}$$

Lo que representa un consumo mensual de 3900kwh y por tanto un gasto en energía eléctrica mensual de 819CUC y anual de 9828CUC.

Luego de este análisis, se puede concluir que con un funcionamiento adecuado de la planta es posible ahorrar 3276CUC anuales a la empresa, los cuáles no constituyen un valor apreciable en una industria; esto no significa que la cifra no sea trascendente, pues lo más importante para un ingeniero es la optimización de su trabajo, lo que se traduce en un funcionamiento efectivo del proceso con la menor cantidad de gastos posibles; lo que es una premisa en nuestros días, donde la crisis económica azota mundialmente y por supuesto, nuestro país no se encuentra exento a tal situación.

### 3.4 Consideraciones parciales

Luego de exponer los resultados obtenidos, se puede considerar que de los modelos hallados, el que mejor se ajusta a su planta real correspondiente es el del flujo de aire, con una concordancia de 97.37%.

El modelo del nivel de la cámara de recepción es el que peores características presenta, en comparación a los modelos hallados para los demás lazos, debido a la dinámica compleja que presenta dicha planta.

Se considera que cada planta queda suficientemente caracterizada por su correspondiente modelo hallado, en base a la aplicación de este último que no es más que la síntesis de controladores; lo que se evidencia en el desempeño de los controladores ajustados para el lazo de flujo de aire y flujo de recirculación.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

1. Luego del estudio diagnóstico realizado se pudo comprobar que es factible el hallazgo del modelo matemático que permita la síntesis de reguladores y modelar en tiempo real el proceso de recirculación de residuales a flotador en la planta de tratamiento residual para lograr mejoras en el proceso.
2. La aplicación de las técnicas de la identificación experimental de sistemas, permitió la obtención de modelos representativos del proceso de recirculación de efluentes, en el tratamiento de aguas residuales de la refinería “Camilo Cienfuegos”.
3. Los modelos hallados permiten la síntesis de controladores que mejoran considerablemente el comportamiento de los sistemas.

**Recomendaciones**

1. Cambiar el flujómetro existente en la línea de recirculación, debido a que es ultrasónico y el flujo que mide llega con burbujas de aire, por lo que en un momento dado puede falsear la medición.
2. Cambiar las válvulas de mariposa existentes por válvulas de compuertas, debido a que las primeras cuando operan a más de un 70% de apertura, ya no son capaces de regular el flujo debido a la saturación de las mismas.
3. Adquirir una planta piloto de la estación de tratamiento de aguas residuales para futuros trabajos.
4. Sintetizar nuevos controladores para los lazos de presión del tanque de saturación y nivel de la cámara de recepción, que otorguen un mejor comportamiento ante cambios producidos en la variable controlada.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- A.W.W.A (2002). CALIDAD Y TRATAMIENTO DEL AGUA. Manual de suministros de agua comunitaria.
- Aguilar, M. (2002). Tratamiento físico-químico de aguas residuales. COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN, Universidad de Murcia.
- Arundel, J. (2002). Tratamientos de Aguas Negras y Efluentes Industriales
- Avilés (2002). Identificación de parámetros de sistemas dinámicos. R. C. e. I. Noegradina.
- Básico, D. d. A. P. y. S. (2000). Sistema de Potabilización. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. M. d. D. Económico. Bogotá, Colombia.
- BIWATER (2007). La Compañía de Agua Perfecta.
- Borrego, L. (2010). Rehabilitación de la automática de PTR (Ampliación I). Refinería “Camilo Cienfuegos”.
- Cadorin, L. (2004). TRATAMIENTO DE RILES MINEROS ÁCIDOS POR PRECIPITACIÓN QUÍMICA Y FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO. É. Tabosa, M. Paiva and J. Rubio. Brasil.
- Cadorin, L. (2007). Avances en el Tratamiento de Aguas Ácidas de Minas. E. Carissimi and J. Rubio.
- CALVO, M. S. (1999). AGUAS RESIDUALES: TRATAMIENTO POR HUMEDALES ARTIFICIALES.
- Carazo, J. P. (2003). AGUAS RESIDUALES EN LA ARQUITECTURA SOSTENIBLE. Medidas preventivas y técnicas de reciclaje.
- Carmona, O. R. (2000). Tratamiento Físico-Químico de Aguas Residuales congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. Distrito Federal, México.
- Colombia, M. d. M. A. d. (2002). Sistema de Alcantarillado y Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. Guía Ambiental. Bogotá Colombia, Ministerio del Medio Ambiente de Colombia.
- Chamizo, J. C. P. (2003). Control de una planta de tratamiento de aguas residuales mediante redes neuronales, Universidad de Extremadura.

- Díaz, F. A. (2009). Desarrollo de un Simulador de una Planta de Lodos Activados. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Cuba.
- ECOMAC (2008). FLOTADOR CIRCULAR DAF MOD. ECOFLOAT. Alcorcón, Madrid, España.
- Fernández-Alba, A. R., P. L. García, et al. (2006). Tratamientos Avanzados de Aguas Residuales Industriales, Universidad de Alcalá
- García, D. A. (2005). Aplicación de Métodos Estadísticos Multivariantes para la Modelación y la Monitorización de un Reactor Discontinuo Secuencial para el Tratamiento de Aguas Residuales, Universidad Politécnica de Valencia.
- García, D. P. (2011). Identificación y caracterización de los puntos de medición para la instrumentación prevista en el alcance del proyecto "Sistema de Neutralización de las Aguas en el Canal de Mezcla al Flotador PTR", Refinería "Camilo Cienfuegos".
- García, D. P. (2011). Propuestas de mejoras a los procesos de Tratamiento Físico-Químicos de Aguas Residuales en la Planta de Tratamiento de la refinería de petróleo "Camilo Cienfuegos". Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales  
Dpto. de Ingeniería Industrial. Cienfuegos, Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez".
- Gross, F. (1996). Clarificación de Agua por Flotación con Aire Disuelto. Aplicaciones desarrolladas en Uruguay y Brasil. V. Cristar and C. Richter.
- Hernández, A. (2004). Manual de Depuración Uralita. Sistemas para Depuración de Aguas Residuales en Núcleos de hasta 20.000 Habitantes.
- Infoenviro (2007). Ampliación de la ETAP de Majadahonda, Madrid. Extension of the Potable Water Treatment Plant in Majadahonda, Madrid. España.
- Izquierdo, S. M. (2005). Identificación de Sistemas, Universidad de Valladolid, Madrid.
- Juana, R. I. d. (2005). Proyectos de Plantas de Tratamiento de Aguas,. Aguas de Proceso, Residuales y de efrigeración.
- Kunusch, C. (2003). Identificación de Sistemas Dinámicos, Universidad Nacional de la Platam, Facultad de ingeniería, Dpto. de Electrotecnia
- Ljung, L. (1999). System Identification: Theory for the User, Linköping University.
- Ljung, L. (2007). "System Identification Toolbox." User's Guide, The MathWorks.
- López, M. E. G. (2002). Identificación de Sistemas. Aplicación al modelo de un motor de continua., Universidad de Alcalá de Henares, Departamento de Electrónica.
- LTDA, I. C. (2009). Sistema de Tratamiento de Residuos Líquidos Industriales (RILES). Chile.
- Mijaylova, P. N. (2002). REMOCIÓN DE ACEITE EMULSIFICADO EN EFLUENTES DE REFINERÍAS MEDIANTE DESESTABILIZACIÓN DE LA EMULSIÓN Y FLOTACIÓN. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y

- Ambiental. G. M. Mantilla, L. Y. Sandoval, M. G. Sánchez et al. Cancún, México, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,.
- Monteiro, C. C. A. (2010). Controlador Predictivo para el Proceso de Lodos Activados. Dpto de Automática y Sistemas Computacionales, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Cuba.
- Normalización, O. N. d. (1999). NC 27: 1999. Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. O. N. d. Normalización. La Habana, Cuba.
- Normalización, O. N. d. (2007). NC 521: 2007. Vertimiento de aguas residuales a la zona costera y aguas marinas. O. N. d. Normalización. La Habana, Cuba.
- Overschee, P. V. (1996). Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation, Applications, Kluwer Academic Publishers.
- Pinas, L. M. (2009). Desarrollo de un Simulador Para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba
- Puerto, N. V. and J. R. Á. Rodríguez (2008). MANUAL DE OPERACIONES DE LA PLANTA DE ABASTO DE AGUA Y TRATAMIENTO DE RESIDUALES. P. C. S.A. Cienfuegos Cuba.
- Ramalho, R. S. (2003). Tratamiento de Aguas Residuales. Madrid, España.
- Rodier, J. (2011). Análisis del Agua.
- Rodríguez, J. R. A. (2008). Instrucción Técnica para el tratamiento físico-químico de las aguas residuales. Cienfuegos, Cuba.
- Rodríguez, P. G. I. and G. D. B. Pantoja (2004). Línea de Profundización en Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Colombia, Dpto de Ingeniería Química.
- Rubio, A. E. (2010). Conferencia 1. Identificación de Sistemas un poco de teoría y algunos criterios prácticos, UCLV, Dpto. Automática.
- Rubio, A. E. (2010). Conferencia 2. Identificación de Sistemas un poco de teoría y algunos criterios prácticos, UCLV, Dpto. Automática
- Russell, D. (2012). Tratamiento de Aguas Residuales. Un Enfoque Práctico. España.
- Santander (2008). FLOTACION COMO PROCESO DE REMOCION DE CONTAMINANTES. III.NUEVAS TÉCNICAS Y EQUIPOS. D. Rosa, Souza and Rubio. Porto Alegre, Brasil, Universidad Federal do Rio Grande do Sul, Dpto. Ingeniería de Minas.
- SCRIBD. (2010). "Procesos de Depuración de Aguas Residuales. Tema 5. Tratamiento Físico-Químico." Retrieved 1 enero 2012, from <http://www.scribd.com/doc/81471909/Tema5-Tratamiento-Fisico-Quimico-2009-2010>.
- Works, W. O. (2005). W&OW Finaliza exitosamente la Rehabilitación de los Trenes API y DAF de la Planta de Efluentes de la Refinería el Palito de PDVSA.

## ANEXOS

### Anexo No.1

**Tabla 1 Norma cubana de límites máximos para parámetros de residuales líquidos.**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>LMPP</b>
<b>Temperatura</b>	°C	< 50
<b>pH</b>	Unidades	6-9
<b>Sólidos Sedimentables</b>	mL/L	<10
<b>Grasas y Aceites</b>	mg/L	<50
<b>Conductividad</b>	μS/cm	<4000
<b>DBO<sub>5</sub></b>	mg/L	<300
<b>DQO (Dicromato)</b>	mg/L	<700
<b>Fenoles</b>	mg/L	<5
<b>Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)</b>	mg/L	<25
<b>Aluminio</b>	mg/L	<10,0
<b>Arsénico</b>	mg/L	<0,5
<b>Cadmio</b>	mg/L	<0,3
<b>Cianuro</b>	mg/L	<0,5
<b>Cobre</b>	mg/L	<5,0
<b>Cromo hexavalente</b>	mg/L	0,5
<b>Cromo total</b>	mg/L	2,0
<b>Mercurio</b>	mg/L	0,01
<b>Plomo</b>	mg/L	1,0
<b>Zinc</b>	mg/L	5,0
<b>Sulfuros</b>	mg/L	5,0

## Anexo No. 2 Parámetros y normas en el sistema FAD

**Tabla 2 Síntesis de los principales parámetros operacionales de sistemas FAD**

Parámetro	Holanda	Finlandia	Reino Unido	Escandinavia	Brasil y Uruguay
• Tiempo de floculación (min)	8-16	30-45	20-29	26-29	18-24
• Tiempo de flotación (min) - Tasa de escurrimiento superficial (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .día) - Tasa de recirculación (%) - Presión de saturación (bar)	nd (2) 240-480 6,5-15 4-8	10-160 72-192 5,6-42 3-7	5-20 120-290 6-10 3,1-8,3	12-15 96-170 4-14 4,7-5,5	10-15 180-200 5-10 4,5-5
• Remoción de lodo - Proceso - Frecuencia	nd nd	nd 0-24°	mecánico 0-2	hidráulico -	mec/hidr 0-24
• % de sólidos en el lodo	0,1-8	3	0,3-3	0,1-6	3-7

**Tabla 3 Características del agua a la salida de los flotadores**

<u>Parámetro</u>	<u>Norma</u>
Productos del petróleo	25 mg/litros
Materia en suspensión	menor de 30mg/litros
DQO (demanda química de oxígeno)	No se norma
pH	7– 8.5

Anexo No. 3 Diagramas en Simulink para la obtención de datos

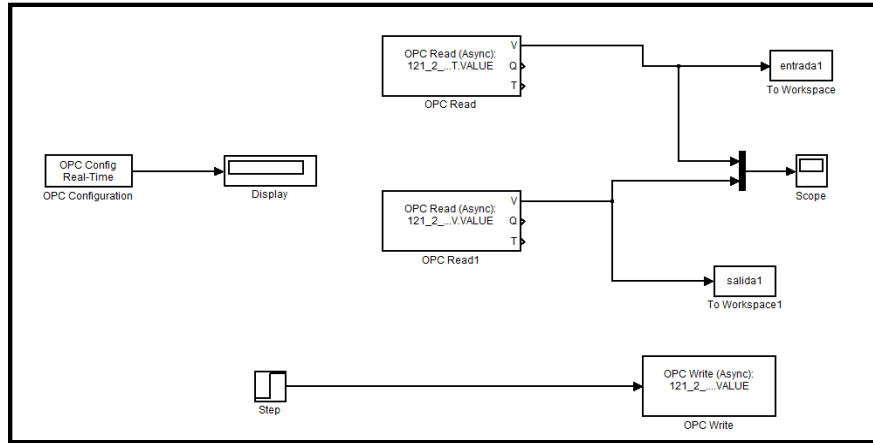


Figura 1 Diagrama en Simulink para la obtención de datos

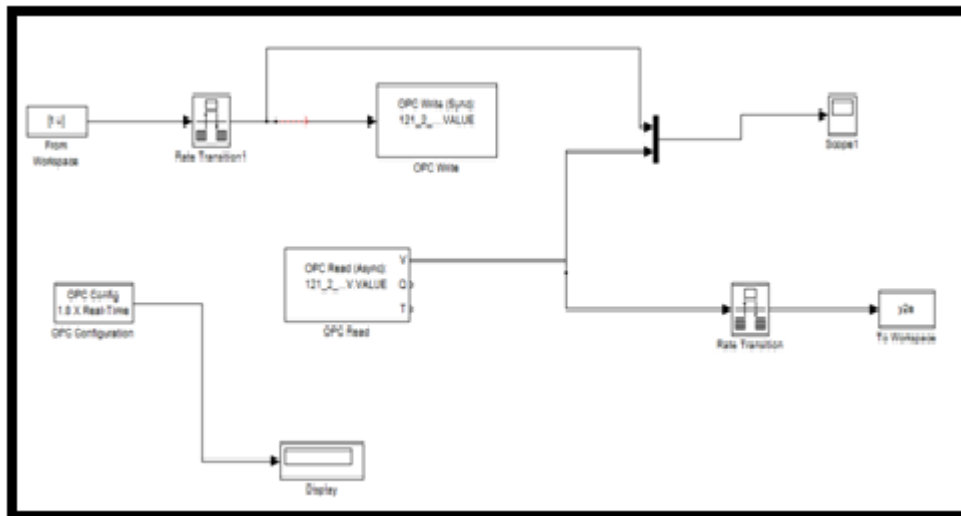


Figura 2 Diagrama en Simulink para la captura de los datos

## Anexo No. 4 Pasos para la validación

<pre> %% Identificación experimental: clc close all datos=[u y2e]; % Construcción de la matriz con los datos de entrada-salida dat = iddata(y2e,u,tm); % dat = detrend(dat); lf = size(dat); lf = lf(1); lm = round(lf/2); date = dat(1:lm); date = detrend(date); datv = dat(lm:lf); datv = detrend(datv); %% Identificación no paramétrica figure cra(date); % respuesta al impulso obtenida por correlación figure sr = step(date); % respuesta al paso obtenida por correlación step(sr); gw = spa(date); % respuesta de frecuencia % Identificación paramétrica th_oe = oe(dat,[1 2 2]); % Estimación por LS con estructura OE present(th_oe); % Presentación de los resultados th_arx = arx(dat,[2 1 2]); % Estimación por LS con estructura ARX present(th_arx); % Presentación de los resultados th_armax = armax(dat,[2 1 1 2]); % Estimación por con estructura ARMAX present(th_armax); % Presentación de los resultados </pre>	<pre> %% Validación % Comparación de las respuestas al paso figure step(sr,th_oe,th_arx,th_armax) % Comparación de las respuestas de frecuencia figure bode(gw,th_oe,th_arx,th_armax) % Verificación de los polos y ceros figure pzmap(th_oe,th_arx,th_armax); % Validación por simulación figure compare(datv,th_oe,th_arx,th_armax); % Análisis de los residuos figure resid(datv,th_oe); pause resid(datv,th_arx); pause resid(datv,th_armax); </pre>
--	--

**Figura 3 Programación en Matlab para la validación de los modelos**

## Anexo No. 5 Validación del modelo de flujo de recirculación

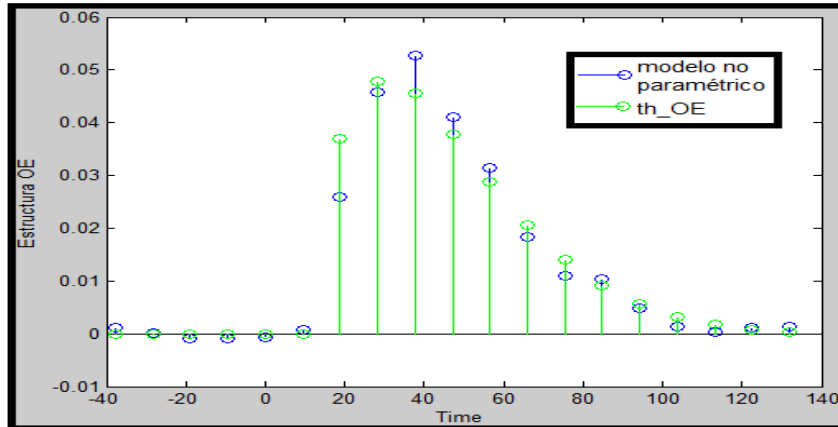


Figura 4 Comparación del modelo OE con el modelo no paramétrico

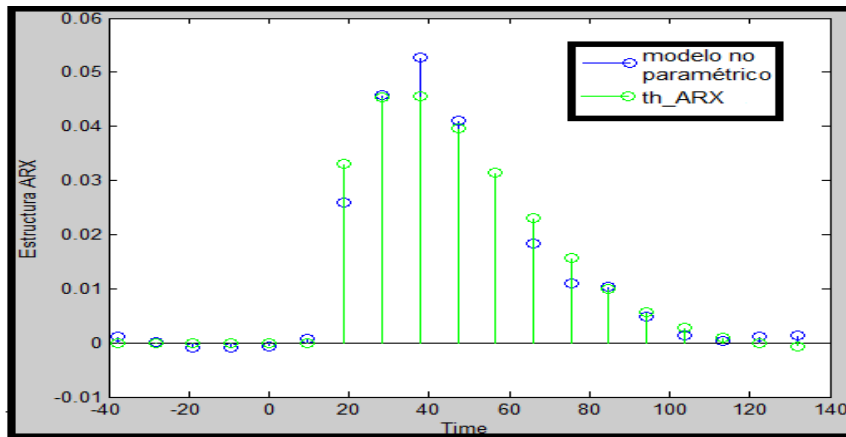


Figura 5 Comparación del modelo ARX con el no paramétrico

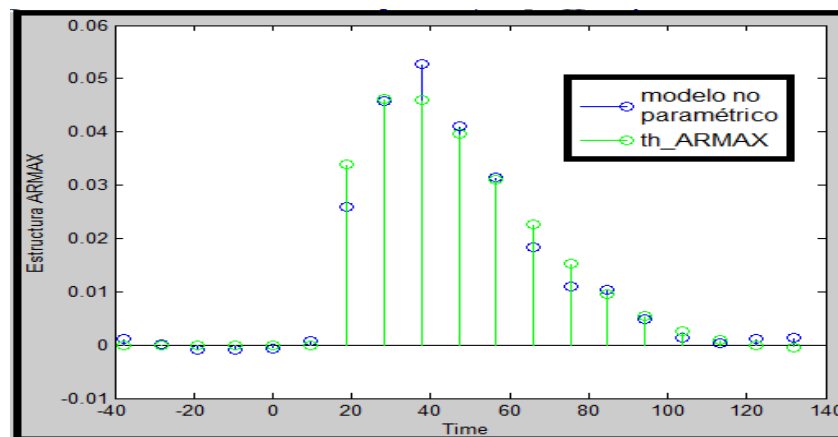
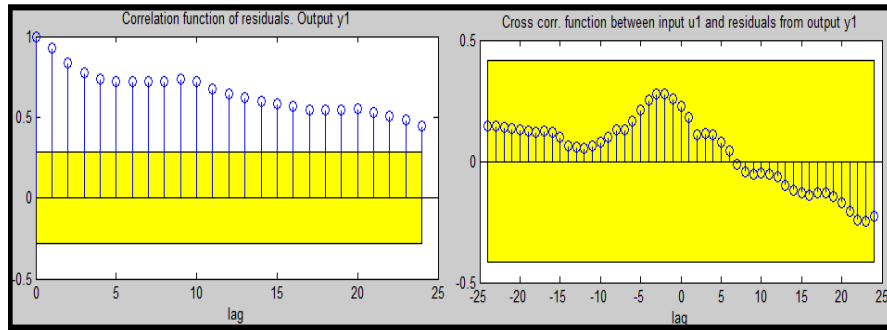
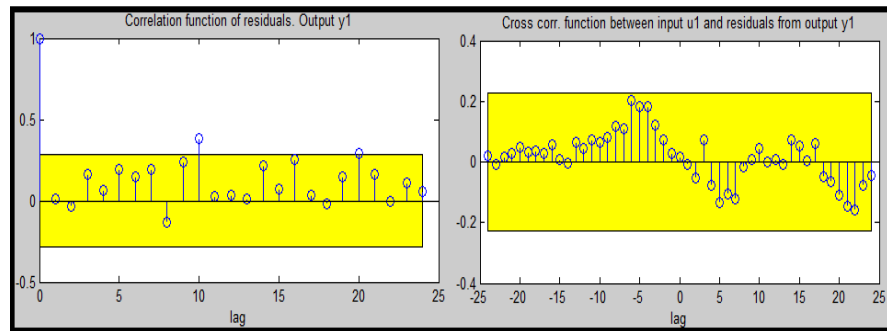


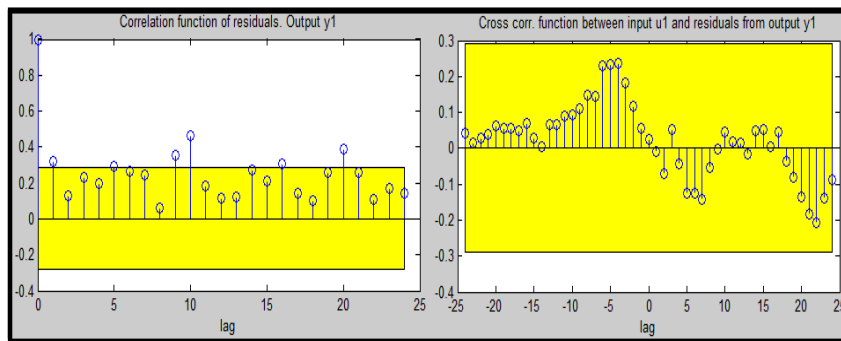
Figura 6 Comparación del modelo ARMAX con el no paramétrico



**Figura 7 Residuos correspondientes al modelo OE**



**Figura 8 Residuos correspondientes al modelo ARX**



**Figura 9 Residuos correspondientes al modelo ARMAX**

## Anexo No. 6 Validación del modelo de flujo de aire

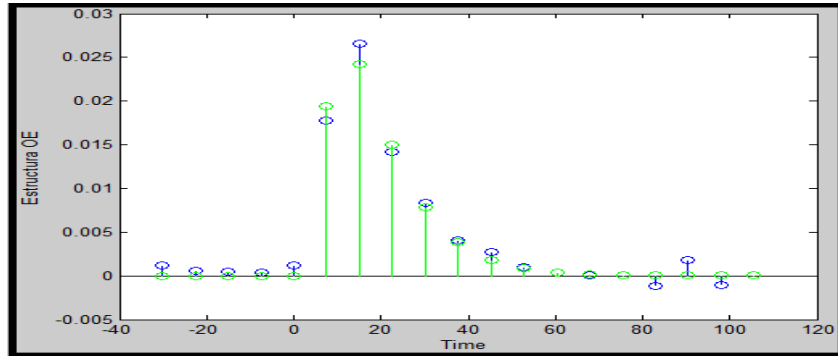


Figura 10 Respuesta al impulso del modelo OE y el no paramétrico

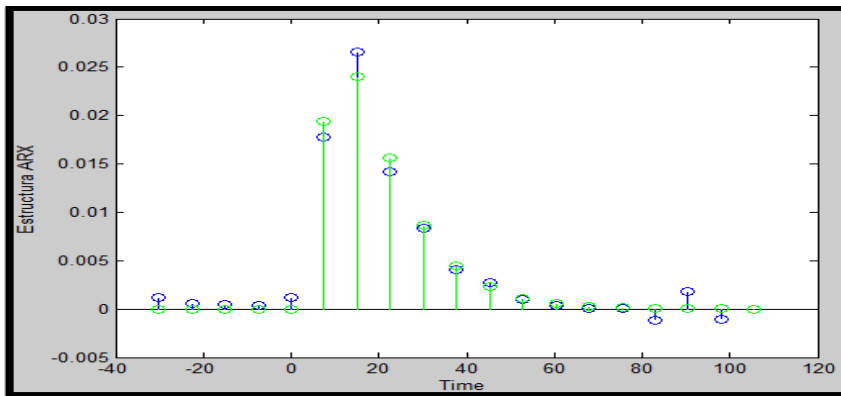


Figura 11 Respuesta al impulso del modelo ARX y el no paramétrico

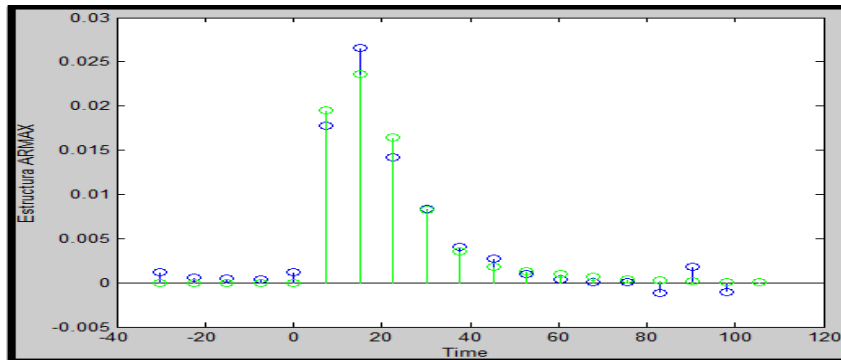
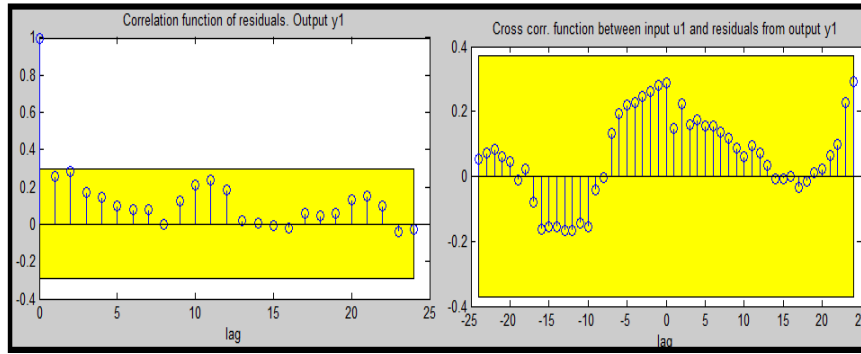
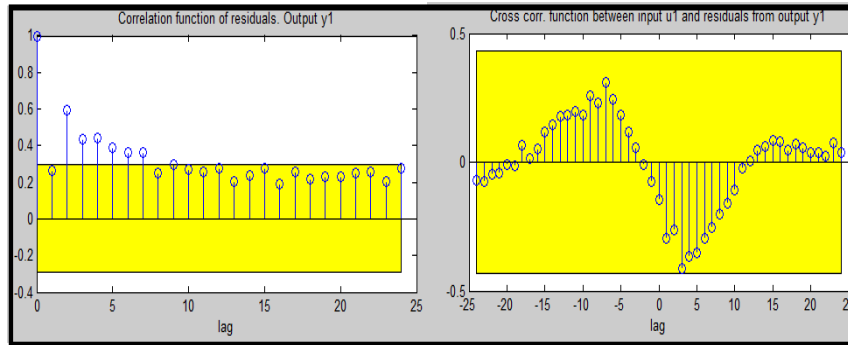


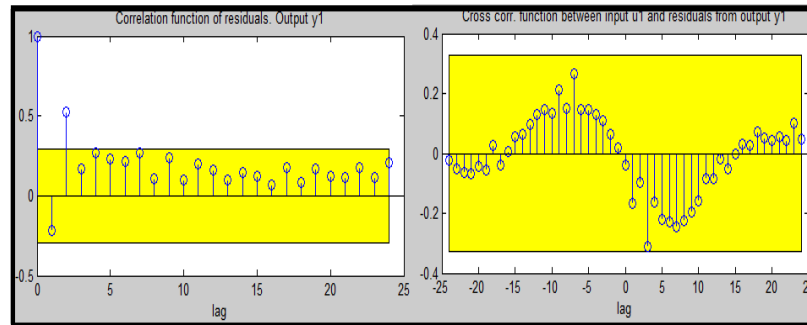
Figura 12 Respuesta al impulso del modelo ARMAX y el no paramétrico



**Figura 13 Residuos correspondientes al modelo OE**



**Figura 14 Residuos correspondientes al modelo ARX**



**Figura 15 Residuos correspondientes al modelo ARMAX**

## Anexo No. 7 Validación del modelo de la presión del tanque de saturación

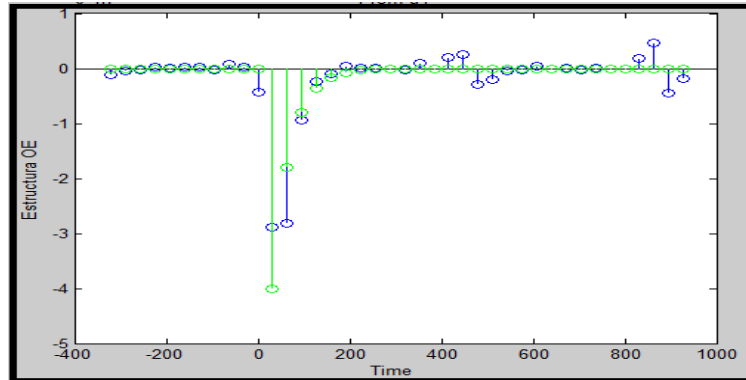


Figura 16 Respuesta al impulso del modelo OE (verde) y el no paramétrico (azul)

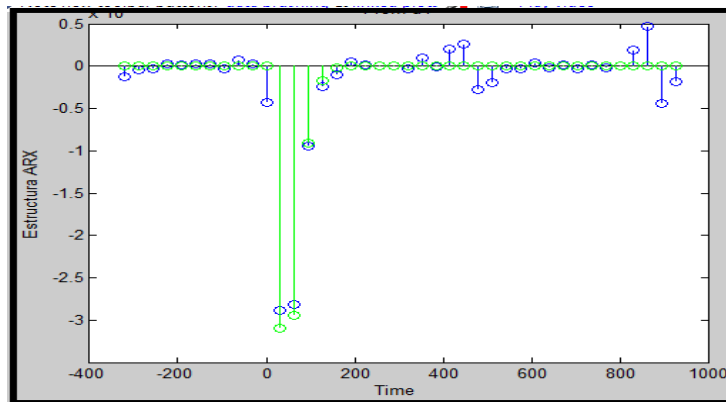


Figura 17 Respuesta al impulso del modelo ARX (verde) y el no paramétrico (azul)

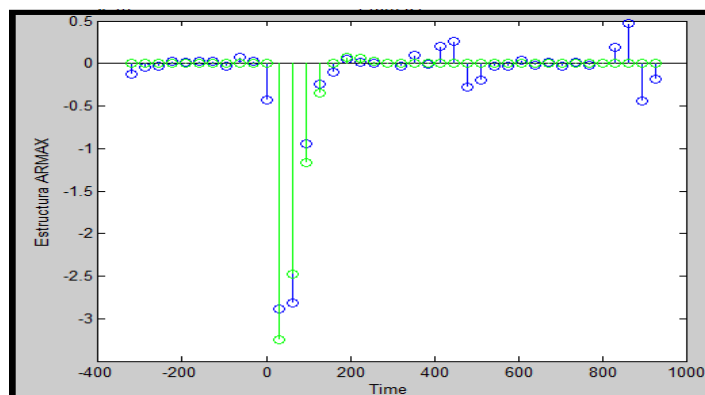
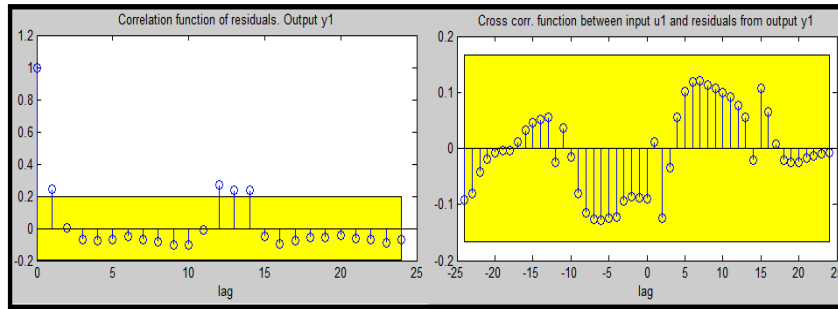
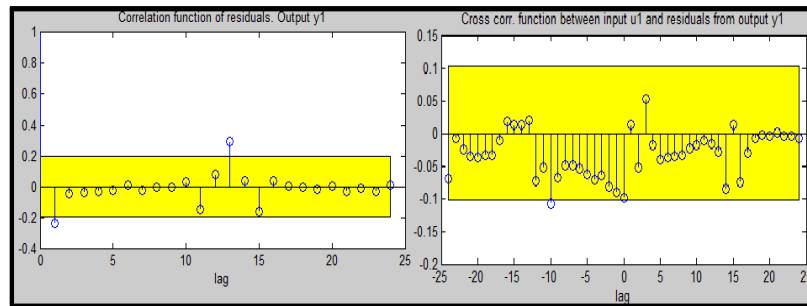


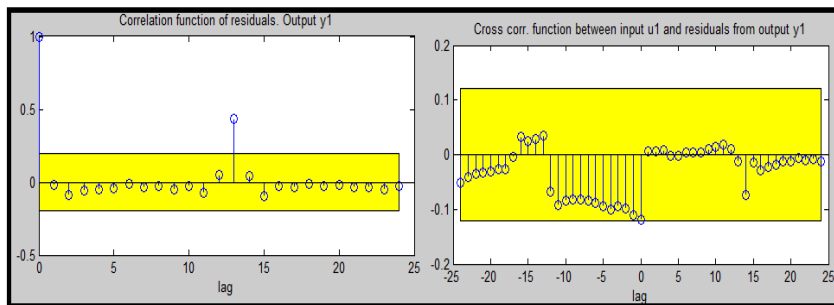
Figura 18 Respuesta al impulso del modelo ARMAX (verde) y el no paramétrico (azul)



**Figura 19 Residuos correspondientes al modelo OE**



**Figura 20 Residuos correspondientes al modelo ARX**



**Figura 21 Residuos correspondientes al modelo ARMAX**

## Anexo No. 8 Validación del modelo del nivel de la cámara de recepción

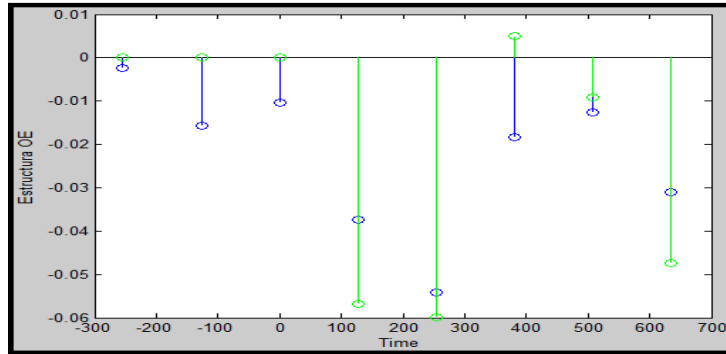


Figura 22 Respuesta al impulso del modelo OE (verde) y el no paramétrico (azul)

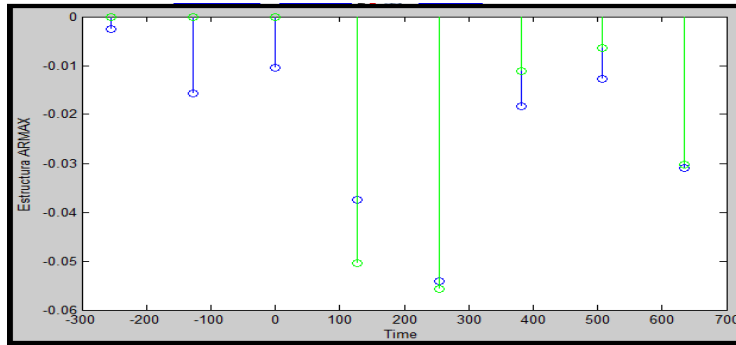


Figura 23 Respuesta al impulso del modelo ARX (verde) y el no paramétrico (azul)

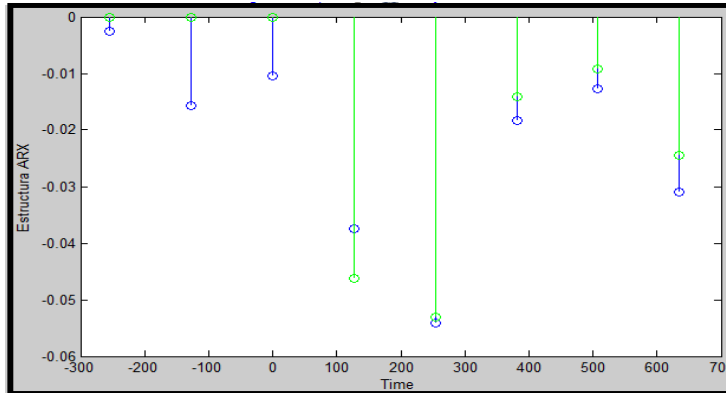
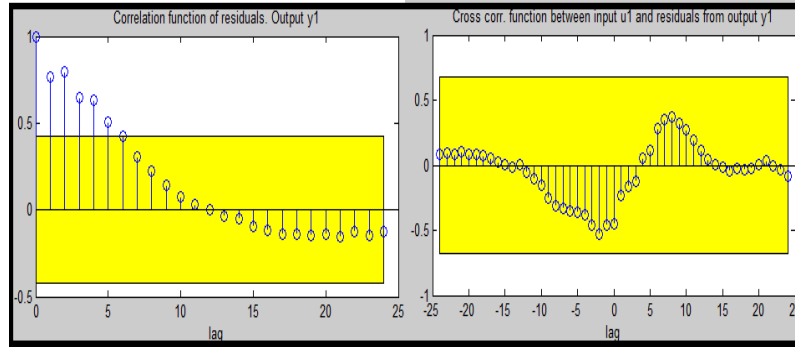
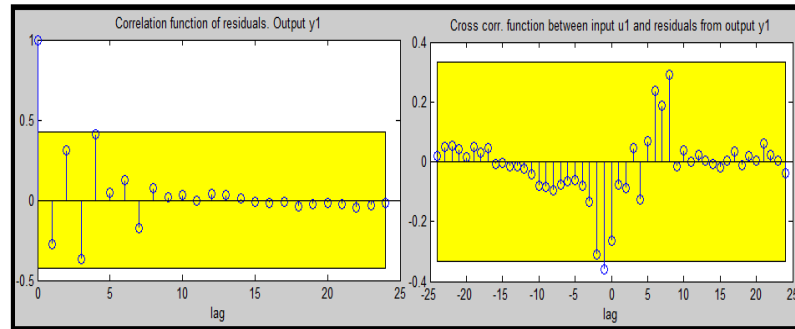


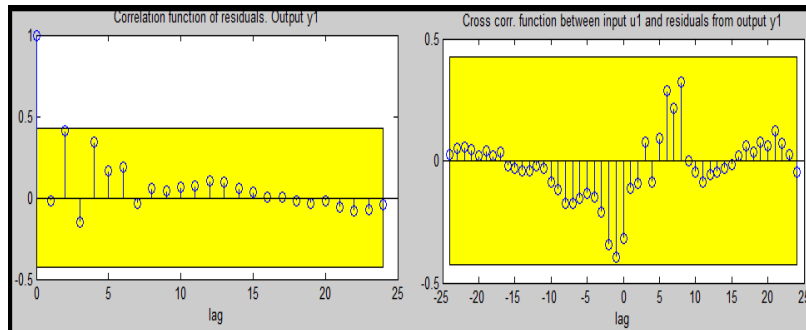
Figura 24 Respuesta al impulso del modelo ARMAX (verde) y el no paramétrico (azul)



**Figura 25 Residuos correspondientes al modelo OE**



**Figura 26 Residuos correspondientes al modelo ARX**



**Figura 27 Residuos correspondientes al modelo ARMAX**