

PROYECTO DE GRADO

Presentado ante la ilustre UNIVERSIDAD DE LOS ANDES como requisito parcial para
obtener el Título de INGENIERO DE SISTEMAS

PROPUESTA DE GEMELO DIGITAL PARA EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN EN HIDROLÓGICAS DESDE LA VISIÓN DE LA INDUSTRIA 4.0

Por

Br. Ysis Lacruz

Tutor: PhD. Juan Cardillo

Cotutor: PhD. Edgar Chacón

Noviembre 2019



©2019 Universidad de Los Andes Mérida, Venezuela

Propuesta de Gemelo Digital para el Proceso de Potabilización en Hidrológicas desde la visión de la Industria 4.0

Br. Ysis Lacruz

Proyecto de Grado — Control y Automatización, 109 páginas

Resumen: Se propone el diseño de un gemelo digital para la unidad de potabilización de una planta hidrológica, en pro de cambiar el enfoque hacia la Industria 4.0. Se estudiará el modelo de negocio que rige a las hidrológicas y se realizarán los modelos del proceso para su sistematización basada en condición, así como el modelo del flujo de producto y de los recursos. Se construye el modelo de operación basado en los modelos anteriores. Se utilizarán Sistemas Híbridos para describir el comportamiento del proceso de potabilización. Los análisis y pruebas se realizarán en un ambiente de simulación.

Palabras clave: Gemelo digital, Industria 4.0, Automatización, Sistemas Híbridos, Hidrológica.

Índice

Índice de Tablas	vi
Índice de Figuras	viii
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	3
1.2 Planteamiento del problema	5
1.3 Justificación	5
1.4 Objetivos	6
1.4.1 Objetivo general	6
1.4.2 Objetivos específicos	6
1.5 Metodología	6
1.6 Estructura del Documento	7
2 Marco Teórico	8
2.1 Sistemas de suministro de agua potable, hacia la I4.0	8
2.2 Industria 4.0	10
2.2.1 Sistemas Ciber-Físicos	12
2.2.2 Internet de las Cosas (IoT) e Internet Industrial de las Cosas (IIoT)	13
2.2.3 Analítica de Datos	13
2.2.4 Empresa Inteligente	13
2.3 Gemelo Digital	14
2.4 Modelo de Conocimiento	15
2.5 Modelo Híbrido	17

2.6	Hidrológicas	18
2.6.1	Áreas de Negocio	18
2.6.1.1	Estudio de fuentes y caracterización de la demanda . .	19
2.6.1.2	Operación	19
2.6.1.3	Comercialización	20
2.6.1.4	Áreas de Soporte	21
2.6.2	Cadena de Valor de cada Área de Negocio	22
2.6.2.1	Fuentes y Estudio de la Demanda	22
2.6.2.2	Operaciones	22
2.6.2.3	Comercial	23
2.6.2.4	Soporte	23
2.6.3	Esquema de Interacciones para las Hidrológicas	23
2.6.4	Modelo APS en Hidrológicas	25
2.7	Proceso de Potabilización	25
2.7.1	Captación del agua	27
2.7.2	Determinación de las características del agua	28
2.7.2.1	Turbidez	29
2.7.2.2	pH	30
2.7.2.3	Cloro Residual	30
2.7.2.4	Color Aparente	30
2.7.2.5	Temperatura	31
2.7.2.6	Determinación de Dosis de Coagulante: Prueba de Jarras	31
2.7.3	Unidad de Potabilización	32
2.7.3.1	Coagulación	33
2.7.3.2	Floculación	37
2.7.3.3	Sedimentación	39
2.7.3.4	Filtración	41
2.7.3.5	Desinfección	43
2.8	Sistemas Holónicos de Producción	46
2.8.1	Descripción del conocimiento de la UHP	46
2.8.2	Dinámica del proceso físico y su supervisión	48

2.8.3	Unidades Holónicas en Hidrológicas	52
2.9	Epanet	53
2.10	MATLAB	55
3	Consideraciones Operativas para las UHP en Potabilización	56
3.1	Condiciones de Operación en Potabilización	56
3.1.1	Unidad de Coagulación	58
3.1.2	Unidad de Floculación	60
3.1.3	Unidad de Sedimentación	62
3.1.4	Unidad de Filtración	66
3.1.5	Unidad de Desinfección	69
3.2	Modelos Generales de las Entidades	71
4	Caso de Uso	78
4.1	Propuesta de Medición	79
4.2	Generación de la Propuesta de Gemelo Digital	80
4.2.1	Modelo de la Unidad de Coagulación	80
4.2.2	Modelo de la Unidad de Sedimentación	87
4.3	Escenarios de Prueba	90
5	Conclusiones y Recomendaciones	97
6	Anexos	99
6.1	Anexo A	99
6.2	Anexo B	103
	Bibliografía	104

Índice de Tablas

2.1	Granulometría de Sustratos	28
2.2	Cationes en agua potable.	28
2.3	Características físicas del agua potable (Jaramillo, 2014).	29
2.4	Principales componentes de Epanet.	53
3.1	Estados y eventos generales de la unidad.	57
3.2	Modo de Arranque para Coagulación.	58
3.3	Modo de Operación para Coagulación.	59
3.4	Modo de Arranque para Floculación.	60
3.5	Modo de Operación para Floculación.	61
3.6	Modo de Arranque para Sedimentación.	63
3.7	Modo de Operación para Sedimentación.	65
3.8	Modo de Arranque para Filtración.	66
3.9	Modo de Operación para Filtración.	68
3.10	Modo de Arranque para Desinfección.	69
3.11	Modo de Operación para Desinfección.	70
3.12	Estados y eventos del caudal.	72
3.13	Estados y eventos de la altura en el tanque.	73
3.14	Estados y eventos del tanque.	74
3.15	Estados y eventos de la compuerta.	75
3.16	Estados y eventos de la turbidez.	76
3.17	Estados y eventos de dosificación de coagulante.	77
4.1	Variables del conjunto de datos.	83
4.2	Estudio de correlación.	84

4.3	Coeficientes de las expresiones md1 y md2.	85
4.4	Estados y eventos de la unidad de coagulación.	86
4.5	Condición de operación de la unidad de sedimentación.	88
4.6	Estados y eventos de la altura en el tanque.	89
6.1	Descripción de instrumentos de medición.	103

Índice de Figuras

1.1	Evolución de la Industria.	2
2.1	Mapa general de problemas y soluciones interconectados en torno al agua.	9
2.2	Modelo de madurez de un CPS (Monostori et al., 2016)	12
2.3	Cadena de Valor en producción. Basada en (Chacón et al., 2012)	16
2.4	Estructura física de las hidrológicas (Hitachi).	18
2.5	Cadena de Valor de áreas de negocio en Hidrológicas.	19
2.6	Cadena de Valor Área fuente y estudio de la demanda.	22
2.7	Cadena de Valor Área de operaciones.	23
2.8	Cadena de Valor Área de comercialización.	23
2.9	Área de soporte.	24
2.10	Esquema de Interacciones.	24
2.11	Modelo APS.	25
2.12	Modelo APS 3D.	26
2.13	Unidad de Potabilización.	26
2.14	Proceso de captación del agua cruda (Cabello et al., 2016)	27
2.15	Prueba de Jarras (Perez and Urrea).	32
2.16	Cadena de valor de la Unidad de Potabilización.	32
2.17	Diagrama P&ID del proceso de Potabilización.	34
2.18	Formación de coloides.	35
2.19	Canal Parshall, unidad de coagulación (Hudson, 1997).	38
2.20	Floculadores (SENA, 1999).	39
2.21	Sedimentador laminar (Gonzalez, 2016).	41
2.22	Filtro rápido (SENA, 1999).	42

2.23	Planta de tratamiento plano superior.	45
2.24	Diagrama de clases de los componentes de una UHP (Chacón et al., 2019).	46
2.25	Capas de recursos en la UHP (Chacón et al., 2019).	48
2.26	Arquitectura de modelo para gelmelo digital de HPU, comportamiento físico.	50
2.27	Ejemplo: componentes de una red de Petri.	51
2.28	Unidades Holónicas de Producción para Hidrológicas.	52
3.1	Estados generales de la unidad.	57
3.2	Estado del caudal de entrada a sedimentación.	72
3.3	Estado de la altura del agua en el tanque.	73
3.4	Estado del tanque.	74
3.5	Estado de la compuerta.	75
3.6	Estado de la turbidez en coagulación.	76
3.7	Estado de dosificación.	77
4.1	Lecho filtrante.	80
4.2	Mediciones propuestas en planta.	81
4.3	Dosis de coagulante real en comparación con Dosis calculada.	85
4.4	Red de petri de la unidad de coagulación.	87
4.5	Estructura de la unidad de Sedimentación en Epanet.	88
4.6	Red de petri de la unidad de sedimentación.	89
4.7	Comportamiento de la unidad de sedimentación en condiciones ideales.	90
4.8	Replica de la unidad de sedimentación realizada en Epanet, desde MATLAB.	91
4.9	Escenario 1: Bajo nivel de turbidez y color inicial.	92
4.10	Escenario 2: Nivel bajo/medio de turbidez y color inicial.	93
4.11	Escenario 3: Nivel alto de turbidez y color inicial.	93
4.12	Escenario 4: Niveles altos de turbidez y color, con aumento de coagulante.	94
4.13	Escenario 4: Niveles altos de turbidez y color, con cierre de compuerta.	95
4.14	Escenario 5.1: Simulación de datos de entrada reales durante 4 días.	96
4.15	Escenario 5.2: Simulación de datos de entrada reales durante 4 días.	96

6.1	Conjunto de datos (1 día), turbidez baja.	100
6.2	Conjunto de datos (1 día), turbidez media.	101
6.3	Conjunto de datos (1 día), turbidez alta.	102

Capítulo 1

Introducción

Los procesos industriales tienen un papel fundamental en el desarrollo de las comunidades, de ellos dependen un sinfín de bienes y artículos que benefician el día a día; es por ello que la evolución en este campo es constante, la industria debe ajustarse a las exigencias que la sociedad dictamina.

Los acontecimientos más destacados en la historia de la industria se ubican en los tres grandes hitos que hicieron posible, entre otras cosas, el crecimiento económico y el desarrollo tecnológico a nivel mundial. Estos tres grandes hitos se conocen como las revoluciones industriales, donde la primera revolución contempla la creación e implementación de la máquina de vapor en los centros de manufactura así como la mecanización en los puestos de trabajo permitiendo la elaboración de productos personalizados, posteriormente, la segunda revolución, es la incorporación del suministro de electricidad a las fábricas, implementación de nuevos paradigmas en la producción como lo es la división del trabajo, que permitieron elaborar productos de bajo costo. La tercera revolución industrial se basa en la puesta en marcha de las microcomputadoras, los PLC (Programmable Logic Controller, por sus siglas en inglés) y los robots autónomos en las líneas de producción de las fábricas, haciendo posible la variedad de los productos y la masificación de la producción. La cuarta revolución industrial o también llamada Industria 4.0 (I4.0), corresponde a una nueva manera de organizar los medios de producción, donde el objetivo es la puesta en marcha de fábricas capaces de una mayor adaptabilidad a las necesidades y a los procesos de producción, así

como a una asignación más eficiente de los recursos usando la interconectividad. Esta nueva visión de la industria contempla una manufactura completamente equipada con sensores, actuadores y sistemas de comunicación, en donde mediante modelos holísticos de proceso, producto y recursos (gemelo digital), aunado a la aplicación de estrategias de computación, logren el despliegue de un control autónomo dentro de estas fábricas. Las características principales de cada evolución industrial se observan en la figura 1.1.



Figura 1.1: Evolución de la Industria.

Es así como la evolución tecnológica, a pasos agigantados, ha permitido la automatización de algunas industrias: desde la pirámide de automatización en la década de los 80, la manufactura integrada por computador y los SCADA para control supervisorio. Sin embargo, en pro del aprovechamiento de recursos y mejoras en los procesos industriales, se busca implantar un nuevo enfoque basado en la Industria 4.0. Este enfoque se fundamenta en el paradigma de digitalización de la empresa o transformación digital de la empresa, para ello hace uso del Internet de las Cosas (IoT), en particular del Internet Industrial de las cosas (IIoT), sistemas ciberfísicos, empresa inteligente y big data ([Del Val Román, 2016](#)). Uno de los conceptos manejados con este nuevo enfoque es el de Gemelo Digital, que no solo incluye la representación digital de un sistema en el mundo real, sino que su diferencia fundamental con respecto a las descripciones actuales es que éste maneja el modelo de proceso clásico, y añade el modelo del flujo de producto y de los recursos, permitiendo utilizar mecanismos como Analítica y Big Data para establecer elementos de ayuda a la toma de decisiones.

Este enfoque de Industria 4.0 ofrece nuevos métodos para encarar los procesos

complejos de sistemas críticos, aquellos sistemas clave en el desarrollo humano e industrial como son la electricidad, el agua, la salud, el transporte, y demás sistemas de sistemas que mantienen interrelación entre sí.

El agua, siendo un recurso limitado, es necesario en todos los ámbitos; el funcionamiento eficiente de la industria hidrológica es uno de los retos a asumir para dar forma a ciudades inteligentes. Durante siete años consecutivos el agua ha estado entre los cinco primeros factores de riesgo más importantes según el informe anual del Foro Económico Mundial sobre Riesgos Globales; en [WEF \(2018\)](#), se detalla que de los problemas de mayor impacto en la próxima década, todos menos uno podrían estar relacionados con el agua, refiriéndose como un problema no solo a la disponibilidad y gasto desmesurado de agua, también a la crisis de calidad que está enfrentando, con solo el 20% del agua tratada adecuadamente.

Así, la evolución de la I4.0 podría ofrecer una vía que permita enfrentar el reto del manejo de agua de forma eficiente, aportando nuevas herramientas de análisis de datos e integración entre las áreas relacionadas al proceso.

1.1 Antecedentes

En busca de cubrir la demanda básica de agua en la sociedad, se han creado a lo largo del tiempo estructuras que permiten el almacenamiento y distribución del líquido. De ahí que el diseño inicial de tanques y acueductos ha sido modificado a medida que la comunidad aumenta en número y necesidades. En un principio el tratamiento de agua para su potabilización era pobre, si bien existen rastros de clarificación de agua en la época antigua, la prioridad se mantuvo en el traslado del flujo hacia los centros urbanos ([Lofrano and Brown, 2010](#)). Investigaciones tempranas (previas al año 1600) se acercaron a lo que hoy se conoce como el proceso de potabilización, centrando su esfuerzo en ofrecer agua de mejor calidad para evitar la propagación de enfermedades. No es sino hasta inicios de 1800 que se inauguró la primera planta de tratamiento con filtros de arena para purificación, y alrededor del año 1850 que se utilizó cloro para la desinfección del agua. En 1924 el tratamiento moderno inició, con la aprobación del mecanismo de filtrado con carbón activado ([Symons, 2006](#)).

A mediados del siglo XX, con la tercera revolución industrial, se marca el inicio de una etapa de desarrollo tecnológico en procesos de producción, sistemas de control y técnicas de computación. La llegada de los computadores industriales y las válvulas controladas eléctricamente hizo posible el monitoreo y control de las unidades del proceso, avanzando vertiginosamente desde entonces ([Cooper, 2001](#)).

Es así como proyectos de control y automatización se desarrollan en el ámbito hidrológico industrial; se realizan instalaciones de sensores, computadores para estar al tanto del proceso en planta y se desarrollan algunos modelos de comportamiento de modo que los autómatas puedan seguir instrucciones. En [Rojas Coronel \(2015\)](#) se describe un modelo de las unidades de potabilización de agua, orientado a sistemas de control supervisorio. Es realizado todo un procedimiento metodológico en pro de conocer las bases de funcionamiento de la planta de tratamiento para luego generar diagramas de actividades de los procesos que desean automatizar. En este caso la automatización no abarca todo el flujo de producto, sino procedimientos puntuales del tratamiento, sirviendo como base para futuras investigaciones.

Con el avance de la tecnología ya no solo es posible el monitoreo y accionamiento de válvulas de forma automática, sino que se busca interconexión y traslado de información de forma rápida y eficiente entre unidades en planta. En [Mrosik \(2018\)](#) hacen referencia a una nueva era de digitalización y la preparación de la empresa para enfrentar los cambios. La visión de la cuarta revolución industrial, con el desarrollo de gemelos digitales de los procesos, utilizados para planificar, simular previa implementación y hacer seguimiento del desempeño una vez instalados los cambios, todo gracias a la sistematización e interconexión de máquinas, datos y modelos.

La industria hidrológica como sistema crítico debe ajustarse a los cambios en la era digital, mejorar los procesos y adoptar nuevas tecnologías para hacer una empresa reconfigurable y adaptable a las exigencias de la sociedad. En [Lietha \(2018\)](#) se hace referencia a la revolución inteligente del agua, asumiéndolo como un reto social de la actualidad y cuantificando las pérdidas que se generan en el tratamiento. Esto es la mayor afectación a la industria, las perdidas en tuberías y procesos, ausencia en recolección de datos, respuesta poco eficientes ante cambios en las solicitudes de la comunidad; por ello se busca mejorar el proceso haciendo uso de las herramientas

tecnológicas disponibles como análisis de datos, algoritmos basados en inteligencia artificial, gemelos digitales.

1.2 Planteamiento del problema

Dada la importancia del proceso de potabilización como el generador del flujo a distribuir, se propone desarrollar los modelos de comportamiento del proceso de potabilización, que incluye el modelo de proceso, el modelo de flujo de producto y el modelo de los recursos, con el fin de determinar el modelo operacional (secuencia de operaciones) para establecer el gemelo digital de la unidad de potabilización. Para cada uno de los modelos mencionados se requiere definir: Condición normal de operación, condición degradada y condición de falla en cada una de las etapas: arranque, operación, parada y limpieza.

1.3 Justificación

Siguiendo la tendencia mundial, en la que se proyecta a la industria en una nueva etapa de crecimiento e innovación, existen numerosas tecnologías emergentes que comienzan a impulsar y sustentar este fenómeno conocido como Industria 4.0; el avance tecnológico dentro de la industria podría permitir una mejora en el proceso de tratamiento de agua.

En una empresa hidrológica, la cadena de valor asociada a producción está genéricamente representada por 6 eslabones, a saber: Fuente, Captación, Potabilización, Distribución, Recuperación, y Retorno. Para el eslabón de Distribución las empresas hidrológicas tienen rigurosos estudios sobre redes que, incluyendo aplicaciones (WaterCAD, EPANET, etc), permiten mostrar el comportamiento de flujo en la red. Sin embargo, en los eslabones anteriores los modelos de comportamiento no han tenido prioridad debido al grado de robustez de las instalaciones y la naturaleza de los procesos. Dadas estas condiciones, generar un gemelo digital pareciera no necesario. Esta perspectiva podría ser errada si se consideran las condiciones actuales de la industria hidrológica, la cual precisa de un mecanismo que evite pérdidas de flujo

y recursos.

El hecho de proponer un Gemelo Digital en el proceso de potabilización, es tener garantía de la calidad del agua, dado que, debido al cambio climático, los periodos estacionales tienen variaciones que afectan las características físico químicas del agua cruda. Por ello, se requiere de un mecanismo flexible para la toma de decisiones durante el proceso de potabilización.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Generar una propuesta de gemelo digital de la unidad de potabilización de una hidrológica desde la visión de la Industria 4.0, basado en Sistemas Híbridos.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar los modelos de comportamiento de la unidad de potabilización (Modelo de comportamiento del proceso, flujo del producto y recursos).
- Establecer las condiciones de conmutación de los modelos obtenidos desde el punto de vista de sistemas a eventos discretos.
- Generar el modelo de comportamiento desde el punto de vista de los sistemas híbridos.
- Implementar el modelo de comportamiento de la unidad de potabilización en un ambiente de simulación.
- Establecer condiciones para generar el gemelo digital e incorporarlas al ambiente de simulación.

1.5 Metodología

A fin de lograr el cumplimiento de los objetivos planteados, se presenta el procedimiento a seguir:

- Se realizará la revisión bibliográfica pertinente, con base en el estudio del proceso de potabilización y en la evolución que ofrece la Industria 4.0 como enfoque en la integración de procesos.
- Se estudiará el modelo de negocios que rige a la industria hidrológica.
- Se determinarán los modelos del proceso, para realizar la sistematización del mismo basada en condición.
- El proceso será definido como una unidad holónica de producción, en base al enfoque de la Industria 4.0.
- Para el desarrollo de las simulaciones en el computador, se utilizarán redes de Petri, debido a la imposibilidad de implantarlo en el proceso real.

1.6 Estructura del Documento

El documento está organizado de la siguiente manera:

- Capítulo 1: Introducción y propuesta.
- Capítulo 2: Marco teórico.
- Capítulo 3: Consideraciones operativas para las UHP en producción.
- Capítulo 4: Caso de uso, inclusión de modelos y escenarios de prueba.
- Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Sistemas de suministro de agua potable, hacia la I4.0

Los Sistemas de Suministro de Agua Potable, WSS por sus siglas en inglés, son sistemas encargados de proveer agua potable en una comunidad mediante amplias redes de distribución ([Chacón et al., 2018](#)). Según el Foro Económico Mundial, la crisis alrededor del agua se sitúa dentro de los diez principales riesgos sociales en el mundo, siendo todo un reto para la industria hidrológica el cumplir sus objetivos de forma eficiente, manteniendo una buena coordinación entre los eslabones que conforman el proceso y asegurando un mínimo de pérdidas del recurso. Aun con la prioridad de mantener un buen funcionamiento, el Banco Mundial calcula que la producción de agua pierde entre un 25% y 30% de flujo debido a fallas ([Lietha, 2018](#)).

Los WSS hacen parte de la clasificación de sistemas críticos debido a la importancia que gira en torno a la industria hidrológica, un proceso clave para el bienestar común y la persistencia de otros sistemas, considerando también que dependen de un recurso limitado y vulnerable como lo es el agua ([Chacón et al., 2018](#)).

Los sistemas críticos mantienen una interdependencia entre ellos (electricidad, agua, salud, entre otros), son sistemas vitales para el buen funcionamiento de la sociedad y demás procesos tecnológicos. La falta de un sistema crítico tendría un impacto directo en el bienestar de la población, afectando también la seguridad y defensa de los

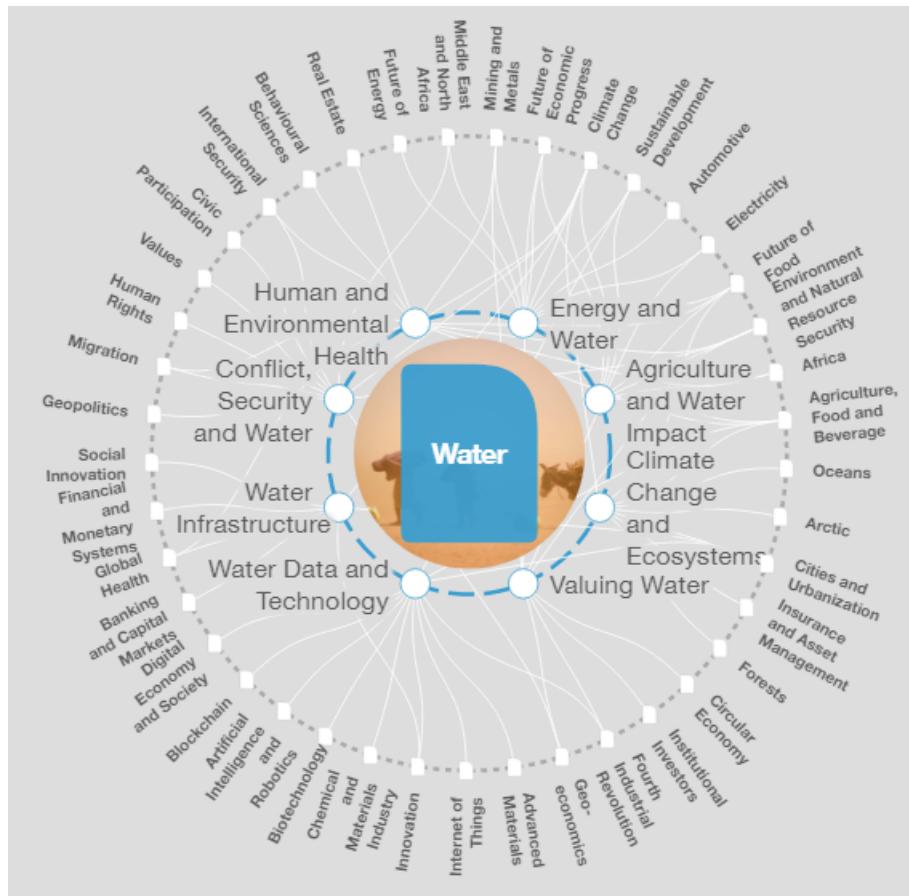


Figura 2.1: Mapa general de problemas y soluciones interconectados en torno al agua.

gobiernos ([Moteff and Parfomak, 2004](#)). En el mapa publicado por el Foro Económico Mundial (véase figura 2.1) se permite explorar los problemas interconectados en torno al agua, donde el enfoque de la I4.0 y sus componentes, pueden ofrecer soluciones basadas en un seguimiento del proceso, junto a recolección y análisis de datos que aporten a la toma de decisiones ([Chacón et al., 2018](#)).

Los Sistemas Ciber-Físicos, como componente base de la I4.0, ofrecen una nueva forma de plantearse el diseño del sistema, combinando una representación virtual del proceso en tiempo real, mientras se interactúa con el proceso físico; los datos obtenidos de planta son almacenados en la nube, de modo de conocer el estado del proceso en cualquier momento. Se debe generar una integración entre las nuevas tecnologías y las instalaciones de los WSS ([Mrosik, 2018](#); [Lietha, 2018](#)).

Dirigir los WSS hacia la visión de la I4.0 implica descentralizar el sistema de control

e integrar el concepto de Sistemas Ciber-Físicos; la creación de módulos autónomos con funciones específicas, la habilidad de reconfiguración del proceso, la automatización de las unidades y su interacción facilitan el manejo adecuado de los WSS. Para ello es necesaria también la integración hombre - máquina y una debida formación para desarrollar los modelos que emulen el comportamiento de cada unidad.

Un esquema que proporciona un sistema autónomo modular es el holónico; la idea de trabajar el proceso hidrológico mediante unidades de producción Holónicas, siguiendo la visión de la I4.0, permite la resolución de problemas complejos a través de paradigmas elementales. En [Chacón et al. \(2018\)](#) se describe la combinación de los conceptos mencionados, con el fin de controlar un sistema de abastecimiento de agua como un sistema holónico de producción.

Partiendo de estas ideas es posible generar una propuesta de los modelos de unidades autónomas en el proceso de potabilización de agua, bajo un esquema holónico, en pro de automatizar e integrar los módulos correspondientes al sistema, teniendo como base de diseño los componentes de la I4.0.

2.2 Industria 4.0

Referida como I4.0, se trata de un proceso de transformación digital en la industria, ocasionado por el avance vertiginoso en el ámbito tecnológico y los cambios que esto generó en la sociedad. La I4.0 busca aplicar las tecnologías de información para modificar la metodología de organización de la cadena de valor y gestión. Se basa en el uso de Sistemas Ciber-Físicos para monitorear los procesos, virtualizarlos, y hacer uso del Internet de las Cosas para generar comunicación y cooperación hombre-máquina y máquina-máquina en tiempo real ([Del Val Román, 2016](#); [Hermann et al., 2015](#)).

En [Hermann et al. \(2015\)](#) se presenta una investigación para establecer principios de diseño que permitan la implementación de escenarios basados en la I4.0; esto debido a que, si bien actualmente es una prioridad para las empresas estar al día en tecnología, no existe una definición general aceptada por la comunidad industrial para la puesta en práctica de los conceptos de la I4.0. Los principios de diseño identificados se presentan a continuación:

- **Interoperabilidad:** Es la habilidad para conectar y habilitar una comunicación entre máquinas y personas, haciendo uso del Internet de las Cosas.
- **Virtualización:** Equivalente al Gemelo Digital. Se refiere a un vínculo entre los sistemas físicos instalados y modelos de la planta, permitiendo la virtualización desde su monitoreo y simulación.
- **Descentralización:** Característica del proceso asociada a la autonomía de entidades en una empresa; en este caso es la autonomía de las unidades de producción asociadas a la cadena de valor. Consiste en la capacidad de los sistemas físicos de tomar decisiones por sí mismos, siguiendo un modelo de comportamiento. Dependiendo del nivel de autonomía de la unidad en caso de un evento de falla o fallo, la unidad se reajusta a su nuevo estado emitiendo eventos al sistema de gestión (coordinador) para que este reconfigure el proceso.
- **Capacidad en Tiempo Real:** Recopilación de datos al instante, ya sea para almacenarlos o analizarlos y tomar decisiones de acuerdo a lo obtenido. La obtención del estado de la planta en tiempo real permite reaccionar ante fallos en el proceso.
- **Orientación al Servicio:** Definida como una forma de gestión en donde la empresa presta el servicio de producción y por ende las unidades, con sus habilidades y competencias, prestan un servicio asociado a una etapa en el proceso de fabricación. La planificación de la producción es asociar a cada etapa de la ruta de producto una unidad con la competencia requerida, usando criterios de optimización.
- **Modularidad:** Capacidad de adaptarse en un mercado cambiante, buscando industrias reconfigurables. Con sistemas modulares se hace fácil el ajuste en caso de fluctuaciones en las solicitudes del mercado, mediante adición, ampliación o sustitución de módulos individuales. Permite determinar unidades autónomas.

Esta nueva revolución industrial busca ir más allá de modelos computacionales y sistemas de SCADA aislados, la colaboración es la clave para optimizar los procesos

industriales; es partiendo de esa premisa que se adoptan los componentes de la I4.0, algunos de ellos se detallan a continuación (Hermann et al., 2015; Alarcón et al., 2018):

2.2.1 Sistemas Ciber-Físicos

Los Sistemas Ciber-Físicos (en adelante CPS, por sus siglas en inglés) son sistemas que integran componentes físicos con componentes computacionales, guardando relación con un proceso en curso. Estos sistemas están dedicados a realizar funciones específicas en tiempo real, siendo capaces de recibir y tratar información, monitorear y actuar sobre elementos físicos del proceso asociado ([Monostori et al., 2016](#)).

En Monostori et al. (2016) se hace referencia al modelo asociado a la madurez de un CPS (véase figura 2.2), donde en un primer nivel se generan las condiciones para la implementación y conexiones físicas, mientras que los niveles superiores representan la evolución en el procesamiento de la información y procesos de cooperación.

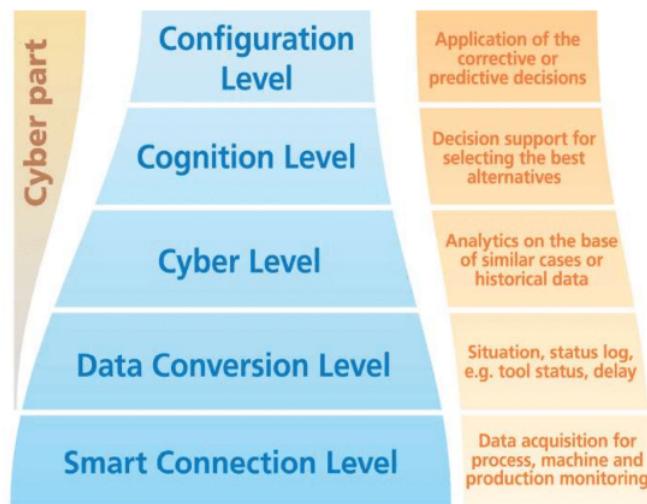


Figura 2.2: Modelo de madurez de un CPS (Monostori et al., 2016)

Los CPS hacen uso del Internet de las Cosas, red de sensores, almacenamiento de información, entre otras propiedades, para mantener una comunicación máquina-máquina y hombre-máquina eficiente, de manera que el proceso de producción se logre de forma eficiente.

2.2.2 Internet de las Cosas (IoT) e Internet Industrial de las Cosas (IIoT)

Son tecnologías emergentes, un conjunto de dispositivos interconectados que permiten la recopilación y acceso a datos compartidos, monitoreo y comunicación en tiempo real, con plataformas amigables para el usuario ([WEF, 2018](#)).

Al aplicar el concepto en el entorno industrial, se pueden obtener datos acerca del estado del proceso o el producto, dispositivos inteligentes y autónomos que optimizan el proceso de producción, lo que incluye la eficiencia en entrega del servicio, mayor productividad, reducción de costos y recopilación de datos de interés ([Boyes et al., 2018](#)).

La adopción del IIoT permite la aplicación de la tecnología a nivel de planta ([Thoben et al., 2017](#)), dando paso a lo que se denomina Smart Factory; siendo ésta una convergencia del proceso industrial de manufactura con tecnologías de información para mejorar y acelerar el proceso de producción ([Li et al., 2018](#)).

2.2.3 Analítica de Datos

Es una técnica que consiste en extraer datos de distintas fuentes y analizarlos para obtener información útil, necesaria para tomar mejores decisiones corporativas y plantear estrategias. El análisis de datos emplea grandes cantidades de información, descrita como Big Data, inmensos paquetes que requieren de software especial para su almacenamiento y tratamiento ([Rouse, 2012](#)).

2.2.4 Empresa Inteligente

En [Hermann et al. \(2015\)](#) se basan en los conceptos de CPS e IoT para definir la empresa inteligente o Smart Factory como una fábrica donde los CPS se comunican a través del IoT, colaborando con los demás componentes y operadores en la ejecución de las tareas.

2.3 Gemelo Digital

Previamente se describe que los CPS interactúan con un sistema virtual a través de redes de comunicación, en ese sentido cada módulo físico tendrá una representación digital de sí mismo, permitiendo la interconexión de procesos en un dispositivo que pueda monitorear y controlar la unidad física, el término es conocido como Gemelo Digital ([Schroeder et al., 2016](#)).

El Gemelo Digital ofrece la posibilidad de crear una planta virtual haciendo uso de modelos matemáticos, modelos de comportamiento, medición de parámetros en campo, historial de datos y análisis, para visualizar posibles acciones a tomar según el estado real del proceso; estas acciones son accesibles gracias al IoT, debido a que facilita de forma eficiente la conexión entre el comportamiento real y el Gemelo Digital ([Schroeder et al., 2016; Marr, 2019](#)).

La aplicación de la tecnología de gemelos digitales ayuda a comprender las operaciones de la planta, visualizar mejorías y detectar problemas físicos en fases tempranas, de esta manera es posible cumplir las expectativas cada vez mayores de los clientes ([Lietha, 2018](#)).

Para lograr la digitalización de una planta, es necesario en primera instancia conocer a fondo cómo opera y realizar la documentación necesaria, de manera que los detalles del proceso estén disponibles. Se deben implementar soluciones digitales a medida que se vayan recreando los modelos físicos en un ambiente virtual, mientras se hace revisión de las estrategias de control y producción, de modo que la colaboración entre virtualización y trabajadores resulte en mejoras de estrategias de gestión ([Mrosik, 2018](#)).

Entre los beneficios que esta tecnología ofrece, está la posibilidad de obtener un gemelo digital del producto, diseñar, planificar y optimizar, para luego generar simulaciones de la producción previas a la implementación física, de esta forma se pueden visualizar escenarios de riesgo sin necesidad de realizar inversiones en pruebas reales. Una vez que el sistema físico esté instalado, transmitirá datos al gemelo digital que actuará como monitor de desempeño, evaluando el proceso de producción y el producto resultante. Los datos obtenidos de planta deben ser analizados según el contexto para asegurar eficiencia en el sistema ([Mrosik, 2018](#)).

Si bien la implementación de un gemelo digital no es tarea sencilla, es una herramienta clave en la visión de la I4.0, permitiendo hacer gestión, coordinación, supervisión y seguimiento. En colaboración con los demás componentes da paso a industrias reconfigurables, aptas para generar respuestas eficientes de producción ya sea ante fluctuaciones en la demanda o ante situaciones adversas dentro del proceso mismo.

2.4 Modelo de Conocimiento

El conocimiento, desde una visión organizacional, es considerado como la información que posee valor para la misma organización, tal información es necesaria para alcanzar objetivos, generar acciones y satisfacer necesidades de mercado. Desde el punto de vista de procesos, el conocimiento es el resultado de la utilización de la información partiendo de un contexto, información generada a partir de datos ([Correa Uribe et al., 2009](#)).

Un modelo, por su parte, es una representación en un lenguaje entendible que expresa el comportamiento de un fenómeno. Así se convierten en abstracciones particulares en función del interés del modelador.

El modelo de procesos industriales está basado en el modelo del negocio y el modelo de producción ([Chacón et al., 2012](#)). La interacción (sinergia) entre ellos determina la integración en la empresa y constituye la base fundamental para obtener el gemelo digital. El modelo de negocio parte de establecer la cadena de valor de la empresa, sus áreas de apoyo (contabilidad, administración, compras, ventas, etc) y sus interacciones (véase figura [2.3](#)).

Cada eslabón de la cadena de valor es visto como una unidad de producción, la tipificación de cada una depende de la manera cómo evoluciona el recurso en ella, a saber: Continua, Lotes, Manufactura, Híbrida, etc. Además, cada unidad de producción realiza una acción específica, basada en un objetivo preestablecido.

El modelo de conocimiento abarca las caracterizaciones del proceso, el flujo de producto y los recursos necesarios para la transformación de tal producto ([Perez, 2015](#)):

- El modelo del proceso determina cómo llevarlo a cabo, incluyendo información

acerca de los parámetros necesarios para la elaboración de un producto o acción específica.

- El modelo del producto describe la calidad y cantidad del flujo de producto, estructuras de datos y métodos para acceder a la información recabada.
- El modelo de recursos por su parte, mantiene la información de los equipos usados por el proceso, estado de funcionamiento y disponibilidad, las condiciones y capacidad de la infraestructura y la calidad del material de la producción.

La elaboración de productos está sujeta a la receta, esto genera un modelo para la fabricación del producto y un modelo del producto. La receta especifica las diferentes etapas donde la materia prima/producto intermedio pasa a través de ellos y se convierte en un producto intermedio /terminado. Este modelo de producto es proyectado sobre el proceso físico del proceso de producción, el cual determina una configuración que permite seguir el producto de acuerdo a la receta.

Es posible, en algunos casos, que cuando el flujo de producto se coloca sobre el proceso físico, genere más de una configuración aceptable, y de éstas, se selecciona una de acuerdo a un criterio, estableciéndose como un patrón en la fabricación del producto.

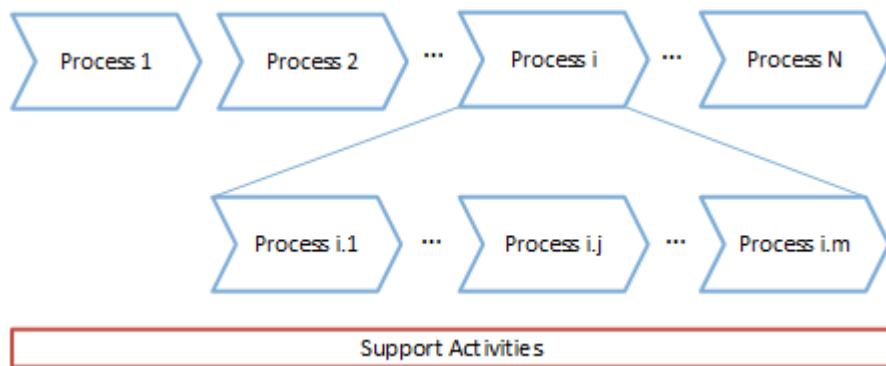


Figura 2.3: Cadena de Valor en producción. Basada en ([Chacón et al., 2012](#))

2.5 Modelo Híbrido

Un sistema híbrido consta de varios modos de operación de dinámicas continuas en el tiempo, y transiciones entre dichos modos, las cuales ocurren bajo ciertas condiciones. Tales condiciones son descritas mediante modelos de tipo discreto. Por tanto, los sistemas híbridos son una interacción de dinámicas continuas y discretas ([Mahla, 2004](#)).

Un modelo híbrido es la representación de las transiciones discretas y la evolución de las dinámicas continuas, afectadas por los eventos discretos. Al momento de modelar se debe cuidar tanto la precisión de los resultados como la simplicidad del modelo, incorporando correctamente las entradas, demás componentes del proceso y la interrelación entre ellos ([Cruz Jimenez and Lara Caballero, 2007](#)).

Un autómata híbrido H está definido como una colección $H = (Q, X, U, \Gamma, Y, f, h_e, h_i, y_e, g, Init, Dom, E, G, R)$ donde:

$Q \in Z^k, \{q_i\}, i = 1, \dots, k$ es el conjunto de *estados discretos*,

$X \in \Re^n, \{x_i\}, i = 1, \dots, n$ es el conjunto de *variables de estado continuo*,

$U \in \Re^{m+l}, \{u_{c_i}\}, i = 1, \dots, m$ es el conjunto de *entradas de control*,

$\{u_{f_i}\}, i = 1, \dots, l$ es el conjunto de *entradas físicas*,

$\Gamma \in \Re^p, \{\Gamma\}, i = 1, \dots, p$ es el conjunto de *parametros*,

$Y \in \Re^{s+r}, \{y_{in_i}\}, i = 1, \dots, s$ es el conjunto de *salidas de proceso*,

$\{y_{e_i}\}, i = 1, \dots, r$ es el conjunto de *salidas de gestión*,

$f(\cdot, \cdot) : Q \times X \times U \mapsto \Re^n$ es el *campo vectorial*,

$g(\cdot) : \Re^s \mapsto \Re^m$ es la *función del control*,

$y_{e-1} \in \Re^l$ son las *entradas físicas*,

$h_e(\cdot) : X \mapsto \Re^r$ son las *salidas del proceso*,

$h_{in}(\cdot) : X \mapsto \Re^s$ es la *función de salida para la gestión*,

$Init \subseteq Q \times X$ es el conjunto de *estados iniciales*,

$Dom(\cdot) : Q \mapsto 2^X$ es el *dominio*,

$E \subseteq Q \times Q$ es el conjunto de *aristas*,

$G(\cdot) : E \mapsto 2^X$ son las *condiciones de guarda*,

$R(\cdot, \cdot) : E \times X \mapsto 2^X$ es el *mapa de reinicio*.

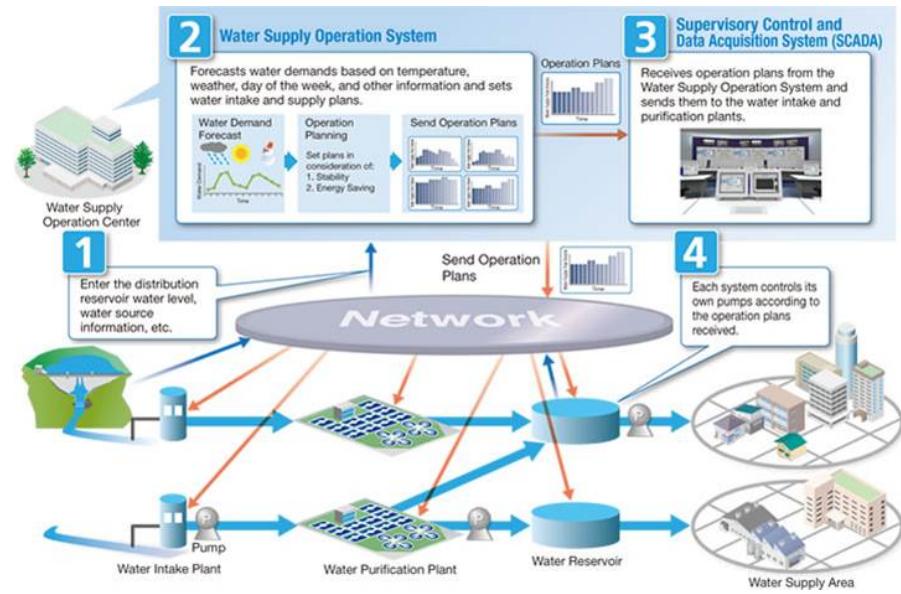


Figura 2.4: Estructura física de las hidrológicas ([Hitachi](#)).

2.6 Hidrológicas

Las hidrológicas son una empresa de servicio cuya misión es proporcionar agua potable a una población, utilizando para ello las fuentes que proporciona la naturaleza, procesando el agua y devolviéndola al ambiente (véase figura 2.4). Todas estas actividades las debe realizar de manera que sea una empresa autosostenible, manteniendo el costo del servicio dentro de márgenes accesibles para el público.

2.6.1 Áreas de Negocio

Los principales procesos que definen las áreas de negocio básicas en una hidrológica (véase figura 2.5) están dados por:

- Estudio de las fuentes para una determinada población.
- La potabilización del agua, el tratamiento y retorno de aguas servidas al ambiente.
- La comercialización del producto.

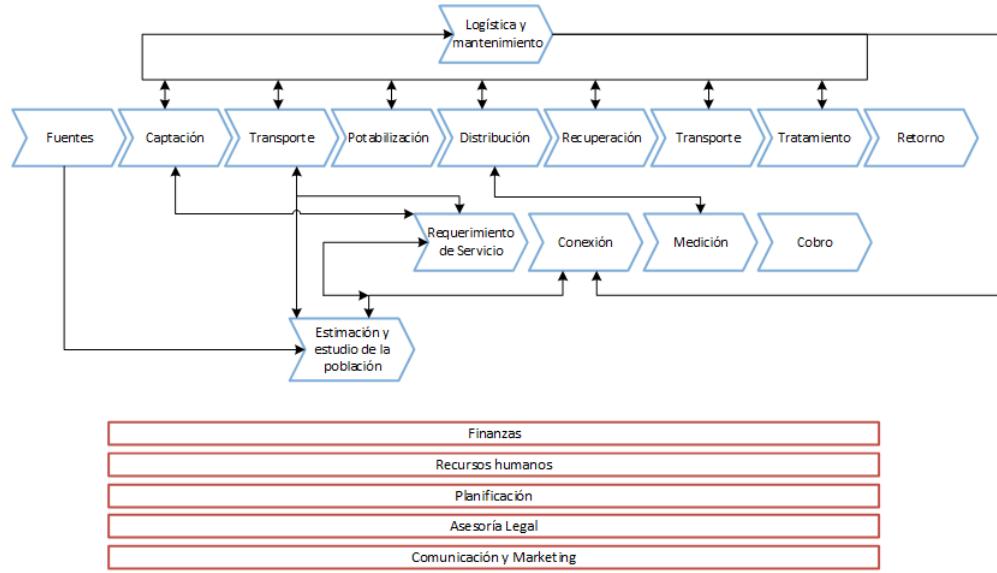


Figura 2.5: Cadena de Valor de áreas de negocio en Hidrológicas.

2.6.1.1 Estudio de fuentes y caracterización de la demanda

En esta área se contemplan los planes de desarrollo para satisfacer las demandas de agua en una población y su posterior tratamiento para devolverlas al ambiente, incluye:

- Estudio y caracterización de la demanda de agua para el consumo.
- Determinación de las posibles fuentes para satisfacción del consumo.
- Elaboración de planes de desarrollo para satisfacer las necesidades de la población.
- Planificación de los sistemas de acarreo del agua desde las fuentes a los centros poblados, potabilización del agua, almacenamiento y distribución del agua potable, tratamiento de las aguas servidas.
- Estimación de los costos de desarrollo y operación de los sistemas.

2.6.1.2 Operación

El área de operaciones contempla el proceso de convertir el agua cruda en agua potable y el proceso de tratar el agua servida y retornarla al ambiente.

El proceso de obtención de agua potable a partir de agua cruda consiste en una serie de pasos que permiten eliminar la turbiedad y suciedad del agua cruda y transformarla en agua apta para el consumo humano. Este proceso capta, potabiliza y almacena agua hasta llevarla a las tuberías matrices de cada área de distribución. Está incluido el retorno de aguas servidas debido a que la conservación del ambiente es un factor importante para una empresa responsable del manejo del recurso hídrico y de su impacto en el ambiente. Los resultados de este proceso de operaciones están referidos al cumplimiento de las necesidades de agua potable para una población cualquiera.

Así, teniendo:

- La caracterización de las unidades correspondientes a operación, modelo de conocimiento.
- El plan de mantenimiento de las unidades operativas con el fin de asegurar su funcionamiento óptimo.
- Los procedimientos para el manejo de los recursos para la potabilización y almacenamiento del agua y el tratamiento de agua servida.

Se determina:

- Las condiciones operacionales de las diferentes unidades para asegurar el servicio de una manera eficiente y económica.
- El seguimiento del comportamiento de las mismas.
- Indicadores de rendimiento, gestión, etc.

2.6.1.3 Comercialización

Las actividades asociadas a la comercialización tienen que ver con el transporte del agua potable desde las redes de distribución hasta los usuarios finales, la conexión de usuarios a la red, la recuperación de las aguas servidas desde los usuarios hasta el alcantarillado de cada localidad en los sitios donde esté disponible este servicio. Para ello se requiere de:

- Manejo del catastro poblacional.
- Manejo de nuevos clientes, conexión a la red.
- Manejo de clientes, prestación del servicio, desconexión, reconexión.
- Facturación y cobranza.

2.6.1.4 Áreas de Soporte

Las áreas de soporte son las responsables del apoyo a las actividades medulares de la hidrológica. Dentro de las funciones podemos mencionar:

- Manejo de los recursos financieros de la empresa.
- Gestión del Recurso Humano.
- Mantenimiento de la imagen de la empresa.
- Soporte legal.
- Protección del recurso humano, ambiente, equipos, etc. (Protección Integral)

Adicionalmente, es necesario realizar la coordinación y manejo de todos los procesos involucrados en las diferentes Áreas de Negocio mediante un conjunto de funciones de gestión de la empresa. Estas funciones son:

- Planificación.
- Evaluación y control de la gestión.
- Mejoramiento continuo de los procesos.
- Manejo de la información y generación de indicadores de la gestión.
- Preparación del presupuesto anual.
- Presentación de nuevos proyectos.
- Control del presupuesto.

2.6.2 Cadena de Valor de cada Área de Negocio

2.6.2.1 Fuentes y Estudio de la Demanda

Se expande en cuatro eslabones (véase figura 2.6), con el fin de obtener la red que debe soportar el consumo de una población dada, considerando las fuentes y su calidad. Estos cuatro procesos son:

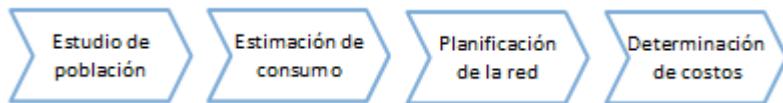


Figura 2.6: Cadena de Valor Área fuente y estudio de la demanda.

- **Estudio de la Población:** Para esto, se deben conocer los estudios de crecimiento poblacional para cada región.
- **Estimación del Consumo:** Con el estudio poblacional y caracterizando los hábitos de consumo se determinar el volumen de agua necesario para cada región.
- **Planificación de la Red:** Este proceso necesita de la estimación de consumo, evaluación de las fuentes hídricas para determinar las zonas de captación de agua junto con los recursos necesarios para realizar esta labor, el dimensionamiento, diseño, establecimiento de planes de construcción para el transporte del agua desde las zonas de captación hasta los centros de potabilización y el costo esperado para la construcción de la infraestructura, su mantenimiento y operación hasta los centros poblados.
- **Determinación de Costos:** se determina cual es el costo final del agua, como este será trasladado a los usuarios.

2.6.2.2 Operaciones

El área de operaciones se expande en nueve eslabones, cinco para el agua potable (Fuente, Captación, Transporte, Potabilización, Distribución) y cuatro para las aguas servidas (Recuperación, Transporte, Tratamiento, Retorno). (véase figura 2.7)

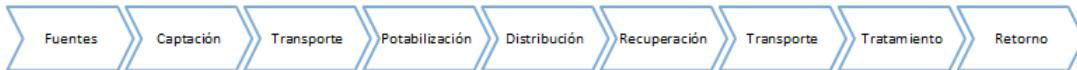


Figura 2.7: Cadena de Valor Área de operaciones.

Asociada a esta cadena debe existir un sistema de logística que asegure los recursos necesarios para mantener la operación.

2.6.2.3 Comercial

En esta área se establecen los requerimientos de servicio que implican un análisis de los nuevos clientes y de la capacidad de distribución en el sitio, así como las estrategias de prestación de servicio de conexión, con el fin de generar la orden de conexión, luego se procede a la conexión física del usuario a la red, incluyendo un mecanismo de medición (fiable) y estableciendo los mecanismos de cobranza por el servicio. Así, el área de comercial se expande en cuatro eslabones: Requerimiento de Servicio, Conexión, Medición, Cobro. (véase figura 2.8)



Figura 2.8: Cadena de Valor Área de comercialización.

2.6.2.4 Soporte

El área de soporte está conformada por: Finanzas, Contabilidad, Recursos Humanos, Relaciones Industriales, Protección Integral, Relaciones con otros organismos públicos y privados en general (véase figura 2.9). Estas sub-áreas soportan todas las actividades de las otras áreas facilitándoles recursos humanos, financieros y apoyando la gestión de las mismas.

2.6.3 Esquema de Interacciones para las Hidrológicas

El diagrama de la figura 2.10 muestra tres ejes de interacción entre la toma de decisiones (planificación), procesos (producción y negocio) y sistemas de apoyo.

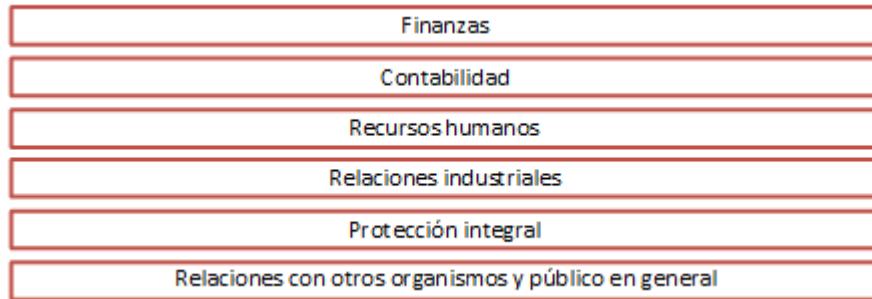


Figura 2.9: Área de soporte.

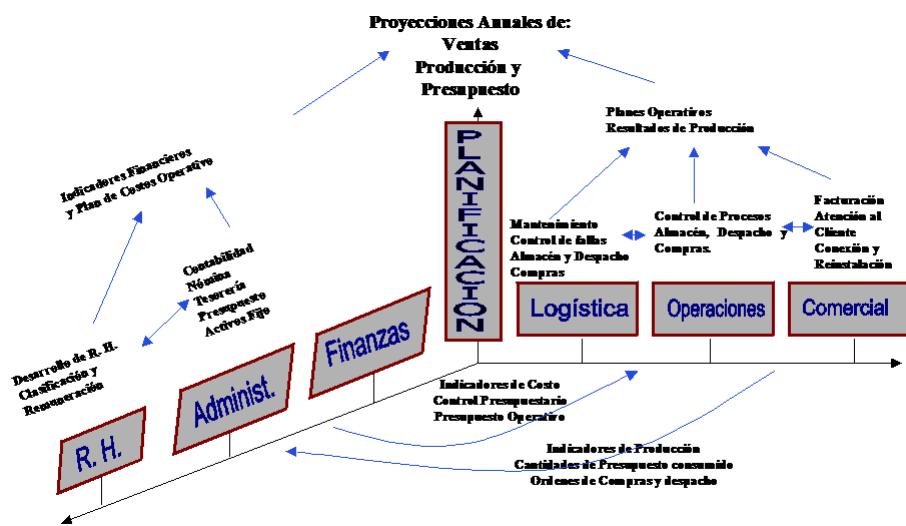


Figura 2.10: Esquema de Interacciones.

2.6.4 Modelo APS en Hidrológicas

El modelo APS (Advanced Planning & Scheduling), define la interrelación entre proveedores y clientes con una empresa a través de sus tres principales actividades: desarrollo de productos, planificación y programación de la producción y el proceso de producción, ver figura 2.11.



Figura 2.11: Modelo APS.

Un APS asigna recursos y capacidad de producción de forma óptima para equilibrar la demanda y la capacidad de la planta. La figura 2.12 es una extensión en 3D del modelo APS para hidrológicas. Contiene los procesos estratégicos (planificación, investigación y desarrollo), los procesos medulares (producción) y los procesos de apoyo (administrativos) basados en el eje de toma de decisiones respecto al manejo de los proveedores y clientes.

2.7 Proceso de Potabilización

El proceso de potabilización comprende el conjunto de recursos y actividades necesarias para administrar y operar los sistemas de agua, sumado al mantenimiento de las instalaciones y equipos utilizados; incluye las unidades fundamentales del proceso de producción: captación, potabilización, almacenamiento y distribución. En la figura 2.13 se presentan las unidades correspondientes a Potabilización.

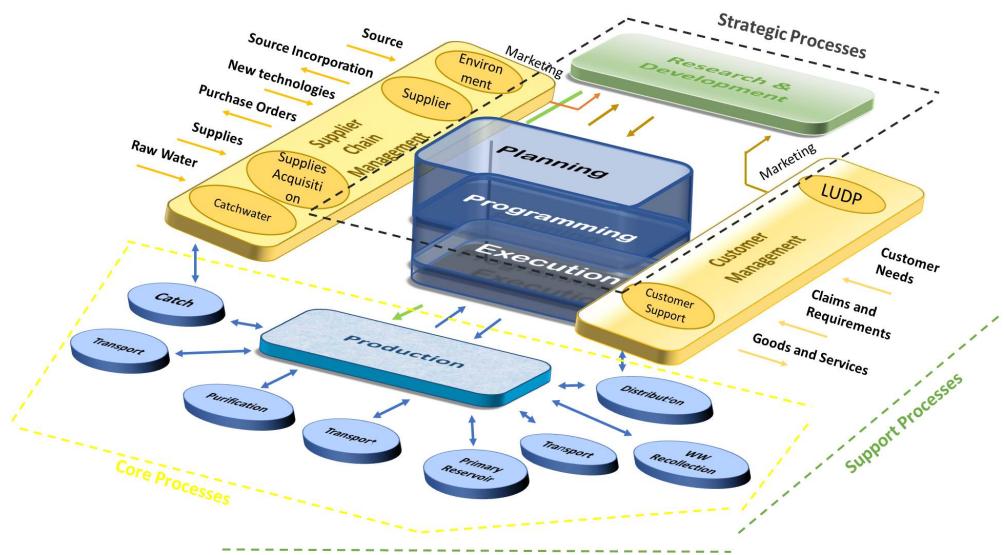


Figura 2.12: Modelo APS 3D.

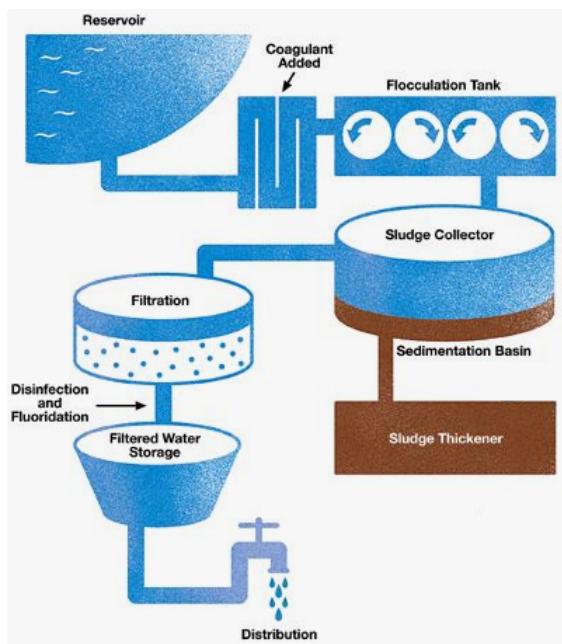


Figura 2.13: Unidad de Potabilización.

2.7.1 Captación del agua

La captación de agua cruda, en el caso de las plantas del Estado Mérida, se realiza mediante una estructura construida adyacente al cauce de la fuente (véase figura 2.14), de forma que el flujo se desvíe e ingrese al sistema mediante la rejilla de captación; el flujo es trasladado hacia un desripiador, donde se evacúa el material sólido de tamaño considerable que ha ingresado, y posteriormente hacia el desarenador, encargado de separar el agua cruda de la arena y partículas en suspensión de tamaño superior a 0,2 mm; luego el flujo ingresa a la planta de potabilización, cuyas unidades funcionales corresponden a: Coagulación - Floculación - Sedimentación - Filtración - Desinfección ([Pinos Guillén, 2016](#)).

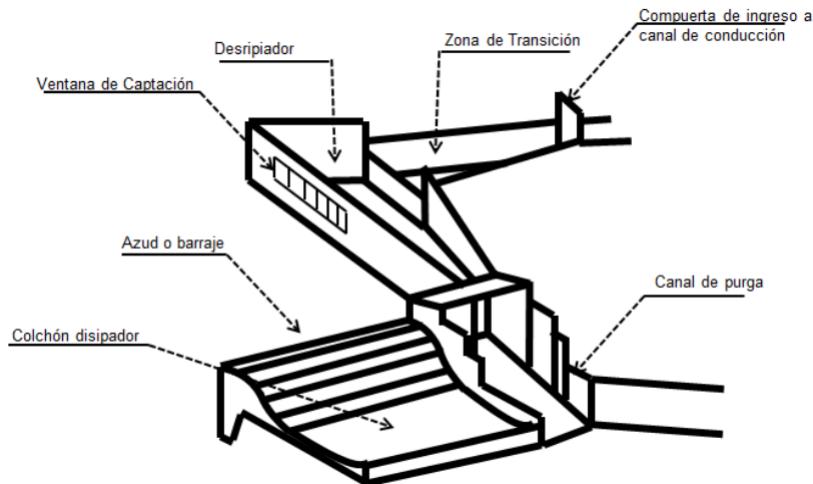


Figura 2.14: Proceso de captación del agua cruda ([Cabello et al., 2016](#))

Las acciones operativas sobre el caudal dependen de la capacidad máxima de la planta, en caso de ser superado este nivel máximo o por el contrario, no contar con una fuente óptima, el agua como producto final no será adecuada para el consumo humano, por ello es necesario el conocimiento y regulación del flujo mediante operación de compuertas para cumplir con los requerimientos de la planta, tomando en cuenta el plan de consumo, calidad de la fuente y periodo climático de la localidad ([Jaramillo, 2014](#)).

Algunos de los parámetros a medir en la fuente de captación, que afectan la calidad

del flujo de entrada a la planta, son los sustratos y los cationes, tabla 2.1 y tabla 2.2 respectivamente.

Sustrato	Dimensión
Arena	0,1 – 1mm
Grava	0,1 – 5cm
Guijarros	5 – 25cm
Piedras	25 – 100cm
Rocas	> 100cm

Tabla 2.1: Granulometría de Sustratos.

Catión	Valor referencial (mg/L)
Calcio (Ca)	< 15
Magnesio (Mg)	1 – 100
Sodio (Na)	< 50
Potasio (K)	< 10
Hierro (Fe)	< 4
Manganoso (Mn)	< 0,6

Tabla 2.2: Cationes en agua potable.

2.7.2 Determinación de las características del agua

Para establecer la secuencia operacional de la unidad de potabilización se consideran dos condiciones principales, la calidad del flujo de entrada, que comprende la turbiedad, el caudal, el color, la temperatura, oxígeno disuelto y el pH de la fuente proveniente de la unidad de captación, incluyendo valores de caudal, y la capacidad máxima de la planta de potabilización (en L/s o m³/s), en condiciones reales de funcionamiento.

Las características del flujo se obtienen por medición, previo a realizar el traslado a la planta de potabilización; esta acción evita el ingreso de agua de mala calidad y ayuda a establecer el modo de operación del sistema. Si la captación es por gravedad o

mecanizada, con estructura física fija, el flujo de entrada es constante, según la calidad del agua. La estacionalidad define el caudal de extracción y la calidad, siempre se debe respetar el caudal ecológico, en cualquier caso.

Las condiciones principales del flujo de salida de la unidad de potabilización, de igual forma, son calidad (pH, turbiedad, color y cloro residual) y cantidad (caudal). La calidad del agua al finalizar el proceso de potabilización, debe cumplir con las características físico químicas descritas en la tabla 2.3. La descripción de los instrumentos de medición se encuentra en el Anexo B.

Características físicas	Expresadas como	Valor aceptable	Instrumento de Medición
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de Turbiedad (NTU)	Hasta 2 NTU	Turbidímetro
pH	-	6,5 - 9,0	pHmetro
Cloro residual	mg/L	Hasta 2 mg/L	Medidor de cloro amperométrico
Color aparente	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	Hasta 15 UPC	Espectrofotómetro
Olor y sabor	Aceptable o No Aceptable	Aceptable	-

Tabla 2.3: Características físicas del agua potable ([Jaramillo, 2014](#)).

2.7.2.1 Turbidez

Es una medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión. Cuantos más sólidos en suspensión haya en el agua, más sucia parecerá ésta y más alta será la turbidez. En potabilización del agua y tratamiento de aguas residuales, la turbidez es considerada como un buen parámetro para determinar la calidad del agua, a mayor turbidez menor calidad.

La turbidez se mide en Unidades Nefelométricas de turbidez, o Nephelometric Turbidity Unit (NTU). Se utiliza para su medición un Nefelómetro o Turbidímetro, que mide la intensidad de la luz dispersada a 90 grados cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua.

Las condiciones de turbidez en agua cruda dependen de condiciones climáticas y contaminantes que afecten a la fuente, registrándose valores entre 0 y 1000 NTU, sin embargo el valor máximo adecuado para la entrada a la planta de potabilización es de 100 NTU.

Para disminuir la turbidez del agua se utiliza un coagulante que, en condiciones y dosis adecuadas, modifica el comportamiento de las partículas presentes en el agua, haciendo que se aglomeren y desciendan, de esta manera las unidades de NTU disminuyen.

2.7.2.2 pH

Coeficiente que indica el grado de acidez o basicidad de una solución acuosa. En general, un agua con un pH menor que 7 se considera ácido y con un pH mayor que 7 se considera básica o alcalina. La alcalinidad es una medida de la capacidad del agua para resistir un cambio de pH que tendería a hacerla más ácida. El rango normal de pH en agua superficial es de 6,5 a 9 y para las aguas subterráneas 6 a 8.5. La medición de pH se realiza con un pHmetro.

2.7.2.3 Cloro Residual

Es aquella porción de cloro que queda en el agua después de un período de contacto, que reacciona química y biológicamente como ácido hipocloroso e hipoclorito; siendo entonces el remanente de cloro en el agua después de que parte del añadido reaccione en el proceso de desinfección. El límite máximo permitido para el agua potable es de 2 mg/L.

2.7.2.4 Color Aparente

El color del agua dependerá tanto de las sustancias que se encuentren disueltas, como de las partículas que se encuentren en suspensión. Se clasifica como *color verdadero* al que depende solamente el agua y sustancias disueltas, mientras el *aparente* es el que incluye las partículas en suspensión (que a su vez generan turbidez). El color aparente es entonces el de la muestra tal como se obtiene en el sistema a estudiar.

La medición de color se realiza por medio de un espectrofotómetro por medio del color Platino-Cobalto (Pt-Co) que es el color que se encuentra en aguas y aguas residuales. Varía de un aspecto amarillo claro hasta marrón, con un rango de 0-500 en Unidades de Platino - Cobalto (UPC).

2.7.2.5 Temperatura

Es un parametro utilizado para determinar el oxígeno disuelto en el agua, a mayor temperatura menor concentración de oxígeno disuelto; la disminución de oxígeno disuelto genera trastornos en el ambiente acuático. La temperatura aceptable para el consumo humano es de 15°C.

2.7.2.6 Determinación de Dosis de Coagulante: Prueba de Jarras

En la industria hidrológica es la Prueba de Jarras la que proporciona los rangos óptimos de la dosis de coagulante según el pH de agua a tratar, para llevar a cabo la coagulación; este ensayo de laboratorio simula las condiciones en que se realiza el proceso de coagulación, floculación y sedimentación en la planta, partiendo de varias muestras de agua cruda tomada de la fuente, con características de calidad conocidas, y añadiendo en cada muestra los productos químicos variando tipo y dosis. El tiempo de retención de las unidades del proceso también es determinado mediante la Prueba de Jarras, tiempo necesario para la mezcla rápida e inicio de formación del flóculo (grumo formado por adhesión de sólidos en suspensión). Las condiciones operacionales para las etapas que comprende el proceso de potabilización, se determinan con esta prueba.

La metodología para realizar la prueba de Jarras consiste primero en tener conocimiento de turbidez, pH y color del agua cruda que está ingresando a la planta. Se toman entre 4 y 6 muestras de agua de igual cantidad en vasos de precipitado, y se les suministra distintas dosis de coagulante a cada muestra, según conocimiento previo. Cada muestra es sometida a una mezcla mecánica que emula el comportamiento de la planta real. La determinación óptima de coagulante resulta de aquella muestra en que se formen y desciendan mayor cantidad de sólidos aglomerados, disminuyendo así la turbidez presente en el agua. (véase figura 2.15)

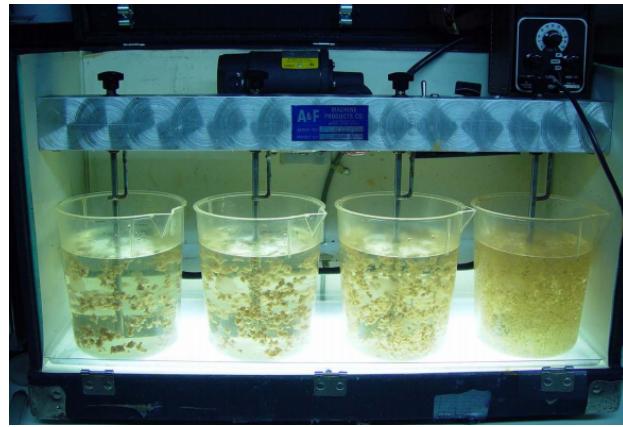


Figura 2.15: Prueba de Jarras ([Perez and Urrea](#)).

2.7.3 Unidad de Potabilización

La Unidad de Potabilización es la encargada de tomar el agua cruda con características particulares y convertirla en agua potable, tal como se muestra en el diagrama de la figura 2.13. Partiendo del modelo de negocio de la unidad de Operaciones, se desglosan las unidades funcionales de la Potabilización (véase figura 2.16): Coagulación, floculación, sedimentación, filtración, desinfección.

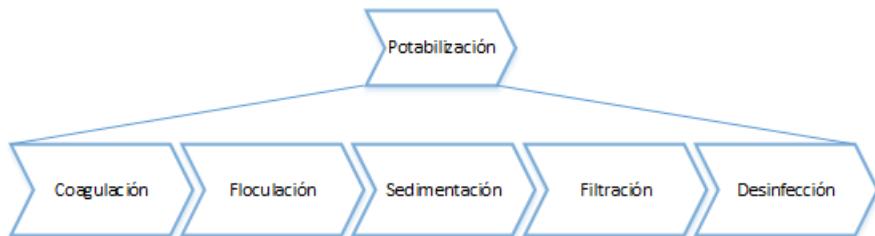


Figura 2.16: Cadena de valor de la Unidad de Potabilización.

La unidad de potabilización debe cuidar que el proceso, el flujo de producto y los recursos estén coordinados. El modelo del proceso comprende la información y buen funcionamiento de cada eslabón de la potabilización, incluyendo los modelos de mantenimiento en las unidades y de consumo de la población. Respecto al flujo de producto se debe cuidar que la calidad y cantidad de agua en la entrada y salida del proceso sean las adecuadas. El modelo de recursos por su parte, permite distribuir los químicos utilizados, como el sulfato de aluminio y el cloro, en las unidades que lo

requieran.

La unidad debe llevar un registro de rendimiento y fallas, de manera que se puedan tomar decisiones en pro de mejorías en la producción mientras se mantiene la continuidad del proceso.

En la figura 2.17 se presenta el diagrama P&ID del proceso de potabilización generalizado, donde cada tanque representa una unidad del proceso, con los sensores que determinan la calidad del agua en la entrada y salida de cada una de ellas. En la práctica, la configuración y número de unidades varía segun el tamaño de la planta; de igual forma, puede que se omitan sensores del proceso, dependiendo de los datos que el personal requiera transmitir. La adición de los sensores se debe a que, si bien es un proceso continuo, al aplicar la visión holónica cada unidad debería poder comunicar el estado en el que se encuentra.

La descripción de las unidades funcionales del proceso se presenta a continuación:

2.7.3.1 Coagulación

Entrada

Agua cruda aceptada, proveniente de la captación. La aceptación del agua cruda depende de los valores obtenidos en las pruebas sobre la calidad del agua cruda: turbidez, color aparente, Ph, temperatura, así se recibe agua con caudal y calidad. La prueba de jarra indica las condiciones operacionales para el tipo de coagulante, cantidad y tiempo de residencia (en condiciones normales del flujo de agua este valor es fijo).

Proceso

El proceso de coagulación consiste en quitar la turbidez del agua cruda proveniente de la fuente, producida por partículas de muy bajo diámetro y baja sedimentación, llamadas partículas coloidales. Los coloides son mezclas intermedias entre las soluciones y las suspensiones, que según la afinidad al medio dispersante, se clasifican en:

- **Liofóbicos o liófobos:** Si las partículas dispersas tienen poca afinidad al medio dispersante. Algunos ejemplos son el aceite suspendido en el agua, óxidos metálicos, sulfuros.

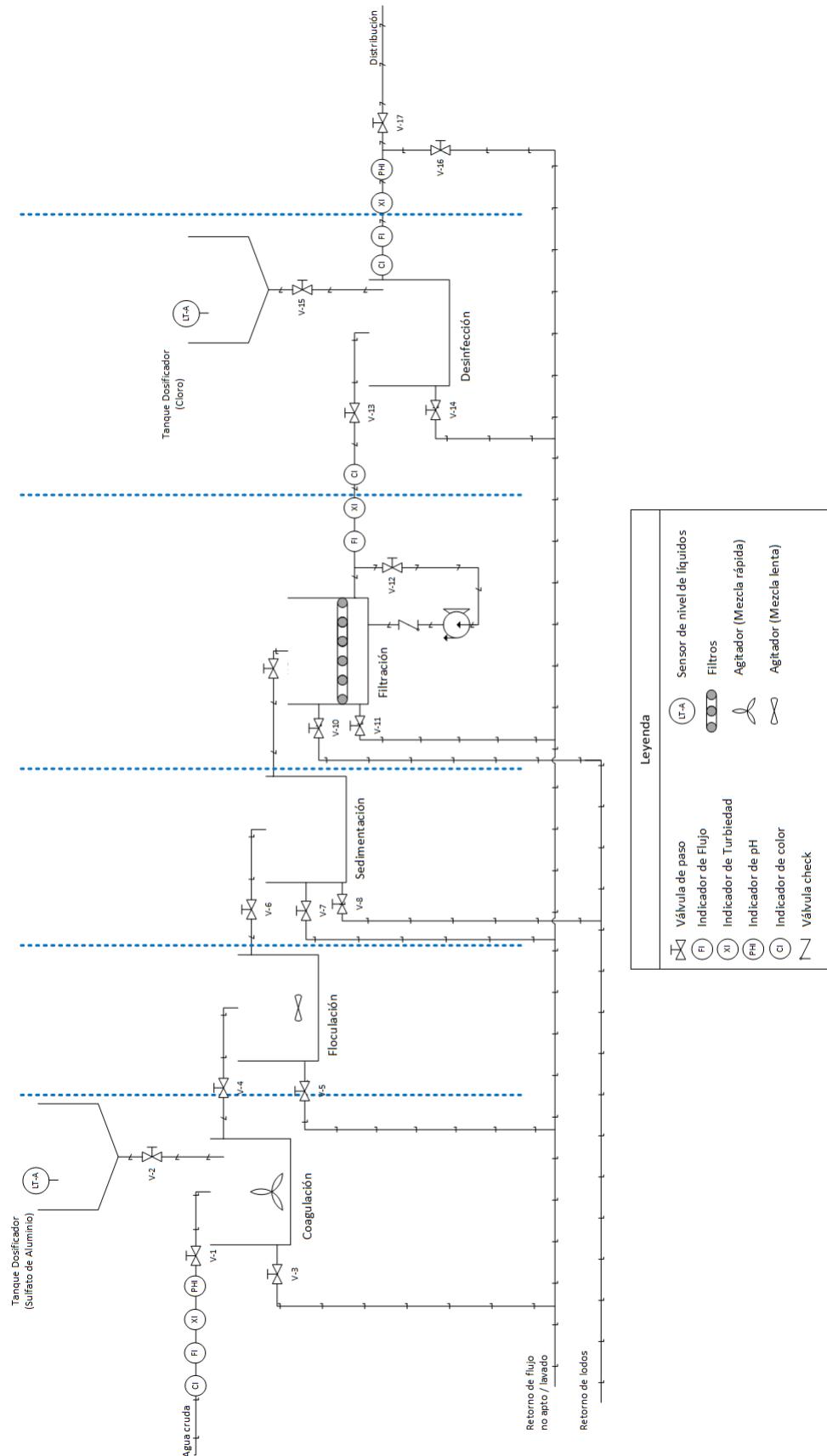


Figura 2.17: Diagrama P&ID del proceso de Potabilización.

- **Liofílicos:** Si las partículas tienen fuerte afinidad al medio de suspensión. Por ejemplo el jabón disperso en agua, gelatina en agua, proteínas, virus.

Para remover la turbidez se realiza un procedimiento de desestabilización química sobre el agua turbia, neutralizando las fuerzas que mantienen separadas las partículas coloidales mediante adición de coagulantes químicos, estos comúnmente son: Sulfato de aluminio, Sulfato Férrico o Polímeros catiónicos. En la figura 2.18 se presenta la formación de flóculos al añadir el coagulante.

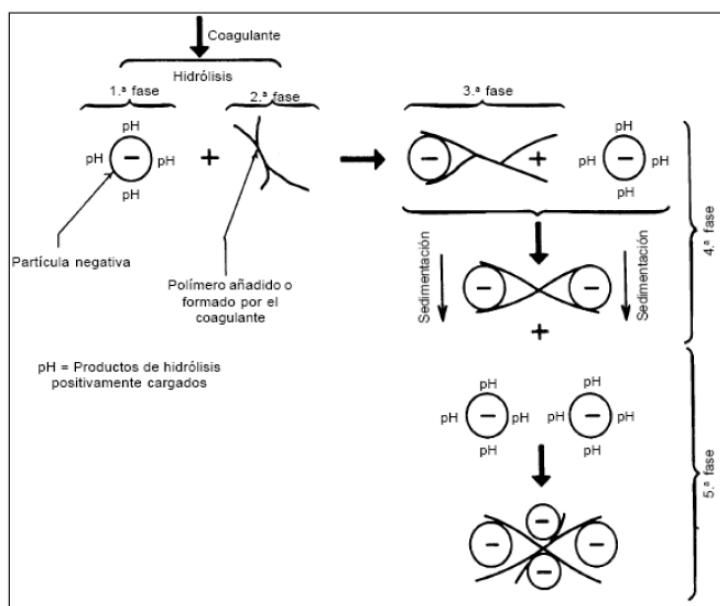


Figura 2.18: Formación de coloides.

Para que la desestabilización se realice de forma adecuada es necesaria la aplicación de energía por mezclado rápido (hidráulico o mecánico), que hace que el material en suspensión cargado eléctricamente al entrar en contacto con los elementos químicos (dispersados de forma rápida y homogénea), permitan la aglomeración de las partículas en suspensión, formando partículas de mayor tamaño llamadas flóculos. Los tiempos de retención varían entre 0,3 y 5 minutos dependiendo del coagulante y el mecanismo de la mezcla, por ejemplo, los polímeros se distribuyen más lentamente que los iones metálicos debido a su mayor molécula, por lo tanto, requerirán mayor tiempo de residencia en la unidad que los coagulantes metálicos hidrolizantes. Esta

desestabilización química que genera cargas iónicas permite eliminar el 95% de las bacterias presentes en el agua cruda en los flóculos y el 90% de las arcillas, partículas gramnegativas que quedan neutralizadas al añadir el químico.

Para realizar el proceso de coagulación hay dos estructuras principales, la estructura mecánica consiste en un tanque con un agitador a motor, y la estructura hidráulica que trata de un canal de ingreso con desnivel, tal desnivel genera un resalto hidráulico óptimo para realizar la mezcla requerida con el coagulante.

En ambos casos de manera general debe controlarse:

- Entrada del flujo a la unidad de coagulación, ya que se realiza una mezcla con el coagulante.
- Fijar la cantidad adecuada de coagulante en los dosificadores y cuidar que se añada uniformemente en la zona de mayor agitación.

Para el agitador mecánico:

- El nivel de agua en el tanque de coagulación, manteniéndose en el rango de operación del equipo.
- El funcionamiento del agitador para la mezcla rápida, con la velocidad óptima determinada en la prueba de jarras mediante el gradiente medio de velocidad: $\bar{G} = \sqrt{\frac{P}{V\alpha}}$, donde, P es la potencia total disipada; V es la unidad de volumen en una estructura hidráulica y α es la viscosidad absoluta del agua.
- Fijar el tiempo de retención necesario para que los químicos entren en contacto con toda la masa de agua.
- Monitorear la salida del flujo una vez cumplido el tiempo adecuado de coagulación.

Para el agitador hidráulico:

- Controlar flujo de agua para un óptimo resalto hidráulico para la mezcla según especificaciones de coagulante.

El gradiente de velocidad hace referencia a las colisiones de partículas debido al movimiento del agua, inducido por una energía exterior. Cuanto mayor es el gradiente de velocidad, más rápida es la velocidad de aglomeración de las partículas. Sin embargo, con un gradiente elevado es posible que flóculos ya formados se dividan en partículas menores. Es necesario realizar la prueba de jarras y mantener un equilibrio en la unidad en cuanto a tiempos de retención y gradientes.

Se debe cuidar también la dosis de coagulante aplicada, si se suministra menos que la cantidad requerida, las cargas no se neutralizan, por lo que la formación de flóculos será escasa y la turbidez se mantendrá elevada; si por el contrario, se añade en exceso el coagulante, las cargas de las partículas se invierten y se forman cantidades altas de microflóculos con velocidad de sedimentación muy baja, manteniendo igualmente elevada la turbidez del flujo. Al añadir cantidades adecuadas de coagulante, se evita también el aumento del costo del proceso para la empresa, ya que es la unidad que más pérdidas puede generar debido a los recursos químicos que intervienen.

Salida

Flujo de agua con añadidura de químicos coagulantes, características de calidad y cantidad de agua.

El mantenimiento de la unidad se asocia al control de válvulas o compuertas (entrada, salida, drenaje), y a los equipos electromecánicos, si aplica.

En la figura 2.19 se presenta un canal Parshall, utilizado para generar la mezcla rápida en la unidad de coagulación, mediante el resalto hidráulico.

2.7.3.2 Floculación

Entrada

Agua cruda con coagulantes añadidos en la unidad anterior; valores de calidad y cantidad de flujo.

Proceso

El objetivo principal de la floculación es reunir las partículas desestabilizadas en el proceso de coagulación, para formar aglomeraciones de mayor peso y tamaño que

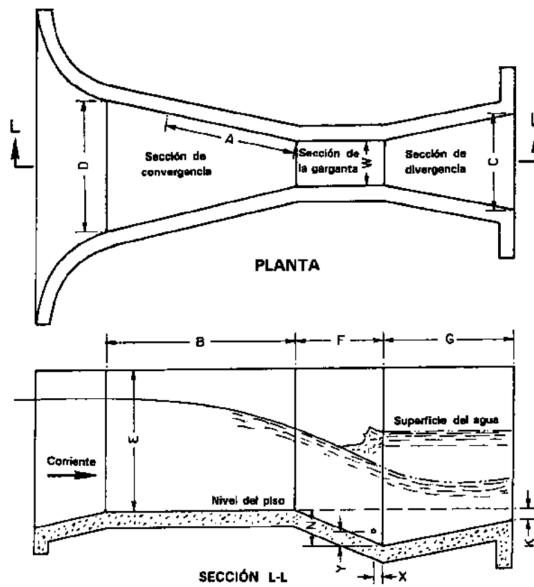


Figura 2.19: Canal Parshall, unidad de coagulación ([Hudson, 1997](#)).

sedimenten con mayor eficiencia. La masa de agua es sometida a una mezcla lenta que permite la aglomeración de las partículas coloidales para disminuir la turbiedad existente.

La unidad se compone de tanques de floculación con agitadores mecánicos o hidráulicos, de flujo vertical, horizontal, alabama o helicoidales. Con gradientes de velocidad decrecientes para garantizar el crecimiento progresivo de los flóculos. El tiempo de mezcla y el gradiente de la velocidad se obtienen mediante la prueba de Jarras detallada previamente, generalmente el gradiente (G) suele ubicarse entre $20s^{-1}$ y $70s^{-1}$, y el tiempo de retención (T) entre 20 y 30 minutos. La agitación muy lenta o muy rápida del fluido, puede producir sedimentación o rompimiento de flóculos en la unidad, respectivamente.

Los parámetros operacionales y procesos de control de la unidad de floculación son:

- Verificar que el caudal de entrada corresponda con el rango de operación de la unidad.
- En caso tal de que el floculador utilizado sea tipo mecánico, se debe cuidar el buen funcionamiento de las aspas.

- Verificar el cumplimiento del gradiente de velocidad (G) y el tiempo de retención (T); parámetros que optimizan el proceso de floculación.
- Controlar el flujo de salida y realizar las mediciones necesarias de caudal, pH y turbiedad.

Salida

Flujo de agua con flóculos listos para la sedimentación.

Para operación y mantenimiento de la unidad funcional, cada floculador debe contar con drenaje protegido que descarga en una línea común; el sistema también debe incluir una válvula de compuerta ([Pinos Guillén, 2016](#)).

En la figura 2.20, (a) y (b), se presentan los floculadores mecánicos e hidráulicos respectivamente.

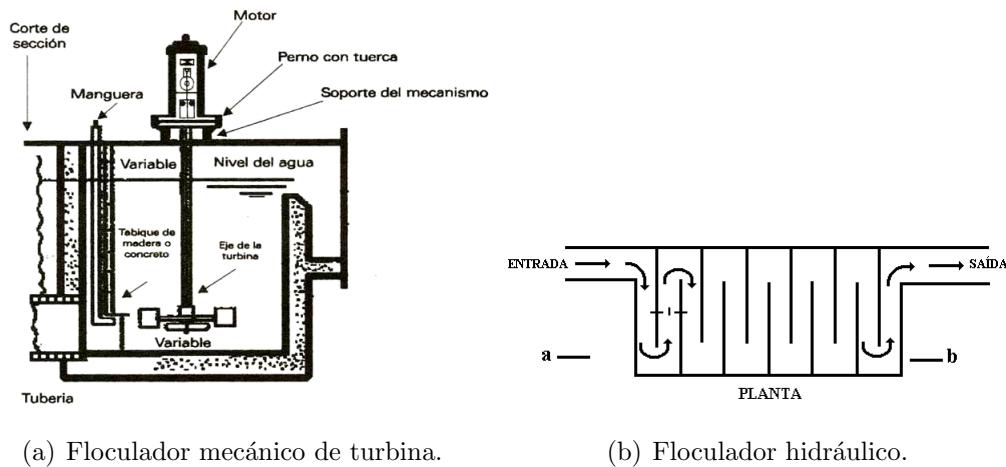


Figura 2.20: Floculadores ([SENA, 1999](#)).

2.7.3.3 Sedimentación

Entrada

Aqua tratada con coagulante y flóculos formados en suspensión.

Proceso

En la unidad de sedimentación se depositan los flóculos que se encuentran en suspensión; la velocidad de caída dependerá de la concentración de las partículas,

gradiente de velocidad del sistema y distribución de tamaños. El efecto de las variables que intervienen en el proceso se determina mediante la prueba de Jarras.

La masa de agua debe permanecer entre 2 y 4 horas en decantación, donde las partículas caerán al fondo de la unidad de modo que la zona clarificada del flujo pase a la siguiente unidad del proceso. En la parte superior del tanque de sedimentación se disponen de canales recolectores a lo largo del tanque, unidos por filas de ductos perforados que recolectan el agua de la zona clarificada. En la parte inferior del tanque de sedimentación existe inclinación a un punto de drenaje, que permita la fácil remoción de los flóculos por apertura de una compuerta o válvula.

El diseño estructural de los sedimentadores puede ser de flujo vertical, horizontal, laminar, dependiendo de la cantidad y calidad del agua a tratar.

Los procesos que deben ser controlados en la unidad de sedimentación son:

- Caudal de entrada a la unidad conocido y controlado. La calidad de agua debe ser conocida.
- Nivel del agua según la capacidad del tanque.
- Tiempo de retención según los estudios previos, basados en la calidad del agua.
- Salida de agua clarificada, caudal y calidad de agua como parámetros conocidos.
- Verificación semanal de crecimiento de algas.
- Medición del nivel de lodos depositados, evitando que supere la zona de lodos según el diseño de la planta. Por lo general esta medición es indirecta asociada al nivel de agua en el tanque.
- Remoción de lodos, incluye el manejo de las válvulas de descarga y los tiempos de acción. Se realiza por gravedad o con bombas de lodos hacia el drenaje de la planta.

Salida

Agua clarificada; calidad y cantidad de flujo.

El mantenimiento de la unidad gira en torno a la calidad del agua; de recibir agua con baja turbidez, usualmente en periodos sin lluvia, el manto de lodos puede vaciarse cada 3 o 4 días, de lo contrario debe realizarse a diario. El flujo de salida hacia los filtros se verá interrumpido sin afectar la distribución hacia la comunidad. Con periodos de tiempo más distanciados, cercano a dos meses, debe realizarse una limpieza profunda de la unidad, con vaciado total para el lavado, con el fin de evitar la formación de algas y organismos que afecten la calidad del agua.

En la figura 2.21 se muestra un sedimentador tipo laminar, uno de los más comunes en el campo de potabilización.

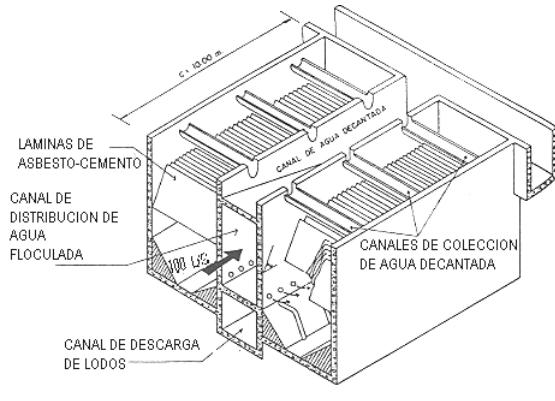


Figura 2.21: Sedimentador laminar ([Gonzalez, 2016](#)).

2.7.3.4 Filtración

Entrada

Aqua clarificada.

Proceso

Filtración se denomina al proceso de separación de partículas suspendidas en un líquido al hacerlo pasar por un material poroso, capaz de retener partículas hasta de 20 micras; en el caso de la potabilización aquellas partículas que quedaron de la etapa de sedimentación. El proceso se puede realizar por filtración rápida o filtración lenta, según la calidad del agua a tratar.

La filtración rápida es utilizada como pulimento final en la cadena de potabilización,

previo a la desinfección; por su parte, la filtración lenta se lleva a cabo cuando no hay una cadena de potabilización, sino un proceso de prefiltrado, como tratamiento único o como pretratamiento a algún proceso que lo amerite. Las velocidades de filtración son 120-360 m³/m²/día para filtros rápidos y 7-14 m³/m²/día en filtros lentos.

El diseño de filtros consta de un falso fondo, compuesto por lechos que pueden variar en composición (arena, grava, antracita, o mezcla de varios componentes), elección ligada a la calidad de agua a tratar. Debido a este fondo se hace difícil la medición de caudal en la salida de cada filtro, pudiendo utilizarse sensores en la tubería de recolección o realizar el cálculo aproximado mediante aforo. En la figura 2.22 se tiene el detalle de los componentes del filtro, el agua proveniente de la unidad de sedimentación ingresa por la parte superior, el agua es recolectada por la parte inferior, bajo el lecho filtrante. Se tienen válvulas de retro lavado (el agua se impulsa de abajo hacia arriba) para el mantenimiento de la unidad, y canales superiores que dirigen el agua de lavado hacia el drenaje.

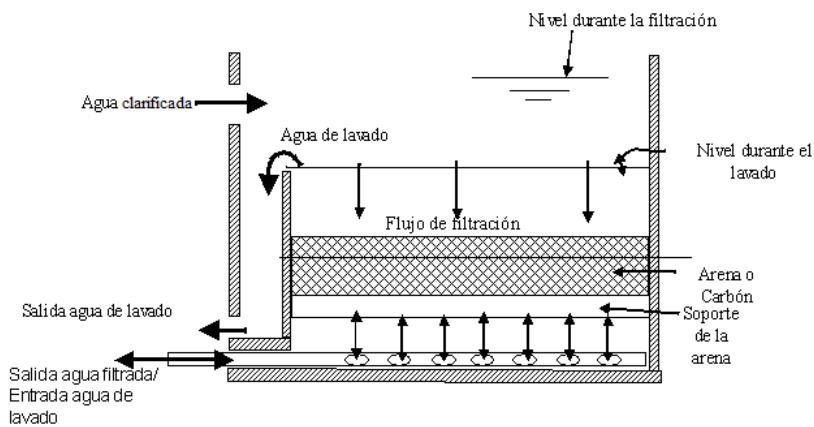


Figura 2.22: Filtro rápido (SENA, 1999).

En esta unidad se debe ejecutar un protocolo para limpieza de filtros una vez esté colmatado. El lavado debe realizarse con agua potable, la mínima cantidad posible, alrededor de 3% mensual de consumo de agua tratada como máximo. La frecuencia de limpieza depende de la calidad de agua a tratar, esta puede variar desde 2 días hasta dos meses según sea el caso.

La condición operacional sobre la colmatación de los filtros, es dada por el flujo

de salida del filtro, si el flujo de salida es menor a la velocidad de filtración (rango asociado a la estructura del filtro, calidad del agua, etc.), considerando también el caudal de entrada, se debe proceder al lavado, sin embargo esta medición puede ser difícil de obtener dependiendo del diseño de la unidad, es por ello que se puede utilizar una medición indirecta de la colmatación de los filtros asociadas a la turbulencia y/o nivel en el tanque de filtración. Una unidad con poca turbulencia, o con nivel máximo de agua, debe pasar a retro lavado.

Los procesos que deben mantenerse controlados en la unidad de filtración son:

- Entrada a la unidad, control de caudal y conocimiento de color y turbiedad.
- Nivel del tanque de filtrado, debe estar en el rango de operación determinado por el diseño de la planta.
- Operación de lavado del filtro, frecuencia y modalidad, dependiendo de la calidad del agua determinada en la prueba de jarras.
- Tiempos para limpieza y acondicionamiento.
- Salida de la unidad de filtración, conocimiento de caudal, color, turbiedad y pH.
- Determinación de la eficiencia de la unidad, empleando la siguiente expresión:
$$\text{Eficiencia}(\%) = \frac{\text{Turbiedad}(afluente) - \text{Turbiedad}(efluente)}{\text{Turbiedad}(afluente)} 100$$

Salida

Agua sin sedimentos.

Cuando un filtro sale de producción, los demás tienen la capacidad para recibir el caudal desviado de éste, lo que resalta la robustez del proceso y la redundancia estructural, de modo que no se pierda la continuidad en la producción.

2.7.3.5 Desinfección

Entrada

Agua filtrada.

Proceso

Desinfectar el agua significa eliminar de ella los microorganismos existentes capaces de producir enfermedades. En la desinfección se usa un agente físico o químico para destruir los microorganismos patógenos, que pueden transmitir enfermedades utilizando el agua como vehículo pasivo. La dosis de desinfectante (mg/l) se determina en el laboratorio.

Procesos que deben ser controlados en la unidad de desinfección:

- Entrada al tanque de desinfección, control de caudal y conocimiento de pH, color y turbiedad (< 1 NTU).
- Nivel del tanque dentro del rango de operación.
- Dosificación de desinfectantes, según la cantidad determinada en estudios previos en el laboratorio.
- El pH del agua debe ser menor a 7,5.
- Mantener medición del cloro residual.
- Salida de agua potable hacia la unidad de almacenamiento.

Salida

Agua potabilizada. Calidad y cantidad de flujo a distribuir.

Según los diseños observados en las plantas de tratamiento, se deduce que su estructura general consta de demultiplexores y multiplexores (figura 2.23), es decir, la entrada es dividida al finalizar el paso por las unidades para generar varias líneas de producción compuestas por coagulación - floculación - sedimentación, disminuyendo la velocidad del flujo circulante. El efluente de cada sedimentador se recolecta en un canal único, la velocidad y caudal aumentan para dirigir la masa de agua hacia la unidad de filtración, donde se divide nuevamente y por última vez, ya que el canal de recolección de agua filtrada dirige el flujo hacia desinfección, sin ninguna desviación. Los instrumentos mínimos para obtener un gemelo digital adecuado de la planta se ubican en el diagrama adjunto, consta de herramientas de medición de caudal, pH, turbidez, color para las características del flujo, y de nivel de agua en los tanques.

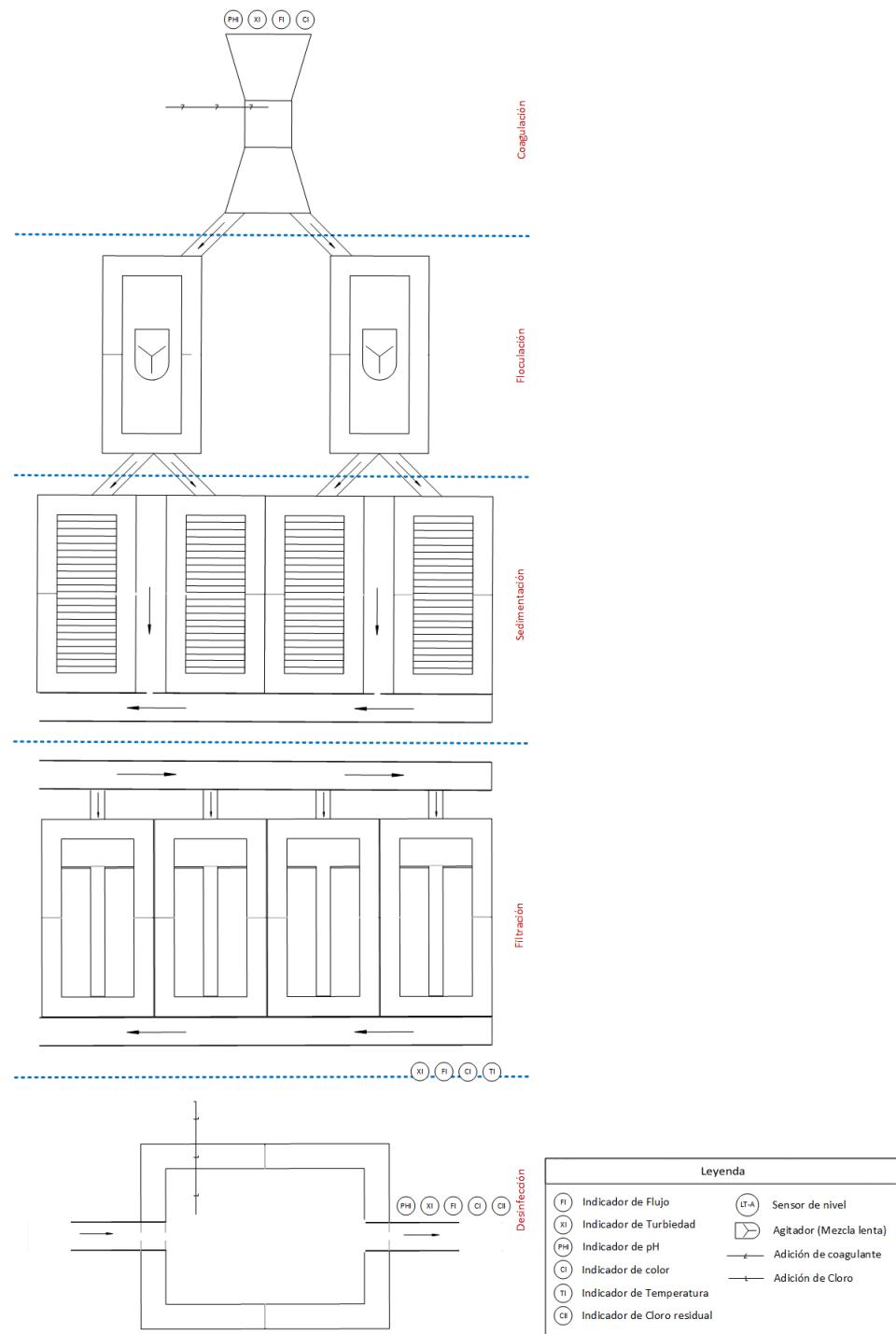


Figura 2.23: Planta de tratamiento plano superior.

2.8 Sistemas Holónicos de Producción

2.8.1 Descripción del conocimiento de la UHP

Según lo descrito en [Chacón et al. \(2019\)](#), cada Unidad de Producción (UP) tiene su propio comportamiento, y el comportamiento global proviene de la composición de los comportamientos locales. Para construir un enfoque integrado de automatización es necesario contar con modelos que cubran ([Pérez et al., 2015](#)):

- Modelos de Producción, que consta de modelos de producto y modelos de proceso para cada etapa del modelo de producto.
- Modelos Topológicos, que es la disposición de la planta que describe el equipo, su jerarquía y las interconexiones entre las PU.
- Modelo de Intercambio de Información, representa el flujo de datos desde el piso de la planta a las capas de decisión.
- Modelo de Información de la Planta (PIM).

La arquitectura de las UHP cubre los aspectos descritos, y sus componentes, dados en la figura [2.24](#), tienen el conocimiento necesario para la toma de decisiones.

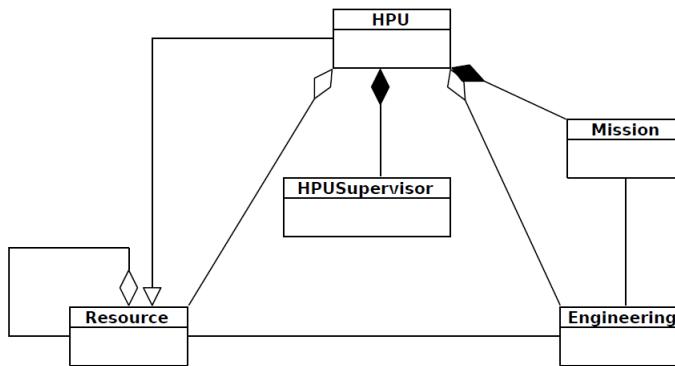


Figura 2.24: Diagrama de clases de los componentes de una UHP ([Chacón et al., 2019](#)).

La producción basada en el conocimiento se agrupa en dos elementos:

- El modelo de producto que describe el conjunto de servicios que proporcionan los recursos inteligentes para obtener un producto y su orden de ejecución, incluida la fórmula.
- El modelo del proceso, que es el procedimiento utilizado por una HPU para proporcionar un servicio.

Los recursos pueden ser internos de la UHP o pueden ser de otra UHP.

El Holón de Ingeniería (EH, por sus siglas en inglés) gestiona el conocimiento asociado a la producción.

El Holón Misión (MH, por sus siglas en inglés), tiene el objetivo de ser alcanzado por una UP durante un período, también tiene la información sobre el estado, cumplimiento de la misión y las metas.

El Holón de Recursos (RH) es el elemento central de la arquitectura utilizada. RH gestiona sus recursos internos y ejecuta los procesos físicos necesarios para alcanzar el objetivo de producción. RH negocia con otras misiones, establece compromisos de producción y calcula el supervisor que se utilizará para monitorear y controlar la misión. Una UHP puede ser un recurso para otra UHP más genérica.

Para gestionar los procesos internos, la UHP está dividida en varias capas de recursos, como se muestra en la figura 2.25. Las capas superiores de recursos realizan la negociación con otras UHP. Evalúa las posibilidades de lograr su parte de la meta global y envía un comportamiento esperado para evaluar todo el comportamiento. Si la composición del sistema se considera viable, se llega a un acuerdo.

El Holón Supervisor (SH) realiza actividades de gestión de recursos. Las actividades de planificación y programación comienzan con la recepción de un objetivo de producción de la capa empresarial. Se construye un árbol de accesibilidad componiendo una abstracción del comportamiento de los procesos físicos, y se genera el camino deseado para cada recurso y un supervisor "distribuido" para los recursos "distribuidos", como se muestra (Chacón et al. 2012). Los supervisores locales determinan los reguladores de acuerdo al estado del proceso físico y la trayectoria deseada cuando suceden los eventos; esto se comunica a un regulador de acuerdo al estado del proceso de producción.

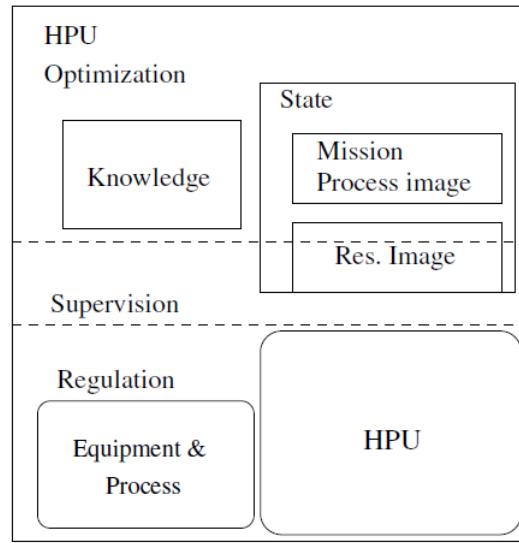


Figura 2.25: Capas de recursos en la UHP ([Chacón et al., 2019](#)).

Para conseguir la autonomía, cada UP debe disponer de modelos que almacenen el conocimiento de la planta (comportamiento, interconexiones y controladores) que interactúan entre sí para conseguir el control global de la unidad.

2.8.2 Dinámica del proceso físico y su supervisión

Los procesos físicos que ocurren dentro de una unidad pueden ser continuos, discontinuos o discretos. La capacidad de construir modelos que describan su comportamiento permite tener mecanismos de control que garanticen los objetivos establecidos para una unidad. El comportamiento del proceso depende de las capacidades y la condición del equipo, la materia prima, la energía, etc. Se espera que los procesos continuos sean "estacionarios", pero tienen varios modos de operación que resultan de cambios en las entradas o salidas, o cambios en la condición del equipo. Los sistemas híbridos son técnicas formales que permiten describir el comportamiento de ese tipo de procesos ([Antsaklis et al., 1998](#); [Antsaklis and Koutsoukos, 2003](#); [Branicky et al., 1998](#); [Lemmon et al., 1999](#); [Van Der Schaft and Schumacher, 2000](#)). Del mismo modo, un proceso por lotes se caracteriza por secuencias de modos de operación que permiten realizar una tarea de producción ([Lennartson et al., 1994](#); [Méndez et al., 2006](#); [Tittus and Lennartson, 1999](#)).

Entonces, un sistema de producción tiene dos tipos de dinámica: *dinámica continua* que describe las reglas mecánicas, químicas o biológicas y un conjunto de reglas lógicas; *dinámica discreta*, que commuta la dinámica continua y se activa por eventos. La dinámica continua está representada por un conjunto de ecuaciones diferenciales y las discretas por sistemas a eventos discretos ([Cassandras and Lafortune, 2009](#)).

Un sistema dinámico híbrido (HDS) se define de varias maneras: como un sistema de transición de fase ([Manna and Pnueli, 1993](#)), como un autómata híbrido ([Lygeros et al., 2012](#)), por medio de redes Petri. [Lygeros et al. \(2012\)](#) da una descripción de conceptos como *Trayectoria híbrida, ejecución, estado alcanzable, componibilidad* que permite la construcción de mecanismos de control y supervisión para el HDS a partir de un automata en conjunción con la dinámica continua.

Los mecanismos de toma de decisiones de la UHP son los controladores, el supervisor, y el programador, su síntesis está sujeta de manera clásica a los modelos de procesos físicos y tangencialmente al escrutinio de los equipos dado por mantenimiento. Desde la visión de I4.0, la unidad de producción debe ser cognitiva, para ello se requiere del modelo de conocimiento y del modelo de gestión de la unidad. El modelo de conocimiento (modelo físico) es derivado de los modelos de comportamiento de los elementos que conforman la unidad, a saber, los recursos, el proceso físico, su infraestructura y su equipamiento. El modelo físico proporciona el estado interno de la unidad, y está descrito desde la óptica de sistemas dinámicos. El modelo de gestión contiene la capacidad, habilidades/competencias, estado de la unidad, y tiene la propiedad de dialogar con otras unidades o con un coordinador para negociar su producción, mostrar la evolución de la producción y su condición para la programación. El modelo de gestión de la unidad suple información al coordinador (supervisor sintetizado del modelo de gestión de rutas del producto) para garantizar objetivos de producción, esto es, la planificación determina la ruta de producción por medio del modelo de gestión de cada unidad, la programación determina el supervisor con el fin de seguir, evaluar y reconfigurar, de ser necesario y si es posible lo establecido según la planificación acordada. Compatibilizar el modelo de gestión y el modelo físico en el gemelo digital conlleva a establecer un modelo de Sistemas a Eventos Discretos que proporciona una imagen del comportamiento físico de la unidad que no es más que la

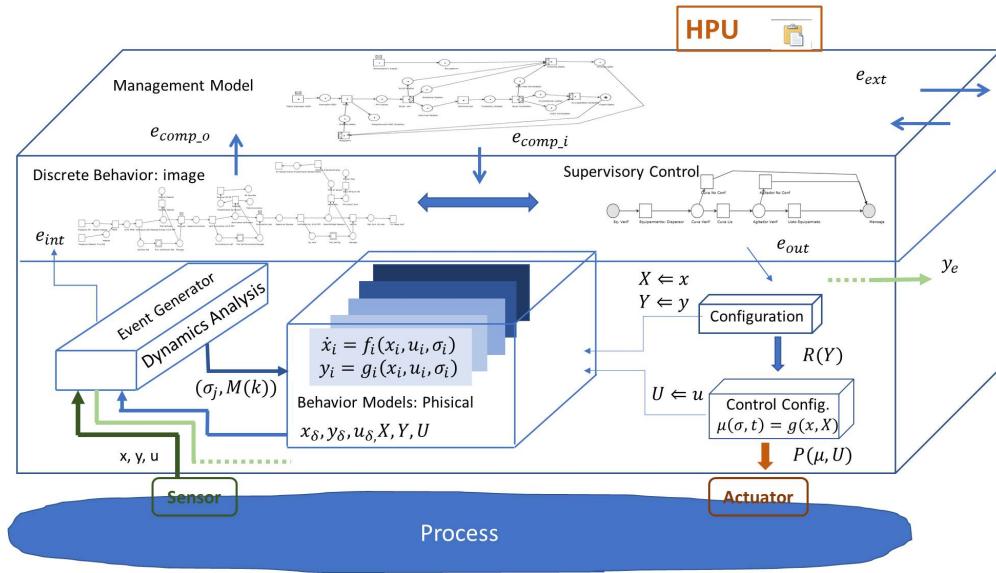


Figura 2.26: Arquitectura de modelo para gemelo digital de HPU, comportamiento físico.

imagen de los componentes de la unidad. El modelo cognitivo descrito corresponde a una dinámica híbrida.

En la Figura 2.26 se muestra la arquitectura de modelos requeridos para conformar el gemelo digital de una UHP, solo considerando el proceso físico.

En el caso estudiado, la sincronización (cooperación entre unidades) procede físicamente por los flujos de salida que son entradas a otras unidades, por lo que se realiza una extensión de la dinámica híbrida definida por Lygeros.

La definición dada en Lygeros et al. (2012) para un sistema dinámico híbrido general controlado, se presenta como un autómata híbrido H que es un conjunto $H = (Q, X, f, Init, Dom, E, G, R)$, donde:

$Q = \{q_1, q_2, q_3, \dots\}$ es el conjunto de *estados discretos*,

$X = \mathbb{R}^n$ es el conjunto de *variables continuas*,

$f(\cdot, \cdot) : Q \times X \mapsto \mathbb{R}^n$ es el *campo vectorial*,

$Init \subseteq Q \times X$ es el conjunto de *estados iniciales*,

$Dom(\cdot) : Q \mapsto 2^X$ es el *dominio*,

$E \subseteq Q \times Q$ es un conjunto de *aristas*,

$G(\cdot) : E \mapsto 2^X$ son las *condiciones de guarda*,

$R(\cdot, \cdot) : E \times X \mapsto 2^X$ es un *mapa de reinicio*.

Para el desarrollo de los modelos híbridos se utilizan ecuaciones con dinámicas continuas que describan partes del proceso y en el caso de estudio se utilizan redes de Petri para los eventos discretos.

Las redes de Petri son una herramienta matemática que permite la representación gráfica de un modelo, facilitando el análisis y modificaciones del mismo. Están representadas por un diagrama compuesto de cuatro bloques: Lugares, transiciones, arcos y marcas o tokens; los lugares simbolizan los posibles estados del sistema, las transiciones representan los eventos que causan cambios en los estados, permitiendo la relación entre dos lugares, los arcos son la unión entre lugares y/o transiciones, armando la red e indicando el sentido del flujo y las marcas, que se ubican en los lugares, representan unidades de materia prima, productos en proceso o productos terminados. (véase figura 2.27)

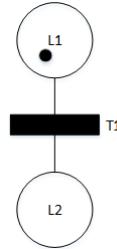


Figura 2.27: Ejemplo: componentes de una red de Petri.

Formalmente las redes de Petri se denotan mediante una quíntupla ([Indriago, 2008](#)):

$$RdP = (P, T, D^+, D^-, \mu_0) \quad (2.1)$$

donde,

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n, \}$ es un conjunto finito de lugares,

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_m, \}$ es un conjunto finito de transiciones,

$D^+ \in Z^{n \times m}$ es la matriz de los lugares de salida,

$D^- \in Z^{n \times m}$ es la matriz de los lugares de entrada,

$D = D^+ - D^-$ es la matriz de incidencia,

$\mu_0 : P \rightarrow \{\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n\}$ es el vector marcación inicial con dimensión $n \times 1$, donde μ_i es la marcación inicial de cada lugar p_i , $P \cap T = \emptyset$ y $P \cup T \neq \emptyset$.

Cada elemento de la matriz D^+ , es el peso del arco del lugar de salida i desde la transición j , y cada elemento de la matriz D^- , es el peso del arco desde el lugar de entrada i hacia la transición j .

2.8.3 Unidades Holónicas en Hidrológicas

Desde la visión propuesta de un enfoque holónico asociado a los sistemas ciberfísicos, la descripción del modelo de conocimiento de las unidades holónicas de producción (UHP) pasa por una caracterización del equipamiento de la unidad, descripción de las competencias-habilidades, modelos y modos de operación, información que constituye el modelo de conocimiento. Una visión que asocia la cadena de valor con unidades de producción para el área de operaciones es mostrado en la figura 2.28.

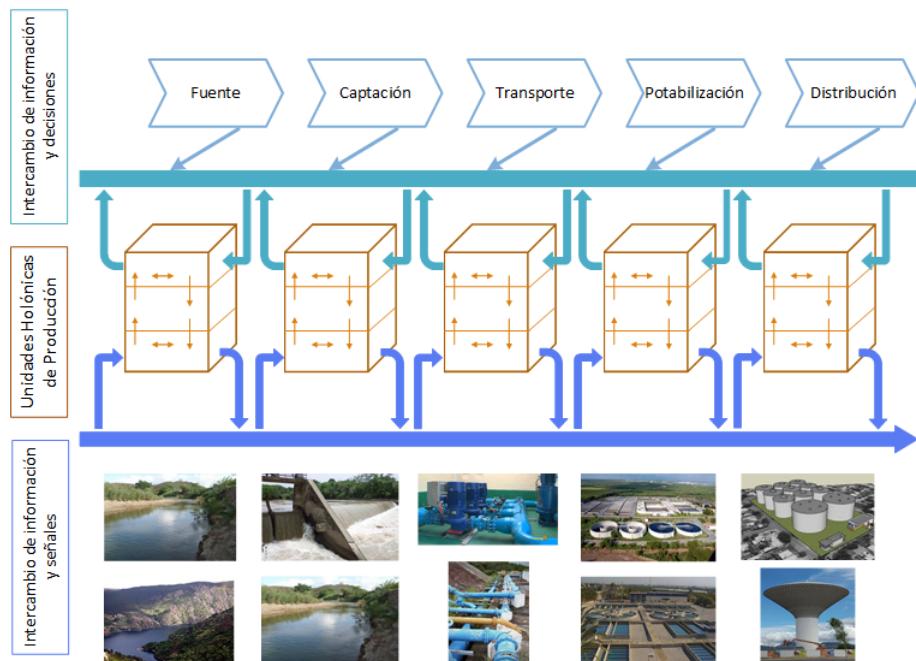


Figura 2.28: Unidades Holónicas de Producción para Hidrológicas.

De la cadena de unidades en las hidrológicas, se tomará para el estudio el proceso de Potabilización del Área de Operaciones, con el fin de generar los modelos de conocimiento e integrarlos desde una visión de sistemas híbridos.

Debido a la variedad posible en la configuración del proceso de potabilización, se toma como referencia la Planta de Potabilización "Dr. Eduardo Jáuregui", ubicada en el Estado Mérida. La referencia no hace exclusiva la visión del proyecto, sino que sirve de base para el desarrollo de los modelos de comportamiento.

2.9 Epanet

Es un programa orientado al análisis de los procesos de distribución de agua y el seguimiento de calidad, donde se conjugan algoritmos de cálculos e interfaz gráfica que permiten plasmar los componentes de una red hidráulica (tuberías, tanques, bombas, válvulas, reservorios), descritos en la tabla 2.4 y las condiciones de los mismos, para generar simulaciones en periodos prolongados.

Representación	Elemento
•	Nodos
■	Embalses
■ T	Tanques
• — •	Tuberías
• — ■ — •	Válvulas

Tabla 2.4: Principales componentes de Epanet.

Epanet realiza un seguimiento de la evolución de caudales en tuberías, presión en los nodos, nivel en tanques, estado de bombas y válvulas, a lo largo del periodo de simulación, realizando un equilibrio hidráulico mediante cálculos iterativos. Los algoritmos de cálculo se encuentran en el manual del programa, apéndice D. ([Rossman](#),

[2001](#)). El cálculo principal que efectúa Epanet es el de pérdidas de carga, usando como base la ecuación [2.2](#).

$$h_L = Aq^B \quad (2.2)$$

Donde,

h_L pérdida de carga en unidades de longitud,

q caudal,

A coeficiente de resistencia,

B exponente del caudal.

Según Darcy-Weisbach, los valores de A y B se determinan como:

$$\begin{aligned} A &= 0,0826f(\epsilon, d, q)d^{-5}L \\ B &= 2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Donde,

ϵ es coeficiente de rugosidad de Darcy-Weisbach (m),

f factor de fricción (que depende de ϵ , d y q),

d diámetro de tubería (m),

L longitud de la tubería (m),

q caudal (m^3/s).

Dentro de las opciones que ofrece Epanet se encuentra el EPANET-Matlab Toolkit, un software de código abierto desarrollado por el KIOS Research Center for Intelligent Systems and Networks de la Universidad de Chipre, que opera en el entorno MATLAB, proporcionando una interfaz de programación para la última versión de EPANET. El Toolkit incluye comandos fáciles de usar para visualizar, modificar, simular y trazar los resultados producidos por las bibliotecas de EPANET ([Eliades et al., 2016](#)).

2.10 MATLAB

MATLAB (MATrix LABoratory) es un sistema de cómputo numérico, líder en desarrollo de software para cálculo técnico, dirigido especialmente a ingenieros y científicos en el sector industrial/empresarial ([MathWorks](#)). Ofrece un entorno de desarrollo integrado con lenguaje de programación propio.

Es un programa apto para el manejo de algoritmos, matrices, representación de datos y funciones, e incluso permite la comunicación con otros programas (como es el caso de el Toolkit-Epanet) y otros dispositivos de hardware.

Capítulo 3

Consideraciones Operativas para las UHP en Potabilización

La propuesta del gemelo digital contempla la determinación de las condiciones del modelo de flujo de producto para cada unidad, no está determinado el modelo de infraestructura y equipos.

3.1 Condiciones de Operación en Potabilización

El proceso de potabilización se compone de unidades cuyo flujo de producto es continuo, y se requiere definir los modos de operación de cada unidad. Así, se tiene que toda unidad inicia, opera y se detiene, asociado a estados de arranque, operación y parada. Con la salvedad que la parada puede efectuarse por parada condicionada, por finalización de producción o por falla y la operación puede ser normal o degradada. Una descripción más precisa de los modos de operación se puede definir como: Arranque (A), Vacío (V), Operando (O), Parada (P); el diagrama básico que describe la unidad se presenta en la figura 3.1, las condiciones que rigen la evolución de la red dependen del funcionamiento de cada unidad. Para cada modo se debe tener un modelo de comportamiento que puede estar dado en función de su desempeño como: Normal (N), Degradado (D), Fallo (F).

Estados	
L_0	Unidad disponible
L_a	Unidad en arranque
L_n	Condición normal
L_d	Condición degradada
L_f	Condición de falla
L_m	Mantenimiento de la unidad
Eventos	
T_0	Inicio
T_{sa}	Fin de secuencia de arranque
T_n	Modo normal
T_d	Modo degradado
T_f	Modo falla
T_m	Mantenimiento
T_{sm}	Fin de secuencia de mantenimiento

Tabla 3.1: Estados y eventos generales de la unidad.

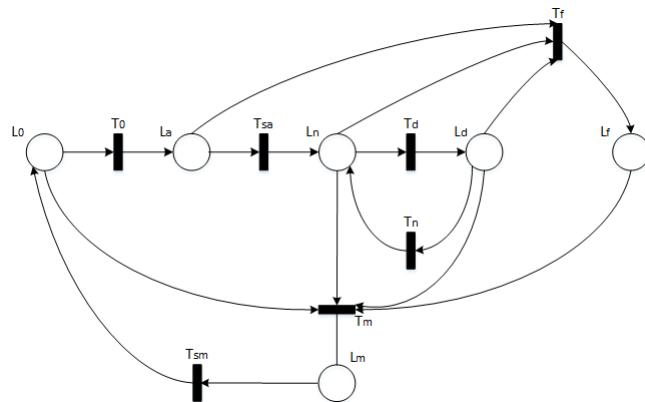


Figura 3.1: Estados generales de la unidad.

El modelo operacional de la unidad debe ir relacionado a los estados que interactúan en el sistema, esto es el estado del flujo de producto, de los recursos y del proceso;

descrito para cada unidad funcional, de manera que se cumpla con la visión establecida de sistemas holónicos.

3.1.1 Unidad de Coagulación

El arranque en condición normal, en general, debe cuidar principalmente que el caudal de entrada disponible esté dentro del rango de operación y las compuertas existentes estén funcionales. Para la unidad de coagulación se debe obtener también el resultado de las pruebas de laboratorio, así programar la adición de coagulante, y verificar que la maquinaria de adición de químicos esté en condiciones. En caso de marchar bien, la compuerta de entrada se apertura permitiendo el inicio del proceso, de lo contrario, la información de caudal y calidad debe transmitirse para el conocimiento de las demás unidades. En la tabla 3.2 se establecen las condiciones que determinan el arranque de la unidad de coagulación.

Condición	Modelos de Conocimiento		
	Flujo	Recursos	Proceso
Normal	$Q_i \approx Q_p \approx Q_o$	Compuertas operativas, sin fallas. Sensores calibrados, sin fallas. Químico coagulante disponible. Maquinaria para adición de coagulante sin fallas.	Pruebas de laboratorio realizadas.
Degradoado	$Q_i \ll Q_p$ $NTU > 100$	Compuertas con obstrucciones, sin interrupción total del flujo. Falta de químico coagulante para añadir. Maquinaria para adición de coagulante con fallas.	Pruebas de laboratorio no realizadas.
Falla	$Q_i \approx 0$	Compuertas bloqueadas, con interrupción considerable de flujo.	

Tabla 3.2: Modo de Arranque para Coagulación.

Mientras la unidad de coagulación se encuentra en operación se debe cuidar

principalmente que la adición de coagulante se realice de forma adecuada, así como actualizar continuamente la información de valores físico químicos del flujo de entrada.

Si la unidad se encuentra operando en degradado debido a calidad de agua, el laboratorio debe actualizar la dosis de coagulante a dosificar para evitar que las unidades siguientes se vean afectadas y deban realizar mantenimientos con mayor frecuencia. En el caso de no tener los químicos necesarios, se debe informar, mas no se detiene la unidad de coagulación; la carga de NTU extra se dirige hacia los filtros, los cuales operarán en degradado.

Condición	Modelos de Conocimiento		
	Flujo	Recursos	Proceso
Normal	$Q_i \approx Q_p \approx Q_o$ $NTU < 100$ $6,5 < pH < 9$	Químicos disponibles para adicionar. Sensores funcionales (recurso humano o tecnológico). Compuerta de salida abierta, en funcionamiento. Compuerta de entrada abierta, en funcionamiento.	Cantidad de coagulante adicionado adecuado, segun estudios previos.
Degradoado	$Q_i \ll Q_p, Q_i \gg Q_p$ $Q_o \ll Q_p, Q_o \gg Q_p$ $NTU > 100$ $pH < 6,5 - pH > 9$	Cantidad limitada o nula de químicos para adicionar. Sensores en falla (falta de personal, falla en dispositivos de medición). Compuertas con fallas mecánicas, sin interrupción total del flujo.	Mantenimiento de la unidad. Cantidad de coagulante añadido fuera del rango ideal.
Falla	$Q_i \approx 0$	Compuerta de entrada en falla, interrupción total del flujo. Compuerta de salida cerrada en falla, imposibilidad de salida del flujo.	

Tabla 3.3: Modo de Operación para Coagulación.

La parada en la unidad de coagulación se puede dar por:

- Interrupción del flujo de entrada debido a bloqueos en la toma.
- Caudal de entrada con turbiedad elevada y exceso de sedimentos debido al clima.
- Falla en otra unidad que afecte la continuidad del flujo.
- Daños en la estructura del canal.

En caso de enfrentar una falla, se debe parar el dosificador de coagulante y cerrar la compuerta de entrada a la unidad.

3.1.2 Unidad de Floculación

El arranque normal de la unidad de floculación debe contar con un nivel de agua apto para el arranque del mezclador, es decir, debe estar por encima de las aspas al menos 30 cm (cada planta tiene sus condiciones específicas), en caso de no tener el nivel necesario o no contar con caudal de entrada, la unidad estará en falla y no puede realizar el arranque. En caso de iniciar un arranque en degradado se debe enviar la información físico químicas del agua a las demás unidades. En la tabla 3.4 se describen las condiciones de cada estado para el arranque de la unidad.

Condición	Modelos de Conocimiento		
	Flujo	Recursos	Proceso
Normal	Nivel de agua dentro del rango de operación, al menos 30cm arriba de las paletas de mezclado.	Motor del agitador en condiciones. Compuertas funcionales.	Agitación de la masa de agua.
Degradoado	$Q_i \ll Q_p$ Nivel de agua por encima del rango óptimo.	Falla en motor del agitador. Falla en compuertas, sin obstrucción total de flujo.	Agitación no adecuada para la formación de flóculos.
Falla	$Q_i \approx 0$ Nivel de agua por debajo del rango de operación.	Compuertas bloqueadas, impidiendo paso de agua.	

Tabla 3.4: Modo de Arranque para Floculación.

La unidad de floculación en operación debe cuidar la mezcla de la masa de agua, el motor de aspas y la formación de flóculos; de haber incongruencias se debe informar el degradado o avisar de falla en la unidad. En la tabla 3.5 se describen las condiciones de comportamiento en operación.

Condición	Modelos de Conocimiento		
	Flujo	Recursos	Proceso
Normal	$Q_i \approx Q_p \approx Q_o$ $NTU < 50$ $6,5 < pH < 9$ Nivel de agua dentro del rango de operación.	Sensores funcionales (recurso humano o tecnológico). Compuerta de salida abierta, en funcionamiento. Compuerta de entrada abierta, en funcionamiento. Compuerta de drenaje cerrada, en funcionamiento. Mezclador mecánico en funcionamiento.	Agitación de la masa de agua. Flóculos en formación.
Degradoado	$Q_i \ll Q_p, Q_i \gg Q_p$ $Q_o \ll Q_p, Q_o \gg Q_p$ $NTU > 50$ $pH < 6,5 - pH > 9$ Nivel de agua por encima del rango de operación.	Sensores en falla (falta de personal, falla en dispositivos). Compuertas con fallas mecánicas, sin interrupción total de flujo, o sin exceso de pérdidas en el caso del drenaje.	Mantenimiento de la unidad. Se visualiza poca formación de flóculos (denota falla en el cálculo de la frecuencia de aspas de mezclado, cantidad de coagulante añadido en la unidad anterior o falla en el diseño).
Falla	$Q_i \approx 0$ Nivel de agua por debajo del rango de operación.	Compuerta de entrada en falla, con interrupción total de flujo o muy por debajo del rango normal. Compuerta de salida, cerrada y en falla, interrupción total de flujo o muy por debajo del rango normal. Compuerta de drenaje en falla, pérdida de flujo.	

Tabla 3.5: Modo de Operación para Floculación.

La parada en la unidad de floculación se puede dar por:

- Nivel del agua debajo del rango de operación.
- Daño en la compuerta de drenaje, evitando que la unidad mantenga un nivel adecuado.
- Caudal de entrada cercano a cero, afectando eventualmente la continuidad del proceso.
- Falla en otra unidad que afecte la continuidad del flujo.
- Daños en la estructura física de la unidad.
- Mantenimiento que requiera el vaciado del tanque.

En caso de requerir la parada de la unidad, se debe detener el motor de mezclado.

3.1.3 Unidad de Sedimentación

El arranque de la unidad de sedimentación se da de forma normal una vez la unidad de floculación esté operativa y el nivel de agua se encuentre sobre los recolectores, para ello las compuertas de entrada y salida del sedimentador deben estar abierta sin fallas.

La unidad arrancaría en degradado si los recolectores se encuentran obstruidos o si el caudal de entrada está por debajo del normal, ya que eventualmente el flujo de salida disminuirá hasta entrar en falla operativa si no se hace nada para solucionar el inconveniente.

Con nivel del agua bajo los recolectores, la unidad no puede iniciar su funcionamiento.

En la tabla 3.6 se describen las condiciones de arranque de la unidad de sedimentación.

Condición	Modelos de Conocimiento		
	Flujo	Recursos	Proceso
Normal	$Q_i \approx Q_p \approx Q_o$ Nivel de agua dentro del rango de operación, sobre los recolectores.	Compuertas en funcionamiento.	Unidad limpia.
Degradoado	$Q_i \ll Q_p$	Compuertas con fallas, sin interrupción total de flujo. Recolectores de agua clarificada obstruídos.	Manto de lodos sobre el nivel requerido. Disminución considerable de Q_o en los canales de recolección.
Falla	$Q_i \approx 0$ Nivel de agua por debajo de las láminas de sedimentación.	Compuertas en falla, con obstrucción del flujo.	

Tabla 3.6: Modo de Arranque para Sedimentación.

Durante la operación de la unidad, el sedimentador debe mantener en la superficie agua clarificada y un caudal de salida acorde a la producción de la planta, de lo contrario se estaría trabajando en degradado.

Cuando las unidades anteriores no operan en condición normal, la unidad de sedimentación puede recibir agua con grado de turbidez mayor al adecuado ($NTU < 10$), lo que demanda un mantenimiento con mayor frecuencia.

El mantenimiento de la unidad corresponde a una de las operaciones de mayor importancia, ya que al llenarse el almacenamiento de lodos o al fermentarse el lodo acumulado, se genera un deterioro en la calidad de agua recolectada. De no contar con un sensor de nivel de lodos, la acumulación de burbujas de gas en la superficie, el aumento del NTU, la visualización de flóculos en la zona de recolección o el aumento de nivel de agua en la unidad (sin aumento del caudal de entrada), son indicios de problemas con acumulación de lodos, por lo que se debe realizar el lavado del tanque.

Para realizar el mantenimiento de rutina se apertura la compuerta de descarga de

lodos, hasta que el nivel de agua esté entre 40y50cm por debajo del canal recolector. Durante el mantenimiento la unidad queda fuera de operación por un periodo de tiempo de aproximadamente 30min, contando el tiempo que tarda en volver al nivel de operación una vez cerrada la compuerta de descarga. En mantenimientos profundos, realizados cada 2 meses en sequía y mensual en tiempos de lluvia, se debe proceder de la siguiente manera:

1. Cerrar la compuerta de entrada.
2. Abrir la compuerta de descarga de lodos hasta vaciar completamente el tanque de sedimentación.
3. Cepillar y utilizar agua limpia externa para limpiar las paredes del tanque.
4. Cerrar la compuerta de descarga de lodos.
5. Abrir la compuerta de entrada a la unidad para proceder al llenado.

El tiempo en este caso depende de los operadores y la profundidad de limpieza.

En la tabla 3.7 se describen las condiciones de operación de la unidad de sedimentación.

La parada en la unidad de sedimentación se puede dar por:

- Nivel de agua bajo el rango de operación.
- Obstrucción del caudal de entrada.
- Daño en la compuerta de drenaje, evitando que la unidad mantenga un nivel adecuado.
- Mantenimiento profundo de la unidad, o parada momentánea del flujo de salida debido al mantenimiento rutinario.
- Detención de otra unidad funcional del proceso, interrumpiendo la continuidad del mismo.
- Daños en la estructura física.

Condición	Modelos de Conocimiento		
	Flujo	Recursos	Proceso
Normal	$Q_i \approx Q_p \approx Q_o$ $NTU < 10$ $6,5 < pH < 9$ Nivel de agua dentro del rango de operación.	Sensores funcionales (recurso humano o tecnológico). Compuerta de salida abierta, en funcionamiento. Compuerta de entrada abierta, en funcionamiento. Compuerta de drenaje cerrada, en funcionamiento.	Nivel de lodos por debajo del máximo. Se visualiza disminución de flóculos.
Degradoado	$Q_i \ll Q_p, Q_i \gg Q_p$ $Q_o \ll Q_p, Q_o \gg Q_p$ $NTU > 10$ $pH < 6,5 - pH > 9$ Nivel de agua por encima del rango de operación.	Sensores en falla (falta de personal, falla en dispositivos). Compuertas con fallas mecánicas, sin interrupción total de flujo, o sin exceso de pérdidas en el caso de la descarga de lodos. Problemas con la apertura de descarga de lodos.	Mantenimiento de la unidad. Se visualizan flóculos en el area de agua clarificada (denota falla en el cálculo de la frecuencia de aspas de mezclado en la unidad anterior, error en la cantidad de coagulante añadido, colmatación de lodos o falla en el diseño).
Falla	$Q_i \approx 0$ Nivel de agua por debajo del rango de operación.	Compuerta de entrada en falla, con interrupción total de flujo o muy por debajo del rango normal. Compuerta de salida, cerrada y en falla, interrupción total de flujo o muy por debajo del rango normal. Compuerta de descarga de lodos en falla, con pérdida considerable de flujo o imposibilidad de descargar lodos por un tiempo prolongado.	

Tabla 3.7: Modo de Operación para Sedimentación.

En caso de parada de la unidad se debe cerrar la compuerta de entrada y abrir la descarga de lodos, evitando vaciar el tanque por completo.

3.1.4 Unidad de Filtración

Para el arranque en la unidad de filtración se debe cuidar que el nivel de agua se encuentre sobre el manto filtrante, de lo contrario se deteriora el material y le resta efectividad al proceso. Las compuertas deben estar funcionales y se debe asegurar que los equipos para limpieza del filtro estén operativos.

Sin caudal de entrada no se puede realizar el arranque del filtro, eventualmente se detendrá el proceso.

En la tabla 3.8 se describen las condiciones de arranque de la unidad de filtración.

Condición	Modelos de Conocimiento		
	Flujo	Recursos	Proceso
Normal	$Q_i \approx Q_p \approx Q_o$ Nivel de agua por encima del manto de filtros.	Manto filtrante en condiciones. Compuertas funcionales. Motor de retrolavado en condiciones.	Filtros sin bloqueos.
Degradoado	$Q_i \ll Q_p$	Daño en el manto filtrante. Compuertas con fallas, sin interrupción total del flujo. Bombas de retrolavado en falla.	Bloqueo de filtros.
Falla	$Q_i \approx 0$	Bloqueo de compuertas, con interrupción de flujo. Imposibilidad para realizar el retrolavado, falla en el sistema de bombeo.	

Tabla 3.8: Modo de Arranque para Filtración.

El buen funcionamiento de las unidades previas hace que los filtros puedan tener una carrera más larga (tiempo de operación sin lavado), debido a que la masa de agua

que entraría a la unidad se mantendría por debajo de 5NTU. De no ser así, la unidad deberá entrar en constante mantenimiento, aumentando el gasto de agua.

El mantenimiento de la unidad se realiza cuando el filtro se encuentra colmatado, los indicios que delatan una colmatación son el aumento del nivel de agua en el tanque, disminución en el flujo de salida, poca turbulencia en la unidad (denota que no hay movimiento de fluido entrante), efluente con índices inadecuados de color o NTU (por encima de 15UPC o 2 NTU). En este caso se procede al retrolavado de filtros:

1. Cerrar la compuerta de entrada, dejando que el nivel de agua llegue hasta 15cm sobre la superficie del manto filtrante.
2. Cerrar la compuerta de salida.
3. Abrir la válvula de drenaje.
4. Abrir lentamente la válvula de lavado, hasta eliminar la turbiedad del agua en el filtro.
5. Cerrar la válvula del agua de lavado.
6. Cerar la compuerta de drenaje.
7. Abrir lentamente la compuerta de entrada de agua sedimentada, para evitar turbulencias en el manto filtrante, hasta llegar al nivel de operación.
8. Abrir la compuerta de salida de la unidad.

En la tabla 3.9 se detallan las condiciones para la operación de la unidad de filtros.

La parada de la unidad de filtración se da cuando:

- Ausencia de caudal de entrada.
- No se puede realizar el lavado de filtros, eventualmente se colmatarán.
- Hay daños en la estructura de la unidad.

Para realizar la parada de filtros se debe cerrar la compuerta de salida de la unidad, evitando que el nivel de agua quede a menos de 15 cm por encima del manto filtrante.

Condición	Modelos de Conocimiento		
	Flujo	Recursos	Proceso
Normal	$Q_i \approx Q_p \approx Q_o$ $NTU < 5$ $6,5 < pH < 9$ Nivel de agua dentro del rango de operación.	Sensores funcionales (recurso humano o tecnológico). Compuerta de salida abierta, en funcionamiento. Compuerta de entrada abierta, en funcionamiento. Compuerta de drenaje cerrada, en funcionamiento.	Lecho filtrante no colmatado.
Degradoado	$Q_i \ll Q_p, Q_i \gg Q_p$ $Q_o \ll Q_p, Q_o \gg Q_p$ $NTU > 5$ $pH < 6,5 - pH > 9$ Nivel de agua por encima del rango de operación.	Sensores en falla (falta de personal, falla en dispositivos). Compuertas con fallas mecánicas, sin interrupción total de flujo, o sin exceso de pérdidas en el caso del drenaje.	Mantenimiento de la unidad. Filtros colmatados.
Falla	$Q_i \approx 0$ Nivel de agua por debajo del rango de operación.	Compuerta de entrada en falla, con interrupción total de flujo o muy por debajo del rango normal. Compuerta de salida, cerrada y en falla, interrupción total de flujo o muy por debajo del rango normal. Compuerta de drenaje en falla, con pérdida considerable de flujo.	

Tabla 3.9: Modo de Operación para Filtración.

3.1.5 Unidad de Desinfección

El arranque adecuado de la unidad de desinfección debe cuidar el funcionamiento de los dosificadores de químicos, el caudal de entrada y las compuertas de la unidad, como se detalla en la tabla 3.10.

Condición	Modelos de Conocimiento		
	Flujo	Recursos	Proceso
Normal	$Q_i \approx Q_p \approx Q_o$ Nivel dentro del rango de operación.	Bombas en funcionamiento. Compuertas en funcionamiento. Químicos disponibles para la adición.	Pruebas de laboratorio realizadas.
Degradoado	$Q_i \ll Q_p$ Nivel fuera del rango de operación.	Bomba de adición de químicos en falla. Compuertas bloqueadas sin interrupción total de flujo. Químicos no disponibles.	Desconocimiento de pruebas de laboratorio.
Falla	$Q_i \approx 0$ Nivel de agua por debajo del rango de operación.	Compuertas en falla, bloqueo del flujo de agua.	

Tabla 3.10: Modo de Arranque para Desinfección.

La operación en desinfección debe mantenerse informada de las cualidades químicas del agua a tratar, de manera de dosificar adecuadamente el cloro a la masa de agua. La unidad entrará en degradado cuando se deban realizar acciones de mantenimiento o cuando algún recurso esté faltando. (tabla 3.11).

La unidad de desinfección detenerse si:

- Ausencia de caudal de entrada.
- Las condiciones físico químicas del agua están fuera del rango aceptable (table 2.3).
- Hay daños en la estructura de la unidad.

Condición	Modelos de Conocimiento		
	Flujo	Recursos	Proceso
Normal	$Q_i \approx Q_p \approx Q_o$ $NTU < 1$ $6,5 < pH < 7,5$ Nivel de agua dentro del rango de operación.	Sensores funcionales (recurso humano o tecnológico). Compuerta de salida abierta, en funcionamiento. Compuerta de entrada abierta, en funcionamiento. Compuerta de drenaje cerrada, en funcionamiento. Químicos de desinfección disponibles para adicionar.	Adición de la cantidad adecuada de químicos, según estudios del laboratorio.
Degradoado	$Q_i \ll Q_p, Q_i \gg Q_p$ $Q_o \ll Q_p, Q_o \gg Q_p$ $NTU > 5$ $pH < 6,5 - pH > 7,5$ Nivel de agua por encima o por debajo del rango de operación.	Sensores en falla (falta de personal, falla en dispositivos). Compuertas con fallas mecánicas, sin interrupción total de flujo, o sin exceso de pérdidas en el caso del drenaje.	Mantenimiento de la unidad. Error en la dosis de químicos a añadir.
Falla	$Q_i \approx 0$	Compuerta de entrada en falla, con interrupción total de flujo o muy por debajo del rango normal. Compuerta de salida, cerrada y en falla, interrupción total de flujo o muy por debajo del rango normal. Compuerta de drenaje en falla, con pérdida considerable de flujo.	

Tabla 3.11: Modo de Operación para Desinfección.

Para llevar a cabo la parada de la unidad se debe cerrar la compuerta de entrada e informar las razones para la detención, de modo que el almacenamiento y la distribución estén al tanto de la situación.

3.2 Modelos Generales de las Entidades

Según lo descrito previamente para UHP, el modelo de conocimiento incluye modelos continuos que rigen el proceso físico y discretos que contienen las transiciones entre tales modelos, dependiendo de las condiciones dadas.

Así, una de las configuraciones para las unidades particulares es el modelado de un tanque, cuya dinámica continua es de la forma:

Dado,

$$\begin{aligned} Hq_s &= Q_2 Cd\sqrt{2gh} \\ q_i &= \Phi \\ q_o &= \begin{cases} \text{si } q_s > \Phi_{demanda} & \rightarrow q_o = \Phi_{demanda} \\ \text{cc} & \rightarrow q_o = q_s \end{cases} \end{aligned} \tag{3.1}$$

Se desglosan las condiciones de operación del tanque,

Condición Normal: $H_{min} < H < H_{max}$

$$\dot{h} = \frac{1}{A}(V_1 q_i - V_2 q_o) \tag{3.2}$$

Donde, $V_1 = V_2 = 1$

Condición de desborde: $H > H_{max}$

$$\dot{h} = \frac{1}{A}(V_1 q_i - V_2 q_o - V_3(q_i - q_o)) \tag{3.3}$$

Donde, $V_1 = V_2 = V_3 = 1$

Condición sin agua: $H < H_{min}$

$$\dot{h} = \frac{1}{A}(V_1 q_i - V_2 q_o - Q_2 Cd\sqrt{2gh_{min}}) \tag{3.4}$$

Donde, $V_1 = V_2 = 1$

A es el área

V son las válvulas

q_i es el caudal de entrada

q_o es el caudal de salida

C_d es el coeficiente de descarga

h es la altura

g es la gravedad.

Las transiciones discretas que influyen en el comportamiento del tanque se detallan a continuación:

Caudal: Referente al caudal de entrada a una unidad.

Estados	
L_a	Caudal de operación
L_b	Caudal en degradado
L_c	Caudal en falla
Eventos	
T_a	Caudal normal
T_b	Caudal en degradado
T_c	Caudal en falla

Tabla 3.12: Estados y eventos del caudal.

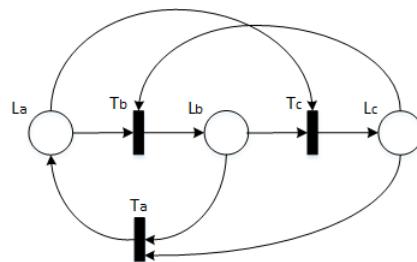


Figura 3.2: Estado del caudal de entrada a sedimentación.

Altura del Tanque: Describe los niveles de agua en los que la unidad puede operar, junto con saturación, vacío y nivel mínimo, depende de las mediciones de altura h en el tanque.

Estados	
L_x	Altura máxima
L_o	Altura de operación
L_v	Altura en vacío
L_m	Altura mínima
Eventos	
T_x	$h > h_{max}$
T_o	$h_{opmin} \leq h \leq h_{opmax}$
T_v	$h_{min} < h < h_{opmin}$
T_m	$h \leq h_{min}$

Tabla 3.13: Estados y eventos de la altura en el tanque.

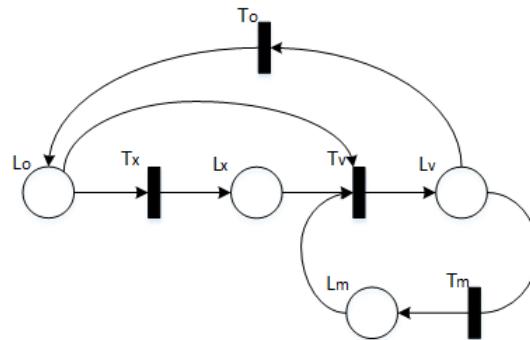


Figura 3.3: Estado de la altura del agua en el tanque.

Estado del tanque: Según el estado de altura del agua y la compuerta de la unidad, se determina si el tanque está operando, en máximo o mínimo, llenando o vaciándose. Figura 3.4.

Estados	
L_o	Tanque en operación
L_x	Tanque saturado
L_v	Tanque en ciclo de vacío
L_m	Tanque en mínimo
L_l	Tanque en ciclo de llenado
Eventos	
T_o	Condiciones de operación
T_x	Condiciones de saturación
T_v	Condiciones para vaciar
T_m	Condiciones de mínimo
T_l	Condiciones para llenar

Tabla 3.14: Estados y eventos del tanque.

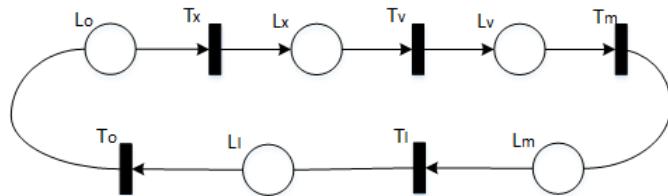


Figura 3.4: Estado del tanque.

De igual forma se presenta un modelo discreto que rige las válvulas o compuertas en el sistema:

Estado de la compuerta: Abierta o cerrada según condición de nivel del agua en el tanque. Figura 3.5.

Estados	
L_a	Compuerta abierta
L_c	Compuerta cerrada
Eventos	
T_a	Abrir compuerta
T_{fa}	Falla en apertura
T_c	Cerrar compuerta
T_{fc}	Falla en cierre

Tabla 3.15: Estados y eventos de la compuerta.

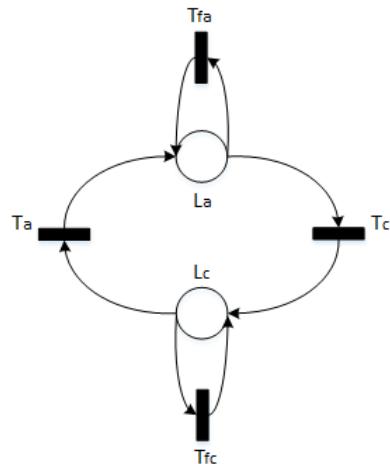


Figura 3.5: Estado de la compuerta.

En el caso específico de la unidad de coagulación, se tiene conocimiento de la cantidad de coagulante a añadir obtenida mediante la prueba de jarras. En referencias consultadas, se han realizado modelos basados en métodos numéricos para coseguir tal valor de dosificación (Farhaoui et al., 2016; Apostol et al., 2011; León-Luque et al., 2016; Bazer-Bachi et al., 1990).

Los modelos discretos que rigen la dosificación de coagulante en el tratamiento de agua, se basan en la evolución de las condiciones de calidad del flujo entrante y la condición de dosificación específica en cada planta.

Calidad de agua: Depende de las variables medidas en cada planta y las consideraciones de calidad alta, media y baja que se tengan.

Estados	
L_a	Calidad alta
L_b	Calidad media
L_c	Calidad baja
Eventos	
T_a	Condiciones de calidad en rango alto
T_b	Condiciones de calidad en rango medio
T_c	Condiciones de calidad en rango bajo

Tabla 3.16: Estados y eventos de la turbidez.

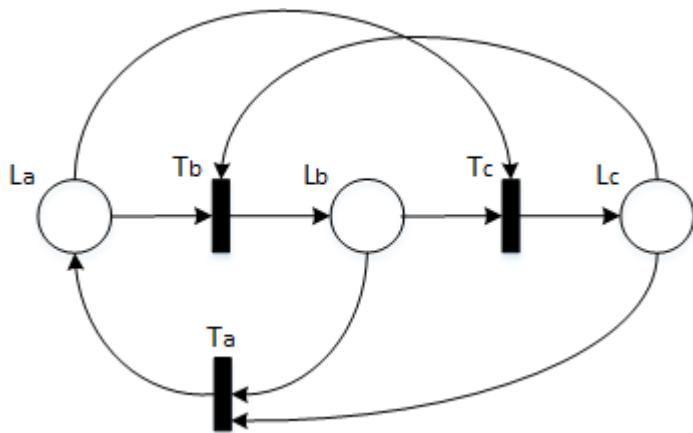


Figura 3.6: Estado de la turbidez en coagulación.

Dosificación de coagulante: Dependerá también de los lineamientos operativos que se tengan en cada planta. Básicamente es una condición de dosificar o no, según las condiciones de calidad (figura 4.4) y caudal de entrada (3.2).

Estados	
L_0	Unidad sin dosificar
L_1	Unidad con dosificación
Eventos	
T_{n0}	Condición para no dosificar
T_{n1}	Condición para dosificar

Tabla 3.17: Estados y eventos de dosificación de coagulante.

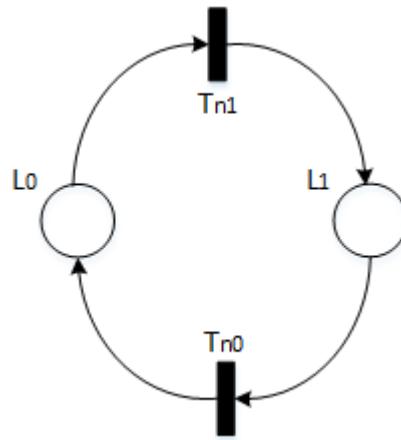


Figura 3.7: Estado de dosificación.

Las condiciones y modelos obtenidos se componen, con el fin de recrear el comportamiento de una unidad específica y obtener una respuesta.

Capítulo 4

Caso de Uso

Las herramientas a utilizar para la composición de los modelos serán Epanet y MATLAB; con Epanet se emularán los modos de operación con dinámicas continuas, mientras que MATLAB funcionará como un motor de evolución de los modelos discretos. La conexión entre ambos programas es realizada mediante el Epanet-Matlab Toolkit, esto permite la modificación de los valores de la dinámica continua según condiciones obtenidas en la simulación.

Se toma como caso de estudio la Planta de Potabilización "Dr. Eduardo Jáuregui", ubicada en la Hoyada de Milla, municipio Milla del Estado Mérida, la cual tiene una producción de 300 L/s de agua potable, siendo este el caudal promedio que genera la fuente. Es importante mencionar que el diseño estructural de las plantas de potabilización se realiza luego de aplicar estudios a la fuente que surtirá el proceso, de modo que en casos extremos, usualmente periodos de sequía, el caudal mínimo que entre a la planta logre en lo posible mantener la producción, sin afectar la distribución de agua a la población.

Brevemente se especificarán algunas condiciones en cada unidad de la planta real:

Coagulación: Se realiza de forma hidráulica con un canal Parshall (véase figura 2.19). La dosis de coagulante se añade justo en el resalto hidráulico que genera la mezcla rápida, en cuestión de segundos. El coagulante utilizado es el Sulfato de Aluminio ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$), químico que debe aplicarse con un rango óptimo de pH entre 5 - 8, consideración que se cumple puesto que la fuente mantiene un pH de 7,1. De igual

forma, la temperatura del agua es templada sin cambios bruscos, por tanto no afecta las reacciones químicas.

En esta planta se condiciona la adición de coagulante, es decir, según el resultado de calidad de agua, si la turbidez se encuentra por debajo de 13 NTU, no se añade ninguna dosis de coagulante. La razón de esta decisión se debe a que el proceso disminuye la turbidez lo suficiente para asegurar agua con calidad aceptable al culminar la potabilización, por lo que se reserva el químico coagulante para cuando se generen cambios de turbidez bruscos en la entrada de la planta.

Floculación: En la planta Jáuregui se cuenta con dos unidades de floculación; el flujo proveniente de coagulación es dividido hacia dos unidades de floculación mecánica de turbina (véase figura 2.20 (a)), de dos cámaras cada una. La segunda cámara de cada floculador se conecta a la unidad de sedimentación.

Sedimentación: Se tienen dos unidades de sedimentación de tipo laminar (véase figura 2.21), cada una con dos canales de recolección, es decir, cuatro pasillos de tubos recolectores. El agua proveniente de la unidad de floculación entra por la parte inferior del tanque de sedimentación, de forma que los flóculos se asienten en las láminas y el agua clarificada se mantenga en la superficie. Los cuatro canales recolectores se unen en un canal común que se dirige a la unidad de filtración.

Filtración: La unidad de filtración consta de seis filtros rápidos instalados en serie, con un lecho filtrante de 1,05 m, compuesto por grava, arena y antracita (véase figura 4.1). Se realiza retro lavado con agua y aire, proceso que dura alrededor de 15 minutos.

Desinfección: La desinfección se realiza en línea, previo a dirigir la masa de agua hacia el almacenamiento.

4.1 Propuesta de Medición

Parte de la propuesta se trata de incluir mediciones en planta que no se tienen actualmente, y son necesarias para el seguimiento y evaluación del proceso. En ese



Figura 4.1: Lecho filtrante.

sentido, se adjunta un diagrama con instrumentación mínima de indicadores requeridos para obtener los valores en tiempo real, figura 4.2. Así, es posible conocer el estado de calidad de agua, o una aproximación, durante todo el proceso de tratamiento, permitiendo identificar valores fuera de los rangos adecuados, en condición degradada por ejemplo, que ameriten revisión de alguna unidad.

La eficiencia de los modelos dependerá de la precisión de los datos obtenidos en planta; si la medición realizada tiene un amplio margen de error, los modelos contenidos en el gemelo digital no serán fieles al comportamiento real.

4.2 Generación de la Propuesta de Gemelo Digital

Según lo descrito en 2.8, la implementación del gemelo digital requiere de datos del proceso y de modelos de comportamiento de la unidad. Para llevar a cabo la prueba de concepto se tomaron dos de las unidades funcionales del proceso de potabilización, la unidad de Coagulación y la unidad de Sedimentación.

4.2.1 Modelo de la Unidad de Coagulación

La adición de coagulante representa uno de los procedimientos primordiales en una planta de tratamiento de agua, ya que conlleva a que el flujo de salida se encuentre dentro de los límites permisibles para el consumo humano. La efectividad del proceso de coagulación se verá afectada por la dosis de coagulante añadido.

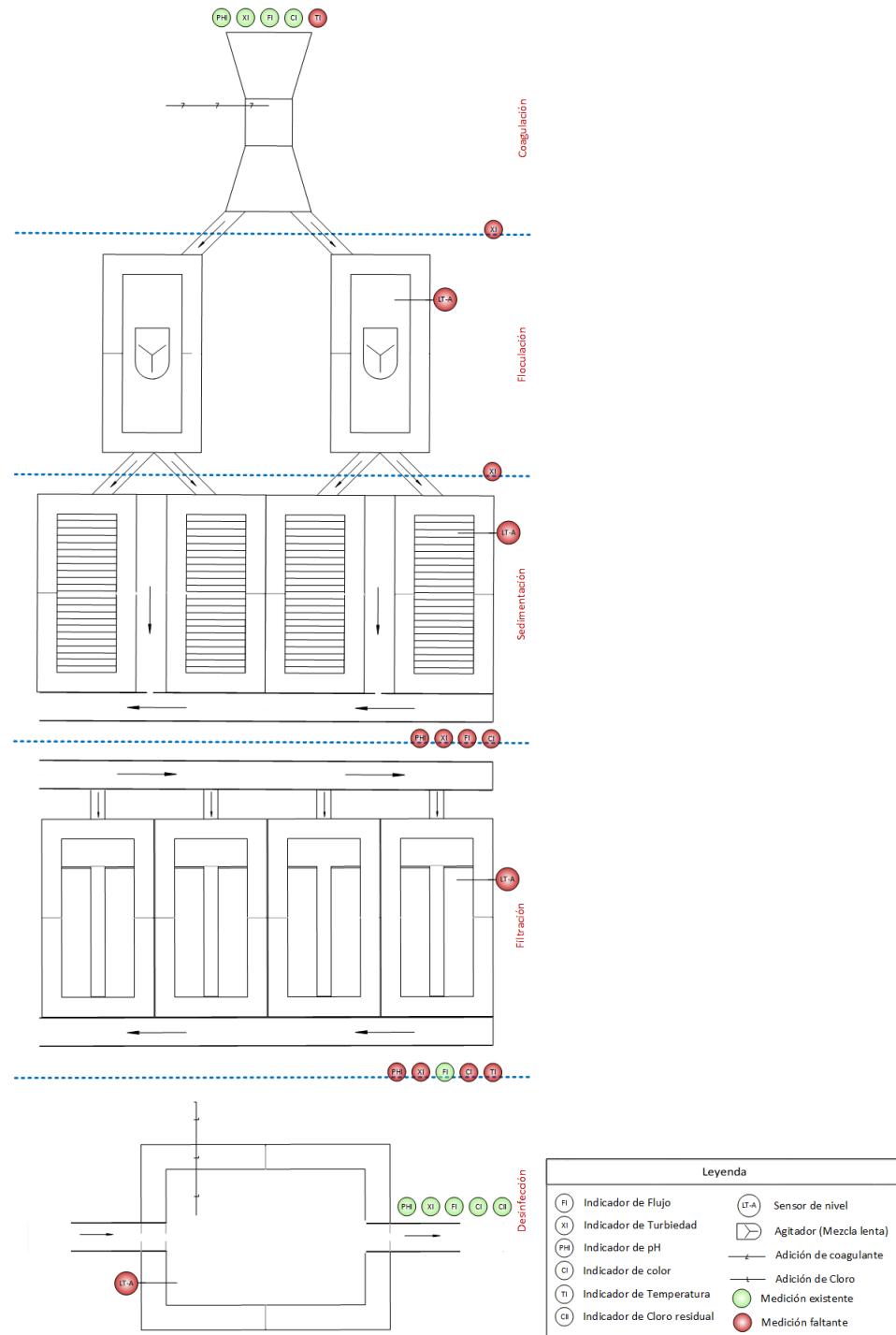


Figura 4.2: Mediciones propuestas en planta.

Para obtener la dosis óptima se realiza la prueba de jarras cada vez que se observa un cambio en la turbidez del flujo, sin embargo, es posible realizar un modelo que permita obtener en línea una estimación de coagulante a suministrar para actuar de forma inmediata en el sistema. Esto aporta robustez y flexibilidad en el proceso, mientras se verifica con la prueba de jarras para realizar ajustes posteriores en caso de ser requeridos. Es por ello que se utilizó un modelo matemático para aproximar la relación de dependencia entre la dosis de coagulante a adicionar y las condiciones físico químicas del flujo entrante.

En la literatura consultada no se muestra ningún modelo matemático asociado a la reacción del coagulante sobre el agua cruda agitada, para determinar la dosis del mismo, ya que su complejidad multifactorial lo hace impráctico cuando los procedimientos son manuales o semiautomáticos. También se considera que, en principio, las condiciones de agua cruda no difieren mayormente en períodos estacionales, por lo que a pesar del retraso, la prueba de jarras funciona y es la única fuente que se tiene para obtener la dosis de coagulante.

Dado que la planta Jáuregui posee datos históricos, como un primer modelo se propone un modelo de predicción estadístico a partir de correlación de variables, basado en regresión lineal debido a la naturaleza de los datos.

Los parámetros que se toman en cuenta al generar un modelo son las características fisicoquímicas del agua, tales como: Turbidez, pH, color, temperatura, alcalinidad, conductividad.

- **Características del flujo:** pH, turbidez (*NTU*), color (*UC*), alcalinidad (*mg/L*), cloro residual (*mg/L*).
- **Dosis de químicos adicionadas:** Gas cloro (*kg/h*), sulfato de aluminio (*kg/h*), cal hidratada (*kg/h*).

El tiempo de muestreo de los datos es de 1 hora. El formato de los datos utilizados se adjunta en el Anexo A.

El desarrollo del modelo se realizó mediante regresión polinomial, utilizado para predecir una variable dependiente Y con base en múltiples variables predictoras $X = (x_1, x_2, \dots, x_k)$; puede ser expresado como:

$$Y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (4.1)$$

Para efectos de determinar la dosis de coagulante ideal, se utilizaron como descriptores las condiciones iniciales del flujo: Turbidez, pH, color y alcalinidad (tabla 4.1), tomando en cuenta solo aquellas muestras a las cuales se le adicionó una cantidad adecuada de coagulante; es decir, la muestras cuyos valores de salida cumplen con las características siguientes:

$$NTU \leq 5$$

$$Color \leq 20$$

$$pH \approx 7$$

Datos	Valor mínimo	Valor máximo
Dosis Sulfato de Aluminio (<i>DSA</i>)	63 kg/h	252 kg/h
Turbidez (<i>T</i>)	12 NTU	1500 NTU
Color (<i>C</i>)	50 UC	9000 UC
pH (<i>Ph</i>)	6,9	7,2
Alcalinidad (<i>A</i>)	22 mg/L	27 mg/L

Tabla 4.1: Variables del conjunto de datos.

Siguiendo estudios enfocados en la optimización de la dosis de coagulante, se utilizó la plataforma MATLAB y su toolbox para determinar la regresión polimomial, considerando la turbidez como variable clave para el cálculo de coagulante a añadir.

En un principio se intentó utilizar el total de las variables medidas en planta, pero mediante un estudio de correlación (tabla 4.2), se determinó que el pH y la alcalinidad guardan baja correlación con la dosis de coagulante, en el caso particular de la planta estudiada.

En pro de obtener un modelo cuyo comportamiento se asemeje al proceso real, se consideran las condiciones de operación de la unidad. Se estableció previamente que con un valor de turbidez mayor a 100NTU, la unidad entra en estado degradado, a ésta

Corr	DSA	T	C	Ph	A
DSA	1,00	0,94	0,95	-0,53	-0,25
T	0,94	1,00	0,98	-0,48	-0,18
C	0,95	0,98	1,00	-0,50	-0,31
Ph	-0,53	-0,48	-0,50	1,00	0,45
A	-0,25	-0,18	-0,31	0,45	1,00

Tabla 4.2: Estudio de correlación.

condición se suma el caso particular de la planta Jáuregui, donde con turbidez menor a $12NTU$, no se realiza dosificación de coagulante. Así pues, se obtiene el modelo de dosificación que sigue la forma expresada en la ecuación 4.2.

$$DSA = \begin{cases} \text{si } NTU < 12 & \rightarrow DSA = 0 \\ \text{si } 12 \leq NTU < 100 & \rightarrow DSA = md1 \\ \text{si } NTU \geq 100 & \rightarrow DSA = md2 \end{cases} \quad (4.2)$$

Donde,

$$\begin{cases} md1 = a_0 + a_1T + a_2C + a_3T^2 + a_4TC + a_5T^3 + a_6T^2C + a_7T^4 + a_8T^3C \\ md2 = b_0 + b_1T + b_2C + b_3T^2 + b_4TC + b_5C^2 + b_6T^2C + b_7TC^2 + b_8C^3 + b_9T^3 \end{cases} \quad (4.3)$$

Los valores de los coeficientes obtenidos para los modelos md1 y md2 (expresión 4.3), se reflejan en la tabla 4.3.

En la figura 4.3 se presenta la comparación entre el modelo calculado y los datos reales de la planta; modelo que representa la cantidad de coagulante a dosificar según las condiciones iniciales de calidad de agua (turbidez y color, en este caso).

Para evaluar el desempeño del modelo en comparación con los datos reales, se realizó el cálculo del porcentaje de variación de la variable DSA que explica su relación con las variables predictoras (R^2), y el cálculo del error cuadrático medio (RMSE):

Variables involucradas: T, C

R^2 : 0,9791

RMSE-Modelo: 6,2176

Coeficientes			
md1	Valor	md2	Valor
a_0	-136, 4	b_0	75, 950
a_1	27, 99	b_1	$-5, 0675e^{-2}$
a_2	2, 909	b_2	$-3, 0520e^{-3}$
a_3	-1, 319	b_3	$2, 3948e^{-3}$
a_4	$-2, 884e^{-1}$	b_4	$-2, 1850e^{-3}$
a_5	$2, 669e^{-2}$	b_5	$2, 7150e^{-4}$
a_6	$8, 650e^{-3}$	b_6	$-3, 1740e^{-6}$
a_7	$-1, 926e^{-4}$	b_7	$1, 4230e^{-6}$
a_8	$-8, 122e^{-5}$	b_8	$-1, 5130e^{-7}$
-	-	b_9	$-3, 1430e^{-7}$

Tabla 4.3: Coeficientes de las expresiones md1 y md2.

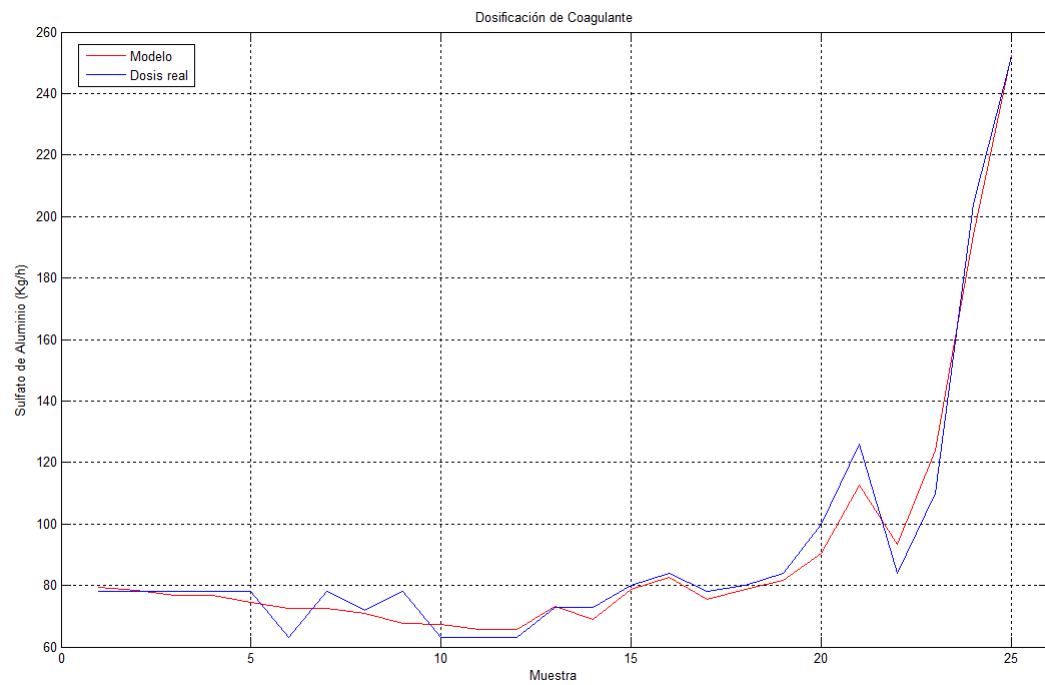


Figura 4.3: Dosis de coagulante real en comparación con Dosis calculada.

Los modelos discretos que rigen la unidad de coagulación, desarrollados de forma general en 3.2, describen la decisión de dosificar o no coagulante, que depende de la evolución en la red de calidad de entrada. En el caso de la planta Jáuregui, se considerará el valor de turbidez como condición para el cambio de estado en la dosificación, tal como se determina en el modelo continuo. La composición de ambos modelos arroja el estado de la unidad según el flujo de producto, véase figura 4.4. Se toman en cuenta las condiciones operativas descritas en 3.1.

Estados	
L_a	Turbidez baja
L_b	Turbidez media
L_c	Turbidez alta
L_0	Unidad sin dosificar
L_1	Unidad con dosificación
L_2	Unidad dosificando, en degradado
L_n	Intercambio de información, turbidez baja, detener dosificación
L_{nd}	Intercambio de información, turbidez media, iniciar dosificación
L_{dd}	Intercambio de información, turbidez alta
Eventos	
T_a, T_0	$T < 12$
T_b, T_1	$12 \leq T \leq 100$
T_c, T_2	$T > 100$

Tabla 4.4: Estados y eventos de la unidad de coagulación.

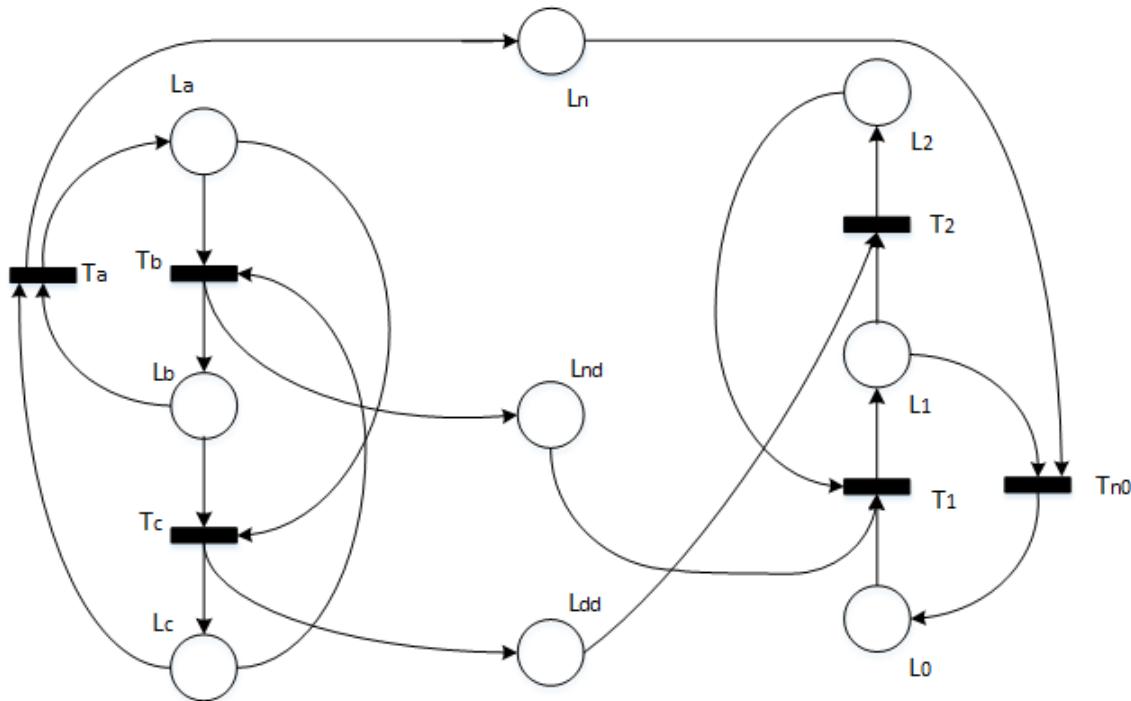


Figura 4.4: Red de petri de la unidad de coagulación.

4.2.2 Modelo de la Unidad de Sedimentación

En el caso de la unidad de sedimentación se hizo uso del programa de redes hidráulicas Epanet, con el fin de hacer uso de herramientas conocidas en el ámbito hidrológico, que incluyen algoritmos de cálculo matemático especializado en el área. Para llevar a cabo la emulación, se utilizaron longitudes reales de los tanques y tuberías presentes en la planta, según el plano de diseño suministrado. La unidad consta de dos sedimentadores con una entrada de agua floculada, una salida de agua decantada y una descarga de lodos para cada uno. (figura 4.5)

Al emular el comportamiento del tanque, se añaden válvulas de Control de Caudal (VCQ o FCV por sus siglas en inglés), para asignar el caudal según la información obtenida de la unidad anterior o las mediciones propias de la unidad de sedimentación; en un principio se fija el caudal de operación ideal (caudal de diseño, 150L/s para cada sedimentador). Se configuran también dos reglas simples de control de tanque para su

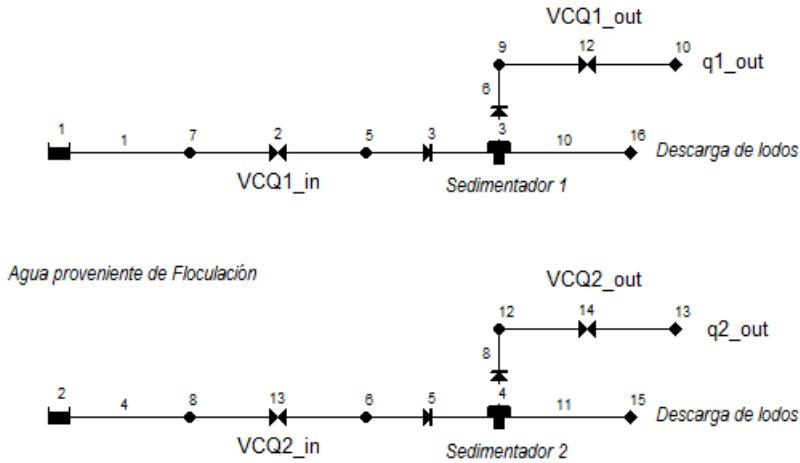


Figura 4.5: Estructura de la unidad de Sedimentación en Epanet.

mantenimiento, que consisten en la apertura y cierre de compuertas de lodos según los niveles de operación, los cuales se describen en la tabla 4.5.

Nivel	Altura (m)	Operación
max-max	3,65	Desborde
max	3,45	Apertura de compuerta de lodos
min	3,16	Mínimo de operación
min-min	2,65	Cierre de compuerta de lodos

Tabla 4.5: Condición de operación de la unidad de sedimentación.

Ya que el volumen el fluido es constante, un aumento al nivel max-max indica una acumulación en el fondo de lodos, por lo que se apertura la compuerta de vaciado. Entre los niveles min y max se define la operación normal, con flujo saliente al colector que va a la unidad de filtración. El nivel min-min indica el nivel mínimo de vaciado del tanque, por lo que se debe cerrar la compuerta de lodos y, en caso de no haber flujo de entrada, anunciar la parada de la unidad.

Los modelos discretos de la unidad de sedimentación se basan en los desarrollados en 3.2 para tanques. El modelo compuesto se presenta en la figura 4.6.

Estados		Eventos	
L_x	Altura máxima	T_x	$h > 3, 40m$
L_o	Altura de operación	T_o	$3, 20m \leq h \leq 3, 40m$
L_v	Altura en vacío	T_v	$2, 65m < h < 3, 40m$
L_m	Altura mínima	T_m	$h \leq 2, 65m$
L_{o1}	Tanque en operación	T_{o1}	Condiciones de operación
L_{x1}	Tanque saturado	T_{x1}	Condiciones de saturación
L_{v1}	Tanque en ciclo de vacío	T_{v1}	Condiciones para vaciar
L_{m1}	Tanque en mínimo	T_{m1}	Condiciones de mínimo
L_l	Tanque en ciclo de llenado	T_l	Condiciones para llenar
L_a	Compuerta abierta	T_a	Abrir compuerta
L_c	Compuerta cerrada	T_{fa}	Falla en apertura
-	-	T_c	Cerrar compuerta
-	-	T_{fc}	Falla en cierre

Tabla 4.6: Estados y eventos de la altura en el tanque.

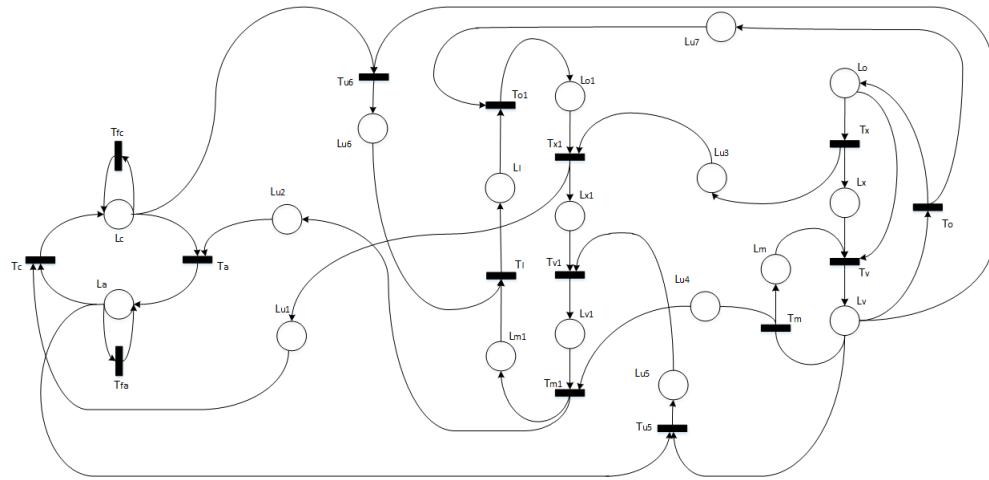


Figura 4.6: Red de petri de la unidad de sedimentación.

Utilizando epanet con condiciones ideales, se puede apreciar un ciclo de carga y descarga del tanque luego de aproximadamente 4 días de simulación en periodo extendido (figura 4.7).

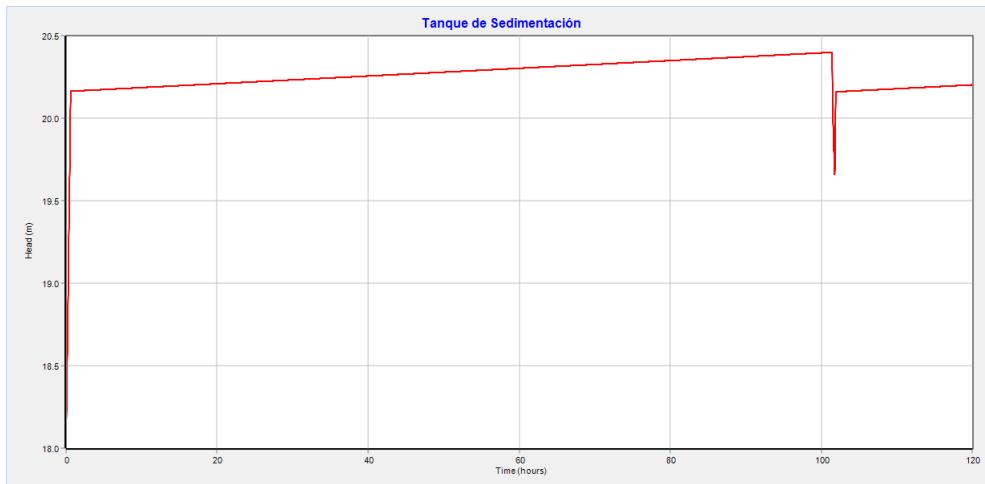


Figura 4.7: Comportamiento de la unidad de sedimentación en condiciones ideales.

La última parte de este capítulo define que la propuesta de gemelo digital está conformada por la instauración de los modelos discretos compuestos, emulados en MATLAB, junto con las condiciones operativas y modelos continuos emulados en epanet, tal y como lo expresa la extensión de Lygeros et al. (2012) en la sección 2.8, figura 2.26.

4.3 Escenarios de Prueba

Una vez condicionado el comportamiento de cada unidad, se realizó un programa matriz donde se emula el funcionamiento de las unidades en simultáneo. Con tal fin se utilizó a Epanet como motor para obtener las variables del proceso que incluye, según 2.8, los valores de campo más los valores del modelo para el análisis dinámico; mientras que la evolución de eventos se realizó en MATLAB. Para llevar a cabo la interconexión de archivos se utiliza la herramienta Epanet MATLAB Toolkit.

La metodología consiste en cargar el archivo MATLAB que contiene el modelo de dosis de coagulante, el Toolkit de Epanet con las funciones de manejo de redes hidráulicas y el archivo de Epanet para la unidad de sedimentación, cuya estructura será replicada por MATLAB, permitiendo la modificación de variables desde el entorno de simulación (figura 4.8).

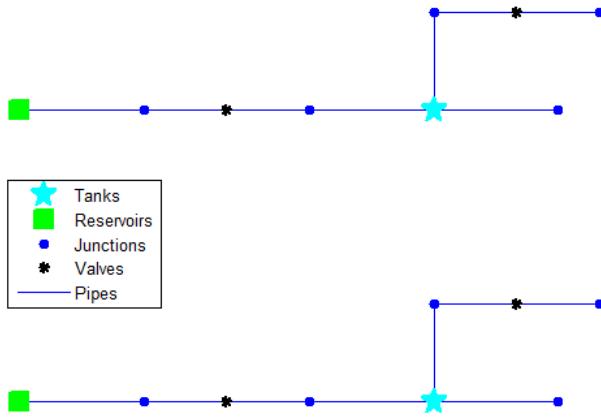


Figura 4.8: Replica de la unidad de sedimentación realizada en Epanet, desde MATLAB.

Se establecen los parámetros iniciales de caudal y se selecciona el conjunto de datos de turbidez del agua cruda a utilizar, de modo que el programa realice los cálculos necesarios de dosis y nivel para dar a conocer el estado de operación del sistema. Los datos iniciales son tomados de la planta real, agrupados en conjuntos de 24 horas, con tiempo de muestreo de una hora.

Escenario 1: En primera instancia se propone un escenario ideal, es decir que presente rangos bajos de turbidez, de modo que en el sedimentador se mantengan los lodos por debajo del nivel de mantenimiento durante más tiempo (tabla 4.5). Es utilizado uno de los conjuntos de datos cuya turbidez inicial máxima es de 5.5 NTU, este conjunto se replica durante cinco días ya que es el único que ofrece las características deseadas. El resultado se presenta en la figura 4.9, donde la descarga de lodos ocurre a las 102,2 horas, cerca de 4 días y 11 horas de funcionamiento continuo, coincidiendo con lo descrito por los operadores en planta (descarga de lodos cada cuatro días). Como se mencionó anteriormente, debido a los bajos niveles de turbidez no hay adición de coagulante.

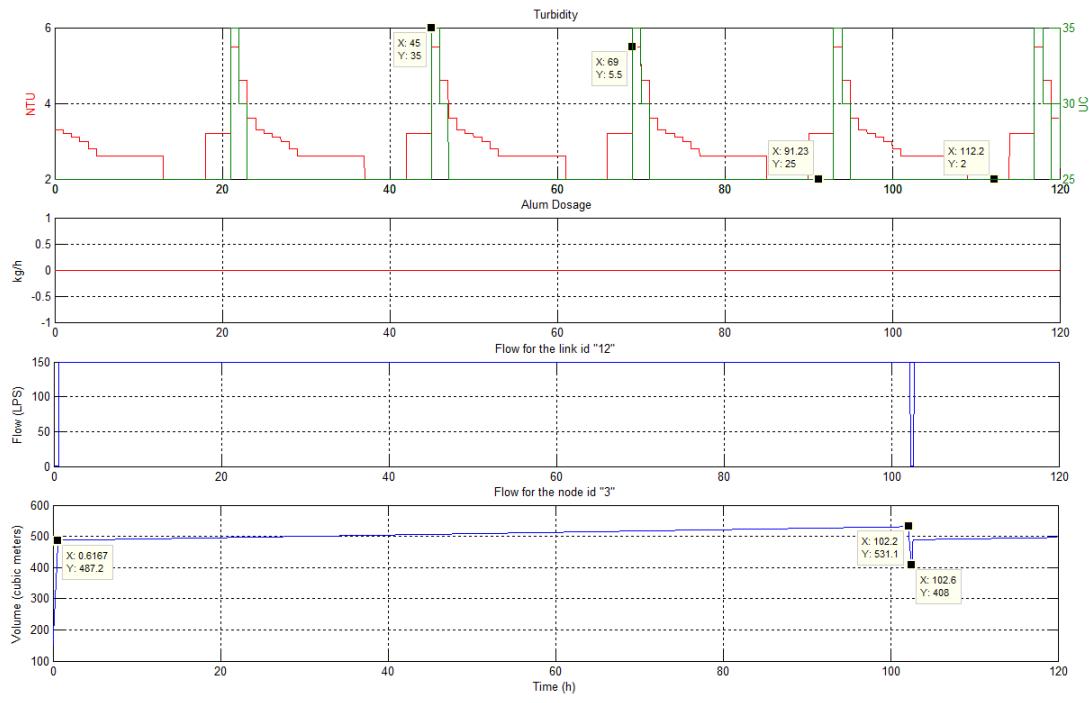


Figura 4.9: Escenario 1: Bajo nivel de turbidez y color inicial.

Escenario 2: Siguiendo los modelos de la unidad de coagulación descritos previamente, se propone un escenario donde la turbidez cubra un rango entre $1NTU$ y $99NTU$, de manera que se añada coagulante al proceso y los sedimentadores se colmaten más rápidamente (figura 4.10). En este caso el nivel máximo de turbidez se ubica en $53NTU$ con un color de $120UC$, con la inclusión de algunos valores de turbidez por debajo de $12NTU$, el sedimentador se colmata a las 64, 92 horas, aproximadamente 3 días y 14 horas de funcionamiento.

Escenario 3: Para el tercer escenario se supuso la entrada de agua con turbidez alta durante todo un día, esto para corroborar que en un caso dado el sedimentador cumpla con la descarga de lodos. Se utilizaron los datos superiores a $95NTU$ de la planta real, tomados como combinación de los conjuntos de datos iniciales. (figura 4.11) Con un nivel máximo de turbidez de $1500NTU$ y $9000UC$, la dosis de coagulante suministrada es de $252,8kg/h$ en la primera unidad, alcanzando que el sedimentador se colmate a las 24, 38 horas, aproximadamente 1 día y 10 horas.

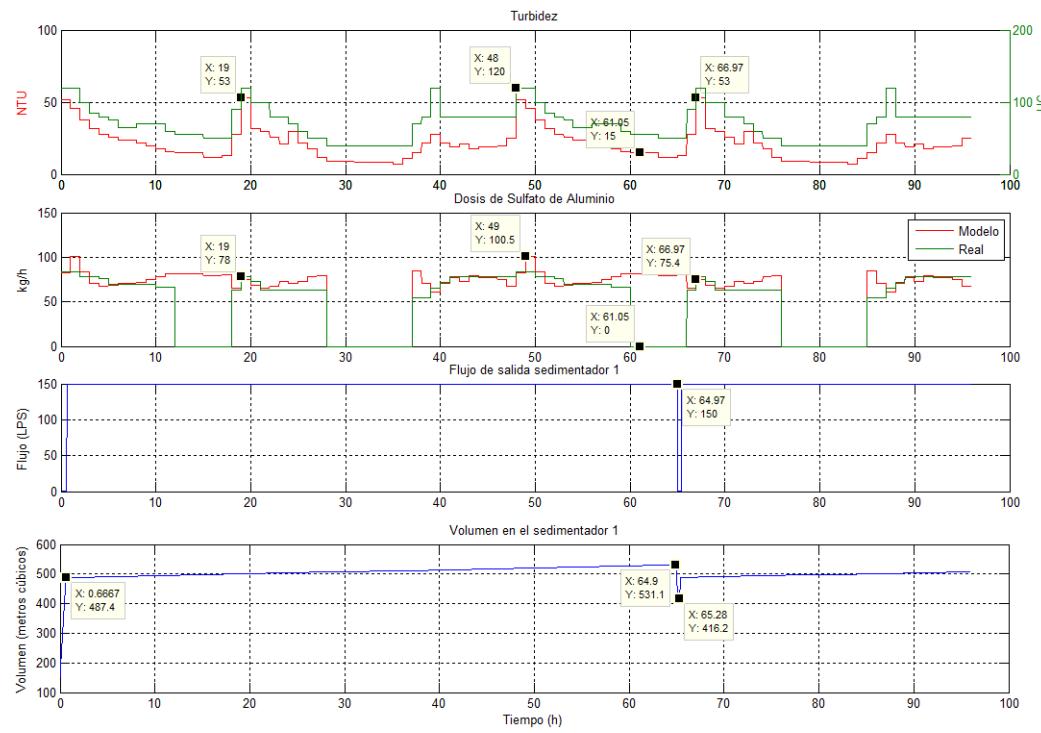


Figura 4.10: Escenario 2: Nivel bajo/medio de turbidez y color inicial.

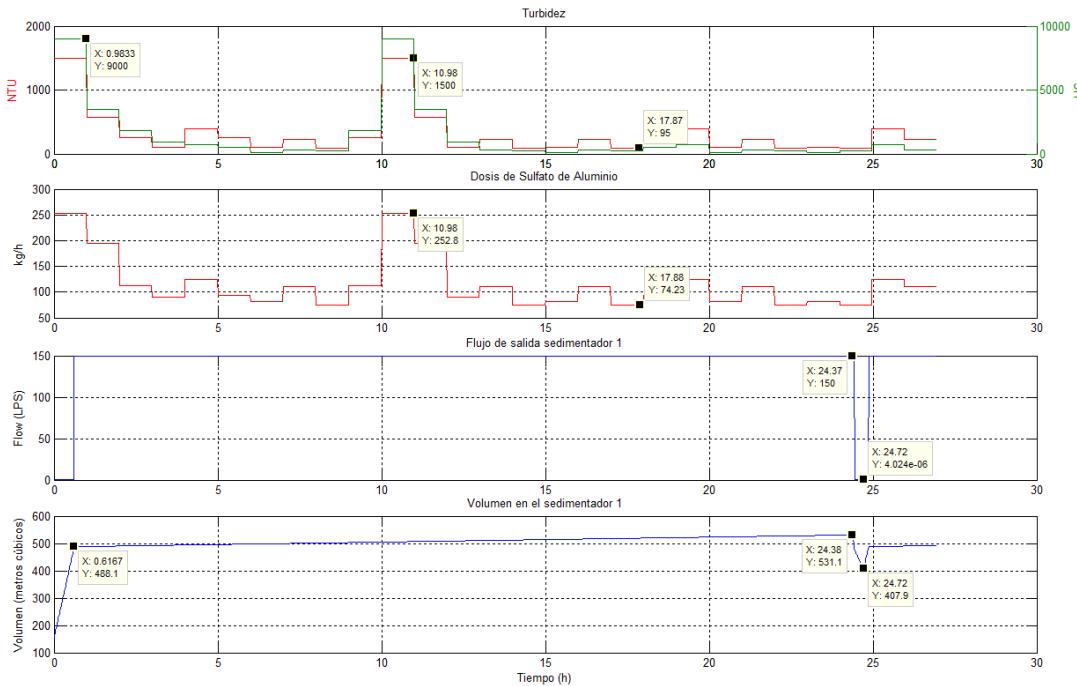


Figura 4.11: Escenario 3: Nivel alto de turbidez y color inicial.

Escenario 4: El cuarto escenario consiste en mostrar las dos opciones operativas desencadenadas por un nivel alto de turbidez en el agua entrante, considerando un rango alto a partir de $100NTU$ para la simulación. Este caso incluye el aumento de la dosis de coagulante como se observa en el escenario 3 o el cierre del flujo entrante, que eventualmente interrumpe la salida hacia los filtros. El actuar ante estas opciones depende exclusivamente de los lineamientos de la planta y la decisión del operador. Se utilizaron dos de los conjuntos de datos que contienen los rangos más altos de color y turbidez inicial; así en caso de mantener la compuerta de entrada a la planta abierta, se observa el aumento de coagulante que se debe añadir al proceso (figura 4.12), razón por la que coagulación se considera la unidad que mayor gasto puede generar en el tratamiento de agua.

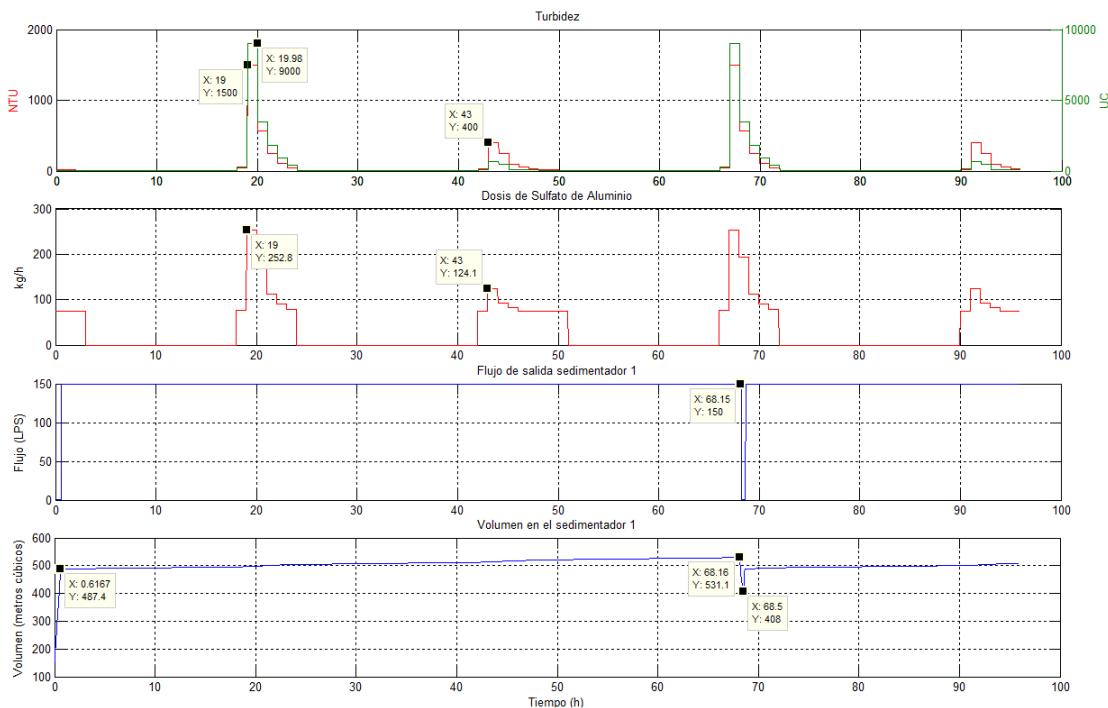


Figura 4.12: Escenario 4: Niveles altos de turbidez y color, con aumento de coagulante.

Si, por el contrario, al obtener valores altos de turbidez en la entrada la compuerta se cierra (figura 4.13), el sedimentador mantendrá el nivel justo debajo del canal recolector ($3,16m$) y se deberá avisar a la siguiente unidad para que active la parada.

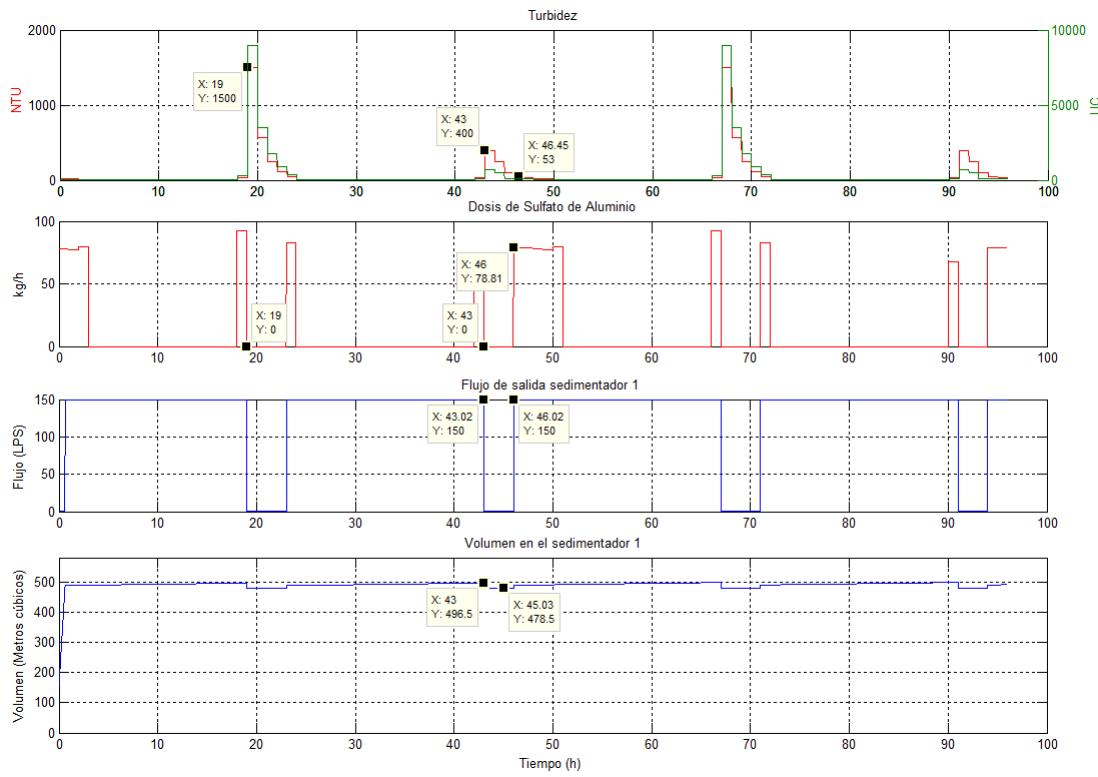


Figura 4.13: Escenario 4: Niveles altos de turbidez y color, con cierre de compuerta.

Escenario 5: Una vez descritos los escenarios predeterminados para un comportamiento ideal, en degradado y en falla, se toman aleatoriamente cuatro de los conjuntos de datos y se corre el programa para observar el comportamiento durante esos cuatro días. En el escenario 5.1 (figura 4.14), el tanque se satura al día 3 de simulación, con promedio de turbidez media. Se observa que en las mediciones reales, con turbidez de 15NTU, se adicionó coagulante al proceso; esto ocurre debido a que los operadores toman ciertas decisiones según su experticia, en este caso fuera del rango de comportamiento definido para el modelo. En el escenario aleatorio 5.2 (figura 4.15), se mantiene una turbidez media durante la mayoría del tiempo por lo que el tanque se satura de igual forma a los 3 días aproximadamente. Presenta un aumento de turbidez al final del ciclo que precisa de un aumento en la dosis de coagulante.

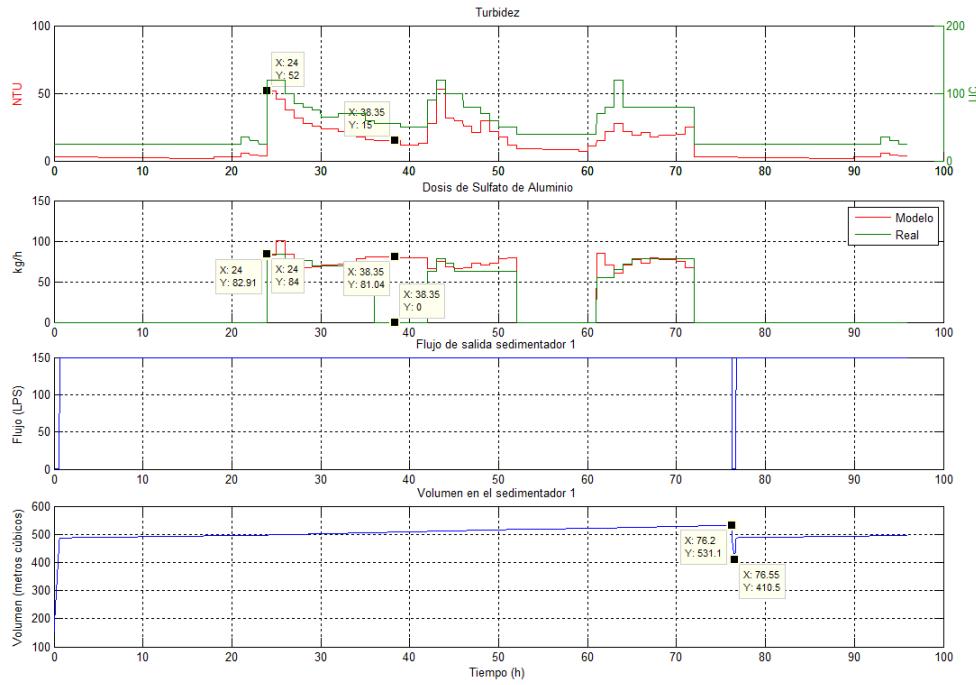


Figura 4.14: Escenario 5.1: Simulación de datos de entrada reales durante 4 días.

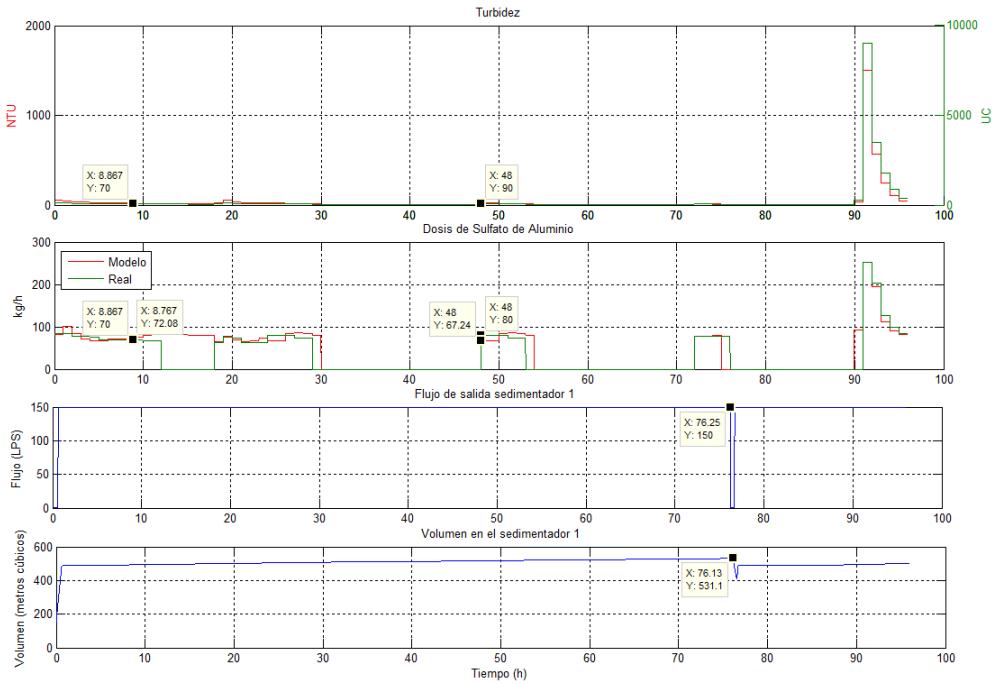


Figura 4.15: Escenario 5.2: Simulación de datos de entrada reales durante 4 días.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

Se determinaron los modelos de comportamiento de la unidad de potabilización.

Se establecieron condiciones de unión de los modelos obtenidos desde el punto de vista de eventos discretos.

Se generó un modelo de comportamiento general desde la visión de sistemas híbridos.

Se realizó la implementación de los modelos obtenidos para dos unidades del proceso, en un ambiente de simulación.

Se establecieron condiciones generales para desarrollar un gemelo digital del proceso e incorporarlas al ambiente de simulación. Esto incluye la propuesta de mejoría en la infraestructura de automatización (sensores, actuadores, mediante PLC, SCADA), requerida para obtener y hacer seguimiento del comportamiento en planta para el ajuste de los modelos.

Se debe destacar la relevancia de los modelos al momento de proponer un gemelo digital; es en ellos donde se almacena todo el conocimiento del proceso, lo que da pie a que se tomen decisiones basadas en condiciones, en pro de la eficiencia de la producción. La obtención de los modelos de cada unidad es clave para generar un gemelo digital del proceso de potabilización, así como también las mediciones en línea.

La implementación de un gemelo digital permite la planificación de modificaciones en la unidad, el seguimiento del comportamiento y gestión en la misma, y el uso de los datos obtenidos para programación y evaluación.

Se recomienda realizar la medición de la temperatura del flujo, debido a que es un parámetro influyente al momento de añadir químicos a un flujo. Conociendo el valor es posible que el modelo de dosificación de coagulante se ajuste mejor al proceso.

Capítulo 6

Anexos

6.1 Anexo A

Se presenta el formato de los valores con los que se trabajó el modelo para dosis de coagulante. Por motivos de confidencialidad no pueden ser adjuntados en su totalidad; se adjuntan un conjunto de datos usados para el caso ideal de turbidez baja, uno con turbidez media y uno con turbidez alta.

Horas	Parámetros Físico-Químicos						Dosisificación		
	Cruda	PH	Turbiedad (NTU)	Color (UC)	Alcalinidad Total (mg/L)	Cloro Residual (mg/L)	Gas Cloro	Sulfato de aluminio	Ca hidratada
	Cruda	Filtrada	Cruda	Filtrada	Cruda	Filtrada	kg/h	kg/h	kg/h
1	7,2	6,9	3,3	1,7	25	15	27	26	
2	7,2	6,9	3,2	1,6	25	15	27	26	
3	7,2	6,9	3,1	1,5	25	15	27	26	
4	7,2	6,9	3	1,5	25	15	27	26	
5	7,2	6,9	2,8	1,4	25	15	27	26	
6	7,2	6,9	2,6	1,4	25	15	27	26	
7	7,2	6,9	2,6	1,4	25	15	27	26	
8	7,2	6,9	2,6	1,4	25	15	27	26	
9	7,2	6,9	2,6	1,4	25	15	27	26	
10	7,2	6,9	2,6	1,4	25	15	27	26	
11	7,2	6,9	2,6	1,4	25	15	27	26	
12	7,2	6,9	2,6	1,4	25	15	27	26	
13	7,2	6,9	2,6	1,4	25	15	27	26	
14	7,2	6,9	2	1	25	15	27	26	
15	7,2	6,9	2	1	25	15	27	26	
16	7,2	6,9	2	1	25	15	27	26	
17	7,2	6,9	2	1	25	15	27	26	
18	7,2	6,9	2	1	25	15	27	26	
19	7,2	6,9	3,2	2,2	25	15	27	26	
20	7,2	6,9	3,2	2,2	25	15	27	26	
21	7,2	6,9	3,2	2,2	25	15	27	26	
22	7,2	6,9	5,5	3,5	35	20	27	26	
23	7,2	6,9	4,6	3,2	30	20	27	26	
24	7,2	6,9	3,6	2,1	25	15	27	26	

Figura 6.1: Conjunto de datos (1 día), turbidez baja.

Horas	Parámetros Físico-Químicos										Dosisificación		
	PH		Turbiedad (NTU)		Color (UC)		Alcalinidad Total (mg/L)		Cloro Residual (mg/L)		Gas Cloro	Sulfato de aluminio	Cal hidratada
	Cruda	Filtrada	Cruda	Filtrada	Cruda	Filtrada	Cruda	Filtrada	Cruda	Filtrada	kg/h	kg/h	kg/h
1	7,1	6,5	52	5,6	120	20	22	10	0,6	1,4	204	84	22
2	7,1	6,5	46	5,6	120	20	22	10	0,6	1,4	204	84	22
3	7,1	6,5	38	5,6	100	20	22	10	0,6	1,4	204	78	22
4	7,1	6,5	32	5,6	85	20	22	10	0,6	1,4	204	78	22
5	7,1	6,5	28	5,6	80	20	21	10	0,6	1,4	204	76	22
6	7,1	6,5	26	5,6	75	20	21	10	0,6	1,4	204	70	22
7	7,1	6,5	24	5,6	65	20	21	10	0,6	1,4	204	70	22
8	7,1	6,5	24	5,6	65	25	21	10	0,6	1,4	204	70	22
9	7,1	6,5	22	5,7	70	25	21	10	0,6	1,4	204	70	22
10	7,1	6,5	20	5,8	70	25	21	10	0,6	1,4	204	70	22
11	7,1	6,5	18	5,9	70	25	21	10	0,6	1,4	204	66	22
12	7,1	6,5	16	6	60	25	21	10	0,6	1,4	204	66	22
13	7,1	6,5	15	6,5	55	25	22	12	0,6	1,3	216		
14	7,1	6,8	15	6,7	55	25	22	14	0,6	1,3	225		
15	7,1	6,8	15	6,7	55	25	22	15	0,6	1,4	225		
16	7,1	6,8	12	6	50	25	24	16	0,6	1,4	250		
17	7,1	6,8	12	6	50	25	24	16	0,6	1,4	250		
18	7,1	6,8	13	7	50	25	24	20	0,6	1,3	204		
19	7,1	6,8	28	3	90	15	23	21	0,6	1,3	204		
20	7,1	6,6	53	3	120	10	23	19	0,6	1,3	204	63	22
21	7,1	6,5	32	3	100	10	23	17	0,6	1,3	204	78	22
22	7,1	6,6	30	3	100	10	23	15	0,6	1,3	204	63	22
23	7,1	6,6	26	4	80	10	23	15	0,6	1,3	204	63	22
24	7,1	6,6	21	4	80	15	23	14	0,6	1,3	204	63	22

Figura 6.2: Conjunto de datos (1 día), turbidez media.

Horas	Parámetros Físico-Químicos						Dosisificación					
	PH		Turbiedad (NTU)		Color (UC)		Alcalinidad Total (mg/L)		Cloro Residual (mg/L)		Gas Cloro	
	Cruda	Filtrada	Cruda	Filtrada	Cruda	Filtrada	Cruda	Filtrada	Cruda	Filtrada	kg/h	kg/h
1	7,2	6,7	18	4	60	10	25	14	0,8	1,3	204	78
2	7,2	6,7	19	4	60	10	25	14	0,8	1,3	204	78
3	7,2	6,6	12	4	50	10	25	14	0,8	1,3	204	78
4	7,2	6,5	10	4	50	10	25	14	0,8	1,3	204	78
5	7,2	6,9	8	4	40	20	25	23	0,8	1,3	204	78
6	7,2	6,9	7	4	40	20	25	23	0,8	1,3	227	
7	7,2	6,9	6	4	40	20	25	23	0,8	1,3	227	
8	7,2	6,9	5,7	4,2	40	20	25	23	0,8	1,3	227	
9	7,2	6,9	5,7	4,2	40	20	25	23	0,6	1,3	227	
10	7,2	6,9	5,7	4,2	40	20	25	23	0,6	1,3	227	
11	7,2	6,9	5,7	4,2	40	20	25	23	0,6	1,3	227	
12	7,2	6,9	5,7	4,2	40	20	25	23	0,6	1,3	227	
13	7,2	6,9	6,5	4,4	40	20	25	23	0,6	1,3	227	
14	7,2	6,9	6,5	4,4	40	20	25	23	0,6	1,3	227	
15	7,2	6,9	6,2	4,2	40	20	25	23	0,4	1,3	250	
16	7,2	6,9	6,2	4,2	40	20	25	23	0,4	1,3	250	
17	7,2	6,9	6	4	40	20	25	23	0,4	1,2	250	
18	7,2	6,9	6	4	40	20	25	23	0,8	1,2	250	
19	7,2	6,8	40	3	300	15	25	18	0,8	1,2	227	
20	7	6,6	1500	5	9000	25	23	14	0,8	1,2	227	
21	7	6,5	570	4	3500	20	23	14	0,8	1,2	227	168+84
22	6,9	6,5	250	4	1800	20	22	14	0,8	1,2	227	168+36
23	7	6,6	110	4	900	20	23	14	0,8	1,2	227	126
24	7	6,6	50	4	400	20	23	14	0,8	1,2	227	100
												84

Figura 6.3: Conjunto de datos (1 día), turbidez alta.

6.2 Anexo B

Las mediciones de calidad de agua se realizan principalmente con los instrumentos descritos en la tabla 6.1.

Instrumento	Función	Funcionamiento
Turbidímetro (NTU)	Medición de turbidez en el agua. Determina la cantidad de sustancias en un líquido, se emplea en la medición de partículas en suspensión en un líquido o gas disuelto	Detección de las partículas con una fuente de haz lumínico y un detector de luz fijado a 90 grados del haz original.
pHmetro (pH)	Medición de la actividad del ion hidrógeno en soluciones acuosas, indicando su grado de acidez o alcalinidad expresada como pH.	Medición de la diferencia de potencial eléctrico entre un electrodo de pH y un electrodo de referencia.
Medidor de Cloro Amperométrico (mg/L)	Detección de la cantidad de cloro libre residual del agua tratada.	Medición amperométrica con potencial constante, hecho a través de dos electrodos, de metal y un electrodo de referencia. La corriente consume el contenido de cloro, por lo que se necesita un sistema de circulación.
Espectrofotómetro (UPC)	Detección del color mediante la medición de la cantidad de luz transmitida a través de la muestra.	Se produce un rango deseado de longitud de onda de luz que pasa a través de la muestra y, mediante un fotómetro, se detecta la cantidad de fotones absorbidos.

Tabla 6.1: Descripción de instrumentos de medición.

Bibliografía

- Alarcón, A., Malagón, E., and Snyder, V. (2018). Digitalización: una revolución para el sector hidroeléctrico. Disponible en: <https://blogs.iadb.org/energia/es/3262/>.
- Antsaklis, P., Koutsoukos, X., and Zaytoon, J. (1998). On hybrid control of complex systems: A survey. *Journal européen des systèmes automatisés*, 32(9–10):1023–1045.
- Antsaklis, P. J. and Koutsoukos, X. D. (2003). Hybrid systems: Review and recent progress. *Software-Enabled Control: Information Technology for Dynamical Systems*, pages 273–298.
- Apostol, G., Kouachi, R., and Constantinescu, I. (2011). Optimization of coagulation-flocculation process with aluminum sulfate based on response surface methodology. *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*, 73.
- Bazer-Bachi, A., Puech-Coste, E., Ben Aim, R., and Probst, J. (1990). Modélisation mathématique du taux de coagulant dans une station de traitement d'eau. *Rev. Sci. Eau*.
- Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J., and Watson, T. (2018). The industrial internet of things (iiot): An analysis framework. *Computers in Industry*, 101:1–12.
- Branicky, M., Borkar, V., and Mitter, S. (1998). A unified framework for hybrid control: model and optimal control theory. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 43:31–45.
- Cabello, F., Vallejos, O., Guevara, E., and Ayros, E. (2016). Análisis comparativo de los parámetros de diseño de una toma tipo tirolesa y una convencional. XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Lima, Perú.

- Cassandras, C. G. and Lafourture, S. (2009). *Introduction to discrete event systems*. Springer Science & Business Media.
- Chacón, E., Cardillo, J., Chacón, R., and Zapata, G. (2012). *Online Production Scheduling and Re-Scheduling in Autonomous, Intelligent Distributed Environments*.
- Chacón, E., Cardillo, J., and Cruz, L. (2018). The control of water distribution systems as an holonic system.
- Chacón, E., Cruz, L., Jiménez, J., and Cardillo, J. (2019). A control architecture for continuous production processes based on i 4.0: Application to water supply systems.
- Cooper (2001). Historical aspects of wastewater treatment. *Decentralised Sanitation and Reuse*.
- Correa Uribe, G., Rosero, S., and Segura, H. (2009). Diseño de un modelo de gestión del conocimiento para la escuela interamericana de bibliotecología. *Revista Interamericana de Bibliotecología*, 31(1):85–108.
- Cruz Jimenez, B. and Lara Caballero, E. (2007). Control híbrido de un sistema electromecánico de llenado de botellas. Congreso Nacional de Control Automático A.M.C.A.
- Del Val Román, J. L. (2016). Industria 4.0: la transformación digital de la industria. In *Valencia: Conferencia de Directores y Decanos de Ingeniería Informática, Informes CODII*.
- Eliades, D. G., Kyriakou, M., Vrachimis, S., and Polycarpou, M. M. (2016). Epanet-matlab toolkit: An open-source software for interfacing epanet with matlab. In *Proc. 14th International Conference on Computing and Control for the Water Industry (CCWI)*, page 8, The Netherlands.
- Farhaoui, M., Hasnaoui, L., and Derraz, M. (2016). Optimization of drinking water treatment process by modeling the aluminum sulfate dose. *British Journal of Applied Science and Technology*, 17:1–14.

Gonzalez, M. (2016). Teoría de sedimentación ii (sedimentadores lamelares). Disponible en: <http://www.tratamientodelagua.com.mx/sedimentadores-lamelares/>. ENEXIO 2H Water Technologies GmbH.

Hermann, M., Pentek, T., and Otto, B. (2015). Design principles for industrie 4.0 scenarios: A literature review. Disponible en: <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.29269.22248>.

Hitachi. *Water Supply Operation System*.

Hudson, N. (1997). *Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía*, volume 68, chapter 4. Food & Agriculture Org.

Indriago, M. (2008). Modelo y simulación de sistemas híbridos en procesos industriales.

Jaramillo, D. C. P. (2014). *Documentación de los procesos operativos para la potabilización de agua en la planta de tratamiento de Villasantana bajo la norma NTC-GP 1000: 2009*. PhD thesis, Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Química Industrial.

Lemmon, M., He, K., and Markovsky, I. (1999). Supervisory hybrid systems. *Control Systems, IEEE*, 19(4):42–55.

Lennartson, B., Egardt, B., and Tittus, M. (1994). Hybrid systems in process control. In *Decision and Control, 1994., Proceedings of the 33rd IEEE Conference on*, volume 4, pages 3587–3592. IEEE.

León-Luque, A., Barajas, C., and Peña-Guzmán, C. (2016). Determination of the optimal dosage of aluminum sulfate in the coagulation-flocculation process using an artificial neural network. *International Journal of Environmental Science and Development*, 7(5):346.

Li, Q., Tang, Q., Chan, I., Wei, H., Pu, Y., Jiang, H., Li, J., and Zhou, J. (2018). Smart manufacturing standardization: Architectures, reference models and standards framework. *Computers in Industry*, 101:91–106.

Lietha, V. (2018). La revolución inteligente del agua. *ABB Review*.

- Lofrano, G. and Brown, J. (2010). Wastewater management through the ages: A history of mankind. *The Science of the total environment*, 408:5254–64.
- Lygeros, J., Sastry, S., and Tomlin, C. (2012). Hybrid systems: Foundations, advanced topics and applications. *under copyright to be published by Springer Verlag*.
- Mahla, I. (2004). Sistemas híbridos. Disponible en: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=158>.
- Manna, Z. and Pnueli, A. (1993). Verifying hybrid systems. In Grossman, R., A., N., Ravn, A., and Rischel, H., editors, *Hybrid Systems*, pages 4–35. Springer.
- Marr, B. (2019). 7 amazing examples of digital twin technology in practice. Disponible en: <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2019/04/23/7-amazing-examples-of-digital-twin-technology-in-practice>.
- MathWorks. Matlab. Disponible en: <https://la.mathworks.com>.
- Méndez, C. A., Cerdá, J., Grossmann, I. E., Harjunkoskic, I., and Fahlc, M. (2006). State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes. *Computers & Chemical Engineering*, 30(6–7):913–946.
- Monostori, L., Kadar, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., Sauer, O., Schuh, G., Sihn, W., and Ueda, K. (2016). Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65:621–641.
- Moteff, J. and Parfomak, P. (2004). Critical infrastructure and key assets: definition and identification. LIBRARY OF CONGRESS WASHINGTON DC CONGRESSIONAL RESEARCH SERVICE.
- Mrosik, J. (2018). Era digital, la visión de un ceo global. *AADeca*.
- Perez, A. (2015). Implementación de un controlador automático programable, basado en unidad de producción holónica, utilizando tecnología no industrial.
- Pérez, F., Irisarri, E., Orive, D., Marga, M., and Estevez, E. (2015). A cpps architecture approach for industry 4.0. *2015 IEEE 20th Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, pages 1–4.

Perez, F. and Urrea, M. Abastecimiento de aguas. Universidad Politécnica de Cartagena.

Pinos Guillén, G. M. (2016). Análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad a los equipos críticos de la planta de tratamiento de agua potable sustag de etapa ep. Master's thesis, Universidad del Azuay.

Rojas Coronel, J. E. (2015). Modelamiento de los sistemas de potabilización de agua, orientado al diseño de los sistemas de control supervisorio, caso emapal ep-azogues. Master's thesis.

Rossmann, L. (2001). *EPANET 2 Manual de Usuario*. Water Supply and Water Resources Division.

Rouse, M. (2012). Análisis de datos. Disponible en:
<https://searchdatacenter.techtarget.com/es/definicion/Analisis-de-Datos>.

Schroeder, G. N., Steinmetz, C., Pereira, C. E., and Espindola, D. B. (2016). Digital twin data modeling with automationml and a communication methodology for data exchange. *IFAC-PapersOnLine*, 49(30):12–17.

SENA (1999). *Operación y Mantenimiento de Plantas de Potabilización de Agua*. Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA.

Symons, G. E. (2006). Water treatment through the ages. *Journal - AWWA*, 98(3):87–98.

Thoben, K.-D., Wiesner, S., and Wuest, T. (2017). Industrie 4.0 and smart manufacturing - a review of research issues and application examples. *International Journal of Automation Technology*, 11:4–19.

Tittus, M. and Lennartson, B. (1999). Hierarchical supervisory control for batch processes. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 7(5):542–554.

Van Der Schaft, A. J. and Schumacher, J. M. (2000). *An Introduction to Hybrid Dynamical Systems*, volume 251. Springer London.

WEF (2018). Harnessing the fourth industrial revolution for water. Technical report, World Economic Forum.