

# UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

---

## DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ESTIMADOR DE ESTADOS HÍBRIDO COMO RESPALDO PARA UN SISTEMA SCADA EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

---

Realizado por

Eduard Felipe Ortega Correa

Proyecto de Grado presentado en cumplimiento del requisito para optar por el grado de Ingeniería Electrónica



Grupo de Investigación GED (Grupo de Estudio y Desarrollo en Robótica)  
Facultad de Ingeniería Electrónica  
División de Ingenierías

Mayo de 2022

---

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ESTIMADOR  
DE ESTADOS HÍBRIDO COMO RESPALDO PARA UN  
SISTEMA SCADA EN UNA PLANTA DE  
TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL**

---

Realizado por

**Eduard Felipe Ortega Correa**

Proyecto de Grado presentado en cumplimiento del requisito  
para optar por el grado de Ingeniería Electrónica

Dirigido por

**M.Sc. Armando Mateus Rojas.**

Co-Dirigido por

**PhD. Jose Guillermo Guarnizo Marin.**

Grupo de Investigación GED (Grupo de Estudio y Desarrollo en Robótica)  
Facultad de Ingeniería Electrónica  
División de Ingenierías

Mayo de 2022

# Índice general

<b>1. Preludio</b>	<b>2</b>
1.1. Declaración de Autoría . . . . .	2
1.2. Resumen . . . . .	2
1.3. Dedicatoria . . . . .	4
1.4. Agradecimientos . . . . .	4
<b>2. Introducción</b>	<b>5</b>
<b>3. Planteamiento del Problema</b>	<b>6</b>
<b>4. Justificación</b>	<b>8</b>
<b>5. Impacto Social</b>	<b>10</b>
<b>6. Objetivos</b>	<b>11</b>
6.1. Objetivo General . . . . .	11
6.2. Objetivos Específicos . . . . .	11
<b>7. Marco Teórico</b>	<b>12</b>
7.1. Análisis en espacio de estados . . . . .	12
7.2. Sistemas Híbridos . . . . .	14
7.3. Estimador de Estados . . . . .	15
7.4. Redes de Petri . . . . .	15
7.5. Autómatas Finitos . . . . .	15
7.5.1. Autómatas Finitos Deterministas (AFD) . . . . .	16
7.5.2. Autómatas Finitos no Deterministas (AFN) . . . . .	16
7.5.2.1. Diagrama de Transición . . . . .	16
7.6. Sistemas SCADA . . . . .	16
7.7. Teorema de Bernoulli . . . . .	17
7.8. Principio de Torricelli . . . . .	18
7.9. Plantas de Tratamiento de Agua Residual . . . . .	19
7.9.1. Homogenizador . . . . .	20
7.9.2. Reactor . . . . .	20
7.9.3. Filtros . . . . .	20
7.9.4. Agitador . . . . .	20

---

7.9.5. Lechos de Secado . . . . .	21
7.9.6. Tanque de Oxidación . . . . .	21
<b>8. Estado del Arte</b>	<b>22</b>
8.1. Estimador de Estados . . . . .	22
8.2. Sistemas SCADA . . . . .	23
8.3. Sistemas Híbridos . . . . .	23
<b>9. Desarrollo Metodológico</b>	<b>25</b>
9.1. Autómatas Finitos . . . . .	27
9.2. Modelo Dinámico . . . . .	29
<b>10. Resultados</b>	<b>36</b>
10.1. Definición de parámetros. . . . .	37
10.2. Simulación planta de tratamiento. . . . .	37
10.2.1. Simulación de Modelos no Lineal y Lineal en Matlab . . . . .	37
10.3. Simulación Autómatas Finitos en <i>LabVIEW</i> . . . . .	41
10.4. Simulación Modelos Lineal y no Lineal <i>LabVIEW</i> . . . . .	43
10.4.1. Modelo no Lineal . . . . .	43
10.4.2. Modelo Lineal . . . . .	45
10.5. Simulación del Sistema SCADA. . . . .	46
10.5.1. S0. Estado Inicial . . . . .	46
10.5.2. S1. Escribir . . . . .	46
10.5.3. S2. Leer . . . . .	46
10.5.4. Validación de Usuario . . . . .	47
10.5.5. Tanques . . . . .	48
<b>11. Conclusiones</b>	<b>49</b>
<b>12. Trabajos Futuros</b>	<b>52</b>
<b>13. Anexos</b>	<b>53</b>
13.1. Código de Matlab . . . . .	53
<b>Bibliografía</b>	<b>58</b>



# Capítulo 1

## Preludio

### 1.1. Declaración de Autoría

Yo Eduard Felipe Ortegón Correa identificado con cédula de ciudadanía número 1.015.478.047 de nacionalidad colombiana, estudiante de la Universidad Santo Tomás del programa de ingeniería electrónica, declaro que en el trabajo titulado: **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ESTIMADOR DE ESTADOS HÍBRIDO COMO RESPALDO PARA UN SISTEMA SCADA EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL.**

- Ninguno de los datos presentes ha sido plagiado, inventado o manipulado a conveniencia.
- Se identifican y citan las fuentes originales en las que se basa la información contenida en el documento.
- Se ha obtenido el consentimiento de quienes han aportado con datos no publicados.
- Todas las personas que firman este trabajo, han participado en su planificación, diseño y ejecución.

### 1.2. Resumen

En el presente proyecto se utilizaron modelos en espacio de estados híbrido y autómatas finitos, para el diseño y simulación de un estimador de estados híbrido, el cual ha sido planteado

---

como respaldo al sistema de instrumentación electrónica diseñado por la empresa Hidromecánica Ingeniería, para la Universidad Agustiniana en su sede central. Para lo anterior, se realizó el modelo de la planta de tratamiento basado en ecuaciones diferenciales de primer orden, lo que permitió dar acercamiento dinámico de la planta y un posterior modelado de su operación general mediante autómatas finitos, que permitieron observar el comportamiento discreto de la misma. Se dividió el diseño de la solución en dos partes; en la primera se implementó un sistema en el software *LabVIEW* que permite la simulación de cada etapa con su respectivo autómata finito, con el fin de conocer el funcionamiento de la planta en algunos estados específicos, los cuales son los encargados de generar las salidas que controlaran el proceso. En la segunda parte, se realizó el diseño del modelo dinámico, para este fin se dividió la planta en siete etapas que corresponden a las fases de diseño propuestas por la empresa, en cada etapa se indagaron datos como el tiempo de llenado de cada tanque, altura y caudales, para generar a partir de estas características un modelo dinámico no lineal que describe al sistema, este modelo contempla otras características como la apertura de las válvulas, y la no linealidad presentada por la variación de la velocidad de vaciado de cada tanque. Si bien el comportamiento dinámico del sistema obedece a un modelo no lineal, en este trabajo se emplean modelos lineales alrededor de puntos de operación definidos por la presencia de sensores tipo interruptor de nivel HHL(*Homogenizer High Level*), HLL(*Homogenizer Low Level*). Esto, se propone porque se espera obtener mejores resultados en los modelos lineales sobre los puntos de operación que mediante un solo modelo que abarque un rango continuo de puntos; de esta forma se reduce el costo computacional y se simplifica el proceso de identificación de la planta. Con base en lo anterior, se implementaron el modelo no lineal y su aproximación, mediante modelos lineales en los puntos de operación para la comprobación de su operación dinámica. Con fines de validación se sometió el modelo a diferentes perturbaciones, obteniendo como resultado una relación lineal entre el error y la magnitud de la perturbación; esto es interesante y de trabajo futuro ya que permitiría predecir las posibles mediciones del modelo lineal si se conoce la salida del modelo dinámico y la magnitud de la perturbación. Tras la realización del modelo dinámico linealizado en Matlab se implementó cada etapa con sus respectivas ecuaciones en el software de *LabVIEW*, para observar el comportamiento conjunto del modelo de eventos discretos y el modelo dinámico; los resultados obtenidos de esta implementación concuerdan con datos reales previos medidos con el sistema de automatización basado en PLC, con el que actualmente cuenta la planta real, permitiendo dar validez al modelo, la identificación y la implementación realizadas.

### 1.3. Dedicatoria

Este proyecto de grado es dedicado a mi madre, Ana Doris Ortigón Correa quien con su amor y compromiso me ha llevado a ser una persona responsable y a alcanzar cada uno de los sueños que me propongo, gracias a ella he aprendido a reflejar toda su responsabilidad y madurez, lo que me lleva a admirarla cada día más. También agradezco todas las posibilidades que me ha brindado para crecer tanto personal, como profesionalmente, enseñándome a enfrentar todas las adversidades sin desfallecer en el intento.

A la memoria de mi abuela Emelina Correa Castro, quien siempre estuvo de acuerdo con que siguiera mis sueños y nunca me rindiera por más difíciles que estos fueran, inculcándome valores como el respeto y la perseverancia, como lo indica el lema latín, "**Vincit qui patitur**", "El que persevera alcanza".

A mi primo, que más que un primo es como un hermano, Jaison Albeiro Borrero Ortigón, pues debido a su conocimiento y paciencia me fue posible tener acceso a los diseños físicos utilizados para la realización de este trabajo de grado, gracias por ser el hermano mayor de nuestra familia, el responsable y el que siempre está presto a ayudar.

A toda mi familia por el apoyo, ya que todos han aportado un grano de arena para mi formación, ayudándome con sus consejos. No me alcanzan las palabras para definir lo maravilloso que me siento por hacer parte de esta familia.

### 1.4. Agradecimientos

A mi madre, por el apoyo incondicional en cada una de las decisiones tomadas, a lo largo de mi vida.

A la Universidad Santo Tomás por permitirme realizar los estudios en la facultad de Ingeniería Electrónica y el haberme formado como profesional, así como a todos los docentes que participaron en mi proceso educativo.

A mi director Armando Mateus Rojas y a mi codirector José Guillermo Guarnizo Marín, por su paciencia y entrega con el proyecto, además de todos los conocimientos brindados para la realización de este.

A mis compañeros de batallas, en especial a Juan Sebastián Herrera Silva, por su amistad y por enseñarme a trabajar en equipo y a tomar decisiones asertivas en conjunto.

## Capítulo 2

# Introducción

El desarrollo tecnológico basado en equipos de cómputo ha potenciado la sofisticación en procesos de automatización como es el caso de las PTAR (Planta de tratamiento de agua residual), en donde los estimadores de estado se han vuelto una alternativa bastante usada ya que son herramientas teóricas compuestas por la interacción de dinámicas tanto continuas como discretas, cuyo propósito es reconstruir el estado de un modelo de espacio de estados, basándose en las entradas y salidas del sistema.

En la planta de tratamiento de agua residual diseñada por la empresa Hidromecánica Ingeniería SAS, no existe monitoreo y control de la totalidad de variables físicas del sistema lo que genera una medición muy limitada de las mismas que repercuten en el funcionamiento de la planta y por ende en la calidad del agua tratada, de modo que, surge la siguiente pregunta: ¿Qué criterios se deben tener en cuenta para el diseño y la implementación de un sistema de respaldo de mediciones, basado en estimadores de estados híbridos para un sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), de una planta de tratamiento de agua residual?

Con el fin de acercarse a una respuesta se propuso el diseño e implementación de un estimador de estados híbrido, en donde se dividió la solución en dos etapas, la primera consta de un conjunto de autómatas finitos que permiten conocer el comportamiento discreto de la planta de tratamiento y la segunda es la implementación de los modelos no lineal y lineal que describen la dinámica del proceso de tratamiento, estos dos procesos permiten el diseño de la interfaz SCADA, en donde se valida el comportamiento tanto discreto como continuo y se analizan los resultados para comprobar la validez del modelo, la identificación e implementación realizadas.

## Capítulo 3

# Planteamiento del Problema

La Universidad Agustiniana de Bogotá en su sede Central cuenta con una planta de Tratamiento de agua residual, diseñada por la empresa Hidromecánica Ingeniería SAS [1], empresa que realiza el diseño, fabricación e instalación de plantas de tratamiento de agua residual industrial, agua potable y agua domestica, en donde realiza la implementación de flotadores de nivel de agua, sensores de PH y sensores ultrasónicos para la medición variables físicas y químicas. Dichas mediciones se utilizan para el control sobre procesos eléctricos, que se ven reflejados en los actuadores del sistema tales como bombas sumergibles y dosificadoras. En este proceso industrial en específico, no existe monitoreo y control de la totalidad de variables físicas del sistema, por el contrario, la medición de estas es muy limitada.

Además, es común que al realizar de manera consecutiva mediciones, los elementos que realizan dicho sensado (pueden ser sensores de nivel, caudal,PH, entre otros), sufran daños debido a diferentes causas: en primer lugar, debido a químicos presentes en los proceso de tratamiento del agua, tales como floculadores y coaguladores, en segundo lugar, daños por temperatura o daños por desgaste [2], limitando la toma de datos de la planta y generando errores en su funcionamiento.

La falta de monitoreo constante de las variables de la planta de tratamiento de agua residual, además de los daños generados por desgastes físicos y químicos, hacen que el proceso de tratamiento, pueda ser vulnerable a cambios, es decir, que en dicho proceso se apliquen sustancias químicas en mayor o menor cantidad afectando los procesos de coagulación, floculación y filtrado. Como el sistema no es capaz de adaptarse a dichos cambios de manera automática, se puede llegar a incumplir con las normas de vertimiento estipuladas en la resolución 631 de 2015, expedida por el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible [3], generando problemas

sanitarios debido al tratamiento no pertinente de las aguas residuales. Esto recae en el medio ambiente, ya que las aguas residuales generan malos olores, contaminación tanto del aire como de las fuentes hídricas, además, repercuten en la salud tanto del ser humano como de la fauna y la flora.

A partir del problema anteriormente presentado, se plantea la siguiente pregunta de investigación, ¿Qué criterios se deben tener en cuenta para el diseño y la implementación de un sistema de respaldo de mediciones, basado en estimadores de estados híbridos para un sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), de una planta de tratamiento de agua residual?

## Capítulo 4

# Justificación

Para aportar con los objetivos de desarrollo sostenible propuestos por la ONU [4], tales como salud, bienestar, agua limpia y saneamiento a la vez que se aporta colaborando con la sostenibilidad en cuanto a aspectos medio ambientales, en las plantas de tratamiento de agua, se hace necesario el correcto funcionamiento de las mismas, ya que según la OMS [5], existen al menos veinticinco enfermedades que pueden ser generadas por la contaminación del agua. En Colombia entre las enfermedades más comunes se encuentran: la fiebre, la hepatitis A y el dengue [5], las cuales se transmiten por contacto con agua contaminada, o por insectos presentes en lugares donde existe estancamiento de esta. Para evitar estos tipos de contagio directo, es necesario automatizar el proceso de tratamiento del agua residual.

Para la automatización en la industria, los *SCADA* son sistemas altamente usados, debido a su capacidad de supervisar, controlar y adquirir datos de entornos, bien sean físicos o virtuales. En algunos casos los procesos industriales son llevados a cabo de manera semiautomática, es decir, que cuentan con unos procesos automatizados y otros que son realizados exclusivamente por los operarios [6]. En numerosas aplicaciones, no se usan todas las variables disponibles en el entorno físico, sino, que se usan ciertos parámetros específicos y a partir de allí se toman decisiones sobre los actuadores del sistema.

Por esta razón si alguno de los sensores que realizan las medidas, llega a sufrir algún tipo de fallo debido a incertidumbres en procesos físicos, químicos, entre otros y no se usan alternativas de métodos redundantes para la medición, se puede observar que el sistema de medición empezara a fallar, entregando medidas erróneas de las variables de la planta, lo que puede llegar a alterar el funcionamiento de la planta de tratamiento de agua residual y por ende la calidad del agua tratada.

Para colaborar con el medio ambiente y la calidad del agua que se vierte en el alcantarillado, se propone el diseño e implementación de un mecanismo de respaldo basado en estimadores de estado híbridos, los cuales, como se expone en el Marco Teórico, constituyen una técnica muy usada para el monitoreo de variables, cuando estas no pueden ser observables ni medibles, este mecanismo consiste en una herramienta teórica que permite calcular las medidas que no se pueden tomar, estableciendo una relación entre las variables de entrada del estimador y su salida, reduciendo la presentación de fallos en la planta y mejorando la calidad del proceso de tratamiento de agua.

## Capítulo 5

# Impacto Social

El objetivo principal de las plantas de tratamiento de agua residual es la protección del medio ambiente [7], generando agua limpia mediante procesos de filtrado, coagulación, sedimentación, floculación, entre otros. En este proceso los principales afectados por las enfermedades que se generan en dichas plantas, son los operarios de estas.

Para este caso específico la planta de tratamiento de agua residual encargada de tomar todos los desechos propios de la Facultad de Gastronomía de la Universidad Agustiniana, debe cumplir con ciertos requerimientos técnicos, para luego realizar un proceso de vertimiento en la red de alcantarillado público, así, mediante el proceso de automatización y detección de fallos propuesto se espera cumplir con la norma de vertimiento 631 de 2015 [3], lo que ayuda a contribuir con dos de los diecisiete objetivos de desarrollo sostenible, propuestos por la ONU[4], los cuales corresponden a salud, bienestar, agua limpia y saneamiento; ya que la pandemia de COVID-19 ha puesto de manifiesto la gran importancia de mantener la higiene y el acceso adecuado al agua limpia.

De igual forma se espera que los resultados de este proyecto puedan ser empleados por empresas y comunidades, como herramienta viable para la mejora de las instalaciones de tratamiento de agua a lo largo del país.

# Capítulo 6

## Objetivos

### 6.1. Objetivo General

Diseñar un sistema de respaldo para un *SCADA* de una planta de tratamiento de agua residual, basado en un estimador híbrido de estado que permita predecir las mediciones de variables del sistema.

### 6.2. Objetivos Específicos

- Modelar la planta de tratamiento de Agua residual en espacio de estados mediante el desarrollo de subsistemas dinámicos de eventos discretos.
- Diseñar el estimador de estados Híbrido basado en el modelo de espacio de estados híbrido y datos adquiridos de variables físicas de la planta de tratamiento.
- Diseñar el escenario de simulación y pruebas, que permita comprobar el funcionamiento del estimador de estados híbrido.
- Programar el sistema *SCADA* a partir del diagrama P&ID, el cual permita emular el comportamiento real de la planta.
- Implementar escenarios de simulación que permitan la Validación del funcionamiento del sistema *SCADA*.
- Validar el sistema *SCADA* en el escenario previsto.

# Capítulo 7

## Marco Teórico

### 7.1. Análisis en espacio de estados

Los sistemas modernos poseen muchas entradas y salidas relacionadas entre sí de manera complicada, lo que dificulta el análisis de estos. Por esta razón se hace necesario disminuir la complejidad de las expresiones matemáticas que los describen. Para este fin se hace uso del espacio de estados el cual como lo indica su definición en [8] es una forma de representar un sistema dinámico en función de  $n$  ecuaciones en diferencia o diferenciales de primer orden, donde cada ecuación puede representar una característica específica del sistema (caudal, nivel, flujo, etc). En el análisis del espacio de estados se tienen en cuenta tres tipos de variables las cuales aparecen al analizar el modelo del sistema dinámico; las variables de entrada, las variables de salida y las variables de estado.



FIGURA 1: Análisis en espacio de Estados

Para definir la dinámica del proceso, se hace uso de las variables de estado. Cabe resaltar que estas variables no tienen que ser físicamente medibles ni observables, por el contrario se pueden seleccionar variables de estado que no representen cantidades físicas, tal libertad de elección de las variables de estado es una ventaja de los métodos en espacio de estados.

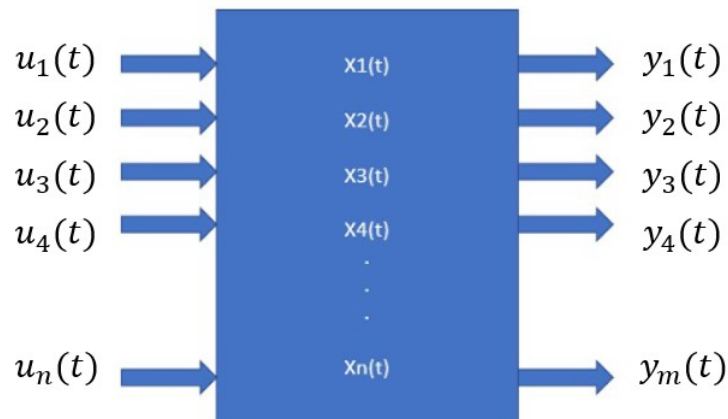


FIGURA 2: Análisis en espacio de Estados

Cada una de las variables de estado pueden ser agrupadas en un vector de estado  $X(t)$ , de la misma manera que las entradas en un vector de entradas  $U(t)$  y las salidas en un vector de salidas  $Y(t)$ .

La representación más común del espacio de estados para sistemas lineales de tiempo continuo invariantes en el tiempo viene dada por:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (7.1)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (7.2)$$

Donde A corresponde a la matriz de estado, B a la matriz de entradas, C a la matriz de salida y D a la matriz de transmisión directa.

Para realizar la representación del sistema de control en tiempo continuo a partir del espacio de estados se representan las ecuaciones 3.1 y 3.2 en diagrama de bloques, de la siguiente manera.

De manera semejante existe una representación para sistemas lineales de tiempo discreto invariantes en el tiempo.

$$x(k+1) = Gx(k) + Hu(k) \quad (7.3)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (7.4)$$

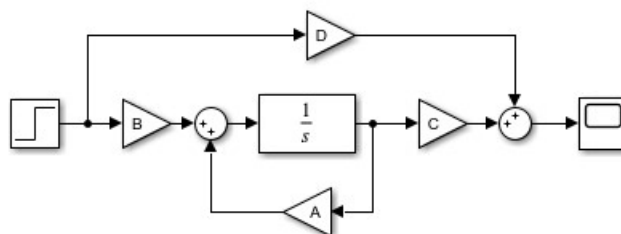


FIGURA 3: Diagrama de bloques de modelo en espacio de estados continuo

Donde  $G$  corresponde a la matriz de estado,  $H$  a la matriz de entradas,  $C$  a la matriz de salida y  $D$  a la matriz de transmisión directa.

Para realizar la representación del sistema de control en tiempo discreto a partir del espacio de estados se representan las ecuaciones 3.3 y 3.4 en diagrama de bloques como se observa en la figura 4 :

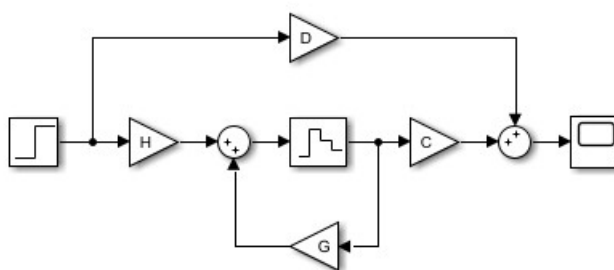


FIGURA 4: Análisis en espacio de Estados

## 7.2. Sistemas Híbridos

El término híbrido hace referencia a un sistema compuesto por la interacción de dinámicas tanto continuas como discretas, que describen el funcionamiento de un proceso industrial. Entre las principales ventajas del uso de sistemas híbridos se resalta la disminución de la complejidad del modelo ya que en lugar de tener una dinámica descrita por ecuaciones diferenciales no lineales de orden superior, se puede representar el mismo sistema a partir de modelos simples usando por ejemplo la conmutación entre modelos dinámicos [9].

### 7.3. Estimador de Estados

Un observador de estados es un sistema dinámico cuyo propósito es reconstruir el estado  $X$  de un modelo de espacio de estados basándose en las entradas medidas y en las salidas. Para Ogata [8] la clasificación de los estimadores se basa en el número de variables que son observadas, de esta manera propone observadores de tres tipos:

- Orden Completo: En este caso específico el observador capta todas las variables del sistema sin importar que algunas estén disponibles para medición directa.
- Orden reducido: el observador estima menos de  $n$  variables de estado, en donde  $n$  es la dimensión del vector de estado.
- Orden mínimo: es un observador de orden reducido con el mínimo orden posible, es decir, si  $n$  es la dimensión del vector de estado y  $m$  es la dimensión del vector de salidas, el observador de orden mínimo observa  $n - m$  variables.

### 7.4. Redes de Petri

Las redes de Petri son una herramienta matemática y gráfica que permite modelar el comportamiento y la estructura de un sistema mediante el desarrollo de subsistemas dinámicos de eventos discretos [10]. Como herramienta matemática es posible establecer ecuaciones de estado, ecuaciones algebraicas y algunos otros modelos matemáticos que denoten el comportamiento del sistema modelado. Como herramienta gráfica las redes de Petri sirven como un apoyo visual, similar a los diagramas de flujo. El campo fundamental de la aplicación de las redes de Petri es el modelado de sistemas en los que los eventos discretos ocurren de forma independiente y concurrente, pero bajo determinadas restricciones

### 7.5. Autómatas Finitos

Un autómata finito hace referencia a una herramienta computacional la cual está compuesta por una quintupla de elementos [11], de la siguiente manera:

$$A = \langle Q, \Sigma, t, q_0, F \rangle \quad (7.5)$$

Donde:

$Q \rightarrow$  Conjunto finito de estados.

$\Sigma \rightarrow$  Conjunto de símbolos finito y no vacío que corresponde al alfabeto del autómata, es decir, los símbolos de entrada comprendidos por el mismo, existen de varios tipos entre ellos el alfabeto binario, el conjunto de letras del abecedario, el conjunto de caracteres ASCII, entre otros.

$t \rightarrow$  Estado de transición, depende de la entrada y del estado en que se encuentre.

$Q_0 \rightarrow$  Estado Inicial es un estado perteneciente a  $Q$ .

$F \rightarrow$  Estados de aceptación o estados finales.

Los autómatas finitos, se clasifican en dos categorías:

### 7.5.1. Autómatas Finitos Deterministas (AFD)

En esta categoría, se encuentran aquellos autómatas que solo pueden estar en un estado específico después de leer un cierto conjunto de entradas. El término “determinista” da a entender que para cada entrada o grupo de entradas, existe uno y solo un estado al que el autómata puede hacer la transición a partir de su estado actual.

### 7.5.2. Autómatas Finitos no Deterministas (AFN)

Tiene la capacidad de estar en varios estados a la vez, la gran diferencia presente entre el AFD y el AFN, se ve reflejada en la función de transición, ya que el AFD entrega un único estado para  $t$ , mientras que el AFN entrega un conjunto de posibles estados.

#### 7.5.2.1. Diagrama de Transición

Los autómatas finitos, pueden ser representados mediante grafos, los cuales son dirigidos y etiquetados. Este tipo de gráfica cuenta con estados los cuales son representados por nodos y transiciones, las cuales son flechas que indican el flujo entre estados. Es útil para realizar el seguimiento del proceso de una cadena de entrada.

## 7.6. Sistemas SCADA

Los sistemas de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA), son una aplicación de software que permite gestionar y controlar cualquier sistema remoto a partir de una interfaz

gráfica que comunica al usuario con el sistema. Entre sus principales características se destacan, la monitorización, la supervisión, la adquisición de datos, la grabación de acciones, la seguridad de los datos y la seguridad de los accesos [12].

## 7.7. Teorema de Bernoulli

Para comprender el comportamiento dinámico de un fluido dentro de un tanque, es necesario realizar el análisis propuesto por Torricelli en el cual se analiza la velocidad que puede alcanzar una partícula tras ser expulsada de un contenedor el cual se encuentra a cierta altura, para explicar el principio de Torricelli se debe entender el de Bernoulli, en el cual se destacan cuatro parámetros importantes de los fluidos, la presión, la altura, la velocidad y la densidad del fluido. Puesto que un fluido tiene masa, debe obedecer las leyes de la conservación de la energía establecida para sólidos, en consecuencia, el trabajo necesario para mover un volumen de fluido a lo largo de una tubería, debe ser igual al cambio total de la energía potencial y cinética.

De esta manera el principio de Bernoulli plantea un equilibrio de energías tanto en el punto uno, como en el punto dos. De la siguiente manera:

$$W_{f_1} + Ec_1 + Ep_1 = W_{f_2} + Ec_2 + Ep_2 \quad (7.6)$$

Cabe resaltar que la ecuación anterior se obtiene analizando un fluido ideal, en el cual no se presentan pérdidas. Reemplazando las definiciones de trabajo, energía cinética y energía potencial, se obtiene la siguiente ecuación.

$$Fdx_1 + \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 = Fdx_2 + \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2 \quad (7.7)$$

Se divide la ecuación 7.7 entre el volumen, debido a que el volumen que entra es igual al volumen que sale de la siguiente manera:

$$\frac{F_1dx_1}{V} + \frac{\frac{1}{2}mv_1^2}{V} + \frac{mgh_1}{V} = \frac{F_2dx_2}{V} + \frac{\frac{1}{2}mv_2^2}{V} + \frac{mgh_2}{V} \quad (7.8)$$

La presión se encuentra definida como:

$$P = \frac{F}{A} \quad (7.9)$$

El volumen de un cilindro corresponde a:

$$V = A \times h \quad (7.10)$$

Y la densidad de un fluido corresponde a:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (7.11)$$

Reemplazando las ecuaciones 3.9, 3.10 y 3.11 en 3.8, se obtiene:

$$\frac{P_1 * A * dx_1}{A * dx_1} + \frac{1}{2} \rho * v_1^2 + \rho g h_1 = \frac{P_2 * A * dx_2}{A * dx_2} + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (7.12)$$

Simplificando se obtiene la ecuación correspondiente al teorema de Bernoulli.

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho * v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho * v_2^2 + \rho g h_2 \quad (7.13)$$

## 7.8. Principio de Torricelli

Este principio es una aplicación de la ecuación de Bernoulli. Se analiza el sistema teniendo en cuenta que la velocidad de variación de la altura es muy baja y la energía potencial en el punto más bajo (de referencia) es cero [13].

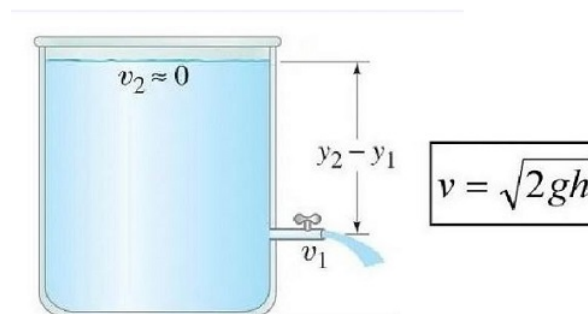


FIGURA 5: Principio de Torricelli. [14]

$$P_{atm} + 0 + \rho g h = P_{atm} + \frac{1}{2} \rho * v^2 + 0 \quad (7.14)$$

Lo que equivale a:

$$\rho gh = \frac{1}{2} \rho * v^2 \quad (7.15)$$

Despejando la velocidad de vaciado se obtiene la ecuación propuesta por Torricelli:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (7.16)$$

Para conocer el caudal de salida a través de una sección transversal se tiene en cuenta la siguiente relación:

$$Q = v * S \quad (7.17)$$

Donde la velocidad corresponde a la propuesta por el principio de Torricelli y S corresponde al área de la sección transversal de la tubería, quedando la ecuación de caudal de la siguiente manera.

$$Q = S * \sqrt{2gh} \quad (7.18)$$

Para efectos de simplicidad del modelo, la constante  $S * \sqrt{2g}$  ahora será llamada K. Posteriormente se plantea la hipótesis de que la apertura de la válvula es lineal, por dicha razón se hace uso de la siguiente relación:

$$Q_v = K * a * \sqrt{h} \quad (7.19)$$

Para este caso  $a$  será tomada como una constante normalizada, en la cual un valor de 0 representará el cierre total de la válvula y 1 la apertura máxima de la misma.

## 7.9. Plantas de Tratamiento de Agua Residual

Una planta de tratamiento de agua residual es el conjunto de procesos que buscan eliminar o disminuir la concentración de contaminantes del agua residual antes de ser vertida en un cuerpo receptor (ríos, lagunas, mares, embalses, etc).

### **7.9.1. Homogenizador**

Es el encargado de transformar el agua residual de entrada de la planta en un fluido homogéneo, tanto en caudal como en composición asegurando un caudal constante, lo que disminuye las variaciones de caudal a lo largo del tiempo.

### **7.9.2. Reactor**

Allí ocurren tres procesos químicos, coagulación-floculación, sedimentación y equilibrio. En la floculación-coagulación se generan masas coaguladas en el agua residual y tras un proceso de polimerización se agrupan dichas masas generando flóculos. Luego de esto se realiza un proceso de sedimentación, en el que por la acción de la gravedad se separan los sólidos en suspensión del líquido a tratar, convirtiendo el agua residual en agua tratable para vertimiento y los sólidos en lodos. Por último en el proceso de equilibrio se cuenta con un líquido, el cual no tiene presencia de muchos sólidos, solamente es un poco turbio, este líquido es apto para ingresar en los filtros.

### **7.9.3. Filtros**

En la etapa de filtrado se cuenta con tres filtros, el filtro multimedia, el filtro de carbón y el filtro de arena. El filtro multimedia es el encargado de eliminar los sólidos suspendidos en el agua residual, mediante diferentes capas de medios filtrantes (antracita, arena, grava). Posteriormente el filtro de carbón sirve para eliminar el cloro presente en el agua residual, además, del sulfuro de hidrógeno (causante de malos olores en el alcantarillado). Por último el filtro de arena elimina los sólidos restantes, dejando en la arena todas las impurezas.

### **7.9.4. Agitador**

En este proceso se toman los lodos que se obtuvieron del reactor y se agitan con el fin de homogeneizar la mezcla, evitando sedimentaciones que obstruyan el funcionamiento de las bombas.

### **7.9.5. Lechos de Secado**

Se toma la mezcla generada por el agitador, la cual se deshidrata mediante evaporación y filtración, generando lodos estabilizados que pueden ser usados posteriormente con fines eléctricos(biomasa), agrícolas(fertilizante), o biogases (gases producidos por la descomposición de materia orgánica).

### **7.9.6. Tanque de Oxidación**

Se eliminan agentes orgánicos que son causantes de afecciones gastrointestinales, respiratorias o cutáneas; mediante la aplicación de hipoclorito de calcio e hipocloroso de sodio.

# Capítulo 8

## Estado del Arte

### 8.1. Estimador de Estados

Resulta necesario conocer el valor de algunas variables que no son medibles en un sistema; a esta acción se le conoce con el nombre de estimación u observación. Un estimador de estados es aquel que estima las variables de estado, con base en las mediciones de las variables de salida y de control, así este puede ser definido como un sistema dinámico cuyo propósito es reconstruir el estado de un modelo en espacio de estados basándose en las medidas de las entradas y las salidas [8]. Existen varios métodos para la realización de estimadores de estados que pueden ser tanto lineales como no lineales, entre los cuales se pueden encontrar: observadores de orden completo, observadores de orden reducido, observadores de estados para la detección y diagnóstico de fallos, métodos de Lyapunov para observadores de estados no lineales, método de linealización extendida, fórmula de Ackerman, técnicas Lie algebraicas, métodos basados en el filtro Kalman, filtro Kalman extendido, métodos de horizonte móvil, filtro Kalman discreto, programación genética basada en algoritmos evolutivos y estimadores de estados de mínima mediana de cuadrados.

A lo largo del tiempo se ha realizado el estudio de los estimadores de estado, en el año 1980 se observa gran interés por estos, resaltando ciertos problemas, como la aplicación óptima del filtro Kalman para su diseño y la carga computacional que genera su cálculo [15]. Con el pasar de los años se han aplicado los estimadores de estado para un sin fin de actividades, entre las cuales se encuentra la combinación de técnicas como redes neuronales para la estimación de estados [16], la estimación secuencial de estados y parámetros de modelos de espacio de estado no lineales mediante el uso de filtros de partículas [17], actualmente son utilizados en sistemas

---

dinámicos de potencia [18] y se ha empezado a utilizar el concepto de estimación de estados híbrida para su aplicación en micro redes [19], otra de sus aplicaciones en la actualidad hace referencia a sistemas eléctricos industriales donde se resalta la no linealidad de los mismos y la capacidad de los estimadores de estados para adaptarse a los sistemas que no cuentan con la disponibilidad completa de mediciones de variables de estado [20].

## 8.2. Sistemas SCADA

De sus siglas en inglés (Supervisory Control and Data Acquisition), los sistemas SCADA son aquellos capaces de supervisar, controlar y adquirir datos desde terminales remotos, conocidos como RTU (Remote Terminal Units) [21]. Son sistemas usados en procesos industriales, estos sistemas han tenido gran aceptación en el sector industrial y una gran evolución con el pasar del tiempo. En el año 2003 los autores Bailey y Wright [21], nombran al SCADA como un sistema de recolección y transferencia de datos, estos son enviados a un sistema de control central, para después mostrar esta información en pantallas. La capacidad de almacenar datos, graficarlos, registrar la escritura y realizar acciones sobre los servidores en los que se encuentran instalados, hacen que los sistemas SCADA sean usados en implementaciones industriales. En los desarrollos actuales se puede resaltar el uso sistemas SCADA para aplicaciones en el colisionador de hadrones del CERN (organización europea para la investigación nuclear) [22], también se han sido utilizados en campos de energía renovable como es el caso de la aplicación de sistemas SCADA para la detección de fallos de un aerogenerador al sur de Turquía [23], otra de las aplicaciones de estos sistemas y que está relacionada con este proyecto de grado es la monitorización del PH del efluente en una planta de tratamiento de agua residual en Mawar[24].

## 8.3. Sistemas Híbridos

Una red Híbrida es un sistema dinámico que combina procesos de tipo continuo y discreto los cuales pueden ser aplicados a modelos bien sean físicos o virtuales, gracias a esto se logra la disminución en la complejidad del modelo en cuanto a orden, ya que, en lugar de representar las relaciones dinámicas como un conjunto de ecuaciones diferenciales de orden superior, se puede representar el mismo sistema a partir de ecuaciones un poco más sencillas [25]. Estas técnicas han sido usadas en la actualidad en varios campos, entre los cuales se resalta un

modelo híbrido para la previsión de agua en Wuhan basado en el filtro Ann Kalman [26], modelos híbridos para estabilizar órbitas inestables de atractores caóticos, controles de potencia para sistemas en vehículos aéreos no tripulados [27], predicción de fallos de sistemas de potencia, redes neuronales (RBFNN) para métodos de modelado híbrido, que permiten predecir la temperatura de intercambiadores de calor, sistemas automatizados para autopistas, controles de temperatura de tanques acoplados usando autómatas finitos, control dinámico activado por eventos basado en modelos de incertidumbre y la estimación recursiva de la distorsión para la transmisión de vídeo híbrido digital-analógico [28]. La unión de los métodos híbridos para el modelado y predicción de sistemas y de los estimadores de estados permite mejorar la estimación de estados, ya que, al usar técnicas conjuntas se pueden aprovechar las ventajas de ambas partes.

## Capítulo 9

# Desarrollo Metodológico

Se dividirá el diseño de la solución en dos etapas, la primera corresponde a los autómatas finitos, que permiten conocer el comportamiento discreto de la planta de tratamiento de agua residual, la segunda hace referencia al modelo que define la dinámica del proceso. Tras conocer el modelo dinámico de la planta, se procederá a realizar la implementación del estimador de estados híbrido.

El sistema consta de 6 etapas de tanques acoplados, las cuales como se puede observar en el marco teórico corresponden a cada una de las etapas que componen a la planta de tratamiento, así para cada etapa se analizan los sensores que se encuentran inmersos, además de la geometría de los tanques, sus entradas y salidas. Para analizar de manera más ordenada la planta de tratamiento se plantearon las siguientes tablas, en donde se analiza cada una de las variables en cuestión.

Entrada	Descripción	Variable	Tipo	Rango[cm]
X0	Stop	Stp	Bool	No aplica
X1	Sensor nivel alto Homogenizador	HHL	Bool	90
X2	Sensor nivel bajo Homogenizador	HLL	Bool	20
X3	Sensor nivel alto Reactor	RHL	Bool	200
X4	Sensor nivel bajo Reactor	RLL	Bool	20
X5	Sensor nivel alto Tanque de oxidación	OHL	Bool	190
X6	Sensor nivel bajo Tanque de oxidación	OLL	Bool	20
X7	Sensor nivel alto caja de lodo	SHL	Bool	90
X8	Sensor nivel bajo caja de lodo	SLL	Bool	20
X9	Sensor nivel alto agitador	AHL	Bool	190

X10	Sensor nivel bajo agitador	ALL	Bool	20
-----	----------------------------	-----	------	----

TABLA 1: Entradas del sistema

En la tabla 1 se observan las entradas del sistema con su respectivo nombre (Variable), además de la ubicación dentro de la planta de tratamiento (Rango).

Salida	Descripción
Y0	Sumergible 1
Y1	Sumergible 2
Y2	Centrifuga 1
Y3	Centrifuga 2
Y4	Sumergible 3
Y5	Sumergible 4
Y6	Motor Reductor
Y10	Dosificadora 1
Y11	Dosificadora 2
Y12	Dosificadora 3
Y13	Dosificadora 4
Y14	Bomba Sumergible

TABLA 2: Salidas del sistema

En la tabla 2 se encuentran todas las salidas presentes en el sistema y una pequeña descripción de estas.

Etapa	Tiempo llenado[ $\text{min}$ ]	Altura[ $\text{m}$ ]	Cantidad	Geometría
Homogenizador	35	2.5	1	Cubo
Reactor	2.5	2	1	Cubo + 2 Cilindros
Filtros	10 c/u	1.5	3	Cilíndrica
Tanque de Oxidación	30	2	1	Cilíndrica
Agitador	20	1.5	1	Cilíndrica
Lechos de Secado	11	1	4	Cubica

TABLA 3: Geometría del sistema

## 9.1. Autómatas Finitos

Para la realización de los autómatas finitos que describen el comportamiento de la planta, se tomó cada etapa por separado y se obtuvo un autómata que definiera su comportamiento en eventos discretos. Tras realizar el análisis de las etapas del sistema se implementó el siguiente esquema que permite observar de manera más clara la disposición de los tanques junto con sus respectivos sensores.

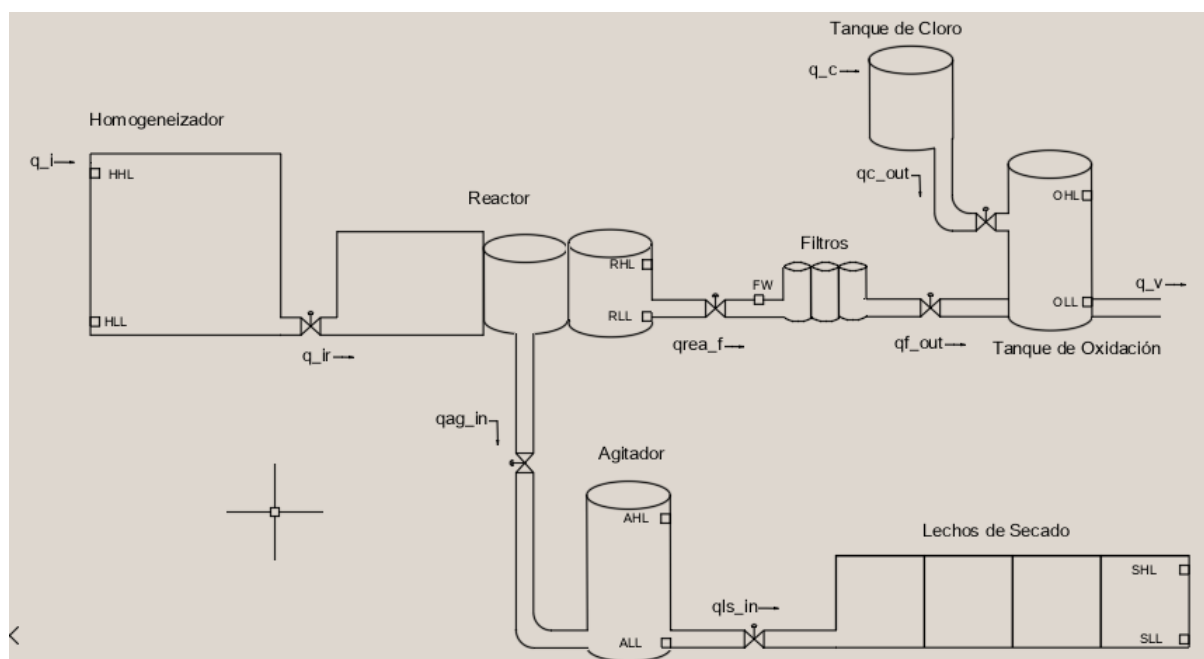


FIGURA 6: Plano base de la planta

En el caso del homogeneizador se plantearon cuatro posibles estados como se observa en la Tabla 4.

Estado Actual	Estado Siguiente	Nombre	Descripción	HHL	HLL	Memorias (M0,M1)	Salidas (Y0, Y1)
S0	S1	Vacío	El fluido ingresado se encuentra por debajo del nivel mínimo del tanque	F	T	F	F
S1	S2	Llenando	El fluido no ha alcanzado el nivel máximo del tanque	F	F	F	F
S2	S3	Lleno	El fluido alcanzo el nivel máximo del tanque	T	F	T	T
S3	S0	Vaciando	El tanque empieza a desocuparse hasta el nivel mínimo.	F	F	T	T

TABLA 4: Autómata Homogenizador

Cada estado corresponde a una situación en la que se encuentra la planta, en estos estados los sensores presentes(HHL y HLL), toman valores que dependen del nivel del agua a lo largo del tiempo, por ejemplo, si el tanque está vacío el sensor de nivel bajo(HLL) tomará un valor de Verdadero, por el contrario si el tanque está lleno entonces el sensor (HHL) tomará un valor de verdadero, en última instancia, si el tanque está en proceso de llenado o vaciado, los dos sensores estarán apagados, pero lo que indicara el funcionamiento correcto de la planta serán las variables de memoria (M0 y M1), las cuales serán activadas o desactivadas tras haber pasado por el límite superior o inferior del homogeneizador. Teniendo en cuenta los sensores y las variables de memoria se activan las salidas (Y0, Y1), en este instante es donde se observa el término de redundancia ya que si una de las dos salidas para las bombas sumergibles falla, la otra estará disponible para su funcionamiento. El diagrama de transición diseñado para el homogeneizador fue el que se observa en la figura 7.

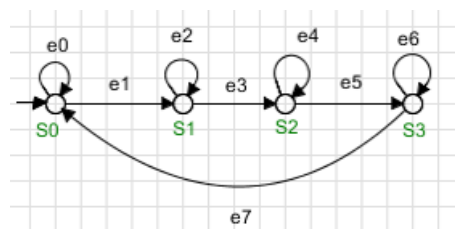


FIGURA 7: Autómata del homogeneizador

El proceso fue repetido de manera similar para las diferentes etapas de la planta de tratamiento obteniendo cinco autómatas finitos deterministas, tales como el del reactor, los filtros, el tanque de oxidación, el agitador y los lechos de secado. Cada diagrama de transición cuenta con sus respectivos cambios entre estados, los cuales permiten generar diferentes salidas digitales que dependen del estado en el que se encuentre el autómata, dichas transiciones se rigen por los sensores de entrada y las variables de memoria.

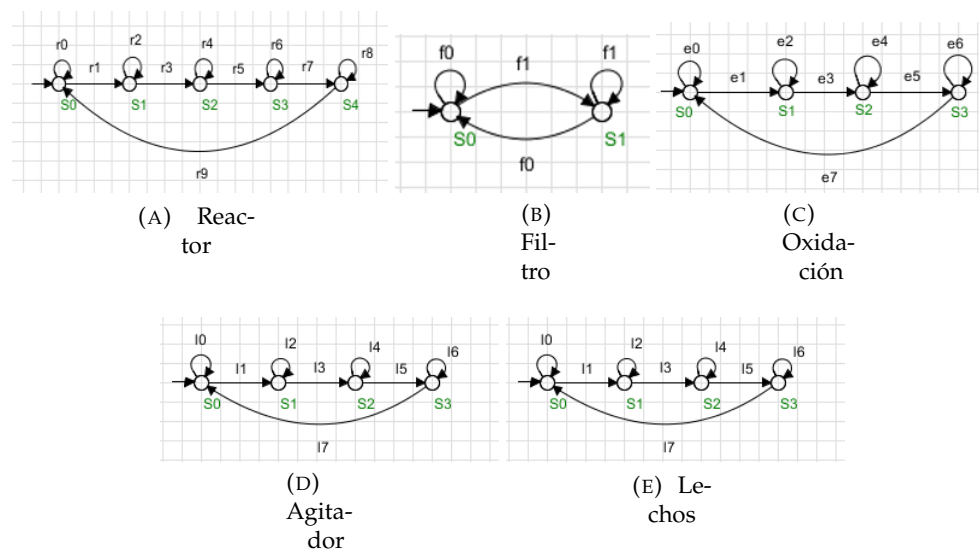


FIGURA 8: Autómatas de la planta

## 9.2. Modelo Dinámico

Posteriormente se realiza la implementación del modelo dinámico de la planta, para este fin se tiene en cuenta la información mostrada en la tabla 3 y se encuentra una relación entre la variación de nivel de la planta con respecto a los caudales de entrada y salida. En primera instancia se definen los volúmenes que contienen el líquido y su relación geométrica, de la siguiente manera:

Etapa	Forma	Volumen
Homogenizador	Cubo	$l^2 h_{Hom}$
Reactor	Cubo + 2 Cilindros	$l^2 h_{Rea} + 2\pi r^2 h_{Rea}$
Filtros	3 Cilindros	$3\pi r^2 h_f$
Tanque de Oxidación	Cilindro	$\pi r^2 h_{Ox}$
Agitador	Cilindro	$\pi r^2 h_{Ag}$
Lechos de Secado	4 Cubos	$4l^2 h_{Ls}$

TABLA 5: Geometría del sistema

En segunda instancia se halla la relación entre los caudales de entrada y salida de cada etapa, el nivel de los tanques y su geometría. Se modela cada salida de los tanques como una válvula que genera pérdidas y cada entrada como la salida inmediatamente anterior, en el caso específico del Homogenizador se plantea la entrada de este como una constante correspondiente a  $1l/min$ .

$$q_i - q_r = C_1 \frac{dh_{Hom}}{dt} \quad (9.1)$$

En donde  $C_1$  corresponde al diferencial de volumen con respecto a la altura  $\frac{d_v}{dh_x}$  del tanque y  $q_r$  al flujo de salida. Derivando la expresión geométrica de la tabla 5 correspondiente al volumen del homogeneizador y reemplazando la expresión correspondiente a  $q_r$  la cual equivale al flujo a través de una válvula con una constante de apertura lineal, se obtiene.

$$\frac{1}{l_{Hom}^2} * [q_i - k_1 a_1 \sqrt{h_{Hom}}] = \frac{dh_{Hom}}{dt} \quad (9.2)$$

Realizando el análisis correspondiente para cada etapa de los tanques, se obtuvieron seis ecuaciones que corresponden a la relación existente entre la geometría, los caudales(entrada-salida) y la altura de cada uno.

$$\frac{1}{(l_{Rea}^2 + 2\pi r_{Rea}^2)} * [k_1 a_1 \sqrt{h_{Hom}} - (k_2 a_2 + k_3 a_3) \sqrt{h_{Rea}}] = \frac{dh_{Rea}}{dt} \quad (9.3)$$

$$\frac{1}{\pi r_f^2} * [k_3 a_3 \sqrt{h_{Rea}} - k_4 a_4 \sqrt{h_f}] = \frac{dh_f}{dt} \quad (9.4)$$

$$\frac{1}{\pi r_{Ag}^2} * [k_2 a_2 \sqrt{h_{Rea}} - k_5 a_5 \sqrt{h_{Ag}}] = \frac{dh_{Ag}}{dt} \quad (9.5)$$

$$\frac{1}{4l_{L_s}^2} * [k_5 a_5 \sqrt{h_{Ag}} - k_6 a_6 \sqrt{h_{L_s}}] = \frac{dh_{L_s}}{dt} \quad (9.6)$$

$$\frac{1}{\pi r_{O_x}^2} * [k_7 a_7 \sqrt{h_c} + k_4 a_4 \sqrt{h_f} - k_8 a_8 \sqrt{h_{O_x}}] = \frac{dh_{O_x}}{dt} \quad (9.7)$$

$$\frac{1}{\pi r_C^2} * [q_c - k_7 a_7 \sqrt{h_c}] = \frac{dh_c}{dt} \quad (9.8)$$

Al igualar las ecuaciones diferenciales de (3.20 a 3.27) a 0 y despejar la variable relacionada en el diferencial se pueden obtener los puntos de operación en los cuales trabaja la planta a partir de algunos caudales conocidos previamente, como  $q_i$  correspondiente a  $l/min$ , este caudal se conoce ya que son parámetros que se plantearon en el diseño de la planta por parte de la empresa Hidromecánica Ingeniería. Los puntos de operación hacen referencia a aquellos puntos físicos donde la planta se encuentra en equilibrio, por ende, la variación de altura en los tanques no existe y su derivada es cero. Realizando el despeje de las variables de cada ecuación diferencial se obtuvo la siguiente tabla, la cual muestra los puntos de operación que se tienen para el sistema.

Variable	Punto de Operación
$h_{Hom_{ss}}$	$\left(\frac{q_i}{k_1 a_1}\right)^2$
$h_{Rea_{ss}}$	$\left(\frac{q_i}{k_2 a_2 + k_3 a_3}\right)^2$
$h_{f_{ss}}$	$\left(\frac{q_i k_3 a_3}{(k_4 a_4)(k_2 a_2 + k_3 a_3)}\right)^2$
$h_{Ag_{ss}}$	$\left(\frac{q_i k_2 a_2}{(k_5 a_5)(k_2 a_2 + k_3 a_3)}\right)^2$
$h_{L_s_{ss}}$	$\left(\frac{q_i k_2 a_2}{(k_6 a_6)(k_2 a_2 + k_3 a_3)}\right)^2$
$h_{O_x_{ss}}$	$\frac{(q_c^2 + (2 * q_c * k_4 * a_4 * \sqrt{(h_{f_{ss}}) + ((k_4^2 * a_4^2) * h_{f_{ss}}))})}{(k_8^2 * a_8^2)}$
$h_{c_{ss}}$	$\left(\frac{q_c}{k_7 a_7}\right)^2$

TABLA 6: Puntos de Operación

Posteriormente al analizar el sistema propuesto por las ecuaciones diferenciales se observa que este es no lineal, debido a que la variables dependientes  $h_i$  (donde  $i$  representa cada sistema) están sometidas a una operación no lineal. Por dicha razón se propone linealizarlo para que opere alrededor de los puntos de equilibrio propuestos; cabe resaltar que al realizar esta linealización no se tendrá el funcionamiento de acuerdo con el modelo dinámico completo de la planta, sino por el contrario se contará con una aproximación del sistema original en los puntos

de equilibrio. Para la obtención de dicha linealización se realizó la aproximación mediante la expansión de la función no lineal en series de Taylor, la cual corresponde a una herramienta matemática que usa derivadas parciales con el objetivo de definir el sistema no lineal como una aproximación lineal de la siguiente manera:

$$f_L(x_0, y_0) = f(x_0, y_0) + \frac{\partial f}{\partial x}(x - x_0) + \frac{\partial f}{\partial y}(y - y_0) \quad (9.9)$$

Haciendo uso de la ecuación 9.9 aplicada a la ecuación no lineal del homogeneizador 9.2, se obtiene la siguiente linealización alrededor de los puntos de operación respectivos.

$$f_L(q_i, h_{homss}) = \frac{1}{l_{Hom}^2} * [q_{i0} - k_1 a_1 \sqrt{h_{Homss}}] + \frac{1}{l_{Hom}^2} (q_i - q_{i0}) - \frac{k_1 a_1}{2\sqrt{h_{Homss}}} (h_{hom} - h_{homss}) \quad (9.10)$$

En donde la función evaluada en  $(x_0, y_0)$  corresponde a 0, quedando la ecuación 9.10 de la siguiente manera:

$$f_L(q_i, h_{homss}) = \frac{1}{l_{Hom}^2} (q_i - q_{i0}) - \frac{k_1 a_1}{2\sqrt{h_{Homss}}} (h_{hom} - h_{homss}) \quad (9.11)$$

Esta linealización permite obtener ecuaciones fácilmente implementables en el software Matlab y que permiten representar la dinámica de cada una de las etapas de la planta de tratamiento alrededor de los puntos de equilibrio enunciados en la tabla 6, obteniendo como resultado las siguientes funciones lineales.

$$f_L(q_{ir}, h_{Reass}) = \frac{1}{l_{Rea}^2 + 2\pi} (q_{ir} - q_{ir0}) - \frac{k_2 a_2}{2\sqrt{h_{Rea}}(l_{Rea}^2 + 2\pi)} (h_{Rea} - h_{Reass}) \quad (9.12)$$

$$f_L(q_{rea}, h_f) = \frac{1}{\pi r^2} (q_{ir} - q_{irss}) - \frac{k_4 a_4}{2\sqrt{h_f}(\pi r^2)} (h_f - h_{fss}) \quad (9.13)$$

$$f_L(q_{agin}, h_{ag}) = \frac{1}{\pi r^2} (q_{agin} - q_{aginss}) - \frac{k_5 a_5}{2\sqrt{h_{Ag}}(\pi r^2)} (h_{Ag} - h_{Agss}) \quad (9.14)$$

$$f_L(q_c, h_c) = \frac{4}{d_{cloro}^2} (q_c - q_{css}) - \frac{2k_7 a_7}{d_{cloro}^2 \sqrt{h_c} \pi} (h_c - h_{css}) \quad (9.15)$$

$$f_L(q_{lsin}, h_{ls}) = \frac{1}{4l_{ls}^2} (q_{rea} - q_{rea}ss) - \frac{k_6 a_6}{8\sqrt{h_{ls}} l_{ls}} (h_{ls} - h_{ls}ss) \quad (9.16)$$

$$f_L(q_{c_{out}}, q_{f_{out}}, h_{ox}) = \frac{4}{d_{ox}^2 \pi} (q_{c_{out}} - q_{c_{outss}}) + \frac{4}{d_{ox}^2 \pi} (q_{f_{out}} - q_{f_{outss}}) - \frac{2k_8 a_8}{d_{ox}^2 \sqrt{h_{ox}} \pi} (h_{ox} - h_{oxss}) \quad (9.17)$$

Dichas funciones lineales fueron implementadas en la herramienta Simulink de Matlab con el objetivo de observar el comportamiento de las diferentes etapas de la planta alrededor de los puntos de operación y compararlas con el modelo dinámico de la misma, como se observa en la figura 9 :

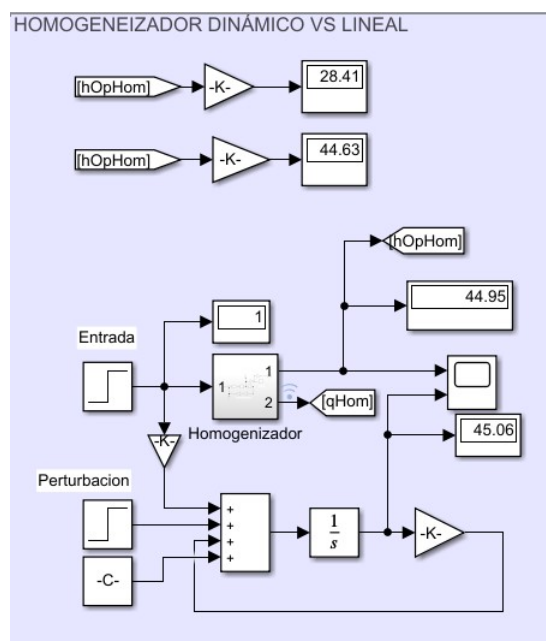


FIGURA 9: Modelo Lineal vs Modelo Dinámico(Simulación)

En la figura 9 se puede observar el bloque llamado Homogeneizador en este se encuentra descrita la ecuación dinámica, además, en la parte inferior de dicha figura se encuentra descrita la ecuación lineal junto con una pequeña perturbación alrededor del punto de operación la cual demuestra que el sistema está en equilibrio para cambios pequeños alrededor de este.

La implementación y el análisis de cada etapa en Simulink permitió la obtención de la tabla 7, en donde se relacionan las respuestas de los modelos no lineal y lineal, con sus respectivos tiempos de establecimiento  $t_s$  por etapa y sus valores de amplitud en estado estacionario  $Y_{ss}$ , además del cálculo de error entre la respuesta del modelo lineal y la del modelo no lineal  $ErrorY_{ss}, Error t_s$ .

Variable	Dinámico		Lineal		Error	
	$Y_{ss}$	$t_s$	$Y_{ss}$	$t_s$	Error $Y_{ss}$ (%)	Error $t_s$ (%)
$h_{Hom}$	44.95	2620.083	45	2700.012	0.11	2.96
$h_{Rea}$	69.31	4465.708	69.36	4620.010	0.07	5.7
$h_{Filtros}$	536.85	2131.719	536.81.1	2270.209	0.00745	5.12
$h_{Ag}$	164.2	1456.960	164.3	1543.114	0.06	5.9
$h_c$	216.266	142.44	216.263	150.048	0.0013	5.34
$h_{ls}$	4.128	184.707	4.128	197.054	14.5e-6	6.6
$h_{ox}$	122.39	1738.500	122.36	1836.219	0.02	5.62

TABLA 7: Comparación Dinámico vs Lineal(Para un punto fijo de operación)

Posteriormente se realizó el análisis del punto de operación del sistema y se sometió el modelo lineal a diferentes amplitudes en la perturbación, gracias a esta prueba, se logró obtener una gráfica de error del sistema en donde se relacionan las amplitudes de perturbación con los errores correspondientes.

Comportamiento Error- diversas amplitudes de perturbación(1.44.9464)			
Modelo Lineal	Modelo real	Perturbación	Error Hom%
45,0026	44,9464	100, E-06	0,125037823
45,5082	44,9464	1, E-03	1,249933254
50,5647	44,9464	10, E-03	12,5
101,1294	44,9464	100, E-03	125
606,7764	44,9464	1, E+00	1250

Comportamiento Error- diversas amplitudes de perturbación(1.69.4444)			
Modelo Lineal	Modelo real	Perturbación	Error Rea%
69,5455	69,4444	100, E-06	0,145584093
70,4558	69,4444	1, E-03	1,456416932
79,5585	69,4444	10, E-03	14,56431332
170,5859	69,4444	100, E-03	145,6438532

Comportamiento Error- diversas amplitudes de perturbación(0.1667.539.4269)			
Modelo Lineal	Modelo real	Perturbación	Error Filtros%
539,4727	539,4269	100, E-06	0,008490492
539,8845	539,4269	1, E-03	0,084830771
544,0025	539,4269	10, E-03	0,84823356
585,1827	539,4269	100, E-03	8,482298528
996,985	539,4269	1, E+00	84,82300382

Comportamiento Error- diversas amplitudes de perturbación(1.216.2623)			
Modelo Lineal	Modelo real	Perturbación	Error Cloro%
216,266	216,2629	100, E-06	0,001433441
216,2935	216,2629	1, E-03	0,014149445
216,5687	216,2629	10, E-03	0,14140197
219,3203	216,2629	100, E-03	1,413742255
246,8364	216,2629	1, E+00	14,13719135

FIGURA 10: Comportamiento del error ante la variación de amplitud en las diferentes perturbación

Se observo que a medida que la amplitud de la perturbación va aumentando, el error también

aumenta de manera lineal, por dicha razón es posible conocer la medición del modelo lineal basado en el modelo real y en el error de la siguiente manera:

$$M_{Lineal} = M_{Real} \left( 1 + \frac{Error}{100} \right) \quad (9.18)$$

Esto es una gran ventaja en el sistema, ya que al ser un error lineal es sencillo de calcular y permite predecir las posibles mediciones del modelo lineal si se conoce la salida del modelo dinámico y la magnitud de la perturbación.

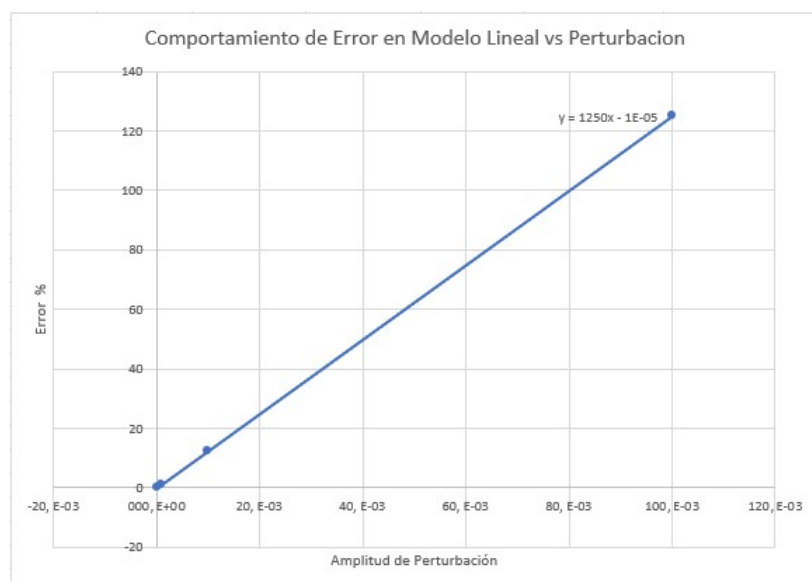


FIGURA 11: Comportamiento de Error vs Magnitud de Perturbación.

## Capítulo 10

# Resultados

Los parámetros básicos necesarios para el desarrollo del proyecto se obtuvieron a partir de algunas de las características de análisis propuestas en [29], donde se relacionan variables físicas con la construcción de cada una de las etapas. Por ejemplo, para el diseño de los floculadores, presentes en el reactor de la planta de tratamiento, existen una serie de cálculos que definen el diseño de estos, entre los cuales se encuentran el tiempo de mezcla y el gradiente de la velocidad, además otra de las relaciones geométricas que cobra relevancia para esta etapa corresponde a la sección de los canales, definida en función del flujo de la siguiente manera:

$$A = \frac{Q}{v} \quad (10.1)$$

Donde  $Q$  corresponde al caudal en  $\frac{\text{Litros}}{\text{s}}$  y  $v$  a la velocidad promedio del líquido en  $m/s$ .

Por otra parte, para la etapa de sedimentación, se hace necesario analizar la carga superficial y la carga sobre el vertedero, en donde la carga superficial corresponde a la relación existente entre el caudal tratado y el área superficial del sedimentador, expresada de la siguiente manera:

$$CS = \frac{Q}{A_s} \quad (10.2)$$

Y la carga sobre el vertedero corresponde a la relación entre el caudal por unidad de longitud.

Además la relación que permite estimar la cantidad de filtros a usar en las plantas de tratamiento de agua residual según Morril y Wallace [29] corresponde a:

$$n = 0,044\sqrt{Q} \quad (10.3)$$

---

Como se puede observar en las ecuaciones, 10.1, 10.2, 10.3 y en general en las ecuaciones de diseño de la planta, la gran mayoría dependen del parámetro de caudal, por dicha razón se hace necesario tener un control, de esta variable y en consecuencia se debe tener el control de la variación de la altura.

### **10.1. Definición de parámetros.**

En primera instancia se plantean los parámetros físicos que se observan en la tabla 3, dichos parámetros son generados debido a las variables físicas, tales como alturas, diámetros y radios conocidos de cada etapa.

Posteriormente se plantean los tiempos de establecimiento para cada etapa, estos datos son adquiridos mediante el método de observación, donde se asume que los sistemas implementados cuentan con una respuesta de primer orden y por ende tendrán un tiempo de establecimiento correspondiente a  $5\tau$ .

Se obtienen las constantes que definen las ecuaciones desde 3.21 a 3.27 y luego, se hace uso de las ecuaciones obtenidas en la tabla 6 y evaluando cada uno de las constantes obtenidas previamente, o analizadas en el diseño de la planta se obtienen los valores de los puntos de operación, alrededor de los cuales va a funcionar cada etapa.

El proceso mencionado anteriormente se observa de manera más clara en el Anexo 1, donde también se observa la definición de las derivadas evaluadas en los puntos de operación.

### **10.2. Simulación planta de tratamiento.**

El proceso de simulación se dividió en tres etapas, en la primera se obtuvo la simulación en el software de Matlab, de los modelos lineal y no lineal, propuestos en el desarrollo metodológico. En la segunda, se obtuvo la simulación de los autómatas finitos en el software de *LabVIEW*, y por último se realizó la implementación del sistema *SCADA* en el software de *LabVIEW*.

#### **10.2.1. Simulación de Modelos no Lineal y Lineal en Matlab**

A partir de las ecuaciones 3.21 a 3.36 se plantearon las simulaciones respectivas, con el fin de modelar la planta de agua residual mediante una descripción matemática que relacione las

variables de estado propias del sistema. En la figura 12 se observa la descripción propia de cada variable usada.

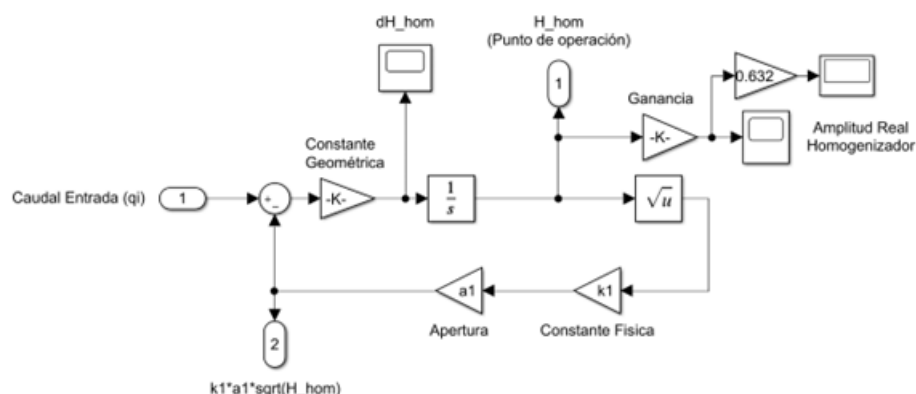


FIGURA 12: Simulación de modelo no lineal

Con esta simulación se pudo observar la incidencia del caudal de entrada, sobre la variación de altura en el líquido contenido en los diferentes tanques. Además, se lograron observar las repercusiones tanto de la geometría de los tanques, las constantes de apertura y la sección transversal de los tubos. Cabe resaltar que la variable  $H_x$  donde  $x$  corresponde a cada etapa de la planta de tratamiento, funciona alrededor de los puntos de operación propuestos en la tabla 6. Obteniendo la siguiente señal que representa el punto de operación (en este caso del homogeneizador) de la siguiente manera:

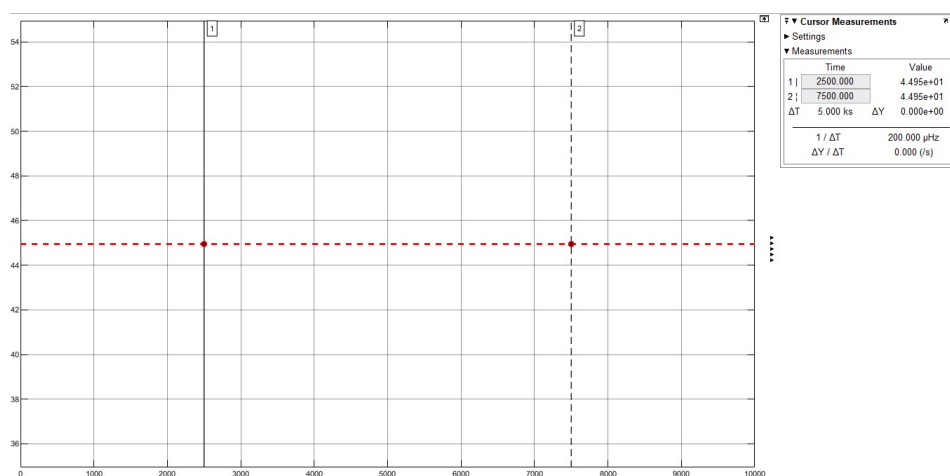


FIGURA 13: Punto de Operación del Homogeneizador

En el script del anexo 1, existen variables que relacionan el punto de operación ( $q_i, H_{Homss}$ ), las cuales al ser validadas con la simulación del modelo no Lineal (Simulink) corresponden con el valor calculado así que se realizó este proceso de comparación para cada etapa y de esta manera se logró corroborar el funcionamiento de la planta alrededor de los puntos de operación.

Tras realizar dicha validación se observó la repuesta del modelo lineal propuesto en las ecuaciones 3.30 a 3.36 el cual fue implementado mediante el uso de diagramas de bloques como el siguiente:

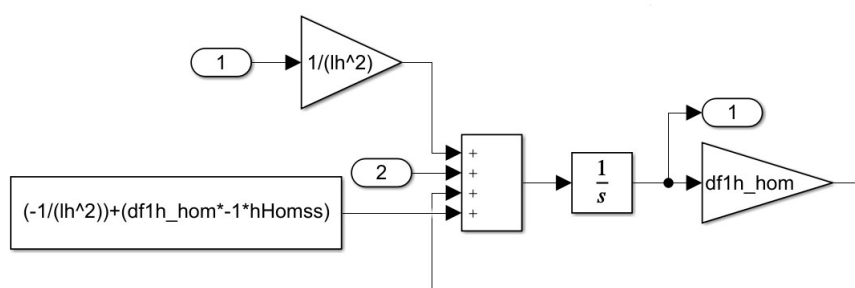


FIGURA 14: Simulación de modelo lineal Homogeneizador

La respuesta del modelo lineal contiene una transición, la cual corresponde a la aplicación de una perturbación en el modelo. La amplitud de esta se encuentra definida en la figura 10 y genera el siguiente comportamiento:

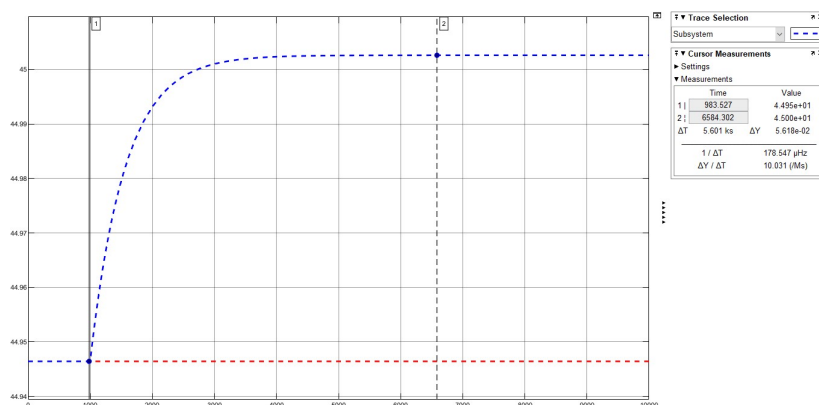


FIGURA 15: Comparación de respuesta entre modelos.

Se analizó el error existente entre el modelo no lineal y el modelo lineal propuesto, obteniendo la siguiente gráfica que permite conocer el comportamiento del error entre modelos:

Gracias a la obtención de la gráfica de la figura 16 y a una serie de gráficas semejantes, se pudo analizar que a medida que el tamaño de la perturbación aumenta, el error lo hace de manera lineal, análisis que se ve consignado en la figura 10 y con el cual se es posible plantear una relación lineal que describa el comportamiento del modelo lineal ante diferentes amplitudes de

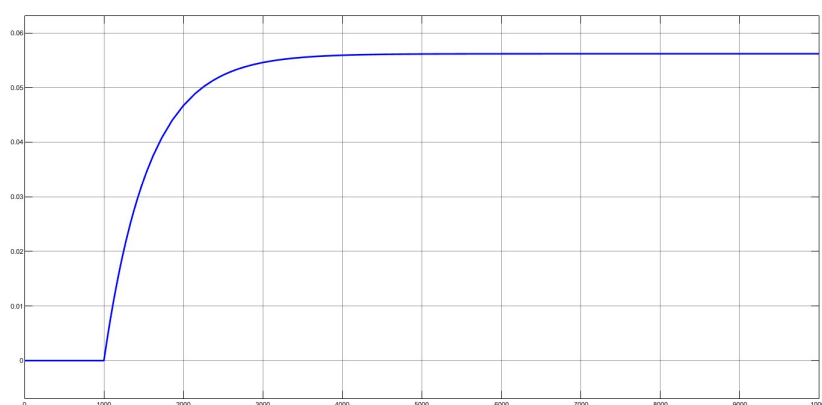


FIGURA 16: Análisis de error entre modelos.

perturbación, teniendo en cuenta la respuesta que genera el modelo no lineal, esta es descrita en la ecuación 3.37.

Por último, se observa el análisis conjunto del modelo, lineal, en donde debido al pequeño tamaño de la variación con respecto a la perturbación se observa que dicho modelo funciona alrededor de los mismos puntos de operación que el modelo no lineal, corroborando así la validez del modelo lineal, con respecto al no lineal.

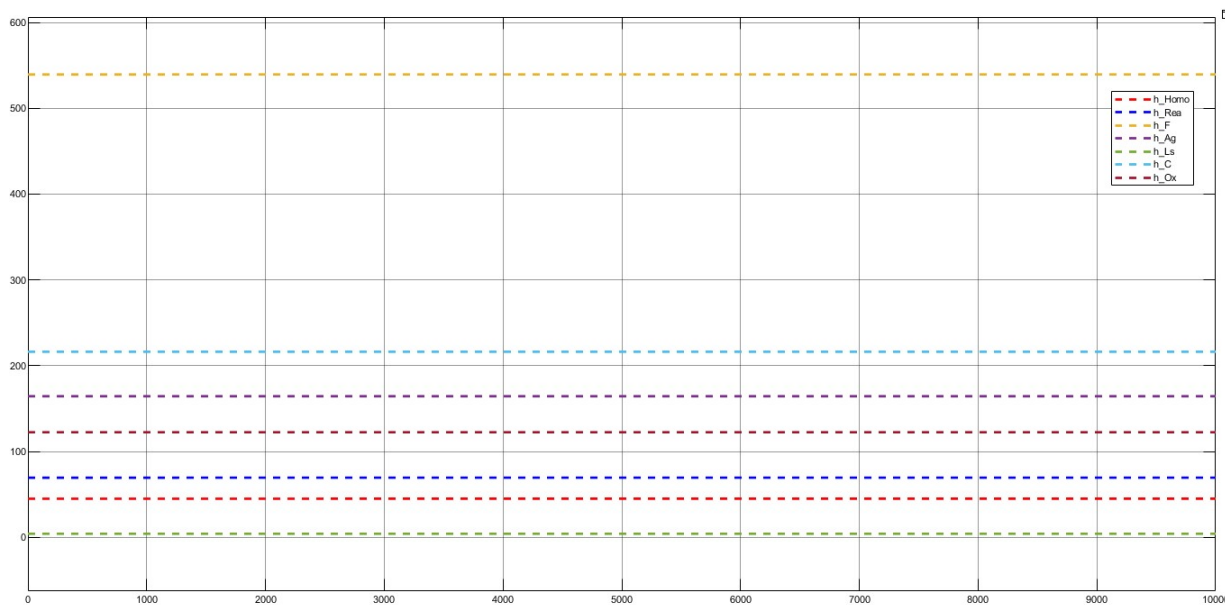


FIGURA 17: Análisis puntos de operación modelo lineal.

### 10.3. Simulación Autómatas Finitos en *LabVIEW*

Posteriormente se realizó la simulación de los autómatas finitos en el software *LabVIEW* estos son los encargados de indicar el comportamiento en eventos discretos de cada etapa, para obtener dichos autómatas se realizó el análisis de los estados, como se observa en la tabla 4. En donde cada estado define en que ubicación dentro de los tanques se encuentra el fluido, para la implementación se planteó un conjunto de máquinas de estado, diseñadas a partir de estructuras de caso, en donde cada caso corresponde a un estado específico.

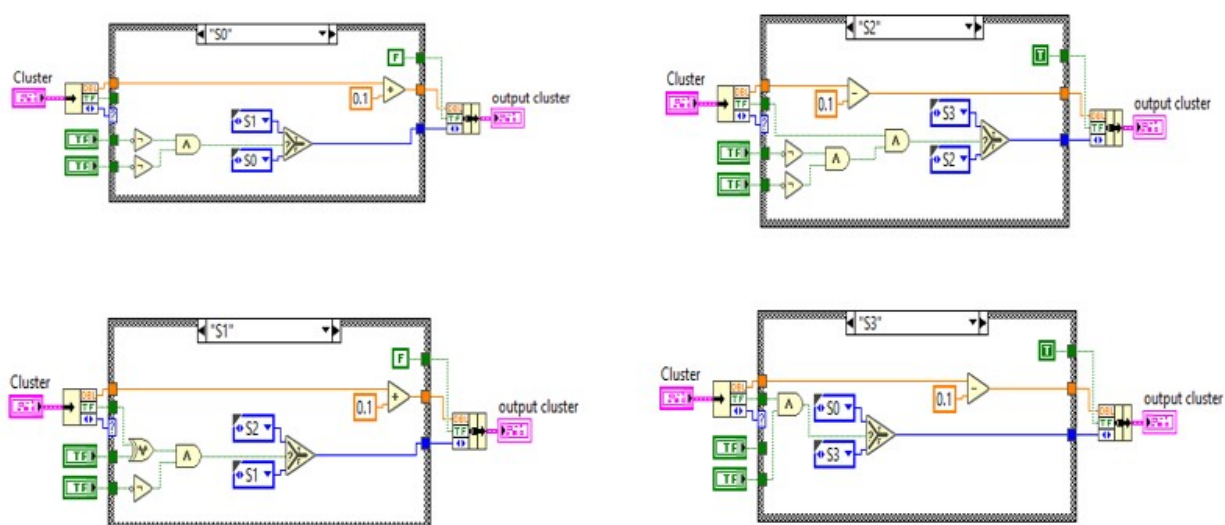


FIGURA 18: Implementación de Autómatas Finitos Deterministas

Estos autómatas fueron almacenados en una herramienta de *LabVIEW* conocida como subVI, con el fin de permitir la reutilización de código en algunas etapas, como es el caso del reactor. Cada subVI cuenta con su respectivo indicador de etapa.



FIGURA 19: Implementación de Autómatas Finitos Deterministas

Los subVI fueron interconectados, de manera tal que las variables de memoria propuestas como salidas en cada una de las etapas, activase la etapa posterior, generando de esta manera un comportamiento secuencial que permite observar el comportamiento en conjunto de la planta de tratamiento.

Con respecto a las animaciones de la tubería implementada para el diseño, simplemente se le indicó a un subVI auxiliar, la presencia o no de la variable de memoria que activa la etapa siguiente, esto para permitir que la transición entre etapas no se vea como algo repentino, sino por el contrario se lograra observar dicha transición de manera apacible.

Tras realizar la explicación del funcionamiento de los autómatas cabe resaltar que existen otros subVI complementarios que contienen información totalmente relevante para el correcto funcionamiento de estos como son: la etapa de comparadores de nivel, la de prenivel y la etapa de generación de alarmas. Por otra parte, se encuentran los indicadores de estado que permiten conocer el estado actual de los autómatas dentro del proceso de tratamiento.

La implementación de este conjunto de elementos llevo a obtener la interfaz que se observa en la figura 20.

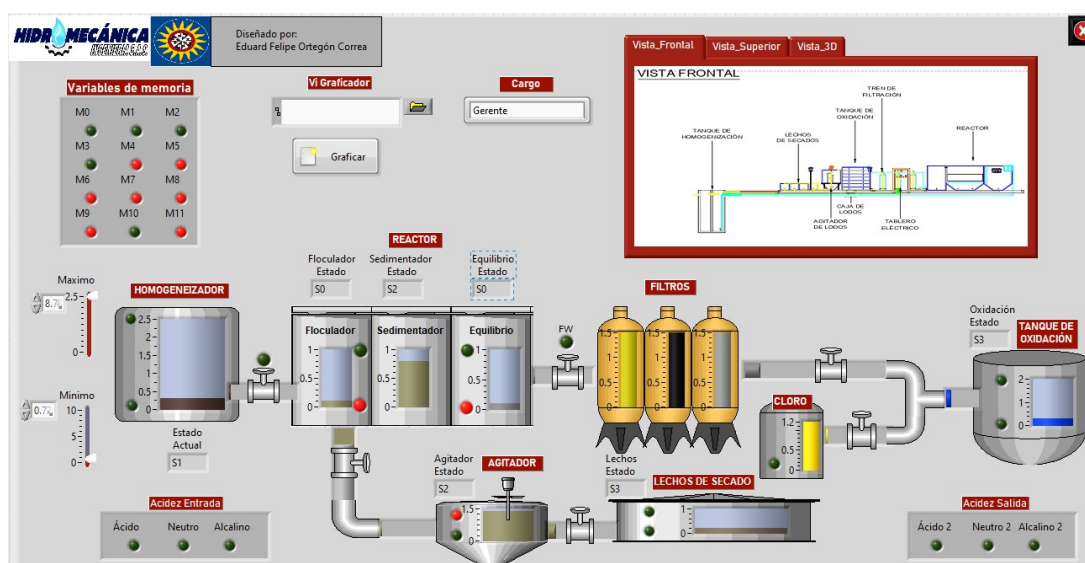


FIGURA 20: Implementación de Sistema SCADA

Otras de las funcionalidades del sistema implementado son el menú de visualización de los planos de diseño en donde se observa la disposición física y las vistas isométricas de la planta de tratamiento y el sistema que permite graficar la respuesta de los modelos no lineal y lineal, para acceder a este último se debe ingresar la ruta en donde se encuentra el archivo Vi\_General\_Graficas y presionar el botón de graficar.

## 10.4. Simulación Modelos Lineal y no Lineal *LabVIEW*

Tras haber ingresado al menú de graficar se genera una ventana en donde se informa al usuario acerca de la respuesta generadas por los modelos propuestos en las figuras 12 y 14.

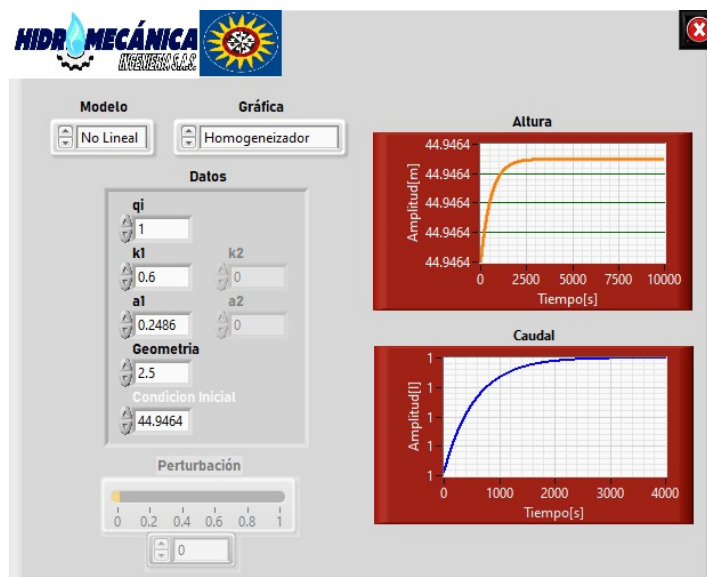


FIGURA 21: Ventana de Gráficas

La implementación de los modelos en el software de *LabVIEW*, se dividió en dos etapas, la primera representa el modelo no lineal y la segunda el lineal.

### 10.4.1. Modelo no Lineal

En el modelo no lineal se planteó un subVI para el reactor y un Vi polimórfico para las otras etapas. Esto se debe a que la forma propia del reactor no coincide con una forma cilíndrica o cubica como la de las otras etapas, sino que por el contrario el volumen de dicha etapa debe ser calculado de manera diferente. Por tal razón se realizó la implementación de un nodo de fórmula que tuviera en cuenta dicha afirmación. Otra de las razones por las cuales se implementó un nodo diferente es por la existencia de una doble realimentación de la variable de estado  $h_{Rea}$ . Este es un efecto que solo se observa en el Reactor, debido a que esta es la etapa primordial de la planta de tratamiento ya que allí ocurren los procesos más relevantes para el tratamiento, como son la floculación-coagulación, sedimentación y equilibrio, así que ingresa únicamente el caudal del homogeneizador, pero se tienen dos salidas, una para el agitador y otra para los filtros. Otro aspecto para tener en cuenta en el diseño de cada una de estas etapas corresponde al punto de operación, como bien se observa en la figura 17 cada etapa cuenta con

su respectivo valor y por esta razón al momento de ser implementado se usó un control que permitiera indicar el valor de este. El integrador que se observa en el modelo no lineal propuesto en Simulink fue implementado en *LabVIEW* mediante el uso de un módulo conocido como *Shift Register* que se usa para transferir datos de la iteración actual a la siguiente de un *While Loop* o *For* actuando como retenedor de orden cero.

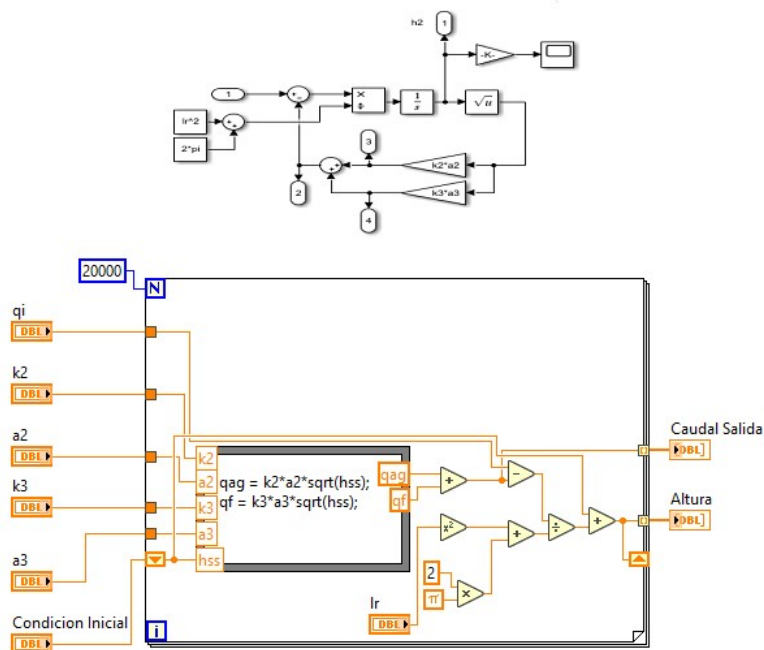


FIGURA 22: Ventana de Gráficas

El VI polimórfico usado consta de una subdivisión en donde se ve reflejada la componente geométrica para su diseño, ya que al validar en la tabla 5, la opción de modelo lineal cilíndrico sería útil para las etapas de filtrado, oxidación y el agitador, mientras que la opción de modelo no lineal cubico es usada por el homogeneizador y por los lechos de secado. En la figura 23 se observa la implementación realizada para el modelo cilíndrico, mientras que en la figura 24 se tiene una representación para el modelo no lineal cúbico.

Con la unión de los modelos no lineal cubico y no lineal cilíndrico en una ventana, se obtiene el resultado que se observa en la figura 21. Donde se relaciona el funcionamiento de la planta alrededor de los puntos de operación y el caudal generado por la etapa en cuestión.

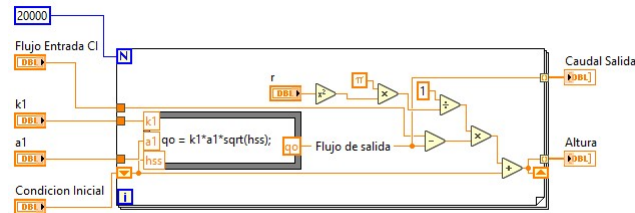


FIGURA 23: Modelo no lineal Cilíndrico

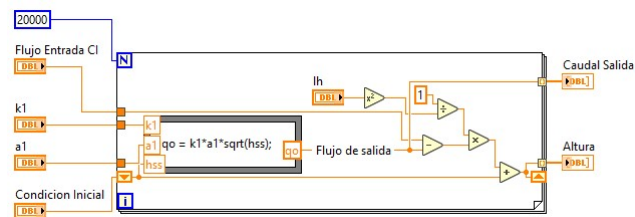


FIGURA 24: Modelo no lineal Cúbico

### 10.4.2. Modelo Lineal

En el modelo lineal se planteó el diseño de un único modelo para todas las etapas y se relaciona la respuesta de cada etapa a partir de las constantes propias de la misma, es decir, con las constantes calculadas a partir del Anexo 1, tales como los puntos de operación de cada etapa, las derivadas parciales evaluadas en dichos puntos, las constantes de apertura de las válvulas y las geométricas, se llegó al modelo que se observa en la figura 25

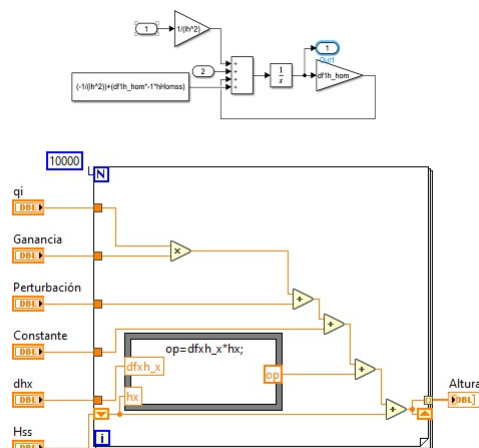


FIGURA 25: Modelo lineal

Dicho modelo permite tener la representación lineal del sistema y además la modificación de la perturbación mediante el uso de un control numérico.

## 10.5. Simulación del Sistema SCADA.

Para la simulación del sistema SCADA se realizó la implementación de un autómata finito que permite la validación de seguridad y la configuración de parámetros propios del sistema.

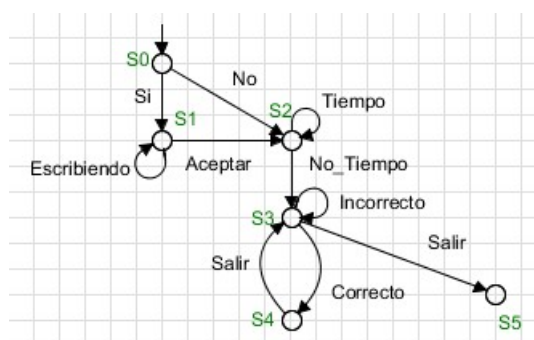


FIGURA 26: Autómata finito SCADA

### 10.5.1. S0. Estado Inicial

Se le permite al usuario tomar la decisión de modificar la configuración de velocidad del sistema o continuar con la predeterminada por el diseñador. Si el usuario desea escribirla pasará al estado S1 de lo contrario pasará al estado S2.

### 10.5.2. S1. Escribir

Se permite configurar a la pantalla principal modificando la velocidad de ejecución, y mostrar el estado de las alarmas. Si el usuario valida la culminación de escritura por medio del botón aceptar pasará al estado S2, de lo contrario el sistema permanecerá en S1.

### 10.5.3. S2. Leer

Se leen las variables modificadas en S1 y si el usuario decidió no modificarlas se asignan condiciones por default por parte del diseñador, el cual asigno tiempos de 100uS por iteración de programa en la pantalla principal de la figura 20 y asigno la visibilidad completa de las alarmas.

#### 10.5.4. Validación de Usuario

Se validan las credenciales de ingreso a la base de datos propuesta para el proyecto, en esta se almacenan datos correspondientes al usuario, nombres, apellidos, contraseñas y cargos. El diseñador se cerciora de que la consulta hecha para dicha validación abstraiga la información necesaria del sistema, generando como respuesta una bandera, de validación exitosa si es el caso, de lo contrario se indicará al usuario una advertencia que le indicará el fallo en el momento de ingresar sus datos.

Usuario: Eduard  
 Contraseña: Eduard1234  
 Usuario\_Base: Eduard  
 Contraseña\_Base: Eduard1234  
 Cargo: 1

**Consulta**

```

SELECT Cargos_Tesis.Usuario,
Cargos_Tesis.Contraseña, Cargos_Tesis.Cargo
FROM Cargos_Tesis
where Cargos_Tesis.Usuario = 'Eduard' AND
Cargos_Tesis.Contraseña = 'Eduard1234'
  
```

Autenticacion\_Exitosa? ●

FIGURA 27: Indicador de consulta, usuario, contraseña, cargo y validación de usuario

La base de datos fue realizada mediante la herramienta de *SQL Server Management Studio* y permite observar la siguiente información para los usuarios previamente creados:

Cada usuario cuenta con su respectivo cargo, los cuales pueden llegar a repetirse y verse desorganizados en la base lo que podría volver compleja la búsqueda de información a mayor escala, por dicha razón se implementó una tabla adicional la cual relaciona a los usuarios con su respectivo cargo mediante el uso de un campo conocido como *Cargo\_Id*

Estas dos tablas se encuentran relacionadas a partir de llaves foráneas, es decir la columna cargo en la tabla de Usuarios, hace referencia a un Nombre de cargo específico en la tabla de Cargos.

Persona_Id	Nombre	Apellido	Cargo	Usuario	Contraseña
1	Eduard	Ortegón	1	Eduard	Eduard1234
2	Jaison	Borrero	5	Jaison	Jaison1234
3	Amando	Mateus	2	Amando	Amando1234
4	Guillermo	Guamizo	2	Guillermo	Guillermo1234
5	Doris	Ortegón	4	Doris	Doris1234
6	Sebastian	Herrera	1	Sebastian	Sebastian1234
8	Allisson	Pedraza	1	Allisson	Allisson1234
9	Carlos	Torres	2	Carlos	Carlos1234

FIGURA 28: Tabla de Usuarios

Cargo_Id	Nombre_Cargo
1	Programador
2	Ingeniero
3	Tecnico
4	Gerente
5	Administrador

FIGURA 29: Tabla de Cargos

### 10.5.5. Tanques

En este VI del SCADA se encuentran implementadas las secciones 3.3.3 y 3.3.4 descritas en este trabajo de grado.

# Capítulo 11

## Conclusiones

- Al realizar el modelo de la planta de tratamiento de agua residual en espacio de estados, mediante el desarrollo de subsistemas dinámicos de eventos discretos, se logró analizar el comportamiento de cada etapa de la planta por separado, lo que permitió observar de manera más clara y concisa la disposición de los tanques junto con sus respectivos sensores. En las figuras 7 y 8 se presenta el modelo de eventos discretos definido y probado en el software Supremica y en la figura 18 se presenta la correspondiente implementación realizada mediante autómatas que constituyen el funcionamiento de alto nivel; en la figura 22 se presenta la ecuación en diferencias correspondiente al modelo dinámico de cada tanque. La validez de la metodología propuesta es verificada mediante simulación en Matlab y comparación directa con los datos disponibles del SCADA real. Esto se debe a que se aplican conceptos del punto de operación que hacen referencia a aquellos puntos físicos donde la planta se encuentra en equilibrio, por ende, la variación de altura en los tanques no existe y su derivada es cero, permitiendo que el modelo lineal propuesto para cada etapa funcione alrededor de dichos puntos, lo que genera el correcto tratamiento del agua residual, ya que al mantener el control sobre dichos puntos implícitamente se validan las variables de entrada y geométricas, lo que recae en los tiempos dedicados para los diferentes procesos físicos y químicos de tratamiento.
- Para el diseño del estimador de estados híbrido se realizó un estudio del modelo no lineal basado en el principio de Torricelli, obteniendo un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales. Se propusieron dos rutas de análisis para el sistema, la primera corresponde a la linealización a partir de series Taylor alrededor de los puntos de operación que se observan en la tabla 6; el modelo lineal es abordado mediante simulación en Matlab y sus parámetros fueron ajustados para que las señales de salida correspondieran con las

---

mediciones disponibles del sistema real como se observa en el Anexo 1, los dos flujos de trabajo coinciden en sus resultados validando el proceso. Para el modelo lineal, se logra apreciar un error proporcional, respecto al punto de operación y la perturbación, como se observa en la figura 10, esto es interesante y de trabajo futuro ya que permitiría predecir las posibles mediciones del modelo lineal si se conoce la salida del modelo dinámico y la magnitud de la perturbación, lo que se explica debido a que el modelo no lineal es un modelo continuo, en el cual se debe tener en cuenta la dinámica total del sistema, pero al realizar la linealización alrededor de los puntos de operación se reduce el rango en el cual funciona el modelo lineal, pero se tiene mayor control sobre el mismo.

- Basado en la operación del sistema real de la PTAR, se identificaron una serie de requerimientos para los valores de los parámetros de los tanques y tuberías, como se presenta en las tablas 1,2 y 3. Con base en estos requerimientos se establecieron escenarios para la simulación, y pruebas que permiten comprobar los resultados obtenidos a lo largo de los capítulos 9 y 10. Los resultados de simulación se observan en las figuras 15 y 17 en donde se relacionan los puntos de operación de todas las etapas presentes en la planta de tratamiento, además se logra observar que en la figura 18 se controla la naturaleza discreta de la planta de tratamiento, mientras que en las figuras 24 y 25, se tiene control sobre los modelos no lineal y lineal, es decir sobre la naturaleza continua de la planta, al agrupar estos tres conceptos, se logra obtener un modelo híbrido que describe al proceso de tratamiento, usando las ventajas del modelo discreto para disminuir la complejidad del modelo continuo.
- Para la programación, implementación y validación del sistema *SCADA*, se planteó la unión de los autómatas finitos deterministas junto con los modelos no lineales y su linealización alrededor de los puntos de operación en *LabVIEW* para cada etapa, obteniendo los resultados que se observan en la figura 20. A partir de esta implementación se pudo corroborar el correcto funcionamiento de los modelos tanto continuos como discretos, comparándolos con los resultados de los modelos propuestos en las figuras 12 y 14 y los puntos de operación en la figura 17, lo que permitió emular el comportamiento de la planta de tratamiento de agua residual. Además de esto se propuso la emulación del sistema *SCADA*, en donde se relacionan otras componentes de estos sistemas, como son las validaciones de seguridad y el manejo de bases de datos, para el almacenamiento información propia del sistema. Esto se realizó con el fin de lograr una herramienta de emulación capaz de describir el comportamiento de la planta de tratamiento de agua residual. En conjunto se logró la implementación de un sistema de respaldo para el sistema *SCADA* basado en un estimador híbrido de estados, que, gracias a la naturaleza lineal

del modelo obtenido, permite la predicción de valores dependiendo de la perturbación y de los puntos de operación.

## Capítulo 12

# Trabajos Futuros

Se observaron algunas deficiencias a la hora de realizar este proyecto de grado, entre las cuales se encuentra la falta de seguridad del sistema, las limitantes del modelo propuesto en cuanto a las variables físicas y químicas tratadas, además de la incapacidad de almacenar datos históricos del comportamiento de la planta. Por tal razón se propone que las personas que deseen continuar con la realización de este analicen la viabilidad de:

- Mejorar la seguridad del sistema *SCADA*, proponiendo algoritmos de encriptación híbrida que permitan aumentar la seguridad e integridad de los datos generados mediante el uso de llaves públicas y privadas para los posibles accesos entre los diferentes usuarios.
- Realizar modelos matemáticos que definan otras variables de importancia para el proceso bien sean químicas, físicas o bioquímicas, que permitan mejorar el modelo propuesto, acercándose a resultados acordes con la realidad.
- Implementar sistemas de bases de datos que almacenen registros históricos del comportamiento de la planta, para tener un punto de partida cuando esta sufra daños por desconexión, o por falta de información de los sensores y de esta manera, poder implementar algoritmos de interpolación o extrapolación para producir aproximaciones polinómicas de las respuestas esperadas por el sistema.

# Capítulo 13

## Anexos

### 13.1. Código de Matlab

```
clc
clear
close all

%Parámetros Físicos de la planta

lh = 2.5    % Longitud Homogenizador
hr = 2    %Altura Reactor.
r_reactor = 1 % Radio del reactor
lr = 1 %longitud de la sección cubica del reactor
h_filtros = 1.5 %Altura de los filtros
d_filtros = 0.3 %Diámetro de los filtros
ls = 1 %Altura lechos de secado
ha = 1.5 % Altura del agitador
r_agitador = 0.5 %radio del agitador
d_cloro = 0.3;%Diámetro tanque de Cloro
hC = 1.2;%Altura Tanque de Cloro
d_Oxidacion = 1.5;%Diámetro Tanque Oxidación
hOxidacion = 2;%Altura tanque de Oxidación
```

---

*%Tiempo de establecimiento de las etapas.*

```
ts_H = 2220;  
ts_R = 3600;  
ts_F = 1800;  
ts_A = 1200;  
ts_C = 120;  
ts_Ls = 120;  
ts_Ox = 1500;
```

```
tao_h = ts_H/5  
tao_r = ts_R/5  
tao_f = ts_F/5  
tao_A = ts_A/5  
tao_C = ts_C/5  
tao_ls= ts_Ls/5  
tao_ox= ts_Ox/5
```

*%Constantes físicas del sistema.*

```
k1 = 0.6; % k1 corresponde a sección_transversal*\sqrt(2*g)  
a1 = 0.2486; % apertura de la válvula al 24,86%  
k2 = 1;  
a2= 0.1; % Apertura de la válvula al 10%  
k3 = 1;  
a3 = 0.02;% Apertura de la válvula al 2%  
k4 = 0.6; % k4 corresponde a s*\sqrt(2*g)  
a4 = 0.01196; % Apertura de la válvula al 1.2%  
k5 = 1;  
a5 = 0.065;% Apertura de la válvula al 6.5%  
k6 = 1;  
a6 = 0.41; %Apertura de la válvula al 41%  
k7 =1;  
a7 =0.068;  
k8 = 1.014;  
a8 = 0.104;
```

---

```

qi = 1; % Caudal de entrada de la planta (l/min).
qiG = 0:0.01:1.5
qc = 1 ; % Caudal de entrada etapa de cloración.
qcG = 0:0.01:1.5

syms k_1 a_1 k_2 a_2 k_3 a_3 k_4 a_4 k_5 a_5 k_6 a_6 k_7 a_7 k_8 a_8
syms h_hom h_rea h_f h_ag h_ls h_ox h_c
syms q_i q_ir qrea_f qag_in q_c qls_in qc_out qf_out l_h l_rea theta_r
syms theta_f theta_Ag l_ls theta_Ox theta_c

%Puntos de operación

hHomss = (qi/(k1*a1 ))^2
hReass = (qi/((k2*a2)+(k3*a3)))^2
hfss = ((qi*(k3*a3))/((k4*a4)*((k2*a2)+(k3*a3))))^2
hAgss = ((qi*(k2*a2))/((k5*a5)*((k2*a2)+(k3*a3))))^2
hCss = (qc/(k7*a7))^2
hLs_ss = ((qi*(k2*a2))/((k6*a6)*((k2*a2)+(k3*a3))))^2
hOx_ss = (qc^2+(2*qc*k4*a4*sqrt(hfss))+((k4^2)*(a4^2)*hfss))/(k8^2*a8^2)

%Función del Homogeneizador

f1 = (1/l_h^2)*(q_i-(k_1*a_1*sqrt(h_hom)))

df1_qi = diff(f1,q_i);
df1_qi = subs(df1_qi,l_h,lh);
df1_qi = eval(df1_qi)

df1h_hom = diff(f1,h_hom);
df1h_hom = subs(df1h_hom,[a_1,k_1,h_hom,l_h],[a1,k1,hHomss,lh]);
df1h_hom = eval(df1h_hom)

```

---

*%Función del reactor*

```
Den1 = ((lr^2 + 2*pi));
f2 = (1/Den1)*(q_ir-(k2*a2 + k3*a3)*sqrt(h_rea))

f20 = subs(f2,[q_ir,h_rea],[k1*a1*sqrt(hHomss),hReass]);
f20 = eval(f20);

df2h_hom = diff(f2,q_ir);
df2h_hom = eval(df2h_hom)

df2h_rea = diff(f2,h_rea);
df2h_rea = subs(df2h_rea,h_rea, hReass);
df2h_rea = eval(df2h_rea)
Funcion de los filtros
f3 = (1/(pi*(0.15)^2))*(qrea_f-(k_4*a_4*sqrt(h_f)))

df3_hrea = diff(f3,qrea_f);
df3_hrea = eval(df3_hrea)

df3h_f = diff(f3,h_f);
df3h_f = subs(df3h_f,[a_4,k_4,h_f],[a4,k4,hfss]);
df3h_f = eval(df3h_f)
```

*%Función Agitador*

```
f4 = (1/(pi*r_agitador^2))*(qag_in-(k5*a5*sqrt(h_ag)))
f40 = subs(f4,[qag_in,h_ag],[k2*a2*sqrt(hReass),hAgss]);
f40 = eval(f40);

df4_hrea = diff(f4,qag_in);
df4_hrea = eval(df4_hrea)

df4h_ag = diff(f4,h_ag);
df4h_ag = subs(df4h_ag,h_ag,hAgss);
df4h_ag = eval(df4h_ag)
```

*%Función Cloro*

```
f5 = (1/(pi*(d_cloro/2)^2))*(q_c - k7*a7*sqrt(h_c))
f50 = subs(f5,[q_c, h_c],[qc,hCss]);
```

```
df5_qc = diff(f5,q_c);
df5_qc = eval(df5_qc)
```

```
df5_hc = diff(f5,h_c);
df5_hc = subs(df5_hc,h_c,hCss);
df5_hc = eval(df5_hc)
```

*%Función Lechos de Secado*

```
Den4 = 4*ls^2;
f6 = (1/(Den4))*(qls_in-(k6*a6*sqrt(h_ls)))
f60 = subs(f6,[qls_in,h_ls],[k5*a5*sqrt(hAgss),hLs_ss]);
```

```
df6_qLsin = diff(f6,qls_in);
df6_qLsin = eval(df6_qLsin)
df6_hls = diff(f6,h_ls);
df6_hls = subs(df6_hls,h_ls,hLs_ss);
df6_hls = eval(df6_hls)
```

*%Función Tanque de Oxidación*

```
f7 = (1/(pi*(d_Oxidacion/2)^2)*(qc_out + qf_out - k8*a8*sqrt(h_ox)))
df7_qc_out = diff(f7,qc_out);
df7_qc_out = eval(df7_qc_out)
df7_qf_out = diff(f7,qf_out);
df7_qf_out = eval(df7_qf_out)
df7_hox = diff(f7,h_ox);
df7_hox = subs(df7_hox,h_ox,hOx_ss);
df7_hox = eval(df7_hox)
```

# Bibliografía

- [1] J. Borrero. *Hidromecánica Ingeniería*. URL: <http://www.hidromecanicaingenieria.com> (visitado 14-09-2020).
- [2] Vega. *Tecnología de medición de nivel y presión para el tratamiento de aguas residuales*. URL: [https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos\\_y\\_documentos/99578/44557-ES-Tecnolog--a-de-medici--n-de-nivel-y-presi--n-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales-ES\\_ES.pdf](https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/99578/44557-ES-Tecnolog--a-de-medici--n-de-nivel-y-presi--n-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales-ES_ES.pdf) (visitado 13-09-2020).
- [3] M.D.A.D.S. *RESOLUCIÓN 631 DE 2015*. URL: <http://www.emserchia.gov.co/PDF/Resolucion631.pdf> (visitado 13-09-2020).
- [4] ONU. *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. URL: <https://www.un.org/sustainable%20development/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/> (visitado 13-09-2020).
- [5] OMS. *Enfermedades transmitidas por el agua*. URL: [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/diseases-risks/diseases/es/](https://www.who.int/water_sanitation_health/diseases-risks/diseases/es/) (visitado 12-09-2020).
- [6] Grupo Morbecik. *COMPARACIÓN ENTRE LOS SISTEMAS: SEMI AUTOMÁTICO, AUTOMÁTICO, NEUMÁTICO Y HIDRÁULICO*. URL: <http://www.grupomorbeck.com/site/es/blog/noticias-del-grupo-morbeck/comparacion-entre-los-sistemas-semi-automatico-automatico-neumatico-y-hidraulico> (visitado 15-09-2020).
- [7] K. Ravi. «Smart Waste Water Treatment». En: (2016). DOI: 10.1109/TENCON\nSpring.2017.8070092.
- [8] O. Katsuhiko. *Ingeniería de control moderna*. PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2010. ISBN: 978-84-8322-660-5.
- [9] Cruz Jiménez B. J. «Modelación y análisis de un sistema híbrido: Un caso de estudio con un sistema de tanques». En: (2006).

- 
- [10] P. Milagros V. Orlando L. Yosvani. «Petri's nets in the determination of critical points for the internal control». En: (2016).
- [11] Rodrigo De Castro Korgi. *Teoría de la Computación*. Universidad Nacional de Colombia, 2004.
- [12] Aquilino Rodríguez Penin. *Sistemas SCADA*. Marcombo, 2007.
- [13] T. E. Paul. *Física, conceptos y aplicaciones*. McGraw-Hill, 2011.
- [14] Xnomind. *Principio de Torricelli*. <https://www.principiode.com/principio-de-torricelli/>. (Visitado 26-05-2022).
- [15] Mahalanabis. «On the state estimation of large-scale continuous-time linear systems». En: (1981).
- [16] A. Cabrera y A. Poznyak. «Bioreactor states estimation in the feedbatch process using differential neural networks». En: *Proceedings of the 22nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* 4.10 (2000), pág. 4. DOI: 10.1109/IEMBS.2000.901483.
- [17] Y. Kobayashi e I. Ono. «Sequential Estimation of States and Parameters of Nonlinear State Space Models Using Particle Filter and Natural Evolution Strategy». En: *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)* 1-8 (2020), pág. 4. DOI: 10.1109/CEC48606.2020.9185666.
- [18] J. Zhao. «Power System Dynamic State Estimation: Motivations, Definitions, Methodologies, and Future Work». En: *IEEE Transactions on Power Systems* 4 (2019), págs. 3188-3198. DOI: 10.1109/TPWRS.2019.2894769.
- [19] P. Zhang F. Feng e Y. Zhou. «Authentic Microgrid State Estimation». En: *IEEE Transactions on Power Systems* 2 (2022), págs. 1657-1660. DOI: 10.1109/TPWRS.2022.3143362.
- [20] K. M. El Hadad S. G. Abokhatwa y M. R. Katebi. «Nonlinear State Estimation of Power Plant System using State-Dependent Kalman Filter». En: *IEEE 1st International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering MI-STA* (2021), págs. 116-121. DOI: 10.1109/MI-STA52233.2021.9464375.
- [21] W. Edwin B. David. *Practical SCADA for Industry*. Elsevier, 2003. ISBN: 07506 58053.
- [22] CERN. *CERN and ETM (Siemens) team up on Industrial Control Systems*. URL: <https://home.cern/news/news/cern/cern-and-etm-siemens-team-industrial-control-systems> (visitado 03-10-2020).

- 
- [23] U. Suphi. «Fault-related Alarm Detection of a Wind Turbine SCADA System». En: *2021 3rd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*. 2021, págs. 1-5. DOI: 10.1109/HORA52670.2021.9461331.
- [24] K. Megat y K. Mahanijah. «SCADA Design System with pH Effluent Monitoring on Sewage Treatment Plant in Mawar's College at UiTM Shah Alam using Tbox LT-12 RTU». En: *2020 10th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE)*. 2020, págs. 52-56. DOI: 10.1109/ICCSCE50387.2020.9204930.
- [25] Cruz Jiménez B.1 Avilés Viñas J.2 Lara Caballero E. *Diseño de un controlador basado en el modelo del autómatas híbrido*. <https://www.redalyc.org/pdf/467/46713053001.pdf>. (Visitado 20-09-2020).
- [26] Cheng Zhong y col. «A hybrid model for water level forecasting: A case study of Wuhan station». En: *2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*. 2017, págs. 247-251. DOI: 10.1109/ICTIS.2017.8047772.
- [27] V. M. Sineglasov, B. I. Dmitrenko y A. V. Kulbaka. «Using PV/wind hybrid systems in the autonomous power of unmanned aerial vehicle control centre». En: *2013 IEEE 2nd International Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments Proceedings (APUAVD)*. 2013, págs. 137-140. DOI: 10.1109/APUAVD.2013.6705306.
- [28] X. Wang J. Zhang. «Recursive Distortion Estimation for Hybrid Digital-Analog Video Transmission». En: *2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. 2018, págs. 1743-1747. DOI: 10.1109/ICASSP.2018.8461594.
- [29] V. Maria. *Purificación de Aguas*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2011.