

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
ESCUELA DE POSGRADO



**DISEÑO DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN Y
DIAGNÓSTICO DE FALLAS BASADO EN MODELO
PARA UNA PLANTA DESALINIZADORA DE AGUA DE
MAR**

**Tesis para optar el grado de:
MAGÍSTER EN INGENIERÍA DE CONTROL Y
AUTOMATIZACIÓN**

Autor:

SOTO ANGLES MARIO EDUARDO

Asesor:

Mg. GUSTAVO PÉREZ ZÚÑIGA

Miembros del Jurado:

PhD. JAVIER SOTOMAYOR MORIANO

PhD. JORGE CHÁVEZ FUENTES

Mg. GUSTAVO PÉREZ ZÚÑIGA

Lima - Perú

2016

RESUMEN

Los sistemas de diagnóstico de fallas cumplen un papel importante en los sistemas de control en la actualidad, ya que los distintos elementos que componen la planta son susceptibles a fallas. Las fallas que ocurren en una planta desalinizadora por ósmosis inversa pueden traer como consecuencia una mala calidad de agua desalinizada, reducir considerablemente la eficiencia de producción de la planta, poner en peligro la integridad de los operadores de la planta o provocar problemas con el medio ambiente.

En este trabajo se desarrolla un modelamiento matemático de una planta desalinizadora con un módulo de ósmosis inversa en configuración enrollamiento en espiral, con el objetivo de obtener un conjunto de ecuaciones analíticas de la planta y comprender las principales variables que intervienen en el modelo.

A partir del modelo obtenido, se hace un análisis estructural del proceso para luego obtener el conjunto de relaciones de redundancia analítica (RRA) que servirán de base para la detección de fallas. Se definen las principales fallas en sensores, actuadores y variables internas que intervienen en el proceso de desalinización por OI, luego se desarrolla un algoritmo para la simulación del modelo dinámico de la planta.

Se realizó la simulación de fallas en los distintos componentes del sistema y se compara el sistema en modo normal de funcionamiento con el sistema sometido a fallas. Se realizan pruebas de detectabilidad y diagnosticabilidad de fallas mediante un algoritmo de emparejamiento de restricciones (matching) a partir de las RRA obtenidas, además mediante el cálculo de posibles mínimos subconjuntos de prueba MTES, se realizaron pruebas adicionales de aislabilidad de fallas simultáneas.

Se consiguió detectar todas las fallas consideradas y mediante el análisis de diagnosticabilidad se logró aislar adecuadamente la mayoría de ellas y determinar la forma de generar RRA a partir del cálculo de MTES para aislar fallas simultáneas.

DEDICATORIA

A mis padres, cuyo apoyo incondicional y confianza depositada en mí fueron invaluableles en la elaboración del presente trabajo.

A mis hermanos, quienes nunca dudaron de mí y siempre me apoyaron a pesar de la distancia.

AGRADECIMIENTOS

El autor de este trabajo de tesis, Mario Eduardo Soto Angles, agradece el apoyo del Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad (Innovate Perú) entidad que financió el proyecto 207-FINCyT-IA-2013, en el marco del cual se desarrolló la presente tesis: “Diseño de un sistema de detección y diagnóstico de fallas basado en modelo para una planta desalinizadora de agua de mar”.

Contenido

INTRODUCCIÓN	1
Generalidades.....	1
Hipótesis de la presente tesis	2
Objetivos de la presente tesis.....	2
Objetivo General.....	2
Objetivos Específicos.....	2
CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE DE LAS PLANTAS DESALINIZADORAS POR ÓSMOSIS INVERSA Y LOS SISTEMAS DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS.	3
1.1. Introducción	3
1.2. Estado del arte de los modelos de plantas desalinizadoras por ósmosis inversa obtenidos por identificación.....	3
1.3. Estado del arte del modelamiento matemático de membranas de ósmosis inversa.	5
1.4. Estado del arte de los sistemas de diagnóstico de fallas	7
1.4.1. Diagnóstico de fallas basado en redundancia física	7
1.4.2. Detección y diagnóstico de fallas basado en redundancia analítica.....	7
1.4.3. Diagnóstico de fallas basado en grafos causales.....	7
1.4.4. Detección de fallas basada en estimación de parámetros.....	8
1.4.5. Detección de fallas basado en observadores	8
1.4.6. Diagnóstico de fallas basado en inteligencia artificial	8
1.5. Estado del arte del diagnóstico de fallas en plantas desalinizadoras.....	8
CAPÍTULO 2. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DINÁMICO DE LA UNIDAD DE DESALINIZACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA.....	11
2.1. Descripción de la planta de desalinización por ósmosis inversa objeto de estudio. ...	11
2.1.1. Ósmosis.....	11
2.1.2. Ósmosis inversa	11
2.1.3. Módulo de ósmosis inversa en configuración enrollamiento en espiral	12
2.1.4. Etapas del proceso de ósmosis inversa.....	13
2.2. Modelamiento matemático de la membrana de ósmosis inversa.	14
2.2.1. Consideraciones de diseño	14
2.2.2. Subsistema 1. Rechazo-membrana.....	18
2.2.2. Subsistema 2. Permeado	20
2.2.3. Subsistema membrana.....	21
2.2.4. Rechazo y polarización de la concentración	25
2.2.5. Influencia del pH en la conductividad	28
2.3. Implementación del modelo obtenido	30
2.4. Validación del modelo obtenido	30
2.4.1. Cambios en la presión de alimentación.....	30

2.4.2. Cambios en el pH de alimentación.....	32
2.4.3. Cambios en la concentración de alimentación	32
2.4.4. Cambios en la temperatura de la solución.....	33
2.5. Resultados de simulación.....	34
2.5.1. Concentración del permeado.....	34
2.5.2. Concentración del rechazo.	34
2.5.3. Concentración en la capa límite 1.	35
2.5.4. Concentración en la capa límite 2.	35
2.5.5. Flujo de permeado.....	36
2.5.6. Flujo de rechazo.	37
2.5.7. Adición de ruido en las variables sensadas	37
2.6. Diseño de lazos de control PID	39
Parámetros del controlador de flujo	40
Parámetros del controlador de concentración	41
CAPÍTULO 3. DISEÑO DE UN SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS BASADO EN MODELOS DE UNA PLANTA DESALINIZADORA POR ÓSMOSIS INVERSA	42
3.1. Introducción	42
3.2. Fallas.....	43
3.2.1. Definición	43
3.2.2. Tipos de Fallas	43
3.3. Modelo estructural	43
3.4. Variables conocidas y desconocidas	43
3.5. Restricciones	43
3.6. Conjunto de Fallas	44
3.7. Conjunto de Restricciones de la planta desalinizadora	44
3.8. Matriz de fallas	45
3.9. Matriz de incidencia.....	46
3.10. Emparejamiento (Matching)	46
3.11. Rango de restricciones	46
3.12. Relaciones de redundancia analítica	48
3.13. Algoritmo de Ranking.....	48
3.14. Cálculo de relaciones de redundancia analítica del modelo estructural del módulo de ósmosis inversa.	50
3.14.1. Relación de redundancia analítica 1.....	50
3.14.2. Relación de redundancia analítica 2.....	51
3.14.3. Relación de redundancia analítica 3.....	51
3.14.4. Relación de redundancia analítica 4.....	52
3.14.5. Relación de redundancia analítica 5.....	54

3.14.6. Relación de redundancia analítica 6.....	54
3.14.7. Relación de redundancia analítica 7.....	54
3.14.8. Relación de redundancia analítica 8.....	55
3.14.9. Relación de redundancia analítica 9.....	55
3.14.10. Relación de redundancia analítica 10.....	55
3.14.11. Señal de error 1	55
3.14.12. Señal de error 2	55
3.15. Análisis de detectabilidad	55
3.15.1. Sistema en modo normal de funcionamiento	55
3.15.2. Falla en el sensor de concentración.....	57
3.15.3. Falla en el sensor de flujo.	57
3.15.4. Falla actuador de presión de alimentación.	58
3.15.5. Falla en el sensor de temperatura.	59
3.15.6. Falla por desgaste de la membrana	60
3.15.7. Falla por rotura de la membrana.	61
3.15.8. Falla en el factor de rechazo de la membrana.	62
3.15.9. Falla en bomba de pH	63
3.16. Análisis de resultados de detectabilidad	64
3.17. Análisis de aislabilidad	65
3.17.1. Aislabilidad de falla en el factor de rechazo	66
3.17.2. Aislabilidad de falla en el sensor de temperatura.....	66
3.17.3. Aislabilidad de falla en el sensor de flujo	66
3.17.4. Aislabilidad de falla por desgaste de la membrana	66
3.17.5. Aislabilidad de falla por rotura de membrana.....	66
3.17.6. Aislabilidad de falla en el actuador de presión	66
3.17.7. Aislabilidad de falla en sensor de concentración	66
3.17.8. Aislabilidad de falla en el actuador de pH	66
3.18. Análisis de aislabilidad por el método de cálculo de MTES	67
3.18.1. Introducción	67
3.18.2. Algoritmo de cálculo de MTES	68
3.18.2. Pruebas de aislabilidad.....	70
CAPÍTULO 4: PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN.....	73
4.1. Introducción	73
4.2. Diagrama de Flujo.....	73
4.3. Implementación en RSlogix5000.....	74
4.3.1 Texto estructurado.....	74
4.3.2 Implementación de Trends.....	76

4.4. Interfaz con Factorytalk View.....	78
4.4.1. Resultados de simulación de fallas	79
CONCLUSIONES	81
RECOMENDACIONES.....	82
BIBLIOGRAFÍA	83
ANEXOS	88
ANEXO 1: CÓDIGO DEL PROGRAMA EN MATLAB	88

INTRODUCCIÓN

Generalidades

La calidad de vida promedio en nuestro planeta está aumentando gracias a los avances científicos y al desarrollo tecnológico, se necesita garantizar la sostenibilidad de estos logros para futuras generaciones mediante acciones que conduzcan al uso óptimo de un recurso tan importante como el agua, ya que es la base de la existencia de toda clase de vida en el planeta.

La escasez de agua dulce constituye uno de los principales desafíos al que se están enfrentando numerosas sociedades del mundo en la actualidad. Debido al fuerte crecimiento demográfico en el siglo XXI, la demanda de agua potable se ha incrementado de forma sustancial, esto sumado al hecho de que la producción a escala industrial también se ha incrementado en el presente siglo, las grandes industrias por lo general requieren una gran cantidad de agua potable o con un grado específico de salinidad para llevar a cabo sus procesos de producción (Cotruvo, 2010).

El agua salada y salobre que se encuentra en los océanos, mares y aguas subterráneas saladas representa alrededor del 97.5 % del total de agua en el planeta tierra. Ante esta situación es importante enfocarse en los métodos para obtener agua desalinizada y potable a partir de agua de mar. La obtención de este recurso mediante desalinización por ósmosis inversa es una alternativa energética económicamente viable y la instalación de plantas desalinizadoras por ósmosis inversa se muestra como una de las principales soluciones a este problema (El-Dessouky, 2002).

Como todo proceso industrial, los sistemas de control de plantas desalinizadoras de agua de mar son susceptibles a fallas, las que pueden dar origen a un mal funcionamiento del sistema (Gambier, 2009). La presencia de una o varias fallas reduce considerablemente el desempeño del proceso que a su vez puede ocasionar pérdidas económicas por la obtención de productos con bajos niveles de calidad. Así también puede poner en peligro la integridad de los operadores de la planta e incluso provocar problemas con el medio ambiente. Es por eso que actualmente el diagnóstico de fallas es de suma importancia en los procesos de producción (McFall, 2007).

Actualmente existen diversos métodos para la detección y diagnóstico de fallas con diferentes características y campos de aplicación. Dentro de éstos se encuentran los métodos basados en identificación, en los cuales las fallas se reflejan en cambios de ciertos parámetros del modelo; los métodos basados en conocimiento, que utilizan técnicas de inteligencia artificial (Isermann, 2005). Una de las corrientes más importantes es la referida a los métodos basados en modelos, que contemplan el conocimiento del modelo analítico del proceso, permitiendo el cálculo de residuos en función de las restricciones de cada componente del sistema (Blanke, 2006).

Esta tesis se enfoca en el desarrollo de un sistema de detección de fallas basado en el modelo analítico de una planta desalinizadora de agua de mar por ósmosis inversa, ya que es posible detectar y diagnosticar fallas más específicas, tanto en los sensores, actuadores y componentes más relevantes de este proceso.

Hipótesis de la presente tesis

El conocimiento profundo del modelo matemático de una planta desalinizadora permite diseñar un sistema de diagnóstico y detección de fallas en sensores, actuadores y en parámetros internos de la membrana de ósmosis inversa.

El desarrollo de un diagnosticador de fallas basado en un modelo de parámetros concentrados es suficiente para el diagnóstico y detección de fallas en elementos de interés de un sistema.

El diagnóstico de fallas aplicando las técnicas de redundancia analítica permite detectar y aislar distintas fallas de un sistema y conocer con precisión la naturaleza de una determinada falla.

Objetivos de la presente tesis

Los objetivos de la presente tesis son de tipo general y de tipo específico, los cuales se presentan a continuación:

Objetivo General

- Diseñar y presentar una propuesta de implementación de un sistema de detección y diagnóstico de fallas para un prototipo de planta desalinizadora por ósmosis inversa usando el método de redundancia analítica.

Objetivos Específicos

- Estudiar del estado del arte de las plantas desalinizadoras y de los sistemas de diagnóstico de fallas.
- Obtener modelos basados en ecuaciones analíticas que describan adecuadamente el comportamiento del proceso objeto de estudio.
- A partir del modelo obtenido aplicar las técnicas de análisis estructural para obtener una representación estructural de la planta desalinizadora.
- Definir conjunto de fallas más relevantes que se presentan en una planta desalinizadora de agua de mar.
- Diseñar las relaciones de redundancia analítica para diagnosticar las fallas más relevantes que afectan el comportamiento nominal del sistema.
- Simular el sistema de detección de fallas basado en relaciones de redundancia analítica y en el conjunto de fallas definido.
- Realizar el análisis de aislabilidad de fallas para localizar una falla en un determinado elemento del sistema.
- Presentar una propuesta de implementación del sistema de diagnóstico de fallas en un equipo industrial para trabajo en tiempo real.

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE DE LAS PLANTAS DESALINIZADORAS POR ÓSMOSIS INVERSA Y LOS SISTEMAS DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS.

1.1. Introducción

En el presente capítulo se describe el estado del arte de los modelos de plantas desalinizadoras por ósmosis inversa (OI). Se presentan los modelos obtenidos mediante el método de identificación de parámetros y los modelos matemáticos obtenidos para un bastidor de ósmosis inversa. También se describe el estado del arte de los sistemas de diagnóstico de fallas y se presenta la literatura existente de los sistemas de diagnóstico de fallas en plantas desalinizadoras por ósmosis inversa.

1.2. Estado del arte de los modelos de plantas desalinizadoras por ósmosis inversa obtenidos por identificación

Los modelos obtenidos por identificación se obtienen aplicando una señal impulso o escalón como entrada y tomando datos en la salida, la gráfica de la respuesta que se obtiene a partir de los datos nos da información del comportamiento dinámico de la planta. Este modelo también es llamado modelo de caja negra en el cual se desarrollan funciones de transferencia que relacionan las entradas y las salidas.

Alatqi obtuvo el modelo de una planta piloto de desalinización por ósmosis inversa en Kuwait (Alatqi et al., 1989). El modelo fue obtenido mediante la identificación de la dinámica que gobierna el proceso de desalinización por ósmosis inversa. Debido a que este proceso posee varias variables que dependen entre sí, fue necesaria la identificación con un enfoque multivariable. Su modelo consideró como variables manipuladas la presión y el pH del agua de alimentación; la presión es manejada mediante el estrangulamiento de la válvula en la línea de rechazo y el pH se varía mediante la adición de ácido o base al agua de alimentación. Se consideró como variables a controlar el flujo de permeado y la conductividad del permeado, la cantidad de agua desalinizada que se desea obtener está relacionada con el flujo y la calidad de agua desalinizada depende de la conductividad del permeado (a menor conductividad mejor calidad del agua).

Como resultado Alatqi obtuvo un sistema que se aproximó a funciones de transferencia de segundo orden, la representación de dicho sistema que es como se muestra a continuación

$$\begin{bmatrix} F \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{P11} & G_{P12} \\ G_{P21} & G_{P22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ pH \end{bmatrix},$$

donde F es el flujo de permeado, C es la conductividad del permeado, P es la presión aplicada al agua de alimentación, y pH es el pH del agua de alimentación. Las ecuaciones obtenidas en el dominio de Laplace fueron las siguientes:

$$\frac{F}{P} = G_{P11} = \frac{0.002(0.56s + 1)}{(0.003s^2 + 1s + 1)}$$
$$\frac{F}{pH} = G_{P12} = \text{cero}$$

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

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

El rango lineal de variación de las variables y las unidades consideradas en el modelo de Alatiqi se muestran en la Tabla 1.1

Tabla 1.1 Rango de variación de las variables del modelo de Alatiqi.

Variable	Rango lineal
Flujo, gpm	0.85-1.25
Presión, psi	800-1000
Conductividad, $\mu\text{S}/\text{cm}$	400-450
pH	6-7

Riverol y Pilipovik (Riverol and Pilipovik, 2005) aplicaron el método de identificación de sistemas para la obtención de modelos y llegaron a obtener un modelo similar al de Alatiqi. En el trabajo de Riverol se desarrolla además una técnica para obtener un modelo con desacoplo perfecto, es decir, que el control de flujo de permeado sólo dependa de la manipulación de la presión del agua de alimentación y el control de la conductividad del permeado sólo dependa de la manipulación del pH del agua de alimentación; de esta manera Riverol diseñó bucles de control independientes para cada variable.

Assef (Assef et al, 1997) utilizó la misma técnica de identificación de parámetros que planteaba Alatiqi para modelar una planta de ósmosis inversa, pero esta vez considerando como variables manipuladas el flujo de salmuera (agua de rechazo) y el flujo del ácido (ácido para la modificación del pH del agua de alimentación) y como variables controladas el flujo, la conductividad del permeado y la presión que atraviesa la membrana de ósmosis inversa; obteniendo también un modelo representado por funciones de transferencia de segundo orden.

Los modelos presentados en los trabajos de Alatiqi, Riverol y Asseff están basados en la herramienta de modelamiento denominada identificación, la desventaja de este tipo de modelos es que la información sirve únicamente para una planta en particular trabajando en un punto de operación específico. Los modelos han sido forzados a una respuesta de una determinada forma, por ejemplo la forma general de una función de transferencia de segundo orden como se muestra a continuación:

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

En respuesta a estas limitaciones, Gambier hizo hincapié en el hecho que si bien en la literatura encontramos modelos generados mediante identificación de parámetros, no hay información acerca de modelos dinámicos de parámetros concentrados (dinámica temporal) o parámetros distribuidos (dinámica espacial) obtenidos a partir de la aplicación de leyes físicas y químicas en una planta desalinizadora (Gambier et al., 2007).

De esta sección se concluye que es necesario estudiar los distintos modelos matemáticos existentes en la literatura para tener un mayor conocimiento de la dinámica y de la estructura interna de un bastidor de ósmosis inversa. La importancia de tener información acerca de estos modelos es la de implementar sistemas tolerantes a fallas y conocer más acerca de las respuestas transitorias y estables del sistema.

1.3. Estado del arte del modelamiento matemático de membranas de ósmosis inversa.

Los modelos matemáticos son aquellos que se obtienen mediante el estudio de leyes físicas y químicas que describen a un determinado proceso o planta. El modelo presentado por Al-haj (Al-haj et al., 2008) es un modelo matemático sencillo utilizado para controlar la calidad del agua desalinizada mediante ósmosis inversa. En este trabajo se obtuvo un modelo teórico, donde la membrana es descrita por dos ecuaciones diferenciales ordinarias utilizando para ello las leyes físicas de conservación, esto es, la aplicación de balances de materia en los subsistemas que conforman la membrana de ósmosis inversa.

El modelo considera las siguientes suposiciones:

- La solución contiene únicamente 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.

Las ecuaciones diferenciales del modelo de Al-haj 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 (concentración de sales del agua de rechazo) así como la presión a la que se encuentra. Finalmente, se halla el flujo de salmuera (flujo del agua de rechazo) 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 (bares), concentración de la solución de 2000 ppm (partes por millón) y velocidad de entrada de 6.8 m/s. El recipiente (vessel) que alberga la membrana utilizada tiene un diámetro de 12.5 cm y longitud de 60 cm.

Se aplica una entrada escalón de 0.5 a 0.55 m^3/s al modelo de Al-haj, es decir, se incrementa el flujo del agua 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 el agua alimentación solo fue agua levemente salada (también llamada agua salobre). Además en condiciones reales existe un

efecto de ensuciamiento de la membrana que influye en la linealidad del modelo, el cual no fue considerado en el modelo de Al-haj.

C. McFall, Bartman y Christofides desarrollaron una estructura de control no lineal basada en modelos feedback/feed-forward de un sistema de desalinización de alta recuperación por ósmosis 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 feed-forward.

El modelo de McFall está basado en los principios básicos de conservación, tales como, el 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.
- La presión osmótica puede relacionarse con los TDS (Sólidos Disueltos Totales) 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.

Teóricamente, el modelo de McFall puede ser mejorado considerando la variación de la presión en la dirección del flujo de alimentación dentro del bastidor de ósmosis inversa, es decir, desarrollar un modelo de parámetros distribuidos que describa la dinámica espacial de la presión en el interior del bastidor. Es posible usar también ecuaciones diferenciales parciales para describir los cambios de velocidad y concentración del fluido en cualquier punto en el espacio en el interior del bastidor, asimismo tomar en cuenta el gradiente de concentración en la dirección radial y axial dentro de la membrana y finalmente incluirlo en el modelo la dependencia de la presión osmótica con la temperatura. Sin embargo los modelos basados en la dinámica espacial de las variables de interés son más difíciles de obtener porque se requiere un conocimiento profundo del proceso y la comprensión de una mayor cantidad de parámetros que involucran el modelo.

También se han obtenido modelos matemáticos con fines más específicos, por ejemplo, el modelo desarrollado por Bartman (Bartman et al., 2009), que propuso un

algoritmo de control predictivo basado en un modelo matemático para controlar la inversión del flujo en un sistema de desalinización por ósmosis inversa. El sistema de inversión de flujo permite alargar la vida útil de las membranas en configuración enrollamiento en espiral ya que previene la formación de cristales en la superficie de la membrana.

Se llega a la conclusión que en la literatura hace falta modelos más completos que describan adecuadamente el comportamiento dinámico de las principales variables que intervienen en el proceso de desalinización por ósmosis inversa. También se requieren simuladores de modelos dinámicos para plantas desalinizadoras así como herramientas que permitan el control de las variables de dichos modelos utilizando diferentes estrategias de control.

1.4. Estado del arte de los sistemas de diagnóstico de fallas

Desde los años 70, el problema de la detección y aislamiento de fallas (Fault Detection and Isolation-FDI) en procesos dinámicos, ha recibido una gran atención y una gran variedad de metodologías han sido estudiadas y desarrolladas. Las principales técnicas se presentan a continuación:

1.4.1. Diagnóstico de fallas basado en redundancia física

Este método consiste en el uso de componentes repetidos para realizar una misma tarea, en este caso el sistema está equipado con dispositivos de redundancia física, como actuadores y sensores, si una falla ocurre, el dispositivo redundante reemplaza la funcionalidad de aquél que se encuentra en falla. La desventaja de este método es que implica elevados gastos de implementación y mantenimiento. (Isermann, 2005).

1.4.2. Detección y diagnóstico de fallas basado en redundancia analítica

Se inicia en los años 70 como una aplicación de la teoría de observadores utilizados en el área de control. Esta técnica se basa principalmente en la obtención de relaciones de redundancia a partir del análisis estructural basado en el modelo matemático de la planta, las fallas se detectan a partir de la falta de coherencia entre el modelo y los datos experimentales. Este enfoque tiene algunas ventajas respecto a la redundancia física, principalmente en aspectos económicos y prácticos, la redundancia analítica no requiere equipamiento adicional, pero se requiere un conocimiento preciso del modelo del sistema real, así como de señales de entrada y salida del sistema. (Blanke, 2006).

1.4.3. Diagnóstico de fallas basado en grafos causales

Es una técnica utilizada para determinar la dependencia entre componentes. Una estructura causal es una descripción abstracta de la influencia que tiene una variable sobre otra. El comportamiento de un dispositivo puede parcialmente describirse mediante un grafo causal, que representa la relación funcional entre las variables. Un grafo causal permite determinar las relaciones causa-efecto entre las variables. De forma similar al caso anterior requiere un conocimiento detallado del modelo del sistema real (Isermann, 2005).

1.4.4. Detección de fallas basada en estimación de parámetros

A veces no se tienen determinados en su totalidad los parámetros de un proceso, es entonces, cuando a través de métodos de estimación, estos parámetros pueden ser obtenidos, las señales de entrada y salida nos pueden servir para este propósito, si se conoce la estructura básica del modelo. Si una falla dentro del proceso cambia uno o varios parámetros, la señal de salida cambia con las pequeñas desviaciones y hay un estimador de parámetros que indica un cambio. Estos cambios en los coeficientes del proceso en muchos casos están directamente relacionados con las fallas. De aquí que, el conocimiento de estos cambios facilita el diagnóstico de fallas. (Isermann, 2005).

1.4.5. Detección de fallas basado en observadores

Una diferencia entre el método de estimación basado en observadores y el método basado en la estimación de parámetros (ecuaciones de error) es que este último puede hacer la estimación de parámetros en línea, es decir, durante el funcionamiento de la planta en tiempo real. La teoría existente para estimación paramétrica se puede aplicar directamente al diagnóstico de fallas sin mayores modificaciones. Los observadores para diagnóstico son diferentes a los observadores para control que son bien conocidos en la literatura. Los observadores de diagnóstico de fallos son primeramente observadores de salida, más que observadores de espacio de estados, como se requiere para propósitos de control (Isermann, 2011).

Tanto en los métodos de estimación paramétrica como los basados en observadores, existirá siempre el riesgo de contaminación de la falla por el control en bucle cerrado (Isermann, 2005). El esfuerzo de control en bucle cerrado procura mantener las variables de salida en ciertos límites. Este esfuerzo de control, cuando la falla es incipiente, lo suele ocultar y sólo es detectable cuando el controlador no puede evitar que los residuos crezcan.

1.4.6. Diagnóstico de fallas basado en inteligencia artificial

Se compara el comportamiento actual del sistema con el que se considera normal, que es obtenido a través de un sistema experto o cualquier técnica de inteligencia artificial. Estos métodos se utilizan frecuentemente cuando la información disponible sobre el sistema se encuentra principalmente a partir de la experiencia y no se cuenta con modelos matemáticos precisos (Isermann, 2005).

1.5. Estado del arte del diagnóstico de fallas en plantas desalinizadoras

Gambier y colaboradores (Gambier et al, 2009), presentan el trabajo realizado en una planta desalinizadora por ósmosis inversa de laboratorio. Su trabajo describe la planta, el modelo matemático del sistema y un banco de pruebas realizado con la planta operando en tiempo real. Para la obtención del modelo matemático, Gambier consideró el balance de materia y energía teniendo en cuenta las principales variables que afectan el proceso, tales como flujos, concentraciones, presiones y temperatura; asimismo para la obtención del modelo consideró oportuno la separación de la unidad de OI en subsistema de rechazo o retenido y subsistema de permeado, dichas variables y subsistemas se muestran en la Figura 1.1.

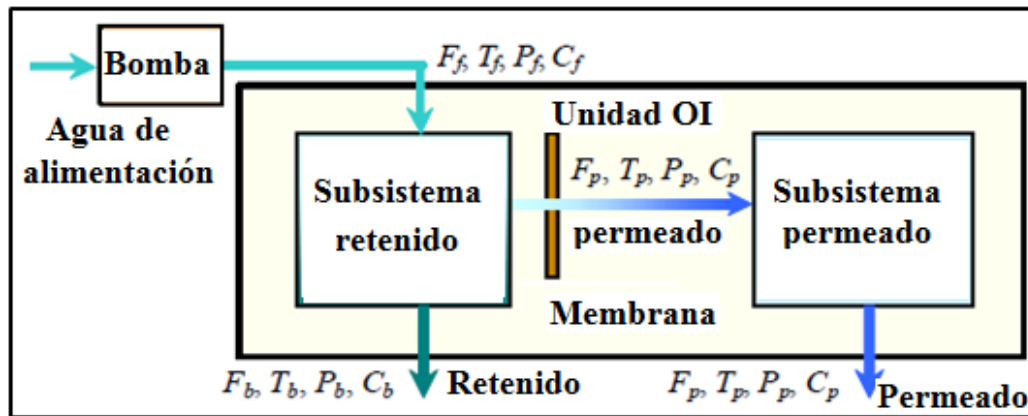


Figura 1.1. Variables y subsistemas considerados por Gambier et al.

Gambier desarrolla además un sistema de control tolerante a fallas basado en el modelo matemático obtenido. Asimismo presentan el conjunto de fallas más comunes que pueden ocurrir durante la operación de una planta desalinizadora por ósmosis inversa. Las fallas estudiadas en el sistema de ósmosis inversa del trabajo de Gambier se muestran en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Fallas del sistema de ósmosis inversa presentado por Gambier (Gambier et al, 2009)

Componente de Sistema	Fallas
Unidad de ósmosis inversa	Fuga Bloqueo de tubería Aire en el sistema Ensuciamiento de la membrana
Bomba	Reducción de la presión de bomba Malfuncionamiento transitorio de la bomba
Actuadores	Perturbación de la señal de control Reducción del rango de la válvula Reducción de la velocidad de la válvula Rotura de la válvula
Sensores	Rotura del sensor Perturbación en la medición

Por otro lado Mcfall et al (McFall, 2007) realiza el estudio de un control tolerante a fallas de una planta desalinizadora por ósmosis inversa. Dentro del conjunto de fallas que considera McFall están incluidas las fallas en válvulas, falla por ensuciamiento de membrana, pérdida de datos de sensores y falla en bomba de alta presión.

McFall presenta 4 pasos para la implementación de sistemas de detección y aislamiento de fallas y sistemas de control tolerantes a fallas en plantas desalinizadoras por ósmosis inversa.

- El primer paso es definir modos de operación de la planta, es decir, cuando la planta se encuentra en modo normal de funcionamiento y cuando entra en falla; con el

objetivo de diseñar controladores feedback para cada modo de operación de la planta.

- El segundo paso es caracterizar explícitamente la región de estabilidad asociada con cada modo de operación.
- El tercer paso es diseñar filtros de detección y aislamiento de fallas (FDI) para cada modo de operación.
- El cuarto paso es el diseño de una ley de conmutación que conduzca a la reconfiguración del sistema de control de forma que garantice la estabilidad en lazo cerrado en caso de ocurrencia de fallas.

Para el desarrollo de la técnica FTC (Fault Tolerant Control) en el modelo de McFall, se sugiere la instalación de variables manipuladas redundantes, que 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 (línea de retorno) 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), que 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 es diferente 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 su modelo teórico necesita ser validado evaluando su desempeño en un sistema real.

CAPÍTULO 2. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DINÁMICO DE LA UNIDAD DE DESALINIZACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA

2.1. Descripción de la planta de desalinización por ósmosis inversa objeto de estudio.

2.1.1. Ósmosis

La ósmosis es un proceso natural de flujo a través de una membrana semipermeable. Si se tiene agua pura presente en ambos lados de una membrana semipermeable y la presión en ambos lados es también la misma, el agua no fluye a través de la membrana. Sin embargo, cuando hay sal disuelta en uno de los lados, ocurrirá un flujo a través de la membrana, este flujo ocurre del lado del agua pura hacia el lado que contiene sales disueltas (Figura 2.1a). La naturaleza trata de igualar las diferencias de concentración de sales en ambos lados de la membrana, este proceso se denomina ósmosis directa u ósmosis natural (Figura 2.1b).

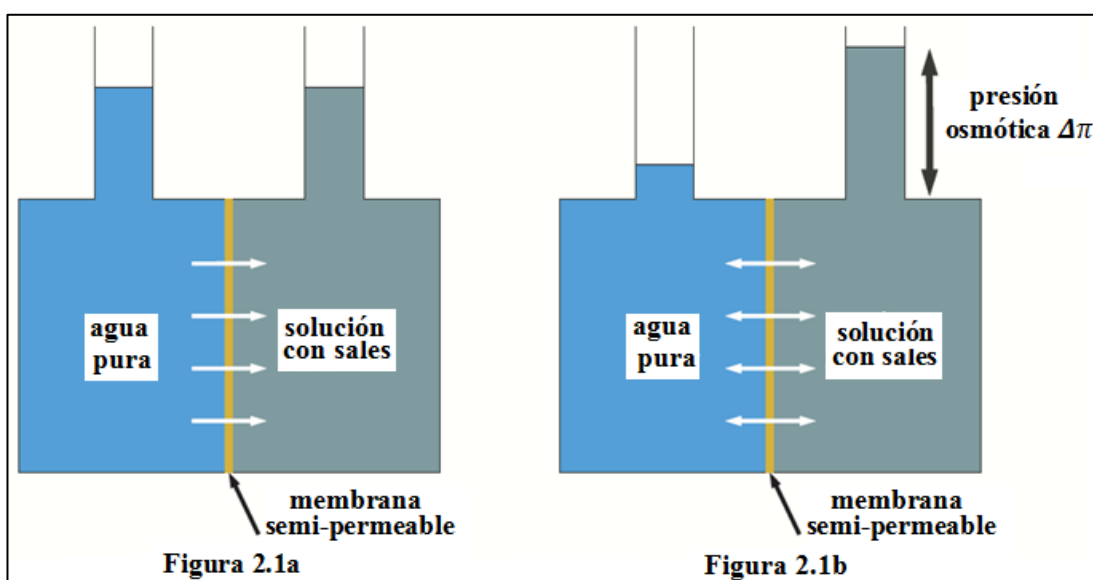


Figura 2.1. Principio de ósmosis

2.1.2. Ósmosis inversa

La ósmosis inversa (OI) es una técnica para extraer sólidos disueltos en agua utilizando una membrana semipermeable. La aplicación más común de la ósmosis inversa es la separación de sal del agua para obtener agua potable. La membrana semipermeable de ósmosis inversa posee una permeabilidad alta respecto del agua y muy baja para las sales. A diferencia de las otras técnicas, este proceso no involucra ningún cambio de fase.

La fuerza que ocasiona la ósmosis inversa es la presión aplicada menos la presión osmótica, es decir, para lograr la separación de sales la fuerza aplicada tiene que superar la presión osmótica natural mostrada en la Figura 2.1b.

Cuando se aplica presión en el lado donde se han añadido sales, se desarrollará un nuevo equilibrio. La presión aplicada traerá como resultado el flujo de agua a través de la

membrana, pero las sales no fluyen a través de dicha membrana, produciendo de esta manera la separación de sales mediante el fenómeno llamado ósmosis inversa (Figura 2.2).

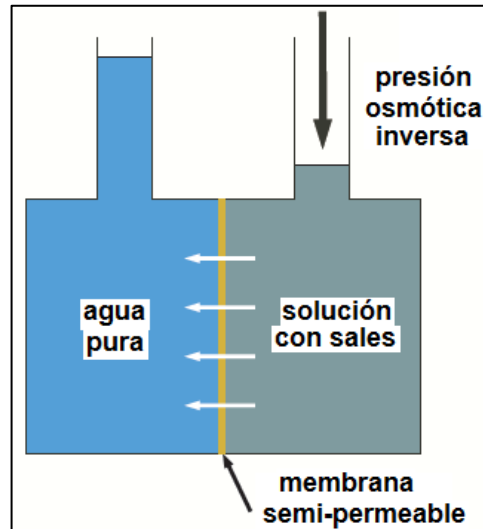


Figura 2.2. Principio de ósmosis inversa

2.1.3. Módulo de ósmosis inversa en configuración enrollamiento en espiral

El módulo de ósmosis inversa en configuración enrollamiento en espiral ocupa el mercado más grande debido a su relativa facilidad de limpieza, tecnología de fabricación y un área de superficie muy grande por unidad de volumen.

Un elemento de membrana es un conjunto de láminas de membrana enrolladas alrededor de una tubería central por donde se obtiene el agua producto, también llamada agua permeada o desalinizada (Figura 2.3).

El elemento de membrana cuenta además con espaciadores, que son capas de soporte entre las láminas de la membrana, el agua es distribuida sobre un elemento de membrana a través de los espaciadores (Figura 2.3).

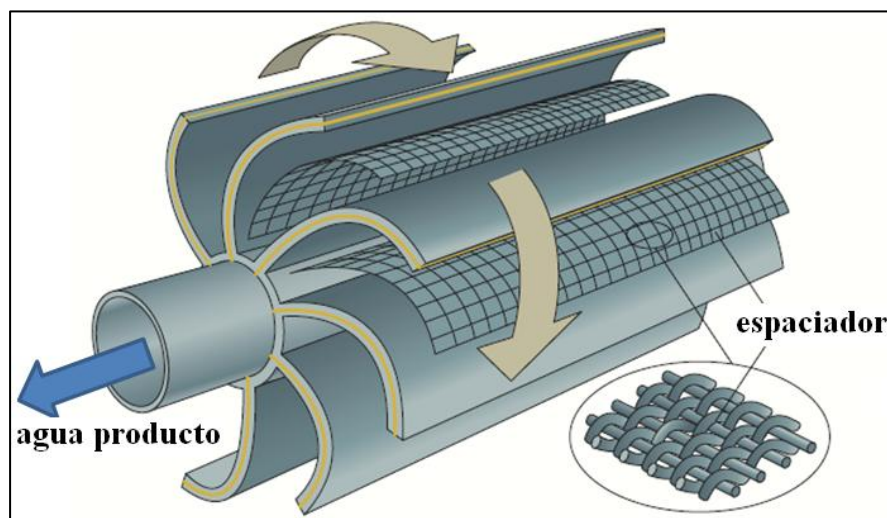


Figura 2.3. Principio de membranas en enrollamiento en espiral

La longitud de un elemento de membrana es normalmente de 1 metro, al salir del primer elemento de membrana, el agua fluye hacia a un segundo elemento y luego hacia un

tercero, etc. Para soportar las altas presiones de operación, se usa un recipiente (módulo), cada módulo está conformado por un conjunto de elementos de membrana, la cantidad de elementos de membrana depende del fabricante. Típicamente un módulo de ósmosis inversa consta de entre 4 y 6 elementos de membrana. El conjunto de módulos conforman un bastidor de ósmosis inversa (Figura 2.4).



Figura 2.4. Bastidor de ósmosis inversa

2.1.4. Etapas del proceso de ósmosis inversa

En una planta desalinizadora por ósmosis inversa primero se lleva a cabo la etapa de pre tratamiento para acondicionar el agua hasta las especificaciones recomendadas por los fabricantes de membranas. En la etapa de pre tratamiento el flujo del agua se lleva a cabo con bombas de baja presión (BP). Esta etapa incluye desinfección con cloro para controlar el crecimiento bacteriológico, filtración multimedia para reducir la cantidad de sólidos totales suspendidos, filtración con cartuchos para proteger las membranas de ósmosis inversa y la declorinación con bisulfito de sodio (Figura 2.5).

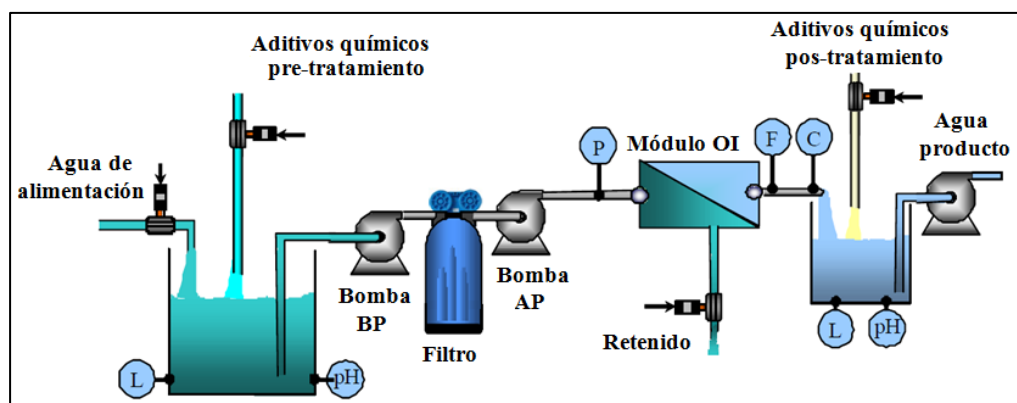


Figura 2.5. Etapas del proceso de ósmosis inversa

Luego se bombea el agua hasta una presión mayor que la presión osmótica impuesta por la concentración de sales y se conduce a los módulos de ósmosis inversa para que se lleve a cabo la desalinización del agua, esto se realiza con una bomba de alta presión (AP).

Posteriormente el agua producto ingresa a una etapa de pos-tratamiento para obtener agua tratada con una calidad determinada. En el proceso se controlan variables como nivel en el tanque alimentación (L), pH del agua de alimentación y del agua producto, presión de la bomba AP, flujo (F) y conductividad (C) del agua producto, nivel en el tanque producto (L) entre otras (Figura 2.5).

En la Figura 2.6 se muestra el diagrama de flujo simplificado de una planta de desalinización por ósmosis inversa.

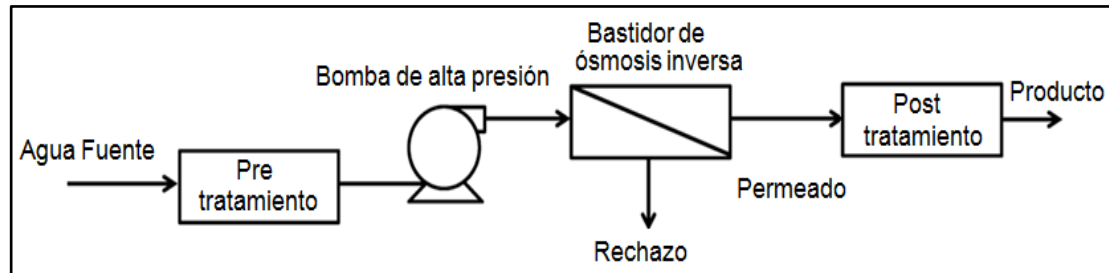


Figura 2.6. Diagrama de flujo de una planta de desalinización por ósmosis inversa

2.2. Modelamiento matemático de la membrana de ósmosis inversa.

2.2.1. Consideraciones de diseño

Una de las ventajas del proceso de desalinización por OI es que no hay cambio de fase, es decir el proceso se desarrolla a temperatura ambiente. Para el presente modelamiento, además, se considera que las pérdidas de calor del sistema de OI con el ambiente son despreciables.

Un módulo de membrana rechaza normalmente el 98% de las sales del agua de alimentación, obteniéndose agua producto que contiene una concentración de sales entre 410-500 ppm (partes por millón) y que según la Organización Mundial de la Salud (OMS) dicha concentración se encuentra dentro del rango apto para consumo humano (menor o igual a 500 ppm). Sin embargo, el agua obtenida con un módulo no es suficientemente pura para ciertos usos industriales, tales como la fabricación de medicinas. Cuando se requiere agua de mejor calidad se debe implementar un segundo módulo de OI a continuación del módulo principal, el presente modelamiento considera solo un módulo de OI.

La concentración del agua de alimentación y tamaño de partícula son importantes porque una alta concentración requiere a una alta presión de alimentación y las partículas grandes tienden a bloquear los finos poros de la membrana y ensuciarlos. Típicamente la concentración de sales en agua de mar oscila entre 30000 y 42000 partes por millón y la concentración de agua salobre oscila entre 500 y 30000 partes por millón. Se debe tener en cuenta esta concentración ya que para desalinizar agua de mar es necesario presiones de entrada cercanas a 800 psi y para desalinizar agua salobre se requieren presiones de aproximadamente 300 psi.

Las ecuaciones analíticas en el presente modelamiento se obtendrán teniendo en cuenta los accesorios y direcciones de flujos que se muestran en el módulo de OI en enrollamiento en espiral de la Figura 2.7 (Johnson, 2009).

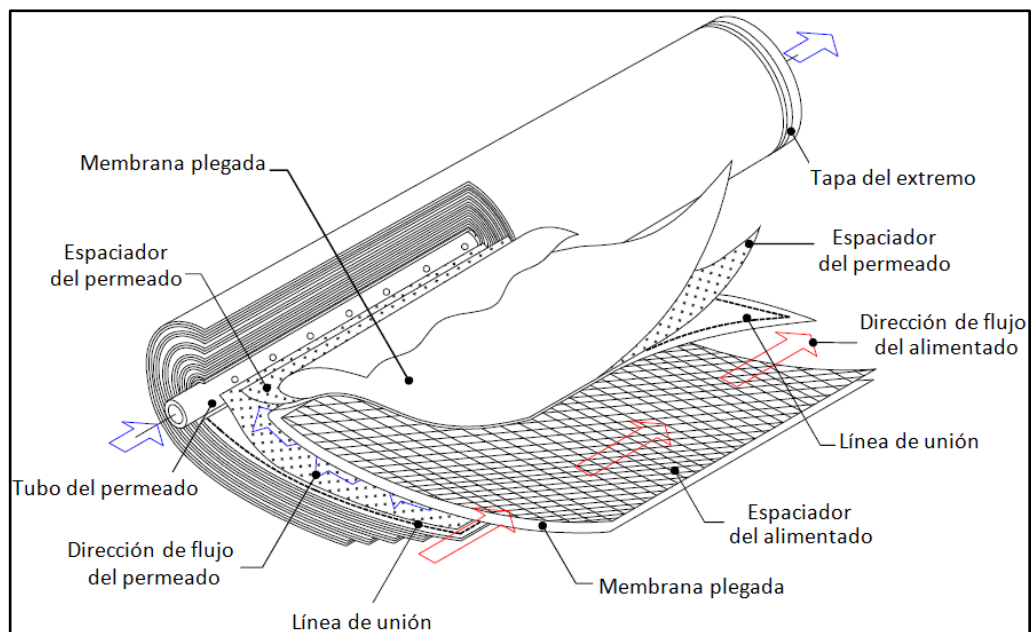


Figura 2.7. Módulo membrana de ósmosis inversa en espiral

En la Figura 2.8 se muestra un elemento de membrana de ósmosis inversa en configuración enrollamiento en espiral, en esta figura se observa con mayor claridad las direcciones de los flujos, tales como: Flujo de agua de alimentación (alimentado), flujo de agua permeada (permeado o producto), flujo del agua con alta concentración de sales (Concentrado, rechazo o salmuera). En dicha figura se aprecia además los accesorios que conforman un elemento de membrana, que son: Membranas de ósmosis inversa, espaciador del alimentado, espaciador del permeado y tubería central.

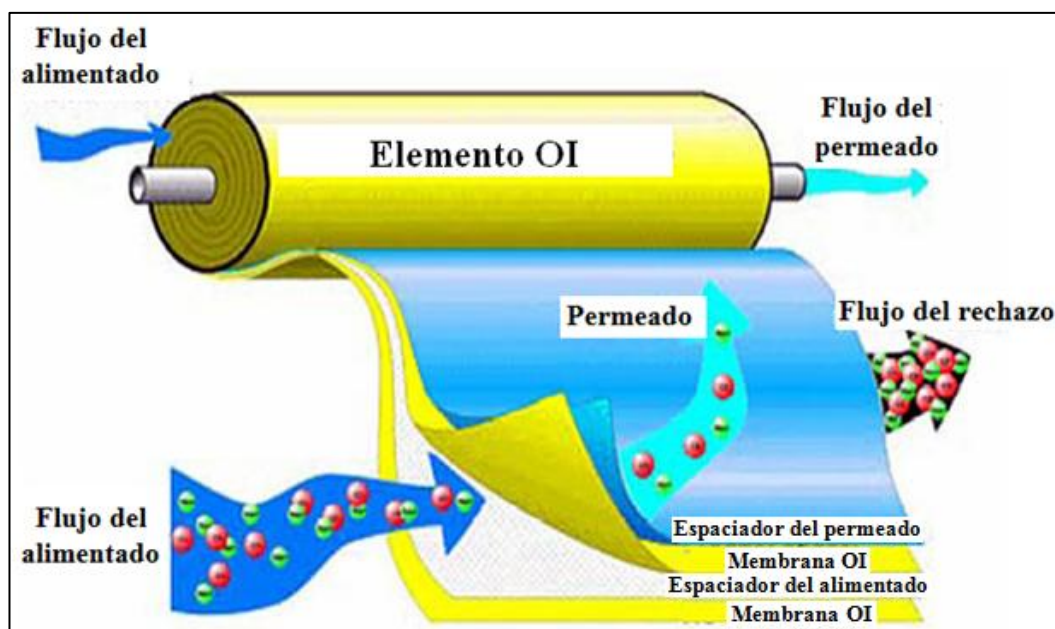


Figura 2.8. Elemento de membrana de ósmosis inversa

Un elemento de membrana en configuración enrollamiento en espiral forma un cuerpo cilíndrico, el cual, típicamente tiene un diámetro de 0.2 metros y una longitud de 1 metro (Dessouky, 2002). Con estos datos calculamos el volumen ocupado por un elemento de membrana.

$$V_{elemento} = \frac{\pi(0.2)^2}{4}(1) = 0.0315m^3$$

En un elemento de membrana el área transversal de la membrana por el que atraviesa el fluido es de aproximadamente $40m^2$, además el área total de la membrana en el módulo es de $136.6m^2$, (Dessouky, 2002). Utilizando esta relación podemos calcular el volumen total del bastidor de la siguiente manera.

$$V_{bastidor} = \frac{136.6m^2}{40m^2}(0.0315m^3) = 0.108m^3$$

El volumen total ocupado por los accesorios (membrana, espaciadores y la tubería central) es de aproximadamente el 20% del volumen total del bastidor.

$$V_{accesorios} = 0.2(0.108m^3) = 0.0216m^3$$

Se define el término fracción hueca o holdup de rechazo o permeado como la cantidad de espacio (volumétrico o másico) que hay en el elemento de membrana para el fluido rechazo o permeado respectivamente, sin tomar en cuenta el espacio ocupado por los accesorios. Por lo descrito anteriormente quedaría el 80% del volumen total para ser ocupado por los holdup de rechazo y permeado.

$$V_{holdup} = 0.8(0.108m^3) = 0.0864m^3$$

Típicamente el volumen ocupado por el fluido de rechazo es el 60% del V_{holdup} y el volumen ocupado por el permeado es el 40% del V_{holdup} , por tanto:

$$V_{rechazo} = 0.6(0.0864) = 0.05184m^3$$

$$V_{permeado} = 0.4(0.0864) = 0.03456m^3$$

Si queremos expresar estos volúmenes en términos de masa, utilizamos la relación existente entre densidad (ρ), masa (m) y volumen (V)

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Se sabe que la densidad del agua de mar es de aproximadamente $1027 kg/m^3$, a partir de esta información calculamos los holdup de rechazo y permeado en términos de masa.

$$m_{rechazo} = m_r = 1027(0.05184) = 53.24kg$$

$$m_{permeado} = m_p = 1027(0.03456) = 35.49kg$$

Los valores de holdup varían de una membrana a otra, dependiendo de la geometría de la membrana, pero la proporción se mantiene aproximadamente constante. Los holdup calculados serán usados más adelante en el balance de masa para la obtención del modelo matemático desarrollado en el presente capítulo.

Se desarrollará un modelo de parámetros concentrados, es decir, un modelo en el que las variables tengan dinámica temporal y será obtenido a partir de las leyes de conservación de materia.

Todas las unidades consideradas estarán en el sistema internacional para realizar una correcta comprobación de los balances realizados. Las 3 variables consideradas en los balances son flujo, presión y concentración. No se considera balance de energía ya que la temperatura permanece prácticamente constante en todos los subsistemas. En la Tabla 2.1 se muestra el significado de las variables mostradas en la Figura 2.9.

Tabla 2.1. Variables de los subsistemas de módulo OI

Símbolo	Parámetro	Unidad (SI)
F_f	Flujo del agua de alimentación	$\frac{kg}{s}$
P_f	Presión del agua de alimentación	Pa
C_f	Concentración del agua de alimentación	$\frac{kg}{m^3}$
F_r	Flujo del agua de rechazo	$\frac{kg}{s}$
P_r	Presión del agua de rechazo	Pa
C_r	Concentración del agua de rechazo	$\frac{kg}{m^3}$
F_{m1}	Flujo en la capa límite 1 de la membrana	$\frac{kg}{s}$
P_{m1}	Presión en la capa límite 1 de la membrana	Pa
C_{m1}	Concentración en la capa límite 1 de la membrana	$\frac{kg}{m^3}$
F_{m2}	Flujo en la capa límite 2 de la membrana	$\frac{kg}{s}$
P_{m2}	Presión en la capa límite 2 de la membrana	Pa
C_{m2}	Concentración en la capa límite 2 de la membrana	$\frac{kg}{m^3}$
F_p	Flujo del agua de permeado	$\frac{kg}{s}$
P_p	Presión del agua de permeado	Pa
C_p	Concentración del agua de permeado	$\frac{kg}{m^3}$

En la Figura 2.9 se muestra el diagrama de bloques de los subsistemas definidos para los balances realizados (Subsistema rechazo, subsistema membrana y subsistema permeado).

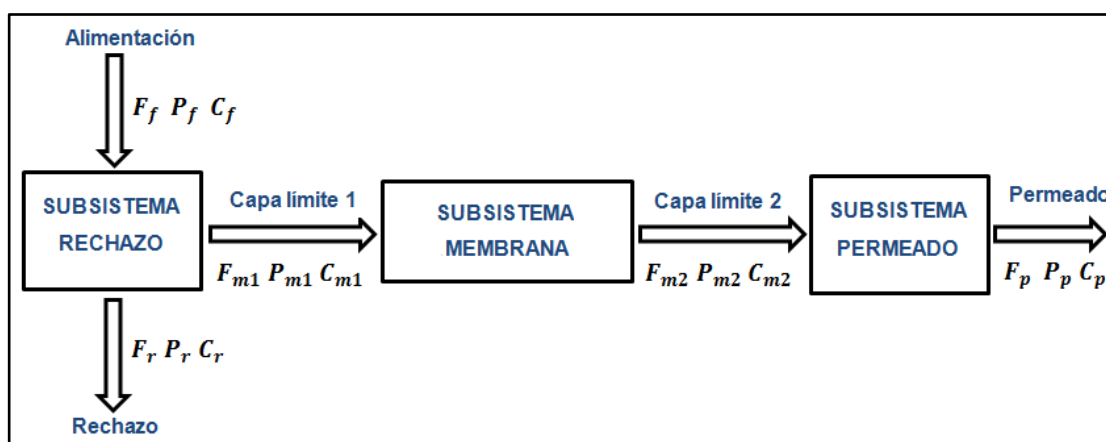


Figura 2.9. Diagrama de bloques de los subsistemas definidos para la membrana de ósmosis inversa

En la Figura 2.9 se muestra además dos capas límite alrededor de la membrana, en la capa límite 1 se produce la acumulación de sales mediante un fenómeno llamado polarización de la concentración propio de la ósmosis inversa, el cual será explicado más adelante. En la Figura 2.10 se aprecia mejor estas capas alrededor de la membrana, vemos que la acumulación de sales (Concentración de sales) en la capa límite 1 aumenta de forma exponencial desde la concentración de alimentado (C_f) hasta la concentración en el límite con la membrana (C_{m1}).

En el otro lado de la membrana se encuentra la capa límite 2, aquí no se produce acumulación de sales, es por esto que típicamente se considera que la concentración en la capa límite 2 (C_{m2}) es igual a la concentración del permeado (C_p).

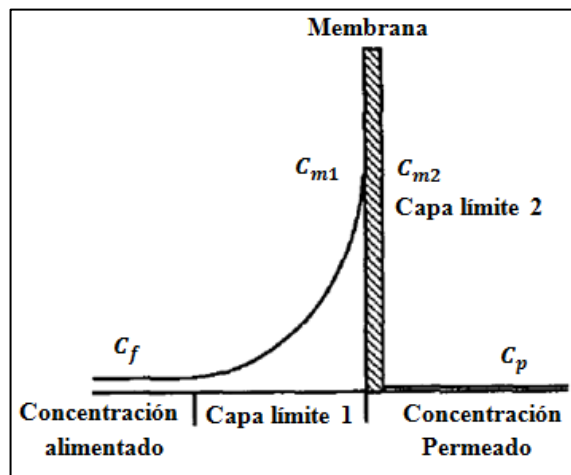


Figura 2.10. Capas límite de la membrana de OI

2.2.2. Subsistema 1. Rechazo-membrana

2.2.2.1. Balance global de materia para subsistema 1

En la Figura 2.11 se muestra el subsistema 1, sobre el cual se realizará el primer balance global de materia.

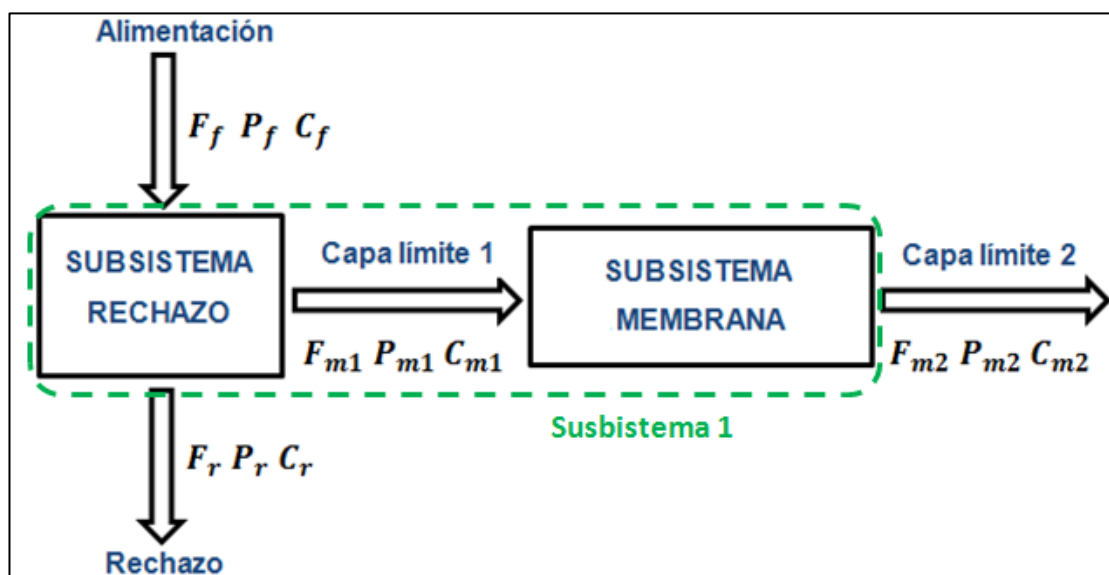


Figura 2.11. Subsistema 1

El balance global se refiere al balance realizado en toda la solución (soluto y solvente). Si tomamos en cuenta el subsistema 1, mostrado en la Figura 2.11 mediante líneas punteadas, vemos que el flujo que entra al subsistema 1 es F_f y los flujos que salen son F_{m2} y F_r . La diferencia de flujos que entran menos flujos que salen deberá ser igual al cambio de masa que ocurre debido al proceso de ósmosis inversa. Este balance es representado por la ecuación (2.1).

$$\frac{dm_r}{dt} = F_f - F_{m2} - F_r \quad (2.1)$$

Debido a que la compresibilidad de solvente (agua) es muy pequeña, es decir, la masa del fluido no cambia con el tiempo debido al proceso de ósmosis inversa el término $\left(\frac{dm_r}{dt}\right)$ lo podemos igualamos a cero y nos queda el balance de flujos en forma algebraica para el subsistema 1, como se muestra en la ecuación (2.2). En la Tabla 2.2 se muestra los parámetros y variables de estas ecuaciones.

$$F_f = F_r + F_{m2} \quad (2.2)$$

Tabla 2.2. Parámetros y variables ecuaciones (2.1) y (2.2)

Símbolo	Parámetro	Unidad (SI)	Valor
F_f	Flujo de alimentación	$\frac{kg}{s}$	se conoce
F_{m2}	Flujo en la capa límite 2	$\frac{kg}{s}$	se calcula
F_r	Flujo de rechazo	$\frac{kg}{s}$	se calcula
m_r	Holdup de rechazo	kg	53.24kg

2.2.2.2. Balance parcial de materia para subsistema 1

El balance parcial de materia se refiere al balance de soluto (sales) y se define en forma algebraica por la ecuación (2.3)

$$F_f C_f = F_p C_p + F_r C_r \quad (2.3)$$

En forma diferencial se define el cambio de la concentración del rechazo por la masa del rechazo respecto al tiempo por la ecuación (2.4)

$$\frac{d(C_r m_r)}{dt} = F_f C_f - F_p C_p - F_r C_r \quad (2.4)$$

Derivando (2.4) tenemos:

$$m_r \frac{dC_r}{dt} + C_r \frac{dm_r}{dt} = F_f C_f - F_p C_p - F_r C_r \quad (2.5)$$

Reemplazando el término $\left(\frac{dm_r}{dt}\right)$ de (2.1) en (2.5), obtenemos:

$$m_r \frac{dC_r}{dt} + C_r (F_f - F_{m2} - F_r) = F_f C_f - F_p C_p - F_r C_r \quad (2.6)$$

Despejando el término $\left(\frac{dC_r}{dt}\right)$ de (2.6), se obtiene:

$$\frac{dC_r}{dt} = \frac{1}{m_r} [F_f (C_f - C_r) - F_p (C_p - C_r)] \quad (2.7)$$

La ecuación (2.7) define el comportamiento dinámico temporal de la concentración de sales en el rechazo. Esta ecuación nos indica que para calcular C_r , es necesario calcular previamente los valores de F_p y C_p , además depende de los valores de flujo y concentración del agua de alimentación.

2.2.2. Subsistema 2. Permeado

2.2.2.1. Balance global de materia para subsistema permeado

En la Figura 2.12 se muestra el subsistema permeado (Subsistema 2) sobre el cual se realizará los balances de materia.

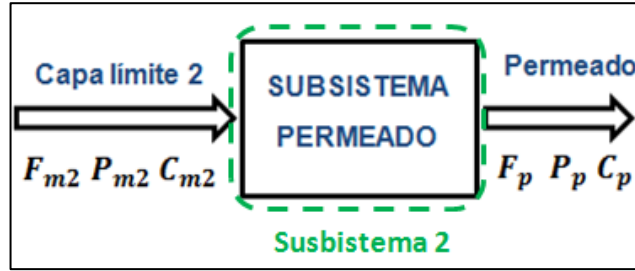


Figura 2.12. Subsistema 2

Si tomamos en cuenta el subsistema 2 mostrado en la Figura 2.12 mediante líneas punteadas, vemos que el flujo que entra al subsistema 2 es F_{m2} y el flujo que sale es F_p . La diferencia de flujos que entran menos flujos que salen deberá ser igual al cambio de masa que ocurre debido al proceso de ósmosis inversa. Este balance es representado por la ecuación (2.8)

$$\frac{dm_p}{dt} = F_{m2} - F_p \quad (2.8)$$

Debido a que la masa del fluido no cambia con el tiempo debido al proceso de ósmosis inversa, el término $\left(\frac{dm_p}{dt}\right)$ de la ecuación (2.8) lo podemos igualar a cero y nos queda el balance de flujos en forma algebraica para el subsistema 2 en la ecuación (2.9).

$$F_{m2} = F_p \quad (2.9)$$

2.2.2.2. Balance parcial de materia para subsistema permeado

El cambio de la concentración en el holdup de control por la masa en el holdup de control (masa del permeado) respecto al tiempo se define por la ecuación (2.10)

$$\frac{d(m_p C_p)}{dt} = F_{m2} C_{m2} - F_p C_p \quad (2.10)$$

Derivando (2.10), obtenemos:

$$m_p \frac{dC_p}{dt} + C_p \frac{dm_p}{dt} = F_{m2} C_{m2} - F_p C_p \quad (2.11)$$

Reemplazando el término $\left(\frac{dm_p}{dt}\right)$ de (2.8) en (2.11)

$$m_p \frac{dC_p}{dt} + C_p (F_{m2} - F_p) = F_{m2} C_{m2} - F_p C_p$$

Despejando $\left(\frac{dC_p}{dt}\right)$ nos queda

$$\frac{dC_p}{dt} = \frac{1}{m_p} [F_{m2}(C_{m2} - C_p)] \quad (2.12)$$

Mediante la aproximación considerada en (2.9), la ecuación (2.12) resulta finalmente:

$$\frac{dC_p}{dt} = \frac{1}{m_p} [F_p(C_{m2} - C_p)] \quad (2.13)$$

La ecuación (2.13) define comportamiento dinámico temporal de la concentración de sales en el permeado. Esta ecuación nos indica que para calcular C_p se requiere calcular previamente el valor de F_p .

2.2.3. Subsistema membrana

2.2.3.1 Transporte de agua

En la Tabla 2.3 se muestra los parámetros y variables que intervienen en las ecuaciones relacionadas con el transporte de agua.

Tabla 2.3. Parámetros y variables ecuaciones del subsistema membrana

Símbolo	Parámetro	Unidad(SI)	Valor
F_p	Flujo del permeado	$\frac{kg}{s}$	se calcula
J_v	Velocidad de solvente (agua)	$\frac{kg}{m^2 s}$	se calcula
A	Área de transferencia de la membrana	m^2	136.6
K_w	Coeficiente de permeabilidad del solvente (agua)	$\frac{kg}{m^2 s Pa}$	$2.05(10^{-9})$
σ	Coeficiente de reflexión de la presión osmótica	no tiene	0.9999
ΔP	diferencia de presión hidráulica a través de la membrana	Pa	se calcula
$\Delta \pi$	diferencia de presión osmótica a través de la membrana	Pa	se calcula

La ecuación (2.14) define la razón flujo de paso de agua a través de una membrana semipermeable (Senthilmurugan, 2005)

$$F_p = J_v A \quad (2.14)$$

Para la determinación de la velocidad de solvente J_v se consideró el enfoque de Spiegler-Kedem-Katchalsky (SKK) (Ahmed, 2013), que incluye el coeficiente de reflexión, σ , que es un factor que afecta a la presión osmótica, $\Delta \pi$, y está definido por la ecuación (2.15)

$$J_v = K_w(\Delta P - \sigma \Delta \pi) \quad (2.15)$$

Por tanto, el flujo de permeado se define por la ecuación (2.16)

$$F_p = A K_w(\Delta P - \sigma \Delta \pi) \quad (2.16)$$

La ecuación (2.16) nos dice que la razón de flujo de agua a través de una membrana es proporcional a la presión diferencial neta ($\Delta P - \sigma \Delta \pi$) a través de la membrana.

Los valores de los parámetros mostrados en la Tabla 2.3 fueron tomados como referencia del ejemplo desarrollado en Dessouky (2002), estos parámetros son propios del módulo de membrana que se esté utilizando.

El coeficiente de reflexión osmótica generalmente toma valores cercanos a 1 (0.95, 0.98, 0.99) y depende del módulo de membrana que se esté utilizando. Este coeficiente es dado por el fabricante. Para el presente modelo por motivos de simplicidad, se tomará un valor muy cercano a 1. En Senthilmurugan (2005) se estudia los efectos de variación de este coeficiente.

También es necesario realizar el balance de presiones en la membrana, los parámetros y variables utilizados en este balance se muestran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Parámetros y variables ecuaciones balance de presiones

Símbolo	Parámetro	Unidad(SI)	Valor
ΔP	diferencia de presión hidráulica a través de la membrana	Pa	se calcula
P_f	Presión del agua de alimentación	Pa	se conoce
P_r	Presión del agua rechazo	Pa	se calcula
P_p	Presión del agua de permeado	Pa	$\approx 1atm$
$\Delta\pi$	diferencia de presión osmótica a través de la membrana	Pa	se calcula
R_g	Constante universal de gases ideales	$\frac{m^3 Pa}{mol K}$	8.314472
T	Temperatura de la solución	K	se conoce
C_{m1}	Concentración de sales en la capa límite 1	$\frac{kg}{m^3}$	se calcula
M_m	Masa molar del cloruro de sodio	$\frac{kg}{mol}$	0.05844

El balance de presiones en la membrana está dado por la ecuación (2.17)

$$P_f = P_r + P_p \quad (2.17)$$

La caída de presión hidráulica ΔP a través de la membrana se determina mediante la ecuación (2.18) (Dessouky, 2002)

$$\Delta P = \frac{1}{2} (P_f + P_r) - P_p \quad (2.18)$$

La caída de presión osmótica $\Delta\pi$ a lo largo de la membrana está linealmente relacionada con la concentración por la relación de Van't Hoff (Jiang, 2010)

$$\Delta\pi = R_g T (C_{m1} - C_p), \quad (2.19)$$

donde las concentraciones C_{m1} y C_p son concentraciones molares de la capa límite 1 y permeado, respectivamente. Para expresar las concentraciones C_{m1} y C_p en (kg/m^3) , dividimos éstas entre la masa molar M_m del soluto. La ecuación para la presión osmótica resulta:

$$\Delta\pi = \frac{R_g T (C_{m1} - C_p)}{M_m} \quad (2.20)$$

2.2.3.2 Transporte de sales

Los parámetros y variables utilizados en el transporte de sales se muestran en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Parámetros y variables para transporte de sales

Símbolo	Parámetro	Unidad (SI)	Valor
F_s	Flujo de sales a través de la membrana	$\frac{kg}{s}$	se calcula
K_s	Coefficiente de permeabilidad de sales	$\frac{m}{s}$	$2.03(10^{-5})$
$\bar{C}$	Concentración media en el lado del retenido de la membrana	$\frac{kg}{m^3}$	se calcula
C_p	Concentración total de sólidos disueltos en el permeado (Salinidad del permeado)	$\frac{kg}{m^3}$	se calcula
A	Área de transferencia de la membrana	m^2	136.6

El flujo de sales a través de la membrana se define mediante la ecuación (2.21) (Dessouky, 2002).

$$F_s = K_s A (\bar{C} - C_p) \quad (2.21)$$

Se aprecia que la razón de flujo de sales es proporcional a la diferencia de concentraciones a través de la membrana

La concentración media en el lado del retenido de la membrana, se define por la ecuación (2.22) (Dessouky, 2002)

$$\bar{C} = \frac{F_f C_f + F_r C_r}{F_f + F_r} \quad (2.22)$$

Además, la relación entre flujos de soluto y solvente está dada por la ecuación (2.23) (Dessouky, 2002)

$$C_p = \frac{F_s}{F_p} \quad (2.23)$$

La salinidad del permeado depende de las razones relativas de transporte de sales y agua a través de la membrana de ósmosis inversa

El hecho de que el agua y la sal tienen diferentes transferencias de masa a través de una membrana dada, crea el fenómeno de rechazo de sales. Ninguna membrana es ideal en el sentido de que rechaza absolutamente todas las sales.

La ecuaciones (2.16) y (2.21) muestran que el incremento de la presión de operación incrementará el flujo de agua sin cambio en el flujo de sales, resultando así en una menor salinidad de permeado y, por lo tanto, en una mejor calidad de agua producto.

Reemplazando las expresiones correspondientes al flujo de solvente y flujo de soluto dadas en (2.16) y (2.21), respectivamente, obtenemos:

$$C_p = \frac{F_s}{F_p} = \frac{K_s A (\bar{C} - C_p)}{K_w A (\Delta P - \sigma \Delta \pi)} \quad (2.24)$$

$$C_p = \frac{K_s (\bar{C} - C_p)}{K_w (\Delta P - \sigma \Delta \pi)} \quad (2.25)$$

Ya que las concentraciones en el permeado y la capa límite 2 tienen valores cercanos, se puede realizar la aproximación $C_p \approx C_{m2}$. Además se puede aproximar el valor de la concentración en la capa límite 1 por la expresión dada en (2.22) es decir $\bar{C} \approx C_{m1}$ (Dessouky, 2002)

$$C_{m2} = \frac{K_s (C_{m1} - C_{m2})}{K_w (\Delta P - \sigma \Delta \pi)} \quad (2.26)$$

De la ecuación (2.26) despejamos C_{m1} y obtenemos

$$C_{m1} = C_{m2} \left(1 + \frac{K_w}{K_s} (\Delta P - \sigma \Delta \pi) \right) \quad (2.27)$$

La ecuación (2.27) relaciona las concentraciones en las capas límite alrededor de la membrana. De la ecuación (2.3) despejamos el término $(F_r C_r)$

$$F_r C_r = C_f F_f - C_p F_p \quad (2.28)$$

La expresión obtenida en (2.28) la reemplazamos en (2.22)

$$\bar{C} = \frac{F_f C_f + (C_f F_f - C_p F_p)}{F_f + F_r} \quad (2.29)$$

Por lo tanto:

$$\bar{C} = \frac{2F_f C_f - C_p F_p}{F_f + F_r} \quad (2.30)$$

Teniendo en cuenta las aproximaciones $C_p \approx C_{m2}$ y $\bar{C} \approx C_{m1}$, se tiene que:

$$C_{m1} = \frac{2F_f C_f - C_{m2} F_{m2}}{F_f + F_r} \quad (2.31)$$

De la ecuación (2.2) despejamos F_r y reemplazamos en (2.31)

$$F_r = F_f - F_{m2} \quad (2.32)$$

$$C_{m1} = \frac{2F_f C_f - C_{m2} F_{m2}}{F_f + (F_f - F_{m2})} \quad (2.33)$$

Se obtiene:

$$C_{m1} = \frac{2F_f C_f - C_{m2} F_{m2}}{2F_f - F_{m2}} \quad (2.34)$$

Reemplazamos (2.34) en (2.27), obteniendo:

$$\frac{2F_f C_f - F_{m2} C_{m2}}{2F_f - F_{m2}} = C_{m2} \left(1 + \frac{K_w}{K_s} (\Delta P - \sigma \Delta \pi) \right) \quad (2.35)$$

Despejando C_{m2} de (2.35) queda:

$$C_{m2} = \frac{C_f}{\left[1 + \frac{K_w}{K_s} (\Delta P - \sigma \Delta \pi) \left(1 - \frac{F_{m2}}{2F_f} \right) \right]} \quad (2.36)$$

De la ecuación (2.9) reemplazamos la igualdad

$$F_{m2} = F_p,$$

en (2.37) y obtenemos finalmente:

$$C_{m2} = \frac{C_f}{\left[1 + \frac{K_w}{K_s} (\Delta P - \sigma \Delta \pi) \left(1 - \frac{F_p}{2F_f}\right)\right]} \quad (2.37)$$

La ecuación (2.37) nos muestra que la concentración en la capa límite 2 del permeado es directamente proporcional a la concentración de alimentación e inversamente proporcional a las caídas de presión a través de la membrana.

2.2.4. Rechazo y polarización de la concentración

2.2.4.1. Definición

El rechazo y la concentración de la polarización son dos características de una membrana de ósmosis inversa y serán estudiadas para encontrar nuevas relaciones entre las variables internas del módulo de OI. Dichas relaciones nos serán útiles para los propósitos desarrollados en el tercer capítulo. Los parámetros y variables utilizados en esta sección se muestran en la Tabla 2.6.

Tabla 2. 6. Parámetros y variables para rechazo y polarización de concentración

Símbolo	Parámetro	Unidad	Valor
ϕ	Polarización de la concentración	no tiene	se calcula
C_b	Concentración bulk	$\frac{kg}{m^3}$	se conoce
σ	coeficiente de reflexión	no tiene	0.9999
R	rechazo	no tiene	se calcula
F	parámetro de flujo	no tiene	se calcula
K_s	Coeficiente de permeabilidad de sales	$\frac{m}{s}$	$2.03(10^{-5})$
k	Coeficiente de transferencia de masa	$\frac{m}{s}$	se calcula
D	Coeficiente de difusión	$\frac{m^2}{s}$	se conoce
δ	Espesor de la capa límite	m	se conoce

2.2.4.2. Rechazo

El rechazo es una medida de la eficiencia de separación de la membrana y se define por la ecuación (2.38) (Senthilmurugan, 2005)

$$R = \frac{C_{m1} - C_p}{C_{m1}} \quad (2.38)$$

Una expresión para el rechazo también corresponde a la ecuación (2.39) (Senthilmurugan, 2005)

$$R = \frac{(1 - F)\sigma}{1 - \sigma F}, \quad (2.39)$$

donde F se calcula por la relación exponencial mostrada en (2.40) (Senthilmurugan, 2005)

$$F = e^{\left[\frac{-J_v(1-\sigma)}{K_s} \right]} \quad (2.40)$$

Reemplazando la expresión correspondiente a J_v en (2.40) se obtiene:

$$F = e^{\left[\frac{-F_p(1-\sigma)}{AK_s} \right]} \quad (2.41)$$

De esta manera reemplazando la ecuación (2.41) en (2.39) obtenemos una expresión para el rechazo de la membrana de OI.

Además, de la ecuación (2.38) despejamos C_p

$$C_p = C_{m1}(1 - R) \quad (2.42)$$

De esta manera obtenemos una nueva forma de hallar C_p a partir de la expresión para el rechazo.

2.2.4.3. Polarización de la concentración

Durante la filtración se produce la acumulación de solutos en la superficie de la membrana (capa límite 1), esta acumulación hace que se forme una capa de polarización de la concentración, que puede ser determinada por el modelo de polarización de la concentración (Ahmed, 2010), (Senthilmurugan, 2005). En la Figura 2.10 se mostró las capas límites alrededor de la membrana

En la Figura 2.13 se muestra el esquema de polarización en la capa límite 1 de la membrana, se muestra la variable C_b (Concentración bulk) que se refiere a la concentración de la solución completa, es decir, incluyendo soluto y solvente, en nuestro caso C_b denota la concentración del agua de alimentación. Vemos, además, que la concentración se incrementa de forma exponencial a lo largo de la capa límite 1 hasta alcanzar el valor final $C_m = C_{m1}$ en las cercanías de la membrana. Se observa también que la concentración del agua de permeado, C_p , es menor que C_b y que C_m , esto se comprobará luego mediante simulación.

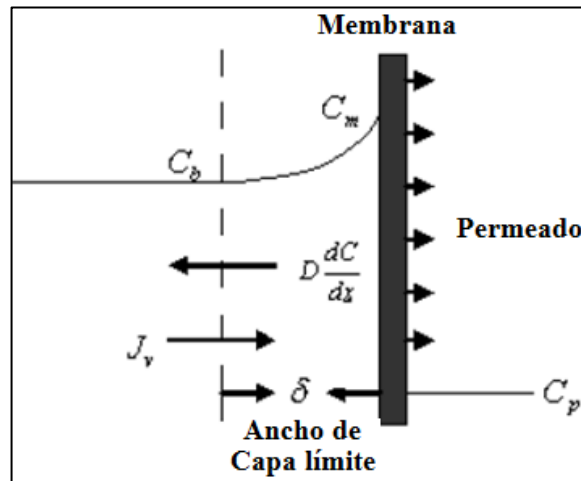


Figura 2.13. Variables que intervienen en la concentración de polarización

La Figura 2.13 ilustra también el esquema para la transferencia de masa para una membrana de ósmosis inversa bajo condiciones de estado estacionario, además muestra las variables involucradas para la obtención del modelo de polarización de concentración.

El ancho de la capa límite se representa por δ y su valor varía de acuerdo a la membrana que se esté utilizando. Este ancho de capa límite debe ser especificado por el

fabricante, pero tiene valores típicos calculados para separaciones con módulos en enrollamiento en espiral en ósmosis inversa (Baker, 2004)

Baker considera el valor del ancho de la capa límite constante en el rango de $0.05 - 20\mu m$ para los procesos de ósmosis inversa en enrollamiento en espiral. Para efectos de simulación es necesario considerar un valor constante del ancho de la capa límite, tomando en cuenta los parámetros de la membrana dados en Senthilmurugan (2005), se determinó que el ancho de la capa límite para el presente modelo es aproximadamente de $0.05\mu m$

El gradiente de concentración puede ser determinado por el balance de masa en estado estacionario a lo largo de la capa límite representado por la ecuación (2.) (Khalaf, 2008)

$$J_v C_p = J_v C - D \left(\frac{dC}{dx} \right), \quad (2.43)$$

donde C es la concentración en la capa límite de la membrana.

Las condiciones de borde están dadas por:

$$(i) C = C_b = C_f \quad \text{en} \quad x = 0$$

$$(ii) C = C_{m1} \quad \text{en} \quad x = \delta$$

El coeficiente D es llamado coeficiente de difusión del soluto en un determinado solvente, este coeficiente depende de la concentración del soluto de la solución de alimentación y de la temperatura de la solución. Podemos considerar este coeficiente constante para resolver la ecuación diferencial mostrada en (2.43). El coeficiente de difusión de sales en agua según experimentos realizados por varios autores tiene un valor aproximado de:

$$D = 1.484(10^{-9}) \frac{m^2}{s} \quad (2.44)$$

Utilizamos el método de separación de variables para resolver la ecuación diferencial mostrada en (2.43)

$$\begin{aligned} \frac{dC}{dx} &= \frac{J_v C - J_v C_p}{D} \\ \frac{dC}{dx} &= \frac{J_v}{D} (C - C_p) \\ \frac{dC}{(C - C_p)} &= \frac{J_v}{D} dx \end{aligned} \quad (2.45)$$

Integramos ambos lados de la ecuación considerando las condiciones de borde.

$$\begin{aligned} \int_{C_f}^{C_{m1}} \frac{dC}{(C - C_p)} &= \int_0^\delta \left(\frac{J_v}{D} \right) dx \\ \ln(C - C_p) \Big|_{C_f}^{C_{m1}} &= \frac{J_v}{D} x \Big|_0^\delta \\ \ln(C_{m1} - C_p) - \ln(C_f - C_p) &= \left(\frac{J_v}{D} \right) (\delta - 0) \\ \ln \left(\frac{C_{m1} - C_p}{C_f - C_p} \right) &= \left(\frac{J_v}{D} \right) (\delta), \end{aligned}$$

de donde:

$$\left(\frac{C_{m1} - C_p}{C_f - C_p} \right) = e^{\left(\frac{L_p}{D} \right) (\delta)} \quad (2.46)$$

La ecuación (2.46) nos muestra la expresión para la concentración de polarización, la cual se representa por:

$$\phi = \frac{C_{m1} - C_p}{C_f - C_p} = e^{\left(\frac{L_p}{D} \right) (\delta)} \quad (2.47)$$

La Figura 2.10 nos muestra que $C_p \ll C_f < C_{m1}$, de esta manera C_p puede ser eliminado de la ecuación (2.47) y se obtiene la expresión simplificada para la concentración de polarización

$$\phi = \frac{C_{m1}}{C_f} \quad (2.48)$$

De la ecuación (2.47), el término $\left(\frac{D}{\delta} \right)$ es también conocido como Coeficiente de transferencia de masa y se representa por k

$$k = \frac{D}{\delta} \quad (2.49)$$

A pesar de que el coeficiente de difusión D se puede considerar constante, existe una expresión para su cálculo teniendo en cuenta el efecto de la concentración y de la temperatura del agua de alimentación. Jiang presenta una fórmula para el cálculo del coeficiente, esta expresión se muestra en (2.50) (Jiang, 2010).

$$D = 6.725(10^{-6})e^{0.1546(10^{-3})C_f - \frac{2513}{273.15 + T}} \quad (2.50)$$

Considerando una concentración típica de sales de agua de mar (35kg/m³) y una temperatura ambiente de 25°, al realizar el reemplazo en la ecuación (2.50), se obtiene

$$D = 1.4775(10^{-9}) \frac{m^2}{s} \quad (2.51)$$

Como se puede ver este valor es bastante aproximado al valor constante presentado en la expresión (2.44), por esto se considera correcto usar la expresión dada por Jiang en nuestro modelo.

2.2.5. Influencia del pH en la conductividad

La escala de pH (potencial hidrógeno) se utiliza como un indicador de la concentración de los iones hidrógeno en la solución.

Cuando la solución presenta una alta concentración de iones hidrógeno, se considera ácido y cuando presenta una baja concentración se considera básico. Un pH =7 se considera neutro. La escala de pH se encuentra en un rango de 1 a 14, siendo 1 extremadamente ácido y 14 extremadamente básico.

El pH se mide en una escala logarítmica y representa el logaritmo negativo de la concentración de los iones hidrógeno en la solución, expresado en moles/L (pH = - log [H⁺]). Por ejemplo, un pH de 2 representa una concentración de 1×10^{-2} moles/L de iones

H^+ , y un pH 8 representa una concentración de 1×10^{-8} moles /L de iones H^+ . Es decir, una mayor concentración de iones H^+ (1×10^{-2}) representa un menor pH y viceversa

La conductividad es una medida de la facilidad que tienen los iones para moverse en una disolución (soluto + solvente), en este caso el ión H^+ pasaría a ser otro soluto más, es decir, que a mayor concentración de iones H^+ , mayor conductividad va a tener dicha disolución. Por tanto, a menor pH, mayor conductividad y viceversa.

Los aditivos tradicionales usados para la modificación del pH en plantas desalinizadoras por ósmosis inversa son ácido clorhídrico (HCl) y el hidróxido de sodio (NaOH).

Supongamos que tenemos una solución con pH inicial de 7, le agregamos ácido clorhídrico a la solución. *Ácido clorhídrico* $\rightarrow H^+ Cl^-$

Al agregar ácido clorhídrico estamos agregando iones H^+ , por tanto estamos aumentando la conductividad y bajando el pH. Las moléculas de Cl^- sirven para mantener la electro neutralidad de la solución.

Alaliqi (1989) presenta resultados experimentales que relacionan el pH y la conductividad. Estos resultados se obtuvieron a partir de un trabajo de identificación, observándose que el cambio de conductividad por unidad de cambio de pH es prácticamente constante en un amplio rango de valores. Las unidades de conductividad en el trabajo de Alatiqi están en $\mu S/cm$ (microSiemens por centímetro), y está relacionada con el cambio en el pH mediante la siguiente expresión:

$$Conductividad = -57(\Delta pH) \quad (2.52)$$

Para trabajar en el sistema internacional de unidades es necesario encontrar una relación entre conductividad y concentración. Esta relación puede ser determinada con la Ley de Kohlrausch, pero también puede ser determinada de forma aproximada a partir de resultados experimentales presentados por el conversor de unidades de Lenntech (Lenntech Water treatment & purification Holding)

Primero convertimos las unidades de $\frac{\mu S}{cm}$ a partes por millón (ppm). Del conversor de unidades se obtiene la siguiente relación:

$$400 \frac{\mu S}{cm} = 256 ppm(STD) \quad (2.53)$$

Ahora convertimos de ppm a kg/m^3 que es la unidad de nuestro interés

$$1000 ppm = 1 \frac{kg}{m^3} \quad (2.54)$$

Este cambio expresado en términos de concentración en kg/m^3 se puede expresar por la relación:

$$C_{pH} = -0.03626(pH_f - pH_i) \quad (2.55)$$

Los parámetros se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7.Parámetros y variables de la ecuación (2.55)

Símbolo	Parámetro
C_{pH}	Aporte de concentración del permeado por el cambio de pH
pH_f	pH final
pH_i	pH inicial

Por tanto la concentración total de permeado estará dada por el aporte de concentración debido a la presión de entrada más el aporte de concentración por los cambios de pH en la solución de alimentación.

$$C_{ps} = C_p + C_{pH} \quad (2.56)$$

2.3. Implementación del modelo obtenido

Se realizó la implementación del modelo obtenido en un script en Matlab y en Simulink y se realizaron distintas pruebas con el objetivo de validar el modelo y comparar los resultados con los de Alatiqi (1989). En la Figura 2.14 se muestra la implementación del modelo en Simulink.

2.4. Validación del modelo obtenido

2.4.1. Cambios en la presión de alimentación

Para mostrar los cambios en la presión de alimentación se considera que no hay variación en el pH, que la concentración de alimentación es constante (35kg/m^3) y la temperatura de solución es constante (25°C). La conversión de psi a Pascales y viceversa se obtiene con la relación:

$$P(Pa) = P(psi) \frac{10^{-5}}{14.5038}$$

La Tabla 2.8 muestra los resultados para el cambio de presión en el rango de 600 psi a 950 psi, este rango de presiones es similar al presentado por Alatiqi. Obsérvese que efectivamente se cumplen los resultados esperados, esto es, al aumentar la presión de alimentación aumenta el flujo de permeado y se reduce la concentración de sales del permeado (aumenta la calidad del agua filtrada).

Tabla 2.8. Cambios en la presión de alimentación

$P_f(psi)$	$F_p(kg/seg)$	$C_p(kg/m^3)$
600	0.64144	0.17271
650	0.72811	0.15532
700	0.81446	0.14178
750	0.90046	0.13097
800	0.98609	0.12217
850	1.0713	0.11492
900	1.1561	0.10886
950	1.2405	0.10375

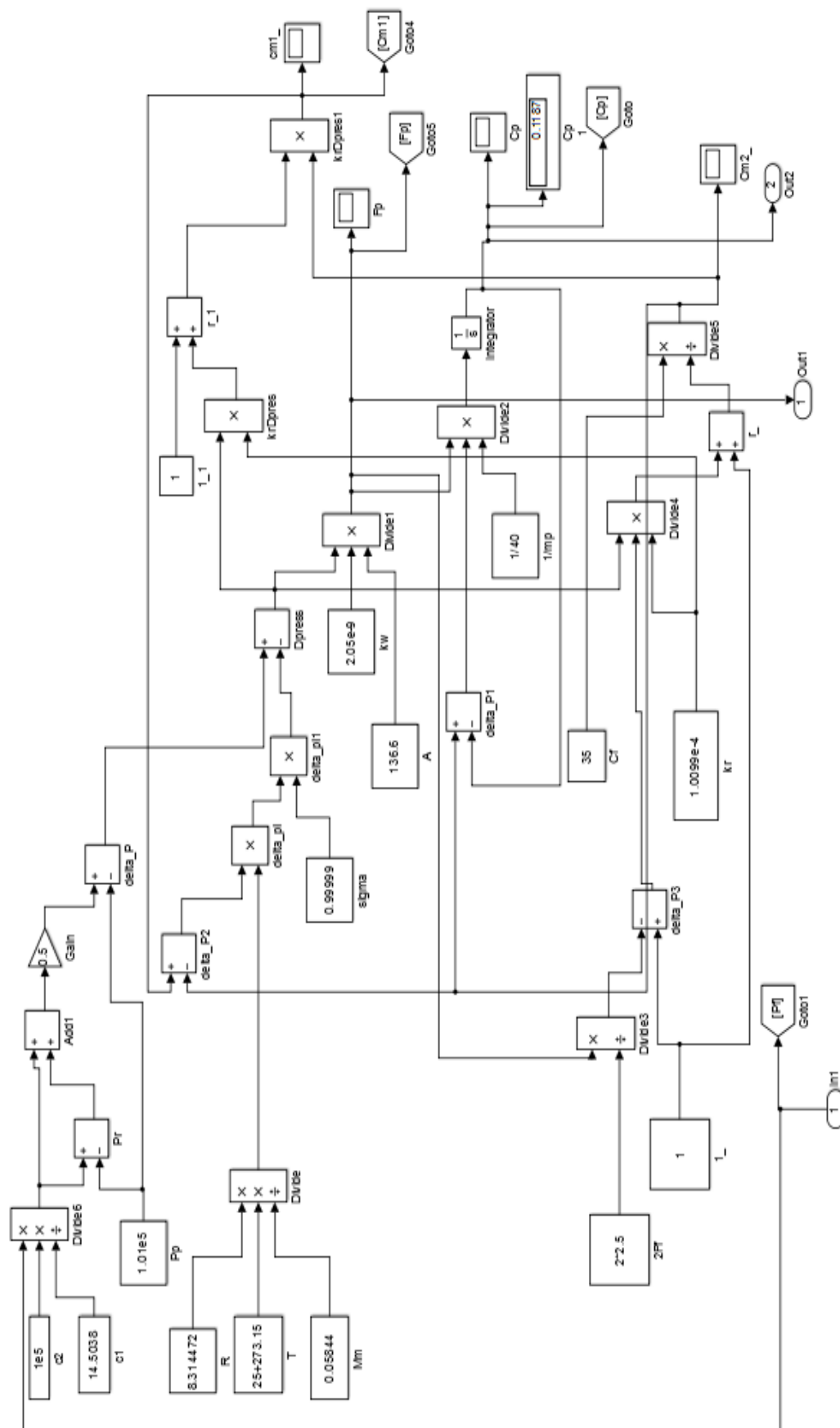


Figura 2.14. Implementación del modelo de OI en Simulink

2.4.2. Cambios en el pH de alimentación

Alatqi (Alatqi et al, 1989) considera cambios de pH entre 6 y 7 en el proceso de ósmosis inversa, sin embargo Jiang (Jiang, 2010) considera cambios de pH entre 5 y 8, en ambos casos se trata de mantener el agua ligeramente ácida. El agua de mar es ligeramente alcalina, y el valor de su pH está entre 7.5 y 8.4. Es por esto que se considera cambios en el pH como máximo ± 2 unidades del pH del agua de alimentación. Para efectos de simulación se consideró el pH inicial del alimentado constante en 7.5 y a partir de allí se realizaron los cambios.

Para realizar las pruebas del efecto de variación de pH, se considera que no hay variación en la presión de alimentación (constante en 800 psi), que la concentración de alimentación es constante ($35\text{kg}/\text{m}^3$) y que la temperatura de solución es constante (25°C).

La entrada de pH se considera como un cambio de pH, un cambio positivo de pH indica que el pH final es mayor que el pH inicial y viceversa. La Tabla 2.9 muestra los resultados de los cambios en pH donde se observa que para un cambio positivo de pH, la concentración de permeado se reduce, y para un cambio negativo de pH, la concentración del permeado se incrementa. Se observa además que para un cambio de pH igual a cero se obtiene el mismo resultado para flujo y concentración que en la Tabla 2.8 para la presión de 800 psi. De esta manera se verifica que el cambio de pH no tiene efecto sobre el flujo de permeado.

Tabla 2.9. Cambios en el pH

ΔpH	$F_p (\text{kg}/\text{seg})$	$C_p (\text{kg}/\text{m}^3)$
2	0.98609	0.049655
1.6	0.98609	0.064159
1.2	0.98609	0.078663
0.8	0.98609	0.093167
0.4	0.98609	0.10767
0	0.98609	0.12217
-0.4	0.98609	0.13668
-0.8	0.98609	0.15118
-1.2	0.98609	0.16569
-1.6	0.98609	0.18019
-2	0.98609	0.19469

2.4.3. Cambios en la concentración de alimentación

Para mostrar los cambios en la concentración de alimentación, se asume que no hay variación en la presión de alimentación (presión constante a 800psi), el pH permanece constante y la temperatura de la solución constante (25°C).

Se consideran diferentes salinidades de alimentación tanto para el caso de agua de mar como para agua salobre. Técnicamente, se considera agua salobre la que posee entre 0.5 y 30 kilogramos de sal por metro cúbico, expresados más frecuentemente como de 500 a 30000 ppm. La concentración media de sales que existe en los océanos es de 35000 ppm ($35\text{kg}/\text{m}^3$). En la Tabla 2.10 se muestran los resultados para el cambio de salinidad del agua de alimentación, manteniendo los demás parámetros constantes, se puede ver que al aumentar la salinidad del agua de alimentación, el flujo del permeado disminuye y la concentración del permeado aumenta.

De estos resultados podemos concluir también que se requiere una mayor presión en el agua de alimentación si queremos desalinizar agua de mar y una menor presión si queremos desalinizar agua salobre para obtener la misma cantidad de agua producto (Flujo de permeado) y calidad de agua producto (Concentración de sales del permeado).

Tabla 2.10. Cambios en la concentración de alimentación

$C_f(kg/m^3)$	$F_p(kg/seg)$	$C_p(kg/m^3)$
0.5	1.4937	0.00132
5	1.4195	0.01360
10	1.3403	0.02818
15	1.2644	0.04390
20	1.1912	0.06093
25	1.1206	0.07948
30	1.0523	0.09979
35	0.9861	0.12217
40	0.9218	0.14699

2.4.4. Cambios en la temperatura de la solución

Anteriormente se mencionó que la ósmosis inversa es un proceso que no presenta cambio de fase, sin embargo es posible que el agua de alimentación se encuentre a una temperatura distinta a la del ambiente, ya sea por cambios de temperatura forzados o producidos por la estación del año y ubicación geográfica. Para realizar la simulación de los efectos del cambio de la temperatura, se asume que no hay variación en la presión de alimentación (presión constante a 800 psi), el pH permanece constante y concentración del agua de alimentación constante ($35kg/m^3$).

Consideramos la temperatura ambiente igual a 25 grados Celsius. De la Tabla 2.11 se aprecia que a medida que se aumenta la temperatura al agua de alimentación, el flujo del permeado disminuye y la concentración de sales del permeado aumenta. Si bien la variación de temperatura produce cambios en el flujo y concentración del permeado, estos cambios no son significativos en comparación con los mostrados en las Tablas 2.8 y 2.10. Se concluye que si se desea obtener una menor concentración de sales en el permeado es preciso enfriar el agua de alimentación.

Tabla 2.11. Cambio en la temperatura de la solución

$T(^{\circ}C)$	$F_p(kg/seg)$	$C_p(kg/m^3)$
0	1.0247	0.1187
5	1.0169	0.1194
10	1.0092	0.1201
15	1.0015	0.1208
20	0.9938	0.1212
25	0.9861	0.1215
30	0.9784	0.1229
35	0.9708	0.1236
40	0.9632	0.1244
45	0.9557	0.1251
50	0.9481	0.1259

2.5. Resultados de simulación.

Los resultados de simulación mostrados en esta sección corresponden a la dinámica de las variables, obtenidas para los siguientes datos de entrada.

- Presión de entrada: 800 psi
- Temperatura de solución: 25°C
- Flujo de alimentación: 2.5 kg/seg
- Concentración de alimentación: 35 kg/m^3
- pH de final de alimentación: 6.5 (constante)

2.5.1. Concentración del permeado

La Figura 2.15 muestra la dinámica en el tiempo de la concentración del permeado, se aprecia que el tiempo de establecimiento es de aproximadamente 200 segundos y que valor final de establecimiento es de 0.1221 kg/m^3 . El valor de la concentración del agua de alimentación fue de 35 kg/m^3 y la concentración de sales del agua producto tiene el valor claramente menor de 0.1221 kg/m^3 , con esto se confirma que el modelo matemático obtenido muestra los resultados esperados.

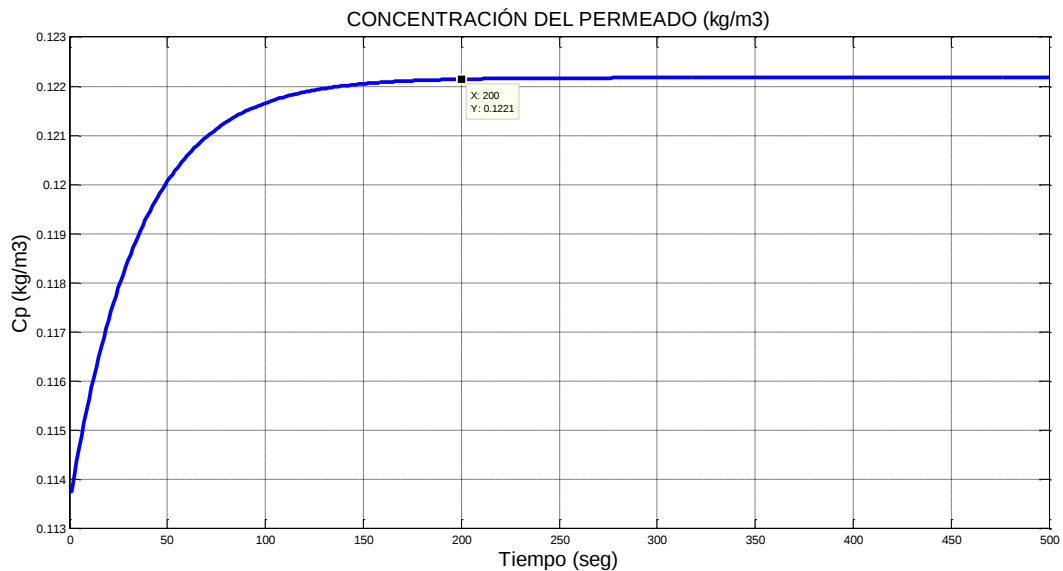


Figura 2.15. Concentración del permeado

2.5.2. Concentración del rechazo.

La Figura 2.16 muestra la dinámica en el tiempo de la concentración de rechazo. El valor final alcanzado fue de 57.72 kg/m^3 y el tiempo de establecimiento fue de aproximadamente 200 segundos.

Se obtiene un resultado esperado y consistente ya que la concentración del agua de rechazo es mayor que la concentración del agua de alimentación. El agua de rechazo debe tener una elevada salinidad, debido a que se trata salmuera o agua con alta concentración de sales.

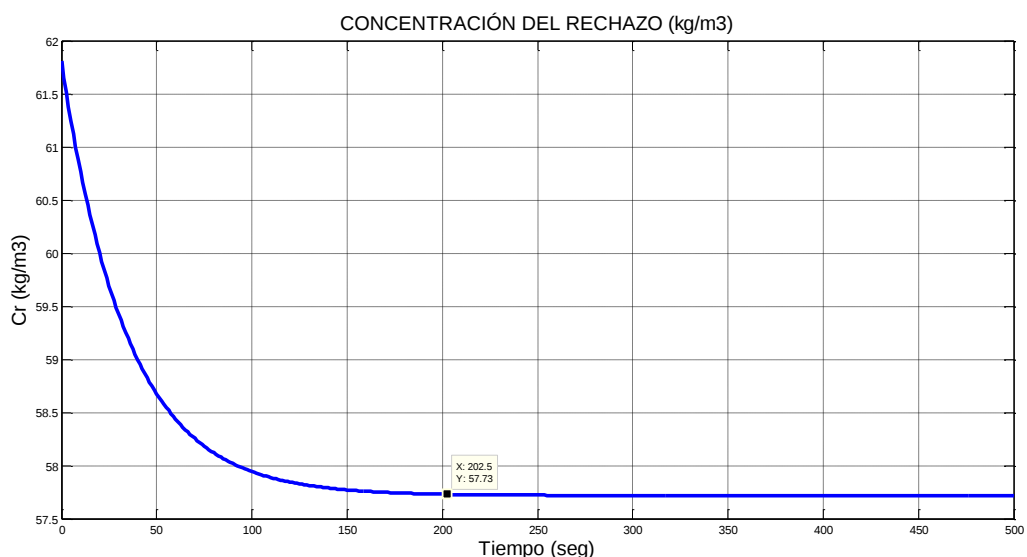


Figura 2.16. Concentración del rechazo

2.5.3. Concentración en la capa límite 1.

En la Figura 2.17 se observa la dinámica de la concentración en la capa límite 1 de la membrana, podemos apreciar una dinámica más rápida que la concentración del permeado, ya que el tiempo de establecimiento es cerca de 10 segundos. El valor en estado estacionario es de $43,57 \text{ kg/m}^3$, este resultado es consistente, ya que, como se vio en el modelamiento, la concentración del agua de alimentación crece de manera exponencial a lo largo de la capa límite 1 hasta alcanzar un valor final de concentración en el límite con la membrana.



Figura 2.17. Concentración en la capa límite 1

2.5.4. Concentración en la capa límite 2.

La Figura 2.18 muestra la dinámica de la concentración en la capa límite 2, la concentración alcanza el valor en estado estacionario de 0.1222 kg/m^3 que es prácticamente igual al valor alcanzado por la concentración del permeado (0.1221 kg/m^3).

Este resultado es también consistente ya que en la mayoría de casos se asume que $C_{m2} \approx C_p$. La diferencia principal es que en la capa límite 2 el valor final de concentración se alcanza en un tiempo aproximado de 10 segundos.

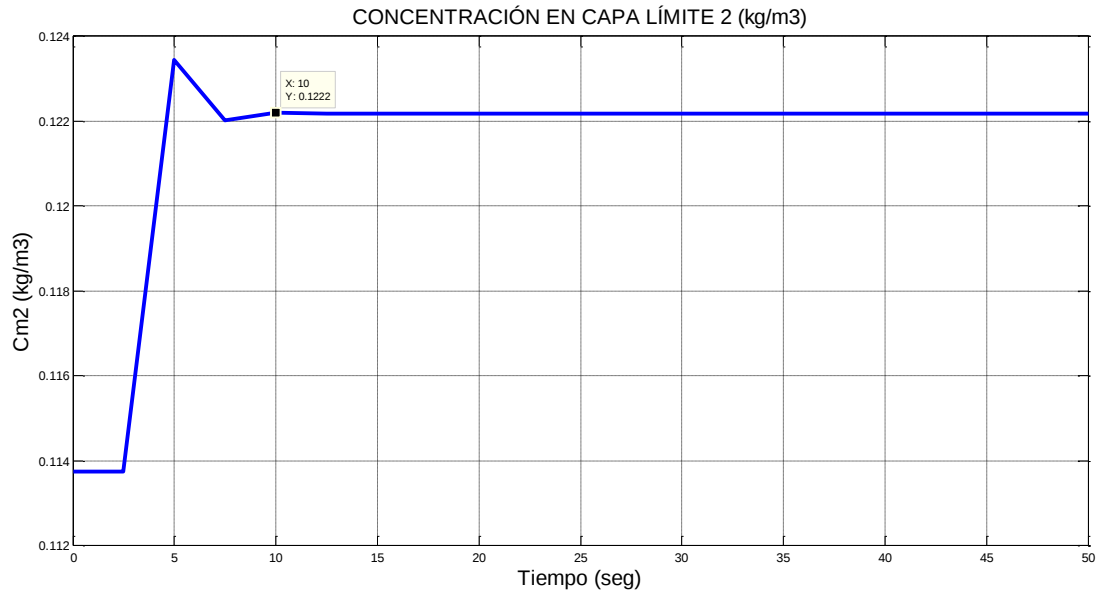


Figura 2.18. Concentración en la capa límite 2

2.5.5. Flujo de permeado.

En la Figura 2.19 se observa que el valor final de flujo de permeado se alcanza en 10 segundos aproximadamente, comparado con los 200 segundos que tomó alcanzar el valor final de la concentración de permeado. El valor final de flujo de permeado alcanzado es de 0.9861 kg/seg.

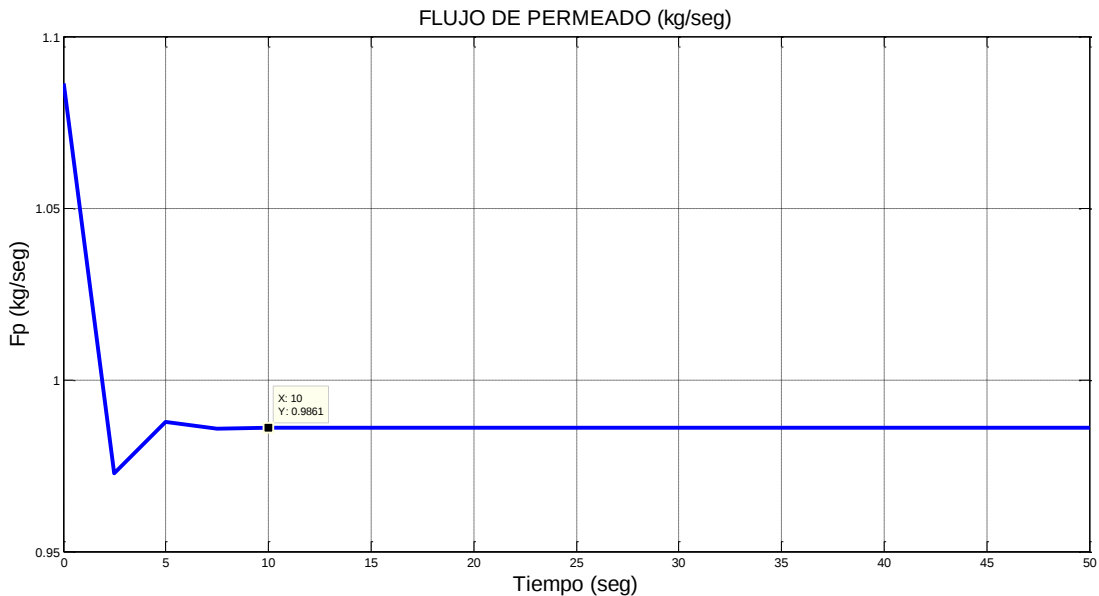


Figura 2.19. Flujo del permeado

2.5.6. Flujo de rechazo.

La Figura 2.20 muestra la dinámica del flujo de rechazo, la cual también alcanza el tiempo de establecimiento en 10 segundos aproximadamente. El valor en estado estacionario alcanzado por esta variable es de 1.514 kg/seg .

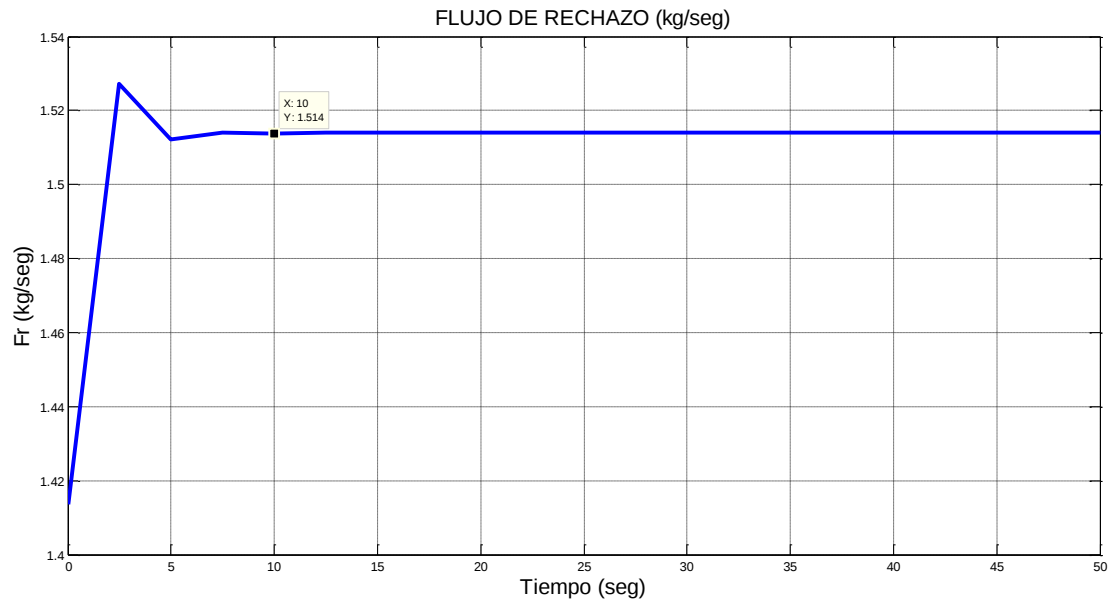


Figura 2.20. Flujo del rechazo

De esta sección se concluye que las dinámicas de las variables de flujo son más rápidas que las variables de concentración de permeado y rechazo. Las concentraciones en las capas límite de la membrana se alcanzan en un tiempo menor que las concentraciones de permeado y rechazo.

2.5.7. Adición de ruido en las variables sensadas

En la planta piloto de ósmosis inversa se cuenta con sensores de temperatura, flujo y conductividad de permeado. Por motivos de simplicidad se asumirá a partir de aquí que se cuenta con un sensor de concentración de sales, en lugar de un sensor de conductividad, ya que se tiene las relaciones de conversión de unidades de conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) a concentración (kg/m^3). Estas relaciones se muestran a continuación:

$$400 \frac{\mu\text{S}}{\text{cm}} = 256 \text{ ppm}$$

$$1000 \text{ ppm} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Para efectos de simulación se añadió ruido a las variables sensadas. La adición de ruido es importante debido a que en la implementación en tiempo real de la planta y el diagnosticador de fallas, las señales medidas siempre tienen una cantidad de ruido inherente en la medición. Las magnitudes de estos ruidos van de acuerdo con la magnitud de la variable sensada de tal manera que aparezcan señales con un ruido significativo a la entrada del diagnosticador.

2.5.7.1. Ruido en la concentración de permeado

Se añadió ruido gaussiano de magnitud 10^{-3} al sensor de conductividad. Los resultados se muestran en la Figura 2.21.

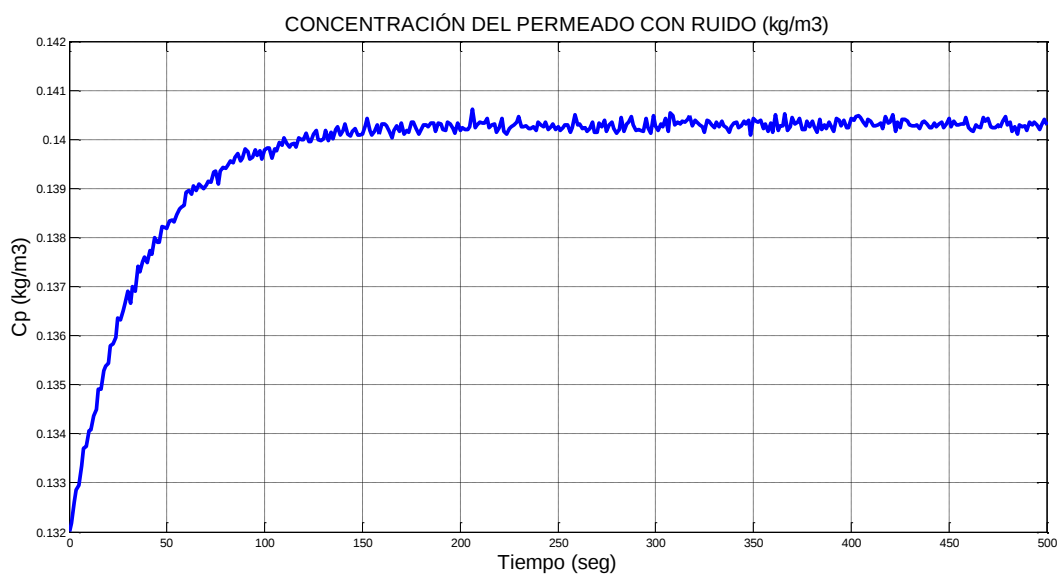


Figura 2.21. Concentración del permeado con ruido

2.5.7.2. Ruido en el flujo de permeado

Se añadió ruido gaussiano de magnitud 10^{-4} al sensor de flujo. Los resultados se muestran en la Figura 2.22.

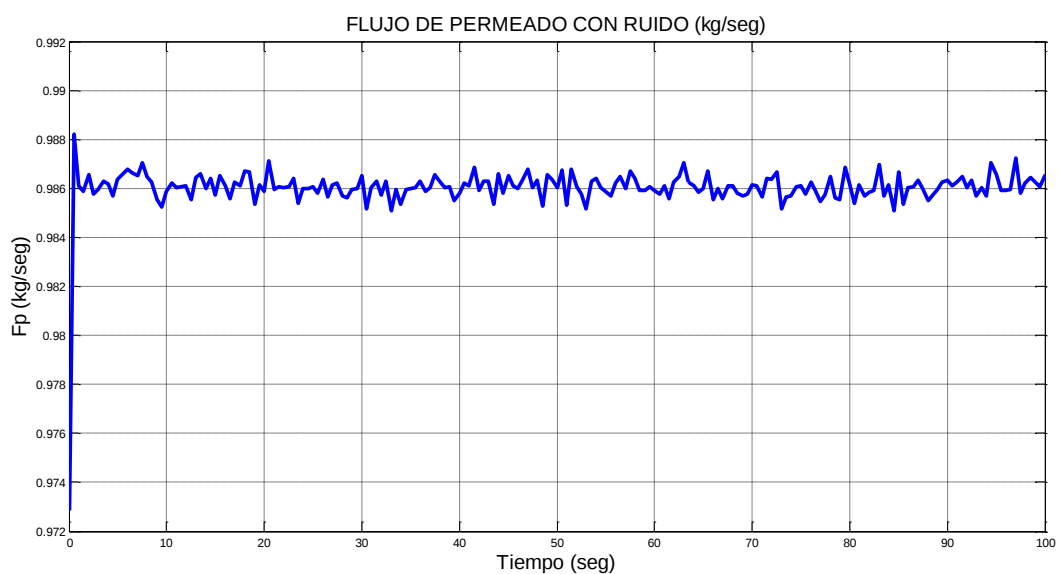


Figura 2.22. Flujo del permeado con ruido

2.5.7.3. Ruido en la temperatura de la solución

Se añadió ruido gaussiano de magnitud 10^{-2} al sensor de temperatura. Los resultados se muestran en la Figura 2.23.

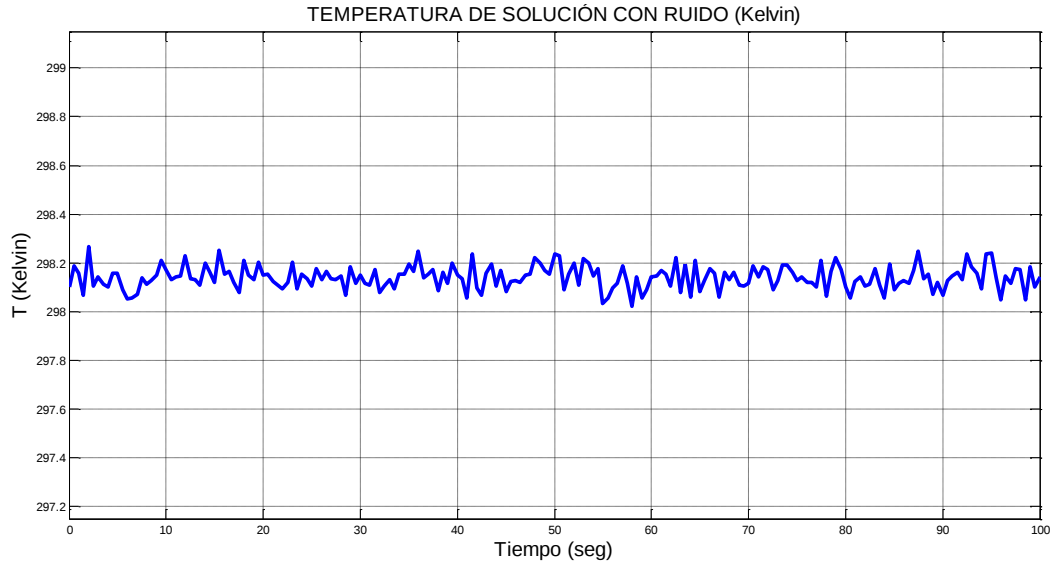


Figura 2.23. Temperatura de solución con ruido

2.6. Diseño de lazos de control PID

En esta sección se diseñará dos lazos de control PID con el objetivo de controlar las 2 variables de interés, el flujo y la concentración de permeado.

Usaremos el PID paralelo en forma incremental:

$$u(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (2.57)$$

donde:

$u(t)$ es la señal de control

$e(t)$ es la señal de error

K_c es la constante del elemento proporcional

T_i es la constante del elemento integrador

T_d es la constante del elemento derivador

Aplicando transformada de Laplace a (2.57)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_c \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad (2.58)$$

Agregamos un filtro de primer orden a la parte derivativa y nos queda:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_c \left[1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\alpha T_d s + 1} \right] \quad (2.59)$$

Discretizamos (2.59) haciendo

$$s = \frac{1 - z^{-1}}{T}$$

$$\frac{U(z)}{E(z)} = K_c \left[1 + \frac{1}{T_i \left(\frac{1 - z^{-1}}{T} \right)} + \frac{T_d \left(\frac{1 - z^{-1}}{T} \right)}{\alpha T_d \left(\frac{1 - z^{-1}}{T} \right) + 1} \right] \quad (2.60)$$

$$U(z) = K_c \left[1 + \frac{T}{T_i (1 - z^{-1})} + \frac{T_d (1 - z^{-1})}{\alpha T_d (1 - z^{-1}) + T} \right] E(z) \quad (2.61)$$

Multiplicamos ambos lados de la (2.61) por $(1 - z^{-1})$:

$$U(z)(1 - z^{-1}) = K_c \left[(1 - z^{-1}) + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d(1 - z^{-1})^2}{\alpha T_d(1 - z^{-1}) + T} \right] E(z) \quad (2.62)$$

$$\Delta U(z) = K_c \left[(1 - z^{-1})E(z) + \frac{T}{T_i}E(z) + \frac{T_d(1 - z^{-1})^2}{\alpha T_d(1 - z^{-1}) + T}E(z) \right] \quad (2.63)$$

En (2.63) hacemos el cambio:

$$B(z) = \frac{T_d(1 - z^{-1})^2}{\alpha T_d(1 - z^{-1}) + T}E(z) \quad (2.64)$$

Por lo tanto se obtiene

$$\Delta U(z) = K_c \left[(1 - z^{-1})E(z) + \frac{T}{T_i}E(z) + B(z) \right] \quad (2.65)$$

La ecuación (2.64) la pasamos a ecuaciones en diferencias, obteniendo:

$$B(z)[\alpha T_d(1 - z^{-1}) + T] = T_d(1 - 2z^{-1} + z^{-2})E(z) \quad (2.66)$$

$$(\alpha T_d + T)b(k) - \alpha T_d b(k - 1) = T_d[e(k) - 2e(k - 1) + e(k - 2)], \quad (2.67)$$

de donde despejamos $b(k)$:

$$b(k) = \frac{\alpha T_d}{(\alpha T_d + T)}b(k - 1) + \frac{T_d}{(\alpha T_d + T)}[e(k) - 2e(k - 1) + e(k - 2)] \quad (2.68)$$

Por simplicidad, hacemos los siguientes cambios de variables en la ecuación (2.68)

$$b_0 = \frac{\alpha T_d}{(\alpha T_d + T)} \quad (2.69)$$

$$b_1 = \frac{T_d}{(\alpha T_d + T)} \quad (2.70)$$

Finalmente obtenemos la ecuación (2.71)

$$b(k) = b_0 b(k - 1) + b_1 [e(k) - 2e(k - 1) + e(k - 2)] \quad (2.71)$$

La ecuación (2.65) la pasamos a ecuaciones en diferencias:

$$\Delta u(k) = K_c \left[e(k) - e(k - 1) + \frac{T}{T_i}e(k) + b(k) \right] \quad (2.72)$$

La ecuación (2.72) representa la ley de control de los controladores PID

La actualización de la señal de control se realiza de la forma:

$$u(k + 1) = u(k) + \Delta u(k) \quad (2.73)$$

En la Figura 2.24 se muestra los 2 lazos PID implementados para controlar las 2 variables de interés: Flujo de permeado y concentración de permeado. En dicha Figura se tiene también el subsistema denominado Módulo de OI que contiene el modelo matemático presentado en la Figura 2.14.

La sintonización de los controladores se llevó a cabo por pruebas mediante el software Simulink. Los parámetros de ajuste obtenidos para los controladores se presentan a continuación:

Parámetros del controlador de flujo

$$K_c = 0.0001, \quad T_i = 1.673(10^{-10}), \quad T_d = 0, \quad \alpha = 0$$

Parámetros del controlador de concentración

$$K_c = 0.0000006, \quad T_i = -5.7468(10^{-7}), \quad T_d = 0, \quad \alpha = 0$$

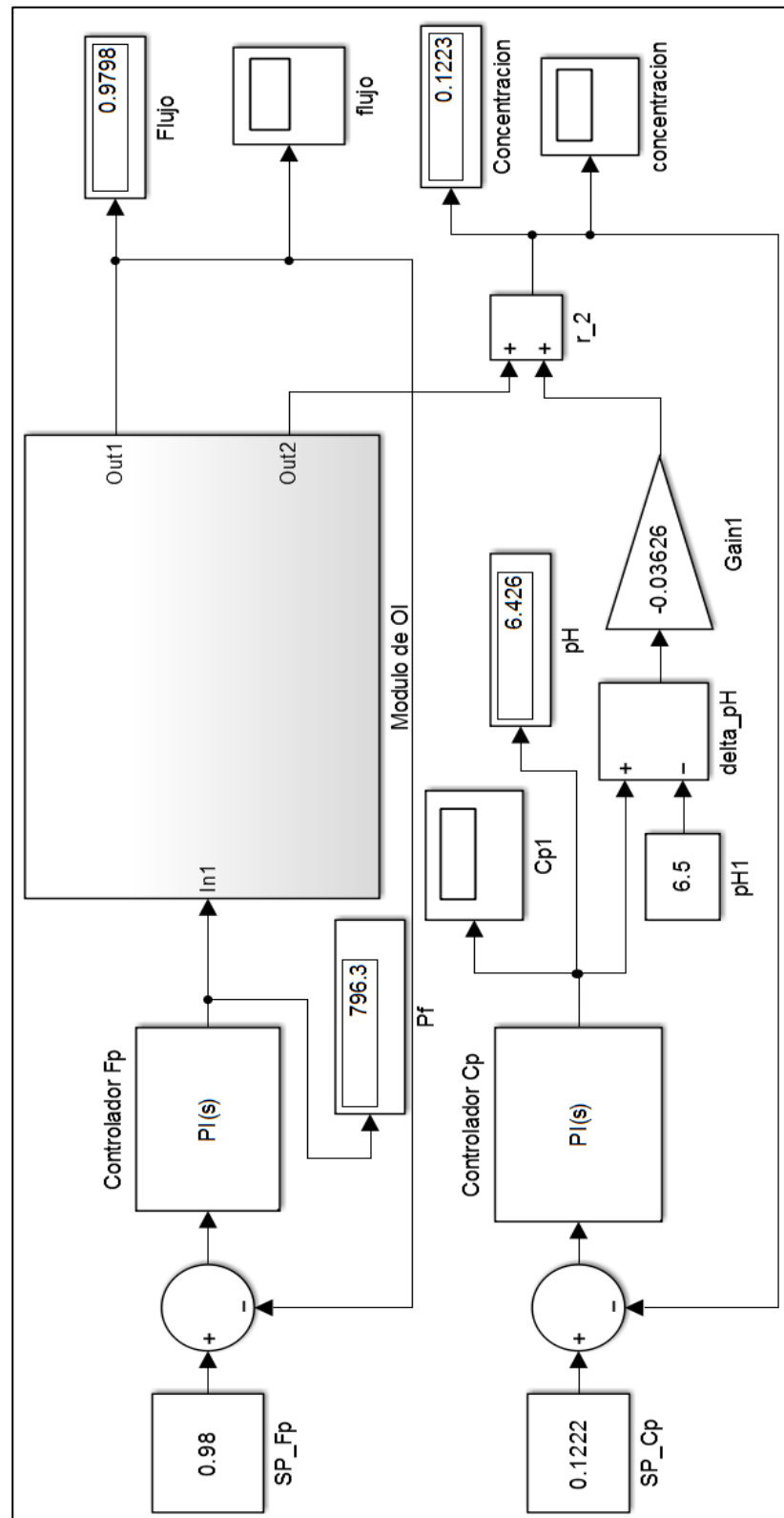


Figura 2.24. Implementación en Simulink

CAPÍTULO 3. DISEÑO DE UN SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS BASADO EN MODELOS DE UNA PLANTA DESALINIZADORA POR ÓSMOSIS INVERSA

3.1. Introducción

En este capítulo se describen los pasos a seguir para el diseño de un sistema de detección y diagnóstico de fallas (SDF). El diseño se enfoca en un sistema de diagnóstico de fallas basado en modelos.

Un sistema de diagnóstico de fallas basado en modelos (DFBM) se basa en la verificación permanente de la consistencia que debe existir las entradas y salidas de un modelo matemático y las mediciones dadas por el proceso o planta real.

En la Figura 3.1 se muestra la estructura del diagnóstico de fallas basado en modelos. Los residuos son señales iguales a cero en ausencia de falla y diferentes de cero cuando se presenta una falla. La comparación del comportamiento de las señales medidas de la planta real con las señales del modelo, permite la generación de ecuaciones residuales o residuos, mediante los cuales será posible la detección de cambios en algún parámetro del modelo y posterior detección de fallas.

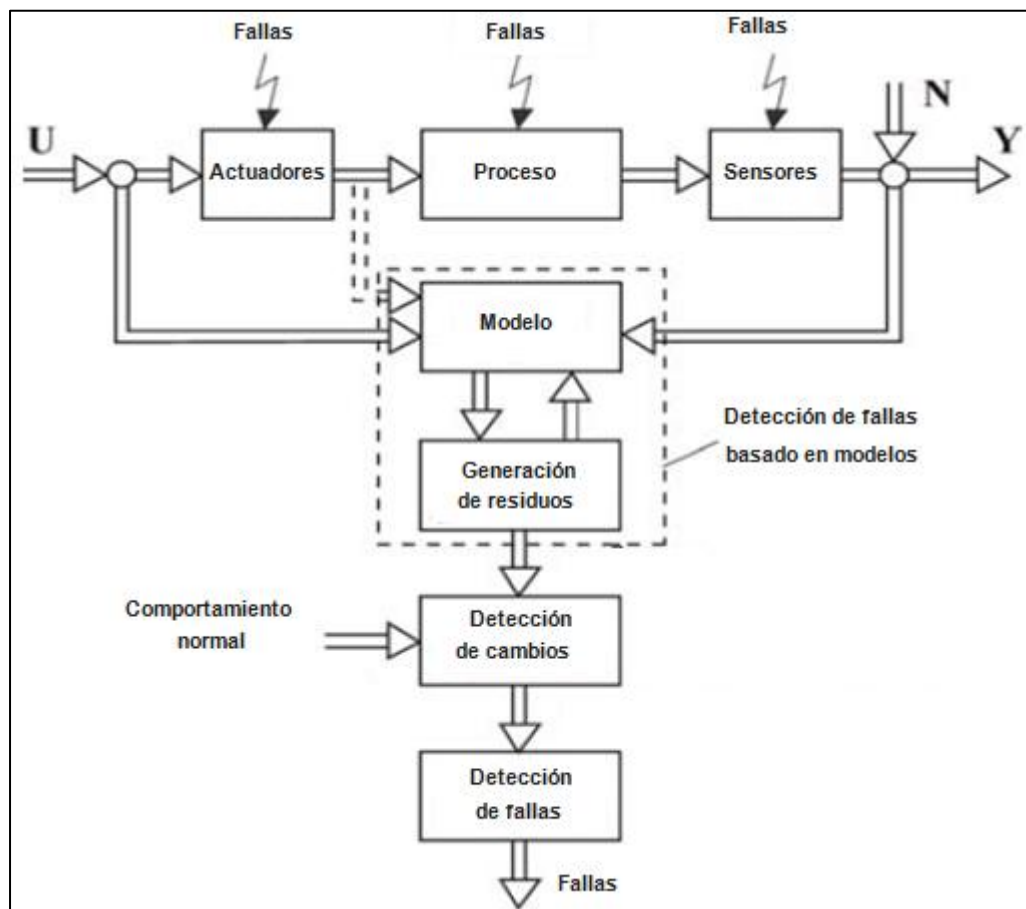


Figura 3.1. Esquema de DFBM

3.2. Fallas

3.2.1. Definición

Una falla es un estado no permitido en el comportamiento de una variable o parámetro, la cual puede ocasionar un mal funcionamiento en el proceso a través de la propagación en otros elementos del sistema.

3.2.2. Tipos de Fallas

3.2.2.1. Fallas aditivas

Se presentan mediante la adición de un valor a las variables medidas del proceso. Este tipo de falla se presenta en sensores, donde se puede producir falla total o por desviación.

3.2.2.2. Fallas Multiplicativas

Se presentan como el producto de una constante a las variables de proceso. Este tipo de fallas se presentan en actuadores, donde un actuador permanece en una de sus posiciones extremas (tipo atasco o saturación), esta falla también puede ocurrir en una posición intermedia del actuador. Generalmente estas fallas son de tipo multiplicativas.

3.3. Modelo estructural

El modelo estructural de un sistema es una abstracción de su modelo matemático en el sentido de que sólo se considera la existencia de enlaces entre variables sin importar el valor de sus parámetros. En este capítulo se desarrolla el análisis estructural del modelo dinámico de la planta desalinizadora por ósmosis inversa analizando su modelo estructural.

Un modelo estructural representa un modelo de comportamiento cualitativo, de bajo nivel y fácil de obtener. (Blanke, 2006). A pesar de su simplicidad, los modelos estructurales proveen mucha información para el diagnóstico de fallas y diseño de controladores tolerantes a fallas, ya que un análisis estructural es capaz de identificar aquellos componentes del sistema que son o no monitoreables para proveer enfoques de diseño de residuos basados en redundancia analítica. (Pérez, 2014).

3.4. Variables conocidas y desconocidas

Las variables del sistema (Z) pueden ser descompuestas en conocidas (K) y desconocidas (X), por tanto:

$$Z = KUX \quad (3.1)$$

Las entradas del sistema son ejemplos de variables que son usualmente conocidas. Las variables conocidas están disponibles en tiempo real y pueden ser directamente usadas en algoritmos de diagnóstico y control tolerante a fallas. Las variables desconocidas no son medidas directamente aunque puede existir algún camino para calcularlas a partir de los valores de las variables conocidas.

3.5. Restricciones

En un modelo estructural la principal asunción es que cada componente está descrito por una o varias restricciones, que son ecuaciones algebraicas o diferenciales que describen el comportamiento dinámico de algún componente del sistema, por tanto la violación de al

menos una restricción indica que este componente se encuentra en falla. (Chantery, 2007). El conjunto de restricciones puede ser descompuesto en:

$$C = C_K \cup C_X \quad (3.2)$$

Donde:

C_K Es el subconjunto de aquellas restricciones que están enlazadas con variables conocidas.

C_X Incluye aquellas restricciones en las cuales aparece al menos una variable desconocida

3.6. Conjunto de Fallas

Se define un adecuado conjunto de fallas f (También llamado firma de fallas) en el modelo para describir el estado de falla en los principales elementos que componen el módulo de ósmosis inversa. Se consideraron en total un conjunto de 8 fallas, 2 en actuadores, 3 en sensores y 3 en parámetros internos del módulo de ósmosis inversa.

El vector de firma de fallas (VFF) se define de la siguiente expresión:

$$f = (f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8) \quad (3.3)$$

Donde:

f1: Falla en sensor de concentración

f2: Falla en sensor de flujo

f3: Falla en la bomba de alta presión (Actuador)

f4: Falla en sensor de temperatura

f5: Falla por desgaste en la membrana (Factores K_w y K_s)

f6: Falla por rotura de membrana (área de membrana)

f7: Falla en el factor de rechazo (ensuciamiento de membrana)

f8: Falla en la bomba de pH (Actuador)

La manera de simular cada una de estas fallas se explicará más adelante en la parte de simulación del sistema sometido a fallas.

3.7. Conjunto de Restricciones de la planta desalinizadora

Para el desarrollo del análisis estructural se requiere un conjunto de restricciones que describan el comportamiento dinámico de la membrana de ósmosis inversa.

De las ecuaciones desarrolladas en el capítulo 2 se obtuvo el siguiente conjunto de 15 restricciones que nos servirán para realizar el análisis estructural del modelo. En la Tabla 3.1 se muestra el conjunto de restricciones utilizadas en el presente análisis estructural.

Tabla 3.1. Conjunto de Restricciones

RESTRICCIÓN	ECUACIÓN
r_1	$\frac{dC_r}{dt} = \frac{1}{m_r} [F_f(C_f - C_r) - F_p(C_p - C_r)]$
r_2	$\Delta P = 0.5(P_f + P_r) - P_p$
r_3	$\Delta \pi = \frac{R_g T_f (C_{m1} - C_p)}{M_m}$
r_4	$J_v = K_w(\Delta P - \sigma \Delta \pi)$
r_5	$F_p = A J_v$
r_6	$C_p = \frac{C_f}{\left[1 + \frac{K_w}{K_s}(\Delta P - \sigma \Delta \pi) \left(1 - \frac{F_p}{2F_f}\right)\right]}$
r_7	$C_{m1} = C_p \left[1 + \frac{K_w}{K_s}(\Delta P - \sigma \Delta \pi)\right]$
r_8	$F_s = K_s A (C_{m1} - C_p)$
r_9	$F_p = \frac{F_s}{C_p}$
r_{10}	$F = e^{\left[\frac{-J_v(1-\sigma)}{K_s}\right]}$
r_{11}	$R = \frac{(1-F)\sigma}{1-\sigma F}$
r_{12}	$C_p = C_{m1}(1-R)$
r_{13}	$C_{ps} = C_p + C_{pH}$
r_{14}	$C_{pH} = -0.03626(pH - 7)$
r_{15}	$C_{m1} = \frac{F_f C_f + (F_f - F_p) C_r}{2F_f - F_p}$

3.8. Matriz de fallas

Esta matriz relaciona las fallas del vector de firma de fallas con las restricciones en las que aparece la variable asociada a cada falla, una misma variable a la que se le asigna una falla aparece en varias restricciones, pero la falla sólo se le asigna a una de ellas. El criterio para relacionar las fallas con las restricciones, es que la variable o parámetro que representa una determinada falla aparezca en la restricción.

En el caso que la variable que representa una falla aparezca en más de una restricción, se elegirá aquella restricción donde la variable tenga dinámica temporal. La Tabla 3.2 muestra la relación de las 8 fallas consideradas con la restricción donde aparecen.

Tabla 3.2. Matriz de fallas

		Fallas							
		f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8
Restricciones	$r1$								
	$r2$			x					
	$r3$				x				
	$r4$					x			
	$r5$								
	$r6$								
	$r7$							x	
	$r8$						x		
	$r9$		x						
	$r10$								
	$r11$								
	$r12$								
	$r13$	x							
	$r14$								x
	$r15$								

3.9. Matriz de incidencia

La matriz de incidencia es un arreglo de datos que nos permite relacionar cada restricción con sus respectivas variables conocidas, variables desconocidas y fallas asociadas. Esto se realiza con el objetivo de simplificar la tarea de emparejamiento de restricciones.

Las restricciones se ordenan por filas y las variables y fallas se ordenan en columnas

En la Tabla 3.3 se muestra la matriz de incidencia obtenida para el modelo estructural de la planta desalinizadora por ósmosis inversa, donde se ha marcado con una “x” aquellas variables conocidas y desconocidas y fallas que aparecen en una determinada restricción.

3.10. Emparejamiento (Matching)

Una herramienta básica para el análisis estructural es el concepto de emparejamiento. En términos sencillos, un emparejamiento es un procedimiento mediante el cual se asocia variables desconocidas del modelo con el conjunto de restricciones a partir de las cuales pueden ser calculadas. Las variables desconocidas que no pueden ser emparejadas no pueden ser calculadas. Las variables que pueden ser emparejadas de varias formas pueden ser determinadas de diferentes maneras lo cual provee un medio para la detección de fallas y posibilidad de reconfiguración.

3.11. Rango de restricciones

El rango de una restricción nos indica el orden en que dicha restricción debe ser resuelta para encontrar el valor de una determinada variable desconocida a partir del conocimiento de las variables conocidas, si el rango de una restricción es cero significa que alguna variable desconocida asociada a esa restricción puede conocerse inmediatamente al reemplazar las variables conocidas en dicha restricción, las de rango uno deben resolverse después de las de rango cero y así sucesivamente.

Tabla 3.3. Matriz de Incidencia

	VARIABLES CONOCIDAS					VARIABLES DESCONOCIDAS										FALLAS							
	P_f	pH	F_p	C_{ps}	T_f	C_p	C_r	ΔP	$\Delta \pi$	J_v	C_{m1}	F_s	F	R	C_{pH}	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8
r_1			X			X	X																
r_2	X							X										X					
r_3					X	X			X		X								X				
r_4								X	X	X										X			
r_5			X							X													
r_6			X			X		X	X														
r_7						X		X	X		X											X	
r_8						X					X	X									X		
r_9			X			X						X					X						
r_{10}										X			X										
r_{11}													X	X									
r_{12}						X					X			X									
r_{13}				X		X									X	X							
r_{14}		X													X								X
r_{15}			X				X				X												

3.12. Relaciones de redundancia analítica

Las relaciones de redundancia (RRA) son también conocidas como redundancias mediante software o elemento virtual. Consisten en la incorporación de conjuntos de ecuaciones que reconstruye el valor de un elemento en falla mediante la estimación de las mismas, así se evita la incorporación de nuevo hardware en el sistema.

Se pueden obtener relaciones de redundancia analítica si luego de realizado el emparejamiento de restricciones se obtienen ecuaciones residuales.

3.13. Algoritmo de Ranking

El Algoritmo de Ranking es un algoritmo de emparejamiento mediante el cual, además del emparejamiento de las restricciones, se puede obtener el rango de cada restricción, también se puede obtener el conjunto de ecuaciones residuales que caracterizan el sistema en su modo normal de funcionamiento (los residuos permanecen iguales a cero) y mediante las cuales se puede detectar las fallas (los residuos toman valores distintos de cero cuando se produce la falla). (Blanke, 2006).

En el Cuadro 3.1 se muestra el Algoritmo de Ranking que se aplica para la matriz de incidencia mostrada en la Tabla 3.3.

Algoritmo de Ranking
1. Marcar todas las variables conocidas. Inicializar variable $i = 0$
2. Encontrar todas las restricciones en la tabla actual con exactamente una variable no marcada. Asociar el rango i con estas restricciones y marcar estas restricciones, así como la correspondiente variable.
3. Hacer $i = i + 1$
4. Si hay restricciones no marcadas cuyas variables están todas marcadas, asociarlas con el rango i , marcarlas y conectarlas con la pseudovariable ZERO (residuo)
5. Si hay variables o restricciones no marcadas, continuar con el paso 2.

Cuadro 3.1. Algoritmo de Ranking

Aplicando el algoritmo presentado anteriormente, se calculó el rango de cada restricción y se obtuvieron los residuos a partir de los cuales se determinarán las relaciones de redundancia analítica. Dicho cálculo se presenta en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Cálculo de rangos y residuos

	VARIABLES CONOCIDAS					VARIABLES DESCONOCIDAS										FALLAS									
	P_f	pH	F_p	C_{ps}	T_f	C_p	C_r	ΔP	$\Delta \pi$	J_v	C_{m1}	F_s	F	R	C_{pH}	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	Rank	Zero
r_1			x			x	x																	2	
r_2	x							x										x						0	
r_3					x	x			x		x								x					2	
r_4								x	x	x										x				1	
r_5			x							x														0	
r_6			x			x		x	x															2	Z
r_7						x		x	x		x											x		2	
r_8						x					x	x									x			3	Z
r_9			x			x						x					x							2	
r_{10}										x			x											1	
r_{11}													x	x										2	
r_{12}						x					x			x										3	Z
r_{13}				x		x									x	x								1	
r_{14}		x													x								x	0	
r_{15}			x				x				x													3	Z

3.14. Cálculo de relaciones de redundancia analítica del modelo estructural del módulo de ósmosis inversa.

Como resultado de la aplicación del algoritmo de Ranking, de la Tabla 3.4 se observa que las restricciones 6, 8, 12, 15 representan las ecuaciones residuales del modelo.

- Las restricciones de rango 0 son r2, r5 y r14
- Las restricciones de rango 1 son r4, r10 y r13
- Las restricciones de rango 2 son r1, r3, r7, r11
- El residuo de rango 2 es r6
- Los residuos de rango 3 son r8, r12, r15

Las RRA se calculan a partir de las ecuaciones residuales obtenidas. Estas ecuaciones fueron: r_6, r_8, r_{12}, r_{15}

$$r_6: C_p = \frac{C_f}{\left[1 + \frac{K_w}{K_s} (\Delta P - \sigma \Delta \pi) \left(1 - \frac{F_p}{2F_f}\right)\right]} \quad (3.4)$$

$$r_8: F_s = K_s A (C_{m1} - C_p) \quad (3.5)$$

$$r_{12}: R = 1 - \frac{C_p}{C_{m1}} \quad (3.6)$$

$$r_{15}: C_{m1} = \frac{F_f C_f + (F_f - F_p) C_r}{2F_f - F_p} \quad (3.7)$$

Para obtener relaciones de redundancia analítica a partir de las ecuaciones residuales, se realiza reemplazos sucesivos en las ecuaciones residuales, de tal manera que quede expresada en función de variables conocidas. Las variables conocidas para el modelo de la planta de ósmosis inversa son:

- **P_f** : Presión de alimentación
- **pH** : pH de alimentación
- **F_p** : Señal del sensor de flujo (con ruido)
- **C_p** : Señal del sensor de concentración (con ruido)
- **T_f** : Señal del sensor de temperatura (con ruido)

Los reemplazos en función de variables conocidas se muestran a continuación donde las variables conocidas se resaltan en negrita.

3.14.1. Relación de redundancia analítica 1

Comenzamos los reemplazos de la ecuación (3.4) en función de variables conocidas.

$$C_p = \frac{C_f}{\left[1 + \frac{K_w}{K_s} (\Delta P - \sigma \Delta \pi) \left(1 - \frac{F_p}{2F_f}\right)\right]}$$

$$C_p = \frac{C_f}{\left[1 + \frac{K_w}{K_s} (0.5(P_f + P_r) - P_p - \sigma \Delta \pi) \left(1 - \frac{F_p}{2F_f}\right)\right]}$$

$$C_p - \frac{C_f}{\left[1 + \frac{K_w}{K_s} \left(0.5 \left(\mathbf{P}_f + (\mathbf{P}_f - P_p)\right) - P_p - \sigma \left(\frac{R_g \mathbf{T}_f (C_{m1} - C_p)}{M_m}\right)\right) \left(1 - \frac{\mathbf{F}_p}{2F_f}\right)\right]} = 0$$

$$C_p - \frac{C_f}{\left[1 + \frac{K_w}{K_s} \left(0.5 \left(\mathbf{P}_f + (\mathbf{P}_f - P_p)\right) - P_p - \sigma \left(\frac{R_g \mathbf{T}_f \left(\frac{2F_f C_f - \mathbf{F}_p C_p}{2F_f - \mathbf{F}_p} - (C_p)\right)}{M_m}\right)\right) \left(1 - \frac{\mathbf{F}_p}{2F_f}\right)\right]} = 0 \quad (3.8)$$

Finalmente al hacer el reemplazo: $C_p = \mathbf{C}_{ps} + 0.03626(\mathbf{pH} - 7)$ obtendremos la relación de redundancia analítica 1.

3.14.2. Relación de redundancia analítica 2

Comenzamos los reemplazos a partir de (3.5) en función de variables conocidas.

$$F_s = K_s A (C_{m1} - C_p)$$

Realizamos los reemplazos sucesivos

$$F_p C_p = K_s A \left(\frac{2F_f C_f - F_p C_p}{2F_f - F_p} - C_p \right)$$

$$F_p C_p = K_s A \left(\frac{2F_f C_f - F_p C_p - C_p (2F_f - F_p)}{2F_f - F_p} \right)$$

$$F_p C_p - 2K_s A \left(\frac{F_f C_f - C_p F_f}{2F_f - F_p} \right) = 0$$

Finalmente hacemos el reemplazo: $C_p = \mathbf{C}_{ps} + 0.03626(\mathbf{pH} - 7)$ para obtener la relación de redundancia analítica 2.

$$\mathbf{F}_p \left(\mathbf{C}_{ps} + 0.03626(\mathbf{pH} - 7) \right) - 2K_s A \left(\frac{F_f C_f - \left(\mathbf{C}_{ps} + 0.03626(\mathbf{pH} - 7) \right) F_f}{2F_f - \mathbf{F}_p} \right) = 0 \quad (3.9)$$

3.14.3. Relación de redundancia analítica 3

Comenzamos los reemplazos a partir de (3.6) en función de variables conocidas.

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_{m1}}$$

$$\frac{(1 - F)\sigma}{1 - \sigma F} = 1 - \frac{C_p}{C_{m1}}$$

$$\frac{\left(1 - e^{\left[\frac{-J_v(1-\sigma)}{K_s}\right]}\right)\sigma}{1 - \sigma e^{\left[\frac{-J_v(1-\sigma)}{K_s}\right]}} - 1 + \frac{C_p}{C_{m1}} = 0$$

$$\frac{\left(1 - e^{\left[\frac{-F_p(1-\sigma)}{A K_s}\right]}\right) \sigma}{1 - \sigma e^{\left[\frac{-F_p(1-\sigma)}{A K_s}\right]}} - 1 + \frac{C_p}{\frac{2F_f C_f - F_p C_p}{2F_f - F_p}} = 0$$

Obteniendo de esta manera la relación de redundancia analítica 3 (3.10)

$$\frac{\left(1 - e^{\left[\frac{-F_p(1-\sigma)}{A K_s}\right]}\right) \sigma}{1 - \sigma e^{\left[\frac{-F_p(1-\sigma)}{A K_s}\right]}} - 1 + \frac{C_{ps} + 0.03626(pH - 7)}{\frac{2F_f C_f - F_p C_{ps} + 0.03626(pH - 7)}{2F_f - F_p}} = 0 \quad (3.10)$$

3.14.4. Relación de redundancia analítica 4

Comenzamos los reemplazos a partir de (3.7) en función de variables conocidas.

$$\begin{aligned} C_{m1} &= \frac{F_f C_f + (F_f - F_p) C_r}{2F_f - F_p} \\ C_p \left[1 + \frac{K_w}{K_s} (\Delta P - \sigma \Delta \pi) \right] - \frac{F_f C_f + (F_f - F_p) C_r}{2F_f - F_p} &= 0 \\ C_p \left[1 + \frac{K_w}{K_s} \left(0.5(P_f + (P_f - P_p)) - P_p - \sigma \frac{R_g T_f \left(\frac{2F_f C_f - F_p C_p}{2F_f - F_p} - C_p \right)}{M_m} \right) \right] - \frac{F_f C_f + (F_f - F_p) C_r}{2F_f - F_p} &= 0 \\ C_p \left[1 + \frac{K_w}{K_s} \left(0.5(P_f + (P_f - P_p)) - P_p - \sigma \frac{2R_g T_f \left(\frac{F_f C_f - C_p F_f}{2F_f - F_p} \right)}{M_m} \right) \right] - \frac{2F_f C_f - F_p C_p}{2F_f - F_p} &= 0 \quad (3.11) \end{aligned}$$

Finalmente hacemos el reemplazo: $C_p = C_{ps} + 0.03626(pH - 7)$ y obtendremos la relación de redundancia analítica 4.

De acuerdo a las ecuaciones del modelo, existen distintas formas de calcular ciertas variables internas del modelo, a partir de variables conocidas del modelo. En los siguientes cálculos el subíndice “r” hace referencia a que se trata de variables reconstruidas. Las variables conocidas se resaltan en negra.

Reconstrucción de velocidad de solvente en función de la variable conocida F_{ps}

$$J_{vr1} = \frac{F_{ps}}{A} \quad (3.12)$$

Reconstrucción de diferencia de caídas de presión D_{pres}

$$D_{pres} r1 = \frac{J_{vr1}}{K_w} \quad (3.13)$$

Reconstrucción de C_p y C_r internos del modelo

Se debe tener en cuenta que no es lo mismo C_p y C_{ps} , la variable de concentración de permeado debido a la presión de alimentación es C_p . Mientras que C_{ps} es la señal sensada de concentración, esta señal incluye el aporte de concentración debido al pH, es decir:

$C_{ps} = C_p + C_{pH}$, además de (2.55), se sabe que $C_{pH} = -0.03626(pH_f - pH_i)$, por tanto el C_p interno se calcula de la siguiente manera

$$C_{pi} = C_{ps} + 0.03626(pH - 7) \quad (3.14)$$

$$C_{ri} = (F_f C_f - F_{ps} C_{pi}) / (F_f - F_{ps}) \quad (3.15)$$

Primera forma de reconstrucción de C_{m1}

$$C_{m1}r1 = \frac{(F_f C_f + (F_f - F_{ps}) * C_{ri})}{(2F_f - F_{ps})} \quad (3.16)$$

Segunda forma de reconstrucción de C_{m1}

$$C_{m1}r2 = \frac{(2F_f C_f - F_{ps} C_{pi})}{2F_f - F_{ps}} \quad (3.17)$$

Tercera forma de reconstrucción de C_{m1}

$$C_{m1}r3 = C_{pi} * \left(1 + \frac{K_w}{K_s} D_{pres} r1\right) \quad (3.18)$$

Reconstrucción de ϕ

$$\phi_{r1} = e^{J_{vr1}/k} \quad (3.19)$$

Cuarta forma de reconstrucción de C_{m1}

$$C_{m1}r4 = C_{pi} + \phi_{r1}(C_f - C_{pi}) \quad (3.20)$$

Quinta forma de reconstrucción de C_{m1} (Forma aproximada)

$$C_{m1}r5 = \phi_{r1} C_f \quad (3.21)$$

Reconstrucción de F

$$F_{r1} = e^{\left(\frac{-J_{vr1}(1-\sigma)}{K_s}\right)} \quad (3.22)$$

Reconstrucción de R

$$R_{r1} = \frac{(1 - F_{r1})\sigma}{1 - \sigma F_{r1}} \quad (3.23)$$

Sexta forma de reconstrucción de C_{m1}

$$C_{m1}r6 = \frac{C_{pi}}{1 - R_{r1}} \quad (3.24)$$

Séptima forma de reconstrucción de C_{m1}

$$C_{m1}r7 = C_{pi} \frac{(F_{ps} + K_s A)}{K_s A} \quad (3.25)$$

Reconstrucción de C_p

$$C_{pr} = \frac{\phi_{r1}(1 - R_{r1})C_f}{\phi_{r1} + R_{r1}(1 - \phi_{r1})} \quad (3.26)$$

Reconstrucción de ΔP

$$P_r = P_f - P_p$$

$$\Delta P_r = 0.5(P_f + P_r) - P_p$$

Reconstrucción de $\Delta \pi$

De las ecuaciones de del modelo es posible despejar $\Delta \pi_{r1}$ de la siguiente manera:

$$\Delta \pi_{r1} = \frac{(R_g T_s C_{pi} K_w (\Delta P_r))}{M_m K_s + R_g T_s C_{pi} K_w \sigma} \quad (3.27)$$

3.14.5. Relación de redundancia analítica 5

La RRA 5 la obtenemos por la diferencia de las variables factor de rechazo, similar a la ecuación (3.6) basada en la ecuación residual r_{12} , donde también se presenta esta diferencia, esta vez esta restricción será calculada de una segunda forma para generar la RRA 5.

$$D_{pres} r2 = \Delta P_r - \sigma \Delta \pi_{r1} \quad (3.28)$$

$$J_{vr2} = K_w * (D_{pres} r2) \quad (3.29)$$

$$F_{r2} = e^{\left(\frac{-J_{vr2}(1-\sigma)}{K_s}\right)} \quad (3.30)$$

$$R_{r2} = \frac{(1 - F_{r2})\sigma}{1 - \sigma F_{r2}} \quad (3.31)$$

$$RR5 = R_{r2} - \frac{C_{m1} r3 - C_{pi}}{C_{m1} r3} \quad (3.32)$$

3.14.6. Relación de redundancia analítica 6

La RRA 6 la obtenemos mediante la resta de las variables de sensor de concentración obtenidas, similar a la ecuación (3.4) basada en la ecuación residual r_6

$$C_p = C_{ps} + 0.03626(pH - 7)$$

$$C_{pH} = -0.03626(pH - 7)$$

$$C_{ps1} = C_{pr} + C_{pH}$$

$$RR6 = C_{ps1} - C_{ps} \quad (3.33)$$

3.14.7. Relación de redundancia analítica 7

La RRA 7 la obtenemos mediante la resta de las variables internas referidas velocidad de solvente J_v , obtenidas nuevamente de dos maneras diferentes a partir de las variables reconstruidas.

$$J_{vr3} = k * \ln\left(\frac{C_{m1} r1}{C_f}\right)$$

$$RR7 = J_{vr3} - J_{vr1} \quad (3.34)$$

3.14.8. Relación de redundancia analítica 8

La RRA 8 la obtenemos mediante la resta de las variables $(C_p - C_p)$, mediante la resta de las variables de sensor de concentración obtenidas, similar a la ecuación (3.4) basada en la ecuación residual r_6

$$RR8 = \frac{C_{m1}r^4}{\left(1 + \left(\frac{K_w}{K_s}\right)D_{pres}r1\right)} - \frac{C_f}{\left[1 + \frac{K_w}{K_s}(D_{pres}r1)\left(1 - \frac{F_{ps}}{2F_f}\right)\right]} \quad (3.35)$$

3.14.9. Relación de redundancia analítica 9

La RRA 9 la obtenemos mediante la resta de las variables $(C_p - C_p)$, mediante la resta de las variables de sensor de concentración obtenidas, similar a la ecuación (3.4) basada en la ecuación residual r_6

$$RR9 = \frac{C_{m1}r^5}{\left(1 + \left(\frac{K_w}{K_s}\right)D_{pres}r1\right)} - \frac{C_f}{\left[1 + \frac{K_w}{K_s}(D_{pres}r1)\left(1 - \frac{F_{ps}}{2F_f}\right)\right]} \quad (3.36)$$

3.14.10. Relación de redundancia analítica 10

La RRA 10 la obtenemos mediante la resta de las variables $(\phi - \phi)$, obtenidas de dos maneras diferentes a partir de las variables reconstruidas.

$$\phi_1 = (C_{m1}r1 - C_{pi})/(C_f - C_{pi})$$

$$RR10 = \phi_1 - \phi_{o1} \quad (3.37)$$

3.14.11. Señal de error 1

$$ERR1 = F_{pref} - F_{ps} \quad (3.38)$$

3.14.12. Señal de error 2

$$ERR2 = C_{pref} - C_{ps} \quad (3.39)$$

Las RRA 11 y RRA 12 corresponden a los errores de los controladores. Se incluyó este par de relaciones para facilitar el análisis de aislabilidad o diagnosticabilidad, que se explicará más adelante.

Hay muchas combinaciones posibles para formar RRA, estas 10 solo son algunas que fueron tomadas por los buenos resultados de aislabilidad de fallas obtenidos mediante pruebas.

3.15. Análisis de detectabilidad

3.15.1. Sistema en modo normal de funcionamiento

Para realizar el análisis del comportamiento del diagnosticador de fallas, se implementó en conjunto de 10 relaciones de redundancia analítica diseñadas y las 2 señales

de error de los controladores. Todas las simulaciones se realizaron hasta el tiempo 1200 segundos. Es necesario visualizar todas las RRA en conjunto para poder comprender la detectabilidad y posterior aislabilidad de fallas. En la Figura 3.2 se muestra el diagnosticador de fallas cuando el sistema no se encuentra sometido a ninguna falla, es decir, se encuentra en su modo normal de funcionamiento.

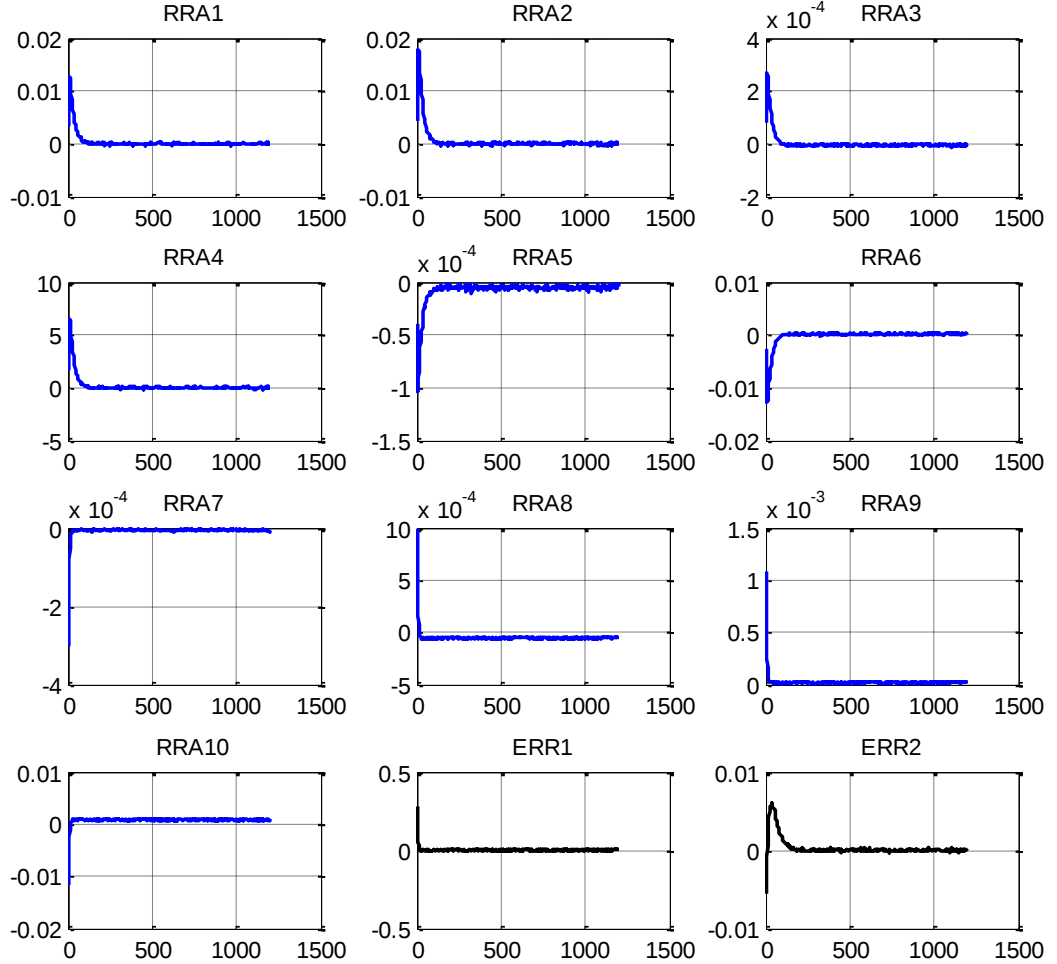


Figura 3.2. Sistema en modo normal de funcionamiento

De la Figura 3.2 se observa que las 10 RRA diseñadas permanecen en cero o en un valor muy cercano a cero, lo que nos indica que no hay presencia de fallas que afecten al sistema. Algunas RRA toman valores distintos a cero debido a las aproximaciones que se hicieron en algunas ecuaciones del modelo, que a su vez afectaron a las relaciones de redundancia analítica. Se observa también que las señales de los errores de los controladores permanecen en cero. Las RRA se graficaron en color azul y los errores de controladores en color negro.

Por motivos de simulación, en todos los casos se considerarán fallas tipo pulso, es decir aquellas que ocurren sólo durante un intervalo de tiempo definido, para mostrar el desbalance de las RRA cuando ocurre una falla.

3.15.2. Falla en el sensor de concentración.

Las fallas en sensores se consideran de tipo aditivas, por ello, para simular una falla en el sensor de concentración, se tomó un offset aditivo del 50% de la variable de concentración de permeado durante el intervalo de tiempo de 600 a 650 segundos. La falla fue detectada por las RRA1, RRA2, RRA3, RRA4, RRA5, RRA6, RRA7 y RRA8. Vemos del conjunto de RRAs que esta falla no fue detectada por las RRA9, RRA10. En la Figura 3.3 se muestran estos resultados.

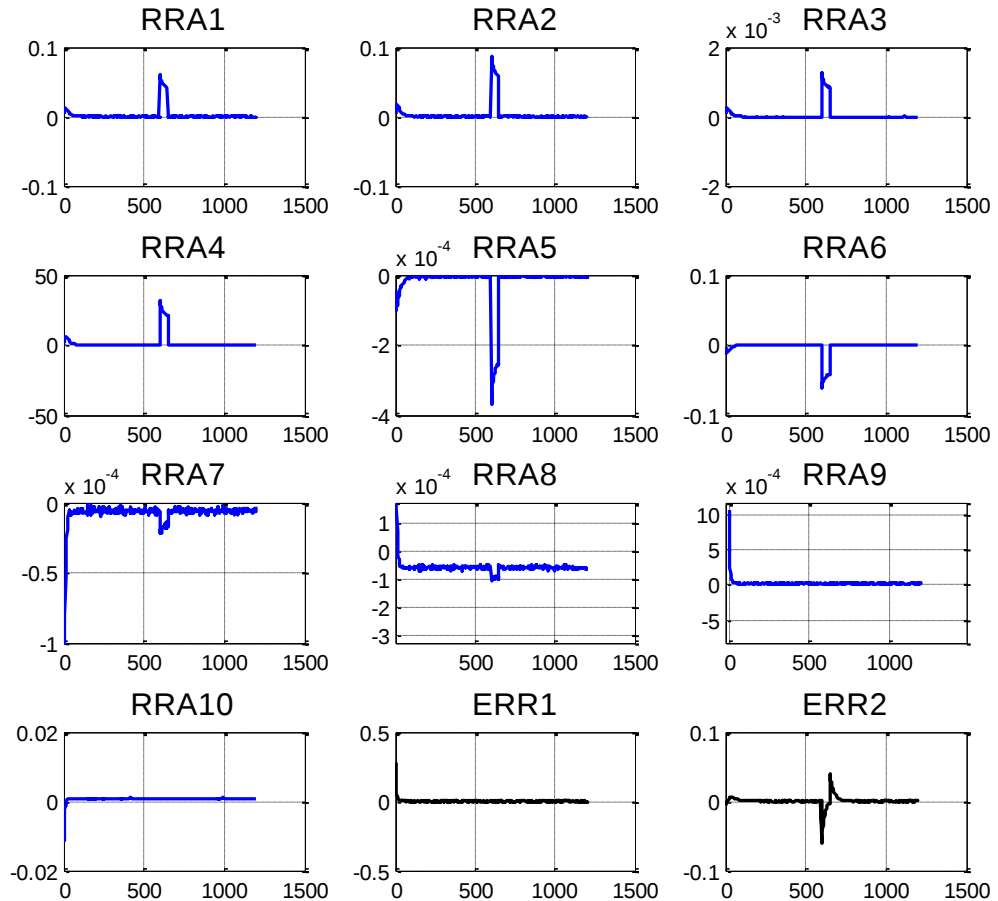


Figura 3.3. Falla en sensor de concentración

3.15.3. Falla en el sensor de flujo.

Para simular una falla en el sensor de flujo, se tomó un offset aditivo del 50% de la variable de flujo de permeado, durante el intervalo de tiempo de 500 a 550 segundos. La falla fue detectada por todas las RRA. Esto es debido que hay una fuerte interacción de la variable flujo de permeado con las demás variables del modelo.

La Figura 3.4 muestra los resultados de simulación para esta falla. Se observa desbalance de las RRA en el tiempo especificado para esta falla.

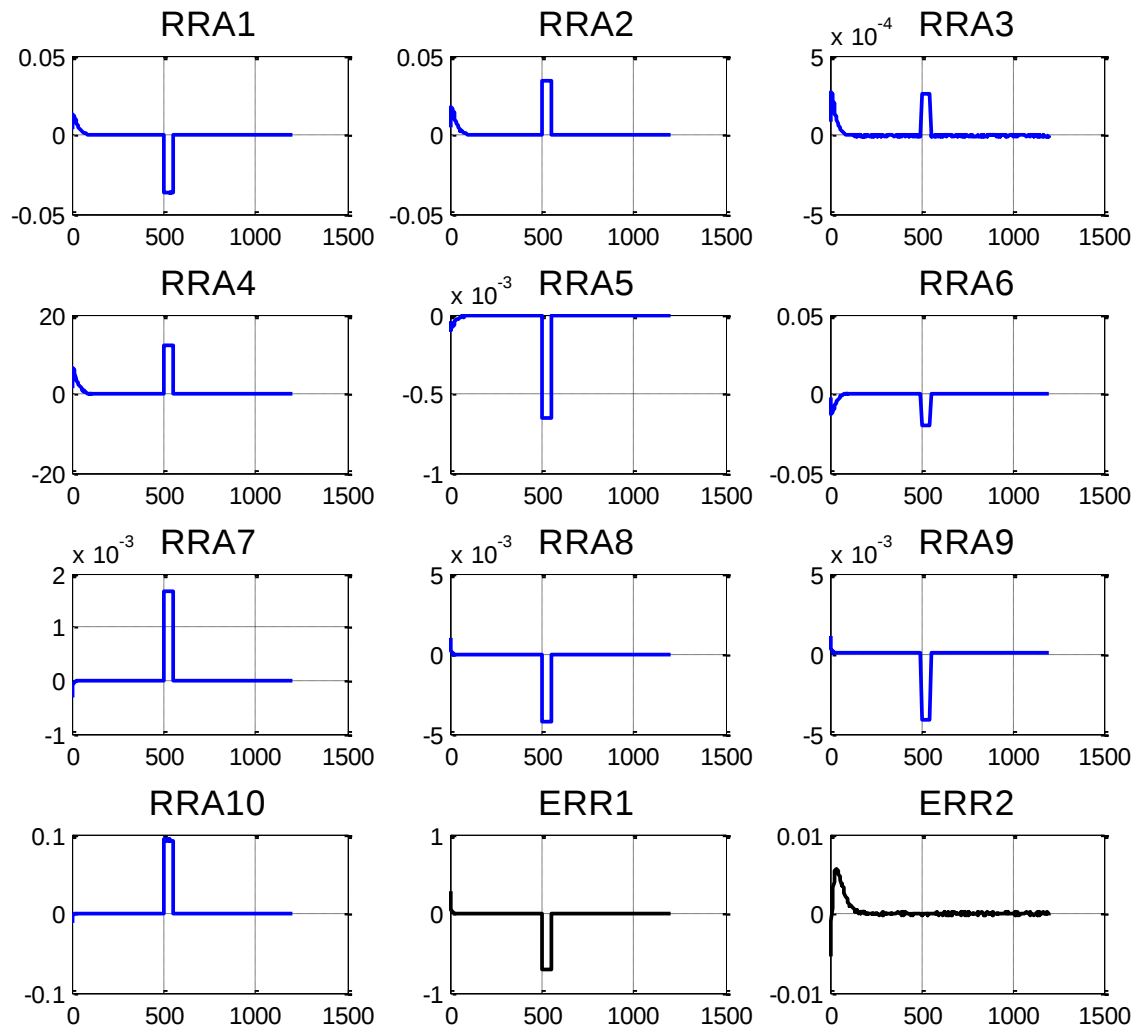


Figura 3.4. Falla en sensor de flujo

3.15.4. Falla actuador de presión de alimentación.

Para simular la falla en la señal del actuador de presión, se colocó la señal de presión de alimentado en cero (falla por bloqueo total) a partir del tiempo 150 a hasta los 200 segundos. Esta falla fue detectada por todas las RRA, esto debido a que es difícil aislar esta falla ya que, según el modelo desarrollado, todas las variables se calculan a partir de la presión de alimentación. La figura 3.5 muestra el resultado de simulación de falla en actuador de presión.

De la Figura 3.5 se puede apreciar también la característica de esta falla, la falla de presión ocasiona un desbalance en las RRAs, pero estas RRAs regresan nuevamente a su valor original una vez que termina la falla.

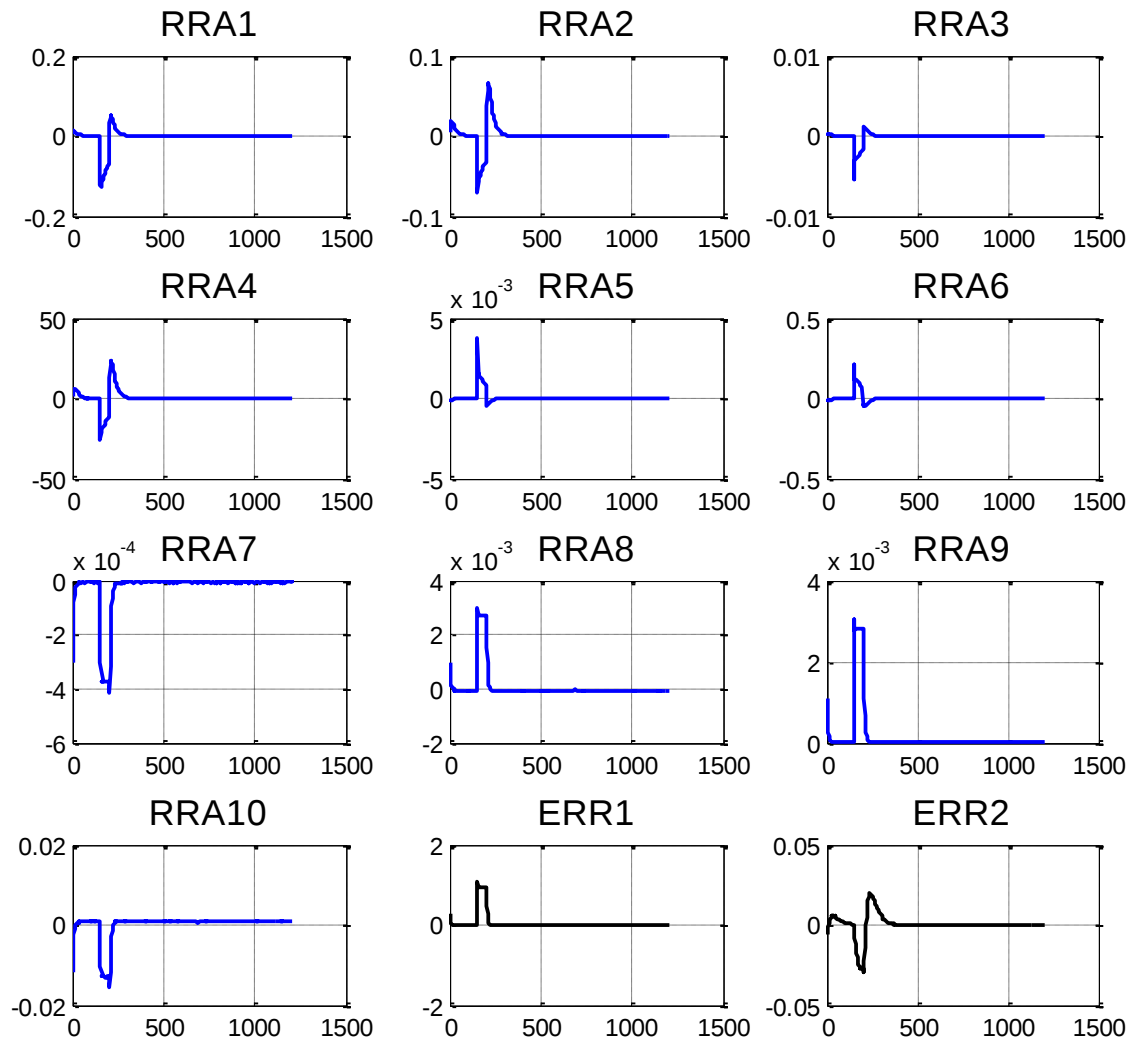


Figura 3.5. Falla en actuador de presión de alimentación

3.15.5. Falla en el sensor de temperatura.

Para simular una falla en el sensor de temperatura, se tomó un offset aditivo del 50% de la variable de temperatura de la solución, durante el intervalo de tiempo de 900 a 950 segundos.

La Figura 3.6 muestra que esta falla fue detectada por las RRA1 y RRA5, ocurrió desbalance de solo 2 RRAs, esto es debido a que la variable temperatura aparece sólo en estas dos relaciones de redundancia analítica.

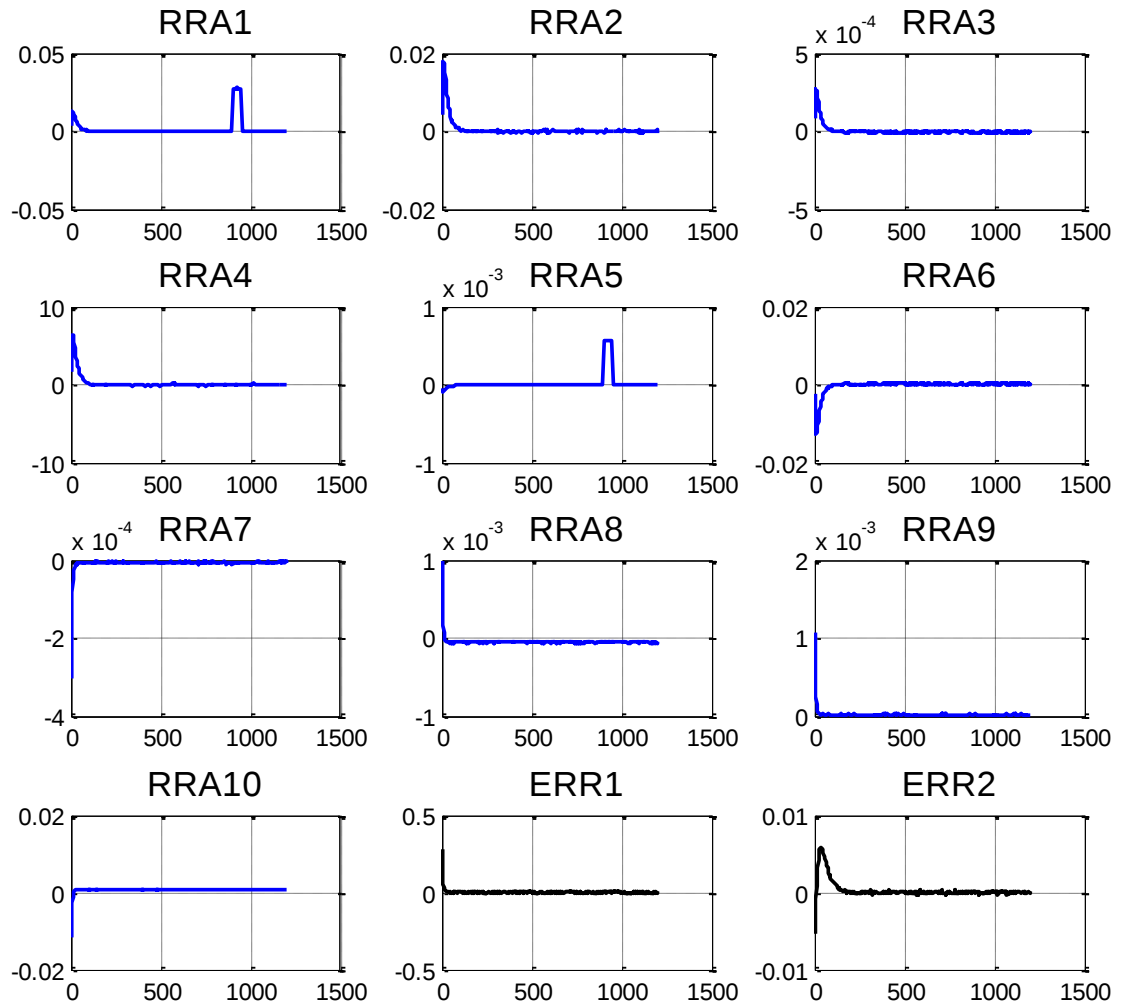


Figura 3.6. Falla en sensor de temperatura

3.15.6. Falla por desgaste de la membrana

Se puede simular el desgaste de la membrana de ósmosis inversa tomando en cuenta la interacción de los factores de permeabilidad. El factor de permeabilidad de la membrana para el paso de agua (K_w) y el factor de permeabilidad de la membrana para el paso de sales (K_s) fueron considerados

Para simular una falla por desgaste de membrana se redujo el valor de K_w en un 10% y se incrementó K_s en un 10%. Con esto se reduce la capacidad de la membrana de permitir el paso de agua en un 10% y se incrementa la capacidad de la membrana de permitir el paso de sales en un 10%. Esta es una condición no deseada ya que lo que se quiere en el proceso de ósmosis inversa es evitar en lo posible el paso de sales y permitir el paso de agua pura. De esta manera es que se puede simular una falla por desgaste de la membrana.

La simulación de esta falla se llevó a cabo para el tiempo 800 a 850 segundos. Esta falla fue detectada todas las RRAs. La figura 3.7 muestra la simulación de esta falla y cómo ocurre un desbalance en las ecuaciones residuales. Se observa que el efecto de la ocurrencia de la falla permanece en el tiempo incluso cuando ha concluido la falla, esto se puede explicar teniendo en cuenta la magnitud de estos factores, como se definió en el capítulo 2, las magnitudes de estos factores fueron.

$$K_w = 2.05(10^{-9})$$

$$K_s = 2.03(10^{-5})$$

El cambio de estos valores afectará la dinámica del sistema de manera significativa, evitando que vuelva a su estado estacionario inicial, además estos son parámetros intrínsecos del modelo y su variación afecta a prácticamente todas las variables del sistema.

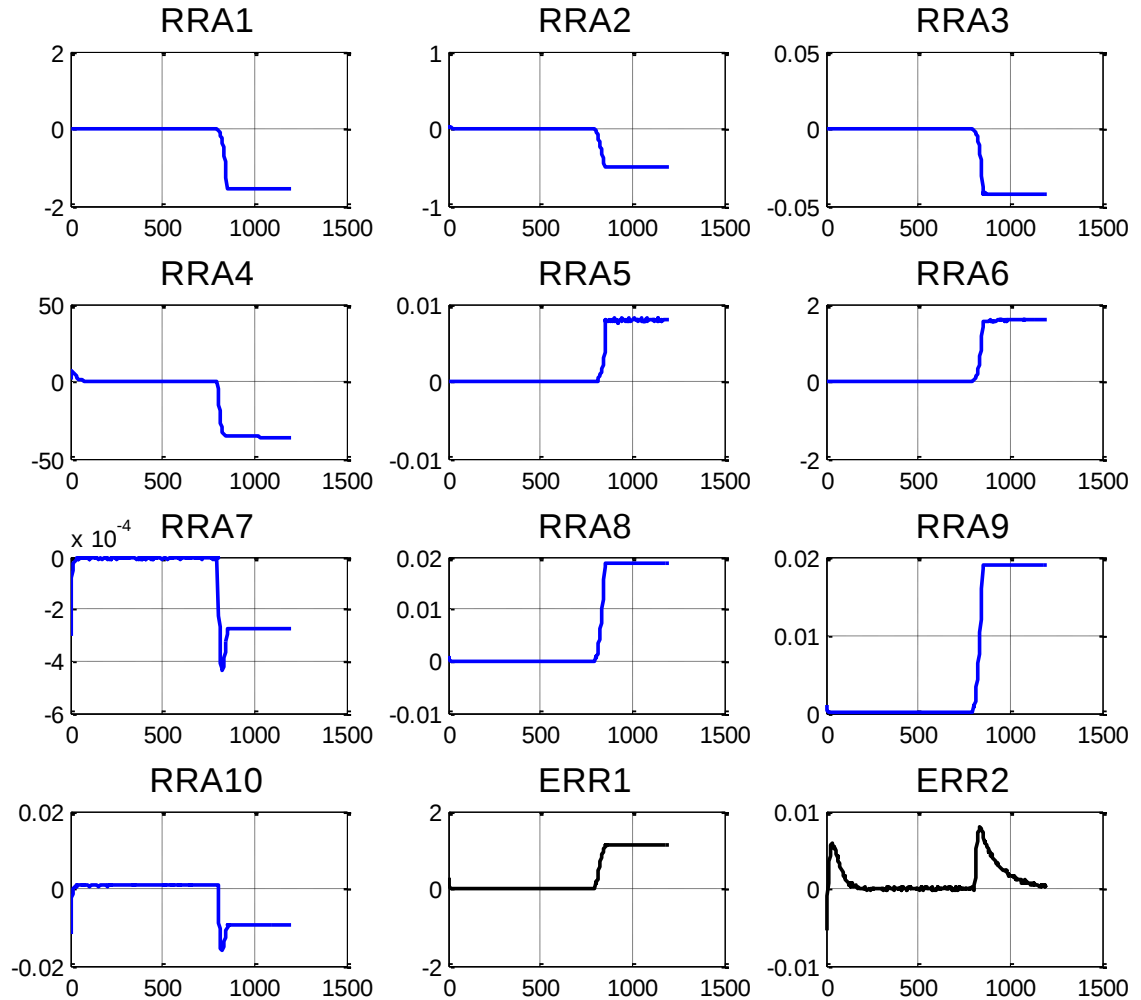


Figura 3.7. Falla por desgaste en la membrana

3.15.7. Falla por rotura de la membrana.

La rotura de la membrana se puede evidenciar con la disminución del área de transferencia de la membrana, la disminución del valor de este parámetro también ocasionará el desbalance de la relación de redundancia analítica donde de alguna manera esté involucrado este parámetro.

Para la simulación de esta falla se disminuyó el parámetro de área de la membrana (A) hasta un 80% de su valor, esta falla fue simulada entre el tiempo 1000 a 1050 segundos. La Figura 3.8 muestra que la simulación de esta falla fue detectada por todas la RRAs. Al concluir la falla se observa que las RRA7, RRA8, RRA9, RRA10 alcanzan un nuevo valor en estado estacionario. En las RRA1, RRA2, RRA3, RRA4, RRA5, RRA6 se ve que el retorno al modo normal de funcionamiento es bastante lento. Esto es debido que el área de la

membrana es un parámetro intrínseco del modelo y su variación afecta a todas las variables del sistema.

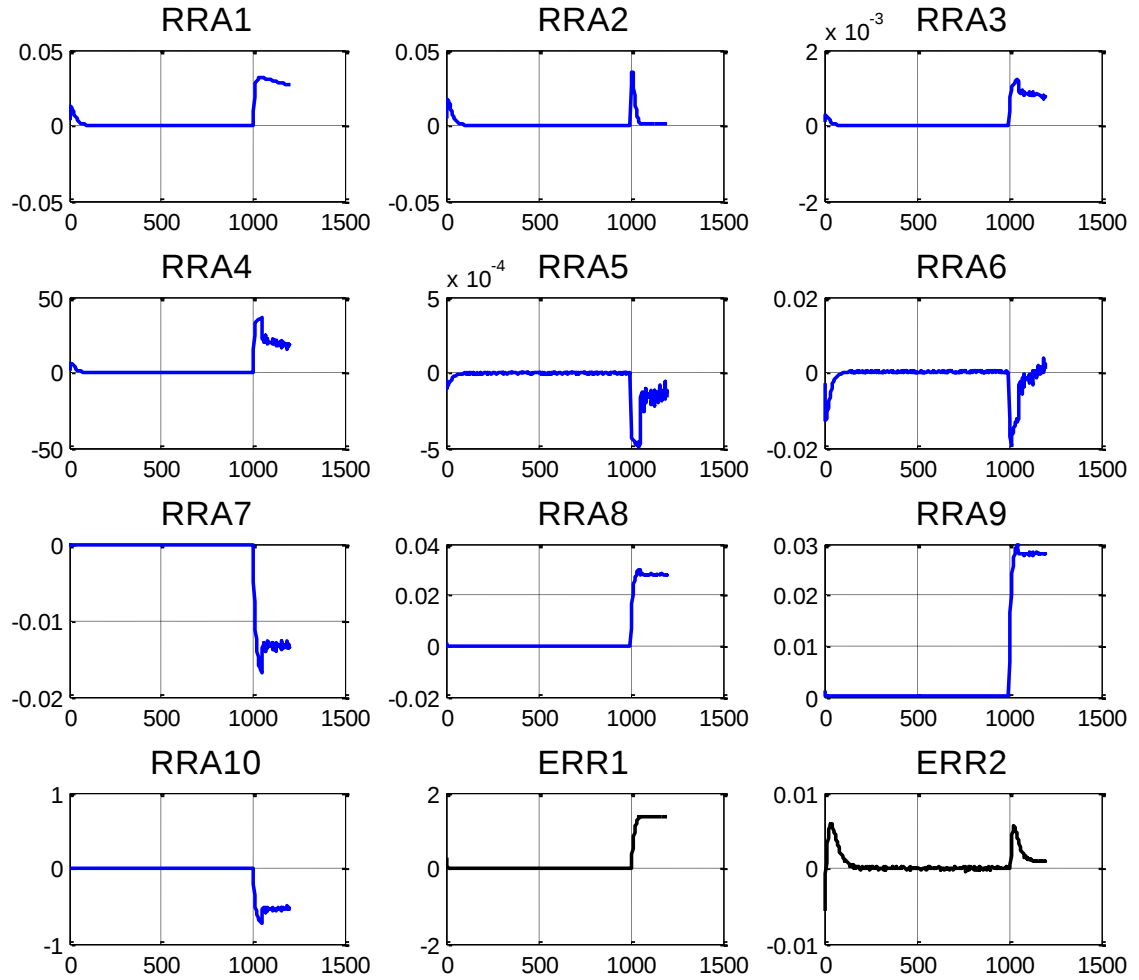


Figura 3.8. Falla por rotura de membrana

3.15.8. Falla en el factor de rechazo de la membrana.

El rechazo es una medida de la eficiencia de separación de la membrana, cuando este factor tiene valores cercanos a 1 significa que la membrana está realizando una buena separación de sólidos. Si este valor se aleja de 1, significa que la membrana tiene algún tipo un problema internamente que le impide realizar una buena filtración.

Se definió el factor de rechazo de la membrana como:

$$R = \frac{C_{m1} - C_p}{C_{m1}}$$

El factor C_{m1} define la acumulación de sales en la capa límite 1 de la membrana, notemos que si este valor se reduce, también se reducirá el factor de rechazo de la membrana. Esta falla también puede ser considerada una falla por ensuciamiento de la membrana, ya que, la reducción de C_{m1} puede significar que un porcentaje de la acumulación de sales ha sobrepasado la capa límite 1, ingresando a la membrana y produciendo el ensuciamiento de la membrana, lo que a su vez reduce el factor de rechazo de

la membrana. Por lo tanto se puede simular una falla en el factor de rechazo de la membrana o ensuciamiento, reduciendo C_{m1} .

Debido a que la variable C_{m1} puede ser calculada de distintas formas, también se pueden diseñar RRAs de distintas formas para esta variable. Se simuló la falla en la variable C_{m1} utilizando la relación de redundancia analítica RRA8.

Para la simulación de esta falla se redujo el valor de la variable correspondiente a la concentración en la capa límite 1 (C_{m1}) en un 50%, durante el tiempo de simulación de 700 hasta los 750 segundos; tal como se muestra en la Figura 3.9. Esta falla fue detectada sólo por la RRA8, en este caso, donde aparece la variable C_{m1}

$$RRA8 = \frac{C_{m1}r^4}{\left(1 + \left(\frac{K_w}{K_s}\right)D_{pres}r1\right)} - \frac{C_f}{\left[1 + \frac{K_w}{K_s}(D_{pres}r1)\left(1 - \frac{F_{ps}}{2F_f}\right)\right]}$$

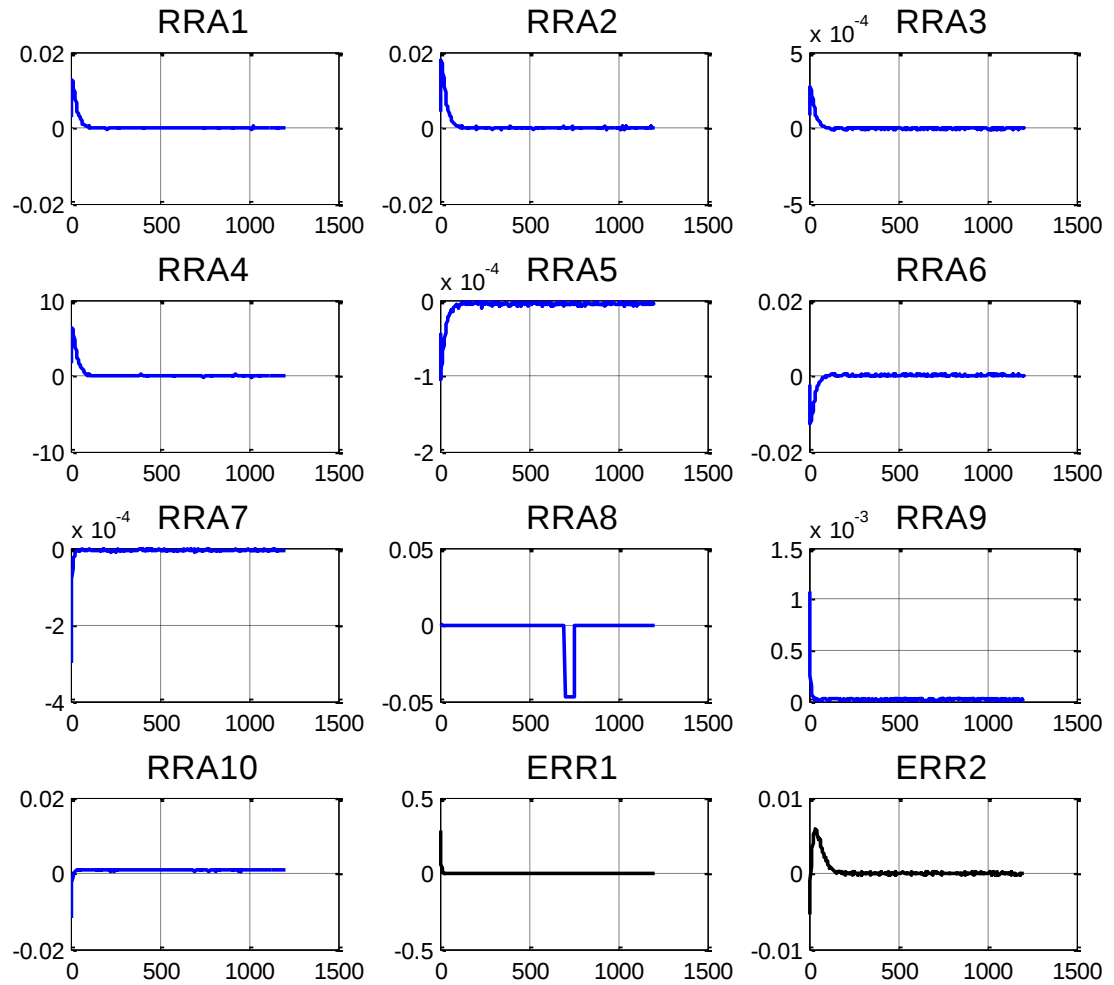


Figura 3.9. Falla en el factor de rechazo R

3.15.9. Falla en bomba de pH

Para simular la falla en la señal del actuador de pH (bomba), se colocó la señal de pH de alimentado en cero (falla por bloqueo total) en el tiempo 350 a 400 segundos. Esta falla fue detectada por las RRA1, RRA2, RRA3, RRA4, RRA5, RRA7, RRA8. La figura 3.10 muestra cómo se evidencia esta falla en el tiempo especificado.

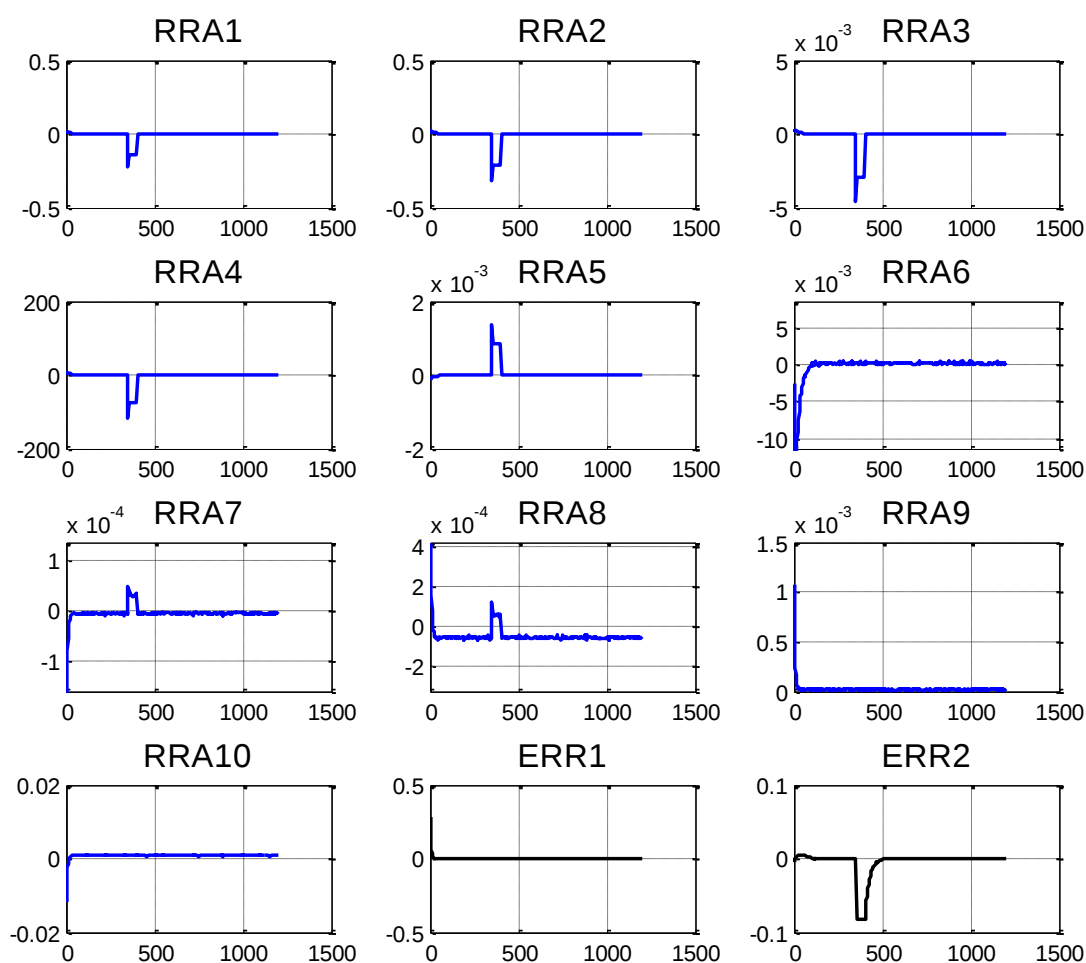


Figura 3.10. Falla en el actuador de pH

3.16. Análisis de resultados de detectabilidad

En la Tabla 3.5 se muestra un resumen de fallas detectadas por cada restricción

Tabla 3.5. Resumen para detectabilidad de fallas

FALLA	RRA1	RRA2	RRA3	RRA4	RRA5	RRA6	RRA7	RRA8	RRA9	RRA10
Actuador de presión	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Actuador de pH	x	x	x	x	x		x	x		
Sensor de Flujo	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Sensor de Concentración	x	x	x	x	x	x	x	x		
Sensor de temperatura	x				x					
Desgaste de la membrana(Kw, Ks)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Rotura de membrana (A)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Ensuciamiento de membrana (Cm1)								x		

De los resultados de la Tabla 3.5 podemos concluir en primer lugar que todas las fallas fueron detectadas por al menos una relación de redundancia analítica, las fallas relacionadas con actuador de presión, sensor de flujo, desgaste de membrana y rotura de membrana; presentan el mismo patrón de RRAs, es decir, fueron detectadas por todas las RRAs. Las fallas relacionadas con actuador de pH, sensor de concentración, sensor de temperatura y ensuciamiento de membrana presentan patrones de RRAs distintos.

3.17. Análisis de aislabilidad

La aislabilidad se refiere a la capacidad que tiene el diagnosticador para distinguir la qué falla ocurre en un determinado momento, es decir, la capacidad de diferenciar la ocurrencia de una falla respecto de otra.

Para aislar fallas debemos analizar todos los residuos en conjunto, e identificar con qué fallas se relaciona dicho residuo, si una falla siempre es determinada por un conjunto de residuos podremos saber de qué falla se trata.

Como se vio en el análisis de detectabilidad, 4 fallas presentan el mismo patrón de RRAs que las detectan, se dice entonces, que estas fallas no son aislables unas de otras, debido a que si se presenta dicho patrón, no se sabe a qué falla se refiere. Hasta el momento se cuenta con 4 fallas aislables y 4 no aislables.

Para mejorar la aislabilidad se propone la inclusión de las señales de error ERR1 y ERR2 en el análisis global de aislabilidad, al incluir los desbalances en las señales de error. La Tabla 3.6 muestra la inclusión de las señales de error de los controladores junto con las 10 relaciones de redundancia analítica.

Tabla 3.6. Análisis de aislabilidad

FALLA	RR1	RR2	RR3	RR4	RR5	RR6	RR7	RR8	RR9	RR10	E1	E2
Actuador de presión	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Actuador de pH	x	x	x	x	x		x	x				x
Sensor de Flujo	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Sensor de Concentración	x	x	x	x	x	x	x	x				x
Sensor de temperatura	x				x							
Desgaste de la membrana	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Rotura de membrana (A)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Factor de rechazo (Cm1)								x				

De la Tabla 3.6 se puede ver que, la inclusión de la señal de error en el análisis permite diferenciar el patrón de RRAs de la falla en actuador de presión con la falla en sensor de flujo.

3.17.1. Aislabilidad de falla en el factor de rechazo

Se puede ver de la Tabla 3.6, la falla en el factor de rechazo en (Falla en Cm1) es detectada solo por la RRA 8, de esta manera si ocurre un desbalance solo en la RRA8, sabremos entonces que la falla que ocurrió, se debe al ensuciamiento de la membrana o falla en factor de rechazo.

3.17.2. Aislabilidad de falla en el sensor de temperatura

La falla en el sensor de temperatura fue detectada por las RRA1 y RRA5. Ya que ninguna otra falla presenta este patrón de residuos, se puede decir que cuando ocurra solo una falla en sensor de temperatura, será fácilmente detectable y aislable.

3.17.3. Aislabilidad de falla en el sensor de flujo

El conjunto de RRAs de que detectan la falla en Fps son: RRA1, RRA2, RRA3, RRA4, RRA5, RRA6, RRA7, RRA8, RRA9, RRA10, además de ERR1. Ya que ninguna otra falla presenta este patrón de residuos, esta falla será fácilmente detectable y aislable.

3.17.4. Aislabilidad de falla por desgaste de la membrana

El conjunto de RRAs de que detectan la falla por desgaste de membrana son: RRA1, RRA2, RRA3, RRA4, RRA5, RRA6, RRA7, RRA8, RRA9, RRA10, además de ERR1 y ERR2. Esta falla comparte el mismo patrón de RRAs de las fallas en actuador de presión y rotura de membrana, por tanto se dice que no es aislable respecto a estas fallas.

3.17.5. Aislabilidad de falla por rotura de membrana

El conjunto de RRAs de que detectan la falla por desgaste de membrana son: RRA1, RRA2, RRA3, RRA4, RRA5, RRA6, RRA7, RRA8, RRA9, RRA10, además de ERR1 y ERR2. Esta falla comparte el mismo patrón de RRAs de las fallas en actuador de presión y por desgaste de la membrana, por tanto se dice que no es aislable respecto a estas fallas.

3.17.6. Aislabilidad de falla en el actuador de presión

Esta falla comparte el mismo patrón de RRAs de las fallas por desgaste y rotura de membrana, por tanto se dice que no es aislable respecto a estas fallas.

3.17.7. Aislabilidad de falla en sensor de concentración

El conjunto de RRAs de que detectan la falla en sensor de concentración son: RRA1, RRA2, RRA3, RRA4, RRA5, RRA6, RRA7, RRA8, además de ERR2. Este patrón solo se presenta para esta falla, por lo que será posible aislarla de la ocurrencia de otro tipo de falla.

3.17.8. Aislabilidad de falla en el actuador de pH

El conjunto de RRAs de que detectan la falla en sensor de concentración son: RRA1, RRA2, RRA3, RRA4, RRA5, RRA7, RRA8, además de ERR2. Este patrón solo se presenta para esta falla, por lo que será posible aislarla de la ocurrencia de otro tipo de falla.

En la la Tabla 3.7 se presenta un cuadro resumen de aislabilidad de fallas. Del conjunto de 8 fallas propuestas, se concluye que todas fueron detectables por las RRAs ,5 fallas fueron detectables y aislables; 3 fallas fueron detectables pero no aislables.

Tabla 3.7. Resumen de aislabilidad de fallas

FALLA	AISLABLE	NO AISLABLE
Actuador de presión		X
Actuador de pH	X	
Sensor de flujo	X	
Sensor de concentración	X	
Sensor de temperatura	X	
Desgaste de la membrana		X
Rotura de membrana (A)		X
Factor de rechazo (Cm1)	X	

En general hay muchas combinaciones posibles de fallas que puedan ocurrir simultáneamente, pero también hay muchas formas de generar relaciones de redundancia analítica, para mejorar la aislabilidad del diagnosticador de fallas es necesario incluir más ecuaciones en el modelo y probar con nuevos conjuntos de RRA.

Es posible simular una falla adicional, llamada falla por bloqueo en tubería central del módulo en espiral. La idea es que si no hay flujo por la tubería, los sensores de flujo y concentración tendrán valores igual a cero, entonces se puede hacer una simulación indirecta de esta falla mediante la utilización de los sensores.

3.18. Análisis de aislabilidad por el método de cálculo de MTES

3.18.1. Introducción

De los resultados del análisis de aislabilidad de la sección 3.17, se puede ver que una misma RRA puede detectar distintas fallas, en el caso de que ocurran fallas simultáneas es necesario desarrollar una metodología para localizar y aislar cada falla, esto se realiza mediante las técnicas de aislabilidad por el cálculo de MTES.

Es posible determinar nuevos conjuntos de RRA mediante el cálculo de mínimos subconjuntos sobredeterminados (MTES). Un conjunto de MTES implica la presencia de redundancia estructural en el modelo, que puede ser utilizada para realizar verificaciones de consistencia para algún componente del sistema.

3.18.2. Algoritmo de cálculo de MTES

El algoritmo de cálculo de MTES presentado por Krysander (Krysander, 2010) nos permite determinar el conjunto fallas y restricciones que se usan para generar de una determinada RRA. Al calcular la RRA se deben despejar todas las variables no medidas en función de las variables medidas y obtener nuevas relaciones de redundancia analítica, este algoritmo además de las ecuaciones residuales nos proporciona el conjunto de fallas que es capaz de detectar dicha RRA. Al calcular la RRA e igualándola a cero, estaremos en la capacidad de detectar cualquier falla asociada a dicha RRA.

Con las posibles combinaciones de ecuaciones residuales proporcionadas por el algoritmo de cálculo de MTES es posible determinar cuáles fallas son aislables y cuáles no (Análisis de aislabilidad).

Con la aplicación del algoritmo de Ranking presentado previamente, se obtuvieron 4 relaciones de redundancia analítica, mediante la aplicación del algoritmo de cálculo de MTES es posible obtener muchas más

La Figura 3.11 muestra el algoritmo presentado por Krysander para el cálculo de MTES.

```

1: function S = MTES(M,R)
2:   S = 0
3:   M = {{e} | e ∈ M+ }
4:   if F(M) ≠ 0 then
5:     S = FindMTES(M,M);
6:   end if
7: end function

La función principal de arriba llama a la función recursiva descrita abajo

8: function S = FindMTES(M,R)
9:   Seleccionar un E ∈ M de forma que F(E) ≠ 0
10:  if ef ∈ UE' ∈ [E] E' para todo f ∈ F(M) then
11:    S = {UE ∈ M E};
12:  else
13:    R' = 0; M' = M;
14:    while F(R) ≠ 0 do
15:      Seleccionar un E ∈ R de forma que F(E) ≠ 0
16:      M' = (M' \ [E]) ∪ {UE' ∈ [E] E'};
17:      if [E] ⊆ R then
18:        R' = R' ∪ {UE' ∈ [E] E'};
19:      end if
20:      R = R \ [E];
21:    end while
22:    S = 0
23:    while R' ≠ 0 do → Llamadas recursivas
24:      Select an E ∈ R'
25:      R' = R' \ [E];
26:      S = S ∪ FindMTES(M' \ {E}, R' ∪ R);
27:    end while
28:  end if
29: end function

```

Figura 3.11. Algoritmo de cálculo de MTES

La Figura 3.12 se muestra la matriz de incidencia hallada mediante la aplicación del algoritmo de cálculo de MTES y vemos que coincide con la mostrada en la Tabla 3.4, esta matriz de incidencia muestra la relación de las restricciones con las variables desconocidas y fallas asociadas a cada restricción.

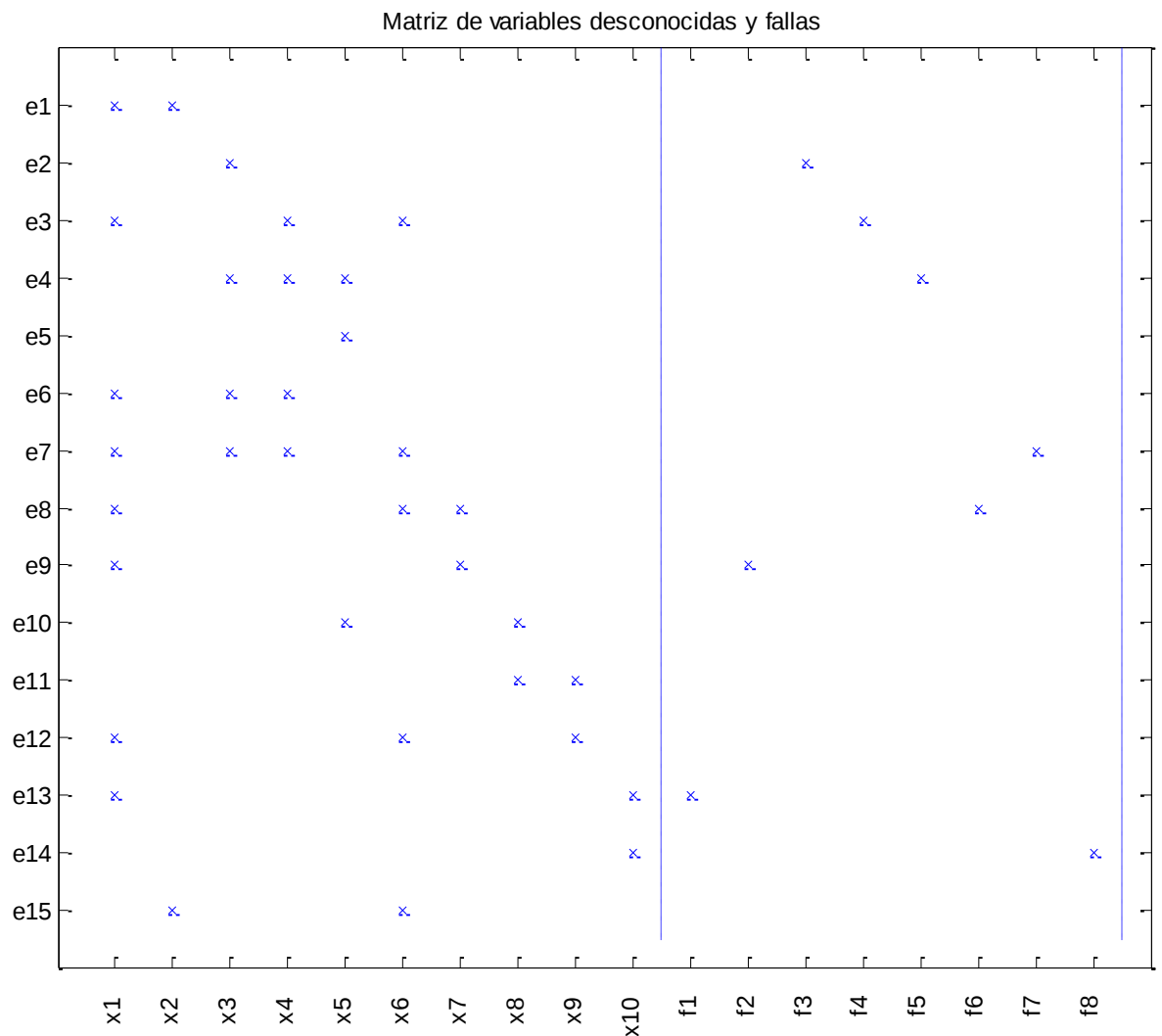


Figura 3.12. Matriz de variables desconocidas y fallas

Para que una falla sea aislable es necesario que el número de relaciones de redundancia analítica sea mayor que el número de fallas consideradas.

Los resultados de la aplicación del algoritmo son los siguientes se muestran en la Tabla 3.8. Estos resultados nos indican que se pueden hallar 8 relaciones de redundancia analítica, la Tabla 3.8 nos muestra el número de las restricciones que intervienen en cada RRA así como las fallas asociadas a dicha RRA, además nos indica que el grado de redundancia estructural para todas las RRA es mayor a cero, es decir es posible la detección de fallas con estos RRAs.

Tabla 3.8. Resultados del algoritmo MTES

NÚMERO	RESTRICCIONES	FALLAS	GRADO DE REDUNDANCIA ESTRUCTURAL (sr)
1	[1 5 10 11 12 13 14 15]	[1 8]	1
2	[1 5 8 9 10 11 12 15]	[2 6]	1
3	[1 4 5 6 7 10 11 12 15]	[5 7]	1
4	[1 3 5 6 7 10 11 12 15]	[4 7]	1
5	[1 3 4 5 6 10 11 12 15]	[4 5]	1
6	[1 2 5 6 7 10 11 12 15]	[3 7]	1
7	[1 2 4 5 6 10 11 12 15]	[3 5]	1
8	[1 2 3 5 6 10 11 12 15]	[3 4]	1

3.18.2. Pruebas de aislabilidad

De las restricciones de la fila 2 de la Tabla 3.8, se puede diseñar una RRA que permita aislar la falla en el sensor de flujo con respecto al sensor de conductividad, como se muestra en el siguiente análisis:

Las restricciones que involucran esta RRA son

[1 5 8 9 10 11 12 15], que se presentan a continuación:

$$r_1: \frac{dC_r}{dt} = \frac{1}{m_r} [F_f(C_f - C_r) - F_p(C_p - C_r)]$$

$$r_5: F_p = AJ_v$$

$$r_8: F_s = K_s A(C_{m1} - C_p)$$

$$r_9: F_p = \frac{F_s}{C_p}$$

$$r_{10}: F = e^{\left[\frac{-J_v(1-\sigma)}{K_s} \right]}$$

$$r_{11}: R = \frac{(1-F)\sigma}{1-\sigma F}$$

$$r_{12}: C_p = C_{m1}(1-R)$$

$$r_{15}: C_{m1} = \frac{F_f C_f + (F_f - F_p) C_r}{2F_f - F_p}$$

Hacemos los despejes sucesivos:

$$de r_5: J_v = \frac{F_p}{A}$$

$$de r_{10}: F = e^{\left[\frac{-J_v(1-\sigma)}{K_s} \right]}$$

$$de r_{11}: R = \frac{(1-F)\sigma}{1-\sigma F}$$

$$de r_{12}: C_{m1} = \frac{C_p}{(1-R)}$$

$$\text{de } r_9: F_s = F_p C_p$$

$$\text{de } r_8: F_s = K_s A (C_{m1} - C_p)$$

A partir de la restricción 8 calculamos un nuevo F_p y lo llamaremos F_{p1} :

$$r_8: F_s = K_s A (C_{m1} - C_p)$$

$$F_{p1} C_p = K_s A \left(\frac{C_p}{1-R} - C_p \right)$$

$$F_{p1} C_p = K_s A \left(\frac{C_p - C_p(1-R)}{1-R} \right)$$

$$F_{p1} C_p = K_s A \left(\frac{C_p R}{1-R} \right)$$

Se cancelan los términos C_p en ambos lados:

$$F_{p1} = K_s A \left(\frac{R}{1-R} \right)$$

De esta manera se puede generar el nuevo residuo que aísla la Falla F_p .

$$RR5 = F_p - F_{p1}$$

Vemos que esta RRA no depende de Concentración de permeado (C_p)

Se simularon fallas simultáneas en sensor de flujo en el tiempo 400 a 450 y en el sensor de concentración en el tiempo 200 a 300 segundos.

La Figura 3.13 muestra los dos residuos cuando los sensores no están sometidos a fallas, vemos que ambos oscilan alrededor de cero (Modo normal de funcionamiento de la planta)

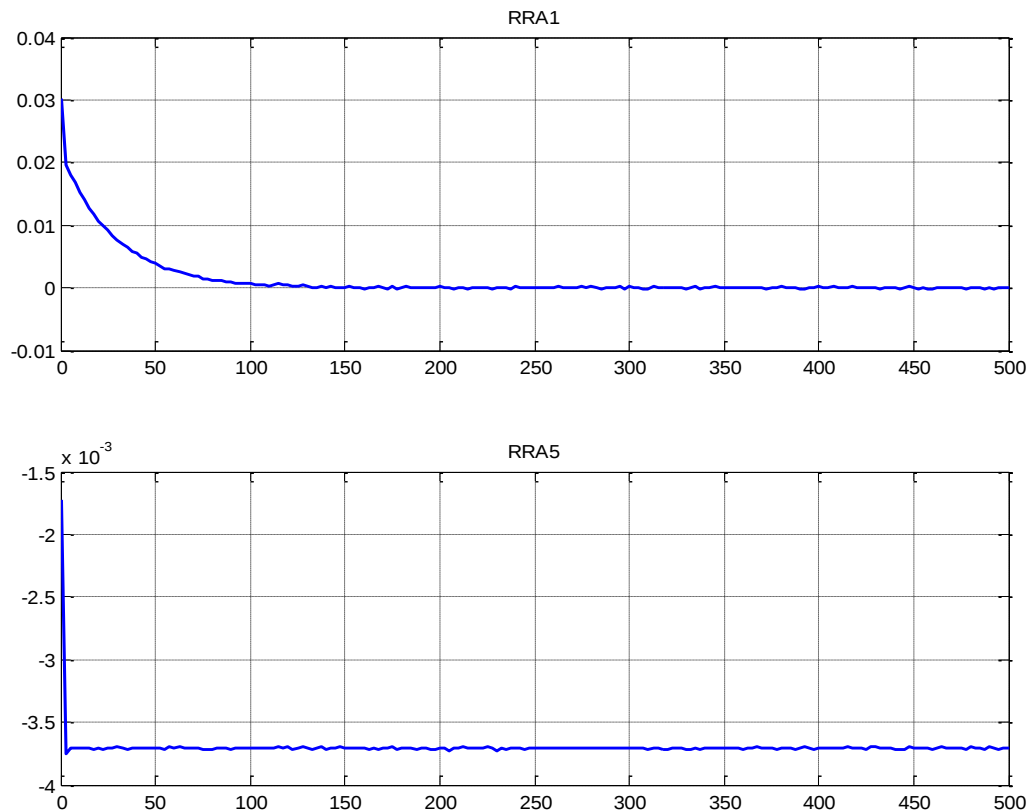


Figura 3.13. Residuos de F_p y C_p sin falla

En la Figura 3.14 se muestra los resultados cuando se simulan fallas simultáneas en los sensores de flujo y conductividad, cuando ocurre la falla en Cp, RR1 sufre un desbalance en el tiempo 200 a 300 segundos, pero también detecta Fp en el tiempo 400 segundos.

Se puede apreciar que RR5 aísla perfectamente la falla Fp, es decir que cuando ocurre la falla en Cp, RR5 no sufre un desbalance.

Aplicando la técnica de cálculo de MTES se pudo obtener un residuo que aísla la falla en flujo de permeado.

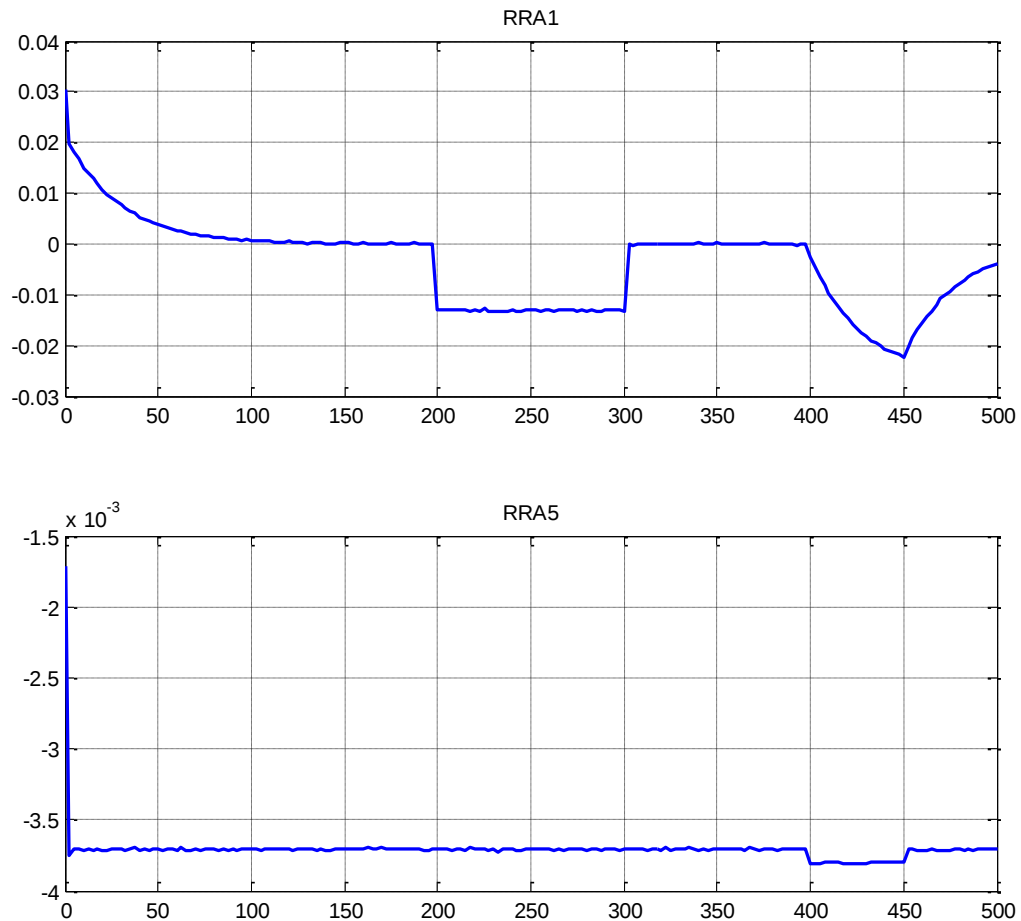


Figura 3.14. Fallas simultáneas en Fp y Cp

De forma ideal, un diagnosticador de fallas debería poder aislar y diferenciar claramente una falla de otra. Sin embargo, esto no siempre es posible debido al grado de interacción de las variables internas del modelo. En el caso del modelo de la planta desalinizadora hay una fuerte interacción entre sus variables internas, es por esto que se complica un poco la tarea de aislabilidad. Sin embargo al contar con ecuaciones adicionales del modelo se pudo mejorar la aislabilidad, por ejemplo se tuvo hasta 7 formas distintas de calcular la variable concentración en capa límite 1 (Cm1), esto sirvió bastante al momento de diseñar las relaciones de redundancia analítica.

CAPÍTULO 4: PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN

4.1. Introducción

El presente capítulo presenta la propuesta de implementación del sistema de diagnóstico de fallas de la planta desalinizadora desarrollado en el capítulo 3. Se describe el diagrama de flujo para la implementación del sistema de diagnóstico de fallas en tiempo real, así mismo, se describe el procedimiento para la implementación del sistema de diagnóstico de fallas en el software RSlogix5000, así como la interfaz con el usuario en el SCADA Factory Talk View de Rockwell Automation.

4.2. Diagrama de Flujo

En la Figura 4.1 se muestra el diagrama de flujo para la implementación del Sistema de Diagnóstico de fallas.

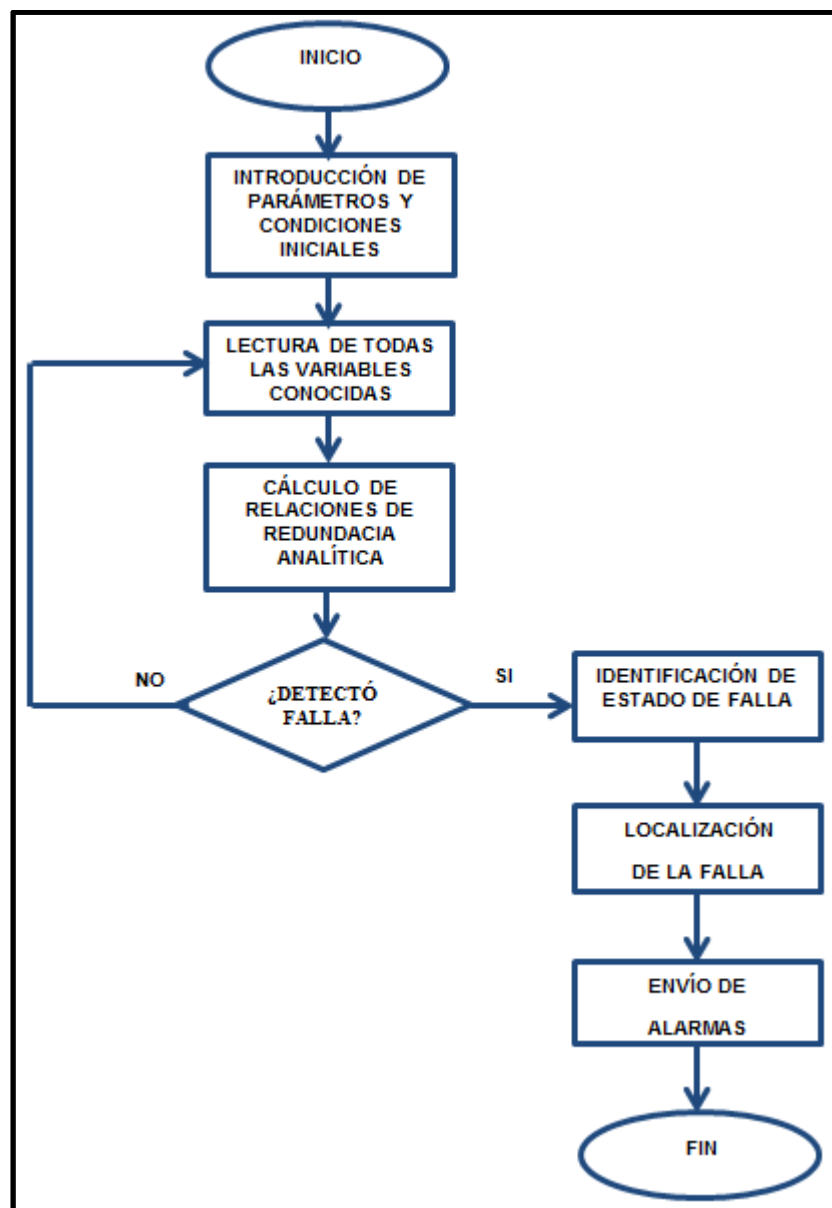


Figura 4.1. Diagrama de flujo del Sistema de Diagnóstico de fallas

A continuación se explica cada bloque del algoritmo de la Figura 4.1

- Para comenzar se pide introducir los parámetros del modelo matemático de la planta de OI, estos parámetros incluyen: Concentración de sales del agua de alimentación, flujo de agua de alimentación, dimensiones de la membrana y el vessel, parámetros de la membrana especificados por el fabricante. Además es necesario introducir los valores iniciales o de arranque de algunas variables antes de comenzar.
- Luego se realiza la lectura de las variables conocidas, que estarán dadas por los valores de los sensores de temperatura, flujo y concentración, además de los valores de las señales de control.
- Seguidamente se realiza el algoritmo realiza el cálculo de las relaciones de redundancia analítica para determinar algún tipo de desbalance en ellas.
- Si no se detecta falla alguna, en el bucle se calculan nuevamente las relaciones de redundancia analítica con la información de los sensores y de los parámetros iniciales.
- En caso se detecta la falla, se aplicará el algoritmo de aislabilidad para determinar en qué parte del sistema ocurrió la falla.
- Se dispara una alarma indicando la ocurrencia de falla en un elemento del sistema.

4.3. Implementación en RSlogix5000

4.3.1 Texto estructurado

El software RSlogix5000 cuenta con un emulador de PLC Allen Bradley llamado RSlogix Emulate Simulate Chassis Monitor, que se muestra en la Figura 4.2. Se introdujo el código desarrollado mediante texto estructurado que es un lenguaje bastante parecido al lenguaje C, en el que fue necesario utilizar la sintaxis de dicho lenguaje de programación.

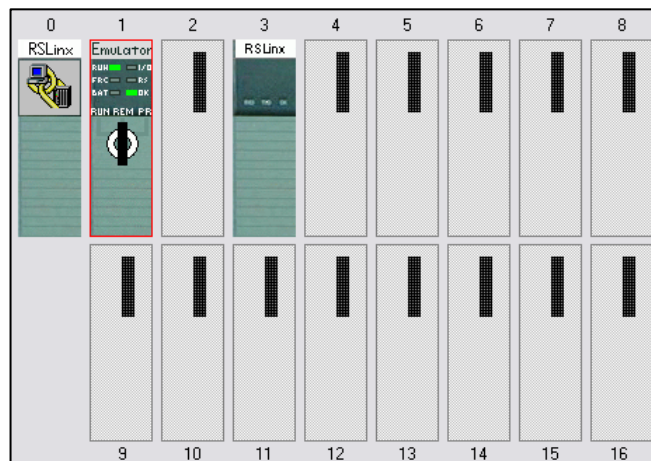


Figura 4.2. RSlogix Emulate Simulate Chassis Monitor

Las variables de entrada, que en este caso son la presión de alimentación y el pH de alimentación, se introducen manualmente antes de correr el programa y pueden ser modificadas durante la simulación en la sección Quick Watch (Figura 4.3)

Watch List:			
Current Routine	Name	Scope	Value
Quick Watch	Pfeed	Controller	800.0
	pH_n	Controller	7.0

Errors Search Results Watch

Figura 4.3. Sección Quick Watch

A diferencia del programa en Matlab, en texto estructurado, no fue necesario el cálculo de condiciones iniciales antes de la inicialización del bucle de la planta, las condiciones iniciales se introducen manualmente antes de correr el programa, en la sección llamada Current Routine, que nos muestra el valor actual de cada una de las variables (Figura 4.4)

Watch List:			
Current Routine	Name	Scope	Value
Quick Watch	A	Controller	136.6
	Cf	Controller	35.0
	Cm1	Controller	43.57087
	Cm1_1	Controller	43.57083
	Cm1_2	Controller	43.570854
	Cm1_3	Controller	43.57087
	Cm2	Controller	0.12215345
	Cm2_1	Controller	0.1221534
	Cm2_2	Controller	0.12215345
	Cp	Controller	0.122153305
	Cpf	Controller	0.122153305
	CpH	Controller	0.0
	Cr	Controller	57.726482
	Cr1	Controller	57.726555
	delta_P	Controller	5364295.5
	delta_pH	Controller	0.0

Refresh

Figura 4.4. Variables en el Current Routine

En esta sección, además, se pueden introducir variables de nuestro interés que se someterán a fallas durante la simulación, es decir, forzando el valor igual a cero para el caso de los actuadores (falla por bloqueo total) y agregándoles un offset para el caso de los sensores, también una variación porcentual en los parámetros internos de la planta.

En la Figura 4.5 se muestra el código de simulación de la planta utilizando texto estructurado, nótese que este lenguaje tiene ciertas particularidades, por ejemplo, los valores de los parámetros se definen utilizando dos “puntos-igual” en lugar de “igual”

En la sección inferior denominada Watch List se observa los valores actuales de los parámetros de la planta, las variables conocidas y las variables internas del modelo.

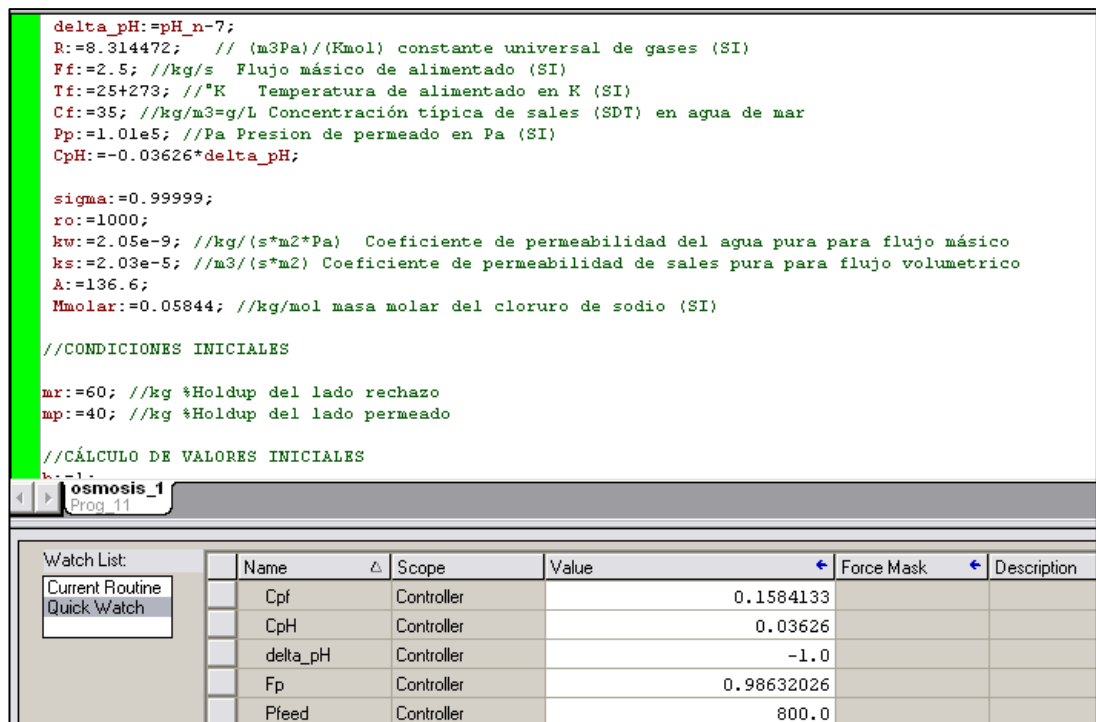


Figura 4.5. Simulación en Rslogix 5000

4.3.2 Implementación de Trends.

Se implementó Trends en RSlogix 5000 para mostrar el comportamiento en tiempo real de las principales variables de salida ante cambio en las variables de entrada. En el eje horizontal se muestra el tiempo actual, se colocó este eje en un rango de 10 minutos (600 segundos), para mostrar adecuadamente la respuesta a los 3 valores en la señal entrada ya que el tiempo de establecimiento de las concentraciones es de aproximadamente 200 segundos. En el eje vertical se muestra el rango de valores de variación de la señal de interés. La figura 4.6 muestra cambios sucesivos en la presión de alimentación en los valores 1000-900-800 psi.

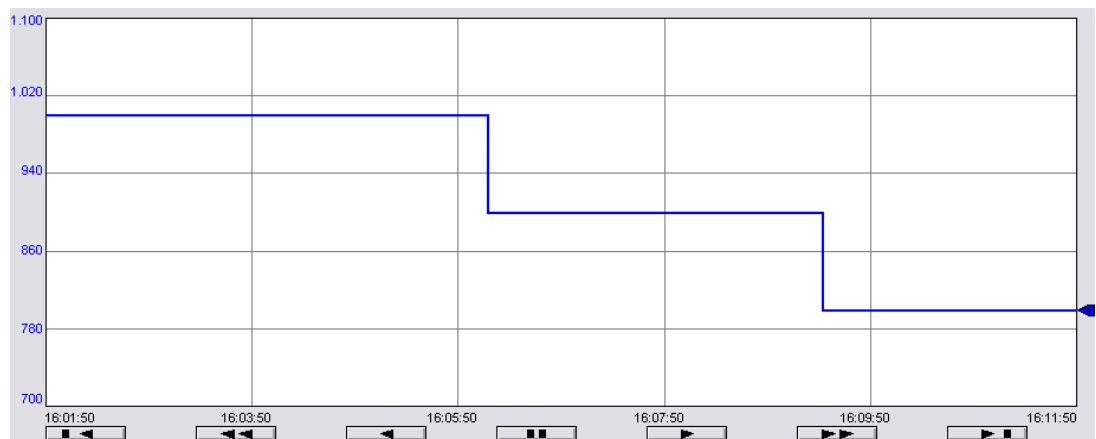


Figura 4.6. Cambios en la presión de alimentación

En la figura 4.7 se muestra que el flujo de permeado tiene una respuesta rápida ante cambios en la presión de alimentación, tal como se ha había determinado en las simulaciones del capítulo 2. Se comprueba, además, que el flujo de permeado disminuye al disminuir sucesivamente la presión del agua de alimentación.



Figura 4.7. Dinámica del flujo de permeado

La figura 4.8 muestra la dinámica de concentración de permeado ante cambios en la presión de alimentación. Se comprueba, además, que la concentración de permeado aumenta al disminuir sucesivamente la presión del agua de alimentación.

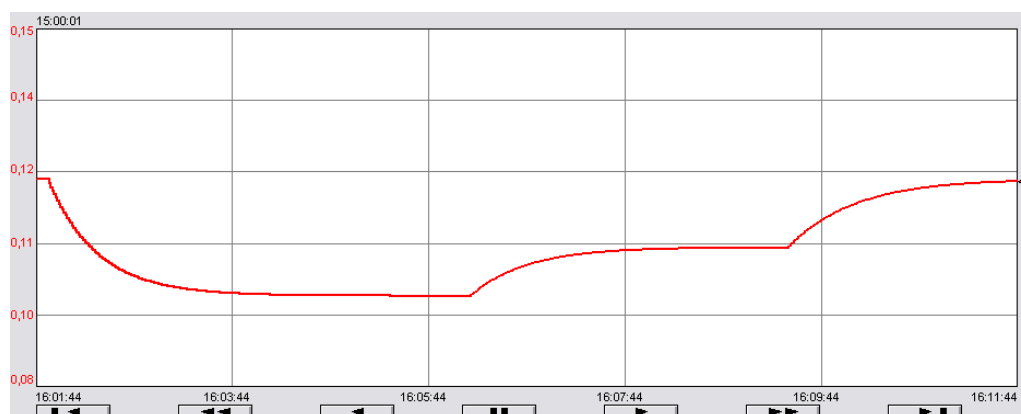


Figura 4.8. Dinámica de concentración de permeado

La figura 4.9 muestra la dinámica de concentración de rechazo ante cambios en la presión de alimentación. Se muestra además, que la concentración de rechazo disminuye al disminuir sucesivamente la presión del agua de alimentación. Los valores estacionarios de las concentraciones de permeado y rechazo se alcanzan en un tiempo aproximado de 200 segundos.

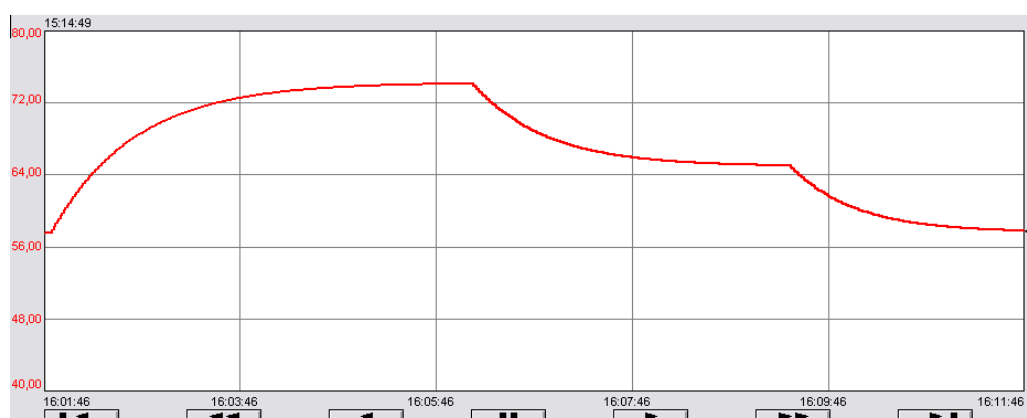


Figura 4.9. Dinámica de la concentración de rechazo

4.4. Interfaz con Factorytalk View

La figura 4.10 muestra la interfaz en FactoryTalk View desarrollada, donde se realizó el enlace de las variables de interés obtenidas en el programa en RsLogix 5000.

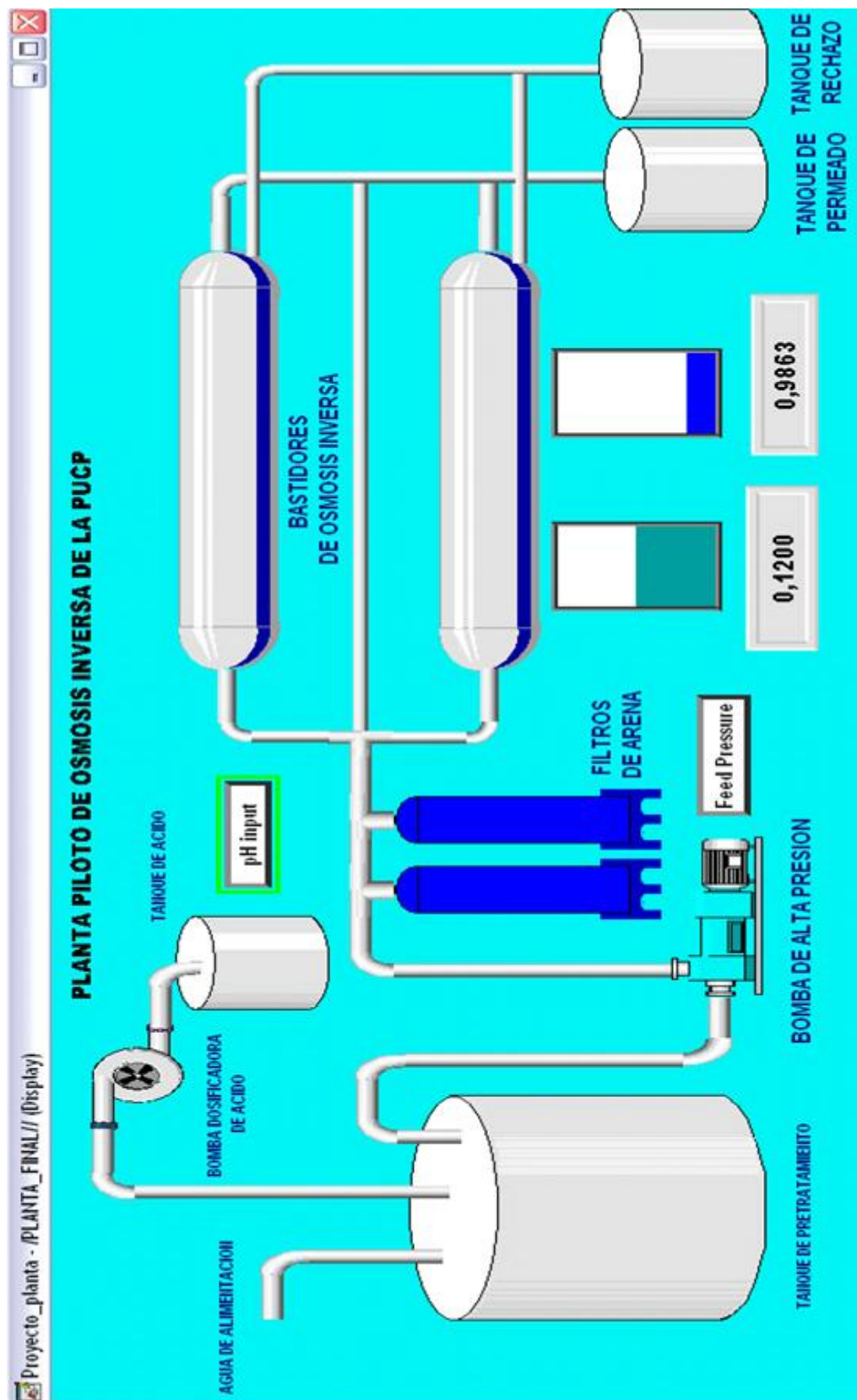


Figura 4.10. Implementación en FactoryTalk View

4.4.1. Resultados de simulación de fallas

La simulación de fallas se realizó en tiempo real cambiando de valor las variables y parámetros de interés en diferentes tiempos. En las figuras 4.10 a 4.15 se muestran algunas simulaciones realizadas para las fallas más importantes que involucran este sistema.

4.4.1.1. Falla en sensor de flujo

La Figura 4.11 muestra la falla en sensor de flujo, se observa que el comportamiento de dicha falla es similar al mostrado en simulación en el capítulo anterior, la falla ocurre durante un tiempo especificado y luego regresa de forma rápida a su valor inicial.

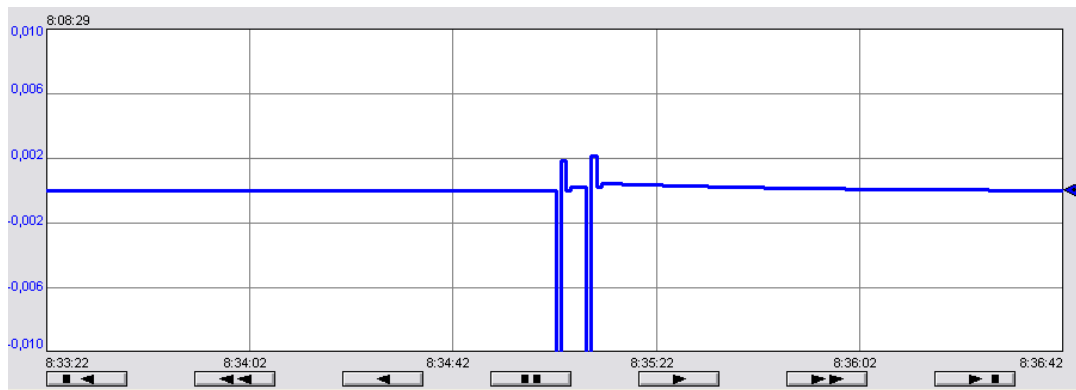


Figura 4.11. Simulación de falla en sensor de flujo

4.4.1.2. Falla en sensor de concentración

La Figura 4.12 muestra la falla en sensor de concentración, se observa que el comportamiento de dicha falla es similar al mostrado en simulación en el capítulo anterior, la falla ocurre durante un tiempo especificado y luego regresa de forma rápida a su valor inicial.



Figura 4.12. Simulación de falla en sensor de conductividad

4.4.1.3. Falla en actuador de presión

La dinámica que se presenta es similar a los resultados mostrados en simulaciones del capítulo 3



Figura 4.13. Simulación de falla en actuador de presión

4.4.1.4. Falla en actuador de pH

La dinámica que se presenta es similar a los resultados mostrados en simulaciones del capítulo 3 (Figura 4.14)

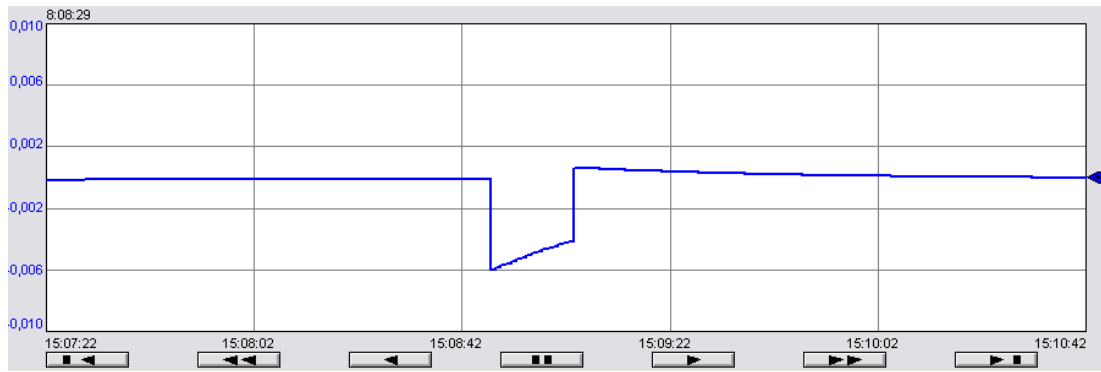


Figura 4.14. Falla en actuador de pH

4.4.1.5. Falla por rotura de membrana

Tal como se vio en el capítulo anterior, la falla por rotura de membrana ocasiona un desbalance mayor en la RRA, en algunos casos la falla produce que la RRA alcance un nuevo valor en modo normal de funcionamiento o, como se muestra en este caso, la RRA regresa a su valor inicial pero luego de un largo tiempo (Figura 4.15)

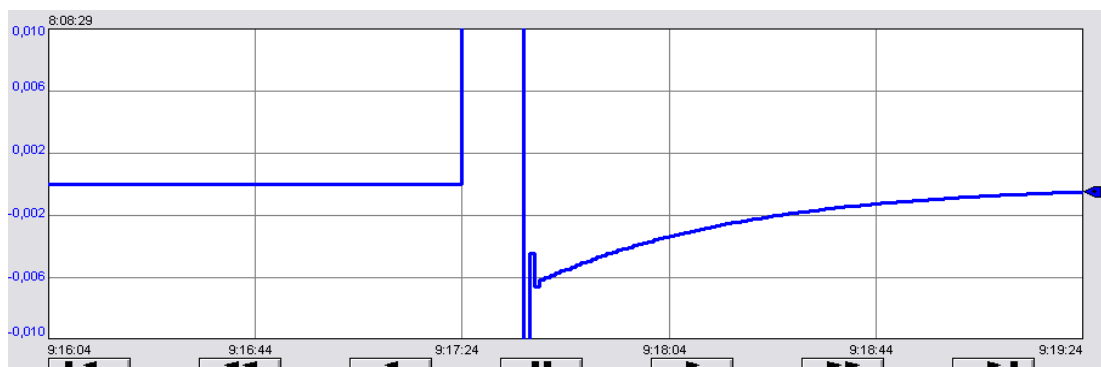


Figura 4.15. Falla por rotura de membrana

CONCLUSIONES

El estudio del proceso productivo de una planta desalinizadora por ósmosis inversa permitió conocer las principales etapas del proceso, así como las principales variables que definen el proceso y la interacción entre ellas.

El modelo matemático basado en ecuaciones analíticas de la planta desalinizadora por ósmosis inversa muestra las principales interacciones entre variables que definen el comportamiento dinámico del módulo en configuración enrollamiento en espiral, la validación de dicho modelo dio resultados consistentes y similares a los obtenidos en la literatura.

La obtención del modelo basado en ecuaciones analíticas dio lugar a la obtención de un modelo estructural de la planta de OI, el cual fue definido en base a un conjunto de restricciones.

El análisis estructural del modelo basado en ecuaciones analíticas permitió conocer la relación entre las variables internas del módulo de OI y variables conocidas del modelo, tales como, variables controladas y manipuladas. Así mismo permitió el diseño de un conjunto de 10 relaciones de redundancia analítica (RRA) mediante técnicas de emparejamiento de restricciones

Se definieron fallas comunes que pueden ocurrir durante el funcionamiento real de un bastidor de ósmosis inversa. Se consideró un conjunto de 8 fallas, 3 en sensores, 2 en actuadores y 3 en parámetros internos que pueden dar lugar a un mal funcionamiento de la membrana de OI.

El análisis de detectabilidad del conjunto de 8 fallas propuestas en el diseño, dio como resultado que todas las fallas fueron detectables por las RRA diseñadas. Además, mediante al análisis de aislabilidad se determinó que 5 fallas fueron detectables y aislables; y 3 fallas fueron detectables pero no aislables.

La aplicación de algoritmo para el cálculo de MTES dio como resultado que es posible aislar fallas que ocurren de forma simultánea mediante el reemplazo adecuado de variables de interés en el conjunto de restricciones obtenidas por el algoritmo, se consiguió aislar las fallas ocurridas en sensor de conductividad y sensor de concentración cuando éstas ocurrieron de forma simultánea.

La propuesta de implementación del Diagnosticador de fallas en tiempo real con el software RSLogix 5000 de Rockwell Automation dio resultados similares al modelo implementado en Simulink. También se realizó satisfactoriamente la comunicación con FactoryTalk View y se pudo supervisar las variables de interés del proceso desde la interfaz de usuario construida.

RECOMENDACIONES

Se puede realizar un diagnóstico de fallas en puntos más específicos del sistema de ósmosis inversa aplicando el método de generación de relaciones de redundancia analítica a un modelo matemático basado en parámetros distribuidos del módulo de ósmosis inversa, en este caso se podría considerar además de la dinámica temporal, la dinámica espacial al interior de la membrana en configuración en espiral. Al contar con un modelo de parámetros distribuidos se puede detectar, por ejemplo, la ubicación exacta donde se produjo la rotura de membrana

Se recomienda aplicar la teoría de detección de fallas en línea de la planta en conjunto con un controlador avanzado (Diagnosticador de fallas en línea). La efectividad del diagnosticador diseñado se verá cuando sea implementado en el sistema supervisor de la planta operando en tiempo real, y se emulen fallas en los distintos parámetros considerados.

Es posible mejorar el diagnosticador de fallas mediante el diseño de observadores no lineales de ciertas variables de interés, los cuales permitirán obtener relaciones de redundancia adicionales y mejorar los resultados al aplicar el algoritmo para la aislabilidad de fallas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alatiqi I.M.; Ghabris A.H.; Ebrahim S. (1989) **System identification and control of reverse osmosis desalination**. Desalination Journal- Elsevier.
2. Abbas A. and Al-Bastaki N., **Modeling of an RO water desalination unit using neural networks**. Chemical Engineering Journal
3. Andrew C. Burden, Pradeep B. Deshpande, James C. Waiters (2000). **Advanced process control of a B-9 Permasep permeator desalination pilot plant**. Desalination.
4. Al-haj Ali, M., Ajbar, A., Ali, E., and Al-Humizi, K., **Controlling Water Quality using Reverse Osmosis: The Development of Simplified Dynamic Model**. UKACC Control 2008, Manchester - UK.
5. Blanke M.; Kinnaert M.; Lunze J.; Staroswiecki M. (2006) **Diagnosis and Fault-Tolerant Control**. Springer.
6. Gambier A.; Miksch T.; Badreddin E. (2009) **A reverse osmosis Laboratory Plant for Experimenting with Fault-Tolerant Control**. American Control Conference Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA.
7. Gambier A.; Krasnik A.; Badreddin, E. (2007) **Dynamic modeling of a simple reverse osmosis desalination plant for advanced control purposes**. Proceedings of the 2007 American Control Conference.
8. Gambier A. Badreddin, E. **Control of Small Reverse Osmosis Desalination Plants with Feed Water Bypass**. IEEE Conference on Control Applications
9. García-Rodríguez L. and Gómez-Camacho C (2001). **Perspectives of Solar-Assisted Seawater Distillation..**
10. H.T El-Dessouky and H.M Ettouney (2002) **Fundamentals of Water Desalination**. Elsevier
11. Isermann R. (2005) **Fault-Diagnosis Systems. An introduction from Fault Detection to Fault Tolerance**. Springer
12. Isermann R. (2011) **Fault-Diagnosis Applications Model-Based Condition Monitoring: Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-tolerant Systems**. Springer.

13. Isermann R. **Model Based Fault detection and diagnosis status and applications.** Darmstadt University of Technology
14. J. Z. Assef, J. C. Watters, P. B. Deshpande, and I. M. Alatiqi. (1997) **Advanced control of a reverse osmosis desalination unit.** J. Proc. Contr.
15. Jie Chen; Ron J. Patton. (1999) **Robust Model Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems.** Kluwer Academic Publishers.
16. Johnson. J, Busch M. (2009) **Engineering Aspects of Reverse Osmosis Module** Lenntech. Dow Water & Process Solutions
17. Krysanter M. (2006) **Design and Analysis of Diagnosis Systems Using Structural Methods.** Department of Electrical Engineering, Linköping University, Sweden.
18. Krysanter M. (2010) **A Structural Algorithm for Finding Testable Sub-Models and Multiple Fault Isolability Analysis.** Department of Electrical Engineering. Linköping University Sweden.
19. McFall C., Bartman A., Christofides P. (2008). **Control and Monitoring of a High Recovery Reverse Osmosis Desalination Process.** Ind. End. Chem.
20. Mhaskar P., McFall C., Gani A., Christofides P., Davis J. (2008). **Isolation and handling of actuator faults in nonlinear systems.** Automatica.
21. 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. Riverol C.; V. Pilipovik. (2005) **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.
23. Robertson M.W.; J. C. Watters; P. B. Desphande; J. Z. Assef; I.M. Alatiqi. (1996) **Model based control for reverse osmosis desalination processes.** Desalination Journal- Elsevier.
24. Steven X. Ding. (2008) **Model-based Fault Diagnosis Techniques.** Springer.
25. Simani S.; Fantuzzi C.; Patton R. (2002) **Model-based Fault Diagnosis in dynamic systems using Identification Techniques.** Springer.
26. Voutchkov N. (2013). **Desalination engineering, planning and design.** New York: McGraw-Hill

27. Senthilmurugan S., Ahluwalia A., Gupta S. (2005) **Modeling of a spiral wound module and estimation of model parameters using numerical techniques.** Desalination. Elsevier
28. Ahmed. F (2013) **Modified Spiegler-Kedem Model to Predict the Rejection and Flux of Nanofiltration Processes at High NaCl Concentrations.** University of Ottawa.
29. Wang L.;Chen.J; Hung Y **Membrane desalination Technologies.** Humana Press
30. Mulder M. **Basic Principles of Membrane Technology** Kluwer Academic Publishers
31. Lyster E, Cohen Y. **Numerical study of concentration polarization in a rectangular reverse osmosis membrane channel: Permeate flux variation and hydrodynamic end effects.** Elsevier
32. Jiang A; Ding Q, Wang J. (2014) **Mathematical modeling and simulation of SWRO Process based on simultaneous method.** Hindawi
33. Faisal H. **Dynamic Modeling of Multi Stage Flash (MSF) Desalination Plant.** University College London
34. Gambier A. **Real Time Fault Tolerant Control of a Reverse Osmosis Desalination Plant Based on a Hybrid System Approach.** American Control Conference
35. Gambier A, Wellenreuther A, Badreddin E. **Optimal Control of a Reverse Osmosis Desalination Plant Using Multi objective Optimization.** International Conference on Control Applications IEEE.
36. Nakayama A, Sano Y. **An Application of the Sano-Nakayama membrane transport model in hollow fiber reverse osmosis desalination systems.** Desalination Elsevier
37. Lee Chen-Jen. **A dynamic simulation model of reverse osmosis desalination systems.** Chang Gung University
38. Felder R, Rousseau R. **Elementary Principles of Chemical Processes.** John Wiley and SonsInc
39. Matsuura T. **Synthetic Membrane and Membrane Separation processes**
40. Cocquempot V. Mezyani T, **Fault detection And Isolation for Hybrid Systems using Structured Parity residuals.** Asian Control Conference

41. Marriot J, (2001) **Detailed modeling optimal design of membrane separation systems**, University College London
42. Palacin L, Tadeo F (2010), **New Dynamic library of reverse osmosis plants with fault simulation**. University of Valladolid
43. Jamal K, Khan A (2003) **Mathematical Modeling of reverse osmosis systems** Desalination Journal
44. Slater C. Zielinski (1985) **Modeling of small scale reverse osmosis systems**. Desalination Journal
45. Eriksson Lars (2005) **Structural Algorithms for Diagnostic system design using Simulink Models** Linkopings university
46. Geankoplis C (1998) **Procesos de transporte y operaciones unitarias** University of Minnesota.
47. Abad A (2006) **Diagnóstico de fallas en el turbogenerador a vapor de una central de generación de ciclo combinado**. Cenidet Mexico
48. Vasile Palade, Cosmin Danut Bocaniala and Lakhmi Jain (Eds). (2006). **Computational Intelligence in Fault Diagnosis**. Springer.
49. Silvio Simani, Cesare Fantuzzi and Ron J. Patton (2002) **Model-based Fault Diagnosis in dynamic systems using Identification Techniques**. Springer
50. Kucera J. **Reverse Osmosis: Design, Processes, and Applications for Engineers**.
51. J. Cotruvo (2010) **Desalination Technology - Health and Environmental Impacts**.
52. Cipollina (2009). **Seawater Desalination**. Springer
53. Syafiie. (2008) **Modelling for Dynamic Simulation of Pretreatment in Reverse Osmosis Plants**. IEEE
54. Mcfall, Bartman, Christofides And Cohen (2008) **Control of a Reverse Osmosis Desalination Process at High Recovery**
55. Mhaskar P., McFall C., Gani A., Christofides P., Davis J. (2008). **Isolation and handling of actuator faults in nonlinear systems**. Automatica.
56. Al-haj. (2010). **Robust model-based control of a tubular reverse-osmosis desalination unit**. Desalination Journal

57. Mcfall, Christofides, Cohen And Davis (2007) **Fault-Tolerant Control of a Reverse Osmosis Desalination Process.**
58. Djebedjian B, Gad H. (2008) **Optimization or reverse osmosis desalination system using genetic algorithms technique.** Mansoura University.
59. Khalaf T. (2008). **Estimation of Concentration Polarization Using the Combined Film theory/Spiegler-Kedem Model and Empirical Correlation.** University of Baghdad.
60. Baker R. 2004. **Membrane Technology and Applications.** John Wiley and Sons.
61. Pérez G.; Sotomayor J. /2014). **Análisis de Redundancia para diagnóstico de fallas de una planta desalinizadora de agua de mar.** CLCA, México.
62. Chantery E. Massuyes T. Indra (2007) S. **The equivalence of decentralizaed & centralized residual generation.**

ANEXOS

ANEXO 1: CÓDIGO DEL PROGRAMA EN MATLAB

```
% =====  
% DIAGNÓSTICO DE FALLOS PLANTA DE OSMOSIS INVERSA  
% =====  
  
close all;  
clear all;  
clc;  
  
%=====DATOS DE ENTRADA  
Pf = 800; %Presión de entrada en psi  
pH = 7; % pH de entrada  
%=====  
Pf = (Pf/14.5038)*10^5; %Pa %Conversión de presión de psi a Pa  
  
%PARÁMETROS DE LA PLANTA  
Rg = 8.314472; % (m3Pa)/(Kmol) constante universal de gases (SI)  
Ff = 2.5; %kg/s %Flujo másico de alimentado (SI)  
T = 25+273.15; %°K %Temperatura de la solución en grados Kelvin  
(SI)  
Cf = 35; %kg/m3=g/L % Concentración típica de sales (SDT) en agua de  
mar  
%Cf=15; %kg/m3=g/L % Concentración de agua salobre (valor medio)  
Pp = 1.01e5; %Pa %Presion de permeado en Pa (SI)  
Pr = Pf-Pp;%Presión del rechazo Pa (SI)  
sigma=0.99999;  
kw=2.05e-9;%Coeficiente de permeabilidad del agua pura para flujo  
másico  
ks=2.03e-5;%Coeficiente de permeabilidad de sales pura para flujo  
másico  
A = 136.6;  
kr = kw/ks;  
Mm = 0.05844; %kg/mol masa molar del cloruro de sodio (SI)  
%D=1.484e-9; %Coeficiente de difusión de sales (constante)  
D=(6.725e-6)*exp((0.1546e-3)*Cf-(2513/T)); %Coeficiente de difusión  
de sales  
delta=4.74e-8;  
kk=D/delta; %0.0315 % Factor de transferencia de masa  
  
%PARAMETROS DEL CONTROLADOR DE FLUJO  
Pf_MAX = (1200/14.5038)*10^5;  
Pf_MIN = (500/14.5038)*10^5;  
Enf = 0;  
En_1f = 0;  
Kcf = 0.0001;  
tauIf = 1.673e-10;  
  
%PARAMETROS DEL CONTROLADOR DE CONDUCTIVIDAD  
pH_MAX = 8;  
pH_MIN = 4;  
Enc = 0;  
En_1c = 0;  
Kcc = 0.0000006;  
tauIc = -5.746829e-7;  
  
%TIEMPOS  
ti = 0;
```

```

tn = 1200;
n = 400;
h = (tn-ti)/n;
T1 = h;

% =====
% CONDICIONES INICIALES
% =====

mr = 53.24; %kg %Holdup del lado rechazo
mp = 35.49; %kg %Holdup del lado permeado
Cr0 = 0; %kg/m3 %Concentración rechazo inicial
Cp0 = 0; %kg/m3 %Concentración permeado inicial

% =====
% CÁLCULO DE VALORES INICIALES PARA EL MODELO
% =====
delta_P = ((0.5*(Pf+Pr))-Pp);
delta_pi = Rg*T*(Cf-Cp0)/(Mm);
Dpres = delta_P-sigma*delta_pi;
Fp = kw*A*(Dpres); %Flujo másico inicial del permeado
Fr = Ff-Fp;
Cp = Cf/(1+(1-(Fp/(2*Ff)))*kr*Dpres);
Cm2 = Cp;
Cm1 = Cp*(1+kr*Dpres);
Cr = (Ff*Cf-Fp*Cp)/Fr;
Fs = 0;
Fw = 0;
RRR = 0;
Jv = 0;
%=====
%BUCLE PRINCIPAL
%=====
Cps = 0;
k = 1;

for t = ti:h:tn

    tt(k,1) = t;
    Dpress(k,1) = Dpres;
    Jvv(k,1) = Jv;
    Cmm2(k,1) = Cm2;
    Cmm1(k,1) = Cm1;
    Cff(k,1) = Cf;
    Crr(k,1) = Cr;
    Pff(k,1) = Pf;
    Ppp(k,1) = Pp;
    Prr(k,1) = Pr;
    Fff(k,1) = Ff;
    Frr(k,1) = Fr;
    Fss(k,1) = Fs;
    pHH(k,1) = pH;

% =====
% CONTROLADOR PI LAZO FLUJO
% =====
    Fp_ref = 1.42;
    Fpref(k,1) = Fp_ref;
    Fpp(k,1) = Fp;
    Enf = Fp_ref - Fp; %error

```

```

    Pf = Pf + Kcf * (Enf - En_1f + (Tl/tauIf) * Enf);
%
    if(Pf > Pf_MAX)
        Pf = Pf_MAX;
    elseif(Pf < Pf_MIN)
        Pf = Pf_MIN;
    end

    Pr=Pf-Pp;

% =====
% CONTROLADOR PI LAZO CONDUCTIVIDAD
% =====
    Cp_ref = 0.1222;%0.1222
    Cpref(k,1) = Cp_ref;
    %Cp(k,1)=Cp;
    Cpp(k,1) = Cps;
    Enc = Cp_ref - Cps; %error
    pH = pH + Kcc * (Enc - En_1c + (Tl/tauIc) * Enc);

    if(pH > pH_MAX)
        pH = pH_MAX;
    elseif(pH < pH_MIN)
        pH = pH_MIN;
    end

% =====
% MODELO DINÁMICO DE PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA
% =====

    Cm2 = Cf/(1+(1-(Fp/(2*Ff)))*kr*Dpres);
    Cm1 = Cm2*(1+kr*Dpres);
    delta_P = ((0.5*(Pf+Pr))-Pp);
    delta_pi = Rg*T*(Cm1-Cm2)/(Mm);
    Dpres = delta_P-sigma*delta_pi;

    Fp = kw*A*(Dpres); %flujo másico del permeado
    Fr = Ff-Fp; %flujo de rechazo
    Fs = ks*A*(Cm1-Cp); %flujo de sales
    CpH = -0.03626*(pH-7);
    Cp = Cp+(h/mp)*(Fp*(Cm2-Cp));
    Cr = Cr+(h/mr)*(Ff*(Cf-Cr)-Fp*(Cm2-Cr));

% =====
% SEÑALES DE LOS SENSORES
% =====
    Cps = Cp+CpH+10e-5*randn(1,1);% Concentración de permeado sensada
    Cpss(k,1) = Cps;

    Fps = Fp+10e-4*randn(1,1); %Flujo de permeado sensado
    Fpss(k,1) = Fps;

    Ts = T+10e-4*randn(1,1); % Temperatura de la solución sensada
    Tss(k,1) = Ts;

    Pfs = Pf+10e-4*randn(1,1); %Sensor de presion
    Pff(k,1) = Pfs;

    pHs = pH+10e-4*randn(1,1); %Sensor de pH

```

```

pHH(k,1) = pH;

%FALLAS EN EL SISTEMA
%Falla en presión de alimentado
% %
%     f_ini= 150;
%     f_end= 200;
%     if (t >= f_ini) && (t <= f_end)
%         %if (t >= f_ini)
%         Pf=0*Pf;
%     elseif (t > f_end)
%         Pf=Pf;
%     else
%         Pf=Pf;
%     end

%Falla en actuador de pH
%
%     f_ini= 350;
%     f_end= 400;
%     if (t >= f_ini) && (t <= f_end)
%         %if (t >= f_ini)
%         pH=0*pH;
%     elseif (t > f_end)
%         pH=pH;
%     else
%         pH=pH;
%     end

%Falla en el sensor/transmisor de flujo
% % %
%     f_ini= 500;
%     f_end= 550;
%     if (t >= f_ini) && (t <= f_end)
%         %if (t >= f_ini)
%         Fps=1.5*Fps;
%     elseif (t > f_end)
%         Fps=Fps;
%     else
%         Fps=Fps;
%     end

%Falla en el sensor/transmisor de concentración
%
%     f_ini= 600;
%     f_end= 650;
%     if (t >= f_ini) && (t <= f_end)
%         %if (t >= f_ini)
%         Cps=1.5*Cps;
%     elseif (t > f_end)
%         Cps=Cps;
%     else
%         Cps=Cps;
%     end

%Falla en kw y ks
%
%     f_ini= 800;
%     f_end= 850;
%     if (t >= f_ini) && (t <= f_end)

```

```

%      %if (t >= f_ini)
%      kw=0.9*kw;
%      elseif (t > f_end)
%      kw=kw;
%      else
%      kw=kw;
%      end
%
%      f_ini= 800;
%      f_end= 850;
%      if (t >= f_ini) && (t <= f_end)
%      %if (t >= f_ini)
%      ks=1.1*ks;
%      elseif (t > f_end)
%      ks=ks;
%      else
%      ks=ks;
%      end
%
% Falla en sensor de temperatura
%
%      f_ini= 900;
%      f_end= 950;
%      if (t >= f_ini) && (t <= f_end)
%      Ts=1.5*Ts;
%      elseif (t > f_end)
%      Ts=Ts;
%      else
%      Ts=Ts;
%      end
%
% Falla por rotura de membrana A
%
%      f_ini= 1000;
%      f_end= 1050;
%      %if (t >= f_ini) && (t <= f_end)
%      if (t >= f_ini)
%      A=0.8*A;
%      elseif (t > f_end)
%      A=A;
%      else
%      A=A;
%      end
%
%Falla por bloqueo en tubería
%
%      f_ini= 800;
%      f_end= 850;
%      if (t >= f_ini) && (t <= f_end)
%      %if (t >= f_ini)
%      Cps=0*Cps;
%      elseif (t > f_end)
%      Cps=Cps;
%      else
%      Cps=Cps;
%      end
%
%      f_ini= 800;
%      f_end= 850;
%      if (t >= f_ini) && (t <= f_end)

```

```

%      %if (t >= f_ini)
%      Fps=0*Fps;
%      elseif (t > f_end)
%      Fps=Fps;
%      else
%      Fps=Fps;
%      end

% =====
% OBSERVADORES (SEÑALES RECONSTRUIDAS) (todo en función de Fps,
Cps, Ts, Pf, pH)
% =====
%Observador de Jv=f(Fps)
Jvol = Fps/A;

%Observador de Dpres=f(Fps)
Dpresol = Jvol/kw;

%Calcula el Cpi, Cri internos
Cpi = Cps+0.03626*(pH-7);
Cri = (Ff*Cf-Fps*Cpi)/(Ff-Fps);

%Observador de Cml=f(+Fps,-Cps)
Cmlol = (Ff*Cf+(Ff-Fps)*Cri)/(2*Ff-Fps);

%Observador de Cml=f(Fps,Cps)
Cmlol2 = (2*Ff*Cf-Fps*Cpi)/(2*Ff-Fps);

%Observador de Cml=f(Dpres)
Cmlol3 = Cpi*(1+(kw/ks)*Dpresol);
% Cálculo de phi (primera forma)
phi=Cml/Cf;
% Cálculo de phi (segunda forma)
phil=(Cmlol-Cpi)/(Cf-Cpi);

%Observador de Cml=f(Fps,Cps) con exponencial 1
phiol = exp(Jvol/kk)
Cmlol4 = Cpi+phiol*(Cf-Cpi); % phi=(Cml-Cpi)/(Cf-Cpi);

%Observador de Cml=f(Fps) con exponencial 1(aprox) %Depende solo de
Fps
Cmlol5 = phiol*Cf; %phi_op=Cml/Cf;

%Observador de Cml=f(Fps,Cps) con exponencial 2
Fol = exp(-(Jvol*(1-sigma))/ks);
Rol = ((1-Fol)*sigma)/(1-sigma*Fol);
Cmlol6 = Cpi/(1-Rol);

%Observador de Cml=f(Fps,Cps)
Cmlol7 = Cpi*(Fps+ks*A)/(ks*A); %Jvo2=ks*(Cmlol-Cps)/Cps;

%Observador de Cp
Cp1 = (phiol*(1-Rol)*Cf)/(phiol+Rol*(1-phiol));
Cps1=Cp1+CpH;

%Observador de Cp segunda forma
%phiol2=Cmlol5/Cf;
Cpe2 = (phi*(1-Rol)*Cf)/(phi+Rol*(1-phi));

```

```

% =====
% DIAGNOSTICADOR DE FALLAS
% =====

%Relación de redundancia analítica 1
deltapi1 = Rg*Ts*(Cm1o2-Cpi)/(Mm);
Dpres1 = delta_P-sigma*deltapi1;
RR1 = Cpi-Cf/(1+(1-(Fps/(2*Ff)))*(kw/ks)*Dpres1); %Restamos Cp-Cp
RRA1(k,1) = RR1;

% Relación de redundancia analítica 2

RR2 = Fps*Cpi-ks*A*(Cm1o2-Cpi); %Restamos Fs-Fs
RRA2(k,1) = RR2;

% Relación de redundancia analítica 3

RR3 = Ro1-((Cm1o2-Cpi)/Cm1o2); %Restamos R-R
RRA3(k,1) = RR3;

%Relación de redundancia analítica 4

RR4 = Cm1o3-(Ff*Cf+(Ff-Fps)*Cri)/(2*Ff-Fps); %Restamos Cm1o3-Cm1o1
RRA4(k,1) = RR4;

% Relación de redundancia analítica 5

deltapi5 = (Rg*Ts*Cpi*kw*delta_P)/(Mm*ks+Rg*Ts*Cpi*kw*sigma);
Dpres5 = delta_P-sigma*deltapi5;
Jv5 = kw*(delta_P-sigma*deltapi5);
F5 = exp(-(Jv5*(1-sigma))/ks);
R5 = ((1-F5)*sigma)/(1-sigma*F5);
RR5 = R5-((Cm1o3-Cpi)/Cm1o3); %Restamos R-R
RRA5(k,1) = RR5;

% Relación de redundancia analítica 6
RR6 =Cps1-Cps;
RRA6(k,1) = RR6;

% Relación de redundancia analítica 7
RR7 = kk*log(Cm1o1/Cf)-Jvo1; % Resta Jv-Jv
RRA7(k,1) = RR7;

%Relacion de redundancia analitica 8
RR8 = Cm1o4/(1+(kw/ks)*Dpresol)-Cf/(1+(1-(Fps/(2*Ff)))*(kw/ks)*Dpresol); %Restamos Cp-Cp
RRA8(k,1) = RR8;

%Relacion de redundancia analitica 9
RR9 = Cm1o5/(1+(kw/ks)*Dpresol)-Cf/(1+(1-(Fps/(2*Ff)))*(kw/ks)*Dpresol); %Restamos Cp-Cp
RRA9(k,1) = RR9;

%Relacion de redundancia analitica 10
RR10 = phi1-phiol; %Restamos phi-phi_obs
RRA10(k,1) = RR10;

% Relación de redundancia analítica 11:

```

```

RR11 = Fp_ref - Fps; %Error controlador flujo
RA11(k,1) = RR11;

% Relación de redundancia analítica 12:
RR12 = Cp_ref - Cps; %Error controlador conductividad
RA12(k,1) = RR12;

En_1f = Enf;
En_1c = Enc;
k=k+1;

end

figure(1)
subplot(4,1,1)
plot(tt,Fpp,'b',tt,Fpref,'--r','LineWidth',2)
title('Control de flujo')
legend('Señal Fp','Referencia')
grid on

subplot(4,1,2)
plot(tt,Cpp,'b',tt,Cpref,'--r','LineWidth',2)
title('Control de conductividad')
grid on

subplot(4,1,3)
Pff = Pff*(14.5038/10^5);
plot(tt,Pff,'Color',[0 0.5 0],'LineWidth',2)
title('Señal de control Pf')
grid on

subplot(4,1,4)
plot(tt,pHH,'Color',[0 0.5 0],'LineWidth',2)
title('Señal de control pH')
grid on

figure(2)
subplot(4,3,1)
plot(tt,RA1,'b','LineWidth',2)
title('RA1','FontSize',14)
grid on

subplot(4,3,2)
plot(tt,RA2,'b','LineWidth',2)
title('RA2','FontSize',14)
grid on

subplot(4,3,3)
plot(tt,RA3,'b','LineWidth',2)
title('RA3','FontSize',14)
grid on

subplot(4,3,4)
plot(tt,RA4,'b','LineWidth',2)
title('RA4','FontSize',14)
grid on

subplot(4,3,5)
plot(tt,RA5,'b','LineWidth',2)

```

```

title('RRA5','FontSize',14)
grid on

subplot(4,3,6)
plot(tt,RRA6,'b','LineWidth',2)
title('RRA6','FontSize',14)
grid on

subplot(4,3,7)
plot(tt,RRA7,'b','LineWidth',2)
title('RRA7','FontSize',14)
grid on

subplot(4,3,8)
plot(tt,RRA8,'b','LineWidth',2)
title('RRA8','FontSize',14)
grid on

subplot(4,3,9)
plot(tt,RRA9,'b','LineWidth',2)
title('RRA9','FontSize',14)
grid on

subplot(4,3,10)
plot(tt,RRA10,'b','LineWidth',2)
title('RRA10','FontSize',14)
grid on

subplot(4,3,11)
plot(tt,RRA11,'k','LineWidth',2)
title('ERR1','FontSize',14)
grid on

subplot(4,3,12)
plot(tt,RRA12,'k','LineWidth',2)
title('ERR2','FontSize',14)
grid on

```