

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

Escuela de Posgrado



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

DESARROLLO DE UN CONTROLADOR INTELIGENTE PARA UN BASTIDOR DE OSMOSIS INVERSA DE UNA PLANTA DESALINIZADORA DE AGUA DE MAR

Tesis para optar por el grado de
Magíster en Ingeniería de Control y Automatización

Autor:

Ing. DIEGO PAÚL UGARTE DÍAZ

Asesor:

Dr. JAVIER SOTOMAYOR MORIANO

Miembros del Jurado:

Dr. Luis Vilcahuamán

Dr. Antonio Morán

LIMA-PERÚ

2016

Dedicatoria:

A mis padres y hermano por apoyarme y motivarme en los momentos más difíciles.



Agradecimientos:

A mi asesor, el Dr. Javier Sotomayor, quien me guió de forma correcta para el desarrollo de este trabajo de investigación. A su vez, un agradecimiento especial al Dr. Antonio Morán por su aporte en lógica difusa.



RESUMEN

En la actualidad, la desalinización de agua constituye una respuesta prometedora a la escasez de agua mundial. Por este motivo, es necesario presentar alternativas de solución y uso eficiente de nuevas tecnologías que permitan desalinizar agua de mar para hacer frente a la escasez que vendrá en los próximos años.

En el proceso de desalinización de agua de mar se utilizan varias técnicas como son la destilación flash multietapa, destilación por múltiple efecto, destilación por compresión de vapor y la osmosis inversa, siendo esta última la que ha ganado mayor terreno en la industria de la desalinización ya que opera rechazando normalmente el 99% de las sales del agua de alimentación.

Por otro lado, a pesar de que la osmosis inversa es la técnica que menos energía consume, en muchos casos no se ha trabajado con una estrategia de control adecuada, generando un funcionamiento deficiente de la planta. Esto tiene como consecuencia que el grado de pureza del agua desalinizada no cumpla con los estándares establecidos para consumo humano.

El Perú, a pesar de sus cuantiosos recursos hídricos, presenta problemas de escasez de agua debido a la mala distribución de dichos recursos y a la geografía adversa. Según la Organización Internacional del Agua, en el 2025 el Perú será uno de los países más afectados en Latinoamérica ya que sufrirá de estrés hídrico permanente.

Por tal motivo, se hace imprescindible una política que permita implementar plantas desalinizadoras a nivel de toda la costa y de otros lugares que lo requieran en el país. Para ello, es necesario desarrollar una técnica de control que permita manipular el proceso de desalinización de manera eficiente y que considere el comportamiento dinámico complejo de este sistema multivariable que no puede ser manipulado de forma correcta mediante técnicas tradicionales de control.

Por otro lado, se necesita hallar un modelo adecuado que represente la dinámica del sistema, siendo muchas veces difícil de obtenerlo de manera precisa. En este sentido, las técnicas de control inteligente resultarían adecuadas ya que tienen la capacidad para actuar de forma apropiada sobre un entorno incierto de manera eficiente y flexible, ofrecen eficiencia computacional y dotan al control de “cierta inteligencia” para evitar comportamientos del sistema provocados por sus características no lineales. Dentro de las técnicas inteligentes se tienen las redes neuronales, lógica difusa y algoritmos genéticos.

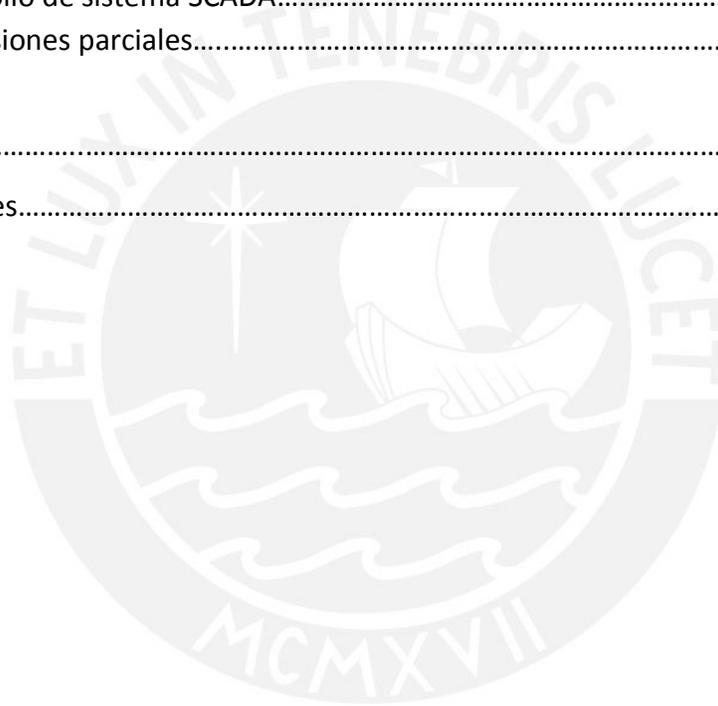
Es por ello que, mediante el uso de técnicas de control avanzado se buscará desarrollar, en este trabajo, un sistema de control inteligente para una unidad de osmosis inversa eligiendo un modelo matemático que describa adecuadamente la dinámica del proceso. Asimismo, se presenta una comparativa entre el desempeño del controlador propuesto y controladores clásicos para justificar el uso del control avanzado. Posteriormente, se realiza una propuesta de implementación basada en una aplicación en PLC ControlLogix5000 de Allen Bradley.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1: ESTUDIO DE LAS TECNOLOGÍAS Y ESTADO DEL ARTE DEL CONTROL PARA LA DESALINIZACIÓN DE AGUA DE MAR POR OSMOSIS INVERSA.	
1.1 Introducción.....	4
1.2 Tecnologías para la desalinización de agua.....	5
1.3 Sistemas de control inteligente en plantas desalinizadoras de agua de mar mediante la técnica de osmosis inversa.....	10
1.4 Objetivos de la tesis.....	25
CAPÍTULO 2: PROCESO DE DESALINIZACIÓN DE AGUA DE MAR POR OSMOSIS INVERSA Y MODELADO MATEMÁTICO DE UN BASTIDOR DE OSMOSIS INVERSA DE UNA PLANTA DESALINIZADORA DE AGUA DE MAR.	
2.1 Introducción.....	27
2.2 Descripción del proceso de osmosis inversa y modelado matemático de un bastidor de osmosis inversa de una planta desalinizadora de agua de mar	28
2.2.1 Etapas del proceso de desalinización por osmosis inversa.....	29
2.3 Modelado matemático de un bastidor de ósmosis inversa de una planta desalinizadora de agua de mar.....	33
CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL CONTROLADOR INTELIGENTE PARA UN BASTIDOR DE OSMOSIS INVERSA DE UNA PLANTA DESALINIZADORA DE AGUA DE MAR.	
3.1 Introducción.....	42
3.2 Fundamentación de la estrategia de control a utilizar.....	42
3.3 Diseño de controlador difuso para un bastidor de osmosis inversa.....	47
3.3.1 Diseño de las reglas difusas para el control de flujo.....	54
3.3.2 Diseño del control de conductividad.....	59
3.3.3 Resultados de simulación del controlador diseñado.....	60
3.3.4 Comparativa entre el controlador propuesto y control clásico.....	68
3.4 Conclusiones parciales.....	77

CAPÍTULO 4: PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA DEL CONTROLADOR INTELIGENTE PARA UN BASTIDOR DE OSMOSIS INVERSA DE UNA PLANTA DESALINIZADORA DE AGUA DE MAR.

4.1 Introducción.....	79
4.2 Hardware de control propuesto.....	79
4.2.1 Controlador PLC ControlLogix5000.....	79
4.2.2 Configuración del sistema de control propuesto.....	80
4.3 Algoritmo de control para el bastidor de osmosis inversa.....	80
4.4 Software para el funcionamiento del PLC.....	83
4.5 Resultados de programación en PLC.....	84
4.6 Desarrollo de sistema SCADA.....	86
4.7 Conclusiones parciales.....	87
Conclusiones.....	88
Recomendaciones.....	89



INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento esencial en la vida de las personas. Es conocido también que la cantidad de agua dulce existente en el planeta es limitada y preservar su calidad es importante para el suministro de agua potable, agricultura e industria.

Actualmente, el Perú presenta problemas de escasez de agua debido a la mala distribución de los recursos hídricos, calentamiento global y crecimiento poblacional. Un caso particular es la ciudad de Lima, donde el agua no abunda. Los asentamientos humanos y distritos al sur de Lima deben esperar a que pase un camión cisterna para venderles agua a precios exorbitantes.

Por lo tanto, el Perú debe aprovechar de forma eficiente el mar que bordea sus costas pues una forma de obtener agua potable es mediante la desalinización de agua marina. SEDAPAL mediante el fondo PROVISUR ha dado en concesión por 20 años a la empresa española TEDAGUA la construcción de una planta desalinizadora por osmosis inversa para beneficiar a los distritos de San Bartolo, Punta Hermosa, Punta Negra y Santa María del Mar cuyo estudio técnico, construcción y entrega será en los años, 2015, 2016 y 2017 respectivamente.

La desalinización de agua de mar constituye un objetivo de gran dimensión y desarrollo para el Perú, debido a que es mucho más barato y rentable que el traslado de agua potable desde la sierra del país hacia las ciudades y zonas agrícolas de la costa. Sin embargo, las plantas desalinizadoras son muy complejas y se requiere de especialistas en el campo del control y automatización para garantizar condiciones óptimas de operación con el fin de lograr costos mínimos de producción, así como un adecuado mantenimiento para una mayor vida útil de la planta.

Por ello, el presente documento busca el control efectivo de un bastidor de osmosis inversa de una planta desalinizadora de agua de mar para obtener agua desalada de calidad para consumo humano de acuerdo a los estándares establecidos.

El objetivo principal de este estudio es el diseño y propuesta de implementación de un controlador inteligente, el cual debe mostrar las diversas ventajas que posee frente a los controladores tradicionales para justificar el uso del mismo.

En el capítulo 1 se presenta una introducción sobre el problema de escasez de agua, las técnicas de desalinización más utilizadas en la industria y en particular el estado del arte de los sistemas de control inteligente aplicados en plantas desalinizadoras de agua de mar por osmosis inversa.

En el capítulo 2 se explica de forma detallada el proceso de desalinización por osmosis inversa que va desde la captación de agua de mar hasta la obtención del agua desalada. Se menciona las características particulares de cada etapa y además se presenta el estado del arte del modelado de un bastidor de osmosis inversa.

En el capítulo 3 se fundamenta el uso del control inteligente para resolver de forma efectiva el problema de control de un bastidor de osmosis inversa. Asimismo, se detallan las características, la base matemática y el diseño del controlador a desarrollar para luego comparar su desempeño frente a un controlador clásico.

El capítulo 4 presenta el esquema para el sistema de control propuesto, el diagrama de flujo del algoritmo de control inteligente diseñado, así como la propuesta de implementación en un PLC Allen Bradley ControlLogix5000.

Finalmente, se presentan los resultados y conclusiones de la investigación haciendo énfasis en los logros alcanzados y recomendaciones para una futura implementación.



CAPÍTULO 1

ESTUDIO DE LAS TECNOLOGÍAS Y ESTADO DEL ARTE DEL CONTROL PARA LA DESALINIZACIÓN DE AGUA DE MAR POR OSMOSIS INVERSA.

1.1 Introducción

La desalinización de agua constituye una respuesta prometedora a la escasez de agua mundial. Actualmente muchas regiones del planeta presentan un severo problema de escases de agua, el cual se va incrementando debido a diversos factores como son el crecimiento poblacional, desarrollo industrial y cambios climáticos (Rivas-Pérez et al., 2008). Es conocido también que el 98% del agua del planeta se encuentra en los océanos, los cuales son una verdadera e inagotable reserva de agua la cual puede ser aprovechada mediante diversos procesos para obtener agua desalinizada y combatir dicha escasez (Ramillo et al., 2003).

E Perú, que posee cuantiosos recursos hídricos, presenta problemas de escasez de agua debido a la mala distribución de dichos recursos, deshielo de los glaciares por efecto del calentamiento global y crecimiento poblacional, lo que ocasionará que, con el correr de los años, la situación se agrave aún más.

Por este motivo, es necesario presentar alternativas de solución y uso eficiente de nuevas tecnologías que permitan desalinizar agua de mar para hacer frente a la escasez de agua que vendrá en los próximos años.

La desalinización de agua de mar constituye una técnica que ha devuelto la esperanza a numerosos pueblos que veían como sus recursos hídricos inexorablemente se iban agotando, limitando por tanto su desarrollo e incluso su supervivencia (Medina San Juan, 2000).

Las plantas desalinizadoras son la principal fuente de abastecimiento de agua de los países del Golfo Pérsico, en las islas del Caribe y el mar Mediterráneo, así como otras partes del planeta. En la figura 1.1 se muestra el diagrama de una planta desalinizadora de agua de mar por osmosis inversa.

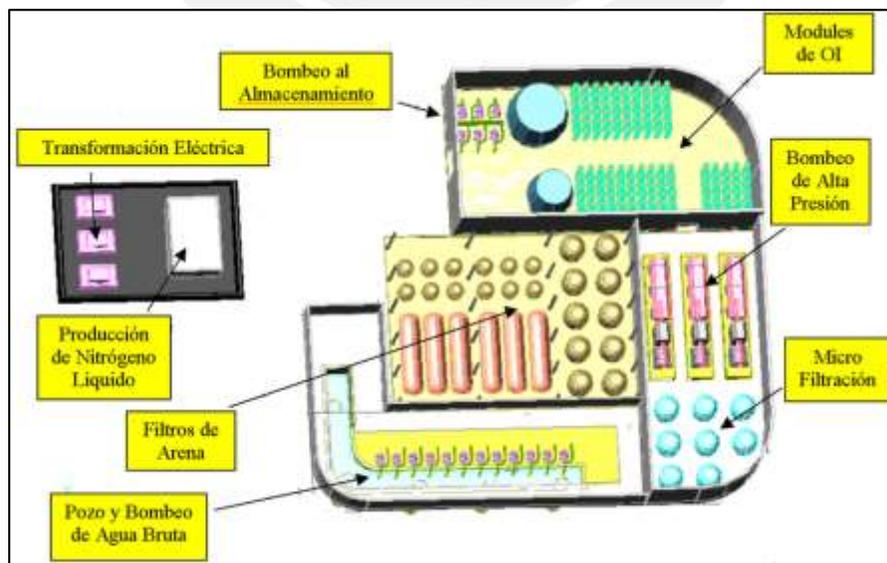


Figura 1.1 Planta desalinizadora de agua de mar por osmosis inversa. [1]

La desalinización de agua de mar es un proceso mediante el cual se elimina la sal del agua de mar o agua salobre. Dicho proceso a nivel industrial tiene sus inicios en la primera parte del siglo XX.

Sin embargo, la expansión y propagación de la industria desalinizadora ocurre entre 1960 a 1980 (El Dessouky et al, 1999). Durante este periodo, la tecnología utilizada para desalinizar agua fue la destilación flash multietapa, más conocida por sus siglas en inglés, MSF, cuyo estándar industrial, para ese tiempo, consistía en una planta con 24 etapas y una capacidad de producción de 6migd (1migd = 3810 metros cúbicos por día) (Al-Shuaib et al, 1999).

Para las 2 décadas siguientes (1980-1999) empezó a utilizarse la técnica de osmosis inversa (RO por sus siglas en inglés), la cual empezó a ganar terreno en el campo de la desalinización de agua debido al progreso ocurrido en el desarrollo de membranas semipermeables con altos flujos, operación a presiones relativamente bajas y capaces de soportar las duras condiciones del agua de mar de alimentación y salmuera (Baker, 2004).

Otras tecnologías que son aplicadas a la desalinización de agua son la destilación por múltiple efecto y la destilación por compresión de vapor. Sin embargo; el mercado actual se encuentra constituido por un 55% de plantas desalinizadoras MSF y un 35% por osmosis inversa dejando a las dos anteriores tecnologías para aplicaciones específicas (Alatqi et al., 1999).

1.2 Tecnologías para desalinización de agua

En la actualidad son varias las tecnologías que se utilizan para desalinizar agua de mar y salobre. Dichas tecnologías se dividen en dos grupos: Procesos térmicos y procesos de membranas.

Entre los principales procesos térmicos están: la destilación MSF o flash multietapa, la destilación MED o de múltiple efecto y la destilación por compresión de vapor. La tecnología que utiliza membranas para la desalinización de agua de mar es la osmosis inversa. Otro proceso conocido es la electrodiálisis, la cual es normalmente usada en la desalinización de agua salobre. A continuación se detalla cada una de estas técnicas (Ramillo, 2003).

■ Destilación flash multietapa (MSF)

Este método se basa en el principio de que al reducir abruptamente la presión del agua de mar por debajo de su presión de vapor de equilibrio, ocurre una evaporación súbita o una ebullición explosiva de la misma. Esto normalmente se logra introduciendo el agua de mar, previamente calentada a temperatura de ebullición con vapor de una fuente externa, en una cámara a través de un orificio de forma tal de reducir así su presión. Debido a la naturaleza violenta y turbulenta de la evaporación, el área de la superficie del agua expuesta aumenta beneficiándose así la producción de vapor. El vapor así producido pasa a través de “demisters” (desnebulizadores), que es un dispositivo empleado en tecnología de procesos e ingeniería química para la separación de un líquido, presente en forma de finas gotas) donde se despoja de las gotas de salmuera que arrastra. Este vapor es condensado luego

sobre la superficie de tubos que alimentan el agua de mar a la planta. El agua de mar alimentada a la planta es precalentada también de esta forma con el calor cedido por el vapor durante la condensación del agua desalinizada producto.

En este proceso la temperatura del agua de mar es llevada a casi 100°C en una cámara denominada “sector de calentamiento” y se le conoce como temperatura “top”, la cual debe estar entre 90°C - 110°C pues el aumento de la temperatura del agua de mar en esta etapa está determinado por la optimización del costo de producción del agua en función de un término llamado GOR (“gain output ratio”) y del número de etapas. El GOR es la relación entre la producción de agua y el consumo de vapor.

El agua de mar así calentada pasa luego hacia otra cámara denominada primera etapa. La presión de esta cámara es menor que la anterior, siendo correspondiente a la de saturación del agua de alimentación que inicia inmediatamente el proceso de ebullición. El vapor condensado es colectado y enviado a la etapa siguiente donde se repite el proceso de evaporación-condensación. Este proceso se repite varias veces, obteniéndose el agua desalinizada como condensado en la última etapa. Esto se aprecia en la figura 1.2. para una planta MSF de ‘n’ etapas.

Las plantas MSF pueden diseñarse para un rango de GOR cuyo límite práctico es aproximadamente 11:1. Los costos de capital se incrementan con el GOR, debido a que su aumento implica la necesidad de una mayor área de transferencia de calor y de mayor número de etapas. El valor de GOR óptimo está normalmente en el rango de 7 a 9 dependiendo del costo de la energía.

El porcentaje de recuperación del agua producida en relación con la cantidad de agua de mar ingresada depende de la calidad del agua de mar de alimentación y de la temperatura “top” en que opera la planta. Su recuperación máxima es 12% a 20%.

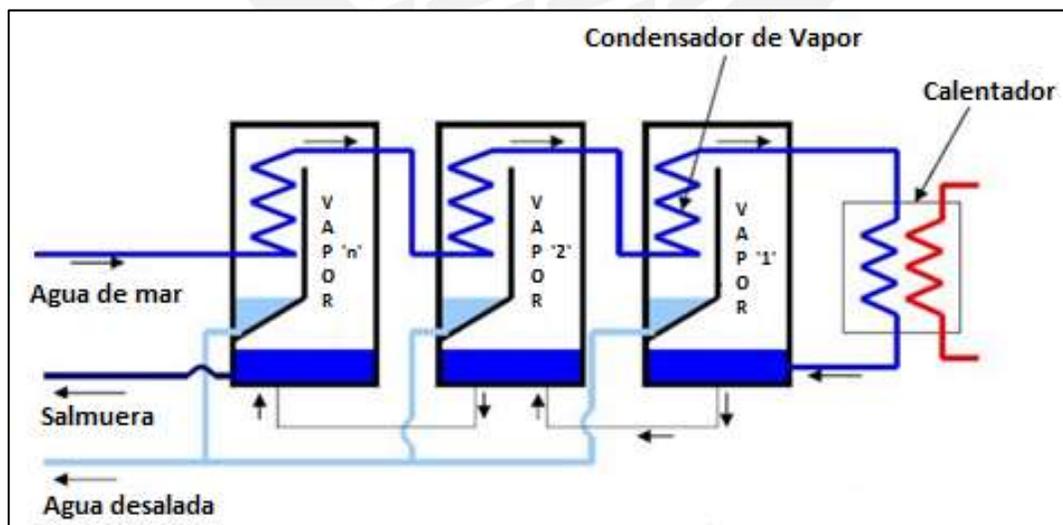


Figura 1.2 Esquema de proceso de desalinización para planta MSF de ‘n’ etapas. [2]

■ Destilación por múltiple efecto (MED)

Esta tecnología utiliza el mismo principio que el proceso MSF. La diferencia principal con el proceso MSF radica en la forma en que se lleva a cabo la evaporación. En las plantas de MED se utilizan varios evaporadores del tipo película delgada, con los cuales se logran mejores coeficientes de transferencia de calor que los que se pueden obtener en las plantas MSF. En el proceso MED, el agua de mar, precalentada en la etapa de condensación del vapor generado en el último efecto, ingresa al primer efecto en donde se eleva su temperatura al punto de ebullición con vapor de calefacción. El agua de mar se rocía sobre la superficie de los tubos del evaporador donde se forma inmediatamente una película delgada la cual favorece su rápida ebullición y evaporación. El vapor producido es colectado en este efecto y enviado al interior de los tubos evaporadores del efecto siguiente, el cual opera a una temperatura y presión inferiores a las del anterior. La salmuera proveniente del primer efecto es también enviada al efecto siguiente donde se rocía formando una película delgada sobre la superficie de los tubos donde circula el citado vapor repitiendo el proceso de evaporación. El vapor de cada uno de los efectos se convierte así en agua desalinizada al ser condensado en el evaporador del efecto siguiente. El proceso se repite varias veces, dependiendo del número de efectos del sistema.

Los factores que limitan el número de efectos son el rango de temperatura total disponible y la diferencia de temperatura mínima requerida entre los efectos. La diferencia de temperatura entre efectos es determinada por la elevación del punto de ebullición y las pérdidas de presión entre los efectos. En la figura 1.3 se muestra una configuración típica de destilación MED para varios efectos.

El GOR de las plantas MED es aproximadamente igual al número de efectos menos uno. Dicho número es mucho menor que el que correspondería a una planta MSF equivalente. El menor número de efectos de las plantas MED contribuye a una importante reducción de costos en comparación con las equivalentes MSF. En este proceso la recuperación máxima es aproximadamente del 30% a 40%.

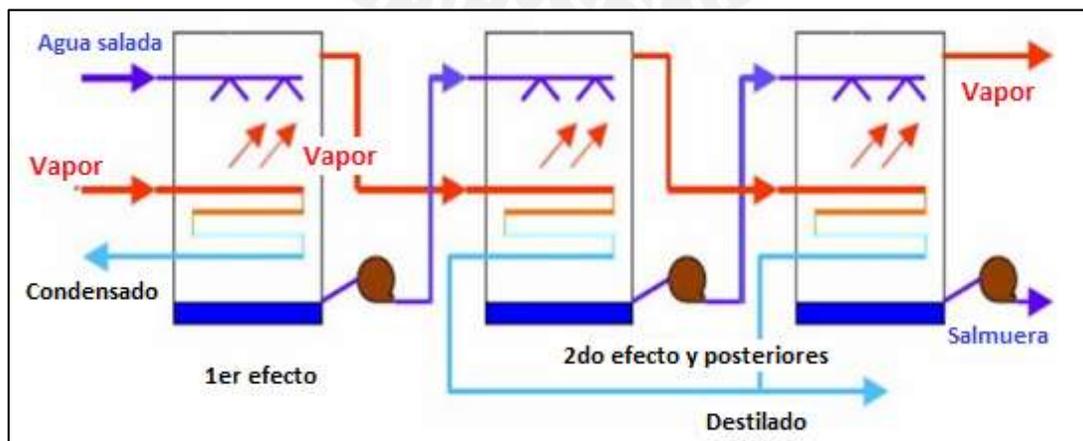


Figura 1.3 Esquema de proceso de desalinización para planta MED. [2]

■ Destilación por compresión de vapor (CV)

En la destilación por compresión de vapor, el calor necesario para llevar el agua de mar a ebullición se obtiene directamente del vapor que es removido del evaporador y reinyectado a la primera etapa luego de ser comprimido para elevar su temperatura de saturación. La compresión de vapor puede efectuarse por compresor mecánico (CMV) o por un termosterocompresor (CTV).

En las plantas CMV la energía que se entrega al sistema, a través del compresor, determina la magnitud del aumento de temperatura y la eficiencia de la planta. En este proceso, durante la puesta en marcha de la planta se requiere energía adicional para llevar el agua de mar a temperatura de ebullición. Esto se efectúa utilizando vapor externo de baja presión. La capacidad de las unidades CMV está limitada por el flujo máximo volumétrico del compresor y la presión desarrollada por el mismo, la temperatura a la que opera y la capacidad de transferencia de calor del evaporador.

La técnica de compresión de vapor logra una recuperación máxima entre 40%-50%. La figura 1.4 muestra el proceso de destilación por compresión de vapor.

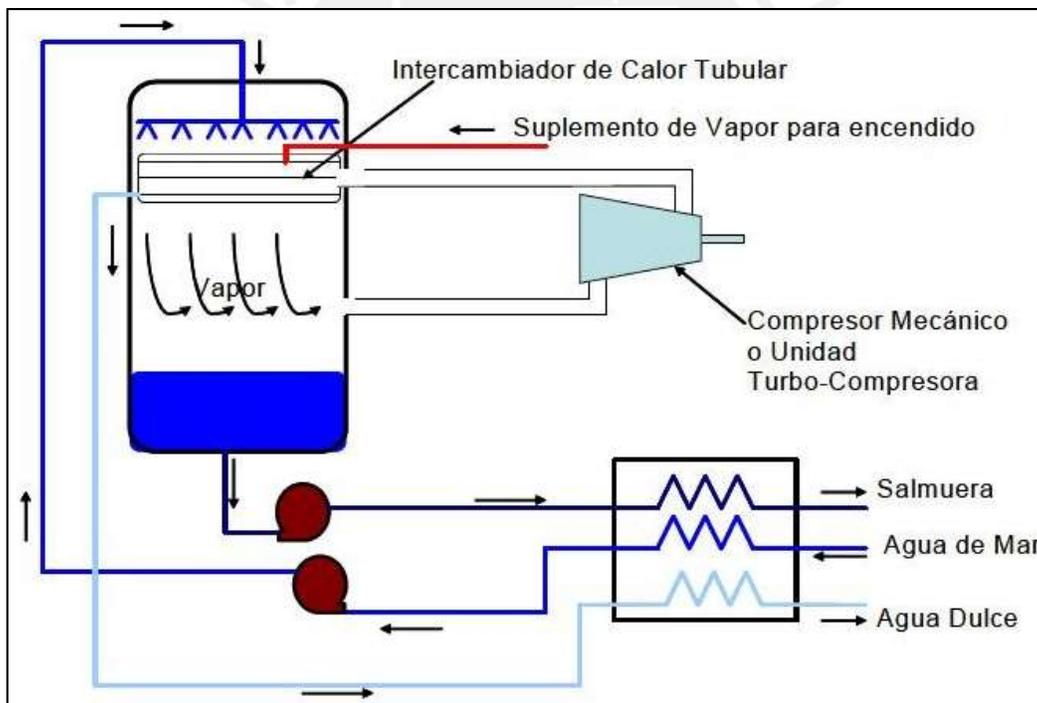


Figura 1.4 Esquema de proceso de desalinización mediante destilación por compresión de vapor. [2]

■ Osmosis Inversa

La osmosis inversa es una técnica para extraer sólidos disueltos en agua utilizando una membrana semipermeable. Dicha membrana posee una permeabilidad alta respecto del agua y muy baja para las sales. A diferencia de las otras técnicas, esta no involucra ningún

cambio de fase. En este proceso, el agua pasa a través de la membrana impulsada por una bomba que eleva su presión hasta un valor superior al de su presión osmótica natural. Para este propósito se utiliza típicamente una bomba de alta presión de 5.4 a 8.2 MPa.

El agua de mar, antes de ser alimentada a estas plantas por osmosis inversa, debe ser sometida a una etapa de pre-tratamiento fisicoquímico más compleja que la requerida por las tecnologías térmicas. Este pre-tratamiento incluye desinfección con cloro para controlar el crecimiento bacteriológico, filtración multimedia para reducir STS (sólidos totales suspendidos), filtración con cartuchos para proteger las membranas de RO y declorinación con bisulfito de sodio. Dichas etapas del proceso se aprecian en la figura 1.5.

Las plantas de RO se instalan en capacidades que van desde unos pocos metros cúbicos hasta decenas de miles de metros cúbicos por día.

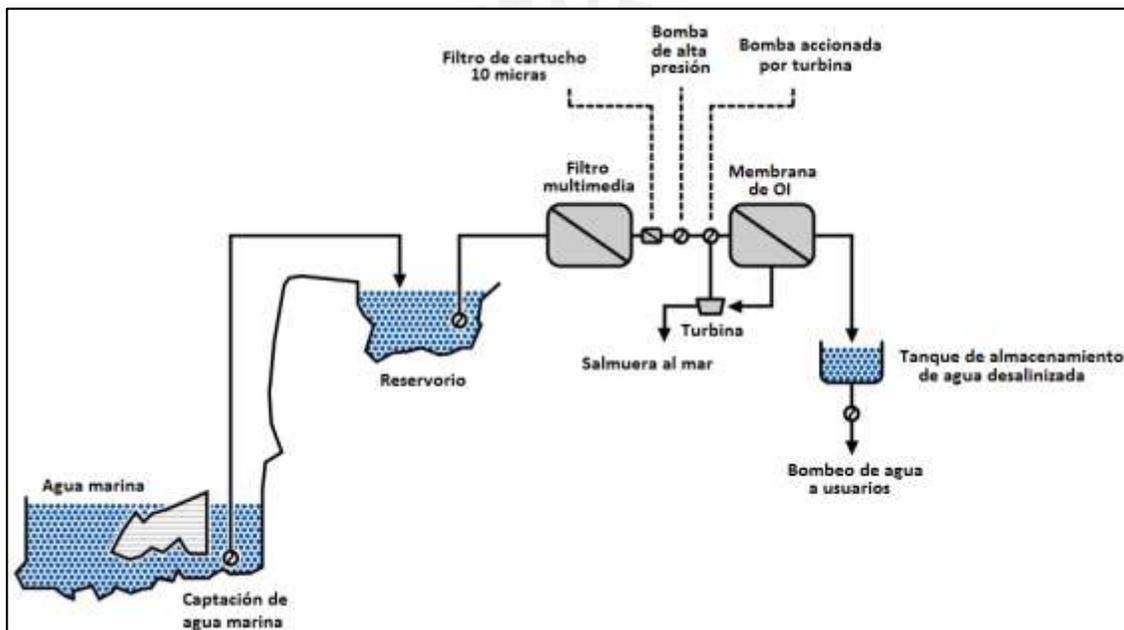


Figura 1.5 Esquema de proceso de desalinización por osmosis inversa. [3]

Las membranas operan rechazando normalmente el 99% de las sales del agua de alimentación, obteniéndose un agua producto que contiene entre 410-500ppm de sólidos totales disueltos (STD) y que según la OMS, está dentro del rango apto para consumo humano (menor o igual a 500ppm), sin embargo; no es suficientemente pura para el uso industrial. Cuando se requiere agua de mejor calidad se debe implementar un segundo módulo de desalinización a continuación del módulo principal de RO (Ramillo et al., 2003).

Esta técnica incluye bajos requerimientos de energía (comparado con los anteriores), bajas temperaturas de operación, diseño modular y bajos costos de producción de agua. Tal es así, que un estudio realizado para plantas de gama media para las tecnologías MSF, MED y RO, estimó que el costo de producción de agua en US\$/m³ era 1.04, 0.95 y 0.75, respectivamente (Wade, N., 2001). Con los altos costos de energía actuales y la diferencia

entre los costos de producción de agua desalinizada por diferentes técnicas, dicha producción se inclina a favor de la osmosis inversa.

1.3 Sistemas de control inteligentes en plantas desalinizadoras de agua de mar mediante la técnica de osmosis inversa

El control de procesos es una parte esencial de la industria desalinizadora que requiere de condiciones óptimas de operación, incrementar el tiempo de vida útil de la planta y reducir el costo de producción (Alatqi et al., 1999). Por ello, son muchas las estrategias que se han planteado para el control de plantas desalinizadoras por osmosis inversa, partiendo desde el control clásico con los controladores PI, PID y sus variantes hasta estrategias avanzadas de control (control predictivo, control por matriz dinámica DMC, redes neuronales, lógica difusa, etc.).

Los controladores PID han sido los más utilizados para el control de los bastidores de osmosis inversa de las plantas desalinizadoras de agua de mar. Sin embargo; debido al carácter multivariable que presenta la planta y debido a la alta interacción entre sus variables, estos no permiten realizar un control efectivo del proceso.

Los primeros estudios de automatización de una planta piloto de osmosis inversa se atribuyen a Imad Alatqi, director de la división de materiales, petróleo y petroquímica del instituto de investigación científica de Kuwait quien realizó el modelado y control de dicha planta.

Esta unidad piloto contaba con una bomba de alta presión (hasta 80bar), y una configuración de membrana de fibra hueca de 4" de diámetro (B-10 Permasep), cuyas características se presentan en la tabla 1.1

Tabla 1.1 Características de la membrana Aramida B-10

Tipo de membrana	Aramida B-10
Configuración de membrana	Fibra hueca
Capacidad inicial de prod. de agua	1400GPD ($5.3m^3/día$)
Rechazo de sal	99.0% nominal
Presión nominal de operación	800-1200 psig (5515-8274kPa)
Rango de temperatura	0-40°C
Exposición continua, rango pH	4-9
Tasa mínima de salmuera	2000GPD ($7.57m^3/día$)
Tasa máxima de salmuera	15000GPD ($56.78m^3/día$)

Las variables de proceso elegidas fueron el flujo y conductividad de permeado, mientras que como variables de control se eligieron la presión y pH de alimentado.

El modelo obtenido para la unidad de osmosis inversa se obtiene mediante la técnica de identificación de sistemas. Para ello, el sistema fue llevado a estado estacionario y se aplicó una señal escalón a las variables manipuladas. Las respuestas obtenidas de las variables de proceso se aproximaron mediante funciones de transferencia de segundo orden con un cero en el numerador (Alatqi et al., 1989). Dicho modelo fue validado con datos experimentales y ha sido ampliamente utilizado en diferentes trabajos por su sencillez y elevado grado de adecuación. Tal es así, que diversos autores han propuesto modelos matemáticos con una estructura similar, como es el caso de Riverol y Pilipovik, (Riverol y Pilipovik, 2005) y M.W Robertson (Robertson et al., 1996).

Los avances del control inteligente para la integración de la información sensorial, la computación y toma de decisiones han llevado a la aplicación de metodologías de computación flexible para el diseño de plantas de osmosis inversa, presentando grandes beneficios que incluyen el trade-off entre la tolerancia, la precisión e incertidumbre. Los sistemas inteligentes utilizados incluyen lógica difusa (FL), redes neuronales (NN), algoritmos genéricos (GA) y el razonamiento probabilístico (PR).

En el año 1996, M. Jamshidi, del Centro de Ingeniería de Control Autónomo de la NASA, realiza el diseño e implementación de controladores difusos para sistemas complejos, tomando como caso de estudio una planta desalinizadora de agua de mar (M. Jamshidi, et al., 1996), debido a que las técnicas tradicionales de control son adecuadas para sistemas de control que operan en un entorno estructurado. Sin embargo; los sistemas reales operan bajo condiciones no estructuradas para las cuales obtener un modelo analítico, a menudo, no puede ser determinado.

El experimento se centró en el modelo no lineal del proceso controlado calentador-salmuera que exhibe diferentes respuestas a varias entradas como son: la temperatura top de salmuera (TBT), la presión de suministro de vapor, flujo de recirculación de salmuera y la temperatura del vapor al calentador de salmuera.

Jamshidi añade a la técnica de lógica difusa la habilidad de aprendizaje de dos formas diferentes: la primera, incorporando un algoritmo inmuno-genético (GA) y la segunda, utilizando redes neuronales. En el primer caso, se utiliza el algoritmo genético para desarrollar una mejor base de conocimiento para el controlador difuso. La figura 1.6 muestra el esquema utilizado para tal fin.

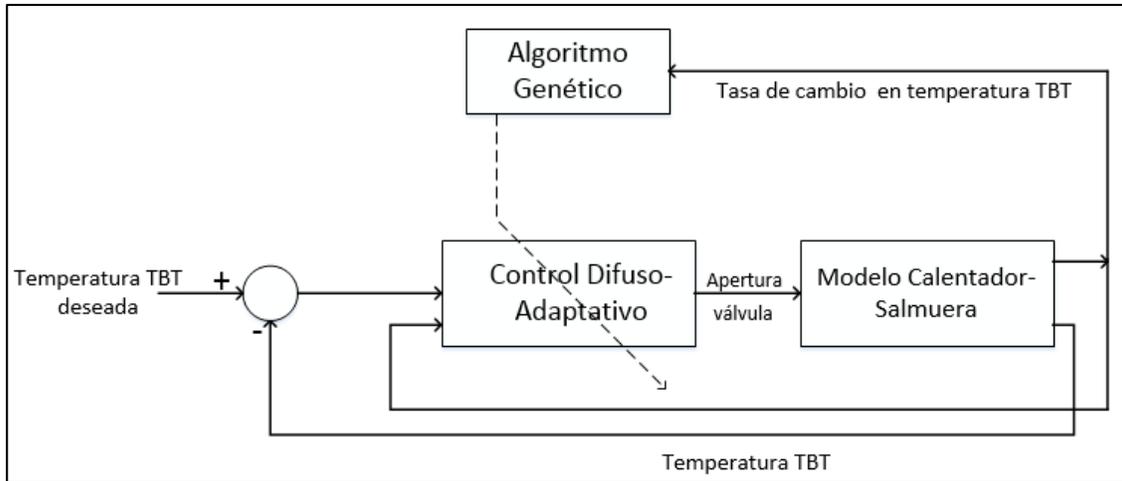


Figura 1.6 Algoritmo genético basado en una arquitectura de control jerárquica adaptiva. (Jamshidi, 1996)

El objetivo de este sistema es sintonizar automáticamente los parámetros del controlador difuso. El sistema consiste de un controlador difuso adaptivo que tiene la capacidad de alterar el factor de escala o la forma de la función de pertenencia de entrada y de salida para modificar la base de reglas. Se realizaron diferentes pruebas con varios controladores obteniendo los siguientes resultados para un cambio de entrada escalón en la temperatura top de salmuera (TBT):

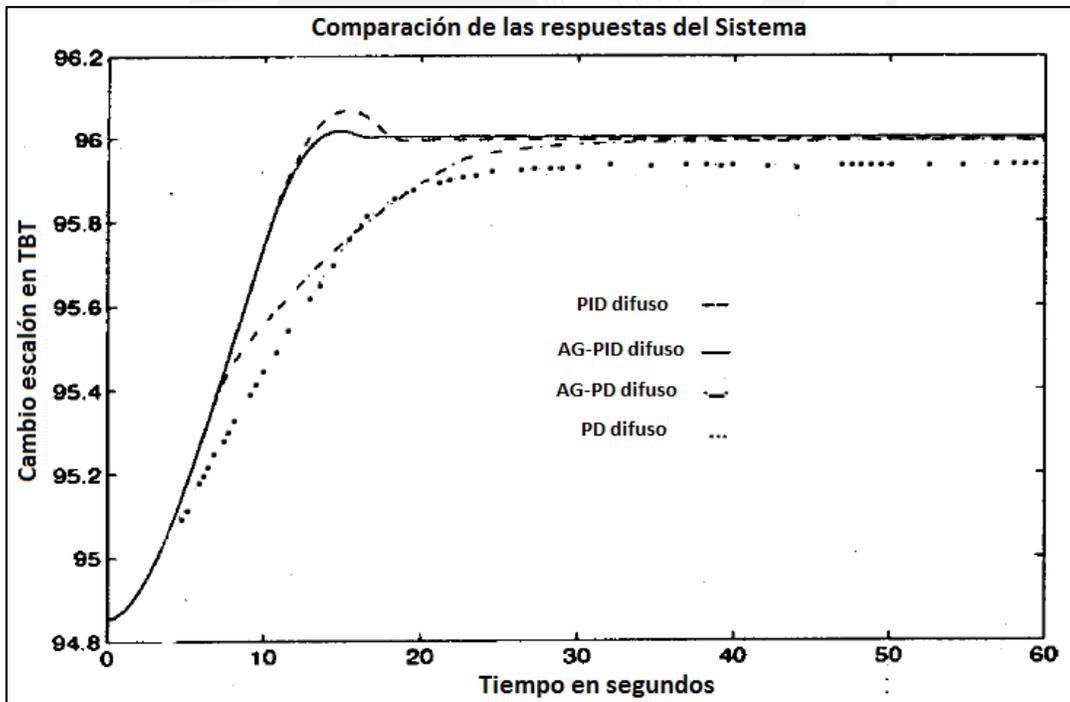


Figura 1.7 Respuesta de diferentes controladores difusos para cambio escalón en la entrada TBT. (Jamshidi, 1996)

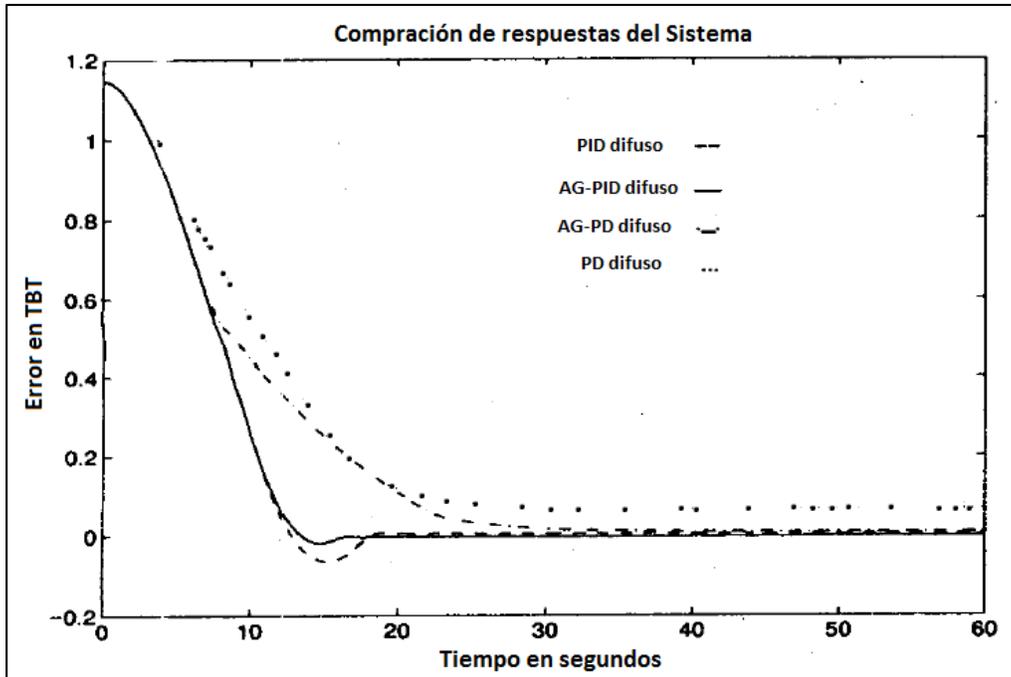


Figura 1.8 Gráfica del error para diferentes controladores difusos para cambio escalón en la entrada TBT. (Jamshidi, 1996)

Para el segundo caso, donde se incorporan redes neuronales, la capacidad de aprendizaje de estas es utilizada para el diseño del controlador difuso, lo cual genera entonces el controlador difuso auto-organizado. El objetivo de este sistema es formar automáticamente el controlador difuso. El esquema utilizado se presenta en la figura 1.9.

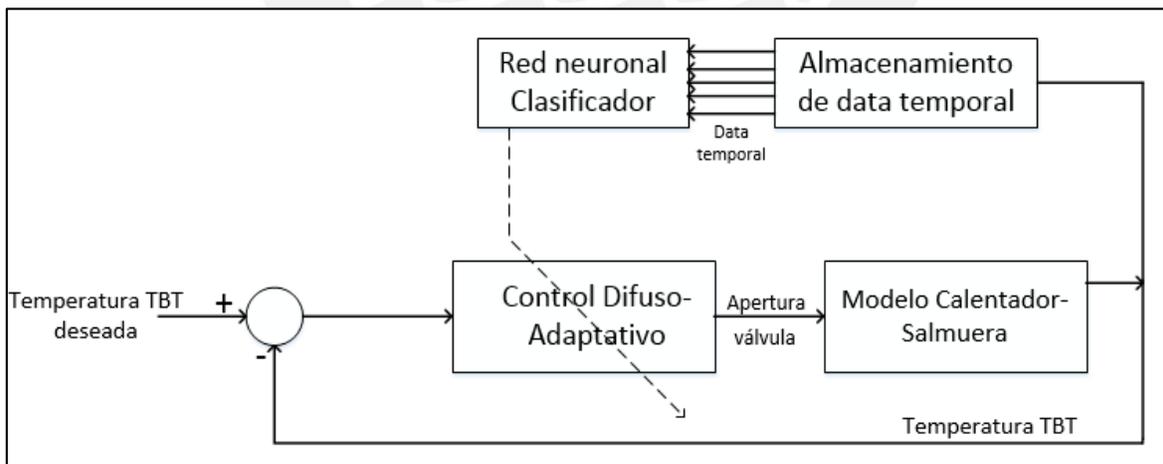


Figura 1.9 Esquema del controlador neuro-difuso. (Jamshidi, 1996)

Se utilizan dos redes neuronales, NN1 y NN2, que son del tipo de aprendizaje por retro propagación. La primera actúa como un clasificador de la respuesta dinámica del sistema que está siendo controlado (proceso de desalinización). NN2, establecido en el mecanismo de juicio 2, tiene conocimiento de las características dinámicas del sistema. Dicho

mecanismo de juicio 2 posee un sistema de ajuste automático para determinar los valores de la normalización de las funciones de membresía para controlar adecuadamente el sistema. La respuesta del controlador neuro-difuso adaptativo se muestra en la figuras 1.10 y 1.11.

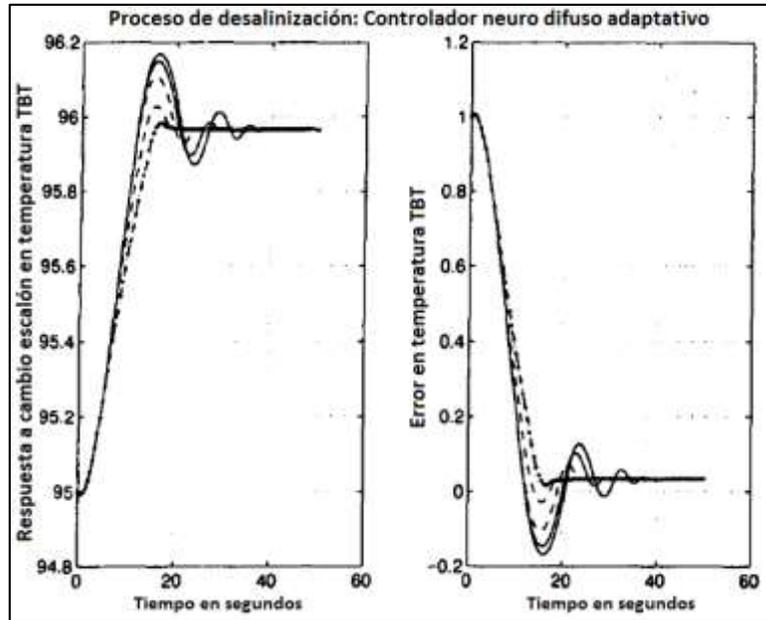


Figura 1.10 Respuesta y error del controlador neuro-difuso para cambio escalón en la entrada TBT. (Jamshidi, 1996)

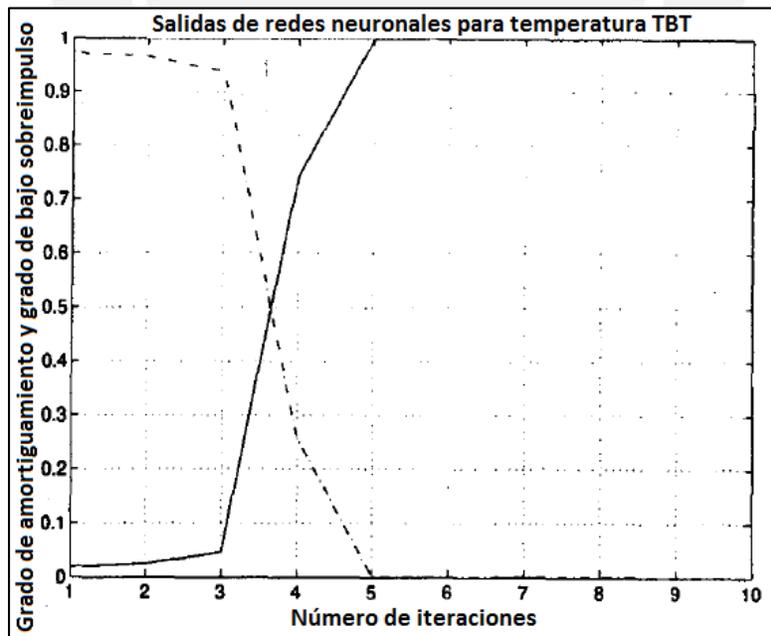


Figura 1.11 Salida de la red neuronal para la entrada TBT en el tiempo. (Jamshidi, 1996)

El experimento se inicia utilizando un controlador difuso PD que no ha sido sintonizado. La línea sólida indica una respuesta oscilatoria con bajo sobreimpulso. Esto puede verse en la figura 1.10 que muestra el grado de sobreimpulso con línea sólida para la salida de la red neuronal. El mecanismo de adaptación actúa cambiando el factor de escala de la parte derivativa del controlador difuso PD mejorando la respuesta al cambio de entrada escalón para la temperatura top de salmuera pues se aprecia menor sobreimpulso y menor tiempo de establecimiento.

Tiempo después, Zilouchian y Jafar (Zilouchian and Jafar, 2001), presentan los avances tecnológicos para el diseño e implementación de soft-computing para el modelado, control y automatización de los procesos de osmosis inversa. Como experimento se diseña e implementa un sistema para un proceso de osmosis inversa de agua de mar situada cerca del Océano Atlántico en Boca Ratón, Florida.

El funcionamiento de la planta prototipo demostró un desempeño eficaz y diseño óptimo para dos tipos de membrana: espiral (SW) y fibra hueca (HFF), en diversas condiciones de funcionamiento forzadas. El sistema logró una recuperación constante de 30% mientras que la concentración de sal se mantuvo por debajo de sus límites. Se alcanzó un 5% de aumento de la disponibilidad, reducción de mano de obra y reducción en el consumo de químicos.

Tanto las plantas de osmosis inversa y de MSF son procesos no lineales que deben operar con restricciones específicas. Un sistema de desalinización de osmosis inversa es generalmente modelado sobre la base de un conjunto definido de datos y análisis tomados como el flujo, la temperatura y agua de alimentación. Sin embargo, la operación de la planta tiene que ser flexible con el fin de responder cambiando cualquiera de las variables, sin la necesidad de personal técnico especializado y competente que pueda interpretar las medidas y datos tomados durante la operación.

En concreto, los sistemas de control inteligente aplicados al procesos de osmosis inversa han utilizado redes neuronales para la predicción de los parámetros críticos sobre la base de información proveniente de los sensores, desarrollo e implementación de la línea de acciones autónomas en el funcionamiento de la planta para el control y la toma de decisiones continua utilizando metodologías de soft-computing, toma de decisiones directa de acuerdo a índices de optimización fijados que incluyen flujo de producto, tasa de recuperación y costes operativos globales, reducción de las necesidades totales de energía para operar la planta y eliminación de vertidos atmosféricos así como la disminución de la dosis de productos químicos.

La predicción de los parámetros de calidad que utilizan las redes neuronales.

La principal ventaja del modelo de una red neuronal es su característica no lineal, así como la complejidad de la interacción entre las neuronas. Se ha utilizado un modelo de NN para predecir la calidad, reducir la degradación de la membrana y aumentar la eficiencia global del sistema. Se usaron redes con algoritmos de aprendizaje como retropropagación (BP) y

redes de funciones de base radial (RBFN) para diferentes tipos de plantas en cuanto a captación de agua.

Aplicación de control de lógica difusa para Osmosis inversa:

- Pre- tratamiento para sólidos en suspensión con la finalidad de obtener estabilidad biológica y química.
- Control de operación entre una temperatura mínima para proporcionar flujo requerido y una temperatura máxima permitida por las especificaciones de la membrana.
- Operación entre el caudal mínimo de salmuera para evitar la polarización de la concentración maximizando el flujo con respecto a la recuperación deseada.
- Funcionamiento a una presión controlada para asegurar transferencia de masa y la equiparación de la caída de presión.
- Características químicas del agua de alimentación y dinámica de la transferencia de masa.

También se han implementado sistemas cuya arquitectura se compone de un controlador difuso y un Controlador Lógico Programable (PLC) y sensores. El PLC funciona como interfaz de entrada-salida, y proporciona los datos acondicionados al controlador difuso como se muestra en la siguiente figura 1.12.

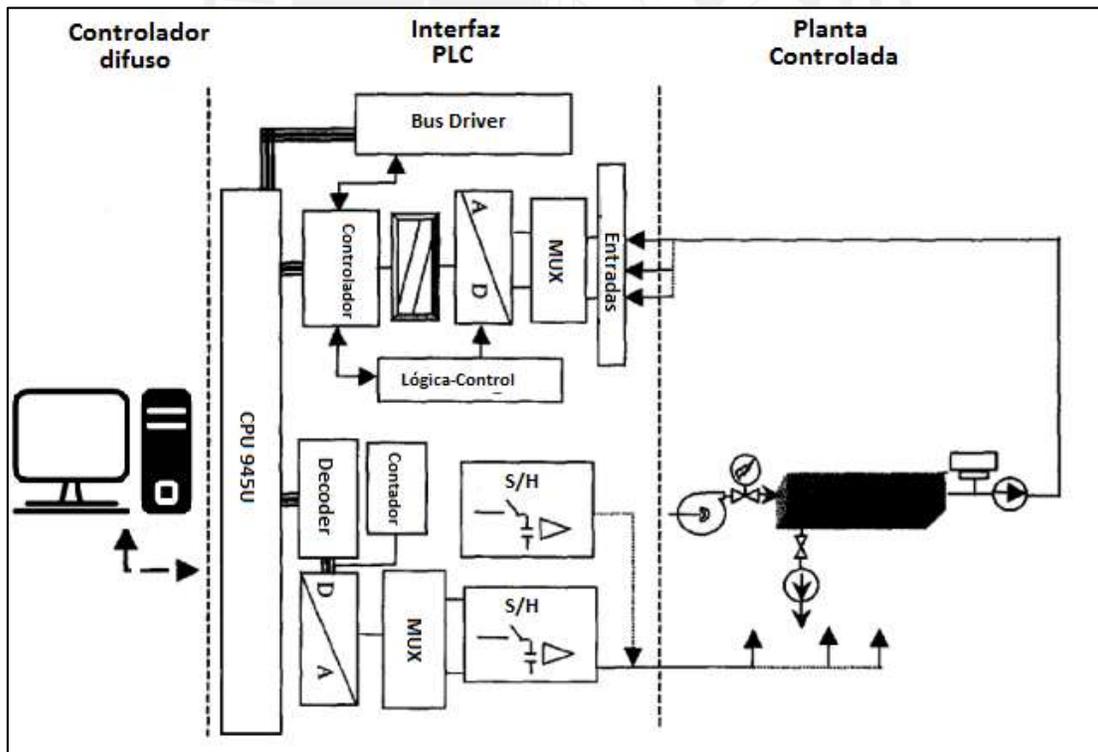


Figura 1.12 Configuración de hardware para el sistema de osmosis inversa. (Zilouchian, 2001)

Años después, Goeun Kim presenta el diseño de controladores PID para una planta desalinizadora por osmosis inversa, realizando una comparación entre la sintonización por el método de Ziegler-Nichols y un algoritmo inmuno-genético (Kim et al, 2009).

El objetivo principal del sistema de control es mantener un pH constante. El modelo utilizado es el propuesto por Alatiqi (Alatiqi et al., 1989) y el esquema utilizado por Kim se presenta en las figuras 1.13 y 1.14 donde se detallan el proceso y la membrana de osmosis inversa, respectivamente.

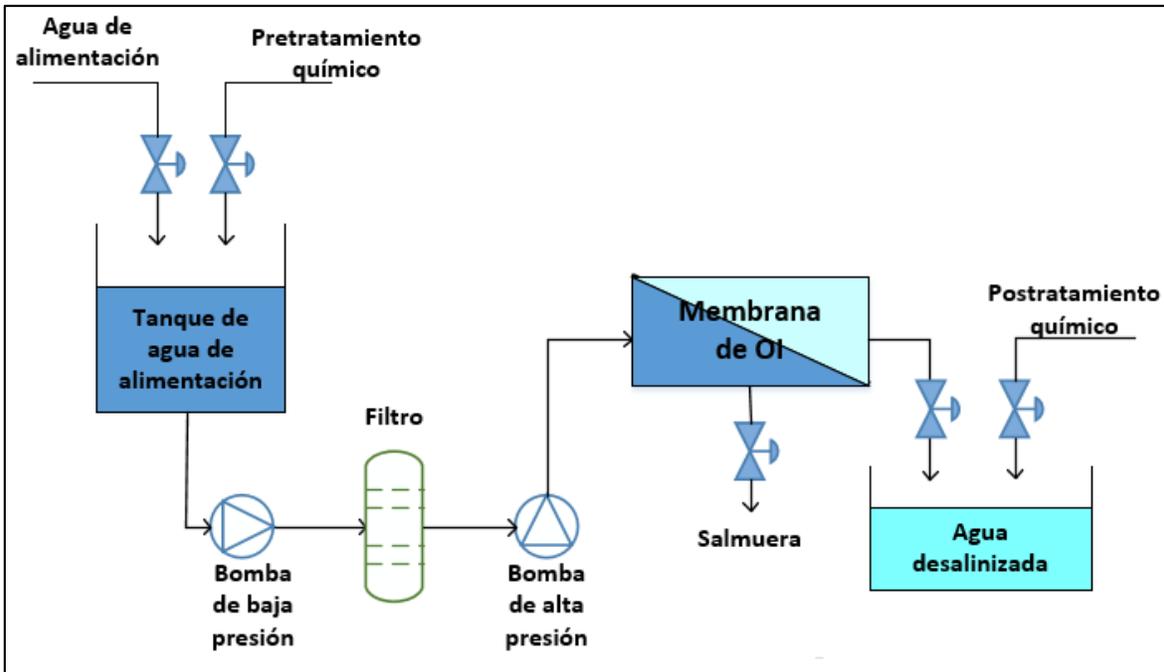


Figura 1.13 Esquema para el sistema de osmosis inversa. (Kim, 2009)

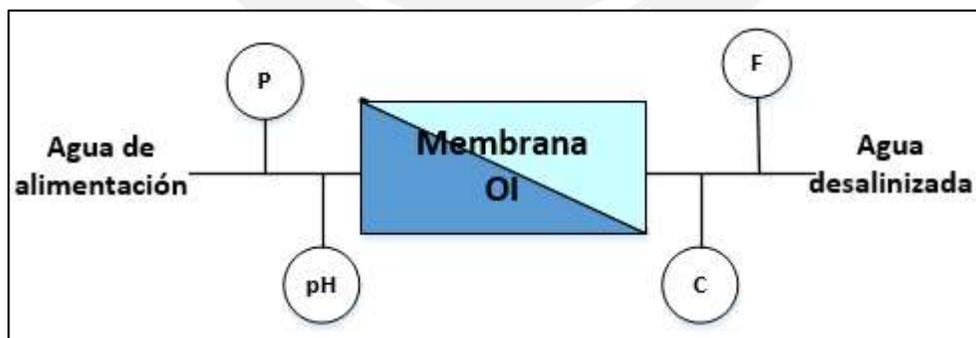


Figura 1.14 Esquema de la membrana del sistema osmosis inversa. (Kim, 2009)

Para el modelo del sistema de osmosis inversa, Kim se basa en las funciones de transferencia halladas por M.W Robertson (Robertson et al., 1996), que a su vez tienen la misma estructura que las halladas por Alatiqi (Alatiqi et al., 1989), pero con diferentes coeficientes. Las funciones de transferencia utilizadas fueron:

$$\begin{bmatrix} F \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ pH \end{bmatrix}$$

$$G_{11} = \frac{F}{P} = \frac{0.002(0.056s + 1)}{0.013s^2 + 0.1s + 1} \quad G_{12} = \frac{F}{pH} = \text{cero}$$

$$G_{21} = \frac{C}{P} = \frac{-0.51(0.35s + 1)}{0.213s^2 + 0.7s + 1} \quad G_{22} = \frac{C}{pH} = \frac{-57(0.32s + 1)}{0.6s^2 + 1.8s + 1}$$

Donde: F es flujo de permeado, en galones por minuto; P es la presión de la bomba, en psi; C es conductividad de permeado, en micro siemens por centímetro y pH es la densidad del ion H. Siendo flujo y conductividad las variables de proceso mientras que presión y pH las variables de control.

Debido a que se utiliza el modelo planteado por Robertson, Kim se enfrenta al problema de desacople perfecto para un sistema multivariable cuya estructura se muestra en la figura 1.15.

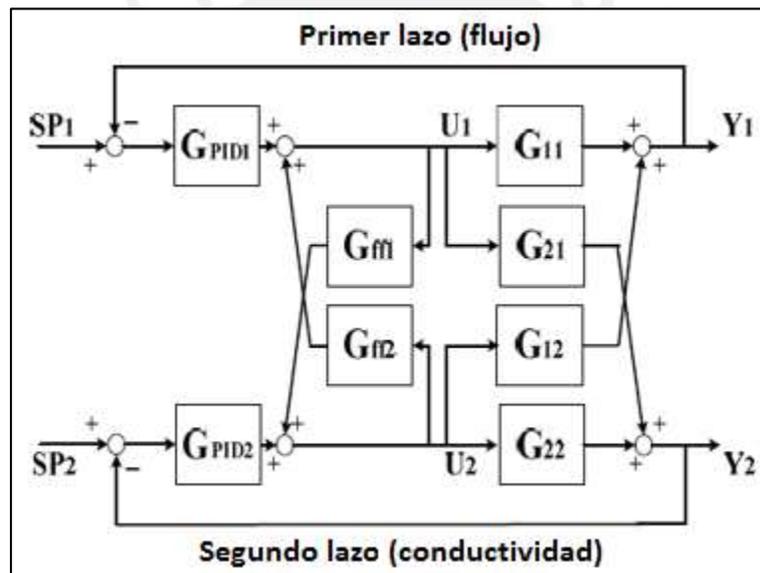


Figura 1.15 Estructura del sistema desacoplado. (Kim, 2009)

Dónde: G_{ff1} y G_{ff2} representan los efectos de primer lazo sobre el segundo y viceversa. Tomando en consideración que el efecto de un lazo no afecta al otro (desacoplador) se obtiene las siguientes expresiones:

$$G_{ff1} = -\frac{G_{21}}{G_{22}} \text{ y } G_{ff2} = -\frac{G_{12}}{G_{11}}$$

Terminado este proceso, la propuesta de Kim está basada en dos partes: un algoritmo genético que se inspira en el mecanismo de la selección natural, proceso biológico en el cual el individuo más fuerte tiene más probabilidad de ser ganador en un entorno de competencia y un algoritmo inmune que simula el funcionamiento del cuerpo humano en

cuanto a la creación de anticuerpos y antígenos, con una capacidad de aprendizaje, memoria, reconocimiento de patrones y recreación de anticuerpos relevantes de forma rápida.

Este algoritmo posibilita la autorregulación del sistema, y representa una opción factible y sencilla en el diseño del controlador ya que únicamente se requiere la función objetivo. Además, se mejora el algoritmo genético utilizando el concepto de cruce y mutación en lugar de utilizar un algoritmo genético convencional.

Para el experimento se busca que el algoritmo inmuno genético propuesto obtenga las ganancias óptimas para los controladores PID, que corresponden a dos lazos independientes, y así mejorar el desempeño de la planta de osmosis inversa. Para esto, se propuso los parámetros que se muestran en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Parámetros del algoritmo genético.

Parámetros	Valor
Generación	80
Población	200
Mutación	0.4%
Cruce	0.5%
Rango de ganancia	-1000 – 1000
Afinidad	ITSE

Tabla 1.3 Parámetros PID para los dos métodos de sintonización.

Método de Sintonización	Sistema	Ganancia 'P'	Ganancia 'I'	Ganancia 'D'
Ziegler y Nichols	G11	715	0.14	0.03
	G22	-0.07	-1.09	0.0027
Algoritmo Inmuno-Genético	G11	993.223	989.455	0.163
	G22	-31.51	-33.716	-0.0003

Tabla 1.4 Comparación en el desempeño del sistema.

Sistema	G11		G22	
	ZN	IGA	ZN	IGA
Especificación				
Referencia	1	1	1	1
Tiempo de levantamiento (seg)	17000	53	23	8
Tiempo de establecimiento (seg)	529000	147	82	25
Valor final	1	1	1	1

Se realizaron pruebas con una entrada tipo escalón y se observa que el algoritmo IGA ofrece un mejor desempeño que el método de Ziegler-Nichols. Los resultados obtenidos se presentan en las figuras 1.16 y 1.17.

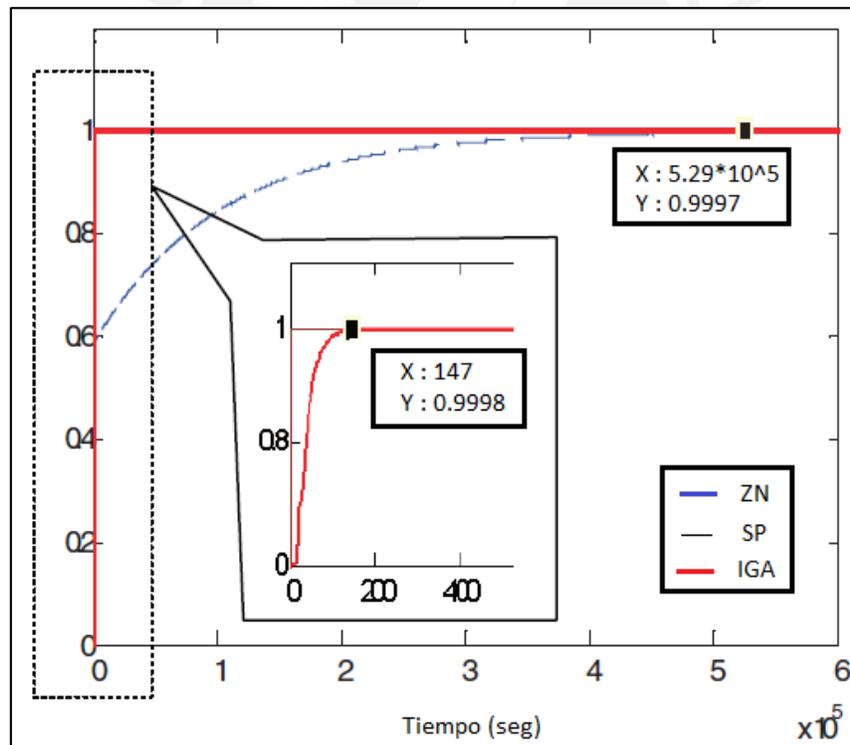


Figura 1.16 Respuesta a entrada escalón para G_{11} . (Kim, 2009)

Para el primer lazo de control, la sintonización usando el algoritmo genético logra un tiempo de establecimiento considerablemente menor que el método de sintonización de Ziegler-Nichols. Además, en ambos casos no se aprecia sobreimpulso.

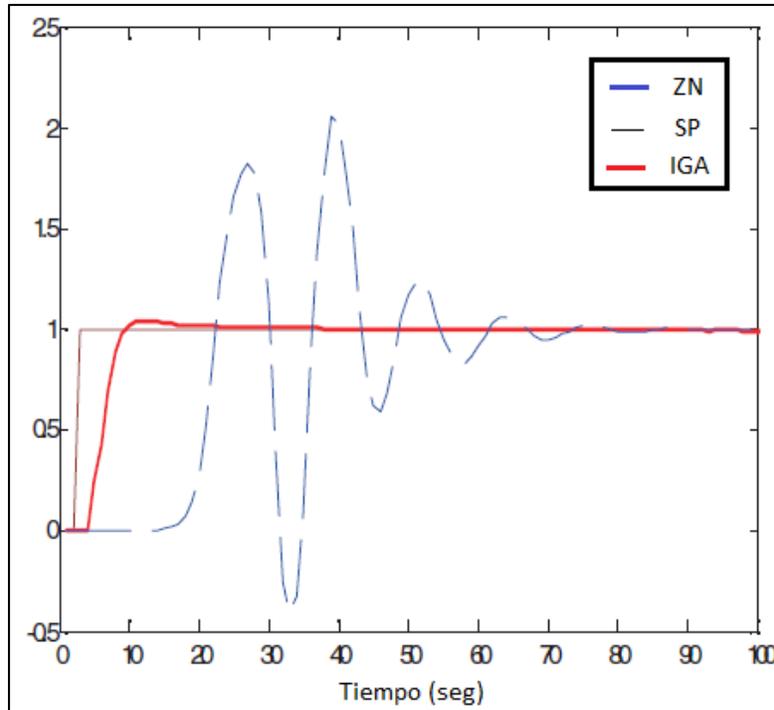


Figura 1.17 Respuesta a entrada escalón para G_{22} . (Kim, 2009)

Para el segundo lazo de control, la sintonización usando el algoritmo genético logra un tiempo de establecimiento considerablemente menor que el método de sintonización de Ziegler-Nichols. Además, se observa que el algoritmo genético presenta un pequeño sobreimpulso mientras que la sintonización por Ziegler-Nichols genera en la respuesta un sobre impulso de casi 100%.

Más adelante, Rathore Natwar, del Instituto Nacional de Tecnología Motilal Nehru de la India, propone un algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO) a un sistema de osmosis inversa con el objetivo de sintonizar controladores PID (Natwar et al., 2013). El esquema utilizado para la experiencia se presenta a continuación:

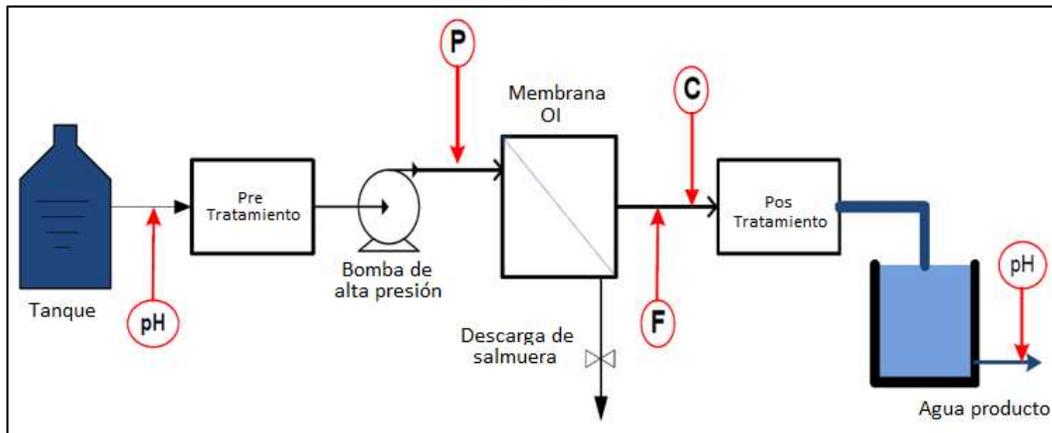


Figura 1.18 Sistema de osmosis inversa. (Natwar, 2013)

Para el modelado del sistema, Natwar toma como referencia el modelo obtenido por Gambier en la planta de osmosis Inversa Doha (DROP), estas ecuaciones son las siguientes: (Gambier et al., 2007):

$$\begin{bmatrix} F \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ pH \end{bmatrix}$$

Donde:

$$G_{11} = \frac{0.002(0.056s + 1)}{0.013s^2 + 0.1s + 1} \quad G_{12} = \text{cero}$$

$$G_{21} = \frac{-0.51(0.35s + 1)}{0.213s^2 + 0.7s + 1} \quad G_{22} = \frac{-57(0.32s + 1)}{0.6s^2 + 1.8s + 1}$$

De acuerdo a estas ecuaciones las variables controladas son el flujo y la conductividad; y las manipuladas, la presión y el pH, considerándose que una variable manipulada afecta a más de una variable controlada. El diagrama de bloques utilizado se muestra en la figura 1.19.

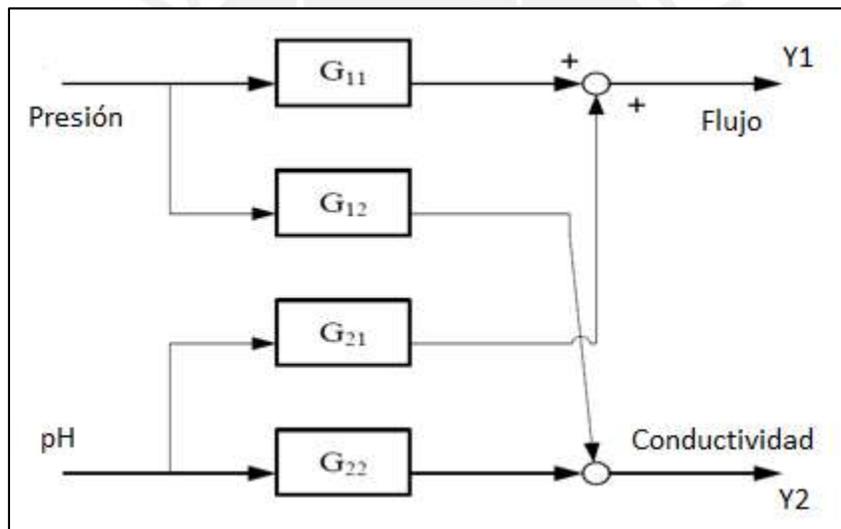


Figura 1.19 Modelo de la membrana de osmosis inversa. (Natwar, 2013)

Sin embargo, para utilizar el método de sintonización por optimización de enjambre de partículas es necesario resolver el problema de desacoplamiento (Riverol y Pilipovik, 2005), con lo cual se logra que las variables manipuladas afecten sólo a una variable de salida. Con este fin se desarrolla el diagrama de bloques mostrado en la figura 1.20 que incluye un desacoplador.

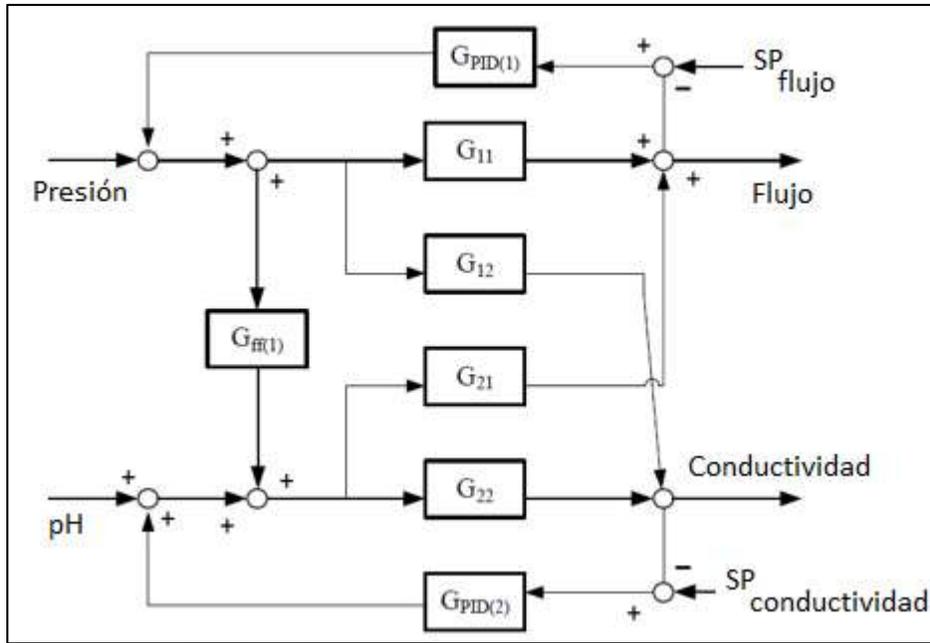


Figura 1.20 Estructura del sistema total desacoplado. (Natwar, 2013)

Con esto se obtienen las siguientes funciones para el desacople similares a las halladas por M.W Robertson (Robertson et al., 1996):

$$G_{ff1} = -\frac{G_{21}}{G_{22}} \text{ y } G_{ff2} = -\frac{G_{12}}{G_{11}}$$

Una vez desacoplado el sistema se aplica el algoritmo de optimización por enjambre de partículas para sintonizar los parámetros K_p , K_i y K_d de los controladores $G_{PID(1)}$ y $G_{PID(2)}$. Este algoritmo intenta mejorar la solución utilizando posibles candidatos, “partículas”, basándose en una simple fórmula matemática con el cual se intenta conseguir el objetivo actualizando la velocidad de éstas y su posición en el espacio de búsqueda, de manera similar al desplazamiento de una bandada de aves o un grupo de peces. A continuación se resume en la tabla 1.5 las constantes halladas para los controladores con diferentes métodos de sintonización.

Tabla 1.5 Comparación de parámetros PID

Sistema	Ziegler-Nichols			PSO		
	P	I	D	P	I	D
G11	535.71	0.1048	0.022	5.9619	42.28	58.22
G22	-0.059	-1.801	0.047	-0.0259	-0.02	-0.005

Los resultados obtenidos fueron comparados en el software MATLAB-SIMULINK y se muestran en las figuras 1.21 y 1.22.

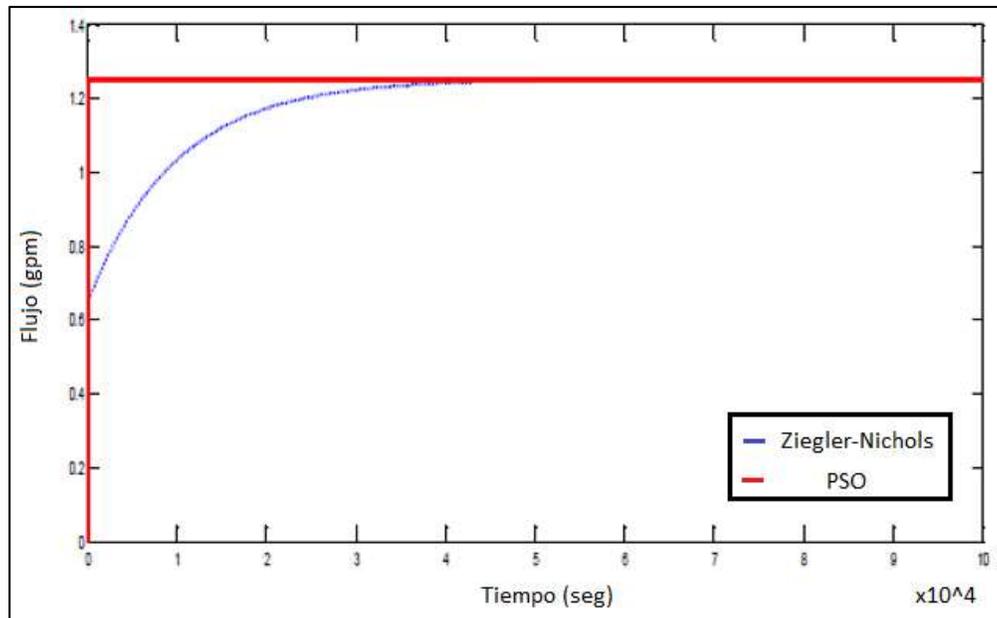


Figura 1.21 Comparación de la respuesta para el flujo de salida. (Natwar, 2013)

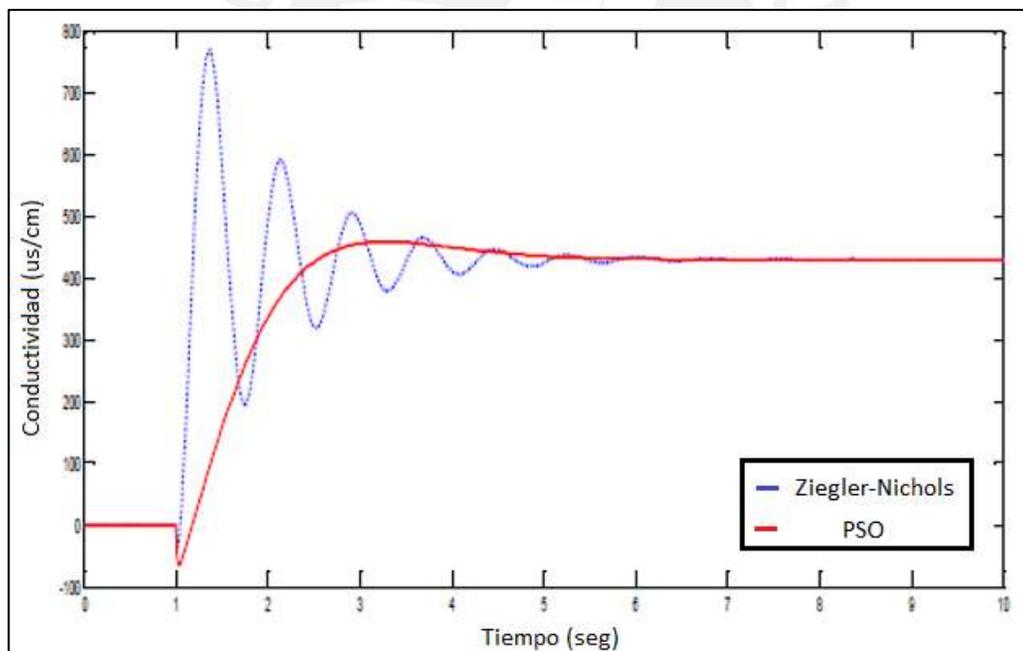


Figura 1.22 Comparación de la respuesta para la conductividad de salida. (Natwar, 2013)

Se observa que la respuesta para conductividad y flujo que ofrece el algoritmo de sintonización por enjambre de partículas presenta una mejora considerable para el tiempo de establecimiento y sobreimpulso en ambos casos. Sin embargo, se debe tener en cuenta que este algoritmo sólo considera el control en el rango de valores donde las variables presentan un comportamiento lineal (trabaja en un rango de operación).

De lo mencionado anteriormente, queda claro que son muchas las técnicas propuestas para el control de plantas desalinizadoras de agua de mar, desde las más simples que involucran el control clásico a las más complejas como el control predictivo, difuso y neuronal; siendo las técnicas de control avanzado las que ofrecen mejor desempeño comparadas con las técnicas de control convencionales, por lo que su diseño e implementación práctica se hacen necesarios.

Sin embargo, se debe destacar que en los trabajos publicados, como regla, no se ofrecen los detalles que se requieren para el diseño e implementación práctica exitosa de esta clase de sistemas de control. Ello se debe a la gran competencia que existen en el ámbito internacional entre las diferentes empresas que producen y comercializan unidades de osmosis inversa para plantas desalinizadoras de agua de mar (Moncada Valerio, 2012).

1.4 Objetivos de la tesis

Debido a la escasez de agua que afectará al país en los próximos años es necesario desarrollar un controlador inteligente para un bastidor de osmosis inversa de una planta desalinizadora de agua de mar, que se desempeñe de manera eficiente y permita obtener agua desalada de alta calidad para consumo humano de acuerdo al estándar de la OMS.

Para lograr este objetivo principal, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Analizar y validar el mejor modelo matemático de una unidad de osmosis inversa.
- Desarrollar un sistema de control inteligente de una unidad piloto de osmosis inversa.
- Realizar un análisis comparativo del sistema de control desarrollado con otras técnicas de control, para determinar la robustez del sistema obtenido frente a diversas perturbaciones, incertidumbres y no linealidades presentes.
- Realizar la propuesta de implementación del sistema de control inteligente desarrollado.

CAPÍTULO 2

PROCESO DE DESALINIZACIÓN DE AGUA DE MAR POR OSMOSIS INVERSA Y MODELADO MATEMÁTICO DE UN BASTIDOR DE OSMOSIS INVERSA DE UNA PLANTA DESALINIZADORA DE AGUA DE MAR.

2.1 Introducción

La desalinización por osmosis inversa es un proceso que permite obtener agua pura mediante la aplicación de una alta presión a través de membranas semipermeables (Fariñas Iglesias, 1999). Esta tecnología es un método eficaz para la remoción de los sólidos disueltos, contaminantes orgánicos, bacterias y virus. La osmosis inversa se ha convertido en los últimos años en una de las tecnologías más atractivas para la desalinización de agua de mar ya que tiene menores requerimientos de energía, baja temperatura de operación y disminuye los costos de producción de agua (Ramillo et al., 2003).

Esta tecnología utiliza membranas para separar solutos disueltos en agua. Pfeffer, Traube y otros estudiaron el fenómeno osmótico utilizando membranas cerámicas por el año 1850 (Baker, 2004). En 1931, el proceso fue patentado como uno de desalinización y el término osmosis inversa fue acuñado. En 1959, el trabajo de Reid y Breton, mostró que mediante el uso de películas de acetato de celulosa también se consiguió este tipo de separación de solutos y se obtiene, bajo ciertas condiciones de presión, hasta un 98% de rechazo de sales del agua de mar. Sin embargo, el descubrimiento crítico para hacer de la osmosis inversa un proceso práctico fue desarrollado por la membrana de acetato de celulosa anisotrópico de Loeb-Sourirajan, la cual obtenía 10 veces más flujo que la mejor membrana de Reid y Breton manteniendo un rechazo de sales equivalente. (Baker, 2004).

La figura 2.1 muestra la evolución de las membranas para el proceso de desalinización por osmosis inversa.

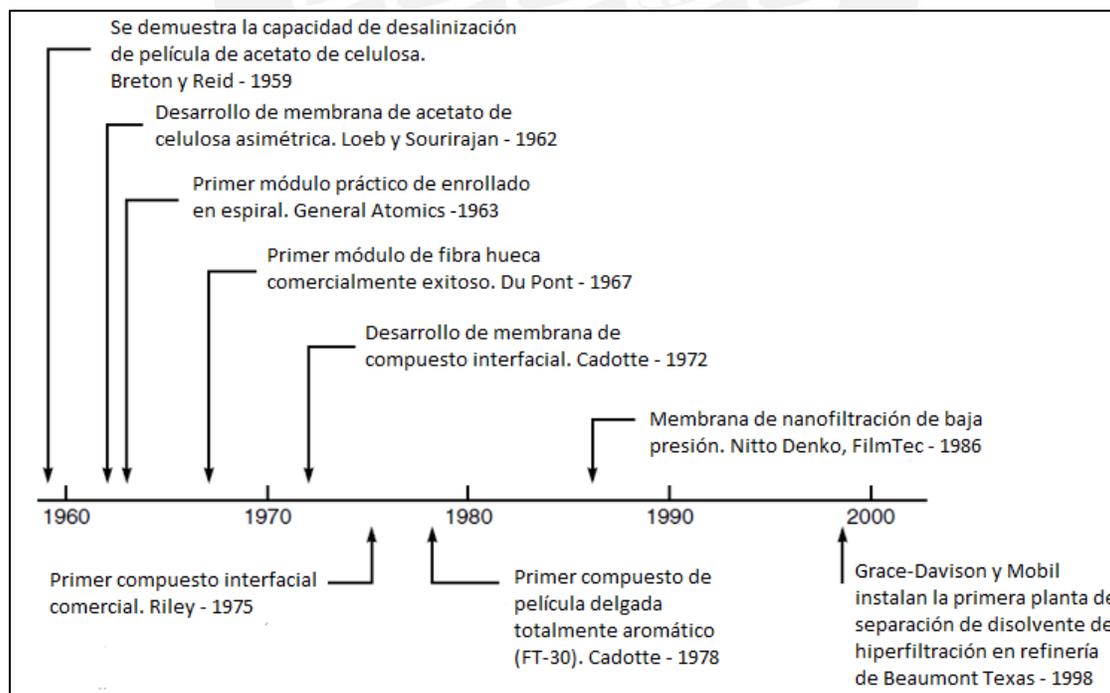


Figura 2.1 Evolución de la tecnología de membranas para el proceso de desalinización osmosis inversa. (Baker, 2004)

El control de este tipo de plantas es complejo debido a que se trata de un sistema con alta interacción entre sus variables, dentro de las cuales, las más importantes a controlar son: la presión de la membrana, que es la que permite que se produzca la osmosis inversa. Cabe mencionar que se debe obtener la mínima presión posible por encima de la presión osmótica ya que las altas presiones afectan considerablemente el costo de producción de la planta. Otra variable importante a controlar es el pH de alimentación el cuál se regula suministrando ácido al agua para disminuir su pH. Asimismo, otras dos variables que se consideran en el proceso de osmosis inversa son el flujo y la conductividad de permeado los cuales garantizan la cantidad y calidad de agua desalinizada, respectivamente.

2.2 Descripción del proceso de osmosis inversa y modelado matemático de un bastidor de osmosis inversa de una planta desalinizadora de agua de mar

■ Osmosis y osmosis inversa

La osmosis es el proceso natural mediante el cual las moléculas de agua fluyen a través de una membrana semipermeable, desde una solución de baja concentración a una de mayor concentración mientras que la osmosis inversa es el proceso mediante el cual se invierte el proceso de osmosis como resultado de aplicar energía en forma de presión a la solución más concentrada. A continuación se presenta la figura 2.2 donde se ilustra dicho proceso.

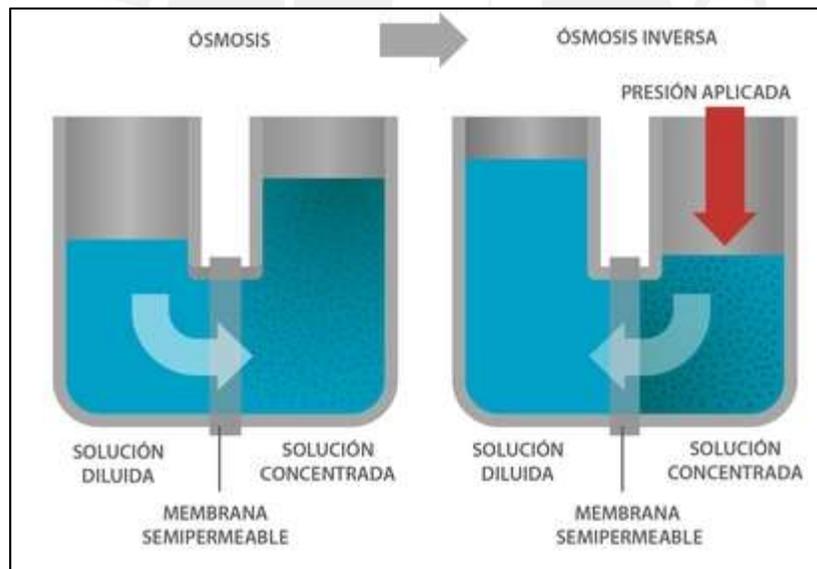


Figura 2.2 Procesos de osmosis y osmosis inversa. [4]

Para el proceso de osmosis, el agua fluye hasta que la concentración se iguala en ambos lados de la membrana. En equilibrio, la concentración de sólidos disueltos es la misma en ambos compartimientos; sin embargo, el compartimiento que contenía mayor concentración ahora tiene un nivel más alto de agua que el otro (Kucera, 2010).

El agua pasa de la solución diluida a la solución concentrada. De esta forma, al perder agua la solución más diluida, aumenta su concentración debido a que posee la misma cantidad de partículas pero en un menor volumen de agua. La solución que era la más concentrada

al recibir agua disminuye su concentración ya que tiene la misma cantidad de partículas pero un mayor volumen de agua.

De esta forma se produce un flujo de agua debido a la diferencia de concentraciones entre dos soluciones que se encuentran separadas por una membrana semipermeable hasta que se alcance el equilibrio. Entre ambas soluciones existe una diferencia de energía originada en la diferencia de concentración. La fuerza que produce este movimiento es conocida como presión osmótica.

Para la osmosis inversa, se debe aplicar energía en forma de presión a la solución más concentrada y cuando dicha presión se iguala a la presión osmótica aparente de las dos soluciones en flujo de agua se detiene. La presión osmótica constituye una medida de la diferencia de energía potencial entre ambas soluciones.

Por lo tanto, si se aplica una presión mayor que la presión osmótica aparente a la solución más concentrada, el flujo de agua comienza a fluir de la solución concentrada a la solución diluida (opuesto a la osmosis). De esta forma se obtiene agua relativamente pura que pasa a través de la membrana, mientras que los sólidos disueltos son retenidos en el otro compartimiento. La figura 2.3 muestra una membrana para osmosis inversa embutida en un tubo metálico de presión con sus diversas capas.

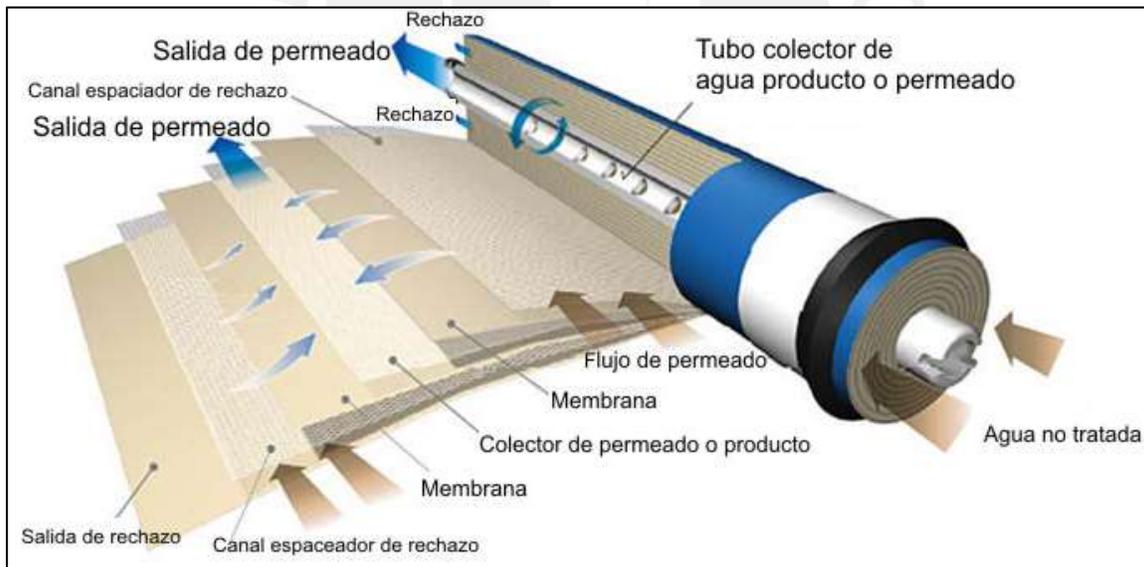


Figura 2.3 Membrana para osmosis inversa en espiral embutida en tubo metálico. [5]

2.2.1 Etapas del proceso de desalinización por osmosis inversa

El proceso de osmosis inversa de una planta desalinizadora de agua de mar cuenta con las etapas que se muestran en la figura 2.4.

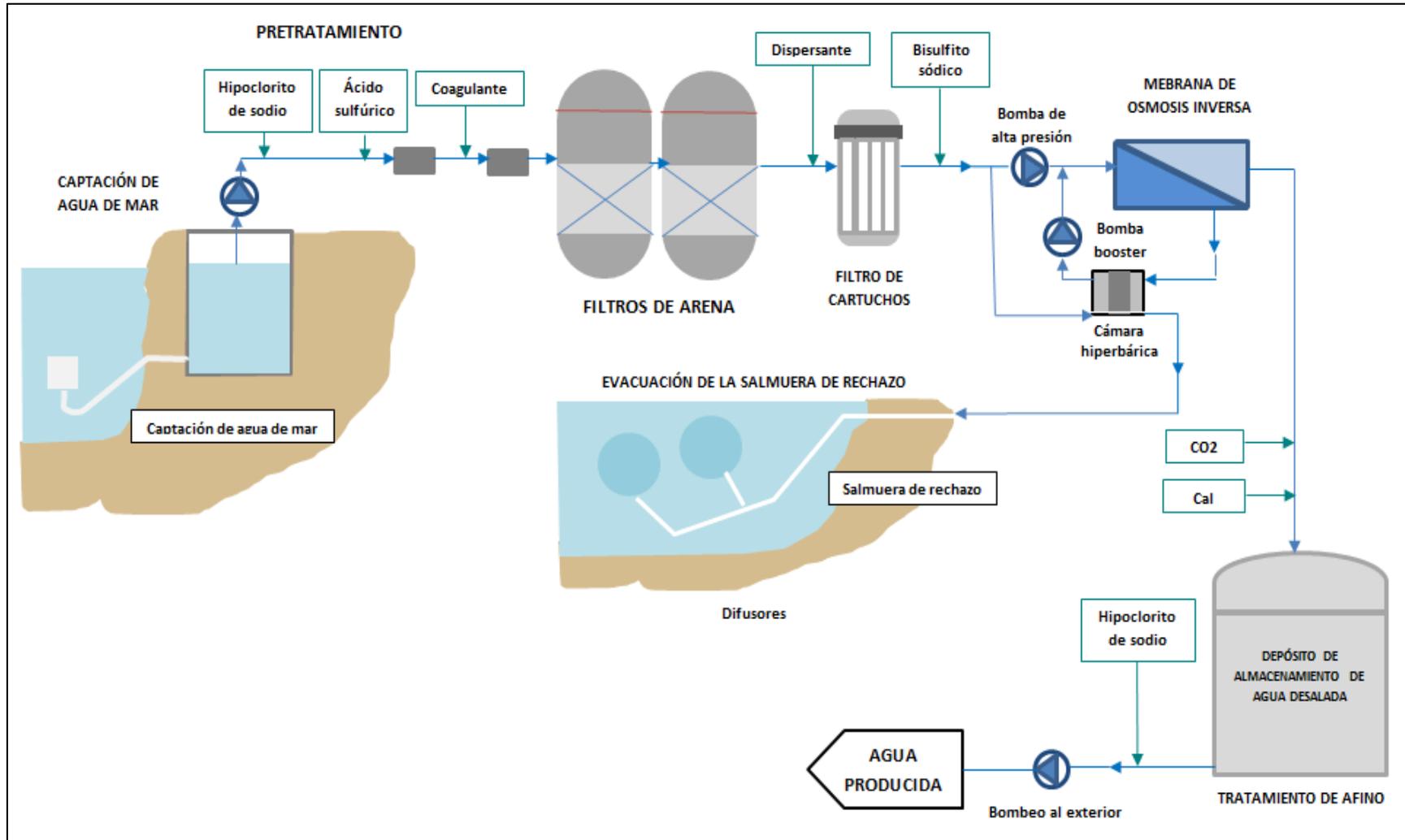


Figura 2.4 Etapas en el proceso de desalinización de agua de mar por osmosis inversa. [6]

■ Bombeo de alta presión

Se desarrolla mediante el funcionamiento de bombas de alta presión. Se instala una bomba de tipo centrífuga multicelular por cada bastidor de osmosis inversa.

Las bomba centrífugas son adecuadas para las aplicaciones de osmosis inversa porque operan favorablemente a flujos medios (menor a 1000gpm) y a presiones relativamente bajas (400psig).

■ Producción de agua desalinizada

El agua impulsada por la bomba de alta presión se conduce al bastidor de osmosis inversa. Cada bastidor tiene una determinada capacidad de producción nominal de agua pura y cuenta con tubos de presión que contienen en su interior a las membranas de arrollamiento en espiral. (Moncada Valerio, 2012)

Estos bastidores operan entregando un alto caudal de permeado y gran rechazo de sales a presiones de operación bajas. Asimismo, poseen un determinado porcentaje de conversión que hace referencia al total del agua que pasa por el bastidor y cuánta agua desalinizada se produce.

Tras la entrada de agua bruta en los tubos de presión del bastidor, se obtienen 2 flujos: uno de permeado que se conduce hacia un tanque de reserva y otro de rechazo (salmuera), que es dirigido hacia un colector y seguidamente hacia un recuperador de presión. A continuación se presenta la figura 2.5 donde se observan los bastidores de osmosis inversa.



Figura 2.5 Bastidores de osmosis inversa. [7]

■ Recuperación de energía

El bombeo de alta presión está dispuesto conjuntamente y en paralelo con un sistema de recuperación dinámica de presión (ERI), que aprovecha la energía residual del agua de rechazo de cada bastidor para transmitirla a una parte del agua de alimentación. Debido a que el caudal de agua que pasa por el sistema de recuperación de energía es prácticamente igual al de agua de rechazo, la bomba de alta presión solo tiene que elevar a la presión requerida un caudal igual al del permeado, con lo cual se logra disminuir el consumo de energía de la bomba de presión. Esto se aprecia en la figura 2.4 donde se ve que el rechazo de la membrana es recirculado a través de una bomba booster (Moncada Valerio, 2012).

Las bombas de recirculación (booster) instaladas se encuentran accionadas por un motor eléctrico con variador de velocidad y proporcionan un bombeo de recirculación de agua de alimentación. Estas bombas incrementan la presión de salida del sistema de recuperación de presión hasta la presión de entrada al bastidor de membranas de osmosis inversa. La impulsión de estas bombas se une a la impulsión de las bombas de alta presión antes del envío del agua a la entrada del bastidor de osmosis inversa.

■ Limpieza química de las membranas

Con el paso del tiempo, las membranas de osmosis inversa se van ensuciando, por lo que el caudal de permeado producido va disminuyendo. El atascamiento debido a materiales coloidales, pequeñas precipitaciones de hierro, etc. hace necesaria la ejecución de operaciones de limpieza para recuperar las propiedades de las membranas.

El sistema de limpieza química se encuentra conformado por los siguientes elementos: dos bombas de limpieza química, un filtro de cartucho con una determinada selectividad para evitar que la solución de limpieza que llega a los bastidores contenga impurezas o reactivos sin disolver que puedan dañar las membranas y un depósito en el que se gestionan las soluciones de limpieza con agua procedente de la línea de retro-lavado y los reactivos adecuados. En la figura 2.4 se aprecia que antes del ingreso de agua a la membrana se tiene filtros de arena y de cartucho para la limpieza del agua de alimentación (Moncada Valerio, 2012).

■ Depósito de equilibrio osmótico y desplazamiento de lavado

Permite mantener la presión de las cajas, evitando que el fenómeno de osmosis directa dañe las membranas por el lado del permeado. De igual forma, estos depósitos son una reserva de agua para las operaciones de desplazamiento y limpieza de las membranas. En estos casos, el agua tratada se dirige mediante bombas a los bastidores para efectuar el desplazamiento y el lavado cuando sean necesaria.

■ Vertido de salmuera

La salmuera de rechazo de las membranas es devuelta al mar a través de un colector de vertido. Uno de los aspectos considerados en la elección de la zona de vertido es que los

fondos marinos donde se evacúe la salmuera sean fondos degradados y sin vegetación para que la afección biológica marina sea mínima.

■ Post tratamiento

El flujo obtenido de cada bastidor de osmosis inversa se conduce hasta un tanque en el que se realiza el proceso de post-tratamiento para ajustar la calidad del agua producto (para consumo humano), antes de ser enviada al tanque de almacenamiento.

El agua desalada mediante osmosis inversa tiene un pH bajo (aproximadamente 5,5), es pobre en calcio y de baja alcalinidad debido al elevado rechazo de estos iones por las membranas.

El proceso de post-tratamiento consiste en una re-mineralización del agua empleando dióxido de carbono y calcita y dosificación de hipoclorito sódico. Los primeros aumentan la alcalinidad del agua mientras que el segundo es necesario para la desinfección de la misma.

2.3 Modelado matemático de un bastidor de osmosis inversa de una planta desalinizadora de agua de mar

El modelado matemático de un bastidor de osmosis inversa resulta una tarea compleja debido al carácter multivariable que presenta dicho proceso.

Uno de los primeros estudios fue realizado por Alatiqi (Alatiqi et al., 1989), quien realizó el modelado de una planta piloto de desalinización por osmosis inversa en Kuwait. Dicho procedimiento consistió en la identificación de la relación dinámica que gobierna el proceso, ya que este posee muchas variables que dependen entre sí y es por esto que un enfoque multivariable se hace necesario.

El modelo consideró como variables manipuladas la presión, que es manejada mediante el estrangulamiento de la válvula de rechazo, y el pH del alimentado, el cual debe adicionarse al agua de entrada para variar el grado de acidez de ésta. Se toma como variables controladas el flujo y conductividad de permeado, pues dan una medida de la cantidad y calidad del agua producto, respectivamente.

Como resultado se obtuvo las ecuaciones (a) y (b) que representan la dinámica del sistema:

$$Y = G_p U \dots (a)$$

$$\begin{bmatrix} F \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{p11} & G_{p12} \\ G_{p21} & G_{p22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ pH \end{bmatrix} \dots (b)$$

Donde F es el flujo de permeado, C es la conductividad del permeado, P es la presión de alimentado, y pH es el pH del alimentado. Las funciones de transferencia en el dominio de Laplace son las siguientes:

$$G_{p11} = \frac{F}{P} = \frac{0.002(0.56s + 1)}{(0.003s^2 + 1s + 1)} \dots (c)$$

$$G_{P12} = \frac{F}{pH} = 0 \dots (d)$$

$$G_{P21} = \frac{C}{P} = \frac{-0.51(0.35s + 1)}{(0.213s^2 + 7s + 1)} \dots (e)$$

$$G_{P22} = \frac{C}{pH} = \frac{-57(0.32s + 1)}{(0.6s^2 + 1.8s + 1)} \dots (f)$$

Para la obtención de estas ecuaciones se llevó el sistema a estado estacionario. Se aplicó una señal escalón a las variables manipuladas y se observó la respuesta de las variables controladas. Se recogieron estos datos resultantes y se aproximaron a funciones de transferencia de segundo grado con un cero en el numerador.

Este modelo fue utilizado por Abbas (Abbas, 2006) para el desarrollo de un controlador DMC mientras que Robertson (1996) utilizó el mismo procedimiento, donde la dinámica fue modelada utilizando funciones de transferencias empíricas. En este trabajo se elige como variables de salida al caudal de agua producto y la correspondiente conductividad, y como variables de entrada a la presión y pH del agua de alimentación. Se considera una variación del flujo como referencia dado que es uno de los eventos que ocurren con mayor frecuencia.

Riverol y Pilipovik (Riverol and Pilipovik, 2005) aplicaron la identificación de sistemas y llegaron a un modelo con desacoplamiento perfecto, considerando las mismas variables que Alatiqi. El modelo planteado se presenta en la figura 2.6.

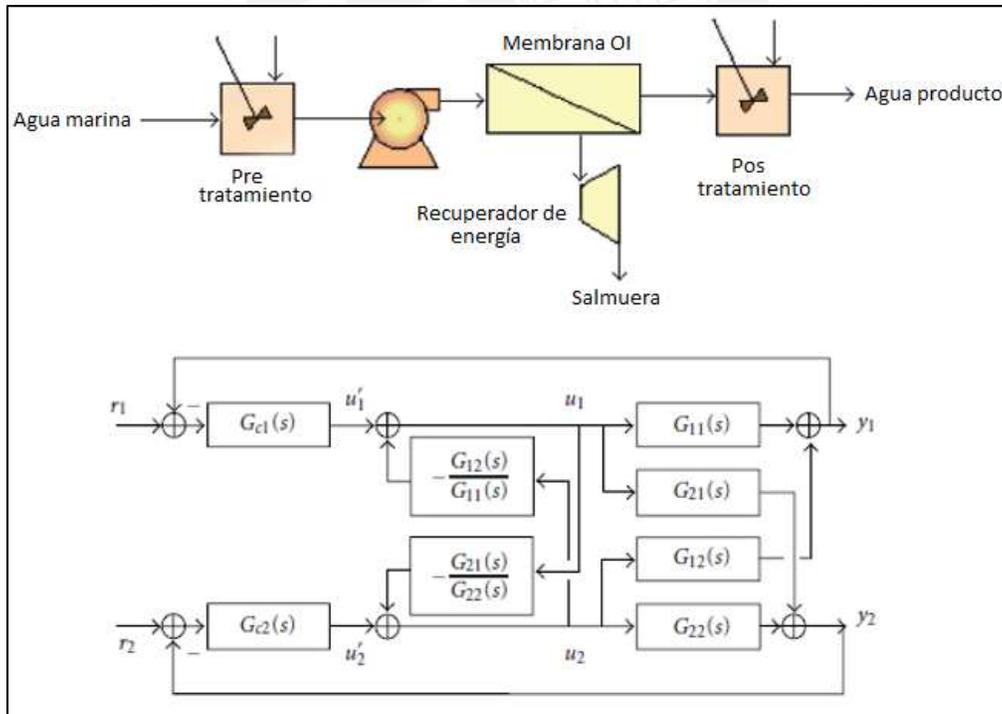


Figura 2.6 Modelo desacoplado para una unidad de osmosis inversa. (Riverol y Pilipovik, 2005)

Assef (Assef et al, 1997) utilizó la misma técnica de identificación de parámetros que planteaba Alatiqi para modelar una planta con cuatro membranas de celulosa. Consideró como variables manipuladas el flujo de salmuera y el flujo del ácido, y como variables controladas el flujo y conductividad del permeado, la presión de la membrana y el pH del alimentado. Con esto se obtuvo también funciones de transferencia de segundo orden.

Burden (Burden et al., 2001) propuso una variación del modelo anterior y consideró las mismas variables para una planta de membranas de fibra hueca. En este caso se utilizó para la identificación del sistema la excitación con una señal impulso.

Los modelos presentados en los trabajos de Riverol, Alatiqi, Asseff y otros están basados en una herramienta de control denominada identificación, con la particularidad de que se ha usado información real que serviría únicamente para una planta trabajando en un punto de operación en particular.

Asimismo, no hay manera de verificar si los modelos presentados son incorrectos. Los modelos han sido forzados a una respuesta de una determinada forma, por ejemplo, a una función de segundo grado (Alatiqi et al., 1989, Robertson et al., 1996).

$$G_{i(s)} = \frac{K_i(\tau_i s + 1)}{\tau_i^2 s^2 + 2\zeta_i \tau_i s + 1}$$

Como respuesta a estas falencias, Gambier (Gambier et al., 2007), resalta el hecho de que si bien en la literatura actual se encuentran modelos en tiempo-espacio y modelos generados por la identificación de parámetros, no hay información al respecto acerca de modelos dinámicos de parámetros agrupados obtenidos por la aplicación de leyes físicas en una planta desalinizadora.

La importancia de tener reportes acerca de estos modelos, es la de implementar sistemas tolerantes a fallos y conocer sobre las respuestas transitorias y estables del sistema. Es por ello que la mayor contribución y el objetivo de este trabajo es presentar un modelo de parámetros agrupados basados en leyes físicas.

El proceso de modelado se dividió en varios pasos. El primero fue dividir la planta en subsistemas. Una planta de osmosis inversa se divide usualmente en 5 subsistemas: generación de energía, pre tratamiento del agua, Bombeo y recuperación de energía, membrana semipermeable y pos-tratamiento.

Los sistemas de pretratamiento y post-tratamiento pueden ser modelados como tanques, así que el enfoque recae principalmente en establecer el modelo para la membrana de RO. La unidad de RO a su vez cuenta con los subsistemas de salmuera, sistema de permeado y la membrana. Se asumió lo siguiente previo a la declaración del modelo:

- La membrana responde a un sistema de filtrado ideal a través de difusión.
- Los flujos dentro de la unidad de osmosis inversa son laminares.
- La unidad de osmosis inversa es alimentada con agua.

Para el subsistema de salmuera se describe el modelado con ecuaciones para la masa, flujo, momento, temperatura, energía y concentración de sal.

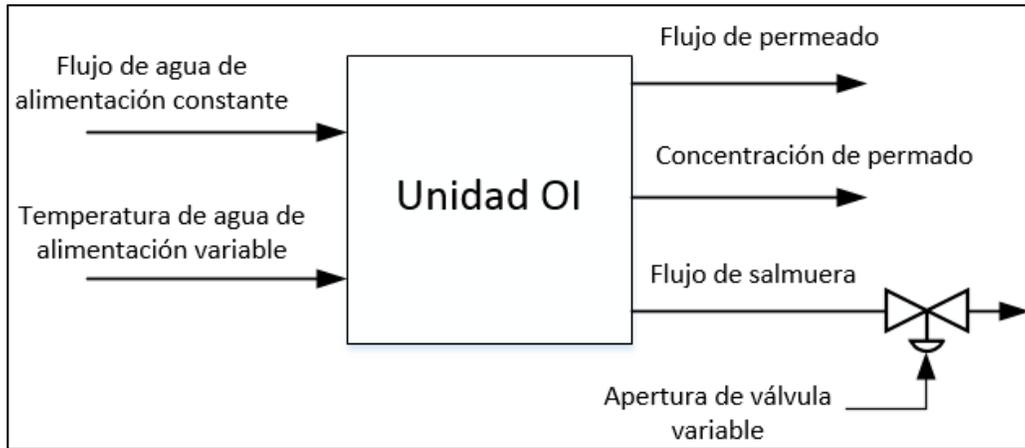


Figura 2.7 Esquema de simulación para una planta desalinizadora por osmosis inversa. (Baker, 2004)

Para el modelado de la membrana se utilizó ecuaciones especiales usando la membrana de tipo fibra hueca. Se simuló y se realizó experimentos en el sistema en lazo abierto en SIMULINK usando la librería estándar y haciendo uso de los parámetros de una membrana real tipo fibra hueca Dupont B9. El esquema utilizado se observa en la figura 2.7

El primer experimento consistió en analizar el flujo de permeado y la concentración ante una determina temperatura (18°C) y a diferentes porcentajes de apertura de la válvula (0-100%), la conclusión es que a menor porcentaje de apertura de la válvula disminuye la sal concentrada en el flujo de permeado lo que significa un agua de mayor calidad y que necesita menor pos-tratamiento.

El segundo experimento consistió en mantener constante la válvula al 50% e incrementar la temperatura de 18°C a 23°C lo que resultó que haya más agua de permeado. Esto provoca un cambio en los coeficientes de la membrana y la concentración de permeado crece y luego decae. Las ecuaciones que se propusieron muestran la relación del flujo y la concentración respecto a la temperatura.

Finalmente, en el tercer experimento, la apertura de la válvula y la temperatura se cambian dinámicamente. Cuando la apertura de la válvula cae de 100 a 50% el flujo de permeado se incrementa linealmente mientras que la concentración de sal decrece exponencialmente. Un efecto similar se observa cuando se incrementa la temperatura del agua que ingresa de 18°C a 24°C .

Como conclusión se obtiene que el modelo matemático propuesto, se ajusta a la dinámica de una planta real (con excepción de algunos parámetros que se necesitan ajustar cuando se aplica a una de estas). Esto constituye un resultado importante ya que demuestra que es posible estimar más modelos matemáticos de igual relevancia y deja en evidencia la falta de herramientas de simulación y de diseño de plantas desalinizadoras de RO.

Otro ejemplo de modelado matemático es presentado por Al-haj (Al-haj et al., 2008), en cuyo estudio desarrolla un modelo dinámico sencillo para controlar la calidad del agua utilizando osmosis inversa, generando un modelo teórico donde cada membrana es descrita por dos ecuaciones diferenciales ordinarias utilizando para ello leyes físicas de conservación. El modelo considera las siguientes suposiciones:

- La solución contiene sólo un soluto y un solvente (solución binaria).
- La permeabilidad del agua es constante e independiente de la presión.
- El flujo dentro del tubo es turbulento.
- La polarización de la concentración en la superficie de la membrana es descrita por el modelo de película de Nerst.
- La presión osmótica puede ser representado por la ecuación de Van't Hoff.
- En el lado de permeado la mezcla es uniforme en la dirección radial.
- Se desprecian los efectos de difusión axial y angular.
- La caída de presión radial es despreciable.

Para describir el modelo se utilizan dos ecuaciones implícitas las cuales se resuelven iterativamente para conseguir el flujo de permeado y la concentración en la superficie de la membrana (considerando el flujo como turbulento). Luego se obtiene la concentración de sales de la salmuera así como la presión a la que se encuentra. Finalmente, se halla el flujo de salmuera y se calcula la concentración de sales del agua producto.

Este modelo es probado en un módulo con condiciones de operación de temperatura ambiente de 30° C, presión de alimentación de 35 bar, concentración de la solución de 2000 ppm y velocidad de entrada de 6.8 m/s. La membrana utilizada tiene un diámetro de 1.25 cm y longitud de 60cm.

Al aplicar el modelo en la experimentación de este módulo se obtiene una buena correlación frente al mismo, el cual indica que existe una dependencia lineal de la presión de salida con respecto a la velocidad de entrada. Asimismo se mide la concentración axial en diferentes posiciones de la membrana para contrastarse con el modelo.

Se aplica una entrada escalón de 0.5 a 0.55 m^3/s , es decir, se incrementa el flujo de alimentación resultando en una disminución de la presión de alimentación. En consecuencia, la concentración de sales en la superficie de la membrana disminuye y la presión de salida (salmuera) aumenta.

Sin embargo, esta experimentación debe modificarse para aplicaciones industriales dado que la alimentación solo fue agua levemente salada. En condiciones reales existe un efecto de ensuciamiento lo cual influye en la linealidad del modelo.

C. McFall, Bartman y Christofides desarrollaron una estructura de control no lineal basada en modelos feedback/feedforward de un sistema de desalinización de alta recuperación por osmosis inversa, en el cual se tuvieron en cuenta las cuestiones prácticas relacionadas con el muestreo, la medición del ruido, grandes perturbaciones variantes en el tiempo y fallas en los actuadores (McFall et al., 2008). Para lograr su objetivo, McFall desarrolló un modelo

matemático detallado de la planta, luego aplicó un controlador no lineal basado en Lyapunov que incluye componentes feedback y feedforward.

El modelo de la planta está basado en los principios básicos de conservación: balance microscópico de energía cinética, balance local de materia y balance microscópico de materia en un volumen de control. El desarrollo del modelo considera que:

- El fluido es incompresible
- La masa y el volumen interno son constantes,
- El agua en el módulo viaja en flujo pistón (no hay retro mezcla ni difusión axial),
- La presión osmótica puede relacionarse con los TDS en la superficie de la membrana.
- La fricción en las paredes de las membranas y tuberías es despreciable con respecto a las pérdidas hidráulicas a través de las válvulas y membranas.
- El balance de materia se realiza alrededor de las válvulas de control manipuladas, el balance local de materia en el punto de derivación del bypass y para el balance de envoltura se toma un volumen de control diferencial en la dirección del flujo.
- La solución del modelo se realiza iterativamente resolviendo las ecuaciones diferenciales del balance de envoltura utilizando el método de disparo.
- La síntesis del controlador se realiza en base a una perturbación originada en la concentración de la alimentación.

Para lograr la técnica FTC (Control Tolerante a Fallos) se sugiere la instalación de variables manipuladas redundantes (las cuales pueden ser usadas para controlar el sistema en caso de una falla). Estas configuraciones implican la instalación de una válvula de control redundante en la línea de bypass y la instalación de una válvula de control de respaldo en la línea de rechazo.

Para la detección e identificación de fallas (FDI), se utilizan filtros FDI (Mhaskar et al., 2008), los cuales son diseñados teniendo en cuenta la diferencia entre los estados del filtro y las velocidades del fluido en las líneas de bypass y rechazo (residuos), de modo que si un residuo se vuelve diferentes de cero, se declara la existencia de una falla en su válvula asociada y se activa la configuración de respaldo correspondiente.

La propuesta realizada por McFall demuestra tener un desempeño superior a los controladores PID convencionales. Sin embargo, no deja de ser más que un modelo teórico que necesita ser validado evaluando su desempeño en un sistema real.

También se han obtenido modelos matemáticos con fines más específicos, como por ejemplo el desarrollado por Bartman (Bartman et al., 2009), quien propuso un algoritmo de control predictivo basado en modelos para controlar la inversión del flujo en un sistema de desalinización por osmosis inversa.

Basado en el hecho de que es fundamental evitar la formación de incrustaciones en las paredes de las membranas y en que los métodos convencionales (adición de agentes anti-incrustantes y flushing) presentan muchos inconvenientes (Rahardianto et al., 2006) y

desventajas respecto al método de inversión de flujo, Bartman desarrolló un modelo y la simulación para el control óptimo de la inversión de flujo, con lo cuales buscó determinar la trayectoria óptima entre las condiciones normales de operación y un nuevo estado estacionario (a partir del cual se dará la transición) utilizando el MPC (Modelo de Control Predictivo).

El modelo desarrollado se basó en un balance global de materia y balances locales de energía (alrededor de válvulas del sistema), se tomó la concentración efectiva en las unidades de osmosis inversa como un promedio ponderado de las concentraciones de alimentación y rechazo. Se utilizó una ecuación algebraica para relacionar la presión del sistema con los demás parámetros y con una ecuación para la presión osmótica basada en la concentración y temperatura.

Las variables controladas durante la inversión de flujo son la presión del sistema y el flujo de bypass, mientras que las variables manipuladas son las resistencias en las válvulas de bypass y de rechazo. El objetivo de control es mantener constante la presión del sistema (para evitar daños en el sistemas y/o las membranas), a la vez que se trató de lograr esta transición en el menor tiempo posible y teniendo en cuenta muchos parámetros importantes, tales como: variación permitida en la presión, velocidad de la corriente de bypass y la cantidad de energía de control gastada.

Para satisfacer las condiciones anteriores, los autores formulan una ecuación de costo para la transición. El valor de la función de costo depende del estado inicial del sistema, del estado del sistema en cualquier instante después de iniciada la transición, de la acción de control utilizada y de los valores asignados a los coeficientes de ponderación.

Los autores muestran los resultados de varias simulaciones del desempeño del controlador MPC y lo comparan contra el control manual de una transición en lazo abierto y contra el caso en que el control de la transición se realiza con controladores PI. En el caso del control manual (debido a la restricción impuesta por la máxima velocidad de apertura y cierre de las válvulas) la presión del sistema cae mucho más que con el uso del control MPC durante la transición. En el caso de los controladores PI, a pesar de la evaluación de muchos parámetros de sintonía, estos muestran ya sea un pobre desempeño transitorio en lazo cerrado o un tiempo de establecimiento demasiado largo, razón por la cual, el controlador MPC es considerablemente mejor.

Finalmente, los autores obtienen que el costo de las transiciones controladas por MPC oscile dentro de dos valores (bandas). Los resultados indican que dicho costo depende fuertemente de la ponderación individual de cada término en la función pero que la tendencia (dentro de las bandas) es independiente de estos factores de ponderación.

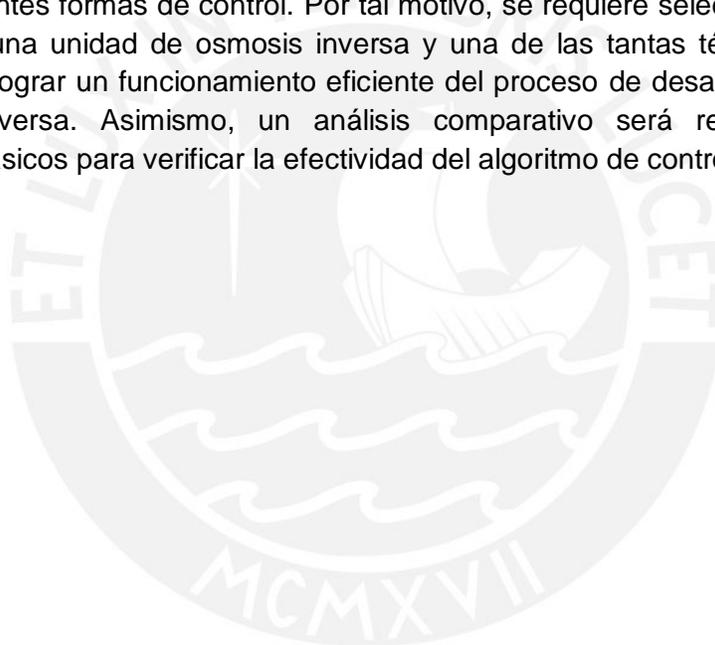
El modelo es bastante simple, no considera el gradiente de presión ni de concentración en la dirección axial a lo largo de la membrana, y más aún, no ha sido validado experimentalmente; sin embargo, merece ser reconocido como el primer trabajo documentado en el que se propone el control MPC a la inversión de flujo de alimentación en los procesos de desalinización por osmosis inversa.

Otro modelado específico es presentado por Syafiie (Syafiie et al., 2008), cuyo objetivo es el de obtener un modelo matemático del comportamiento dinámico de los componentes del subsistema de pretratamiento (filtro de arena y cartuchos de asentamiento).

Los parámetros de las ecuaciones del modelado del filtro de arena son caudal de ingreso y de salida y diferencial de masa del agua que pasa a través de ellos y de las partículas suspendidas.

Se ha modelado también la cantidad de bacterias vivientes y componentes inorgánicos en la solución de agua salada, y su relación y reacción con los componentes químicos adicionados (cloro, por ejemplo). Se ha simulado el sistema de pretratamiento en una planta de RO usando el software EcoSimPro.

Se llega a la conclusión que en la literatura hace falta simuladores de modelos dinámicos para plantas desalinizadoras, así como herramientas que permitan su fácil simulación y prueba de diferentes formas de control. Por tal motivo, se requiere seleccionar un modelo matemático de una unidad de osmosis inversa y una de las tantas técnicas de control inteligente para lograr un funcionamiento eficiente del proceso de desalinización de agua por osmosis inversa. Asimismo, un análisis comparativo será realizado frente a controladores clásicos para verificar la efectividad del algoritmo de control propuesto.



CAPÍTULO 3

DISEÑO DE CONTROLADOR INTELIGENTE PARA UN BASTIDOR DE OSMOSIS INVERSA DE UNA PLANTA DESALINIZADORA DE AGUA DE MAR.

3.1 Introducción

Como se mencionó en los capítulos anteriores, la desalinización de agua constituye una propuesta prometedora frente a la escasez de agua mundial. Por ello, resulta indispensable disponer de sistemas de control efectivos que permitan obtener agua desalinizada apta para el consumo humano. Sin embargo, uno de los principales problemas que enfrentan las diversas técnicas de desalinización es el elevado consumo energético. Citando un ejemplo directo, el uso de bombas de alta presión para llevar a cabo la desalinización por osmosis inversa dependiendo de la cantidad de bastidores que se vayan a implementar (Moncada Valerio, 2012).

Por lo tanto, en la medida que puedan desarrollarse estrategias efectivas de control que logren llevar a cabo el proceso de manera eficiente permitirá la construcción de plantas desalinizadoras en diversas partes del mundo.

Dentro de estas estrategias, se encuentra el control inteligente con alternativas como las redes neuronales, lógica difusa y algoritmos genéticos.

El control inteligente comprende una serie de técnicas, tomadas fundamentalmente de la inteligencia artificial, con las que se pretenden resolver problemas de control inabordables por los otros métodos (Sanz. R et al., 1996). En ese sentido, el control inteligente se utiliza para hacer referencia a un control en el que las actividades cognitivas tienen especial importancia, por ejemplo, los comportamientos impredecibles de un sistema a controlar.

Por otro lado, esta técnica permite realizar un control efectivo de plantas con comportamiento dinámico complejo (no linealidad, sistemas multivariables con fuerte interacción entre sus variables, sensibilidad al ruido y perturbaciones, etc.).

3.2 Fundamentación de la estrategia de control a utilizar

Actualmente, los sistemas de control de plantas desalinizadoras mediante osmosis inversa deben satisfacer necesidades económicas asociadas a las variables de proceso, minimizando costo de operación, con criterios de seguridad, medioambientales y de calidad de producto final (agua desalinizada) y además cumpliendo con ciertas especificaciones sujetas a una demanda normalmente variable. Por ello, el objetivo de todo controlador avanzado debe ser el de generar variables de control que posibiliten satisfacer múltiples y cambiantes criterios de funcionamiento en presencia de cambios en el comportamiento dinámico de la planta (Moncada Valerio, 2012).

Uno de las técnicas que permite enfrentar estas dificultades es la lógica difusa, la cual fue formulada por Lotfy A. Zadeh en 1965 y cuyo desarrollo ha permitido diferentes aplicaciones relacionadas a la industria, la medicina y la actividad espacial.

La lógica difusa es bastante sencilla ya que está asociada a la manera de pensar del ser humano y en la forma en que este percibe el medio que lo rodea, es decir, se puede saber que el ambiente está “frío” o “caliente” pero no se tiene una medida exacta de la temperatura.

La incorporación de la lógica difusa a los sistemas de control da lugar a lo que se conoce como sistemas de control difuso. La idea que se maneja es la siguiente, se debe determinar de forma lógica qué se debe hacer para lograr los objetivos de control de la mejor manera

posible a partir de una base de conocimiento proporcionada por algún operador humano (experto). Sin esta base de reglas no es posible desarrollar una aplicación y que esta funcione de manera adecuada (Sanz Molina y Martín del Brío, 2002).

Se utiliza el conocimiento y experiencia de un operador humano para construir un controlador que emule el comportamiento de una persona y puede ser aplicado para sistemas de lazo simple como sistemas multivariables. Comparado con el control tradicional (PID), el control difuso tiene dos ventajas prácticas:

- El modelo matemático del proceso a controlar no es requerido.
- Se obtiene un controlador no lineal desarrollado empíricamente sin complicaciones matemáticas.

Como desventaja, si la base de reglas es proporcionada por un operador que no tiene la experiencia adecuada del proceso, el sistema funcionará de forma deficiente.

Diferentes autores han propuesto para el control de plantas desalinizadoras el uso del control difuso, como es el caso de Jamshidi (M. Jamshidi, et al., 1996), quien realiza el diseño e implementación de controladores difusos para sistemas complejos, tomando como caso de estudio una planta desalinizadora de agua de mar indicando que las técnicas tradicionales de control son adecuadas para sistemas de control que operan en un entorno estructurado. Sin embargo, los sistemas reales operan bajo condiciones no estructuradas para las cuales obtener un modelo analítico, a menudo, no puede ser determinado.

A continuación se mencionan los principales elementos que conforman la lógica difusa: (Jang, 1996)

a) Conjuntos borrosos: Los conjuntos clásicos tienen limitaciones, se define un universo de discurso que contiene a conjuntos cuyos bordes están bien definidos de tal forma que un elemento puede o no pertenecer a cierto conjunto (es verdadero o falso), no se definen situaciones intermedias. Los conjuntos borrosos son una extensión de los conjuntos clásicos donde se añade una función de pertenencia, definida esta como un número real entre 0 y 1. Así se introduce el concepto de conjunto o sub-conjunto borroso y se le asocia a un determinado valor lingüístico, definido por una palabra o etiqueta donde esta es el nombre del conjunto o sub-conjunto. Por cada conjunto se define una función de pertenencia o membresía denotada por $\mu_A(x)$, la cual indica el grado en que la variable 'x' está incluida en el concepto representado por la etiqueta 'A', es decir

$$0 \leq \mu_A(x) \leq 1$$

Donde: cero indica un grado de pertenencia nulo y uno un grado de pertenencia total al conjunto en cuestión.

Por ejemplo, sea el conjunto 'velocidad' con variable 'x' definido por 3 subconjuntos {baja, media, alta} con sus respectivas funciones de membresía:

$$\mu_{Baja,A}(x), \mu_{Media,A}(x), \mu_{Alta,A}(x)$$

Estas se muestran a continuación en la figura 3.1.

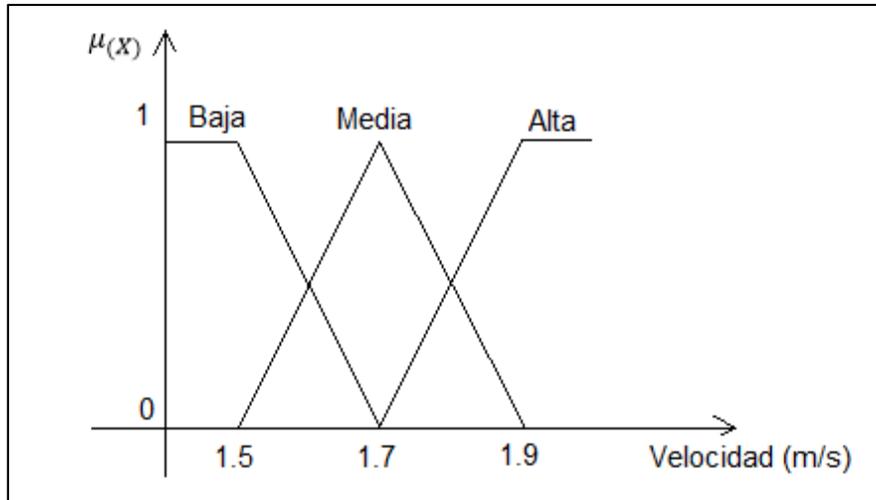


Figura 3.1 Funciones de membresía para el conjunto velocidad. [Elaboración propia]

b) Funciones de membresía: Son las que representan el grado de pertenencia de un elemento a un subconjunto definido por una etiqueta lingüística. Existe una gran variedad de funciones para representar las funciones de membresía, entre las más conocidas están las funciones triangulares y trapezoidales las cuales se muestran en las figura 3.2.

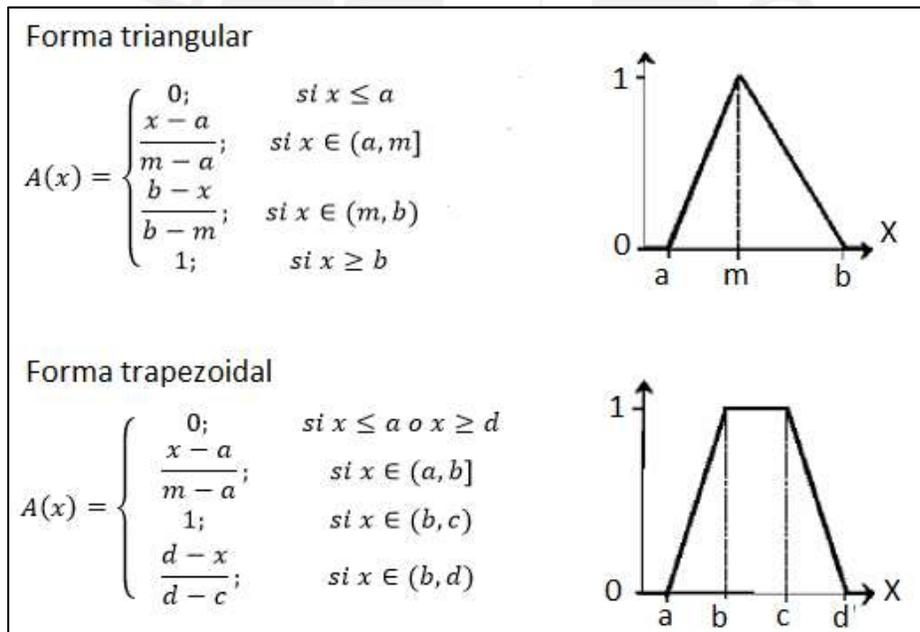


Figura 3.2 Representaciones de las funciones de membresía. [Elaboración propia]

c) Operaciones borrosas: A los subconjuntos se les puede aplicar determinados operadores o bien se pueden realizar operaciones entre ellos. Al aplicar un operador sobre un conjunto se obtendrá otro conjunto. Lo mismo sucede cuando se realiza una operación entre conjuntos.

Las operaciones lógicas se utilizan en controladores y modelos difusos. Se definen así 3 operaciones básicas a realizar sobre conjuntos, las cuales son: intersección, unión y complemento.

Sean dos conjuntos 'A' y 'B' asociados a una variable lingüística 'x', dichas operaciones se definen como:

$$\text{Complemento: } \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

$$\text{Unión: Operador MAX (Zadeh): } \mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

$$\text{Intersección: Operador MIN (Zadeh): } \mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

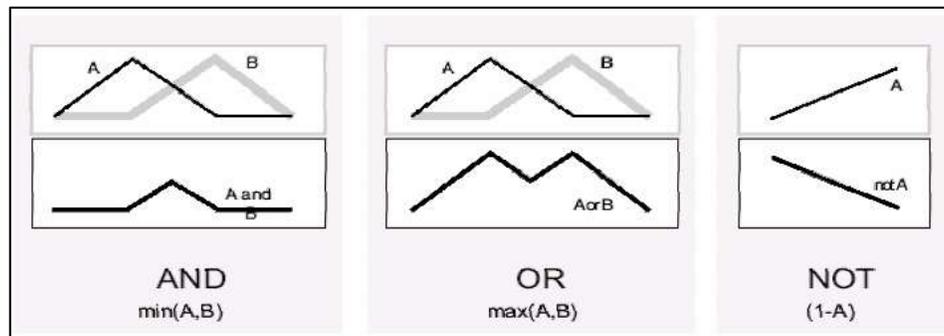


Figura 3.3 Operaciones difusas con dos conjuntos [Elaboración propia]

d) Fuzzyficación: Es un procedimiento matemático en el que se convierte un elemento del universo de discurso (variable medida del proceso) en un valor en cada función de membresía a las cuales pertenece.

e) Reglas difusas: Son combinaciones de uno o más conjuntos de entrada asociados mediante afirmaciones del tipo “si-entonces” que dan como resultado otro conjunto borroso llamado consecuente. A esta asociación se le conoce como reglas borrosas o fuzzy rules. Los conjuntos borrosos del antecedente se asocian mediante operaciones lógicas ‘AND’, ‘OR’, etc.

Las reglas difusas son proposiciones que permiten expresar el conocimiento de que se dispone sobre la relación entre antecedentes y consecuentes. Para expresar este conocimiento de manera completa normalmente se precisan varias reglas que se agrupan formando lo que se conoce como base de reglas, la que determina cuál será el comportamiento del controlador difuso y es aquí donde se emula el conocimiento o experiencia del operario y la correspondiente estrategia de control.

Existe una gran variedad de tipos de reglas, siendo dos tipos los que mayormente se utilizan y son: reglas difusas Mandani (el resultado de la inferencia es una variable lingüística) y reglas difusas Takagi-Sugeno (el resultado de la inferencia es una combinación lineal de las entradas).

f) Defuzzyficación: Es un proceso matemático utilizado para convertir un conjunto difuso en un número real. El sistema de inferencia difusa obtiene una conclusión a partir de la información de la entrada, pero en términos difusos. Esta conclusión o salida difusa es obtenida por la etapa de inferencia difusa generando un conjunto difuso, pero el dato de

salida debe ser un número real y debe ser representativo, motivo por el cual existen diferentes métodos de defuzzyficar, siendo el más utilizado el método del centroide.

Todos estos procedimientos descritos pueden apreciarse de mejor manera en la siguiente imagen:

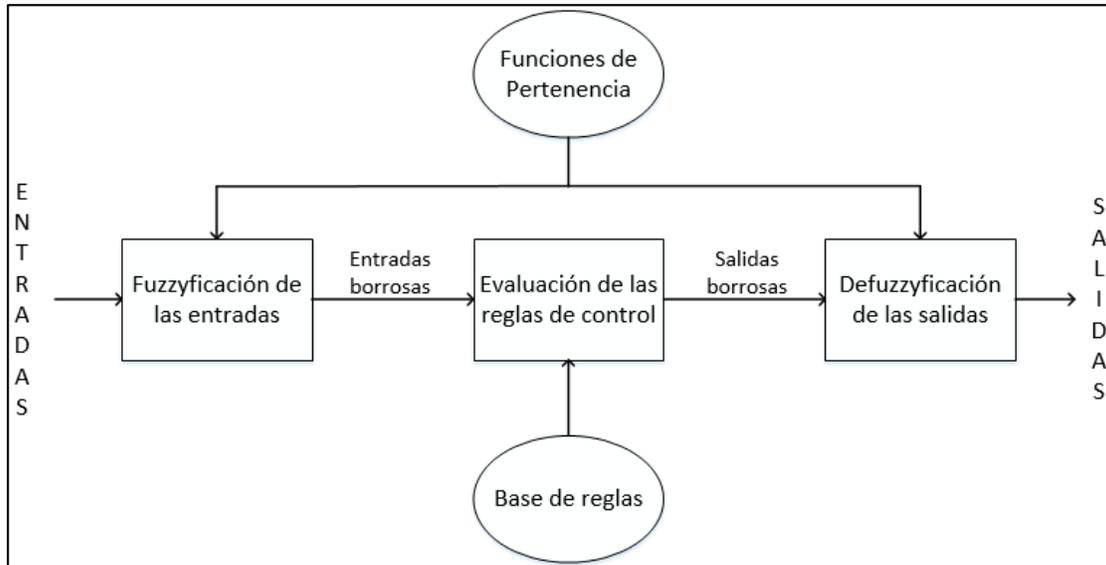


Figura 3.4 Sistema de inferencia difuso. [Elaboración propia]

El objetivo del controlador con lógica difusa es resolver problemas complejos de control a partir de soluciones simples o más simples que otras en base a la experiencia que se tiene del proceso, convirtiéndose esta en la base de conocimiento requerida. Este tipo de controlador en ningún caso pretende desplazar a las técnicas tradicionales de control como el PID. El control difuso se debe emplear cuando sea necesario, es decir, cuando otras herramientas más simples no solucionen el problema de control de manera satisfactoria.

En la actualidad esta herramienta de control tiene aplicación en muchos campos, proporcionando una solución sencilla a problemas complejos. Asimismo, diversos fabricantes de insumos para control, software y hardware, están incorporando módulos con lógica difusa y productos nuevos que en menor o mayor grado usan lógica difusa. Algunas aplicaciones exitosas utilizando fuzzyPLC que es un PLC con un módulo de lógica difusa incorporado son:

- Control de balanceo de grúas.
- Control de llama en plantas de incineración de residuos.
- Control de robots en inspección de túneles.
- Control de dosificación en plantas de tratamiento de aguas negras.

Por lo tanto, siendo un bastidor de osmosis inversa de una planta desalinizadora de agua un sistema complejo por ser multivariable y tener fuerte interacción entre sus variables críticas es que se opta por utilizar el control difuso para conseguir un mejor desempeño del proceso y obtener agua desalinizada de calidad para consumo humano.

3.3 Diseño del controlador difuso para un bastidor de osmosis inversa

El primer paso consiste en definir el modelo a utilizar. Para este caso se trabaja con el modelo matemático hallado por Robertson (Robertson et al., 1996) para una planta piloto de osmosis inversa, quien se basó en las técnicas de identificación usadas por Alatiqi (Alatiqi, et al., 1989) para aproximar las relaciones entre las variables de proceso y las variables de control mediante funciones de transferencia con un cero y dos polos respectivamente. A continuación se detallan las ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} F \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ pH \end{bmatrix} \dots (1)$$

Donde:

$$G_{11} = \frac{F}{P} = \frac{0.002(0.056s + 1)}{0.003s^2 + 0.1s + 1} \dots (2) \quad G_{12} = \frac{F}{pH} \text{cero} \dots (3)$$

$$G_{21} = \frac{C}{P} = \frac{-0.51(0.35s + 1)}{0.213s^2 + 0.7s + 1} \dots (4) \quad G_{22} = \frac{C}{pH} = \frac{-57(0.32s + 1)}{0.6s^2 + 1.8s + 1} \dots (5)$$

Se observa que el sistema es multivariable pues presenta dos entradas, presión (P) y pH, mientras que las salidas son flujo (F) y conductividad (C). El rango de variación considerado para la obtención del modelo matemático y las unidades se muestra a continuación:

Tabla 3.1 Rango de variación de las variables del modelo

Variables	Unidades	Rango lineal
Flujo (F)	gpm	0.85-1.25
Presión (P)	Psi	800-1000
Conductividad (C)	$\mu\text{s/cm}$	400-450
pH (pH)	-	6-7

Para realizar la validación del modelo matemático se recurre a lo enunciado por Robertson: “Un cambio en la presión, añade un cambio de 0.002 gpm de flujo de permeado. De forma similar, un cambio en presión tiene un efecto negativo sobre la conductividad. Cambios en el pH no tienen efectos sobre el flujo. Sin embargo, tiene un efecto negativo sobre la conductividad”. Además, la membrana puede ser representada como se muestra en la figura 3.5.

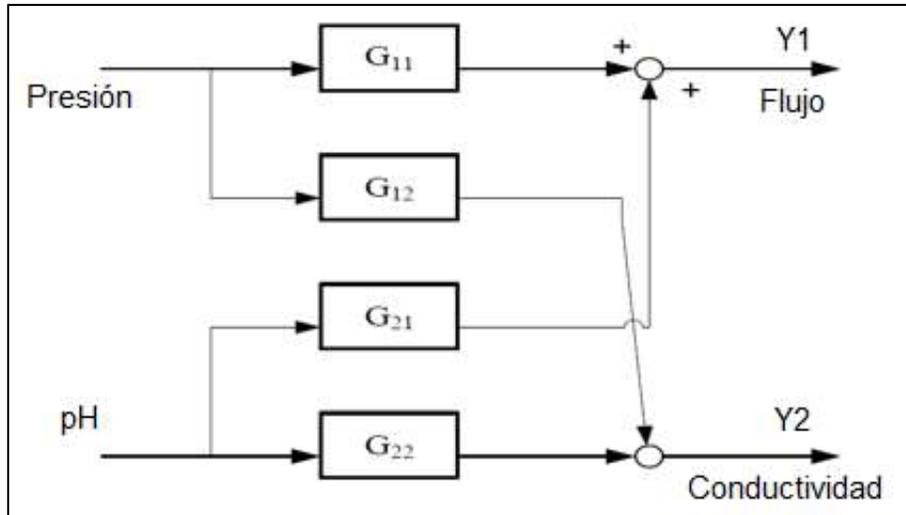


Figura 3.5 Modelo de la membrana de osmosis inversa. (Natwar, 2013)

La figura 3.6 permite observar de mejor manera la interacción de las variables de entrada con las salidas, es decir, el efecto de modificar una entrada tiene como consecuencia alterar ambas salidas. Sin embargo, el modelo planteado por Robertson indica que la relación existente entre flujo y pH (G_{12} o F/pH) es nula y esto permite únicamente variaciones de flujo al modificar la presión:

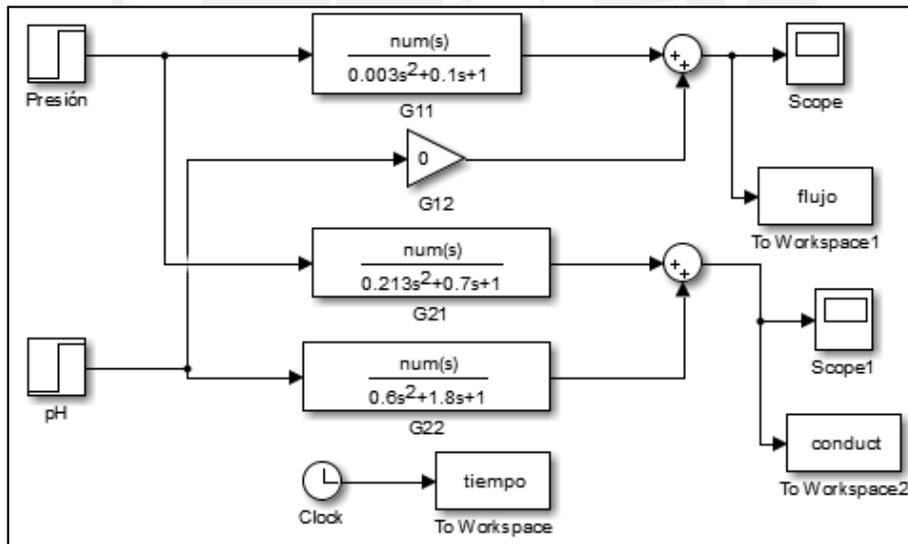


Figura. 3.6 Diagrama SIMULINK en lazo abierto para validar modelo [Elaboración propia]

Luego de hacer modificaciones escalón tanto en presión como en pH se obtuvo las siguientes respuestas que se muestran en las figuras 3.7 y 3.8

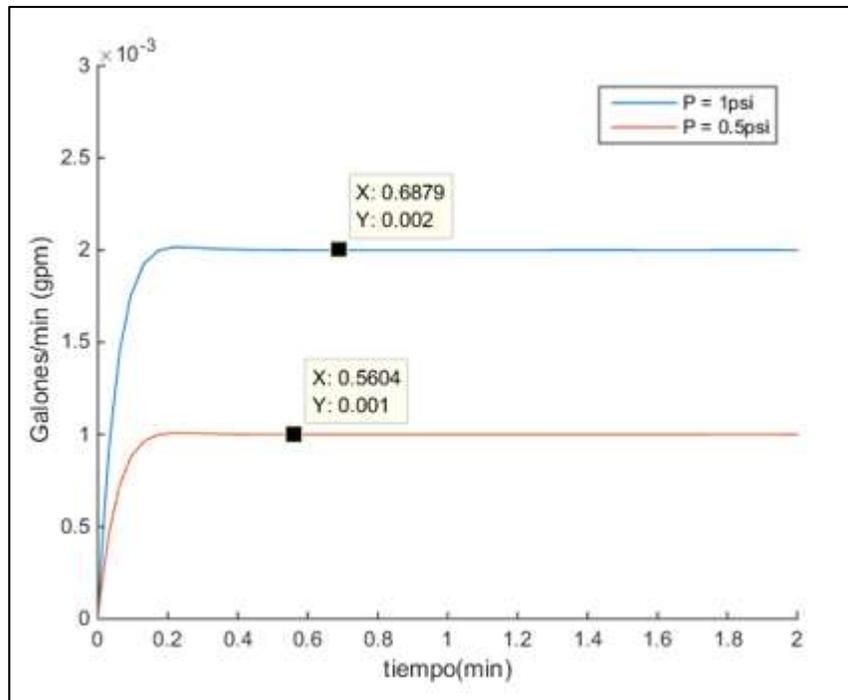


Figura 3.7 Respuesta de lazo abierto en flujo de permeado para validación del modelo matemático. [Elaboración propia]

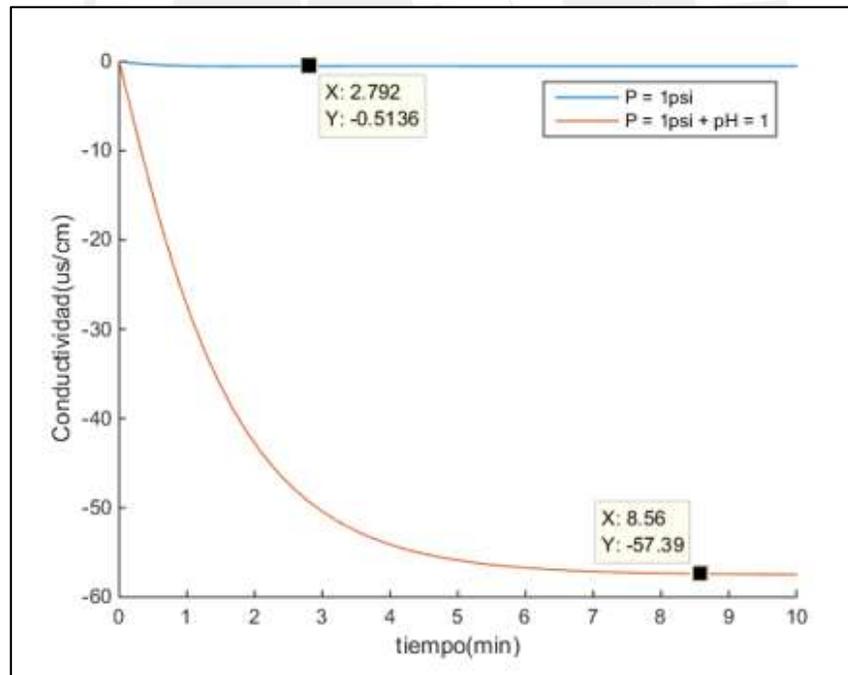


Figura 3.8 Respuesta de lazo abierto en conductividad de permeado para validación del modelo matemático. [Elaboración propia]

Con esto queda demostrado que un cambio de presión añade 0.002gpm y que ningún cambio de pH altera el flujo (debido a que G12 es cero). Por otro lado, un cambio de presión genera un pequeño cambio en la conductividad mientras que al hacer cambios en presión y pH se observa un mayor efecto. Este es el principal problema al tratar con plantas de carácter multivariable y para lo cual se aplicará el control difuso para conseguir un comportamiento adecuado del sistema.

Una vez validado el modelo a utilizar hay un punto aún más importante para el análisis del sistema. Para poder aplicar el control difuso se requiere una base de reglas que es el corazón del controlador difuso y para obtenerlas se necesita tener “conocimiento” o ser “experto” en el dominio del proceso.

A continuación se realizan pruebas con el diagrama mostrado en la figura 3.6 para entender cómo funciona el sistema haciendo cambios primero a una variable de control y luego a la otra. Para una determinada condición, los resultados obtenidos se muestran en las figuras 3.9 y 3.10.

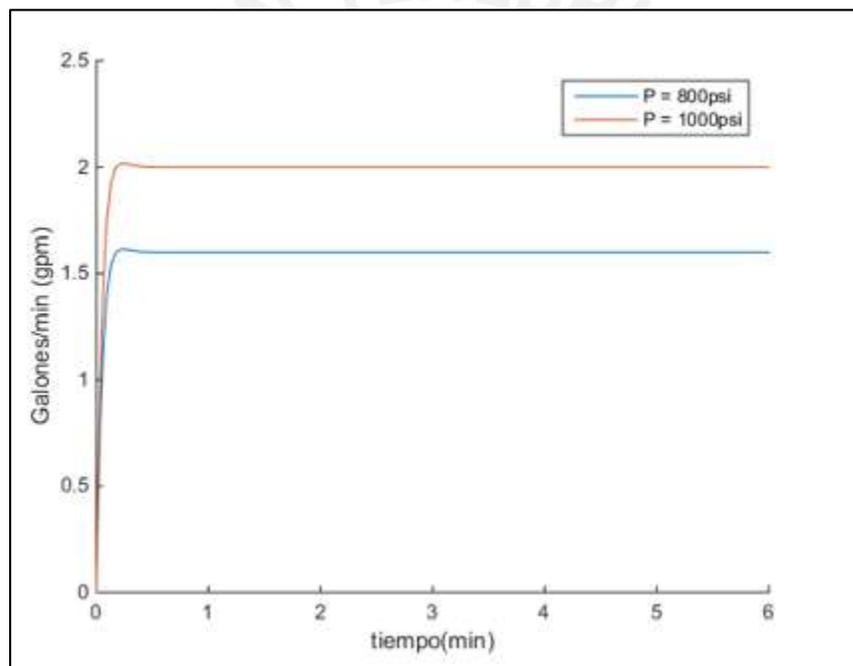


Figura 3.9 Variación de flujo de permeado para cambios escalón en los límites de la señal de control presión. [Elaboración propia]

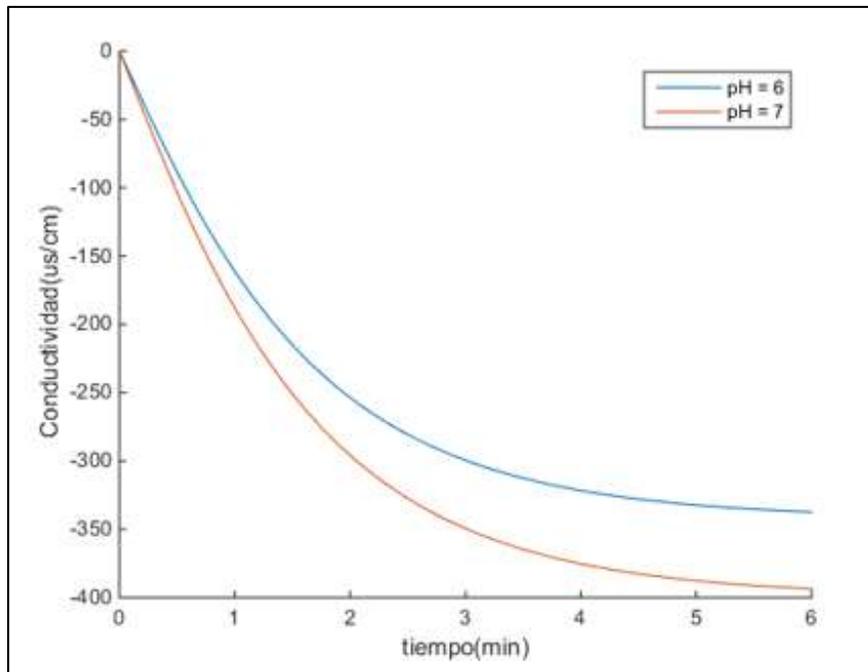


Figura 3.10 Variación de conductividad de permeación para cambios escalón en los límites de la señal de control pH. [Elaboración propia]

Los valores de presión y pH tomados son representativos para el sistema ya que forman parte del rango de operación. Lo importante aquí es observar que para un aumento de la presión le corresponde un aumento del flujo. Para el caso de la conductividad, se obtienen valores negativos ya que el sistema se está simulando en lazo abierto y si se observan las funciones de transferencia G_{21} y G_{22} éstas tienen la particularidad de tener ganancia negativa. Por lo tanto, se puede observar que a medida que el grado de acidez (pH) aumenta se tiene mayor conductividad.

Por otro lado este comportamiento puede traer confusión debido a que hablar de un grado de acidez mayor implica que el escalón sea más pequeño mientras que un grado de acidez menor se refleja en un escalón mayor. Este razonamiento es importante para no cometer errores a la hora de elaborar la base de reglas.

Finalmente y luego de todo lo explicado se llega a la siguiente conclusión sobre el comportamiento del bastidor de osmosis inversa:

- La presión y el flujo tienen una relación directa
- El pH (escalón) y la conductividad tienen una relación inversa.

Definido el “comportamiento” del sistema, el siguiente paso es definir la estructura de controlador difuso. En este caso se utilizará un PID difuso cuyas variables de entrada pueden ser el error, derivada del error o su integral. A su vez, el PID difuso presenta las siguientes estructuras como se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Diversas estructuras de PID difuso con reglas acopladas.

Una entrada y una salida (posicional)	Proporcional $U = f(E)$	Derivativo $U = f(dE/dt)$	Integral $U = f(iE)$
Una entrada y una salida (incremental)	Proporcional $dU = f(dE/dt)$	Derivativo $dU = f(d^2E/dt^2)$	Integral $dU = f(E)$
Dos entradas y una salida (posicional)	PD $U = f(E, dE)$	PI $U = f(E, iE)$	
Una entrada y una salida (incremental)	PD $dU = f(E, dE)$	PI $dU = f(dE, d^2E)$	
Tres entradas y una salida	PID (posicional) $U = f(E, dE, iE)$	PID (incremental) $dU = f(dE, d^2E, E)$	

Donde, $f(E)$: función determinada por el comportamiento del controlador difuso, E : error, dE : derivada del error, d^2E : segunda derivada del error, iE : integral del error, U : acción de control y dU : incremento de la acción de control.

Típicamente se presentan dos problemas de control. El primero es el problema de regulación en torno a un punto y el otro es el problema de seguimiento de una referencia.

Al analizar las funciones de transferencia halladas por Robertson, estas no poseen un integrador. Por lo tanto, es necesario agregar uno para eliminar el error en estado estacionario y conseguir el seguimiento de la referencia. En base a esto, las posibles estructuras mostradas en la tabla 3.2 se reducen quedando como alternativa las que puedan incorporar un integrador para eliminar el error en estado estacionario. Dentro de estas posibilidades está el controlador FPD+I difuso, cuya estructura se presenta en la figura 3.11.

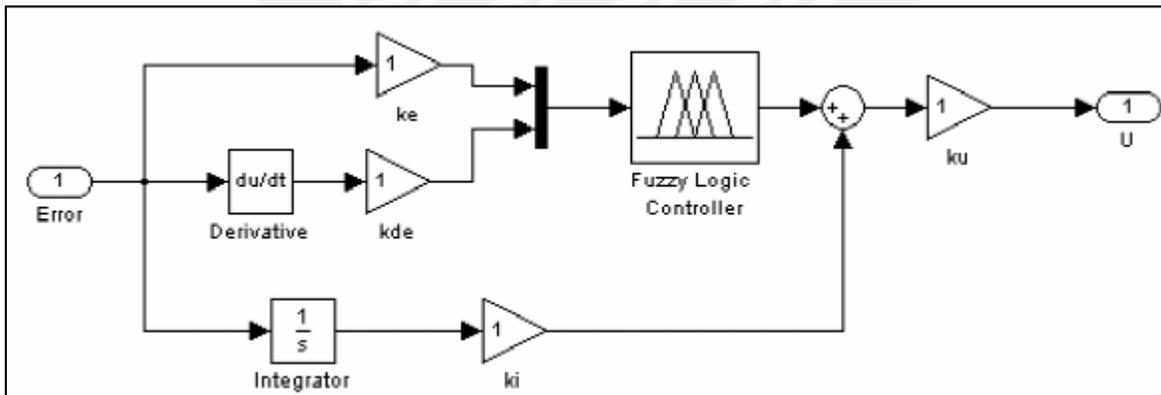


Figura 3.11 Diagrama SIMULINK del controlador FPD+I difuso. [Elaboración propia]

Determinado el comportamiento y la estructura del controlador difuso se presenta la interrogante de qué variables se deben utilizar como entradas. Una de las características principales para este tipo de control es el de utilizar el mínimo de variables que provean la máxima información ya que si se usan más variables de las necesarias el controlador difuso crecerá en complejidad y no se logrará una mejora efectiva en el desempeño.

A continuación se detalla cómo elegir las variables a utilizar como entradas al controlador difuso (Mann, G et al., 1999):

- **Usar el error:** Es la variable que más información provee acerca del logro del objetivo de control en estado estacionario.
- **Usar de/dt :** Esta variable es útil para predecir el comportamiento del error (si crece o no y su dirección de cambio). Esta información ayuda determinar el comportamiento que debe tener el sistema durante el transitorio.
- **Usar la integral del error:** La información más valiosa que provee esta variable es en estado estacionario, representa el error acumulado e indica cuánto se debe incrementar la acción de control para que la salida alcance la referencia. La interpretación de la acción integral es muy compleja para implementarla con reglas. En general no se emplea y se opta por otros métodos alternativos para corregir el error en estado estacionario.

Con esto queda aún más claro por qué se elige el controlador FPD+I difuso. El paso siguiente es la definición de las reglas difusas y este procedimiento se presenta a continuación:

Debido a que en la función de transferencia del sistema el elemento $G_{12} = 0$, el problema se divide en dos controladores. El primero para el seguimiento de la referencia de flujo teniendo como entrada la presión y el otro para el seguimiento de la referencia de conductividad variando únicamente el pH. Debe tenerse en cuenta que la relación existente entre conductividad y presión afectará (en alguna medida) el comportamiento de la conductividad pues el sistema es multivariable. El diagrama de bloques de la figura 3.12 muestra la estructura del sistema de control a utilizar.

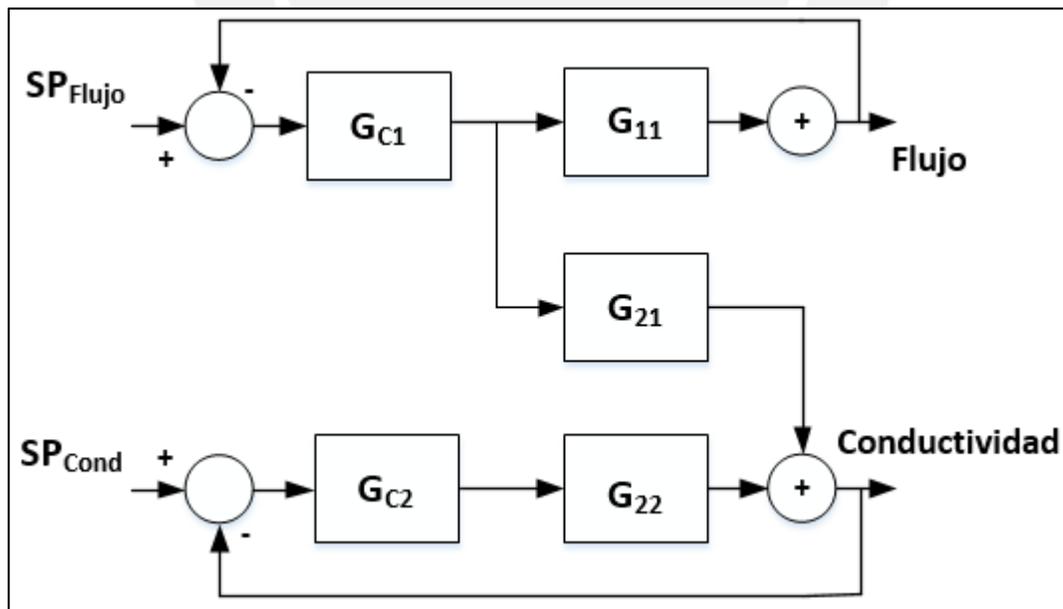


Figura 3.12 Diagrama de bloques para el sistema de control de osmosis inversa.
[Elaboración propia]

El esquema mostrado en la figura 3.12 posee dos controladores G_{C1} y G_{C2} los cuales típicamente son del tipo PI o PID. La idea de utilizar la lógica difusa consiste en reemplazar alguno de estos por un control difuso y lograr mejoras en el desempeño del proceso.

3.3.1 Diseño de las reglas difusas para el control de flujo.

Luego de analizar la figura 3.8 se llega a la conclusión de que la presión y el flujo tienen una relación directa. Además, se menciona que elaborar reglas para la acción integral como entrada al controlador difuso es complicado. Por lo tanto, el controlador de flujo tendrá dos entradas: error de flujo y derivada del error de flujo y una salida: la presión.

Debido a que el controlador difuso se construye en base a la experiencia, se asume para el error y derivada del error 3 funciones de membresía y para la presión 5 funciones de membresía las cuales recibirán las siguientes etiquetas lingüísticas:

- Para el error: 'neg' si es negativo, 'cero' si está próximo a cero y 'pos' si es positivo.
- Para la derivada del error: 'N' si es negativa, 'Z' si está próxima a cero y 'P' si es positiva.
- Para la presión: 'MBP' indica muy baja presión, 'BP' indica baja presión, 'PC' es presión central, 'AP' es alta presión, y 'MAP' indica muy alta presión.

Se utiliza el TOOLBOX de MATLAB mediante el comando "fuzzy" en la línea de comandos para implementar lo mencionado anteriormente:

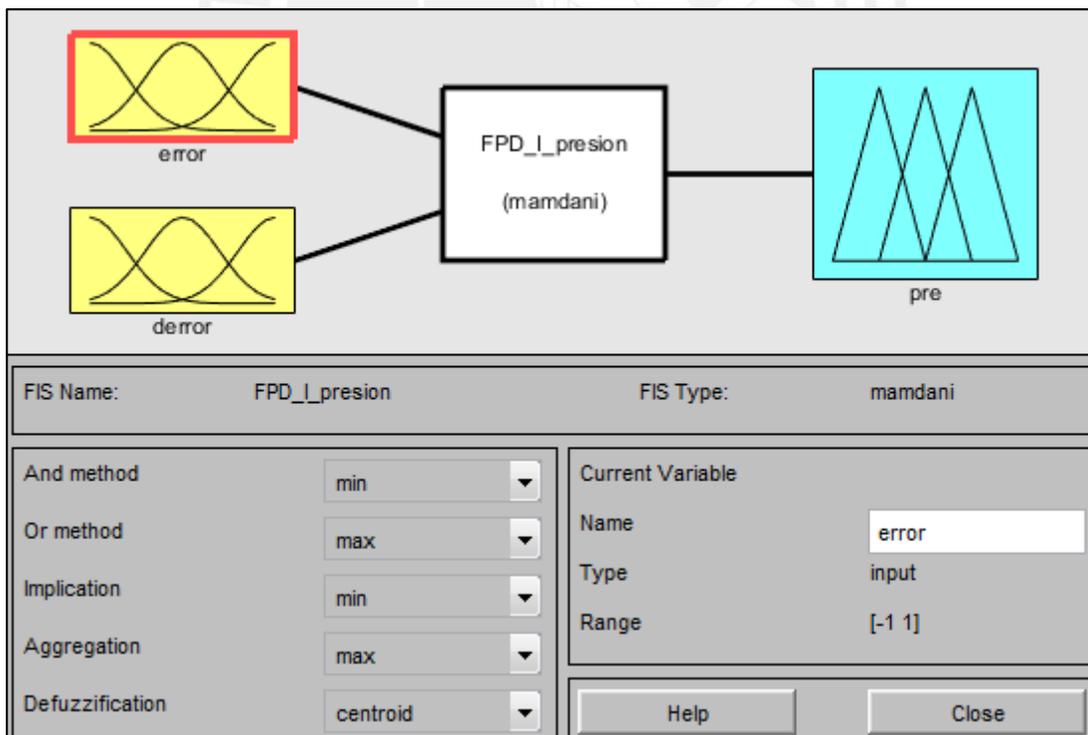


Figura 3.13 Sistema de inferencia difuso para el lazo de control de flujo. [Elaboración propia]

Los rangos elegidos para las entradas y salida son:

- Error: Rango corresponde a $[-1 - 1]$ gpm: En realidad el rango debería ser ± 0.4 , ya que el rango lineal de la función de transferencia determinada por Robertson solo puede realizar cambios escalón de esa magnitud. Sin embargo, al ser este controlador no lineal se puede explotar aún más el rango de operación.
- dError: Rango corresponde a $[-1 - 1]$ gpm/min.
- Pre: Rango corresponde a $[-2 - 2]$ psi. Siguiendo el criterio de Jantzen, el rango de salida debe ser el doble del rango del error. Finalmente, el rango de operación la presión debe variar entre $[800 - 1000]$ psi.

Siguiendo el criterio de diseño propuesto por Jantzen (Jan Jantzen, 1999), se eligen funciones de tipo triangulares para las entradas con cruces en un grado de pertenencia 0.5 mientras que en la salida se utilizan funciones singleton. Los gráficos correspondientes a estas funciones se muestran en el ANEXO 1.

A continuación, se muestra la figura 3.14 que permitirá definir la base de reglas.

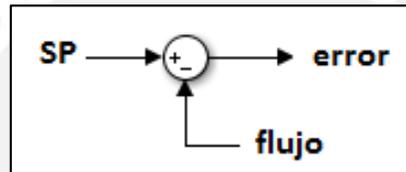


Figura 3.14 Error al comparar el SP y la variable medida. [Elaboración propia]

Con esto se definen 9 reglas que se detallan a continuación:

1. **Si Error es 'cero' y dError es 'Z' entonces presión es PC.** Esta regla es fácil de entender ya que si el error y el cambio del error son muy pequeños entonces la salida medida está siguiendo a la referencia.
2. **Si Error es 'neg' y dError es 'N' entonces presión es MBP.** Como el error es negativo, esto quiere decir que el valor medido es mayor a la referencia y siendo la derivada del error negativa quiere decir que el valor medido va creciendo aún más. Por lo tanto se debe disminuir mucho la presión.
3. **Si Error es 'neg' y dError es 'Z' entonces presión es BP.** El error es negativo quiere decir que la salida medida es mayor que la referencia. Como no existe cambio en el error entonces se baja un poco la presión.
4. **Si Error es 'neg' y dError es 'P' entonces presión es PC.** Este caso es interesante ya que la variable medida es mayor que la referencia pero en algún punto la derivada del error crece positivamente lo que hace que el flujo disminuya y esto es deseable. La regla 1 se encargará de estabilizar el flujo cuando llegue a la condición correspondiente.
5. **Si Error es 'cero' y dError es 'N' entonces presión es BP.** La variable medida sigue a la referencia pero en algún punto el flujo empieza a crecer. Este comportamiento no es deseable por lo que la presión debe bajar.
6. **Si Error es 'cero' y dError es 'P' entonces presión es AP.** Este comportamiento es opuesto a la regla anterior, por lo tanto la presión debe aumentar.

7. Si *Error* es 'pos' y *dError* es 'N' entonces presión es PC. Esta regla tiene un comportamiento similar a la regla 4 la cual se estabilizará con la regla 1.
8. Si *Error* es 'pos' y *dError* es 'Z' entonces presión es AP. En este caso la referencia es mayor que la variable medida y como no hay cambios en el error se requiere aumentar la presión.
9. Si *Error* es 'pos' y *dError* es 'P' entonces presión es MAP. Como el error es positivo, esto quiere decir que el valor medido es menor a la referencia y siendo la derivada del error positiva quiere decir que el valor medido va disminuyendo aún más. Por lo tanto se debe aumentar en gran medida la presión.

Estas reglas pueden resumirse en la tabla 3.3 que se presenta a continuación.

Tabla 3.3 Funciones de membresía para la señal de control presión.

dError\Error	NEG	CERO	POS
N	MBP	BP	PC
Z	BP	PC	AP
P	PC	AP	MAP

Este comportamiento también es expresado en el TOOLBOX FUZZY de MATLAB. La figura 3.15 muestra la superficie de control definida por las reglas difusas.

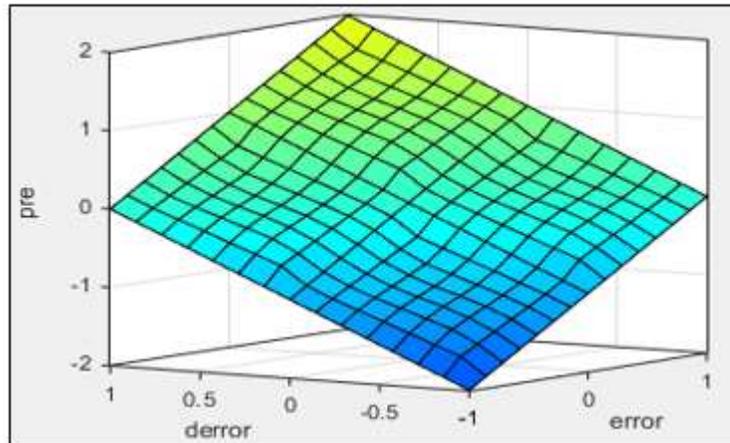


Figura 3.15 Superficie de control (no lineal) para la señal de control presión en TOOLBOX FUZZY de MATLAB. [Elaboración propia]

Lo que se aprecia en la figura 3.14 es muy importante, ya que como se menciona anteriormente, si se añaden más variables al controlador difuso este crecerá en complejidad y ya no puede hablarse de una superficie de control.

Con esto se construye el diagrama de bloques correspondiente al controlador de flujo que reemplazará al controlador G_{C1} mostrado en la figura 3.12. Dicho diagrama se aprecia en la figura 3.16.

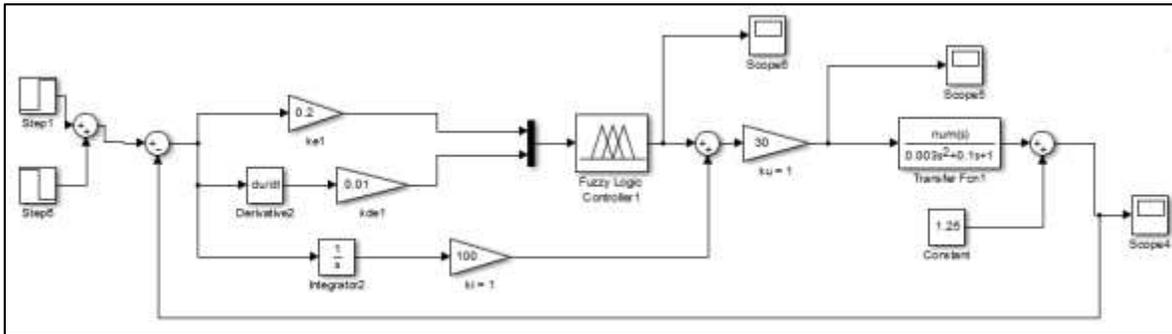


Figura 3.16 Diagrama de bloques SIMULINK para el control de flujo. [Elaboración propia]

Se aprecia que se está utilizando la estructura FPD+I difuso tal cual se observa en el figura 3.9. Los valores de las ganancias ' ke ', ' kde ', ' ki ' y ' ku ' pueden obtenerse de dos maneras según el criterio expuesto por Jantzen (Jan Jantzen, 1999):

1. Diseñar un controlador PID por cualquier método conocido (Ziegler-Nichols) y transferir esas ganancias al controlador difuso (ver tabla en ANEXO 2).
2. Realizar una sintonización manual (hand tuning) siguiendo los criterios adecuados para llegar a la estabilidad.

En este caso se ha utilizado el segundo criterio teniendo en cuenta lo siguiente:

- Ajustar el valor de ' ke ' acorde al tamaño del escalón a utilizar para explotar todo el rango del universo de discurso elegido.
- Ajustar el valor de ' ku ' colocando ' kde '= ' ki ' = 0 hasta obtener la forma de respuesta deseada obviando cualquier offset.
- Incrementar la ganancia ' ke ' en proporción con ' ku ' e ir aumentando ' kde ' para amortiguar el sobreimpulso.
- Finalmente, ajustar ' ki ' para eliminar el error en estado estacionario.

A continuación, las figuras 3.17 y 3.18 muestran la respuesta para un cambio escalón que corresponde a -0.4gpm de acuerdo al rango de operación mostrado en la tabla 3.1. Los valores de las constantes del controlador FPD + I difuso se detallan en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Parámetros del controlador FPD+I de flujo.

kde	ke	ki	ku
0.01	1	100	30

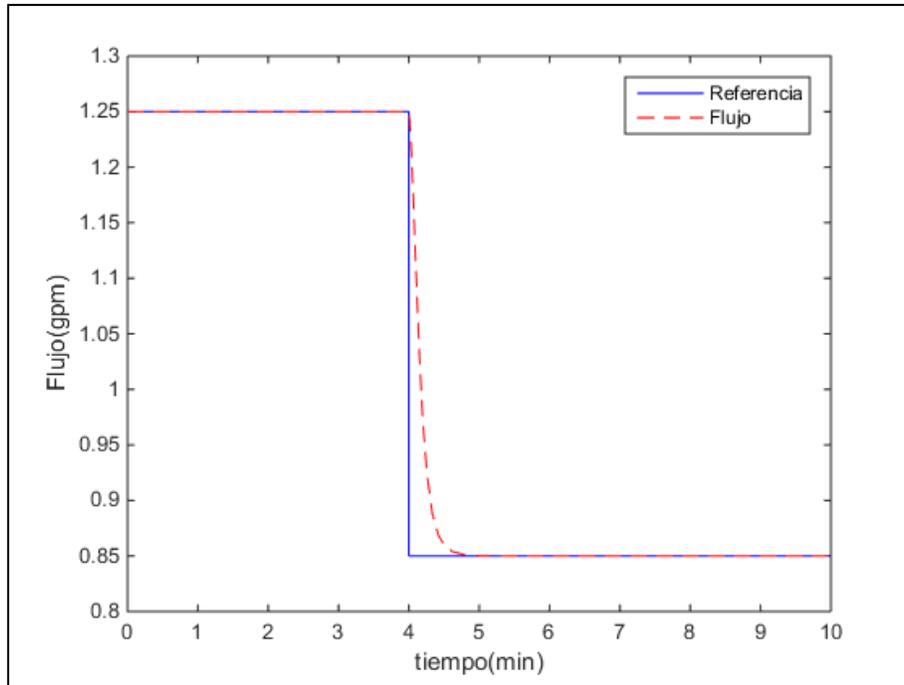


Figura 3.17 Respuesta del controlado FPD+I difuso para flujo. [Elaboración propia]

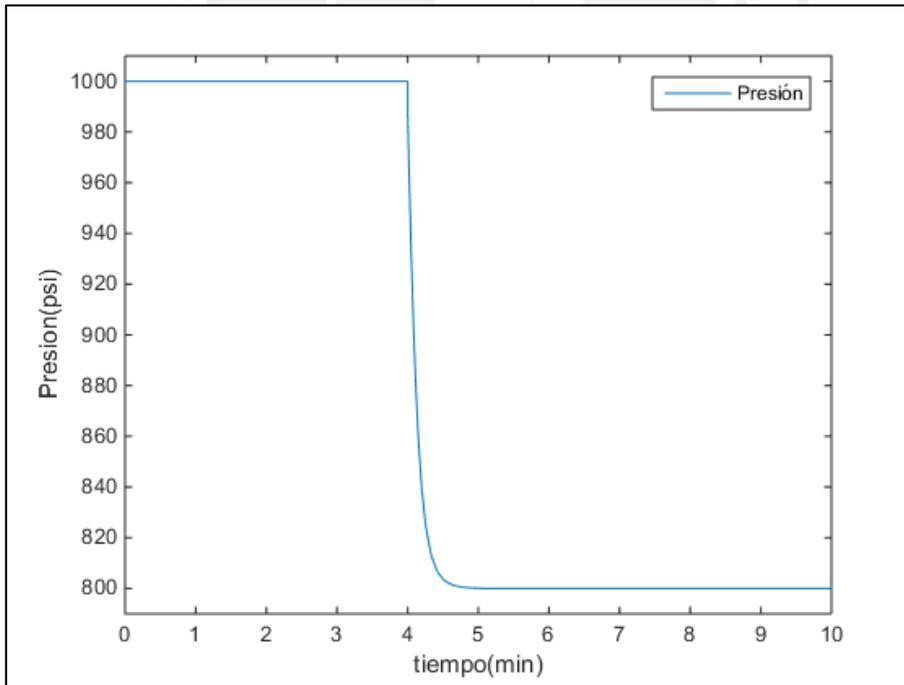


Figura 3.18 Señal de control de presión del FPD+I difuso para flujo. [Elaboración propia]

Se observa que el controlador FPD+I difuso logra estabilizar el flujo en aproximadamente 1 minuto y la señal de control (presión) presenta un tránsito suave (sin caídas bruscas) en el rango de operación definido entre 800psi y 1000psi.

3.3.2 Diseño del control de conductividad

En este caso, debido a que se quiere realizar una comparación con el ensayo desarrollado por M.W Robertson (Robertson., et al., 1996) se considera un regulador PI clásico para el controlador G_{C2} mostrado en la figura 3.12 cuya función será mantener el valor de conductividad en 442us/cm. De no apreciarse cambios sustanciales con el uso del controlador FPD + I de flujo y el control PI en conductividad se deberá hacer el análisis de un controlador avanzado para lograr mejoras en el proceso.

Luego de realizar una sintonización mediante el método de Ziegler-Nichols y hacer un ajuste fino se obtiene un controlador PI para la conductividad cuyos parámetros se detallan en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Parámetros del regulador PI de conductividad.

KP	KI
-0.039	-0.036

A continuación, la figura 3.16 muestra el seguimiento de referencia del control de conductividad aunque para el caso del experimento multivariable la conductividad se mantendrá en un valor constante y se debe apreciar cómo reacciona frente al cambio de flujo.

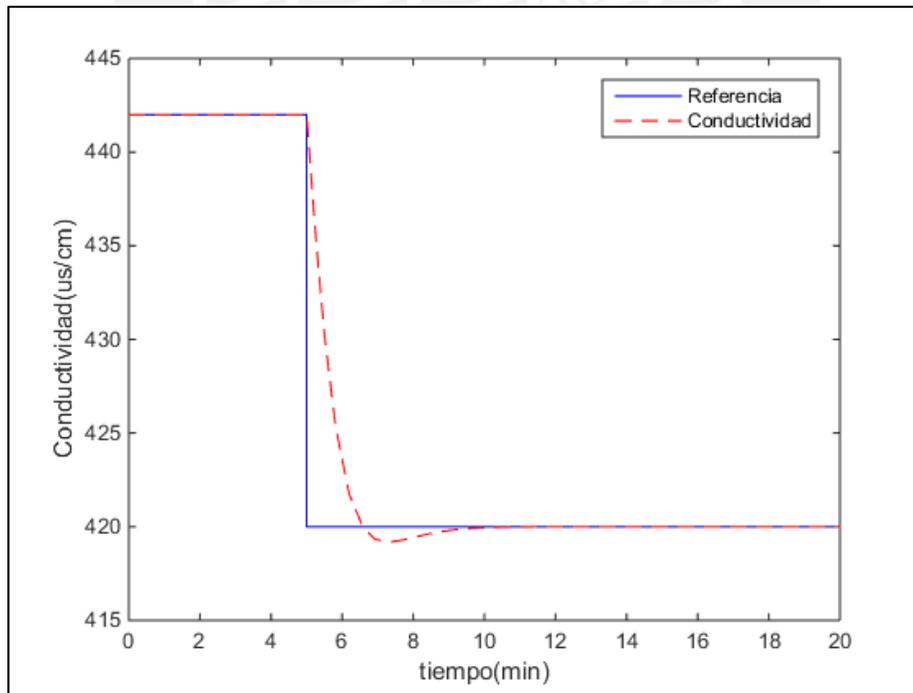


Figura 3.19 Respuesta del controlador PI para conductividad. [Elaboración propia]

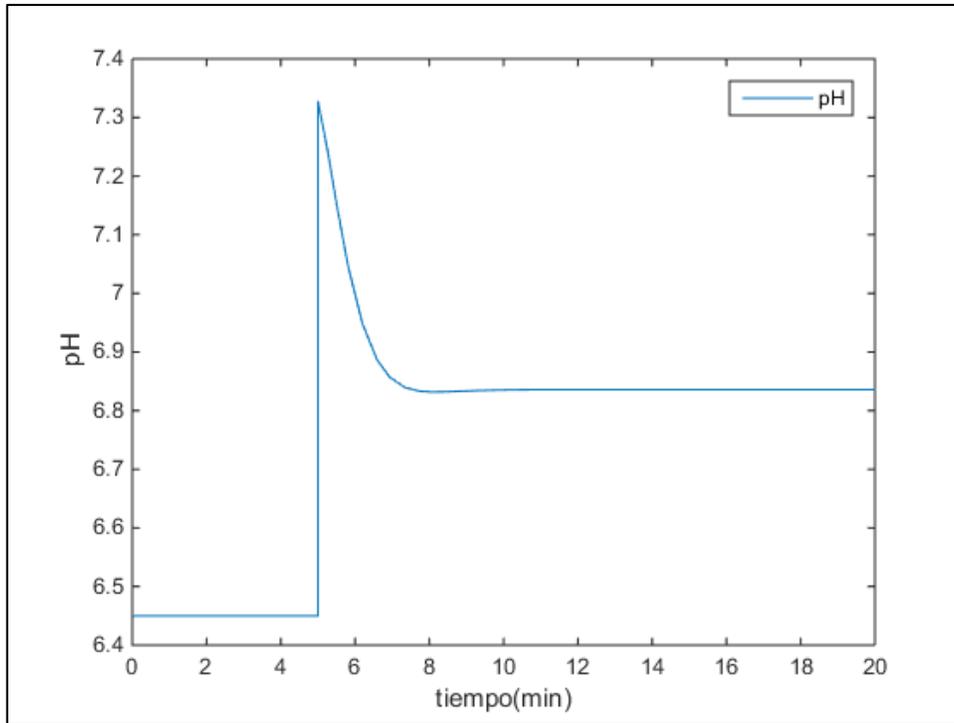


Figura 3.20 Señal de control pH del controlador PI. [Elaboración propia]

Las gráficas que se muestran tienen coherencia ya que al disminuir la conductividad quiere decir que el pH del agua de permeado es más básico. Hacer un cambio para el aumento de conductividad en este caso no tiene sentido ya que lo que se busca es disminuir la conductividad del agua producto y no aumentarla.

3.3.3 Resultado de simulación del controlador diseñado

Una vez definidos los controladores para el flujo y conductividad de forma independiente, estos reemplazarán a los controladores G_{C1} y G_{C2} del diagrama de bloques mostrado en la figura 3.12. En este caso, se consideran como variables de entrada la presión y el pH del agua de alimentación mientras que las salidas serán el flujo y la conductividad de permeado.

Los parámetros para ambos controladores se detallan en las tablas 3.7 y 3.8.

Tabla 3.7 Parámetros del controlador FPD+I de flujo.

kde	ke	ki	ku
0.01	1	100	30

Tabla 3.8 Parámetros del PI de conductividad.

KP	KI
-0.039	-0.036

En este caso G_{C2} se mantiene como un controlador clásico PI. De no apreciarse mejoras con este, se realizará un análisis para reemplazarlo por un control avanzado.

De acuerdo al diagrama de bloques de la figura 3.12 se observa que la señal de control (presión) calculada es una entrada al subsistema de conductividad ya que existe una relación entre conductividad y presión dada por la función de transferencia G_{21} . Este es el efecto multivariable que indica que cambios de presión afectarán en alguna medida la señal de conductividad.

Los resultados para un cambio escalón de -0.4gpm bajo una condición inicial conocida de acuerdo a Robertson se muestran en las figuras 3.21 a 3.24.

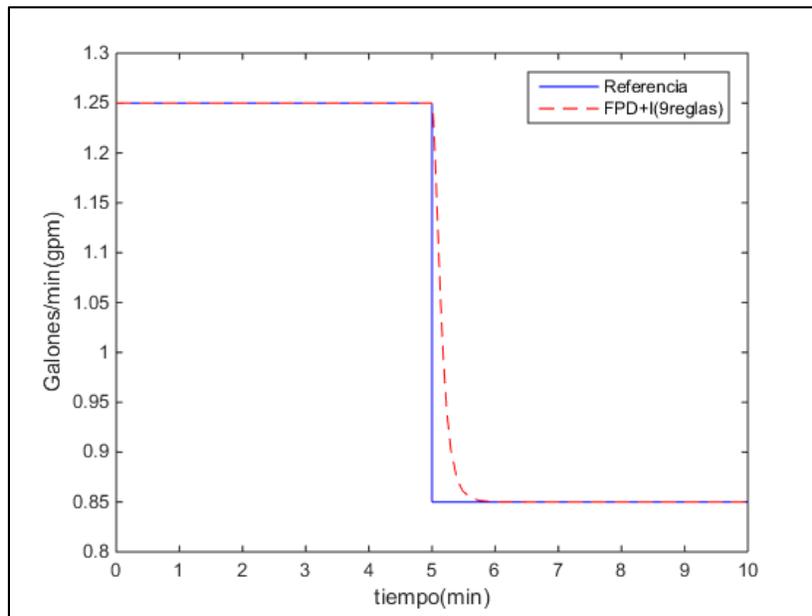


Figura 3.21 Seguimiento de referencia de flujo para el bastidor de osmosis inversa. [Elaboración propia]

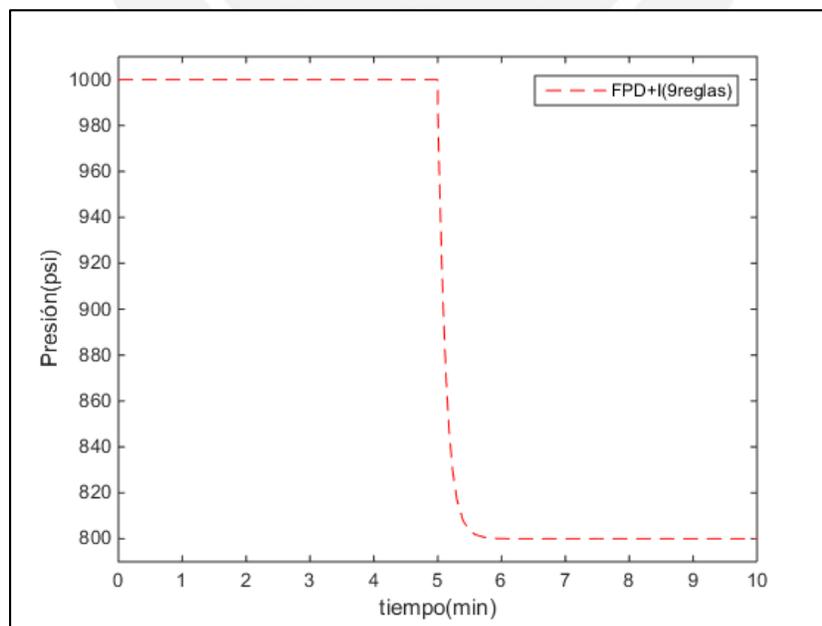


Figura 3.22 Señal de control presión de la bomba. [Elaboración propia]

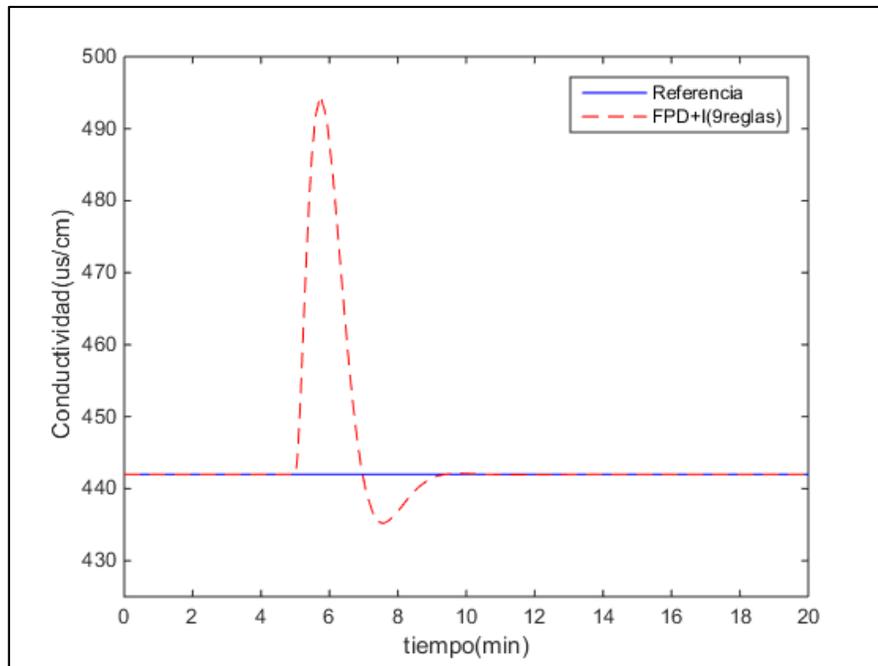


Figura 3.23 Seguimiento de referencia de conductividad para el bastidor de osmosis inversa. [Elaboración propia]

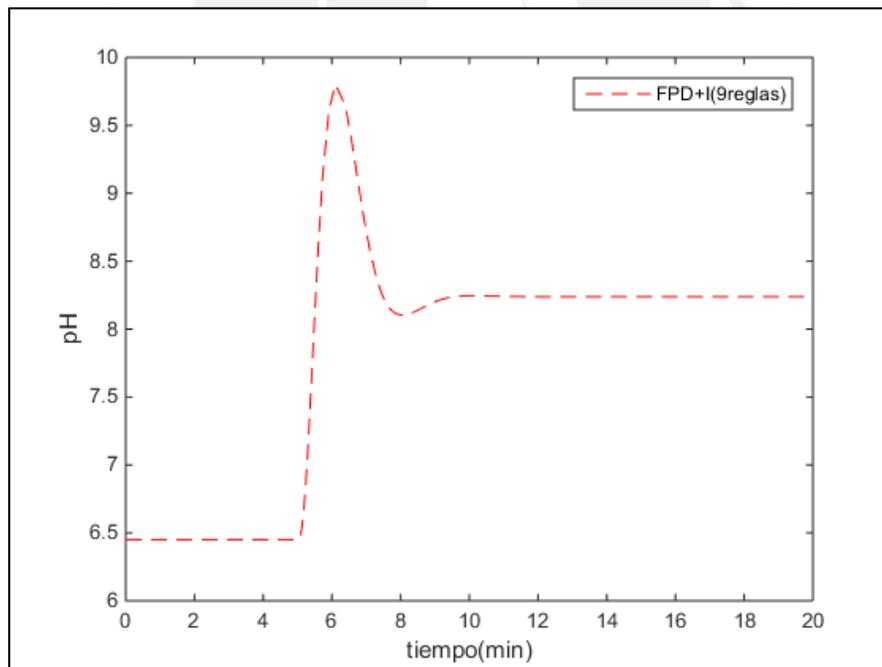


Figura 3.24 Señal de control pH. [Elaboración propia]

Se observa que el sistema ha sido controlado por el controlador FPD+I difuso de flujo y un PI clásico de conductividad cuyas variables de entrada son la presión y pH del agua de alimentación y las salidas son el flujo y conductividad de permeado. Sin embargo, se observa que hay un pico de conductividad muy grande cuando se realizan cambios de presión ya que existe una función de transferencia G_{21} que relaciona dichas variables.

Por lo tanto, se debe plantear un esquema diferente en el lazo de control de conductividad con el cual se pueda disminuir en forma considerable el sobre impulso pero sin afectar el rendimiento del sistema.

En la figura 3.12 las funciones de transferencia de G_{21} y G_{22} se muestran en la figura 3.25.

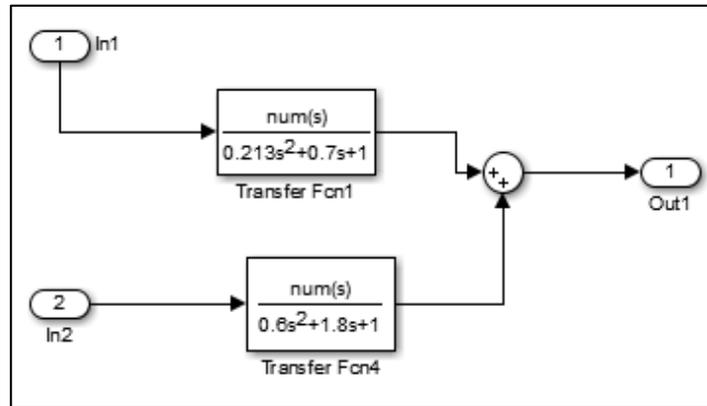


Figura 3.25 Funciones de transferencia de G_{21} y G_{22} . [Elaboración propia]

Donde se observa lo siguiente:

- La función de transferencia que recibe como entrada 'in1' (presión) es la relación $C(s)/P(s)$ y se añade como una perturbación interna a la salida del lazo del control de conductividad. (planteamiento de Robertson).
- La función de transferencia que recibe como entrada 'in2' corresponde a la relación entre $C(s)/pH(s)$ del lazo de control de conductividad.

Dicho esto, se cumplen dos condiciones fundamentales para poder aplicar un lazo de control PI con feedforward. Esto solo es posible ya que:

- La perturbación que afecta al sistema es medible.
- Se conoce el modelo de la perturbación.

Estas condiciones son satisfechas por el modelo pues la perturbación interna es la presión, la cual se monitorea en cada instante de tiempo y es la señal de control para el lazo de flujo, mientras que el modelo de perturbación viene dado por la relación $C(s)/P(s)$.

La técnica de control feedforward o anticipativo se basa en la medición de una o más variables de entrada y actúa simultáneamente sobre la variable manipulada que produce la salida deseada del proceso. Con este tipo de control, se cancelan efectos indeseables de perturbaciones "medibles" al compensarlos antes de que se perciban en la salida.

Este tipo de control requiere un conocimiento exacto y completo de las características estáticas y dinámicas del proceso, así como la forma en que las perturbaciones afectan la salida del proceso.

La eficacia del control anticipativo depende de la precisión alcanzada en la medida de la variable de entrada y de la precisión del modelo calculado. Por otra parte, puede resultar costoso o imposible de determinar el modelo del proceso.

A continuación, la figura 3.26 muestra el diagrama de bloques de un sistema de control con feedforward para el lazo de conductividad.

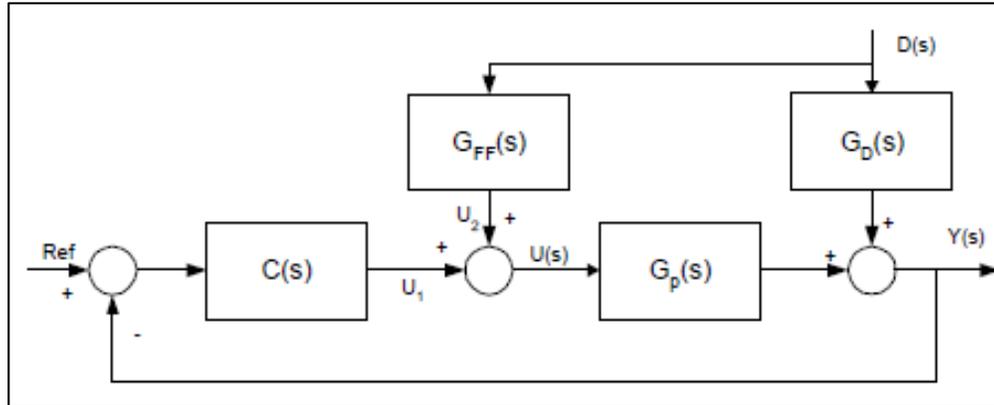


Figura 3.26 Diagrama de bloques de control feedback + feedforward. [Elaboración propia]

Donde:

- $C(s)$ es la función transferencia de un controlador PID (en este caso, G_{22}).
- $G_{ff}(s)$ es la función transferencia feedforward a determinar.
- $G_d(s)$ es el modelo de la perturbación.
- $G_p(s)$ es el modelo de la planta.
- $D(s)$ es la perturbación medible.
- $U(s)$ es la señal de control.
- $Y(s)$ es la salida (conductividad de permeado).

Con esto se procede a hallar la relación existente entre la salida y referencia más perturbación:

$$Y(s) = \left[[R(s) - Y(s)]C(s) + D(s)G_{ff}(s) \right] G_p(s) + D(s)G_d(s) \dots (1)$$

$$Y(s) = R(s)C(s)G_p(s) - Y(s)C(s)G_p(s) + D(s)G_{ff}(s)G_p(s) + D(s)G_d(s) \dots (2)$$

Agrupando convenientemente en (2):

$$Y(s) = \frac{C(s)G_p(s)}{1 + C(s)G_p(s)}R(s) + \frac{G_{ff}(s)G_p(s) + G_d(s)}{1 + C(s)G_p(s)}D(s) \dots (3)$$

Se observa que la función de transferencia total en lazo cerrado tiene como ecuación característica $1 + C(s)G_p(s)$. Por lo tanto, la estabilidad del sistema en lazo cerrado no se ve afectada por la inclusión del feedforward.

Si el modelo de la perturbación es conocido entonces puede eliminarse el efecto de la perturbación sobre la variable de salida de la siguiente manera. De (3)

$$\frac{G_{ff}(s)G_p(s) + G_d(s)}{1 + C(s)G_p(s)}D(s) = 0 \rightarrow G_{ff}(s)G_p(s) + G_d(s) = 0 \rightarrow G_{ff}(s) = -\frac{G_d(s)}{G_p(s)} \dots (4)$$

La ecuación (4) indica que la función de transferencia feedforward corresponde al negativo del cociente entre el modelo de la perturbación y el modelo del proceso.

Como conclusión, se detallan algunas ventajas y desventajas del control feedforward:

Ventajas:

- Detecta las variables perturbadoras y toma la acción correctiva antes de que la variable controlada se desvíe de su punto de referencia.
- Útil para procesos con tiempo muerto y de respuesta dinámica muy lenta.

Desventajas:

- Requiere medir todas las variables perturbadoras.
- Requiere conocimiento exacto del proceso.
- El modelo puede resultar físicamente irrealizable (polinomios no racionales).

Además, es importante mencionar que obtener un modelo preciso de una perturbación puede ser muy complicado y compensarlo casi imposible. Es por esto que una alternativa menos ambiciosa para compensar las perturbaciones viene dado por un control feedforward estático donde se considera:

$$\lim_{s \rightarrow 0} G_{ff}(s) = - \lim_{s \rightarrow 0} \frac{G_d(s)}{G_p(s)} = - \frac{K_d}{K_p} \dots (5)$$

Para el caso en que se consideran las constantes de tiempo se habla de un feedforward dinámico.

En este caso, se utilizará un controlador feedforward dinámico de segundo orden para reducir el efecto de la perturbación de presión sobre la conductividad:

De la ecuación (4):

$$G_{ff}(s) = - \frac{G_d(s)}{G_p(s)}$$

$$G_{ff}(s) = - \left(\frac{-0.51(0.35s + 1)}{\frac{0.213s^2 + 0.7s + 1}{-57(0.32s + 1)}} \right) \dots (6)$$

$$\frac{-0.51(0.35s + 1)}{0.6s^2 + 1.8s + 1}$$

Se despreciará los efectos de los ceros $(0.35s + 1)$ y $(0.32s + 1)$ para obtener una función de transferencia feedforward no ideal. Con esto se desarrolla (6):

$$G_{ff}(s) = - \left(\frac{0.51}{57} \right) \left(\frac{0.6s^2 + 1.8s + 1}{0.213s^2 + 0.7s + 1} \right)$$

De acuerdo al esquema planteado en la figura 3.26, al aplicar este esquema en lazo de conductividad el diagrama de bloques definitivo se muestra en la figura 3.27.

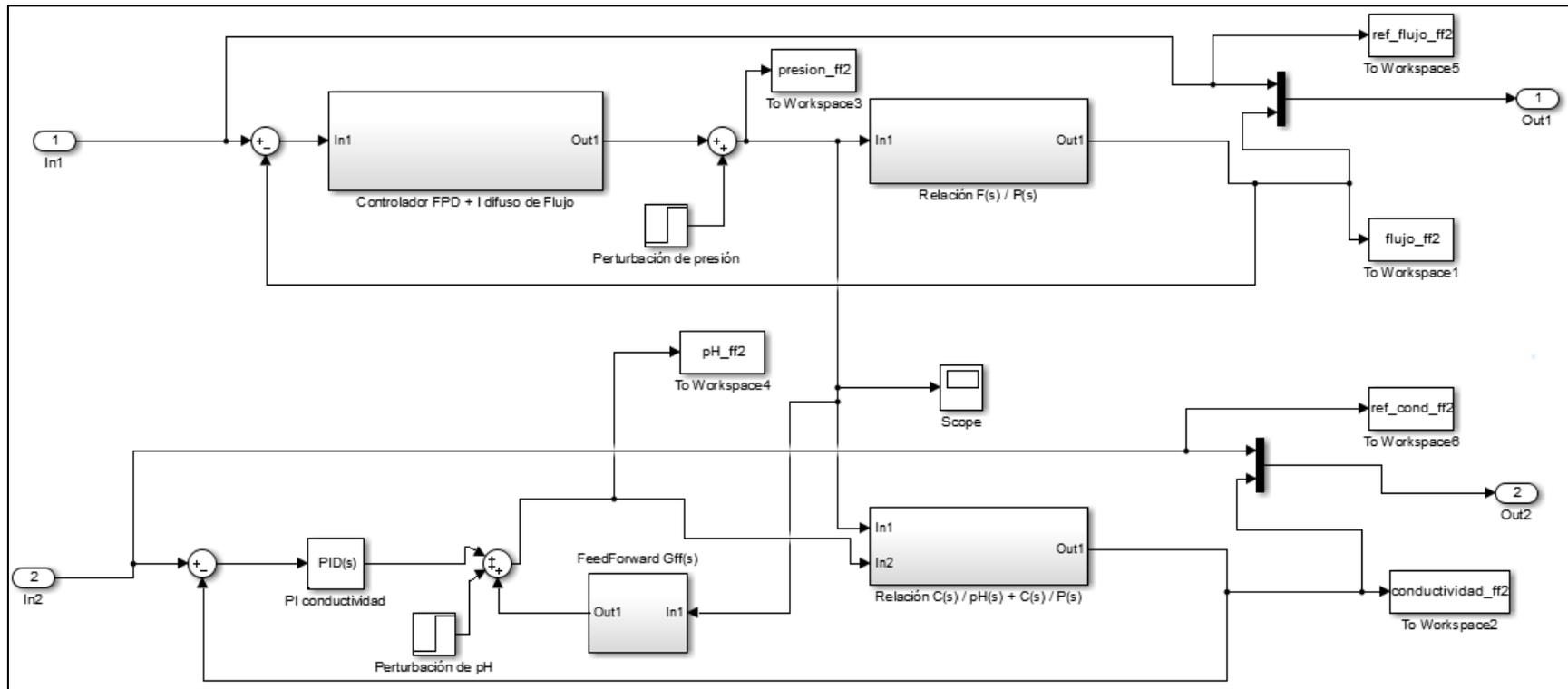


Figura 3.27 Diagrama de bloques final en SIMULINK para el sistema de control propuesto para un bastidor de osmosis inversa de una planta desalinizadora de agua de mar.

Las respuestas de esta estructura propuesta se muestran en las figuras 3.28 y 3.29.

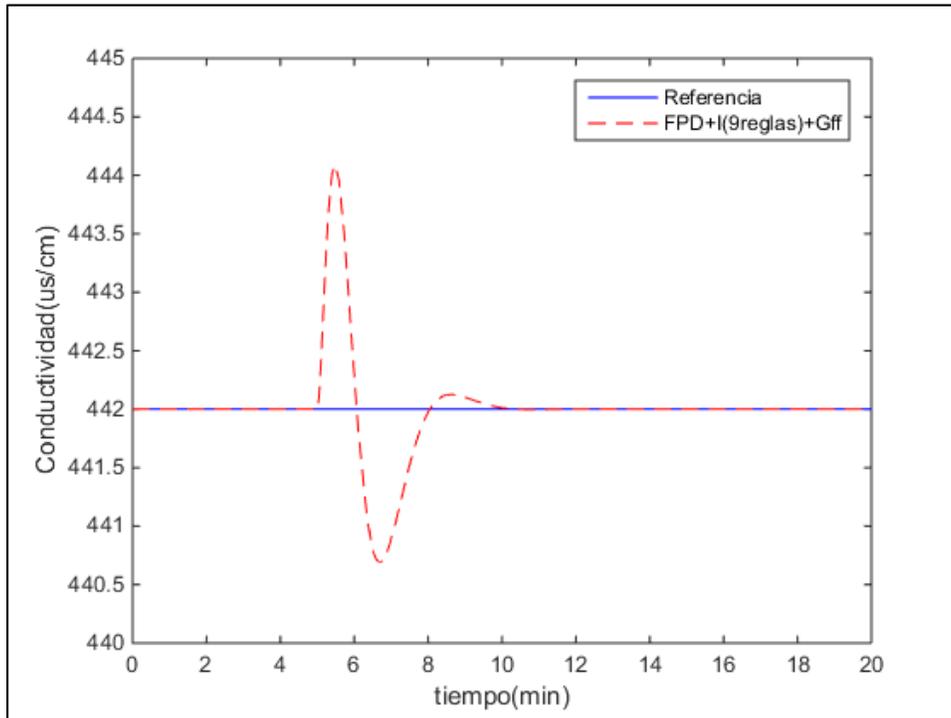


Figura 3.28 Seguimiento de referencia de conductividad con feedforward. [Elaboración propia]

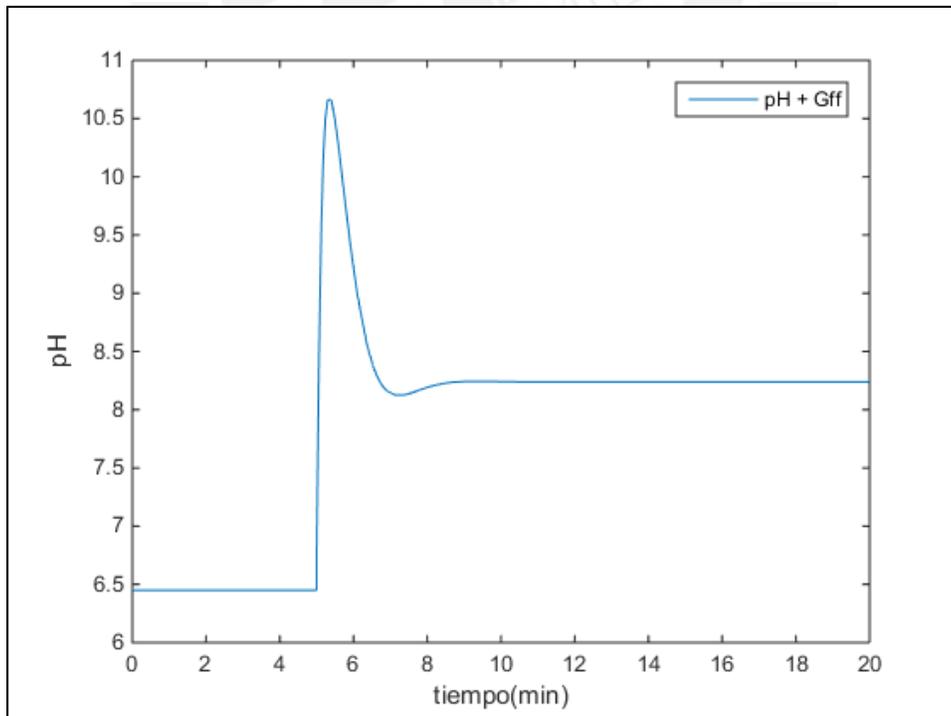


Figura 3.29 Señal de control pH con feedforward. [Elaboración propia]

A continuación se detallan las especificaciones temporales logradas en la tabla 3.9 al reemplazar G_{C1} y G_{C2} por los controladores FPD+I difuso de flujo y PI + feedforward en el lazo de conductividad, respectivamente.

Tabla 3.9 Especificaciones de la respuesta temporal diseñado

VARIABLES DE PROCESO	ERROR EN ESTADO ESTACIONARIO	TIEMPO DE ESTABLECIMIENTO	SOBRE IMPULSO (%)
Flujo	Menor al 2%	0.8min	0%
Conductividad	Menor al 2%	3min	0.45%

Debe tenerse en cuenta que los tiempos de establecimiento tomados corresponden al tiempo en que el error en estado estacionario es menor al 2%. Asimismo, se hizo una modificación escalón de -0.4gpm partiendo de una condición inicial de operación.

3.3.4 Comparativa entre el controlador propuesto y control clásico

El controlador FPD+I difuso desarrollado permite controlar de forma adecuada un bastidor de osmosis inversa de una planta desalinizadora de agua de mar.

En este caso se tomará en cuenta el comportamiento de la respuesta temporal del sistema entregado por el controlador FPD+I difuso más feedforward desarrollado y controlador clásico PID. Además, se muestra el comportamiento del sistema para seguimiento de referencia y robustez a frente a perturbaciones.

■ Respuesta del sistema para seguimiento de referencia

Los parámetros de sintonía correspondientes a los controladores se detallan en la tabla 3.10. y 3.11.

Tabla 3.10 Ganancias del controlador FPD+I difuso con PI + feedforward.

CONTROLADOR	Ke	Kde	Ki	Ku
FPD+I flujo	1	0.01	100	30
CONTROLADOR	KP		KI	
PI conductividad	-0.039		-0.036	
CONTROLADOR	Gff(s)			
Feedforwad	$-\left(\frac{0.51}{57}\right)\left(\frac{0.6s^2 + 1.8s + 1}{0.213s^2 + 0.7s + 1}\right)$			

Tabla 3.11 Ganancias de los controladores PI

CONTROLADOR	KP	KI
PI flujo	81.29	1818.98
PI conductividad	-0.039	-0.036

En las figuras 3.30 a 3.35 se muestran las respuestas del bastidor de osmosis inversa para el controlador diseñado, un PI clásico y otros controladores.

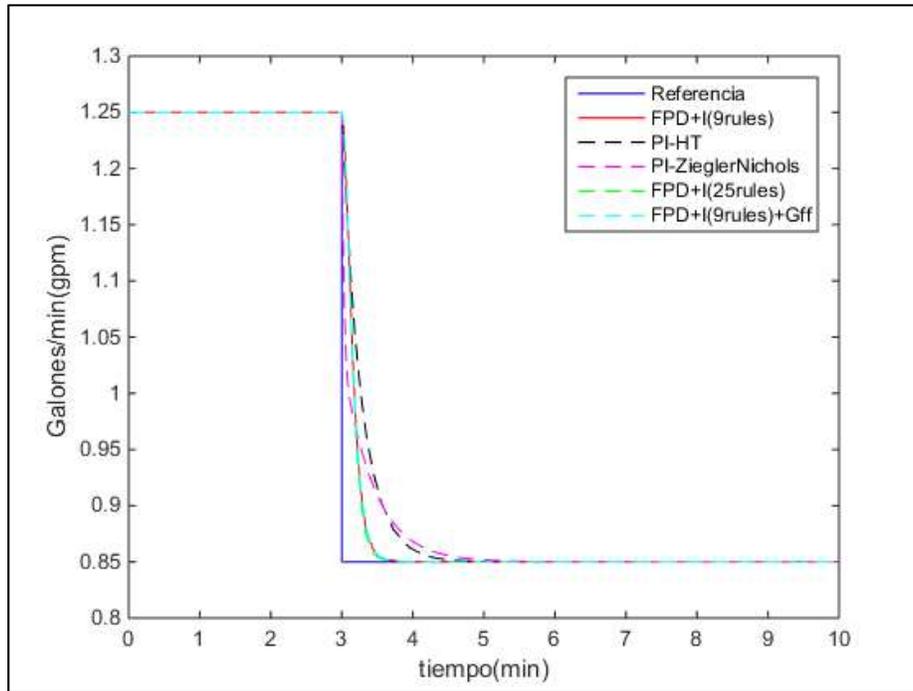


Figura 3.30 Respuesta de controladores para seguimiento de flujo. [Elaboración propia]

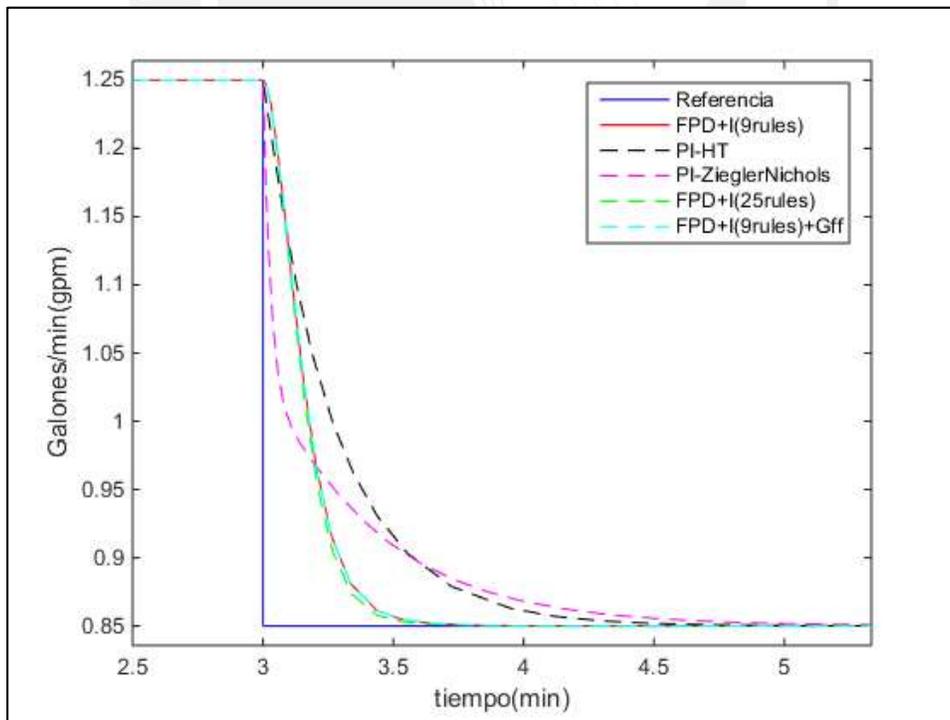


Figura 3.31 Respuesta de controladores para seguimiento de flujo (acercamiento). [Elaboración propia]

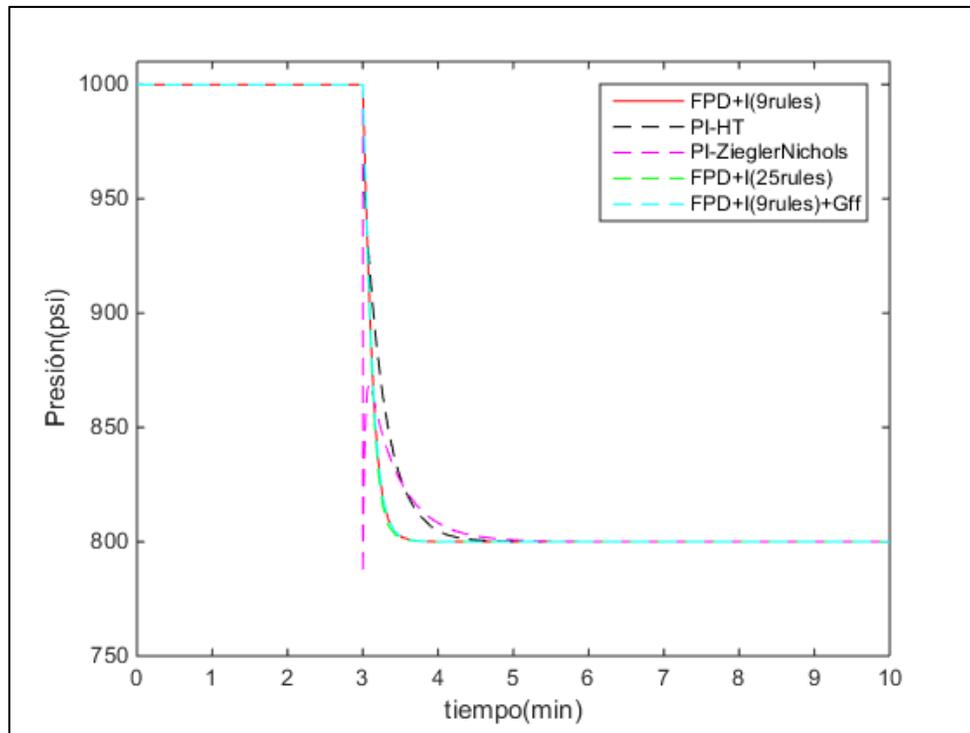


Figura 3.32 Señal de control de Presión para el bastidor de osmosis inversa. [Elaboración propia]

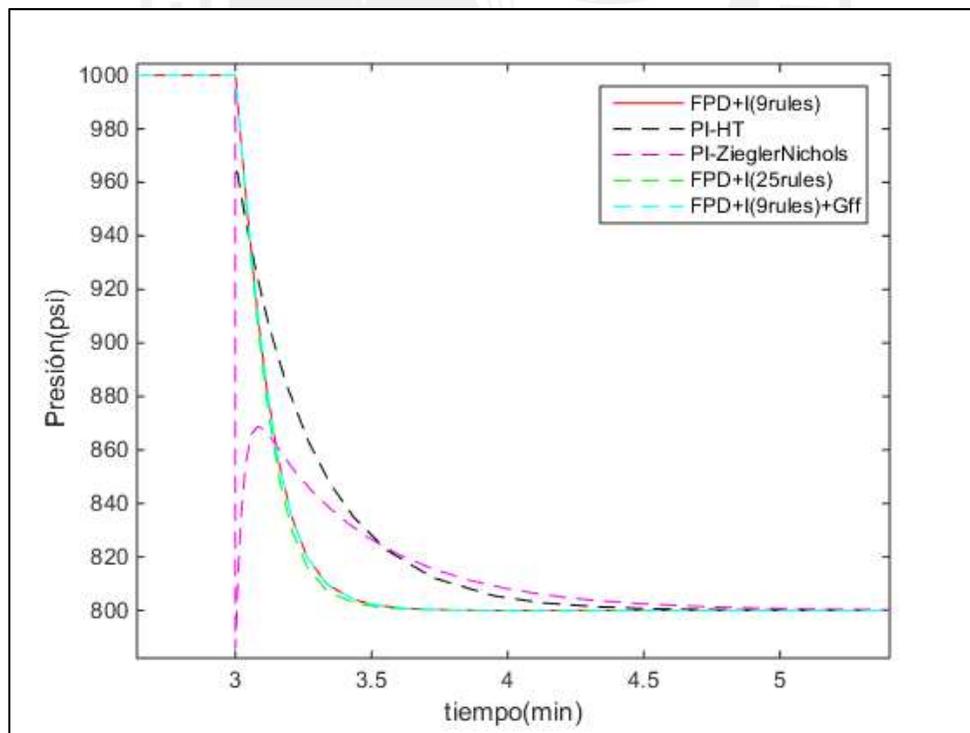


Figura 3.33 Señal de control de Presión para el bastidor de osmosis inversa (acercamiento). [Elaboración propia]

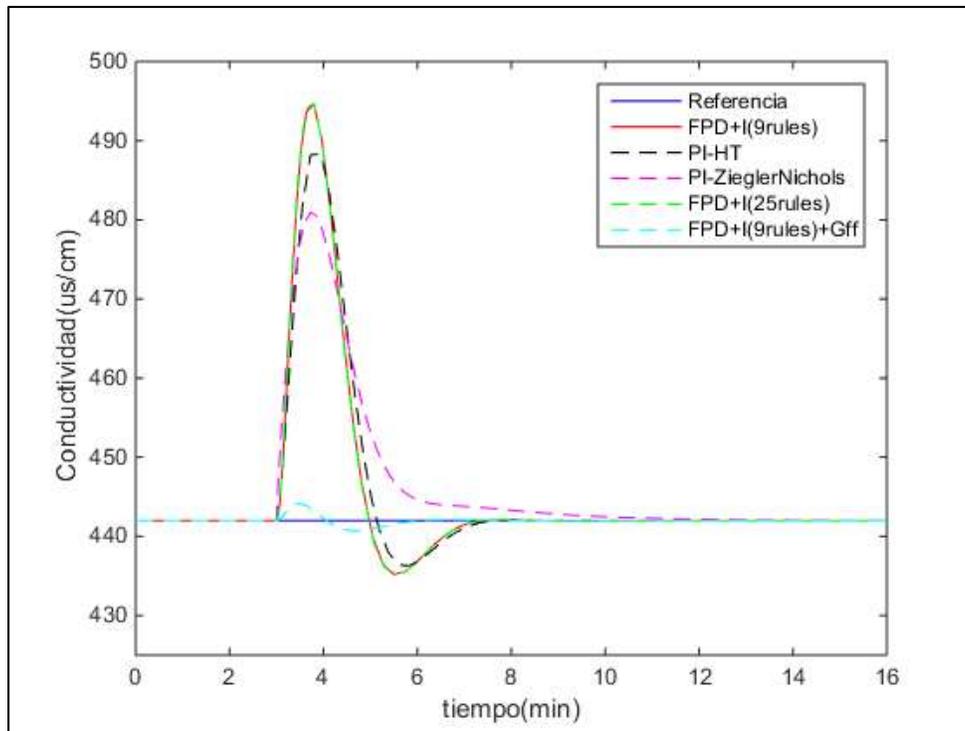


Figura 3.34 Respuesta de controladores para seguimiento de conductividad. [Elaboración propia]

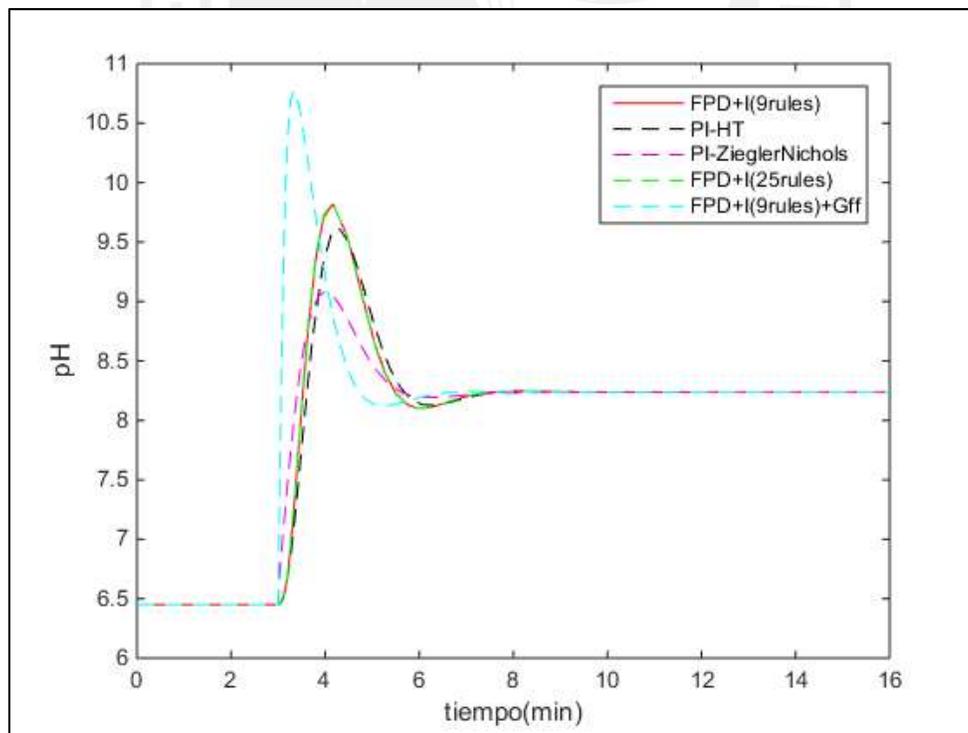


Figura 3.35 Señal de control pH para el bastidor de osmosis inversa. [Elaboración propia]

De las gráficas presentadas puede observarse la efectividad del controlador FPD+I difuso con PI + feedforward para el sistema de osmosis inversa. Se ha realizado un acercamiento en las gráficas de flujo y presión para poder observar de forma clara las ventajas que presenta el controlador diseñado.

En la figura 3.30 se observa que los controladores clásicos tienen un tiempo de establecimiento de aproximadamente 1.2 minutos mientras que el controlador diseñado logra estabilizar el flujo en poco menos de 1 minuto. Sin embargo, lo más importante se aprecia en la figura 3.31 donde se hace un acercamiento a la señal de presión.

En el caso del controlador PI hallado por Ziegler-Nichols, este presenta una caída de presión casi instantánea de 1000psi a menos de 800psi, crece nuevamente hasta 860psi y disminuye lentamente hasta que logra estabilizar. Algo similar se observa con un controlador PI con sintonización manual (PI-HT) el cual tiene también una caída de 40psi aproximadamente. De forzar la respuesta de este segundo controlador se obtendrá una respuesta parecida al controlador hallado por el método de Ziegler-Nichols.

El comportamiento presentado por estos dos controladores no es adecuado para el actuador (motor de la bomba) ya que este tendría un tiempo de vida corto. Todo lo contrario ocurre con el controlador diseñado puesto que este logra estabilizar el flujo en un menor tiempo y genera un cambio suave en el actuador aumentando el tiempo de vida de este.

Se observa también las respuestas de otros controladores: el mismo controlador diseñado pero con 25 reglas difusas y otro con 9 reglas. Como se mencionó anteriormente, el feedforward solo se aplica en lazo de control de conductividad y no debe afectar el desempeño del lazo de flujo, lo cual queda comprobado. Asimismo, se construye una tabla con 25 reglas difusas para verificar si se logra una mejor performance del sistema. Sin embargo, el aporte observado no es sustancial por lo que se decide utilizar el controlador FPD + I con 9 reglas difusas.

A continuación, la tabla 3.12 detalla las especificaciones temporales de los controladores utilizados para el seguimiento de referencia.

Tabla 3.12 Especificaciones temporales de la respuesta del bastidor de osmosis inversa para los controladores utilizados.

Flujo	Error en estado estable	Tiempo de establecimiento	Sobre impulso (%)
FPD+I difuso	Menor a 2%	0.8min	0%
PI-HT	Menor a 2%	1.2min	0%
PI-ZN	Menor a 2%	1.25min	0%
Conductividad	Error en estado estable	Tiempo de establecimiento (min)	Sobre impulso (%)
PI+feedforward	Menor a 2%	3min	0.45%
PI-HT	Menor a 2%	4min	10.4%
PI-ZN	Menor a 2%	6min	8.8%

Se aprecia que el sistema de control desarrollado ofrece un mejor desempeño que el control clásico, pues se logra estabilizar el flujo y la conductividad en menor tiempo y con menor sobreimpulso. Sin embargo, se observa que la señal de control pH es más agresiva.

■ Respuesta del sistema frente a perturbaciones

En este caso se aplicará una perturbación escalón de 100psi al sistema en el instante de tiempo 12min ya que efectos en la presión modifican tanto al flujo como a la conductividad. Los resultados se muestran en las figuras 3.36 a 3.39.

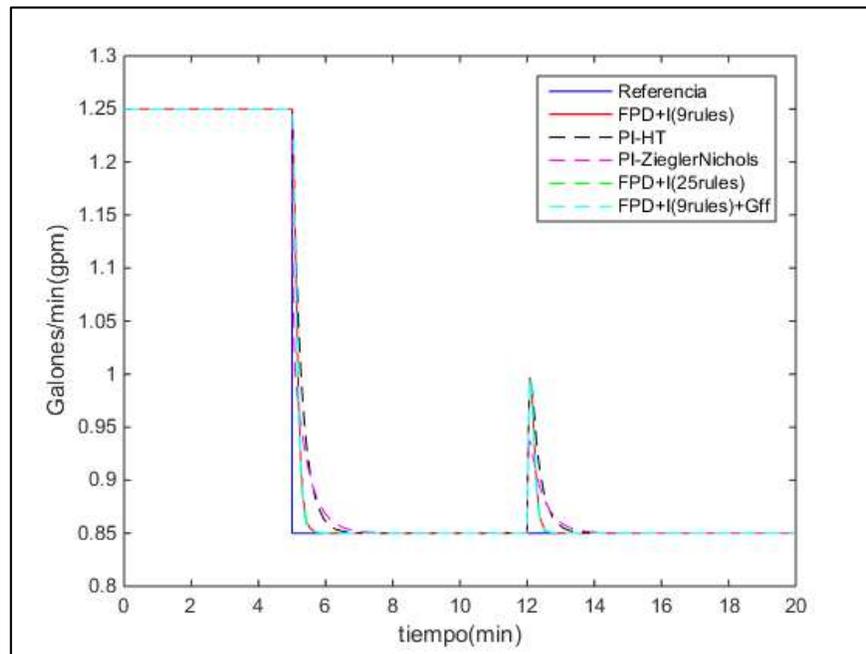


Figura 3.36 Respuesta de controladores para seguimiento de flujo (con perturbación).
[Elaboración propia]

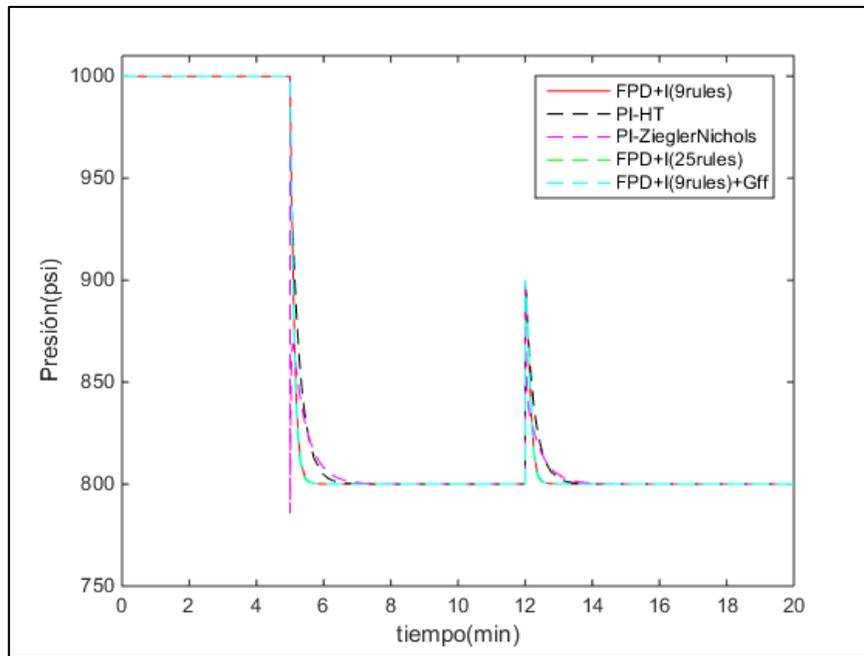


Figura 3.37 Señal de control de presión para para el bastidor de osmosis inversa (con perturbación). [Elaboración propia]

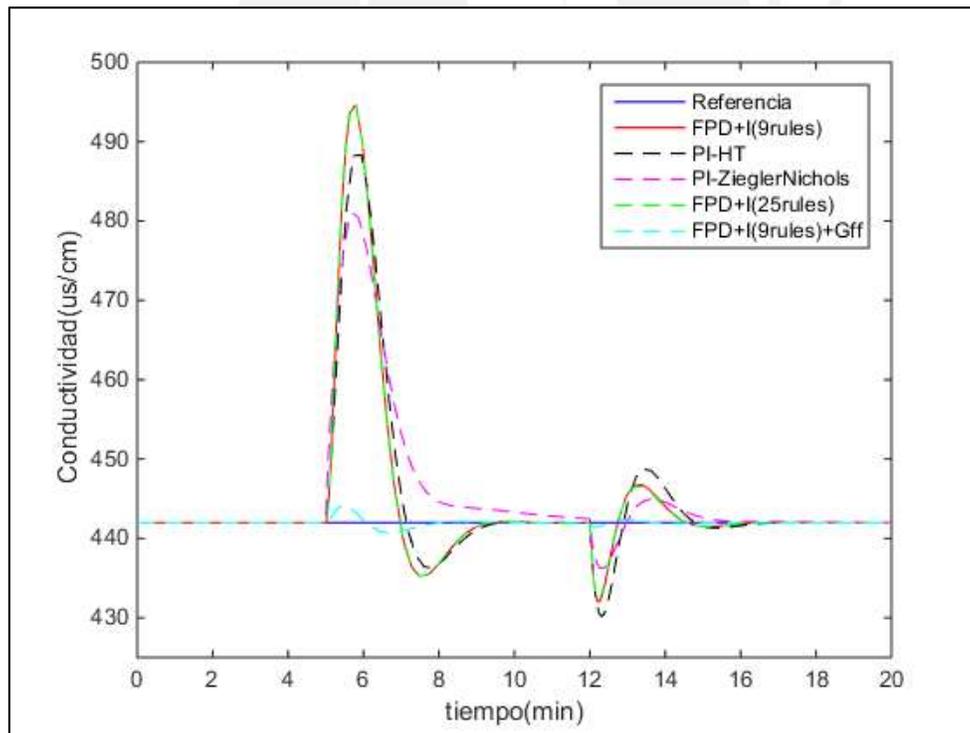


Figura 3.38 Respuesta de controladores para seguimiento de conductividad (con perturbación). [Elaboración propia]

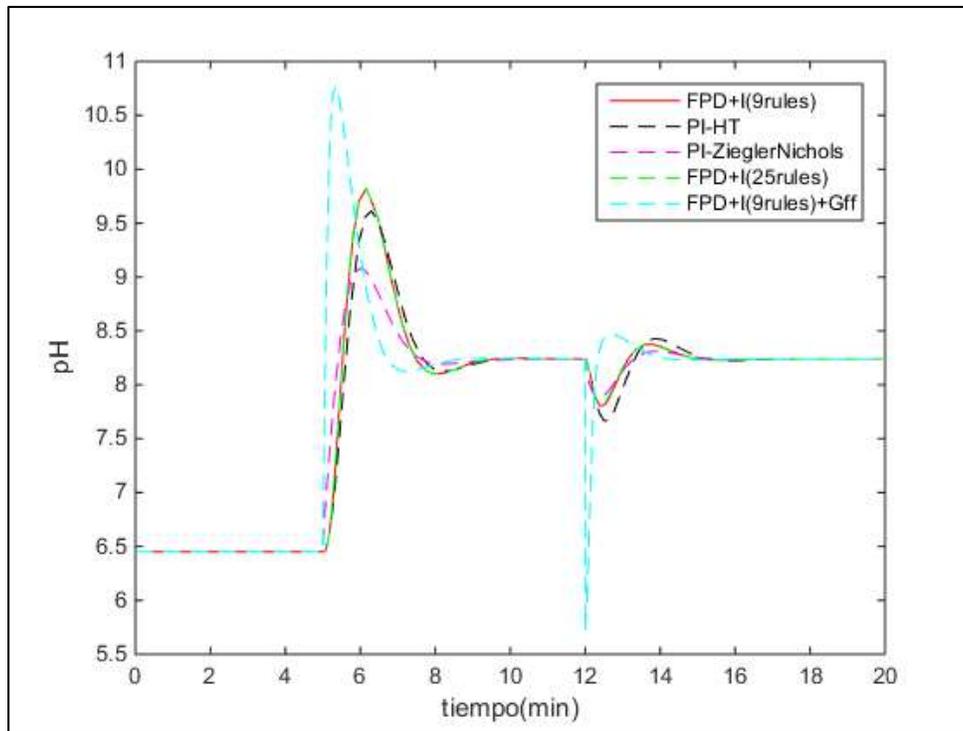


Figura 3.39 Señal de control de pH para el bastidor de osmosis inversa (con perturbación). [Elaboración propia]

La tabla 3.13 presenta la comparación de la repuesta de los controladores frente a la perturbación de presión.

Tabla 3.13 Especificaciones temporales de la respuesta del bastidor de osmosis inversa frente a perturbación escalón (100psi) para varios controladores.

Flujo	Tiempo de establecimiento	Sobre impulso (%)
FPD+l difuso	0.5min	17.64%
PI-HT	1.5min	16.47%
PI-ZN	2min	10.59%
Conductividad	Tiempo de establecimiento (min)	Sobre impulso (%)
PI+feedforward	3min	1.35%
PI-HT	4min	2.71%
PI-ZN	6min	8.8%

Se observa que el controlador diseñado ofrece un control efectivo del sistema frente a perturbaciones con menor tiempo de estabilización comparado con un control clásico. Sin embargo, en el lazo de control de conductividad el pH tiene una acción más agresiva para compensar el efecto de la perturbación de presión.

■ Respuesta del sistema con diferentes controles feedforward

El controlador feedforward solo puede ser diseñado de forma efectiva si se conoce de forma exacta el modelo de la perturbación y si esta es de tipo medible. Las figuras 3.40 y 3.41 muestran las respuestas para otros controladores feedforward que podrían ser diseñados.

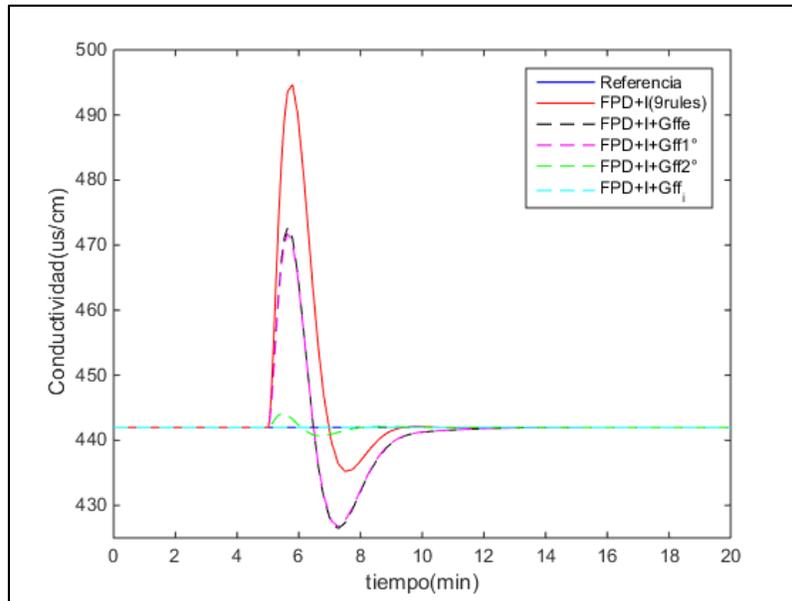


Figura 3.40 Respuesta de conductividad para diferentes órdenes de Gff(s). [Elaboración propia]

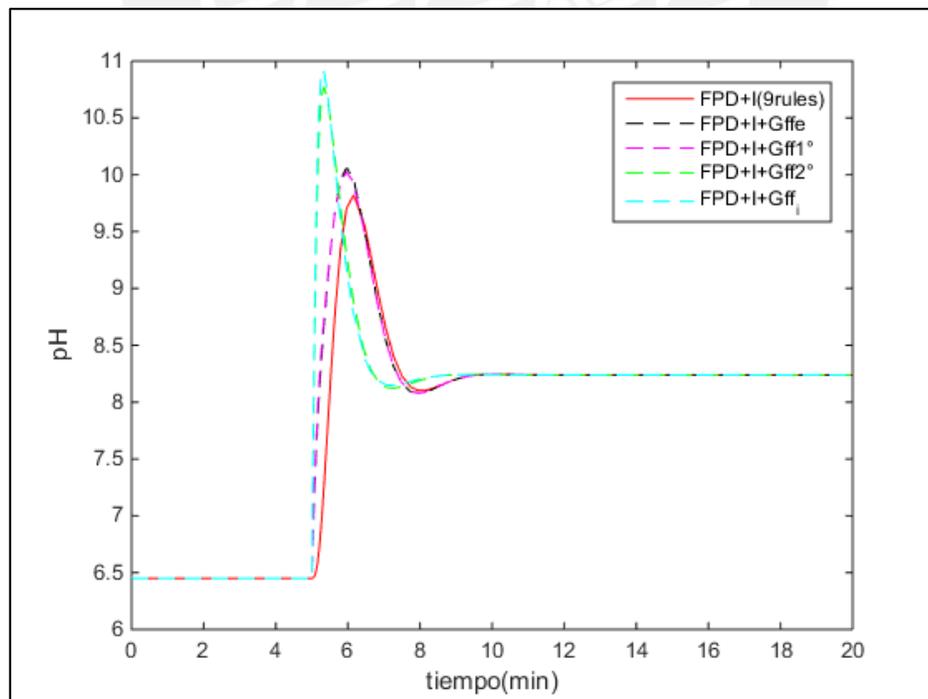


Figura 3.41 Señal de control pH para diferentes órdenes de Gff(s). [Elaboración propia]

Como era de esperar, utilizando el modelo de Gff(s) ideal el sistema logra compensar la perturbación antes de que esta altere la conductividad. El hecho de utilizar un Gff(s) de segundo orden para el control diseñado tiene que ver con la idea de que no siempre es posible obtener un modelo exacto de la perturbación que afecta el proceso.

3.4 Conclusiones parciales

1. Se diseñó un controlador FPD+I difuso de flujo y un PI + feedforward de conductividad para el control de un bastidor de osmosis inversa de una planta desalinizadora de agua de mar.
2. Se validó el modelo matemático determinado por Robertson.
3. Se verifica que realizar cambios en la presión ocasiona variaciones en la conductividad, esto debido al carácter multivariable del sistema.
4. Variaciones de pH no afectan al flujo de permeado ya que la función de transferencia que relaciona el flujo y el pH es nula.
5. Los resultados obtenidos reflejan la efectividad del control difuso para tratar con plantas complejas que presentan fuertes interacciones entre variables.
6. El control feedforward es efectivo siempre que se conozca el modelo de la perturbación y que esta sea medible.

CAPÍTULO 4

PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA DEL SISTEMA DE CONTROL INTELIGENTE PARA UN BASTIDOR DE OSMOSIS INVERSA DE UNA PLANTA DESALINIZADORA DE AGUA DE MAR

4.1 Introducción

Como se mostró en el capítulo anterior, el controlador propuesto dio mejores resultados frente al uso del control clásico, pues estabilizar el flujo y la conductividad en menor tiempo y genera una transición suave para la señal de control de presión, aspecto que el control PI no logra resolver de forma efectiva.

En la actualidad, el control difuso tiene aplicación en muchos campos, proporcionando una solución sencilla a problemas complejos. Asimismo, diversos fabricantes de insumos para control, software y hardware, están incorporando módulos con lógica difusa y productos nuevos que en menor o mayor grado usan lógica difusa. Es por ello que el presente capítulo desarrolla una propuesta de implementación del controlador diseñado utilizando un controlador lógico programable, en particular el PLC ControlLogix5000 de Allen Bradley.

4.2 Hardware de control propuesto

4.2.1 Controlador PLC ControlLogix5000

Un PLC es un dispositivo electrónico que puede ser programado por el usuario y se utiliza en la industria para resolver problemas de secuencia en la maquinaria o procesos, ahorrando costos de mantenimiento y aumentando la confiabilidad de los equipos.

En particular, la familia ControlLogix de PLC Allen Bradley presenta los beneficios de la plataforma Logix: el mismo ambiente de programación, redes y motor de control para entregar un alto rendimiento en las aplicaciones que se requieran en un ambiente fácil de usar. Su estrecha integración entre el software de programación, el controlador y la interfaz de E/S reduce el tiempo de desarrollo y costos en la puesta en marcha y durante el funcionamiento normal del proceso. [9]

Esta gama de PLC utiliza el RSLogix5000 para su programación, el cual permite crear, modificar y monitorear los programas de aplicación para el ControlLogix. Dispone además, de una interfaz sencilla, intuitiva y confiable. En la figura 4.1 se muestra el controlador perteneciente a esta familia de PLC.



Figura 4.1 PLC ControlLogix5570 de Allen Bradley. [8]

4.2.2 Configuración del sistema de control propuesto

Para la implementación del controlador desarrollado se propone utilizar el entorno RSLogix5000 el cual posee varios lenguajes de programación, entre ellos, lenguaje ladder y texto estructurado. En este caso, debido a la similitud que presenta el código de MATLAB con el texto estructurado, esta será la alternativa a utilizar para la programación del PLC.

La figura 4.2 muestra la propuesta de implementación del sistema de control para el bastidor de osmosis inversa de una planta desalinizadora de agua de mar.

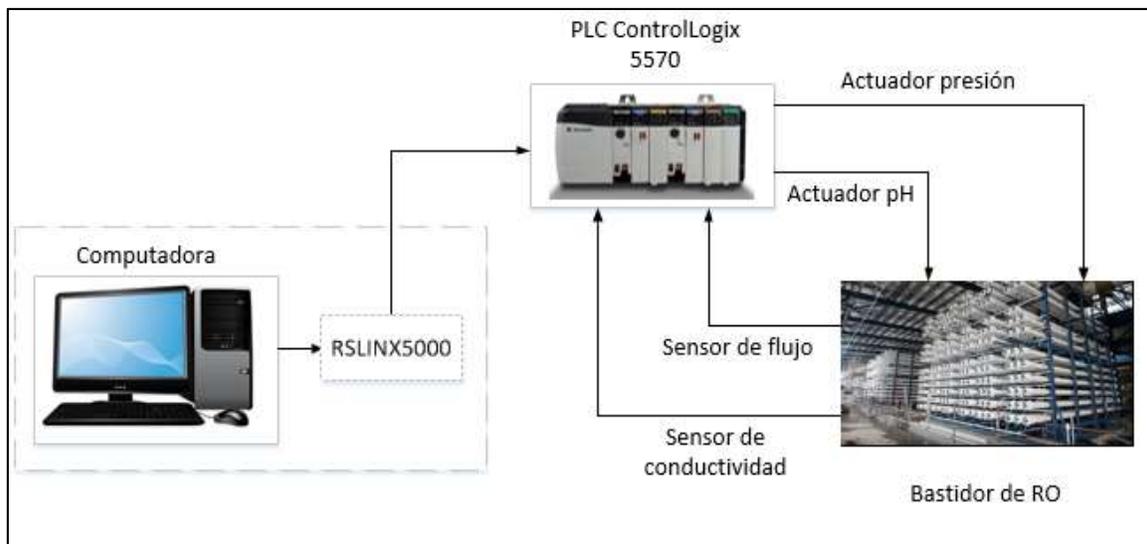


Figura 4.2 Configuración del sistema de control del bastidor de osmosis inversa con PLC ControlLogix5570 de Allen Bradley. [Elaboración propia]

4.3 Algoritmo de control para el bastidor de osmosis inversa:

El controlador propuesto consta de dos lazos de control independientes, uno difuso para el control de flujo y el otro avanzado convencional para el control de la conductividad.

El algoritmo de control PID es conocido y por lo tanto no se entrará al detalle de este mientras que para el control difuso se hará un análisis más específico para entender su funcionamiento y poder implementarlo.

El controlador difuso presenta 3 etapas importantes que son: fuzzyficación, base de reglas y defuzzyficación. La primera permite llevar los valores numéricos a valores lingüísticos para que luego estos, de acuerdo a la base de reglas definida por el experto, den una salida que también será una variable lingüística, la que finalmente pasa por la etapa de defuzzyficación convirtiéndose en un valor numérico que es lo que requiere el sistema.

A continuación se presenta la figura 4.3 con el diagrama de flujo donde se detalla este proceso.

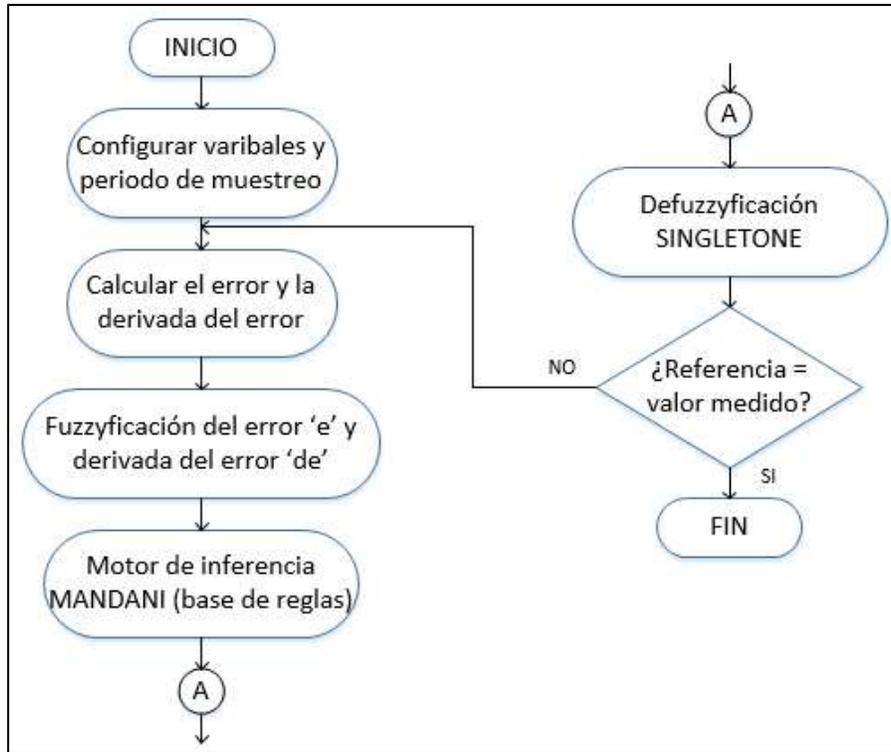


Figura 4.3 Diagrama de flujo para el controlador FPD+I difuso. [Elaboración propia]

De acuerdo al esquema propuesto en el capítulo 3, el controlador difuso consta de dos entradas, error y derivada del error de flujo, y la salida presión. Para poder fuzzyficar estos valores se crean dos matrices o arreglos que tendrán como número de filas la cantidad de entradas y como número de columnas la cantidad de particiones que se utilicen para cada entrada. En este caso, como son dos entradas de tres particiones cada una, estas matrices serán de dimensión 2x3.

Las etiquetas de estas matrices serán AFP [2,3] y EFP [2,3]. La primera indica si la variable de entrada pertenece a una determinada partición y la segunda indica el grado de pertenencia de cada entrada que pertenece a determinada partición. Por ejemplo, el error tiene 3 particiones como se muestra en la figura 4.4.

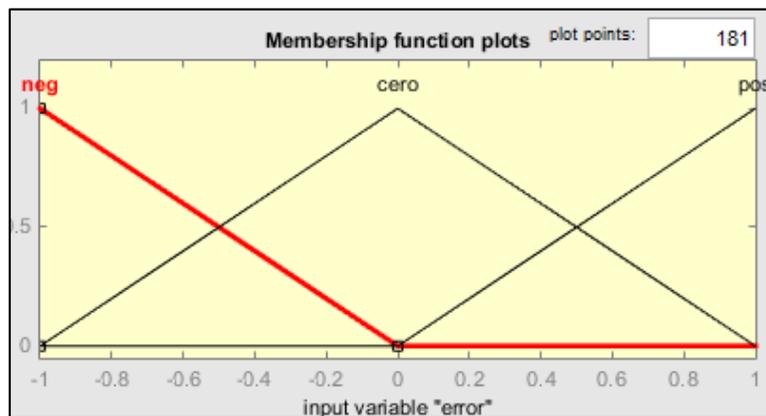


Figura 4.4 Funciones de pertenencia del error de flujo. [Elaboración propia]

Para el caso de la función definida con la etiqueta 'cero', el algoritmo para fuzzyficar sería de la siguiente manera:

Si error mayor igual que -1 y error menor igual que 1 ENTONCES

Si error menor que cero ENTONCES

$AFP[1,2] = \text{'verdadero'}$

$EFP[1,2] = (\text{error} - (-1)) / (0 - (-1))$ SINO

Si error mayor igual que cero ENTONCES

$AFP[1,2] = \text{'verdadero'}$

$EFP[1,2] = 1 - (\text{error} - (0)) / (1 - 0)$

FIN SI

FIN SI

De la misma forma se trabaja para las otras zonas y para la entrada derivada del error. Con esto y la base de reglas se crea un arreglo $S[n]$ donde se almacenarán los valores de los singletons correspondientes a cada combinación de particiones de las dos entradas, es decir, la base de reglas:

Si AFP[1,1] y AFP[2,1] ENTONCES

Si EFP[1,1] es mayor que EFP[2,1] ENTONCES

$\text{Temp} = EFP[2,1]$ SINO

$\text{Temp} = EFP[1,1]$

$WS[1] = \text{Temp}$

FIN SI

FIN SI

La matriz $WS[n]$ contiene los pesos correspondientes a cada regla. Finalmente, como se utilizan singletons para la defuzzyficación, el método del centro de área de simplifica llegando a ser un promedio ponderado es decir:

$$\text{Salida defuzzyficaada} = \frac{\sum_{i=1}^n WS[n] * S[n]}{\sum_{i=1}^n WS[n]}$$

Con esto se crea un bucle 'for' de la siguiente manera para obtener la salida defuzzyficada:

For n=1 → 9 hacer:

$\text{Num} = \text{Num} + WS[n] * S[n]$

$\text{Den} = \text{Den} + WS[n]$

FIN for y devolver Num/Den

4.4 Software para el funcionamiento del PLC

Debido a que se realizará una simulación de la planta y el controlador en el PLC, se deben configurar dos programas: RSLinx y RSLOGIX Emulate 5000. El primero permite enlazar un chasis “virtual” y comunicar la PC y el PLC mientras que el segundo se utiliza para darle la configuración al chasis, es decir, dependiendo del número de módulos que se escoja al crear el nuevo proyecto. Esto se muestra en las figuras 4.5 y 4.6.

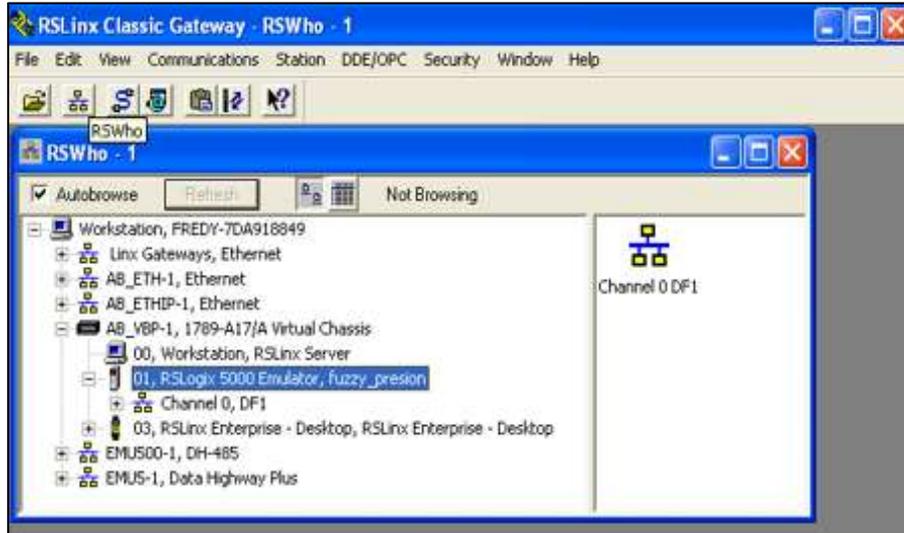


Figura 4.5 Programa RSLinx. [Elaboración propia]



Figura 4.6 Programa RsLogix Emulate 5000. [Elaboración propia]

Para la programación del controlador se utiliza el RSLogix5000 donde se crea una nueva tarea, la cual debe tener asociados dos programas. Uno que corresponde al algoritmo de la planta y el otro para el algoritmo de control. Por lo general ambos programas podrían ir juntos en un solo, sin embargo, tener los códigos de planta y control por separado y luego enlazarlos es una buena práctica para evitar confusión.

La figura 4.6 muestra la tarea creada con sus respectivos programas.

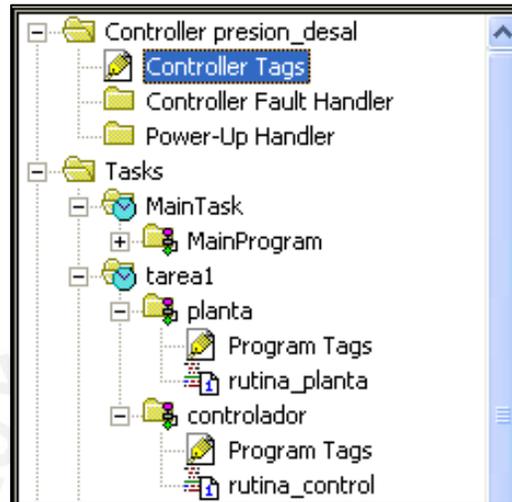


Figura 4.6 Creación de nueva tarea y sus programas 'planta' y 'control'. [Elaboración propia]

Además, es necesario enlazar a cada programa una determinada subrutina, es decir, en la figura 4.6 'rutina_planta' está enlazada con el programa 'planta'. De igual forma con 'rutina_control' y 'controlador'. El código en texto estructurado correspondiente a cada uno de estas subrutinas se encuentra en el ANEXO 3.

4.5 Resultados de programación en el PLC

Una vez implementadas las subrutinas para la simulación se accede a la opción 'trends' para obtener las gráficas correspondientes a flujo, presión, conductividad y pH. Los resultados obtenidos para el sistema presentado en las figuras 3.20-3.23 como 'FPD+I difuso' se muestran en las figura 4.7 a 4.10



Figura 4.7 Seguimiento de referencia de flujo. [Elaboración propia]



Figura 4.8 Seguimiento de referencia de conductividad. [Elaboración propia]



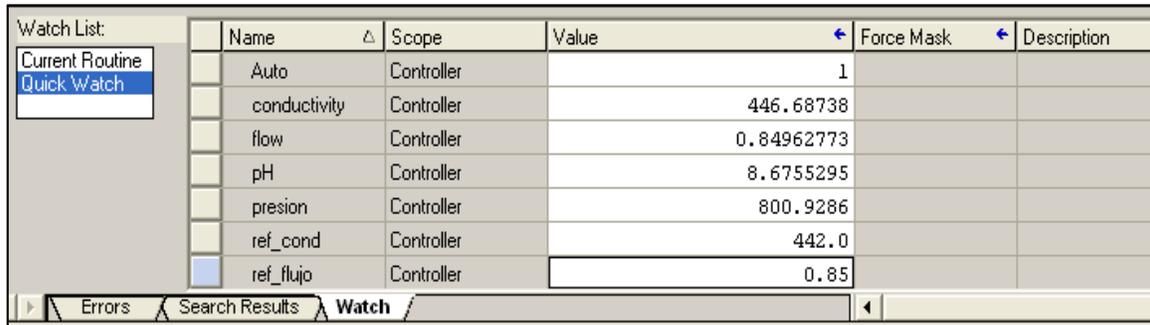
Figura 4.9 Señal de control de presión. [Elaboración propia]



Figura 4.10 Señal de control de pH. [Elaboración propia]

Con esto queda comprobado el funcionamiento del controlador desarrollado tanto en simulación como en una posible implementación.

Además, el PLC ControlLogix5000 permite no solo analizar las variables por medio de gráficas sino también a través de una tabla definida como “Quick Watch”. En ella se pueden agregar las variables de interés para realizar el monitoreo del sistema en tiempo real y esta se muestra en la figura 4.11.



Watch List:	Name	Scope	Value	Force Mask	Description
Current Routine	Auto	Controller		1	
Quick Watch	conductivity	Controller	446.68738		
	flow	Controller	0.84962773		
	pH	Controller	8.6755295		
	presion	Controller	800.9286		
	ref_cond	Controller	442.0		
	ref_flujo	Controller	0.85		

Figura 4.11 Quick Watch PLC ControlLogix5000. [Elaboración propia]

4.6 Desarrollo de sistema SCADA

La etapa final consiste en desarrollar una interfaz hombre máquina (HMI) que permita la interacción entre el usuario y el proceso controlado. Esto es necesario ya que al implementar el sistema de control por lo general el cuarto de supervisión se encuentra alejado de la planta o proceso productivo. Por lo tanto, la interfaz hombre máquina permite el cambio de parámetros del controlador de la planta, señales de referencia, y monitoreo de variables críticas del proceso a distancia en un entorno fácil entendimiento.

En este caso, el software para crear dicha interfaz es el FactoryTalk View Studio (FTV), programa desarrollado por Allen Bradley.

Luego de realizar la configuración del driver de comunicación entre el PLC simulado (PLCEmulate5000) y el FTV, se presenta la interfaz desarrollada en la figura 4.12.

Esta interfaz cuenta con un botón de inicio/parada, tanque de agua de alimentación, ácido y agua producto. Asimismo, se observan los filtros de arena y de cartucho y la bomba de alta presión que se encarga de bombear el agua hacia la membrana semipermeable que también está representada en la interfaz. Finalmente, los cambios de referencia para el flujo y conductividad de permeado y para el monitoreo de las variables críticas del bastidor de osmosis inversa se realiza en las pantallas de color verde y amarillo que se muestran en la parte superior de la interfaz desarrollada, respectivamente.

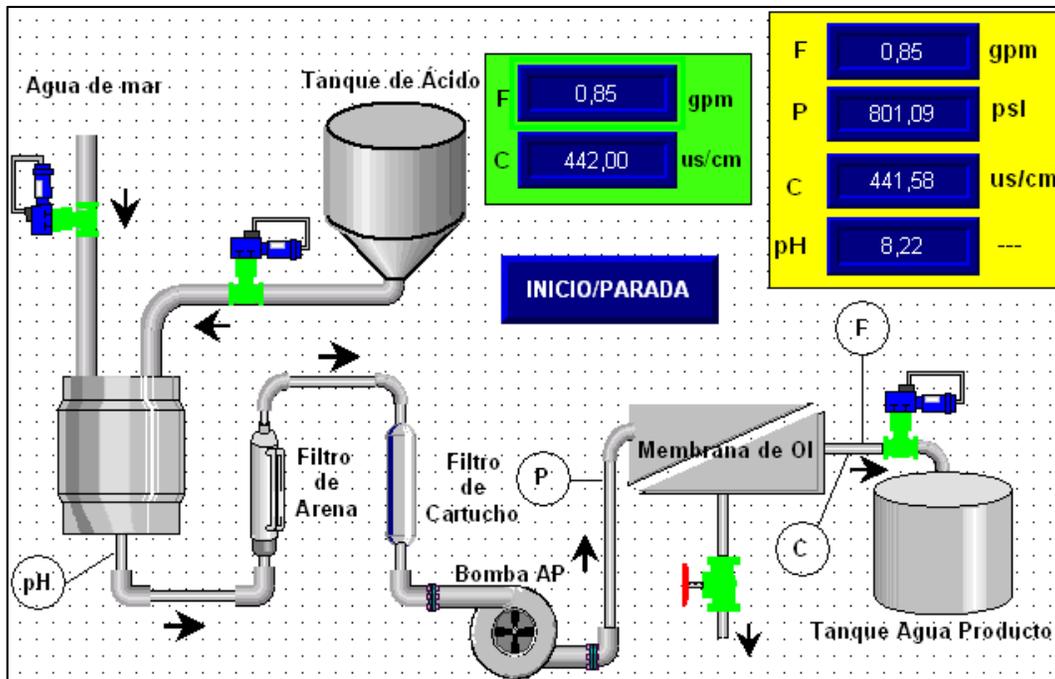


Figura 4.11 Interfaz de usuario para planta desalinizadora. [Elaboración propia]

4.7 Conclusiones parciales

1. Se verifica que el algoritmo de control propuesto es efectivo para el control de una planta desalinizadora por osmosis inversa.
2. Los resultados obtenidos por la propuesta de implementación se corresponden con las pruebas realizadas en MATLAB-SIMULINK y con el experimento de Robertson.
3. Se desarrolló una interfaz hombre-máquina que permite modificar las referencias de flujo y conductividad de permeado así como para la supervisión del sistema de control propuesto.

Conclusiones

1. Existen diversas estrategias de control que pueden ser aplicadas a un bastidor de osmosis inversa de una planta desalinizadora de agua de mar, entre ellas, el control predictivo, clásico y control inteligente.
2. Se desarrolló un sistema de control FPD+I difuso de flujo con un PI + feedforward de conductividad para el control del bastidor de osmosis inversa de una planta desalinizadora de agua de mar. Se obtuvo resultados satisfactorios.
3. El análisis comparativo entre el sistema de control propuesto y el control clásico muestra una mejora en la respuesta temporal del sistema pues estabiliza el flujo y conductividad de permeado en 0.4 minutos y 1 minuto menos, respectivamente.
4. Para el lazo de control de conductividad, el porcentaje de sobreimpulso del controlador diseñado es 0.45% mientras que para el control clásico se tiene 10.4%.
5. El controlador propuesto resulta ser más robusto frente a la perturbación de presión de 100psi aplicada al sistema. Éste logra estabilizar el flujo en aproximadamente 0.5 minutos y con sobreimpulso de 17.64% mientras que al control clásico le toma 1.5 minutos en estabilizar aunque con un sobreimpulso de 16.47%.
6. La señal de control de pH escapa del rango lineal de operación. Más allá de este rango el comportamiento del sistema es incierto. Por lo tanto, una alternativa es saturar las señales de control o realizar más pruebas con la planta para definir una base de reglas que permita un control efectivo en todo el rango de operación del proceso.
7. La propuesta de implementación del sistema de control está basada en una aplicación en PLC Allen Bradley de la familia 5000, desarrollándose una interfaz hombre máquina (HMI) para la supervisión del proceso en el software de automatización FactoryTalkView de Allen Bradley.
8. Los resultados del presente estudio alientan al uso del control difuso complementado con el control feedforward para resolver el problema de control de un bastidor de osmosis inversa de una planta desalinizadora de agua de mar, siempre que se cuente con la experiencia necesaria y dominio del proceso.

Recomendaciones

1. Aplicar los resultados del controlador FPD + I difuso con PI + feedforward como alternativa de solución al problema de control de plantas desalinizadoras de agua de mar por osmosis inversa.
2. Para realizar la implementación práctica del algoritmo de control propuesto y comprobar la efectividad de éste se deben desarrollar diversos ensayos con la planta para determinar los rangos de las variables de entrada/salida y definir la base de reglas difusa correspondiente.
3. Al desarrollar el algoritmo en el controlador PLC, se debe definir un tiempo de muestreo adecuado para la planta a tratar mediante algún criterio de diseño conocido.



Bibliografía

Libros y artículos científicos.

1. A. R. Bartman, P. D. Christofides and Y. Cohen, **“Non-linear Model-based Control of an Experimental Reverse-osmosis Water Desalination System”**. Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 48, 2009, pp. 6126-6136.
2. Abbas A. and Al-Bastaki N., **“Modeling of an RO water desalination unit using neural networks”**. Chemical Engineering Journal, 114, 139–143, 2005.
3. Abbas, A. (2006). **“Model predictive control of a reverse osmosis desalination unit”**. Desalination, 194, 268-280.
4. Alatiqi, I., A. Ghabris, and S. Ebrahim, **“Measurement and control in reverse osmosis desalination”**. Desalination, 75, 119–140, 1989.
5. Alatiqi, I.M., Ghabris, A.H., and Ebrahim, S. (1989). **“System identification and control of reverse osmosis desalination”**. Desalination, 75, 119-140.
6. Alatiqi, Imad, Hissham Ettouney, Hisham El-Dessouky (1999). **“Process Control in Water Desalination Industry: An Overview”**. Desalination 126, 15-32.
7. Albertos P. and Sala A. (2004). **“Multivariable Control Systems”**, Springer-Verlag, New York.
8. Baker R. W. (2004). **“Membrane Technology and Applications”**, 2nd Edition, John Wiley & Sons.
9. Burden A. C. Desphande P. B., Watter C. J. (2001). **“Advanced Process Control of a B-9 Permasep Permeator Desalination Pilot Plant”**. Desalination, 133, 271-283.
10. El-Dessouky H. T., Ettouney H. M. (2002). **“Fundamentals of Salta Water Desalination”**. Elsevier, New York.
11. Fariñas Iglesias M. (1999). **“Osmosis inversa. Fundamentos, Tecnología y Aplicaciones”**. McGraw Hill, Aravaca, España.
12. García-Rodríguez L. and Gómez-Camacho C. (2006). **“Perspectives of Solar-Assisted Seawater Distillation”**. Desalination, 136, 213-218.
13. Goeun Kim, Jimo Park, Jinsung Kim, Heejae Lee and Hoon Heo. (2009). **“PID Control of Reverse Osmosis Desalination Plant Using Immune-Genetic Algorithm”**. ICROS-SICE International Joint Conference. Fukuoka International Congress Centre, Japan.
14. Ibrahim Perera J. C. (1998). **“Desalación de Aguas”**. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.
15. Ines Ben Ali, Mehdi Turki, Jamel Belhadj, Xavir Roboam. (2012). **“Energy Management of a Reverso Osmosis Desalination Process Powerd by Renewable Energy Sources”**. IEEE, ICDE Whorkshop.
16. J. Z. Assef, J. C. Watters, P. B. Deshpande, and I. M. Alatiqi. **“Advanced control of a reverse osmosis desalination unit”**. J. Proc. Contr., 7: 283-289, 1997.
17. Jyh-Shing Roger Jang, Chuen-Tsai Sun, Eiji Mizutani (1996). **“Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence”**. 1st Edition, Prentice Hall.
18. Jyh-Shing Roger Jang. (1993). **“ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System”**. IEEE Transcations on Systems, Man. And cybernetics, Vol 23, No 3.
19. Kucera J. (2010). **“Reverse Osmosis Industrial Applications and Processes”**, Publicaciones Scrivener, Wiley Canada.

20. M. Jamshidi, M.-R. Akbarzadeh- T & K- Kumbla. (1996) **“Design and Implementation of Fuzzy Controllers for Complex Systems – Case Study: A Water Desalination Plant”**. ISAI/IFIS, Mexico-USA Collaboration in Intelligent Systems Technology.
21. M. Sugeno. (1985). **“Industrial Applications of Fuzzy Control”**. Elsevier, New York.
22. Majali F., Ettouney H. (2008). **“Design and Operating Characteristics of Pilot Scale Reverse Osmosis Plants”**. Desalination, 222, 441-445.
23. Malak T. Al-Nory, Stephen C. Graves. (2013). **“Water Desalination Supply Chain Modelling and Optimization”**. IEEE, ICDE Whorkshop.
24. McFall C., Bartman A., Christofides P. (2008). **“Control and Monitoring of a High Recovery Reverse Osmosis Desalination Process”**. Ind. End. Chem. Res., Vol 47, No. 17.
25. Medina San Juan J. A. (2000). **“Desalación de Aguas Salobres y de Mar. Osmosis Inversa”**. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
26. Mindler A.B. and Epstein A.C. **“Measurement and control in reverse osmosis desalination”**, Desalination, Vol. 59, pp. 343-79. 1986.
27. Moncada-Valerio J., Rivas-Pérez R. (2012). **“Control Predictivo Multivariable de un Bastidor de Osmosis Inversa de una Planta Desalinizadora de Agua de Mar”**. Memorias XV Congreso Latinoamericano de Control Automático, Lima-Perú.
28. N.M Wade (2001). **“Distillation Plant Development and Cost”**. Desalination 136, 3-12.
29. Natwar S. Rathore, Neha Kundariya, Anirudha Narain. (2013). **“PID Controller Tuning in Reverse Osmosis System based on Particle Swarm Optimization”**. International Journal of Scientific and Research Publications. Volume 3, Issue 6.
30. P. J. Craven, R. Sutton and M. Kwiesielewicz. (1998). **“Neurofuzzy Control of a Non-linear Multivariable System”**. UKACC International Conference of Control, No 455.
31. Ramillo, Lucía., Gómez de Soler, Susana., Coppari, Norberto (2003). **“Tecnologías de Proceso para Desalinización de Aguas”**. Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA, Buenos Aires), 22-27.
32. Ricardo Sanz, Fernando Matía, Agustín Jimenez, Ramón Galán. (2000). **“Control Inteligente”**. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial, 43-48.
33. Riverol, C., and V. Pilipovik. **“Mathematical modeling of perfect decoupled control system and its application: A reverse osmosis desalination industrial-scale unit”**. Journal of Automated Methods and Management in Chemistry, 2005, 50-54, 2005.
34. Robertson, M.W., J. C. Watters, P. B. Desphande, J. Z. Assef and I.M. Alatiqi, **“Model based control for reverse osmosis desalination processes”**. Desalination, 104, 59-68, 1996.
35. Seborg D. E., Edgar T. F., Mellichamp D. A. (2004). **“Process Dynamics and Control”**. 2nd Edition, John Wiley & Sons.
36. Syafie, S.; Tadeo, F.; Palacin, L.; De Prada, C.; Salazar, J., **“Modelling for dynamic simulation of pretreatment in Reverse Osmosis plants”**. Industrial Engineering and Engineering Management, 2008. IEEM 2008. IEEE International Conference on, vol., no., pp.1663, 1667, 8-11 Dec. 2008.
37. T. Takagi and M. Sugeno. (1983). **“Derivation of Fuzzy Control Rules from Human Operator’s Control Actions”**. IFAC, Symp. Fuzzy Inform. Knowledge Representation and Decision Analysis, 55-60.

38. Torky, O.M.; Elamvazuthi, I.; Hanif, N.; “**PC based SCADA system for reverse osmosis desalination plants**”, IEEE Student Conference on Research and Development, 2009, p. 442-445.
39. Zilouchian A. and Jafar M., “**Automation and process control of reverse osmosis plants using soft computing methodologies**”. Desalination, 135, 51-59, 2001.

Enlaces y páginas web.

- [1] **Desalinización. Desalinización por Osmosis inversa (2004).**
Consultado: 20 de setiembre de 2014.
<<https://es.wikipedia.org/wiki/Desalinizaci%C3%B3n>>
- [2] **Procesos con cambio de fase para desalinización de agua (2005).**
Consultado: 15 de setiembre de 2014.
<<https://sites.google.com/site/ladesalinizacion/home/cambio-de-fase>>
- [3] **Agua Limpia, Finanzas Claras. Planta de Osmosis Inversa (2003).**
Consultado: 1 de diciembre de 2014.
<<http://www.oomsapaslc.gob.mx/publico/desalinizadora/>>
- [4] **NSC Agua. (2014).**
Consultado: 5 de diciembre de 2014.
<<http://nscagua.com/tecnologia/osmosis-inversa/>>
- [5] **Aqua Market. (2015).**
Consultado: 10 de enero de 2015.
<<http://www.gesfilter.com/wp-content/uploads/2015/04/membrana-osmosis-inversa-abierta.jpg>>
- [6] **Desalinización de Agua para Consumo Humano (2012)**
Consultado: 12 de enero de 2015.
<<http://desalinizacionaguaparaconsumohumano.blogspot.pe/>>
- [7] **Grupo Agua. ¿Qué es la Osmosis inversa? (2010).**
Consultado: 20 de junio de 2015.
<<https://purificadorasdeagua.wordpress.com/category/osmosis-inversa-2/osmosis-inversa/>>
- [8] **Rockwell Automation. ControlLogix 5570 Controllers (2015).**
Consultado: 20 de noviembre de 2015.
<<http://www.ab.com/en/epub/catalogs/12762/2181376/2416247/360807/1837516/ControlLogix-5570-Controllers.html>>
- [9] **Logix5000 Controllers Add On Instructions (2015).**
Consultado: 20 de noviembre de 2015.
<http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/pm/1756-pm010_-en-p.pdf>