



**UNIVERSIDAD NACIONAL
“PEDRO RUIZ GALLO”**



**FACULTAD DE CIENCIA FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**“DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO DESALINIZADORA
DE AGUA CONTROLADA POR UN SISTEMA HMI/SCADA,
PARA LA CAPACITACIÓN DE LOS ALUMNOS DE LA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO”**

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRÓNICO**

AUTORES:

Bach. Esqueche Gonzales Moises Abraham.

Bach. Villanueva Guevara Timy Eduardo.

ASESOR:

Ing. Ramirez Castro Manuel

Lambayeque-Perú

2020



UNIVERSIDAD NACIONAL
“PEDRO RUIZ GALLO”



FACULTAD DE CIENCIA FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

“DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO DESALINIZADORA DE AGUA
CONTROLADA POR UN SISTEMA HMI/SCADA, PARA LA
CAPACITACIÓN DE LOS ALUMNOS DE LA ESCUELA
PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO”

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

AUTORES

Bach. Esqueche Gonzales Moises Abraham
Autor

Bach. Villanueva Guevara Timy Eduardo
Autor

Bach. Ramirez Castro Manuel Javier
Asesor



UNIVERSIDAD NACIONAL
“PEDRO RUIZ GALLO”



FACULTAD DE CIENCIA FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

“DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO DESALINIZADORA DE AGUA
CONTROLADA POR UN SISTEMA HMI/SCADA, PARA LA
CAPACITACIÓN DE LOS ALUMNOS DE LA ESCUELA
PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO”

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

APROBADO POR EL SIGUIENTE JURADO:

Ing. Chiclayo Padilla Hugo.
Presidente del jurado

Ing. Oblitas Vera Carlos Leonardo
Secretario del jurado

Mg. Ing. Romero Cortez Oscar
Vocal del jurado

DEDICATORIA

Esta tesis la dedico a mis padres Miguel y Margarita por el sacrificio que realizaron para darme los recursos para poder estudiar, por el amor y la paciencia.

Atte. Moises Esqueche G

Esta tesis la dedico a mis padres José y María por el sacrificio que realizaron para darme los recursos para poder estudiar, por el amor y la paciencia.

Atte. Timy Villanueva

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios por todo lo que me ha dado en la vida mis padres y docentes

A mi Asesor por su asesoría y apoyo brindado.

A mi Universidad UNPRG, por brindarme la formación académica y profesional. A todos los docentes que han impartido y compartido sus conocimientos con nosotros los estudiantes, por sus sabios consejos, apoyo y sugerencias para ser personas de bien y excelentes profesionales.

ÍNDICE

I.	Introducción.....	14
1.	Justificación	15
2.	Objetivo	15
2.1.	Objetivo general.....	15
2.2.	Objetivos específicos.....	15
3.	Hipótesis:	15
II.	Marco Teórico	16
1.	Sistema de desalinización	16
2.	Características del agua de mar:	16
2.1.	Salinidad:	16
2.2.	PH:	20
2.3.	Densidad:	20
2.4.	Gases Disueltos:.....	21
2.5.	Sólidos en suspensión:	21
2.6.	Temperatura	21
3.	Tecnología de desalinización.....	26
3.1.	Desalinización Térmica:.....	26
3.2.	Electrodialisis (ED):	28
3.3.	Intercambio de iones (IX)	28
3.4.	Ósmosis inversa:	29
3.5.	Sistema de Calentador de agua:	41
3.6.	Automatización para plantas industriales	42
3.7.	<i>Función de transferencia</i>	48
3.8.	<i>PID</i>	48
3.9.	<i>Modelo de los dispositivos de campo</i>	49
III.	Metodología	68
1.	Sistema de captación de agua de mar:	69

1.1.	Toma abierta:	69
1.2.	Pozos o canteras de captación	69
2.	Pretratamiento:	69
2.1.	Desbaste grueso:	69
2.2.	Tamizado:	70
2.3.	Flotación por aire disuelto	70
2.4.	Decantación:	70
2.5.	Filtración sobre arena o sobre lecho multicapa:	70
2.6.	Ultrafiltración	71
2.7.	Filtros de cartucho	71
3.	Acondicionamiento químico:	72
3.1.	PH:	73
3.2.	Temperatura	73
3.3.	Sistema de calefacción de agua:	73
4.	Ósmosis Inversa:	74
4.1.	Membranas de ósmosis inversa:	76
4.2.	Agrupación de membranas	79
4.3.	Esquema básico de un proceso de ósmosis inversa	80
4.4.	Concepto de etapa y de paso:	81
4.5.	Influencia de distintos factores en el rechazo de sales	83
5.	Post tratamiento	85
6.	Instrumentos de campo.	86
6.1.	Transmisores:	86
6.2.	Actuadores:	99
IV.	Implementación.	104
1.	Captación del agua de mar:	105
2.	Pretratamiento:	105
3.	Acondicionamiento químico:	105
3.1.	PH.	105
3.2.	Temperatura	106
4.	Ósmosis Inversa:	109
4.1.	Membrana de ósmosis inversa:	109
4.2.	Agrupación de membranas:	110
5.	Post tratamiento:	110
6.	Instrumentos en campo:	110
6.1.	Transmisores.	110

6.2. Actuadores.....	115
V. Resultados:	118
1. Sistema de calentamiento de agua:.....	118
2. SIMULACIÓN:	119
VI. Conclusiones y recomendaciones:	121
VII. BIBLIOGRAFIA.	122

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: SALINIDAD DE LAS DIFERENTES REGIONES DEL PLANETA SEGÚN G. FORCHHAMMER-----	17
TABLA 2: PROPORCIÓN DE LOS PRINCIPALES IONES DEL AGUA DE MAR SEGÚN W.DITTMAR Y LYMAN&FLEMING -----	20
TABLA 3: COMPARACION DE LAS MEMBRANAS DE PELICULA DE DELGADA Y DE ACETATO DE CELULOSA -----	36
TABLA 4: DIRECTRICES DE CALIDAD DE AGUA GENERALMENTE ACEPTADAS PARA MINIMIZAR LA OBSTRUCCIÓN DE LA MEMBRANA DE RO -----	39
TABLA 5: DIRECTRICES DE CALIDAD DE AGUA GENERALMENTE ACEPTADAS -----	39
TABLA 6: APLICACION DE LA OSMOSIS INVERSA EN EL TRATAMIENTO DE AGUA -----	41
TABLA 7: CARACTERÍSTICAS DE LA VÁLVULA VALBIA 030-----	65
TABLA 8: DOSIS DE REACTIVOS HABITUALES EN UNA DESALADORA POR ÓSMOSIS INVERSA [82]-----	72
TABLA 9:MEDIDOR MULTI PARAMÉTRICO-----	112

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: SALINIDAD DE LAS DIFERENTES REGIONES DEL PLANETA SEGÚN G. FORCHHAMMER	18
FIGURA 2: SALINIDAD SUPERFICIAL MEDIDA DESDE EL ESPACIO [HTTP://ACUARIUS.NASA.GOV]	19
FIGURA 3: INFLUENCIA DEL PH EN EL RECHAZO DE SALES (MEDINA, 2000)	20
FIGURA 4: TEMPERATURA ANUAL EN LA SUPERFICIE DEL MAR (°C) (WORLD OCEAN ATLAS, 2013)	22
FIGURA 5: TEMPERATURA ANUAL EN LA SUPERFICIE – MAR MEDITERRÁNEO (°C) (WORLD OCEAN ATLAS, 2013)	22
FIGURA 6: TEMPERATURA ANUAL EN LA SUPERFICIE – MAR DEL NORTE (°C) (WORLD OCEAN ATLAS, 2013)	23
FIGURA 7: TEMPERATURA ANUAL EN LA SUPERFICIE – ATLÁNTICO CENTRAL (°C) (WORLD OCEAN ATLAS, 2013)	23
FIGURA 9: TEMPERATURA ANUAL EN LA SUPERFICIE – ATLÁNTICO SUR (°C) (WORLD OCEAN ATLAS, 2013)	23
FIGURA 9: TEMPERATURA ANUAL EN LA SUPERFICIE – ATLÁNTICO SUR (°C) (WORLD OCEAN ATLAS, 2013)	23
FIGURA 10: TEMPERATURA ANUAL EN LA SUPERFICIE – MAR DE ARABIA (°C). (WORLD OCEAN ATLAS, 2013)	24
FIGURA 11: TEMPERATURA ANUAL EN LA SUPERFICIE – OCÉANO INDICO (°C) (WORLD OCEAN ATLAS, 2013)	24
FIGURA 12: TEMPERATURA ANUAL EN LA SUPERFICIE – AUSTRALIA (°C) (WORLD OCEAN ATLAS, 2013)	24
FIGURA 13: TEMPERATURA ANUAL EN LA SUPERFICIE – OCÉANO PACÍFICO (°C) (WORLD OCEAN ATLAS, 2013)	25
FIGURA 14: TEMPERATURA ANUAL EN LA SUPERFICIE Y A 25 M – MAR DE ARABIA (°C) (WORLD OCEAN ATLAS, 2013)	25
FIGURA 15: TEMPERATURAS MÁXIMAS Y MÍNIMAS EN SUPERFICIE EN LOS DISTINTOS MARES DEL PLANETA (CABRERA, 2015)	26
FIGURA 16: DESTILACIÓN FLASH MULTITAPA (VOUTCHKOV, 2013).	27
FIGURA 17: DESTILACIÓN MULTIEFECTO (VOUTCHKOV, 2013).	27
FIGURA 18: DESTILACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR (VOUTCHKOV, 2013).	28
FIGURA 19: ELECTRODIÁLISIS (VOUTCHKOV, 2013).	28
FIGURA 20: ÓSMOSIS INVERSA (VOUTCHKOV, 2013).	29
FIGURA 21: PROCESO DE DIFUSIÓN A TRAVÉS DE UNA MEMBRANA SEMIPERMEABLE	30
FIGURA 22: PROCESO DE DIFUSIÓN DE DOS SOLUCIONES CON DISTINTA CONCENTRACIÓN	30
FIGURA 23: PROCESO DE ÓSMOSIS INVERSA	31
FIGURA 24: OSMOSIS INVERSA	33
FIGURA 25: RECHAZO DE LA OSMOSIS INVERSA	33
FIGURA 26: SISTEMA TÍPICO DE OSMOSIS INVERSA	34
FIGURA 27: CONSTRUCCIÓN DE UNA MEMBRANA EN ESPIRAL	38
FIGURA 28: MODICOM 084	43
FIGURA 29: SEÑAL DIGITAL SOBREPUESTA A LA SEÑAL ANALÓGICA	44
FIGURA 30: DOS CANALES DE COMUNICACIÓN	45
FIGURA 31: CONFIGURACIÓN PUNTO A PUNTO Y MULTIPUNTO (HART WEB)	45
FIGURA 32: PIRÁMIDE DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL	46
FIGURA 33: PLC O DCS COMO RTU	46
FIGURA 34: IED'S COMO RTU	47
FIGURA 35: ARQUITECTURA SCADA	47
FIGURA 36: PANELES DE OPERADOR PANEL VIEW DE LA COMPAÑÍA ALLEN BRADLEY	48
FIGURA 37: SISTEMA PID	49
FIGURA 38: INTERACCIÓN DE DISPOSITIVOS EN UN PROCESO	50
FIGURA 39: COMPORTAMIENTO REAL E IDEAL DE UN SENSOR	50
FIGURA 40: RELACIÓN DE MEDIDAS PARA LA ASOCIACIÓN A UNA FUNCIÓN	51
FIGURA 41: MEDICIÓN DE UNA VARIABLE POR UN SENSOR	51

FIGURA 42: POSIBLE COMPORTAMIENTO DEL SENSOR DE ACUERDO CON LA UBICACIÓN DE SUS POLOS EN EL PLANO IMAGINARIO -----	53
FIGURA 43: RELACIÓN DE GANANCIA DEL TRANSMISOR -----	54
FIGURA 44: DIAGRAMA DE BLOQUES PARA TRANSMISORES EN SIMULINK -----	55
FIGURA 45: PRINCIPIO DE MEDICIÓN DEL FLUJÓMETRO ELECTROMAGNÉTICO -----	55
FIGURA 46: RESPUESTA DEL TRANSMISOR EN TODO SU RANGO -----	56
FIGURA 47: OPERACIÓN DEL SENSOR PIEZORESISTIVO -----	57
FIGURA 48: OPERACIÓN DEL TRANSMISOR DE PRESIÓN ROSSEMOUNT 2051 (ROSSEMOUNT, 2013) ----	58
FIGURA 49: RESPUESTA DEL TRANSMISOR EN TODO SU RANGO -----	59
FIGURA 50: CONEXIÓN A 4 HILOS DE UNA PT100 -----	59
FIGURA 51: RESPUESTA DEL TRANSMISOR EN TODO SU RANGO -----	60
FIGURA 52: ELECTRODO COMBINADO PARA MEDICIÓN DE PH -----	60
FIGURA 53: RESPUESTA DEL SENSOR EN TODO SU RANGO -----	61
FIGURA 54: PROCESO DE MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DE UN FLUIDO -----	62
FIGURA 55: RESPUESTA DEL SENSOR EN TODO SU RANGO -----	62
FIGURA 56: ACTUADOR Y CUERPO DE VÁLVULA -----	63
FIGURA 57: DINÁMICA DE UNA VÁLVULA DE CONTROL PROPORCIONAL -----	63
FIGURA 58: REPRESENTACIÓN PRÁCTICA DE UNA VÁLVULA DE CONTROL -----	64
FIGURA 59: DINÁMICA DE UNA VÁLVULA DE CONTROL PROPORCIONAL LINEAL -----	65
FIGURA 60: RELACIÓN ENTRE TIEMPO Y PORCENTAJE DE APERTURA -----	65
FIGURA 61: RESPUESTA DEL ACTUADOR EN UNA APERTURA DEL 0 AL 100% -----	66
FIGURA 62: DIAGRAMA DE FLUJO DE UNA DESALADORA DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA ----	68
FIGURA 63: SISTEMA DE CALEFACCIÓN DE AGUA -----	73
FIGURA 64: PLANTA DE DESALINIZACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA. -----	74
FIGURA 65: RELACIÓN DE CAUDALES EN UNA MEMBRANA DE ÓSMOSIS INVERSA -----	75
FIGURA 66: MEMBRANA DE ARROLLAMIENTO ESPIRAL [21] -----	79
FIGURA 67: AGRUPACIÓN DE MEMBRANAS EN SERIE -----	80
FIGURA 68: AGRUPACIÓN DE MEMBRANAS EN PARALELO -----	80
FIGURA 69: ESQUEMA BÁSICO DE UN RACK DE ÓSMOSIS INVERSA DE AGUA DE MAR -----	81
FIGURA 70: PROCESO DE ÓSMOSIS INVERSA EN N ETAPAS -----	82
FIGURA 71: PROCESO DE ÓSMOSIS INVERSA EN 2 PASOS. -----	83
FIGURA 72: INFLUENCIA DE LA T° EN EL RECHAZO DE SALES DE UNA MEMBRANA -----	84
FIGURA 73: INFLUENCIA DE LA SALINIDAD DE ENTRADA EN EL RECHAZO DE SALES DE UNA MEMBRANA -----	84
FIGURA 74: INFLUENCIA DE LA PRESIÓN DE ENTRADA EN EL RECHAZO DE SALES DE UNA MEMBRANA -	84
FIGURA 75: INFLUENCIA DE LA CONVERSIÓN EN EL RECHAZO DE SALES DE LA MEMBRANA -----	85
FIGURA 76: COMPORTAMIENTO REAL E IDEAL DE UN SENSOR -----	87
FIGURA 77: RELACIÓN DE MEDIDAS PARA LA ASOCIACIÓN A UNA FUNCIÓN -----	87
FIGURA 78: MEDICIÓN DE UNA VARIABLE POR UN SENSOR -----	88
FIGURA 79: POSIBLE COMPORTAMIENTO DEL SENSOR DE ACUERDO CON LA UBICACIÓN DE SUS POLOS EN EL PLANO IMAGINARIO -----	89
FIGURA 80: RELACIÓN DE GANANCIA DEL TRANSMISOR -----	90
FIGURA 81: DIAGRAMA DE BLOQUES PARA TRANSMISORES EN SIMULINK -----	91
FIGURA 82: PRINCIPIO DE MEDICIÓN DEL FLUJÓMETRO ELECTROMAGNÉTICO -----	92
FIGURA 83: RESPUESTA DEL TRANSMISOR EN TODO SU RANGO -----	93
FIGURA 84: OPERACIÓN DEL SENSOR PIEZORESISTIVO -----	93
FIGURA 85: OPERACIÓN DEL TRANSMISOR DE PRESIÓN ROSSEMOUNT 2051 (ROSSEMOUNT, 2013) ----	94
FIGURA 86: RESPUESTA DEL TRANSMISOR EN TODO SU RANGO -----	95
FIGURA 87: CONEXIÓN A 4 HILOS DE UNA PT100 -----	95
FIGURA 88: RESPUESTA DEL TRANSMISOR EN TODO SU RANGO -----	96
FIGURA 89: ELECTRODO COMBINADO PARA MEDICIÓN DE PH -----	97
FIGURA 90: RESPUESTA DEL SENSOR EN TODO SU RANGO -----	98
FIGURA 91: PROCESO DE MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DE UN FLUIDO. -----	98

FIGURA 92: RESPUESTA DEL SENSOR EN TODO SU RANGO -----	99
FIGURA 93: ACTUADOR Y CUERPO DE VÁLVULA -----	99
FIGURA 94: DINÁMICA DE UNA VÁLVULA DE CONTROL PROPORCIONAL -----	100
FIGURA 95: REPRESENTACIÓN PRÁCTICA DE UNA VÁLVULA DE CONTROL -----	100
FIGURA 96: DINÁMICA DE UNA VÁLVULA DE CONTROL PROPORCIONAL LINEAL -----	101
FIGURA 97: RELACIÓN ENTRE TIEMPO Y PORCENTAJE DE APERTURA -----	102
FIGURA 98: RESPUESTA DEL ACTUADOR EN UNA APERTURA DEL 0 AL 100% -----	103
FIGURA 99: PLANTA DE DESALINIZACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA -----	104
FIGURA 100: SISTEMA DE CALENTAMIENTO CON RESISTENCIA -----	106
FIGURA 101: SISTEMA ÓSMOSIS INVERSA -----	109
FIGURA 102: MEMBRABA PARA EL SISTEMA DE OSMOSIS INVERSA -----	110
FIGURA 103: AGRUPACIÓN DE MEMBRANAS EN SERIE -----	110
FIGURA 104: MEDIDOR MULTI PARAMÉTRICO DE CALIDAD DE AGUA. U53G -----	111
FIGURA 105: SENSOR DE NIVEL ULTRASÓNICO -----	112
FIGURA 106: SENSOR DE TEMPERATURA -----	113
FIGURA 107: TRANSMISOR DE PRESIÓN. -----	114
FIGURA 108: ELECTROVÁLVULA -----	115
FIGURA 109: ELECTROBOMBA -----	116
FIGURA 110: CALENTADOR DE AGUA -----	116
FIGURA 111: RESPUESTA AL ESCALÓN DE LA PLANTA EN LAZO ABIERTO -----	118
FIGURA 112: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA -----	118
FIGURA 113: RESPUESTA AL ESCALÓN EN LAZO CERRADO -----	119
FIGURA 114: SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA (SIMULIK) -----	119
FIGURA 115: SISTEMA DE CALENTAMIENTO Y ALMACENAMIENTO PARA EL SISTEMA OSMOSIS INVERSA -----	120
FIGURA 116: LÓGICA DEL SISTEMA -----	120

RESUMEN

La presente investigación se realiza en la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, tiene como objetivo: La capacitación de los alumnos de la escuela profesional de Ingeniería Electrónica en el diseño de una planta piloto desalinizadora de agua controlada por un sistema HMI/SCADA.

El trabajo inicialmente consistió en controlar una planta desalinizadora a través del sistema HMI/SCADA para esto primero elegimos el Sistema de osmosis Inversa el cual usa una membrana y de acuerdo a la elección de esta membrana se debe considerar la salinidad, el PH (7), la temperatura (25°C) y los sólidos en suspensión, gases disueltos que deben ingresar a esta membrana, para ello se consideró mejorar el pretratamiento y la temperatura antes del ingreso en el sistema y esto pueda extender la vida útil de la membrana, para ello se ha considerado el uso de transmisores de flujo, temperatura, nivel y también electroválvulas, electrobombas, en el caso del pretratamiento tamices rotativos y rejillas de desbaste, para ello hemos estudiado el sistema de desalinización del agua (osmosis inversa) y así plantear el diseño estructural del sistema de desalinización del agua de mar, el diseño del sistema de supervisión y control del sistema y seleccionar los equipos e instrumentos adecuados para el sistema. Esto nos llevó a estudiar el agua de mar en nuestro territorio y en las costas del norte del país y nos dio como datos preliminares la salinidad (33,2 a 35,6 UPS), PH (7.5 a 8.4), temperatura (19°C - 21°C).

ABSTRAC

This research is carried out at the Pedro Ruiz Gallo National University, with the objective of: Training the students of the Professional School of Electronic Engineering in the design of a pilot water desalination plant controlled by an HMI / SCADA system. The work initially consisted of controlling a desalination plant through the HMI / SCADA system, for this we first chose the Reverse Osmosis System which uses a membrane and according to the choice of this membrane, salinity, PH (7) must be considered. , the temperature (25 ° C) and the suspended solids, dissolved gases that must enter this membrane, for this, it was considered to improve the pre-treatment and the temperature before entering the system and this may extend the useful life of the membrane, For this, the use of flow, temperature, level transmitters and also solenoid valves, electropumps has been considered, in the case of pretreatment of rotary sieves and roughing bars, for this we have studied the water desalination system (reverse osmosis) and thus, to propose the structural design of the seawater desalination system, the design of the system's supervision and control system, and select the equipment and instruments suitable for the system. This led us to study the seawater in our territory and on the northern coasts of the country and gave us as preliminary data salinity (33.2 to 35.6 UPS), PH (7.5 to 8.4), temperature (19 ° C -21 ° C).

I. **Introducción:**

Aproximadamente el 97.5% del agua en el planeta se encuentra localizada en los océanos, lo que representa una extensa reserva de agua, la cual puede ser aprovechada mediante diversos métodos de obtención de agua desalinizada (Micale, Rizzuti & Cipollina, 2009).

En esta tesis se hablará de los métodos para obtener agua potable del agua de mar, métodos de desalación, los cuales estudiaremos con mayor detalle más adelante. Como se menciona antes nuestro planeta cuenta con una fuente de agua de gran volumen como es el agua del mar y esto puede ser una solución a la falta de agua en el planeta que se incrementa más día a día por las sequías y el cambio climático así como el mal uso del agua.

Para ello en un artículo que se cita a continuación que habla sobre la desalación y sus métodos. Nos dice que entre los años 1960 y 1980, se comenzaron a introducir las técnicas de desalinización de agua por destilación flash multietapa (MSF), destilación multiefecto (MED) y destilación por compresión de vapor (CV). Estas técnicas se centran en evaporar el agua de mar para separar el agua dulce de la sal, lo que ocasiona un alto consumo de energía y, por lo tanto, un alto consumo de producción de agua. Es así que entre los años 1980 y 1999, se introdujo el desarrollo de la técnica de desalinización de agua por ósmosis inversa (RO), con la cual se redujo el costo de producción de agua desalinizada (Alatqi, Ettouney, & El-Dessouky, 1999).

Conforme ha pasado el tiempo estos métodos van mejorando y su rendimiento puede ser optimizado y seguido de manera automatizada. Como se menciona en el título de esta tesis haremos un estudio y seguimiento de este método de automatización.

Las tecnologías de automatización industrial han avanzado a pasos agigantados desde la invención del transistor en 1947 en los laboratorios (Riordan, Hoddeson, Herring, 1999).

En la presente tesis se propone realizar un estudio a todo el sistema para la desalación de agua. Como se menciona en el título de esta, se realizará el diseño de una planta desalinizadora controlada por un sistema autónomo o PLC (control lógico programable). También se buscará mejorar el uso de los equipos de la planta desalinizadora.

1. Justificación

La consecuencia de conocer el funcionamiento de un sistema de desalinización a través de una planta piloto.

Ver el proceso exacto, poder hacer medidas y conocer los parámetros de este sistema de manera presencial.

Poder realizar una mejora al sistema para un proceso más eficiente y rápido conociendo los pasos y sus medidas.

2. Objetivo

2.1. Objetivo general

Diseño de una planta piloto desalinizadora de agua controlada por un (Michael Riordan, 1999) Sistema HMI/SCADA, para la capacitación de los alumnos de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

2.2. Objetivos específicos

- Estudiar los sistemas de desalinización del agua.
- Plantear el diseño estructural del sistema de desalinización del agua de mar
- Plantear el diseño del sistema de supervisión y control del sistema.
- Seleccionar los equipos e instrumentos adecuados para el sistema.
- Simular el diseño del sistema SCADA.

3. Hipótesis:

Desarrollar módulos de control distribuido, que integre los datos obtenidos por protocolos de comunicación industrial para un sistema de desalinización y generar un conocimiento de una miniplanta desalinizadora piloto, tal que estos módulos puedan ser utilizados en otros procesos similares de forma rápida y sencilla.

II. Marco Teórico

1. Sistema de desalinización

En este capítulo estudiaremos los sistemas de desalación. Los cuales son un método apropiado que nos ayudara con la escasez de agua a nivel mundial. Actualmente, muchas regiones del planeta presentan un severo problema de escases de agua, el cual se va incrementando debido a diversos factores como son el crecimiento poblacional, desarrollo industrial y cambios climáticos (García & Gómez, 2001). Es conocido también que el 98% del agua del planeta se encuentra en los océanos, los cuales son una verdadera e inagotable reserva de agua la cual puede ser aprovechada mediante diversos procesos para obtener agua desalinizada y combatir dicha escasez (Ramillo, Gómez & Coppari, 2003).

Al hacer la investigación de este tema según los estudios realizados y la evidencia de revista como libros encontramos que las tecnologías de desalinización de agua de mar se pueden distribuir en cuatro grupos (Voutchkov, 2013), que son:

- Desalinización térmica (destilación).
- Ósmosis inversa (RO).
- Electrodialisis (ED).
- Intercambio de iones (IX).

2. Características del agua de mar:

El agua de mar contiene altas cantidades de sólidos disueltos totales de aproximadamente 34.500 mg/L. y para el diseño del sistema de desalación son importantes factores como la salinidad y la temperatura del agua a tratar.

2.1. Salinidad:

Se entiende por salinidad a la cantidad de solidos disueltos en el agua y está la determina la conductividad eléctrica (depende de la temperatura), el índice de refracción o ion cloruro y cantidad de agua evaporada.

El concepto de salinidad evoluciona conforme se hacen más estudios sobre los océanos. Y esto inicio desde el siglo XVII. Aproximadamente un siglo después, Antoine Lavoisier presentó a la Academia de Ciencias francesas sus estudios y proclamó públicamente la composición del agua (1784). (Armijo, 2012; Pellon, 2002)

Forchhammer (1865) introdujo el término de Salinidad e identificó 27 elementos en el Agua de Mar. Confirmó el principio de Marcet para las sales más abundantes (Cloruros, sodio, calcio, potasio, magnesio y sulfatos) y en 1865 publicó los resultados de su investigación en los que dividía el planeta en diferentes regiones y mostraba la salinidad de cada una de ellas (Forchhammer, 1865).

Salinity of the surface of the different parts of the ocean					
On the composition of Sea-water in the different parts of the ocean - Georg Forchhammer					
Región	Oceano/mar	Situación	Salinidad (mg/l)		
			Media	Minima	Máxima
1ª Región	Oceano Atlántico	Entre el ecuador y latitud 30° Norte	36.169	34.283	37.908
2ª Región	Oceano Atlántico	Entre latitud 30°N y la línea que va entre el punto norte de Escocia y el punto norte de la Isla de Terranova	35.946	33.854	36.927
3ª Región	Atlántico Norte	Entre la 2ª región y la línea que une Islandia con Labrador	35.391	34.831	36.480
4ª Región	Groenlandia	Mar de Groenlandia	35.278		
5ª Región A	Bahía de Baffin	Norte de Canada	33.281	32.304	34.414
5ª Región B	Mar de Noruega y Barents	Mar de Noruega y mar de Barents	35.327	34.396	36.254
5ª Región C	Oceano Artico	Oceano Artico	33.623		
6ª Región	Mar del Norte	Entre Noruega, Dinamarca y el Reino Unido	32.823	30.530	35.041
7ª Región	El kattegat	Entre el mar Báltico y el mar del Norte	29.441	19.716	42.163
8ª Región	Mar Báltico	Mar Báltico	9.048		13.728
9ª Región	Mar Mediterraneo		37.936	36.301	39.257
10ª Región A	Mar Negro	Mar Negro	15.894	11.880	18.146
10ª Región B	Mar Caspio	Los datos de Forchhammer no son muy buenos			
11ª Región	Oceano Atlántico	Entre el ecuador y latitud 30° Sur	36.553	35.930	37.155
12ª Región	Oceano Atlántico	Entre la región 11 y la línea que une el cabo de Hornos y el cabo de Buenaesperanza	35.038	34.151	35.907
13ª Región	Oceano Indico	Entre Africa y Malasia	33.868	25.879	35.802
14ª Región	Oceano Pacífico Norte	Entre Filipinas, costa sureste de Asia y las islas Aleutinas	33.506	32.370	34.234
15ª Región	Oceano Pacífico Central	Entre las islas Aleutianas y las Islas de la sociedad	35.219	34.157	36.061
16ª Región	Oceano Pacífico Sur	Corriente de la Patagonia	33.966	33.788	34.152
17ª Región	Mar del Polo Sur			28.565	37.513

Tabla 1: SALINIDAD DE LAS DIFERENTES REGIONES DEL PLANETA SEGÚN G. FORCHHAMMER

La figura 1 muestra de manera gráfica como en el rango entre 30.000 y 40.000 mg/l se encuentra la mayor parte de las salinidades de agua de mar del planeta. Esta conclusión es válida en la actualidad, aunque son conocidas regiones concretas con valores superiores a los citados, como son el mar Muerto o el Golfo Pérsico,

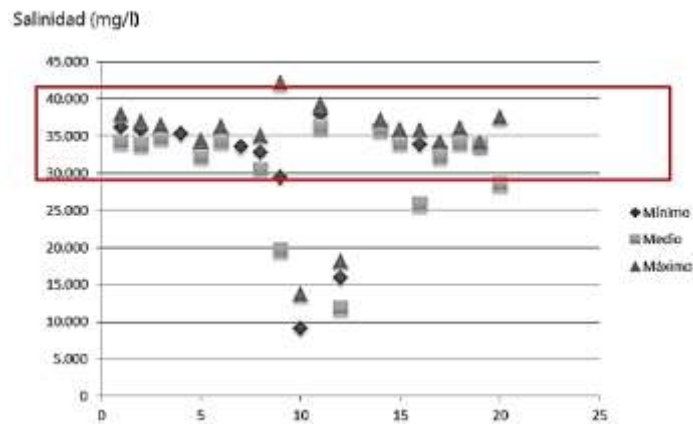


Figura 1: SALINIDAD DE LAS DIFERENTES REGIONES DEL PLANETA
SEGÚN G. FORCHHAMMER

En 1884, William Dittmar estableció la teoría de la composición constante en el agua de mar, a partir de análisis recogidos en todos los mares del mundo. Estableció un porcentaje constante para los principales iones del agua de mar (Sverdrup, Johnson & Fleming, 1942).

Martin Knudsen, a principios del siglo XX, encontró que existía una relación lineal entre la salinidad y la clorinicidad, siendo esta última la masa en gramos de cloruros contenidos en agua de mar sumada a la masa de bromuros convertida a cloruros equivalentes (Werlinger, Alveal & Romo, 2004).

En 1966, se publican las Tablas Oceanográficas Internacionales (Volumen I), preparadas conjuntamente por la UNESCO y el Instituto Nacional de Oceanografía (Wormly, UK), las cuales tras ser supervisadas por el SCOR (Scientific Commission for Oceanic Research) y el IAPSO (International Association for the Physical Sciences of the Ocean) las recomendaron para el uso de todos los oceanógrafos (UNESCO, 1987). La relación de salinidad según dichas tablas es la siguiente:

$$\text{Salinidad} = 1.80655 \times Cl \quad (\text{g/l}) \quad (1)$$

Si se comparan los resultados en la medida de la salinidad a partir del valor de clorinicidad con los resultados a partir de la medida de conductividad a 15°C, los resultados son similares, aunque se observan pequeñas diferencias. Por esta razón, en 1978, un comité de expertos compuesto por la UNESCO, SCOR, IAPSO e ICES propuso una nueva definición de la salinidad y recomendó el uso de la Escala Práctica de Salinidad (UPS – Unidades prácticas de Salinidad), en siglas anglosajonas PSU. Esta escala define la salinidad en términos del cociente entre dos conductividades, la de una muestra de agua de mar con respecto a una solución de cloruro potásico (KCl) en unas condiciones estándar de 15°C y 1 atmósfera de presión. Con lo cual es una medida adimensional. Una salinidad práctica de 35 psu equivale a una salinidad de 35 g/L (Lewis & Perkin, 1981).

Para realizar los cálculos de un proceso de desalación por ósmosis inversa, las diferencias que existen entre medidas basadas en clorinicidad, conductividad o unidades prácticas de salinidad son insignificantes.

En los últimos años, la salinidad del agua de mar ha comenzado a ser estudiada y monitoreada desde el espacio, como es el caso del instrumento “Aquarius” de la NASA (Agencia Americana del Espacio y la Aeronáutica), equipado con potentes aparatos de medida como un conjunto de tres radiómetros sensibles a la salinidad (1,413 GHz; banda L), un dispersómetro que corrige la variación de oleaje, un radiómetro de microondas y una cámara infrarroja de nueva tecnología (NASA, 2013).

En la figura 2 se muestra la salinidad en los mares y océanos tomados por el satélite Aquarius y estas coinciden con Forchhammer.

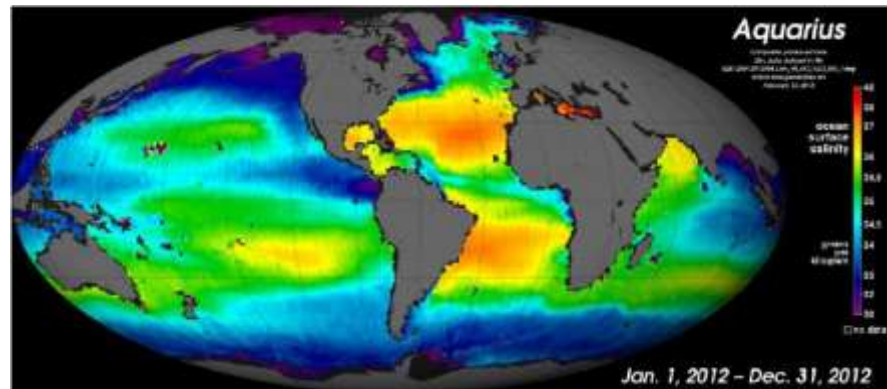


Figura 2: SALINIDAD SUPERFICIAL MEDIDA DESDE EL ESPACIO
[[HTTP://ACUARIUS.NASA.GOV](http://aquarius.nasa.gov)]

Existen parámetros para el diseño de una desaladora de agua en un proceso de ósmosis inversa. Estos parámetros son los siguientes:

- Permeabilidad, es decir el caudal de agua tratada por unidad de superficie de membrana (normalmente expresado en l/m²/h)
- Rechazo de sales, es decir la capacidad de la membrana para retener sales y por tanto obtener agua con menor cantidad de sólidos totales disueltos (normalmente expresado en %)
- Presión de entrada a las membranas

Al aumentar la salinidad del agua bruta, la permeabilidad de las membranas de ósmosis disminuye. Lo mismo ocurre con el rechazo de sales que disminuye su porcentaje al aumentar la concentración a la entrada. Con respecto a la presión de alimentación a las membranas, esta aumenta a medida que aumenta la salinidad de entrada.

W. Dittmar definió en 1884 los porcentajes de los principales iones del agua de mar. En los años posteriores, la modificación de algunos pesos atómicos afectó a dichas proporciones por lo que en 1940 Lyman y Fleming realizaron dichas correcciones (Sverdrup et al., 1942), con lo cual la tabla de porcentajes de los principales iones del agua de mar quedaría tal y como muestra la siguiente tabla:

	W. Dittmar 1884	Lyman & Fleming 1940
POTACIO (K^+)	1.13%	1.10%
SODIO (Na^+)	30.66%	30.70%
MAGNESIO (Mg^{2+})	3.65%	3.70%
CALCIO (Ca^{2+})	1.17%	1.16%
ESTRONCIO (Sr^{2+})		0.04%
BICARBONATO (HCO_3^-)	0.30%	0.41%
CLORURO (Cl^-)	50.02%	55.19%
SULFATO (SO_4^{2-})	7.71%	7.70%

Tabla 2: PROPORCIÓN DE LOS PRINCIPALES IONES DEL AGUA DE MAR SEGÚN W.DITTMAR Y LYMAN&FLEMING

La combinación de estos iones da lugar a las sales que se encuentran en el agua de mar. La mayor proporción se encuentra como Cloruro Sódico ($NaCl$) con un 78,0% y Cloruro de Magnesio ($MgCl_2$) con un 10,5%, de manera que entre las dos representan un 88,5% del total de las sales disueltas (Spliegler & Laird, 1980)

2.2. PH:

El PH del agua de mar oscila entre 7.5 y 8.4. Y está varia en base a la temperatura la salinidad, de la presión o la profundidad. Asi como también disminuye por la contaminación industrial.

Para el sistema de osmosis las membranas la elección de las membranas de poliamida o acetato de celulosa nos dan el valor recomendado para el PH, y están entre los valores de 4 a 11, como se muestra en la figura 3 se compara el rechazo de sales con el tipo de membranas a usar.

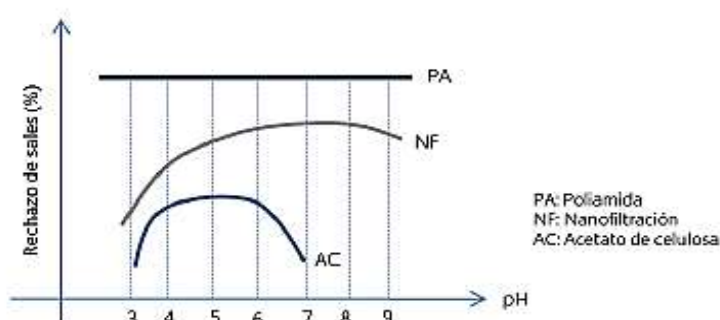


Figura 3: INFLUENCIA DEL PH EN EL RECHAZO DE SALES (MEDINA, 2000)

En esta tesis se utilizará las membranas de poliamida ya que son las que se usan en la actualidad y que resisten un cambio de PH en periodos cortos.

2.3. Densidad:

La densidad del agua depende de la salinidad, temperatura y presión y esta varia como varia la salinidad al aumentar y la temperatura al disminuir. Aproximadamente el agua de mar tiene una densidad de 1,027 Kg/L (Timco & Frederking, 1996).

2.4. Gases Disueltos:

La composición típica de gases disueltos en aguas marinas es la siguiente: 64% de N₂, 32% de O₂ y 1,8% DE CO₂. La temperatura y la salinidad influyen reduciendo la solubilidad de los gases cuando cualquiera de estos dos parámetros aumenta.

La concentración total y la composición de los gases disueltos varían con la profundidad, la fotosíntesis y la abundancia de organismos (Weiss, 1970).

2.5. Sólidos en suspensión:

En el agua de mar encontramos sólidos en suspensión o materia en suspensión y estos se determinan por gravimetría. Este procedimiento no distingue entre sólidos de origen inorgánico o los de origen orgánico.

La cantidad de sólidos presentes está muy relacionada con el tipo de captación o toma de agua de mar. Por ejemplo, si el agua ha reposado en balsas de decantación, el contenido de sólidos en suspensión es menor que si se capta directamente del mar. Las partículas que no sedimentan provocan un gran problema a las plantas desalinizadoras, puesto que taponan las membranas provocando así una disminución de la eficiencia de estas. Por este motivo, se determina el índice de ensuciamiento de las membranas (SDI); que consiste en la medida del tiempo de filtración a través de un filtro de 0,45 µm de 500 mL de agua, realizados en intervalos de unos 15 minutos a una presión fija de 2 bares. (Medina, 2000).

Los sólidos en suspensión se tratan en la fase del pretratamiento, donde son filtrados mediante un medio granular o mediante cartuchos filtrantes. Esta fase se puede reforzar mediante la aplicación de sustancias coagulantes donde se retienen la mayor parte de los sólidos coloidales, y mediante una desinfección por cloración.

2.6. Temperatura

Como se menciona antes la temperatura es un parámetro fundamental para la desalación del agua de mar por osmosis inversa. Así también la temperatura es fundamental para la densidad y PH.

Adicionalmente, los mares y océanos presentan grandes diferencias de temperaturas entre las aguas profundas y las aguas superficiales. Estas últimas, están afectadas por el calentamiento procedente de los rayos solares, de manera que se producen cambios térmicos similares a los continentes; es decir, que en los océanos las temperaturas decrecen desde el Ecuador, donde se desarrolla un máximo calentamiento, hasta los polos pasando, de modo general, de una temperatura máxima de unos 29-30°C en los mares tropicales a una temperatura de – 1,8° C. en los mares polares, donde sus aguas permanecen heladas durante la mayor parte del año (World ocean atlas, 2013)

A profundidades superiores a los 1.500 metros, la temperatura permanece estable entre los 4° C. y 1° C. ya que los rayos solares tienen la imposibilidad de llegar hasta allí.

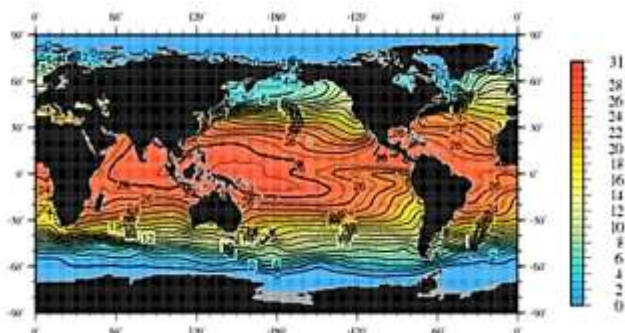


Figura 4: TEMPERATURA ANUAL EN LA SUPERFICIE DEL MAR (°C) (WORLD OCEAN ATLAS, 2013)

La mayoría de los procesos de desalación de agua de mar toman el agua bruta en una zona cercana a la costa, desde varios metros a unos pocos kilómetros, y a una profundidad que varía entre la superficie y los 25 m.

A continuación, se muestran las temperaturas máximas y mínimas de diferentes puntos geográficos:

- Mar Mediterráneo
- Mar del Norte
- Atlántico Central
- Atlántico Sur
- Mar de Arabia
- Océano Indico
- Australia
- Océano Pacífico

Los datos están recogidos del Centro Nacional de datos Oceanográficos de EEUU: NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). La NOAA es la agencia federal para la implementación de un sistema nacional integrado de observación del océano que será parte del mayor Sistema de Observación Global de la Tierra. Para realizar dichas mediciones, mantiene una red de boyas, estaciones de marea y mediciones por satélite que ofrecen una imagen continua del estado de los océanos, mares y grandes lagos (World ocean atlas 2013).

La temperatura del mar Mediterráneo varía entre un mínimo de 11°C y un máximo de 28°C

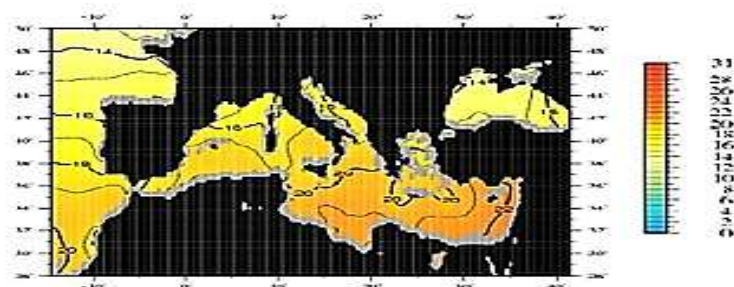


Figura 5: TEMPERATURA ANUAL EN LA SUPERFICIE – MAR MEDITERRÁNEO (°C) (WORLD OCEAN ATLAS, 2013)

La temperatura del mar del Norte varía entre $-1,6^{\circ}\text{C}$ y 17°C

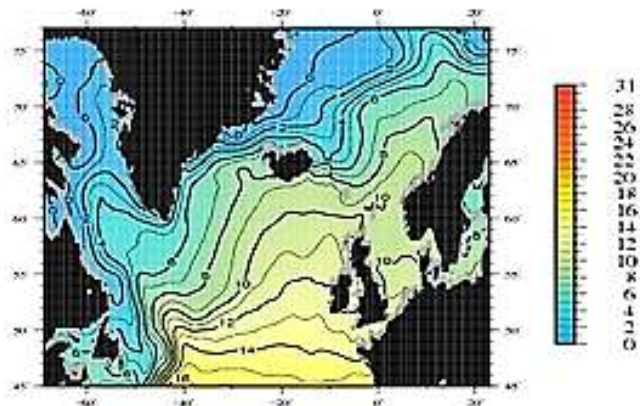


Figura 6: TEMPERATURA ANUAL EN LA SUPERFICIE – MAR DEL NORTE ($^{\circ}\text{C}$) (WORLD OCEAN ATLAS, 2013)

La temperatura del Atlántico Central varía entre $3,8^{\circ}\text{C}$ y 30°C , aunque si tomamos como referencia los valores de zonas cercanas a la costa varía entre 10°C y $27,5^{\circ}\text{C}$

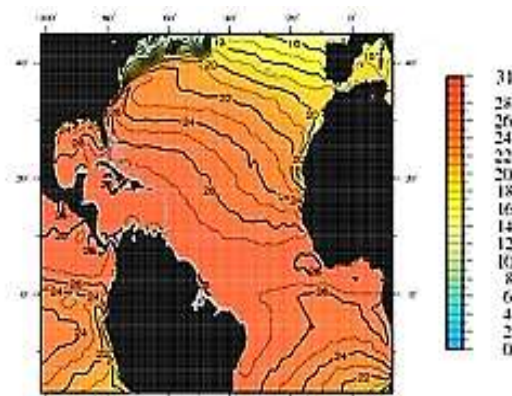


Figura 7: TEMPERATURA ANUAL EN LA SUPERFICIE – ATLÁNTICO CENTRAL ($^{\circ}\text{C}$) (WORLD OCEAN ATLAS, 2013)

La temperatura del Atlántico Sur varía entre $-1,5^{\circ}\text{C}$ y 27°C , aunque si tomamos como referencia los valores de zonas cercanas a la costa varía entre 10°C y $27,5^{\circ}\text{C}$

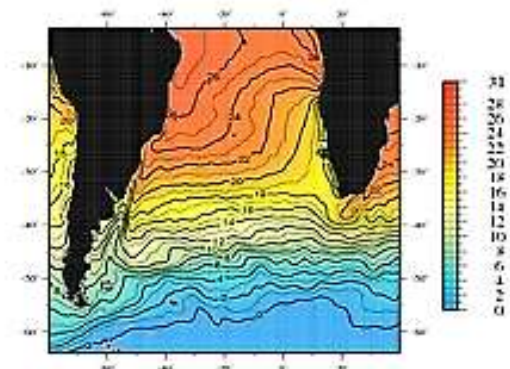


Figura 9: TEMPERATURA ANUAL EN LA SUPERFICIE – ATLÁNTICO SUR ($^{\circ}\text{C}$) (WORLD OCEAN ATLAS, 2013)

La temperatura del Mar de Arabia varía entre 20°C y 30°. Aunque existen zonas concretas del Golfo pérsico con valores más elevados.

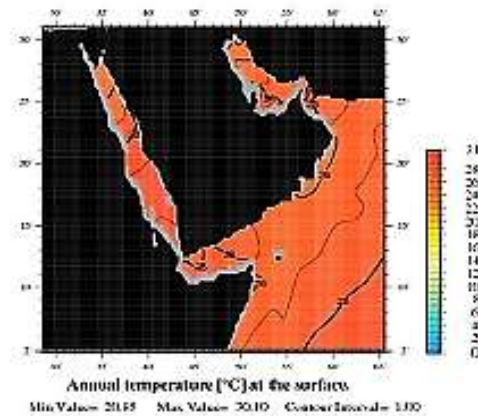


Figura 10: TEMPERATURA ANUAL EN LA SUPERFICIE – MAR DE ARABIA (°C). (WORLD OCEAN ATLAS, 2013)

La temperatura del océano Índico varía entre 11°C y 30°C

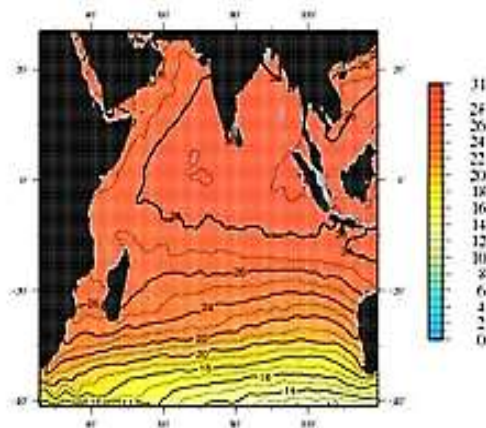


Figura 11: TEMPERATURA ANUAL EN LA SUPERFICIE – OCEANO INDICO (°C) (WORLD OCEAN ATLAS, 2013)

La temperatura de los mares alrededor de Australia varía entre 11°C y 29°C

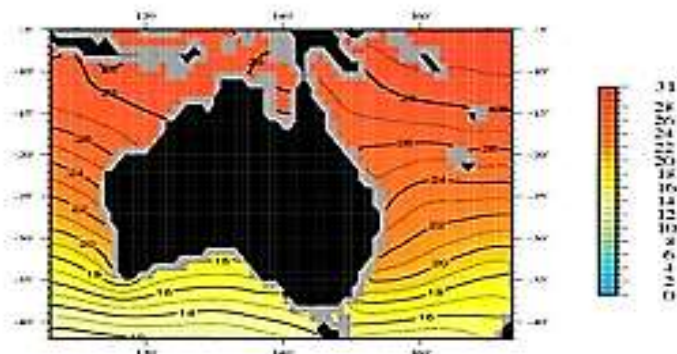


Figura 12: TEMPERATURA ANUAL EN LA SUPERFICIE – AUSTRALIA (°C) (WORLD OCEAN ATLAS, 2013)

La temperatura del Océano Pacífico varía entre $-0,6^{\circ}\text{C}$ y $29,8^{\circ}\text{C}$, aunque si tomamos como referencia los valores de zonas cercanas a la costa varía entre 10°C y $29,8^{\circ}\text{C}$

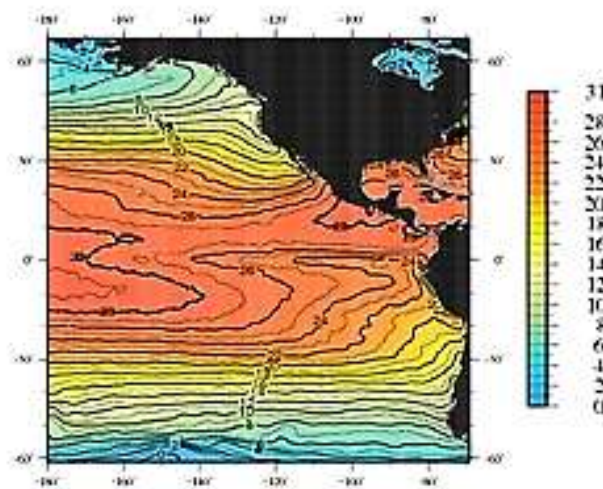


Figura 13: TEMPERATURA ANUAL EN LA SUPERFICIE – OCÉANO PACÍFICO ($^{\circ}\text{C}$) (WORLD OCEAN ATLAS, 2013)

Medidas tomadas entre la superficie y 25 m de profundidad, no muestran grandes variaciones de temperatura. En la figura siguiente, poniendo como ejemplo el Mar de Arabia, la temperatura máxima varía entre $29,25$ y $30,1^{\circ}\text{C}$ y la temperatura mínima tiene una variación entre $20,5$ y $24,2^{\circ}\text{C}$

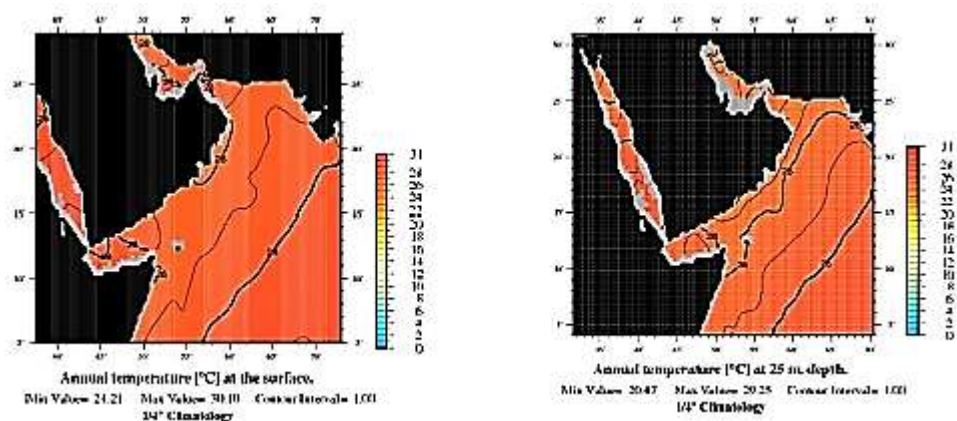


Figura 14: TEMPERATURA ANUAL EN LA SUPERFICIE Y A 25 M – MAR DE ARABIA ($^{\circ}\text{C}$) (WORLD OCEAN ATLAS, 2013)

La siguiente figura muestra, a modo de resumen, la temperatura máxima y mínima en los distintos mares del planeta, tomada en una zona cercana a la costa y en superficie. Se puede concluir que la mayoría de las medidas se encuentran entre los 10°C y los 30°C (Cabrera, 2015).

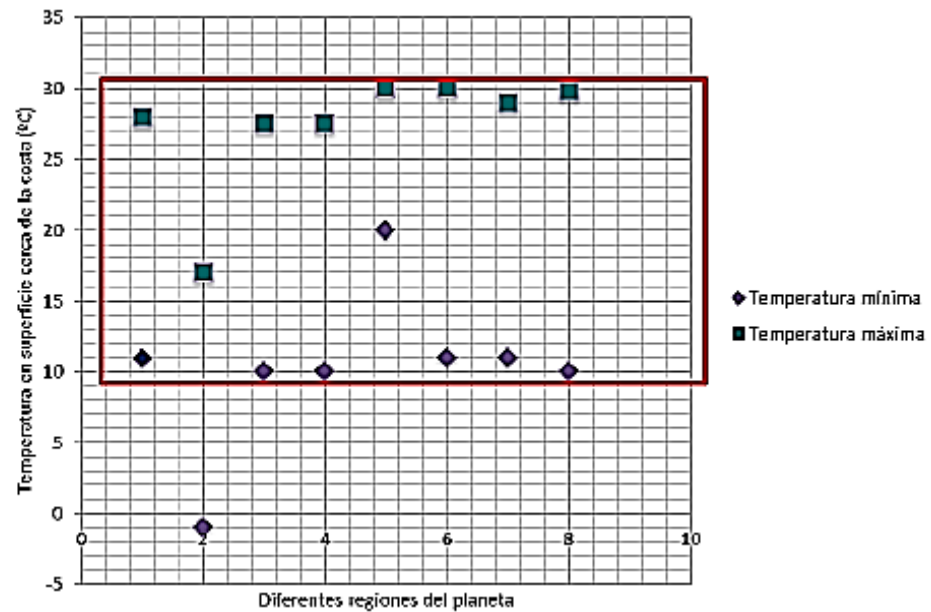


Figura 15: TEMPERATURAS MÁXIMAS Y MÍNIMAS EN SUPERFICIE EN LOS DISTINTOS MARES DEL PLANETA (CABRERA, 2015)

3. Tecnología de desalinización

La desalinización de agua constituye una respuesta prometedora a la escasez de agua mundial. Actualmente, muchas regiones del planeta presentan un severo problema de escases de agua, el cual se va incrementando debido a diversos factores como son el crecimiento poblacional, desarrollo industrial y cambios climáticos (García y Gómez, 2001).

Es conocido también que el 98% del agua del planeta se encuentra en los océanos, los cuales son una verdadera e inagotable reserva de agua la cual puede ser aprovechada mediante diversos procesos para obtener agua desalinizada y combatir dicha escasez (Ramillo, Gomez. y Coppari, 2003).

3.1. Desalinización Térmica:

Esta tecnología se basa en calentar el agua de mar para producir vapor. Para que al ser condensada se obtenga agua con baja salinidad. Este método es utilizado para desalar agua con alto grado de salinidad.

Debido a las condiciones climáticas y geográficas, aproximadamente el 75% de plantas de desalinización térmica se encuentran ubicadas en la península Arábiga y la mitad de estas en Arabia Saudita.

Dentro de las tecnologías de desalinización térmica, se distinguen tres técnicas principales que son:

- Destilación flash multietapa (MSF).
- Destilación multiefecto (MED).
- Destilación por compresión de vapor (CV).

3.1.1. Destilación flash multietapa:

En esta técnica se utilizan varios recipientes de evaporación (ver Figura 15). Al inicio el agua salada es calentada entre 90 y 115°C para crear vapor de agua, luego este ingresa al primer recipiente de evaporación, el cual tiene una presión ligeramente menor a la de la presión de saturación del vapor, con esto el vapor de agua reduce su presión ocasionando un fenómeno conocido como flasheo. Finalmente, el vapor obtenido, en los recipientes de evaporación, pasa a través de un condensador para obtener el destilado (Voutchkov, 2013)

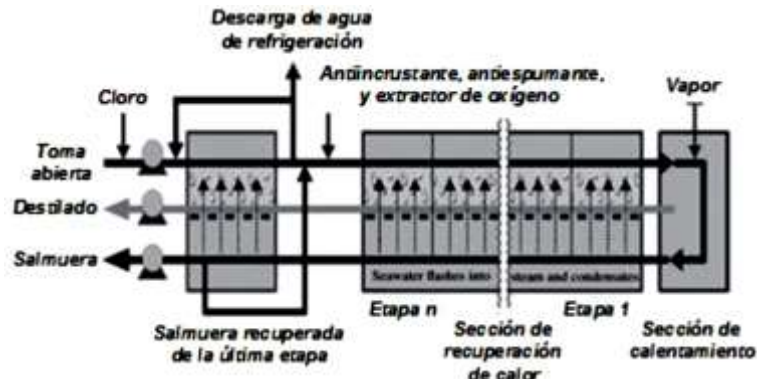


Figura 16: DESTILACIÓN FLASH MULTIETAPA (VOUTCHKOV, 2013).

3.1.2. Destilación multiefecto:

En esta técnica el agua de alimentación no es pre-calentada (ver Figura 16). El agua es inyectada por medio de pulverizadores sobre un sistema de tuberías, el cual transporta el vapor de agua de alimentación en un ciclo cerrado (Voutchkov, 2013). Esta técnica opera a menores temperaturas que la MSF (62 a 75°C).

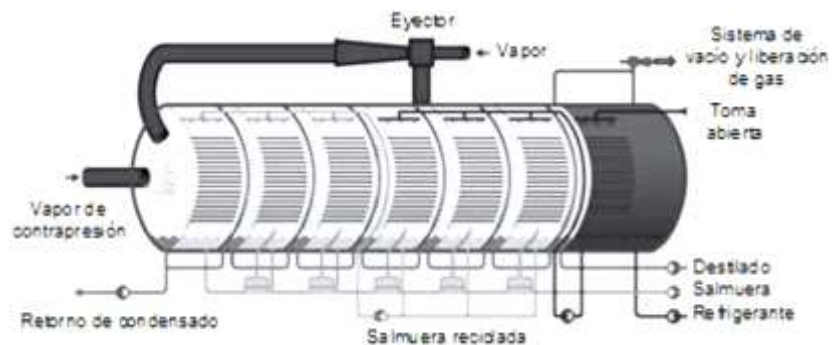


Figura 17: DESTILACIÓN MULTIEFECTO (VOUTCHKOV, 2013).

3.1.3. Destilación por compresión de vapor:

En esta técnica la fuente de agua es evaporada, y el vapor es transportado a un compresor (ver Figura 17). Luego, el vapor es comprimido para incrementar su temperatura hasta un punto adecuado para evaporar el agua inyectada sobre un conjunto de tubos. De esta manera el vapor comprimido realiza un intercambio de temperatura con la nueva fuente de agua que ingresa al conjunto de tubos, para ser finalmente condensada (Voutchkov, 2013).

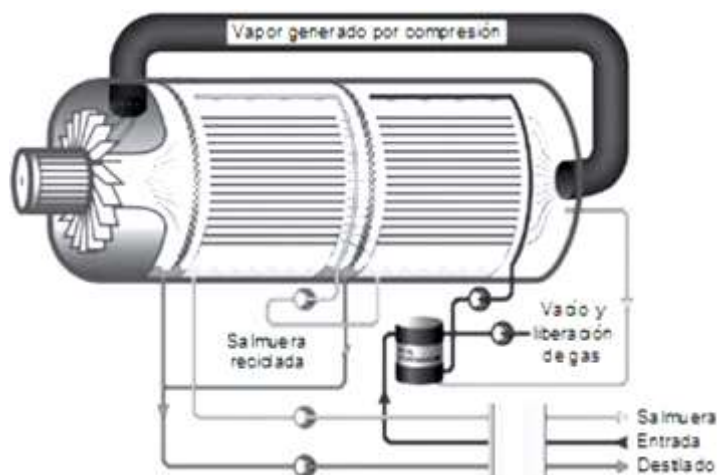


Figura 18: DESTILACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR (VOUTCHKOV, 2013).

3.2. Electrodialisis (ED):

Esta técnica se basa en la aplicación de corriente continua al agua de alimentación (ver Figura 18). Esta corriente transporta a los iones minerales y otros iones con una gran carga eléctrica, contenidos en el agua de alimentación, a través de una membrana selectiva de iones hacia un par de electrodos con carga opuesta (Voutchkov, 2013).

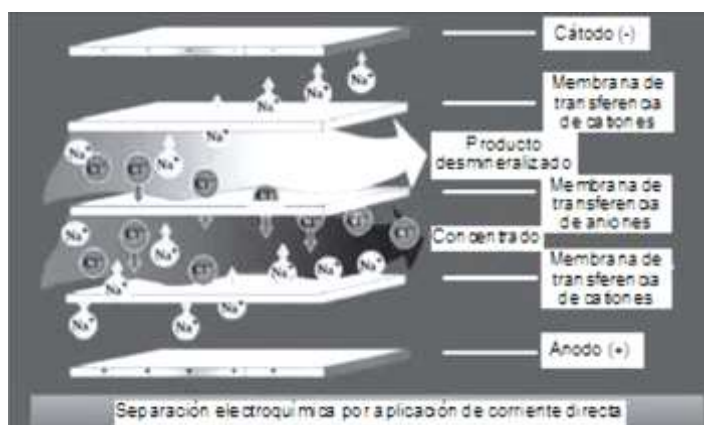


Figura 19: ELECTRODIÁLISIS (VOUTCHKOV, 2013).

3.3. Intercambio de iones (IX)

Esta técnica se basa en la remoción de sal del agua de alimentación mediante el proceso de adsorción, la cual se obtiene gracias al uso de una resina selectiva de iones. El elemento principal en este proceso es la carga de iones que posee la resina IX, la cual en forma selectiva atrae o retiene iones de carga opuesta contenidos en la fuente de agua (Voutchkov, 2013).

3.4. Ósmosis inversa:

La ósmosis inversa (RO) es un proceso en el cual el agua que contiene sales minerales, sólidos suspendidos, organismos orgánicos e inorgánicos, etc. Es forzada a pasar a través de una membrana semipermeable (se puede definir como semipermeable a una membrana que deja pasar selectivamente el agua y no sus constituyentes) mediante una determinada presión (ver Figura 19). Con este procedimiento se logra obtener agua con un bajo grado de salinidad (Voutchkov, 2013).

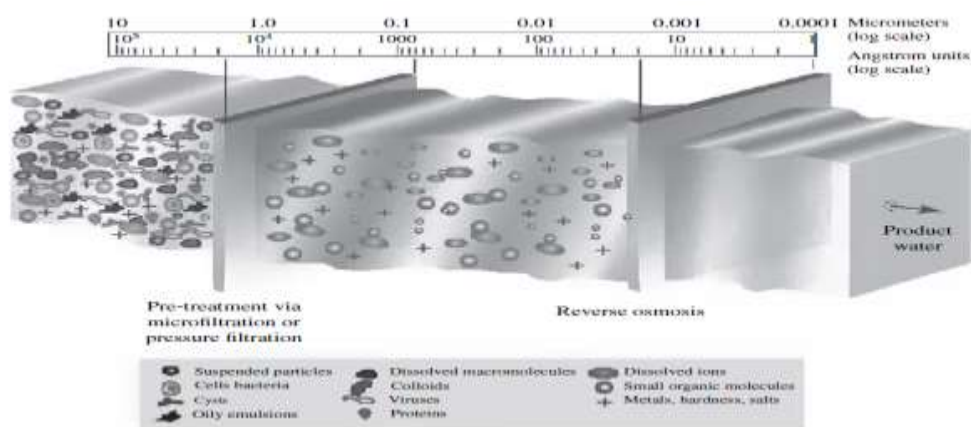


Figura 20: ÓSMOSIS INVERSA (VOUTCHKOV, 2013).

La Ósmosis Inversa es una tecnología basada en una membrana semipermeable que separa dos soluciones con distinta concentración en la cual, al aplicar una presión superior a la presión osmótica en el lado de mayor concentración se produce un flujo de agua que va desde la solución con mayor salinidad (agua de mar) hasta otra de menor salinidad (agua dulce)

Para esta tesis utilizaremos el sistema de osmosis inversa el cual vamos a detallar a continuación.

Antes de describir el funcionamiento de un proceso de ósmosis inversa, es necesario entender el proceso de difusión entre dos soluciones con distinta concentración que se encuentran en un mismo recipiente, y el proceso de difusión de dos soluciones con distinta concentración a través de una membrana semipermeable (Mulder, 1992).

Si se ponen en contacto dos soluciones con diferente concentración en un mismo recipiente (figura 20) donde la concentración de la solución 2 es mayor que la de la solución 1, se producirá una difusión de sales de la solución 2 a la solución 1, así como un movimiento de agua en sentido contrario, de manera que se tiende a igualar la concentración de ambas soluciones.

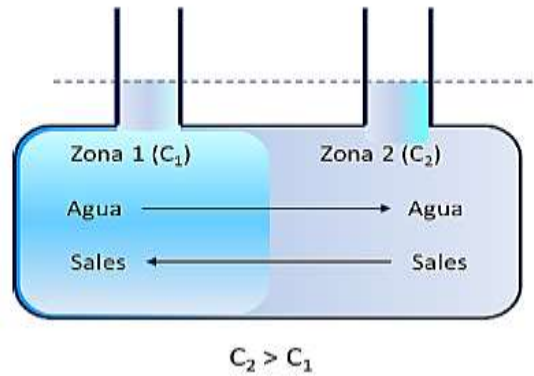


Figura 22: PROCESO DE DIFUSIÓN DE DOS SOLUCIONES CON DISTINTA CONCENTRACIÓN

Si se coloca una membrana semipermeable entre las dos soluciones con diferente concentración, de manera que dicha membrana permita el paso de agua, pero no permita el paso de sales, lo que ocurrirá será que el agua se difundirá de la solución menos concentrada a la más concentrada, pero no ocurrirá la difusión de las sales de la zona 2 a la zona 1 debido a dicha membrana. Esto provocará que el nivel de la zona 2 aumente hasta que la presión que ejerza la columna de agua se iguale a la presión que tiende a difundir el agua de la zona 1 a la zona 2 (figura 21). A este fenómeno se le denomina Ósmosis.

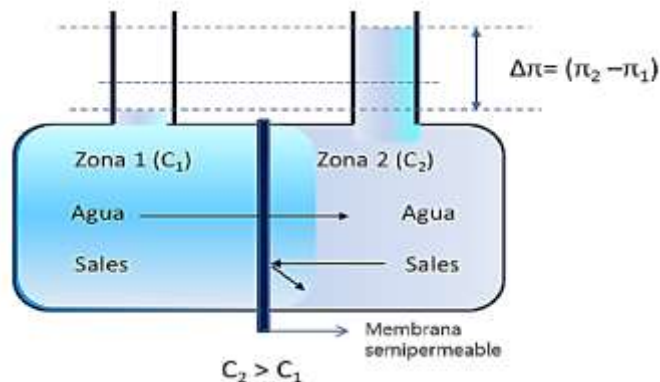


Figura 21: PROCESO DE DIFUSIÓN A TRAVÉS DE UNA MEMBRANA SEMIPERMEABLE

Si la concentración de la solución 1 fuese cero (agua pura), la diferencia de alturas entre los dos recipientes se denomina presión osmótica de la solución 2. En caso de no tener agua pura, la diferencia de altura sería la diferencia de presiones osmóticas de ambas soluciones.

En el caso de la desalación de agua de mar, el origen del agua es una solución con una concentración de sales muy alta y se pretende separar el agua de las sales, con lo cual interesa invertir el proceso de la figura 23. Esto se consigue aplicando en el recipiente 2 una presión superior a la diferencia de

presiones osmóticas de ambas soluciones (figura 22). A este fenómeno se le denomina Osmosis Inversa.

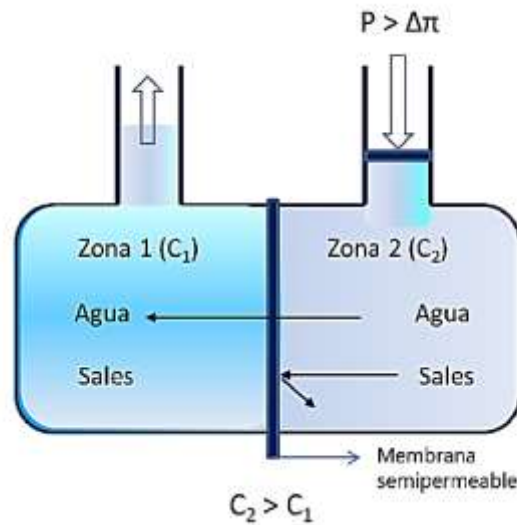


Figura 23: PROCESO DE ÓSMOSIS INVERSA

De esta manera, la zona 1 representa la zona de agua tratada la cual tiene una salinidad muy baja y la zona 2 representa la zona de alta concentración, también denominada rechazo o salmuera (Dupont, Eisenberg & Middlebrooks, 1982).

En 1885, Van't Hoff publicó la relación existente entre la presión osmótica y la concentración de soluto de una disolución:

$$\pi = R * T * M \quad (2)$$

Donde:

π presión osmótica de la solución (atm)

R constante universal de los gases ideales (0,082 atm·l·K⁻¹·mol⁻¹)

T temperatura absoluta (K)

M molaridad de la solución (mol/l)

Conocida la concentración de cada uno de los constituyentes del agua de mar, se puede obtener de manera rápida y aproximada la presión osmótica de dicha solución a partir de la siguiente expresión (Fariñas, 1999)

$$\pi = 0.08308 * \Phi * (t + 273.16) * \sum m_i \quad (3)$$

Dónde:

π	presión osmótica de la solución (bar)
Φ	coeficiente osmótico (en agua de mar 0,902)
t	temperatura del agua de mar ($^{\circ}\text{C}$)
m_i	suma de las molalidades de todos los constituyentes de la solución

Siendo:

$$m_i = \frac{C_i}{1000 * P m_i * \left(\frac{10^6 - SDT}{10^6} \right)} \quad (4)$$

Dónde:

C_i	concentración del componente "i" de la solución (mg/l)
PM_i	peso molecular del componente "i" de la solución
SDT	sólidos disueltos totales de la solución (mg/l)

La ósmosis inversa es capaz de rechazar contaminantes o partículas con diámetros tan pequeños como 0,0001 μm ; consecuentemente, permite eliminar además de sales disueltas en agua, patógenos, durezas, turbidez, compuestos orgánicos sintéticos, pesticidas, y la mayoría de los compuestos contaminantes del agua potable conocidos hoy en día (AWWA, Lyonnaise & WRCSA, 1999)

3.4.1. Principio de funcionamiento:

La osmosis inversa como se puede entender proviene de hacer un proceso contrario al de osmosis que como sabemos cuándo se ponen en contacto dos soluciones de diferentes concentraciones de un determinado soluto (por ejemplo, sales), se genera un flujo de solvente (por ejemplo, agua) desde la solución más diluida a la más concentrada, hasta igualar las concentraciones de ambas.

Es decir, en otras palabras: si ponemos en contacto, a través de una membrana, agua salada y agua destilada obtendremos un equilibrio entre ambas y quedarán moderadamente saladas. El agua que atraviesa la membrana es "empujada" por la presión osmótica de la solución más salada y el equilibrio del proceso se alcanza cuando la columna hidrostática iguala dicha presión osmótica.

De aquí se deduce que si nuestro interés en el tratamiento es obtener una corriente de agua lo más diluida posible deberemos invertir el fenómeno. Para ello hay que vencer la presión osmótica natural mediante la aplicación en sentido contrario de una presión mayor (Garcia, 2015)

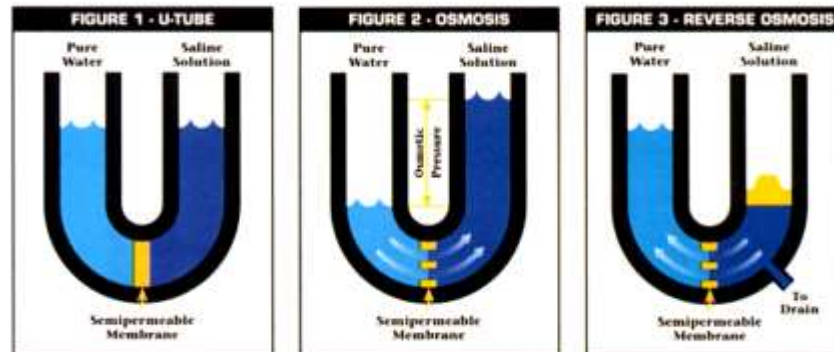


Figura 24: OSMOSIS INVERSA

Cuando se hace lo contrario a lo expuesto anteriormente esto se llama osmosis inversa.

Entonces cuando hay una alta presión en el lado opuesto a la membrana y se logra un equilibrio distinto al anterior, en el cual se genera dos corrientes:

- Una que es la que atraviesa la membrana, queda libre de sólidos disueltos (minerales, materia orgánica, etc.) y de microorganismos (virus, bacterias, etc.): producto o permeado.
- La otra se va concentrando en esos mismos productos sin que lleguen a depositarse en la membrana, porque la taparían y se eliminarían en forma continua, constituyendo el concentrado (Garcia, 2015).

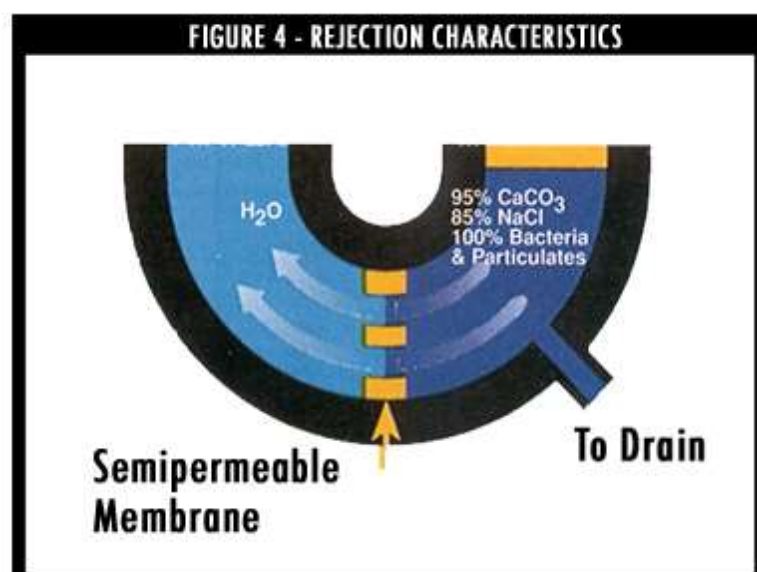


Figura 25: RECHAZO DE LA OSMOSIS INVERSA

3.4.2. Sistema típico de osmosis inversa

La osmosis inversa tiene tres subsistemas separados:

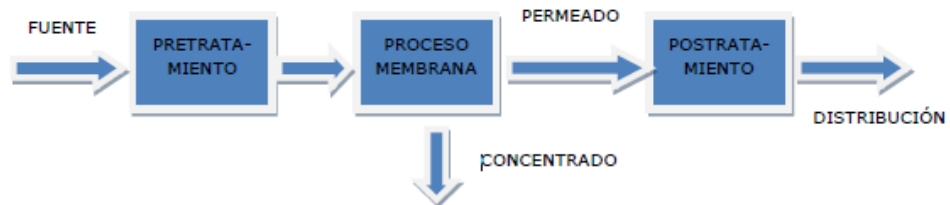


Figura 26: SISTEMA TÍPICO DE OSMOSIS INVERSA

Como se puede observar en la figura 24 el sistema de osmosis inversa pasa por tres procesos en uno de los cuales se usan membranas. Para ello el pretratamiento busca preservar la integridad de esta, maximizando su eficiencia y durabilidad.

El pretratamiento usualmente involucra la adición de ácidos, inhibidores de incrustación, o ambos, para prevenir la precipitación de sales poco solubles, seguido de una etapa de filtración (por cartucho) de 5 a 20 μm para prevenir la obstrucción por partículas. Otros pretratamientos adicionales (típicamente aguas arriba del filtro) se pueden requerir para agua con alto potencial de obstrucción, tales como agua de superficie.

El postratamiento puede incluir muchas unidades típicas de un sistema convencional de tratamiento de agua potable, tales como aireación, desgasificación, ajuste de pH, adición de químicos contra la corrosión, fluorización, y desinfección (García, 2015).

Para que el sistema de osmosis inversa sea diseñado de forma adecuada es importante conocer que membranas se utilizarán la calidad de agua a usar y a obtener. Para eso existe el pretratamiento y postratamiento.

3.4.3. Tipos de Membranas:

Las membranas dependen de su material y estructura.

3.4.3.1. Membranas de acetato de celulosa

Las características predominantes de las membranas de acetato de celulosa son:

- La morfología relativamente lisa de la superficie de la membrana ofrece alguna protección contra la obstrucción ya que no hay espacios muertos en la membrana donde los materiales incrustantes pueden ser atrapados.
- La carga neutra de la superficie minimiza el potencial de obstrucción con polímeros catiónicos que puedan ser arrastrados desde el pretratamiento.
- Capacidad de tolerar hasta 1 ppm de cloro libre de forma continua ofrece alguna protección contra el crecimiento biológico en la membrana. Esto es particularmente importante porque los polímeros de CA en sí mismos suministran nutrientes para la población microbiana, que a su vez metabolizan el polímero y degradan la membrana.
- La temperatura está limitada a 35°C.
- El pH de operación está limitado de 4 a 6.
- La presión de operación está en el rango de 200 a 400 psi (presiones superiores pueden producir la compactación de la membrana, aplastándola y haciendo por tanto más densa).
- El rechazo de sales varía según se use una membrana “estándar” o una membrana de alto “rechazo”. El rechazo de sílice es solamente del 80% (El-Saied, Basta, Barsoum, & Elberry, 2003).

3.4.3.2. Membranas de Poliamida (PA) Compuesta:

Las membranas compuestas, algunas veces llamados “compuestos de película delgada” son esencialmente una combinación de dos polímeros fundidos sobre un soporte de tela.

Las características predominantes de las membranas compuestas de poliamida son:

- La morfología de la superficie es desigual, ofreciendo muchas áreas donde los materiales incrustantes pueden ser atrapados y mantenidos por la membrana.
- La carga de la superficie es negativa y por tanto atrae los polímeros catiónicos que puedan ser arrastrados desde el pretratamiento.
- No pueden tolerar el cloro libre ni ningún otro oxidante. Algunos fabricantes establecen un límite de exposición de 200-1.000 ppm-hora para la pérdida de la capacidad de rechazo de la membrana.

- La temperatura está limitada a 45°C.
- El rango de pH de operación es de 2 a 11 aunque puede variar con el fabricante.
- La presión de operación está en el rango de 150 a 400 psi.
- El rechazo de sales y de sílice es mucho más alto que en las membranas CA (Gorgojo, Jimenez-Solomon & Livingston, 2014).

3.4.3.3. Ventajas y desventajas:

En la tabla 6 se encuentra una comparación de las membranas sus ventajas y desventajas.

PARAMETRO	MEMBRANA DE PELICULA DELGADA DE POLIMEROS	MEMBRANA DE ACETATO DE CELULOSA
Rechazo de sales	Más Alta (> 99,5%)	Más baja (Hasta 95%)
Rechazo de Sílice	> 96%	≈85%
Presión Neta	Más baja (10-15 bars)	Más alta (15-30 bars)
Carga en la superficie	Más negativa (Limita el uso de coagulantes catiónicos en el pretratamiento)	Neutral (no limitaciones en pretratamiento con coagulantes)
Tolerancia al cloro	Pobre (hasta 1000 ppp-h. Necesita decoloración)	Aceptable (continuo uso de 1-2 ppm de cloro es aceptable)
Frecuencia de limpiado	Más alta (semanas a meses)	Más baja (meses a años)
Requerimiento de pretratamiento	Alto (SDI < 4)	Más bajo (SDI < 5)
Tolerancia a la obstrucción	Aceptable	Buena
Remoción de Orgánicos	Alta	Relativamente más baja
Bio - obstrucción	Más susceptible	Menos susceptible
Bio - degradación	Ninguna	Más alta
Tolerancia al PH	Alta (2-13)	Limitada (4-8)
Temperatura	Hasta 30°C	Hasta 45°C

Tabla 3: COMPARACION DE LAS MEMBRANAS DE PELICULA DE DELGADA Y DE ACETATO DE CELULOSA

Principalmente debido a las mejores características de rechazo y a las menores presiones de trabajo, las membranas compuestas de película delgada son más usadas en las aplicaciones de tratamiento de agua. La excepción son las aplicaciones con fuentes de agua ricas en orgánicos, para las cuales las membranas de acetato ofrecen significativos beneficios en términos de limitada bio-obstrucción de la membrana, limpieza y pretratamiento necesario (García, 2015).

3.4.4. Configuración de Membranas:

3.4.4.1. Tubular:

Los módulos RO tubulares son también usados para aplicaciones especiales con altos contenidos de sólidos típicamente encontrados en las industrias de procesamiento biológico y de comidas.

Las características principales de los módulos tubulares son:

- Relativamente costosos por unidad de área de membrana
- Fáciles de limpiar
- En la mayoría de las aplicaciones requieren limpieza diaria
- Requieren flujo alto por tubo para lograr alta velocidad de flujo cruzado y minimizar la obstrucción
- Usado especialmente en MF y UF

Los módulos de fibra hueca ofrecen mayor área de membrana por módulo que los módulos en espiral. Esto permite una alta producción de agua del módulo y un menor espacio ocupado por los bancos de módulos en la planta debido a su alta compacidad (Mulder, 1991)

3.4.4.2. En Espiral:

Los módulos en espiral son los más comunes hoy en día en RO. Las características principales de los módulos tubulares son:

- Densidad más bien alta
- Temperatura limitada a 45°C
- Moderadamente costosos, pero con bajo costo por unidad de área de membrana
- Pueden ser difíciles de limpiar
- Alta área de membrana por unidad de volumen

- Módulos de alta calidad (AWWA, Lyonnaise y WRCSA, 1999)

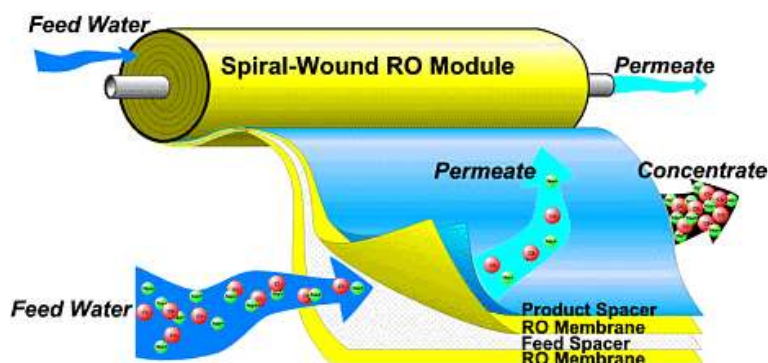


Figura 27: CONSTRUCCION DE UNA MEMBRANA EN ESPIRAL

3.4.4.3. Fibra fina Hueca:

Los módulos RO de fibra fina hueca son membranas formadas por tubos de diámetro muy pequeño, con diámetros externos de 85 micrones e internos de cerca de 42 micrones. Las fibras se parecen al cabello humano y pueden ser tan flexibles. La “piel” de la membrana o película delgada esta por fuera de la fibra. Esta piel es de cerca de 0,1 a 1 micra de espesor.

Las características de los módulos de fibra fina hueca son:

- Relativamente baratas
- Relativamente difíciles de limpiar
- Requieren agua de “alta calidad”
- Densidad de empaquetado extremadamente alta

Los módulos de fibra hueca ofrecen mayor área de membrana por módulo que los módulos en espiral. Esto permite una alta producción de agua del módulo y un menor espacio ocupado por los bancos de módulos en la planta debido a su alta compacidad (Mulder, 1991).

3.4.5. Obstrucción:

La obstrucción es resultado de solidos suspendidos en las superficies de las membranas. Las membranas obstruidas ocasionan la disminución en la presión.

Las causas de obstrucción de una membrana en el sistema de osmosis inversa son:

- Depósito de cieno (limo) u otros sólidos suspendidos que han sido inadecuadamente removidos por el pretratamiento
- Incrustaciones inorgánicas causadas por la precipitación de sales poco solubles o sílice.
- Obstrucciones biológicas causadas por el excesivo crecimiento microbiano
- Interacción de orgánicos con la membrana (obstrucción química)

La bio-obstrucción ha sido considerado uno de los problemas más serios en la operación de las plantas de osmosis inversa (Garcia, 2015).

La Tabla 2 muestra las directrices de calidad de agua generalmente aceptadas para minimizar la obstrucción de la membrana de RO.

Sustancia	Medida	Valor
Sólidos suspendidos	Turbiedad	< 1 NTU
Coloides	SDI	< 5
Microbios	Filtración por membrana	<1.000 UFC/ml ³
Orgánicos	Concentración COT ⁴	< 3 ppm
Color	Unidad de color	< 3 APHA 5
Metales: hierro, manganeso, aluminio	Concentración	< 0,05 ppm
Sulfuro de hidrogeno	Concentración	< 0,1 ppm

Tabla 4: DIRECTRICES DE CALIDAD DE AGUA GENERALMENTE ACEPTADAS PARA MINIMIZAR LA OBSTRUCCIÓN DE LA MEMBRANA DE RO

3.4.6. Incrustaciones:

En una membrana la incrustación se debe a la aglomeración de sales saturada sobre la superficie de estas, dentro de los principales problemas es la presión y el menor rechazo de sales.

La Tabla 3 muestra las directrices de calidad de agua generalmente aceptadas para minimizar la incrustación de la membrana de RO (Garcia, 2015).

Sustancia	Medida	Valor
Sílice	ppm	200
Bario, Estroncio	ppm	< 0,05
Calcio	LSI	< 0

Tabla 5: DIRECTRICES DE CALIDAD DE AGUA GENERALMENTE ACEPTADAS PARA MINIMIZAR LA INCRUSTACIÓN DE LA MEMBRANA DE RO

3.4.7. Clasificación Según Rendimiento:

Para clasificar las membranas según su rendimiento existen tres parámetros importantes son rendimiento, flujo/productividad y presión de operación.

3.4.7.1. Membranas de rechazo estándar:

Estas membranas remueven el 99,6% de las sales de la fuente de abastecimiento (Ures, Jacome & Suarez, 2015).

3.4.7.2. Membranas de alto rechazo:

Estas membranas tienen la capacidad de rechazar el 99,75-99,85% al precio de un 10-20% más de presión de operación y esto se debe a su diseño el cual está constituido por estructuras más compactas (Ures, Jacome & Suarez, 2015).

3.4.7.3. Membranas de alta productividad (baja energía):

Estas son diseñadas para producir más agua por elemento de membrana. Estas características son: (1) mayor superficie y (2) empaquetado más denso. El aumento del área activa de superficie de membrana permite un aumento significativo de la productividad usando el mismo tamaño (diámetro) del elemento de membrana (Ures, Jacome & Suarez, 2015).

3.4.7.4. Membranas de alta presión

El objetivo de este tipo de membranas es producir agua fresca de agua de mar concentrada con salinidad de 50.000-60.000 mg/L y son usadas para maximizar el agua recuperada a partir de un volumen de agua de abastecimiento dado.

Mientras una membrana estándar permite solo recuperar hasta un 50% del agua de abastecimiento, las membranas de alta presión son adecuadas para obtener recuperaciones del 60% y superiores (Ures, Jacome & Suarez, 2015).

3.4.8. Aplicaciones:

Las membranas de ósmosis inversa han sido usadas ampliamente para el tratamiento de agua como se muestra en la Tabla 3(Garcia, 2015).

Uso Industrial	Agua Potable	Reúso y Tratamiento de Agua Residuales
Agua Ultrapura, Agua de calderas, agua pura para procesos y uso diario en industrias	Desalinización de agua de mar y agua salobre	Agua industrial, agua de agricultura, agua potable indirecta

Tabla 6: APLICACION DE LA OSMOSIS INVERSA EN EL TRATAMIENTO DE AGUA

3.5. Sistema de Calentador de agua:

Un sistema de calefacción es un dispositivo termodinámico que utiliza energía para aumentar la temperatura de un líquido en este caso el agua.

Dentro de los cuales podemos encontrar diversos tipos de calentadores.

3.5.1. Tipos de calentadores de agua.

Los tipos de calentadores de agua más conocidos son:

- calentador de punto
- calentador de paso (boiler)
- calentador de acumulación
- caldera (para recirculación).

Para poder seleccionar un tipo de calentador y de combustible se debe tener en cuenta factores como la temperatura deseada, combustible (disponibilidad, costo), mantenimiento, espacio a usar, caudal instantáneo requerido.

3.5.1.1. Calentadores de punto, instantáneo de paso o de flujo.

Estos calentadores son muy pequeñas y se instalan cerca del lugar donde se requiere el agua caliente. Son alimentados con electricidad y se activan automáticamente por flujo o manualmente con un interruptor. Su uso es doméstico.

Su consumo eléctrico va desde 1500 W a 5000 W.

3.5.1.2. Calentadores de paso.

Se les conoce también como calentadores instantáneos o calentadores de flujo son pequeños en su modelo eléctrico y más grande en modelos de gas natural o GLP. Los modelos

eléctricos van desde los 8 kW (1,91 kcalorías/s) hasta los 22 kW (5,26 kcalorías/s). Los modelos de gas pueden alcanzar 31,4 kW (8 kcal/s) como es el caso de un calentador de 18 L/min. Los modelos eléctricos están equipados con resistencias calentadoras de inmersión y los de gas encienden una llama que calienta un intercambiador de calor por donde circula el agua.

3.5.1.3. Calentadores de acumulación

Se les conoce así porque almacenan agua y la calienta hasta la temperatura que se desea, se almacena de 15 litros a 1000 litros.

Tienen la ventaja de suministrar agua caliente a temperatura constante por tantos litros como casi la totalidad de depósito. (Lopez, 2009).

3.5.1.4. Caldera:

La caldera es una máquina generada por la ingeniería, que fue diseñada para producir vapor. Este vapor se forma a través de la transferencia de calor a presión constante, en el cual el fluido entra o es originalmente un líquido que luego se calienta y cambia de fase. Es un recipiente que debe soportar presiones, por lo cual es construido con acero laminado.

3.6. Automatización para plantas industriales

3.6.1. Introducción

Sus inicios se dieron en la revolución industrial en el Reino, donde se introdujo las modificaciones al sistema de control de lazo cerrado para las máquinas de vapor, dadas por James Watt. Esta tecnología en la actualidad está más avanzada.

3.6.2. Controlador lógico programable (PLC):

Un PLC o controlador lógico programable es un equipo industrial que realiza el control de una gran cantidad de procesos, se le conoce también como una computadora digital de tipo industrial. El cual procesa señales discretas o continuas.

En 1968, Bill Stone, quien pertenecía al grupo de ingeniero de General Motors, presentó una propuesta para el desarrollo de un equipo que solucionara los problemas del proceso de manufactura (Romero, Theorin, 2013). Como son:

Reducir los retardos de producción relacionados con problemas de control, además de ser de fácil mantenimiento y programación en línea con lógica escalera.

- Proveer la capacidad de expansión futura y ser desarrollado bajo un concepto modular para reducir el tiempo en el intercambio de componentes.
- Tenía que ser robusto, pues debería trabajar bajo condiciones de suciedad, interferencia electromagnética y vibración.

En 1969, la compañía Bedford Associates and Modicon presentaron el equipo Modicon 084, el cual cumplía con las características requeridas, y el que es conocido actualmente como el primer PLC (ver Figura 27) (Romero, Theorin, 2013).



Figura 28: MODICOM 084

Actualmente se tiene una gran variedad de fabricantes como son:

- ABB
- Allen Bradley
- Omron
- Schneider
- Siemens

3.6.3. Protocolos de comunicación industrial

Se le conoce como un conjunto de reglas que permite la transferencia e intercambio de datos entre los dispositivos que forman una red. En el tiempo han evolucionado con el avance de la electrónica y el desarrollo de los microprocesadores.

Actualmente se usa estos protocolos para automatizar y mejorar un proceso industrial. La integración de las mencionadas islas automatizadas suele hacerse dividiendo las tareas entre grupos de procesadores jerárquicamente anidados. Esto da lugar a una estructura de redes Industriales, las cuales es posible agrupar en tres categorías:

- Buses de campo

- Redes LAN
- Redes LAN-WAN

Durante la evolución de los equipos PLC y los protocolos de comunicación se presentó la necesidad de enlazar los equipos y esto se hacía en serie. Durante este tiempo cada fabricante creaba su protocolo así existieron varios protocolos y al ser tantos se estandarizó los protocolos y se quedaban protocolos que presentaban mejores características.

En la actualidad los protocolos de comunicación de campo más utilizados son:

- ControlNet
- DeviceNet
- Fieldbus Foundation
- HART
- Modbus
- Profibus (DP, PA y FMS)

Sin embargo, en este trabajo solo se utiliza el protocolo HART, pues es el que viene integrado en los dispositivos de campo de las plantas piloto y en los módulos de entrada/salida de la arquitectura de control distribuido a utilizar.

3.6.3.1. Protocolo HART:

El protocolo HART (High way-Addressable-Remote-Transducer) agrupa la información digital sobre la señal analógica típica de 4 a 20 mA DC. La señal digital usa dos frecuencias individuales de 1200 y 2200 Hz, que representan los dígitos 1 y 0 respectivamente y que en conjunto forman una onda sinusoidal que se superpone al lazo de corriente de 4-20 mA, ver fig.28.

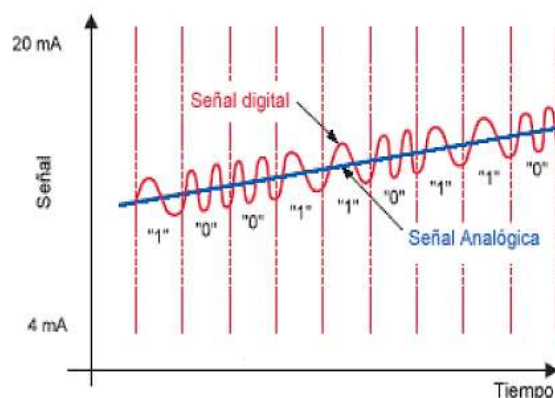


Figura 29: SEÑAL DIGITAL SOBREPUESTA A LA SEÑAL ANALÓGICA

Este protocolo permite la comunicación en ambos sentidos. Una ventaja del protocolo HART sobre los demás protocolos es la comunicación de canales simultáneos (ver Figura 30): la señal analógica de 4 – 20mA y la señal digital (HART, 1999).



Figura 30: DOS CANALES DE COMUNICACIÓN

A su vez permite la comunicación punto a punto y multipunto. (Ver Figura 31).

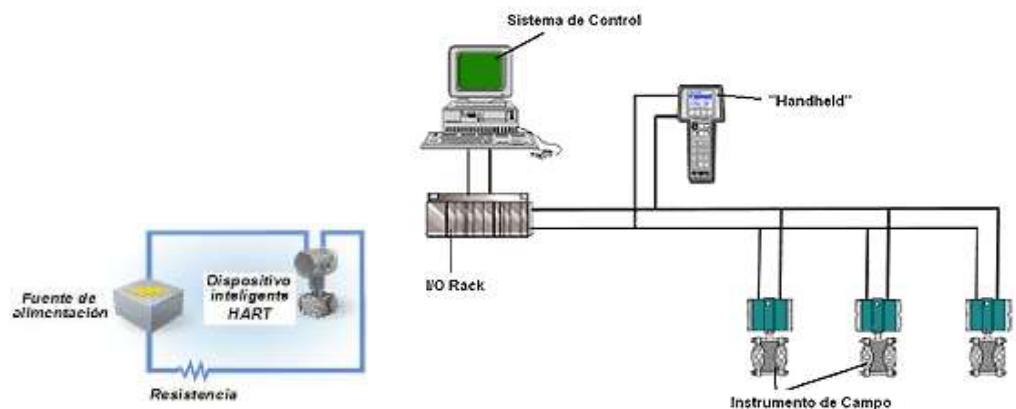


Figura 31: CONFIGURACIÓN PUNTO A PUNTO Y MULTIPUNTO (HART WEB)

3.6.4. Sistemas de supervisión por computadora y SCADA:

El sistema SCADA es un sistema industrial de mediciones y control. El cual consiste en una computadora principal, una o más unidades de control obteniendo datos en campo y estos tienen características de control de lazo cerrado. También se puede integrar con otros sistemas de supervisión mediante algún protocolo de comunicación (normalmente Ethernet TCP/IP).

Los sistemas de supervisión por computadora nacen en 1959 con la computadora RW – 300, la cual solo servía para observar los datos obtenidos de campo, pues debido a los retardos en el procesamiento de datos, no era un medio adecuado para sostener el control de un proceso (Romero, Theorin, 2013).



Figura 32: PIRÁMIDE DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL

Actualmente existe una confusión en cuanto al concepto de sistema de supervisión por computadora y sistema SCADA (Adquisición de Datos y Control Supervisorio). Si bien, en los dos se utiliza un software para supervisión por computadora, el sistema SCADA va más allá, pues para definir a un sistema como SCADA, este debe tener la capacidad de realizar comunicación a grandes distancias mediante telemetría (telemetría es usada para enviar comandos, programas y para recibir información de monitoreo desde locaciones remotas (RTUs), como PLCs o DCSs hacia estaciones Maestras), como se muestra en la Figura 33 (Bailey, Wright, 2013).

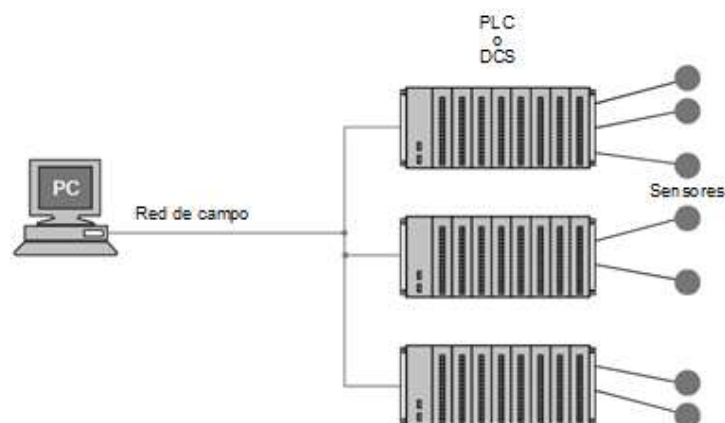


Figura 33: PLC O DCS COMO RTU

Muchas veces no es necesaria la obtención de grandes cantidades de información de todos los RTUs, pues los subprocesos, a los que se accede desde el computador principal, tienen pocas variables, por esta razón se desarrollaron los dispositivos electrónicos inteligentes (IED's), los cuales tienen capacidad de

comunicación mediante algún protocolo de comunicación de campo (Bailey, Wright, 2013). Usualmente posee varios sensores y en muchos casos tiene la capacidad de ejecutar un algoritmo de control como el PID (ver Figura 34).

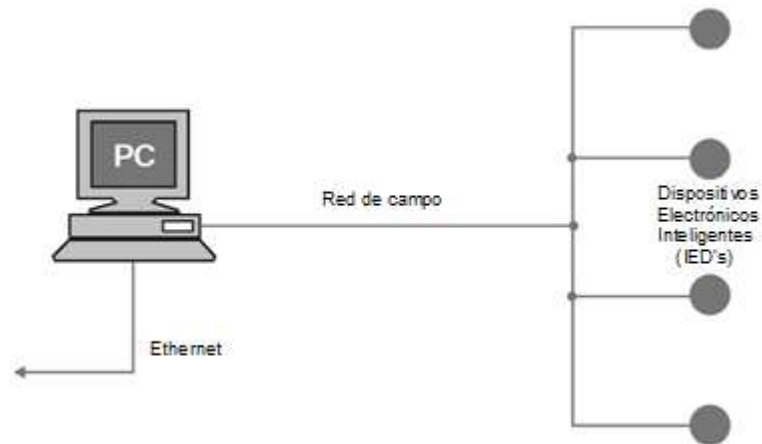


Figura 34: IED'S COMO RTU

En la Figura 35, se muestra un sistema SCADA típico donde cada estación de operador contiene todo o parte del sistema de supervisión por computadora (Bailey, Wright, 2013).

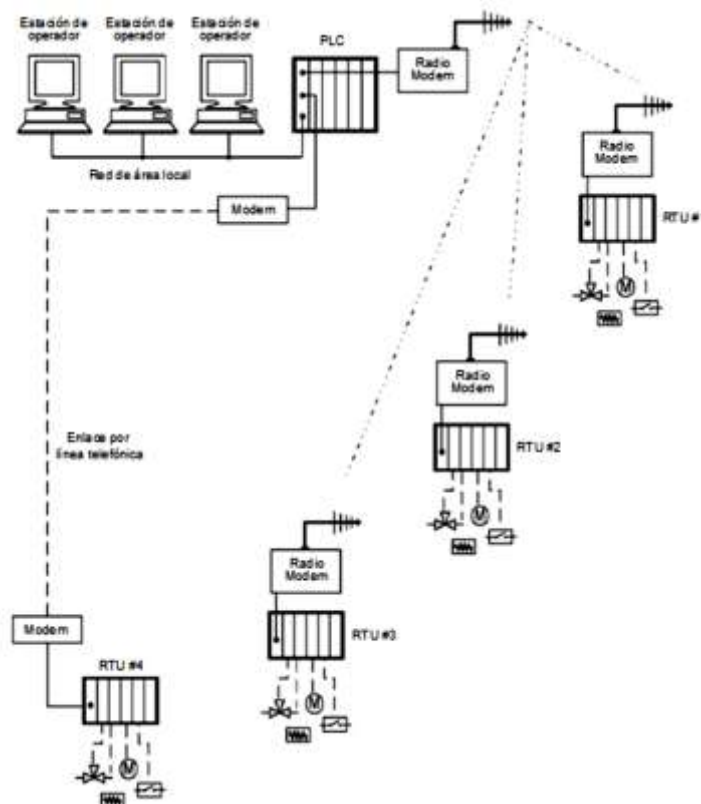


Figura 35: ARQUITECTURA SCADA

Adicional a los sistemas de supervisión por computadora se tienen los paneles de operador (ver Figura 36) que son equipos diseñados para la supervisión de un proceso en campo. Este equipo es de gran ayuda, porque no es necesario esperar la acción correctiva de un operador en la sala de control;

cualquier operador de campo calificado puede realizar algún cambio requerido en el proceso de forma inmediata (los cambios producidos por los operadores solo se dan si éste tiene el permiso otorgado mediante una contraseña) (Romero, 2016).



Figura 36: PANELES DE OPERADOR PANEL VIEW DE LA COMPAÑÍA ALLEN BRADLEY

3.7. Función de transferencia

La Función de Transferencia se define como el cociente entre la Transformada Laplace de la señal de salida $Y(s)$ y la Transformada de Laplace de la señal de entrada $U(s)$, suponiendo todas las condiciones iniciales nulas.

$$F.T = \frac{L[c(t)]}{L[r(t)]} \quad (5)$$

Donde:

$c(t)$ = salida

$r(t)$ = entrada

La función de transferencia:

Solo es aplicable a sistemas descritos por ecuaciones diferenciales lineales invariantes en el tiempo. Es una descripción entrada salida del comportamiento del sistema. Depende de las características del sistema y no de la magnitud y tipo de entrada. No proporciona información acerca de la estructura interna del sistema (Ogata, 1998)

3.8. PID

Corresponde a la estructura de control más usada en el medio industrial. Las letras PID corresponden a las acciones: Proporcional, Integral y Derivativa. Su simplicidad limita el rango de las plantas que puede controlar satisfactoriamente. Consideremos el siguiente lazo de control SISO como se muestra en la figura 37 (Ogata, 2010):

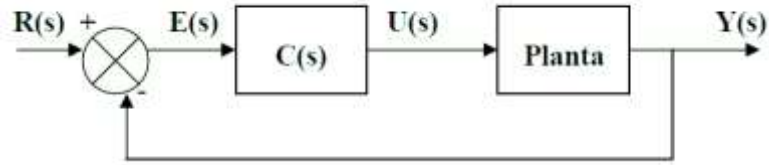


Figura 37: SISTEMA PID

Los controladores PID se pueden describir mediante sus funciones de transferencia, relacionando el error $E(s)$ con la salida $U(s)$ del controlador (Ogata, 2010):

$$C_p(s) = K_p \quad (6) \quad \text{Proporcional}$$

$$C_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_r s}\right) \quad (7) \quad \text{Proporcional e Integral}$$

$$C_{PD}(s) = K_p \left(1 + \frac{T_d s}{t_D s + 1}\right) \quad (8) \quad \text{Proporcional y Derivativo}$$

$$C_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_r s} + \frac{T_d s}{t_D s + 1}\right) \quad (9) \quad \text{Proporcional, Integral y Derivativo}$$

La función $C_{PID}(s)$ es conocida como la forma estándar, otras alternativas son:

3.9. Modelo de los dispositivos de campo

En esta tesis estudiaremos también sobre los dispositivos de campo que son necesarios para la atomización del sistema de desalación de agua.

Los instrumentos para estudiar son:

- Analizador inteligente, el cual analiza dos parámetros del proceso:
- Sensor de conductividad de permeado.
- Sensor de PH de alimentación.
- Transmisor de flujo de permeado.
- Transmisor de presión de alimentación.
- Transmisor de temperatura de entrada.
- Válvula de control proporcional eléctrico

Antes de realizar el modelo se deben tener en cuenta algunas definiciones básicas:

- Transductor: Un transductor es un dispositivo capaz de transformar una determinada manifestación de energía medida en otra diferente, pero de valor muy pequeño. Se les podría definir como un convertor de energía

- **Actuador:** Es un dispositivo capaz de transformar energía hidráulica, neumática o eléctrica en la activación de un proceso con la finalidad de generar algún cambio en un proceso automatizado.

Los sensores y actuadores siempre se relacionan mediante uno o más procesos como se muestra en la Figura 38.

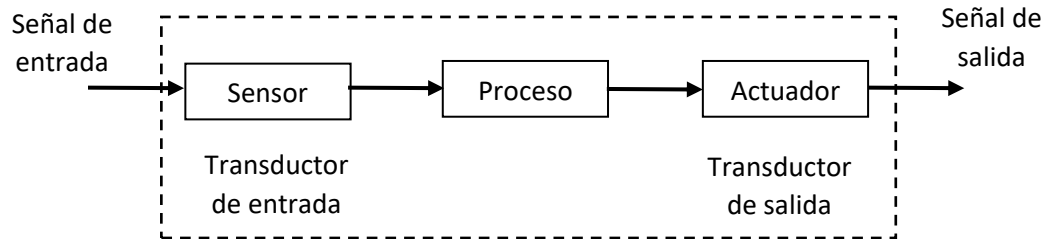


Figura 38: INTERACCIÓN DE DISPOSITIVOS EN UN PROCESO

3.9.1. Transmisores

Un transmisor es un instrumento de medición industrial, el cual utiliza un sensor para medir una magnitud física o química, la cual es mostrada en una pantalla electrónica. También tiene la capacidad de transmitir la información medida mediante algún protocolo de comunicación industrial, así como la de definir los parámetros de operación de este instrumento.

Si bien los sensores miden variables, estas no necesariamente van a mostrar el resultado medido de forma directa. Muchos sensores tienen retardos o no linealidades dependiendo del rango de operación o variable a medir.

Los sensores pueden presentar comportamientos lineales, logarítmicos, exponenciales o potenciales (Figura 39).

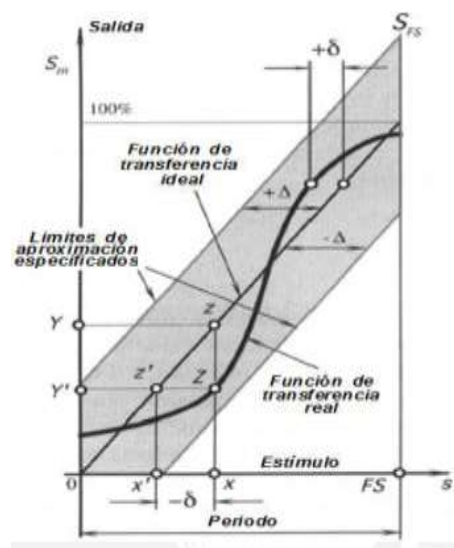


Figura 39: COMPORTAMIENTO REAL E IDEAL DE UN SENSOR

Sin embargo, la mayoría de los sensores utilizados en el campo industrial presentan un rango de operación lineal en el cual se recomienda trabajar

Para entender el funcionamiento de un dispositivo de campo (sensor o actuador), se puede realizar el modelamiento mediante ecuaciones matemáticas o mediante datos. Cada método tiene ventajas y desventajas; sin embargo, la forma más sencilla de realizar el modelamiento de un sensor es por medio de datos y asociación a una función (ver Figura 40).

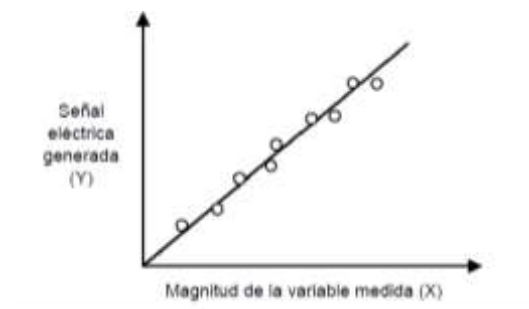


Figura 40: RELACIÓN DE MEDIDAS PARA LA ASOCIACIÓN A UNA FUNCIÓN

Si se realizan pruebas con el mismo sensor sujeto a diferentes condiciones, las medidas presentadas no siempre van a ser las mismas, pues la influencia de interferencia electromagnética, temperatura u otra variable desconocida, puede afectar el desempeño del sensor, como se muestra en la Figura 41.

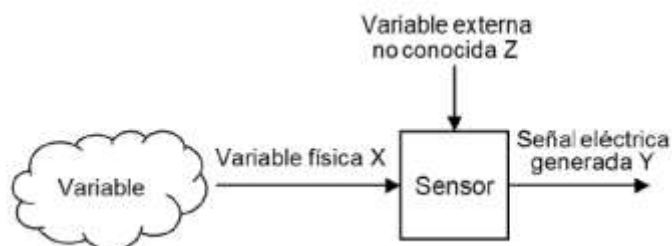


Figura 41: MEDICIÓN DE UNA VARIABLE POR UN SENSOR

Algunas características estáticas de los sensores se mencionan a continuación:

Rango de entrada: El mínimo y máximo valor de la variable física a medir.

Rango de salida: El mínimo y máximo valor que entrega el sensor. Este valor normalmente trabaja bajo un estándar, dentro de los más conocidos se tiene:

Rango de 0 – 20mA.

Rango de 4 – 20mA.

Rango de -10 – 10V.

Rango de 0 – 10V.

Rango de 0 – 5V.

Sensibilidad: Es la capacidad que tiene el sensor para detectar una variación en la variable medida.

Linealidad: El acercamiento que tiene un sensor a comportarse como una recta.

Monotonicidad: Es la relación que existe entre la variable medida y la señal eléctrica generada. Si se incrementa el valor de la variable, entonces se incrementa la señal eléctrica generada y viceversa.

Histéresis: Se refiere a la diferencia de dos valores de señal eléctrica generada para una misma magnitud medida, dependiendo de la trayectoria (crecimiento o decrecimiento). Este comportamiento normalmente se presenta en materiales ferromagnéticos.

A pesar de que los sensores presentan comportamiento no lineal (en el mundo todas las variables tienen un grado de no linealidad), estos se suelen considerar como lineales, de manera que pueden ser representados por una ecuación diferencial lineal (2.6). En la práctica los sensores se representan como un sistema de orden cero, primer orden y segundo orden, ya que es muy raro encontrar sistemas de orden superior.

$$a_k \frac{d^k y(t)}{dt^k} + \dots + a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{d^1 y(t)}{dt^1} + a_0 y(t) = x(t) \quad (10)$$

Se debe entender que los sensores son estudiados como sistemas causales; es decir, las condiciones iniciales de operación son cero.

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación 2.6, se obtiene:

$$L \left\{ a_k \frac{d^k y(t)}{dt^k} + \dots + a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) \right\} = L\{x(t)\}$$

$$L(a_k s^k + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + a_0)Y(s) = X(s)$$

$$G(s) = \frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{1}{a_k s^k + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$$

La ubicación de los polos de la ecuación (2.7), en el plano imaginario, permite conocer el comportamiento dinámico del sensor. Este comportamiento dinámico puede ser estable, oscilatorio, integral (positivo o negativo) o inestable, como se muestra en la Figura 42.

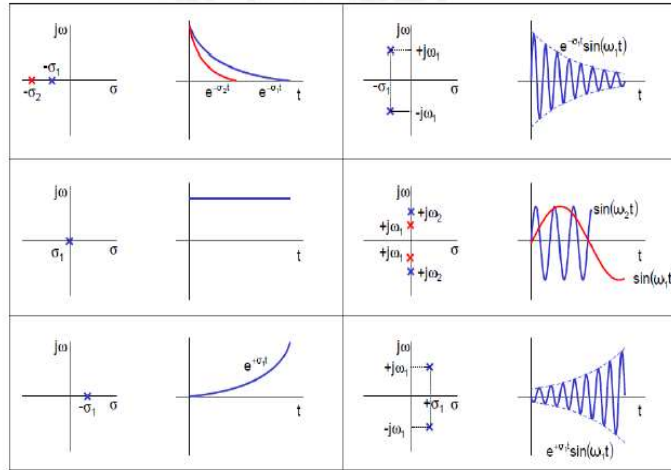


Figura 42: POSIBLE COMPORTAMIENTO DEL SENSOR DE ACUERDO CON LA UBICACIÓN DE SUS POLOS EN EL PLANO IMAGINARIO

De acuerdo con las características mencionadas en los manuales de los transmisores con los que se trabaja, todos los sensores presentan rangos de linealidad y funciones de compensación interna por efecto de la temperatura sobre la variable medida. Por esta razón todos los sensores se consideran de orden cero (ecuación 2.8) o de primer orden (ecuación 2.9), dependiendo de la existencia de retardo en la medición y generación de señal eléctrica.

$$G(s) = \frac{X(s)}{Y(s)} = K \quad (11)$$

$$G(s) = \frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{1}{a_1 s + a_0} = \frac{K}{ts + 1} \quad (12)$$

Donde:

- K: Ganancia estática que viene de la relación de la magnitud de la variable medida y la magnitud de la señal generada.
- τ : Es la constante de tiempo, indicada por el fabricante, la cual determina la dinámica del sistema.

Para hallar ganancia K en los transmisores en estudio, se debe tener en cuenta la ecuación de la recta generada de la Figura 43.

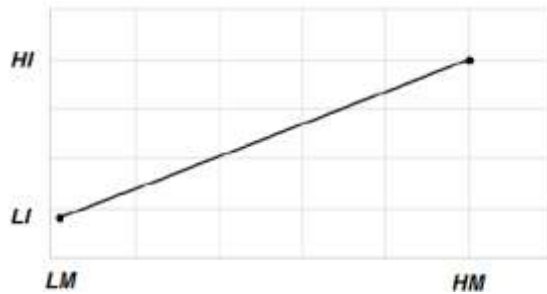


Figura 43: RELACIÓN DE GANANCIA DEL TRANSMISOR

Donde:

- LM: Medida mínima del transmisor
- HM: Medida máxima del transmisor
- LI: Mínima salida del transmisor
- HI: Máxima salida del transmisor
- Con estos datos se puede calcular la ganancia del transmisor, y por ende, la función de transferencia del transmisor:

$$S = \frac{m(M - LM)}{ts + 1} + LI \quad (13)$$

Donde:

- I: Señal de salida del transmisor
- M: Variable medida por el transmisor
- m: pendiente de la recta:

$$m = \frac{HI - LI}{HM - LM}$$

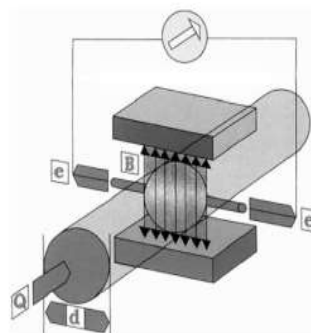
Con la función de transferencia (ecuación 13), se desarrolla un diagrama de bloques (ver Figura 44) en Simulink, con el cual se van a realizar las simulaciones de las funciones de transferencia de los transmisores para validarlos.

3.9.1.1. Transmisor de flujo

Este dispositivo es un flujómetro electromagnético que consiste en un sensor y un transmisor, el cual mide el flujo de un

La ley de inducción de Faraday afirma que el desplazamiento de una barra conductora, a través de un campo magnético, induce una tensión eléctrica. Este principio de dínamo rige también la forma en que funcionan los flujómetros electromagnéticos.

De acuerdo con la Figura 45 se llega a producir una relación entre el flujo que atraviesa el campo magnético y la corriente medida por los electrodos mediante la siguiente ecuación:


$$e = kBQd \quad (14)$$

e: emf generada en los electrodos (V).

k: Constante de medición.

B: Fuerza del campo magnético (Wb).

Q: Tasa de flujo volumétrico (m^3/s).

d: Espacio entre los electrodos (m).

El campo magnético se genera mediante una corriente continua pulsante de polaridad alterna para asegurar la estabilidad del punto cero y conseguir que la medición sea insensible a líquidos no homogéneos o con varias fases y, asimismo, pueda efectuarse en líquidos de baja conductividad ($> 5\mu s/cm$).

De acuerdo con el manual de referencia 00809-0100-4662, Rev DA (Rossemount, 2011) este instrumento tiene las siguientes características:

Máximo tiempo de respuesta: 50ms.

Señal de salida: 4 – 20mA.

Magnitud medida: 3.529 – 141.15l/m.

Luego, tomando como referencia la ecuación 13, se determina la función de transferencia para este transmisor:

$$G(s) = \frac{0.1163}{0.05s + 1} + 4 \quad (15)$$

Al realizar una simulación de la función de transferencia del transmisor, en Matlab, se obtiene la respuesta mostrada Figura 46.

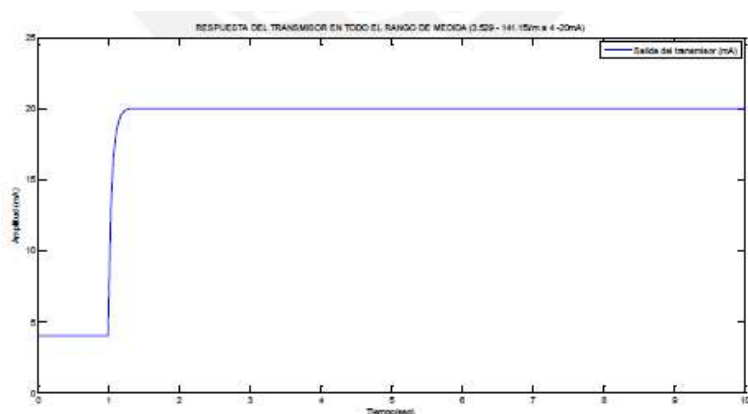


Figura 46: RESPUESTA DEL TRANSMISOR EN TODO SU RANGO

3.9.1.2. Transmisor de presión.

Este dispositivo mide la presión haciendo uso de un sensor piezoresistivo, el cual se basa en la medida de la variación de resistencia inducida por la deformación en función de la presión (ver Figura 47).

Una tracción del conductor aumenta la longitud y reduce la superficie de sección con la consecuencia de un aumento en la resistencia eléctrica. Una deformación en el recalcado tiene el efecto contrario (Rossemount, 2013).

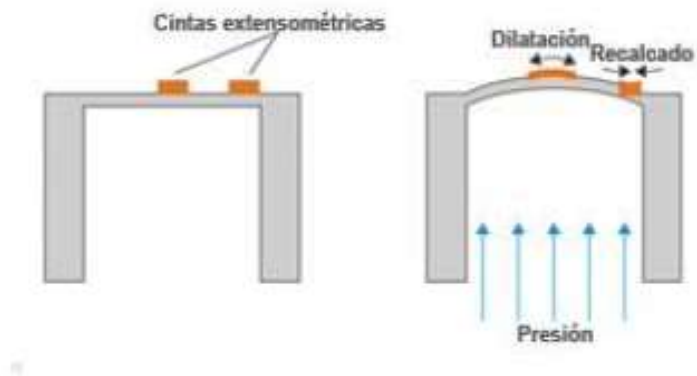


Figura 47: OPERACIÓN DEL SENSOR PIEZORESISTIVO

Para la realización del principio de medición se utiliza un cuerpo base que se deforma de manera controlada al someterle presión. A menudo este cuerpo consiste en una membrana con una cinta semiconductor incorporada en forma de microestructura.

La ecuación que relaciona la resistencia con los cambios en la presión viene dada por la siguiente ecuación:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (16)$$

Donde:

R: Resistencia eléctrica.

ρ : Resistencia específica.

l: Longitud.

A: Superficie de sección.

Dado que la microestructura no ofrece gran resistencia al contacto de numerosos medios, esta es encapsulada para la

mayoría de las aplicaciones, donde la transmisión mediante aceite.

Para los transmisores Rossemount 2051, la presión es aplicada al diafragma. El aceite contrae el sensor y produce una variación de voltaje. Luego, esta señal es tratada por el procesador de señales.

La señal tratada es utilizada por el microprocesador para calcular la salida del transmisor. Finalmente, esta señal es enviada al convertor D/A, el cual vuelve a convertir la señal a analógica y la superpone a la señal HART en la línea de 4 – 20mA, como se muestra en la Figura 48.

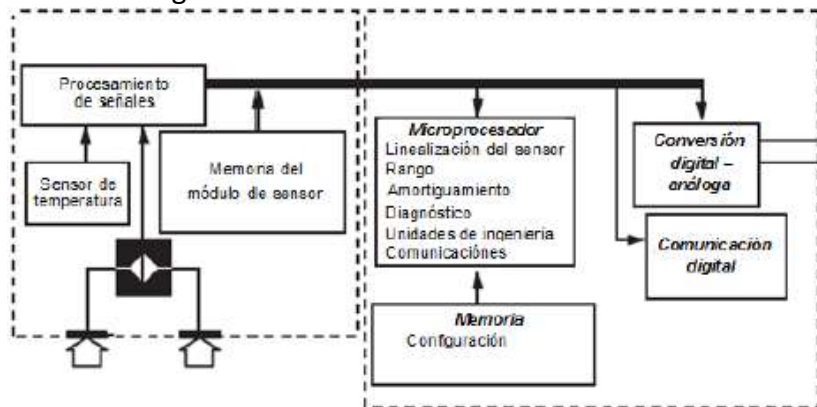


Figura 48: OPERACIÓN DEL TRANSMISOR DE PRESIÓN ROSSEMOUNT 2051
(ROSSEMOUNT, 2013)

De acuerdo con el manual de referencia 00809-0100-4107, Rev BA (Rossemount, 2013) este instrumento tiene las siguientes características:

Máximo tiempo de respuesta: 160ms.

Señal de salida: 4 – 20mA.

Magnitud medida: 0 – 10000psi.

Luego, tomando como referencia la ecuación 13, se determina la función de transferencia para este transmisor:

$$G(s) = \frac{0.00160}{0.16s + 1} + 4 \quad (17)$$

Al realizar una simulación de la función de transferencia del transmisor, en Matlab, se obtiene la respuesta mostrada en la Figura 49.

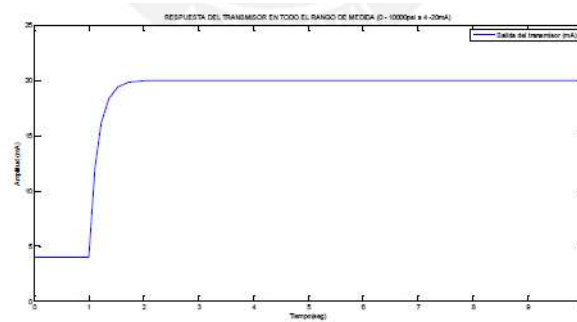


Figura 49: RESPUESTA DEL TRANSMISOR EN TODO SU RANGO

3.9.1.3. Transmisor de temperatura.

Este dispositivo mide la temperatura haciendo uso de un sensor termoresistivo (RDT) de tipo Pt 100 (ver Figura 49).

El Pt100 consiste de un alambre de platino que a 0°C tiene 100ohms de resistencia y que, al aumentar su temperatura, aumenta su resistencia eléctrica. El instrumento utilizado en este trabajo utiliza un Pt100 en conexión a 4 hilos (Rossemount, 2015).

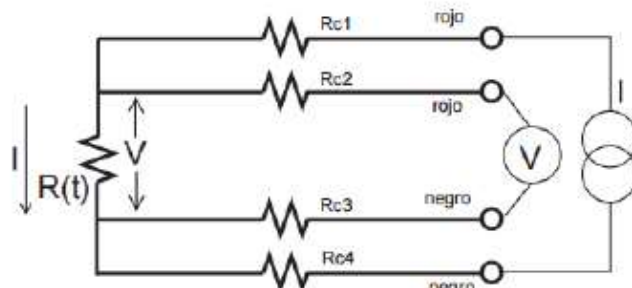


Figura 50: CONEXIÓN A 4 HILOS DE UNA PT100

De acuerdo con el manual de referencia 00809-0200-4728, Rev RA (Rossemount, 2015) este instrumento tiene las siguientes características:

Máximo tiempo de respuesta: 500ms.

Señal de salida: 4 – 20mA.

Magnitud medida: 0 – 100°C.

Luego, tomando como referencia la ecuación 13, se determina la función de transferencia para este transmisor:

$$G(s) = \frac{0.160}{0.5s + 1} + 4 \quad (18)$$

Al realizar una simulación de la función de transferencia del transmisor, en Matlab, se obtiene la respuesta mostrada en la Figura 51.

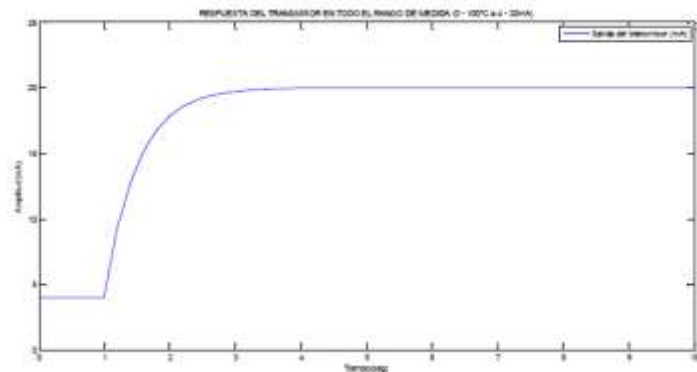


Figura 51: RESPUESTA DEL TRANSMISOR EN TODO SU RANGO

3.9.2. Sensor:

Un sensor es un dispositivo que genera una señal eléctrica al detectar una magnitud física o química, llamada normalmente variable de instrumentación.

3.9.2.1. Sensor de PH.

Este dispositivo utiliza un electrodo de vidrio y un electrodo de referencia para medir el PH. Los dos electrodos vienen montados juntos como se muestra en la Figura 52 (Rossemount, 2014).

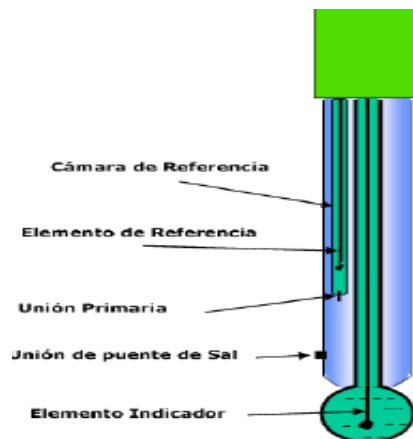


Figura 52: ELECTRODO COMBINADO PARA MEDICIÓN DE PH

El PH se determina midiendo el potencial generado (en milivolts) por el electrodo de vidrio, este potencial se compara con un potencial constante generado por el electrodo de referencia, el cual se encuentra en contacto con el fluido, formando un puente salino.

Este sensor envía la señal medida a un analizador (Rossemount Analytical 1056), el cual realiza una compensación de temperatura mediante un factor de compensación. El analizador también permite enviar la señal por corriente (4 – 20mA) o por protocolo HART.

De acuerdo al manual de instrucción PN 51-1056, Rev J (Rossemount, 2014) este instrumento tiene las siguientes características:

- Máximo tiempo de respuesta: 5s.
- Señal de salida: 4 – 20mA.
- Magnitud medida: 0 – 14.

Luego, tomando como referencia la ecuación 13, se determina la función de transferencia para este transmisor:

$$G(s) = \frac{1.1429}{5s + 1} + 4 \quad (19)$$

Al realizar una simulación de la función de transferencia del transmisor, en Matlab, se obtiene la respuesta mostrada en la Figura 53.

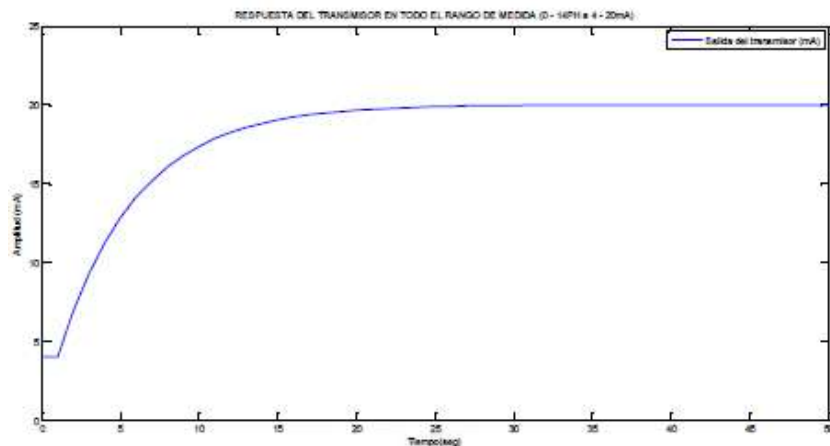


Figura 53: RESPUESTA DEL SENSOR EN TODO SU RANGO

3.9.2.2. Sensor de Conductividad.

Este dispositivo realiza la medida de la conductividad eléctrica del agua haciendo uso de dos electrodos ubicados en forma opuesta. Luego, se aplica una magnitud de voltaje AC, el cual genera una corriente en el medio. Esto hace que los cationes y aniones que contiene el medio se muevan de un electrodo hacia otro, generando un medio conductivo (a mayor cantidad de

cationes y aniones, mayor será la corriente generada y viceversa). Ver Figura 54 (Rossemount, 2014).

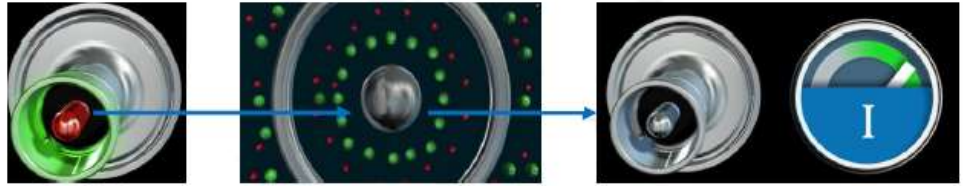


Figura 54: PROCESO DE MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DE UN FLUIDO

Este sensor envía la señal medida a un analizador (Rossemount Analytical 1056), el cual realiza una compensación de temperatura mediante un factor de compensación. El analizador también permite enviar la señal por corriente (4 – 20mA) o por protocolo HART.

De acuerdo al manual de instrucción PN 51-1056, Rev J (Rossemount, 2014) este instrumento tiene las siguientes características:

- Máximo tiempo de respuesta: 3s.
- Señal de salida: 4 – 20mA.
- Magnitud medida: 0 – 600mS/cm.

Luego, tomando como referencia la ecuación 10, se determina la función de transferencia para este transmisor:

$$G(s) = \frac{0.0267}{3s + 1} + 4 \quad (20)$$

Al realizar una simulación de la función de transferencia del transmisor, en Matlab, se obtiene la respuesta mostrada en la Figura 55.

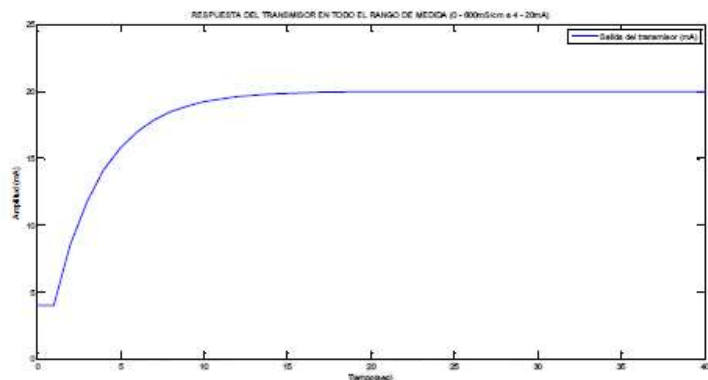


Figura 55: RESPUESTA DEL SENSOR EN TODO SU RANGO

3.9.3. Actuadores

Para el control de la planta desalinizadora piloto, se debe hacer uso de actuadores como una motobomba y una válvula de control

proporcional. Para este trabajo se plantea que la motobomba tiene una presión de trabajo constante, y el actuador que realiza la regulación es la válvula de control proporcional, por lo que se debe tener en consideración un modelo que permita identificar las posibles fallas de este actuador.

3.9.3.1. Válvulas de control proporcional:

Las válvulas de control proporcional generan una acción de variación de flujo de un fluido mediante la oposición al mismo. Básicamente se componen de dos partes como se muestra en la Figura 56.

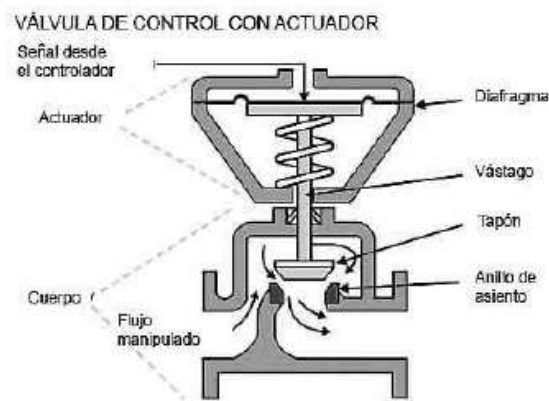


Figura 56: ACTUADOR Y CUERPO DE VÁLVULA

Al producirse un movimiento en el vástago, se produce una diferencia de presión en el cuerpo y, por ende, una variación en el flujo de salida.

La relación directa entre el movimiento del vástago y el flujo de salida se da en base a la dinámica de la válvula, la cual puede ser radical, lineal o isoporcentual (Fisher, 2013), como se muestra en la Figura 57.

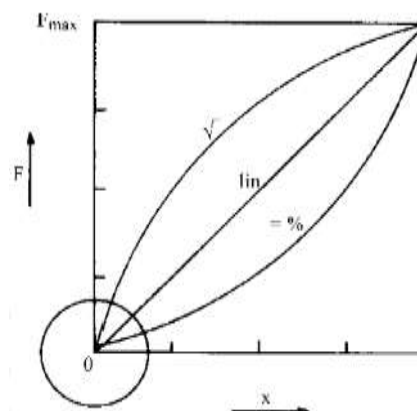


Figura 57: DINÁMICA DE UNA VÁLVULA DE CONTROL PROPORCIONAL

En este trabajo, las dos válvulas en estudio son lineales, por lo que su dinámica se representa mediante la siguiente ecuación:

$$G_V(s) = \frac{K_a K_v}{T_v s + 1} \quad (21)$$

Donde:

K_a : Ganancia del actuador.

$$K_a = \frac{\text{Rango de variación del desplazamiento del vástago}}{\text{Rango de variación de salida del controlador}} \quad (22)$$

K_v : Ganancia del cuerpo de válvula.

$$K_v = \frac{\text{variación del flujo a la salida de la válvula}}{\text{Rango de variación del desplazamiento del vástago}} \quad (23)$$

T_v : Constante de tiempo de la válvula Dada por el

En la práctica, las válvulas de control proporcional generan una pérdida de presión del fluido que atraviesa el cuerpo de la válvula, por lo que su representación práctica se muestra en la Figura 58.

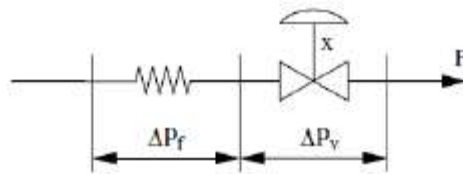


Figura 58: REPRESENTACIÓN PRÁCTICA DE UNA VÁLVULA DE CONTROL

A la pérdida de presión se le denomina resistencia hidráulica (R_H), y relaciona el flujo a una variación de presión mediante la ecuación 22 (Fisher, 2013).

$$\Delta P_f = R_H F \quad (24)$$

Adicionando la ecuación 22 a la ecuación 20, se obtiene la ecuación 24, la cual representa el comportamiento dinámico de una válvula de control proporcional lineal en la práctica:

$$G_V(s) = \frac{K_a K_v}{T_v s + 1} + \frac{1}{R_H} \quad (25)$$

Finalmente, se construye un diagrama de bloques con base en la ecuación 24 para realizar simulaciones de las válvulas de control en estudio (ver Figura 59).

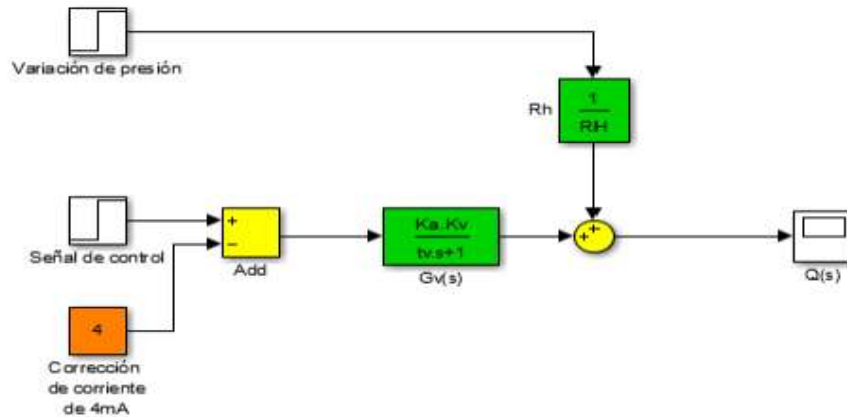


Figura 59: DINÁMICA DE UNA VÁLVULA DE CONTROL PROPORCIONAL LINEAL

3.9.3.2. Válvula de control proporcional eléctrica.

Esta válvula trabaja en un rango lineal y con control por tiempo de acuerdo con el manual del fabricante (valbia web). Las características se presentan en la tabla 7.

MODELO	VB030	VB060	VB110	VB190	VB270	VB350
TIEMPO DE APERTURA	8	9	27	27	50	50
TORQUE	266	530	975	1680	2390	3100
VOLTAJE HT	100-240VAC					
MAXIMA CORRIENTE HT	0.38-0.25	0.75-038				
MAXIMA POTENCIA HT	38-60VA	75-90VA				
FRECUENCIA	50/60 Hz					
VOLTAJE LT	24V AC/DC					
MAXIMA CORRIENTE LT	1.25	1.25	2.25	2.25	2.25	2.25
MAXIMA POTENCIA LT	30VA	30VA	55VA	55VA	55VA	55VA

Tabla 7: CARACTERÍSTICAS DE LA VÁLVULA VALBIA 030

Como la válvula se maneja bajo una relación, se debe crear una función que exprese el tiempo con el porcentaje de apertura mediante la gráfica presentada en la Figura 60.

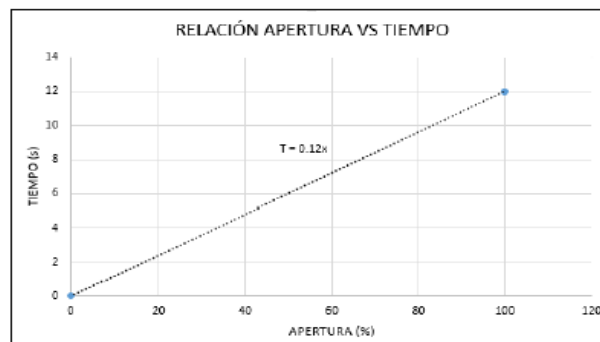


Figura 60: RELACIÓN ENTRE TIEMPO Y PORCENTAJE DE APERTURA

Con la relación de tiempo y porcentaje de apertura se obtiene una ecuación de orden cero, representada por:

$$T = \frac{T_MAX}{100\%} SP \quad (26)$$

Donde:

- T: Señal de apertura de la válvula en segundos.
- T_MAX: Tiempo para abrir la válvula al máximo.
- SP: Punto de operación de la válvula.

3.9.3.3. Válvula de control proporcional neumática.

De acuerdo con el manual de referencia 52.124CVF_SVF (Baumann, 2015), la válvula de control proporcional de la planta de temperatura piloto presenta las siguientes características:

- Máximo tiempo de respuesta: 2s.
- Señal de entrada: 4 – 20mA.
- Dimensión del vástago: 12.7mm
- Resistencia hidráulica: 100
- Ganancia del cuerpo de válvula: 8.

Luego, tomando como referencia la ecuación 24, se determina la función de transferencia para este transmisor:

$$G(s) = \frac{6.35}{2s + 1} + \frac{1}{100} \quad (27)$$

Al realizar una simulación de la función de transferencia del transmisor, en Matlab, se obtiene la respuesta mostrada en la Figura 61.

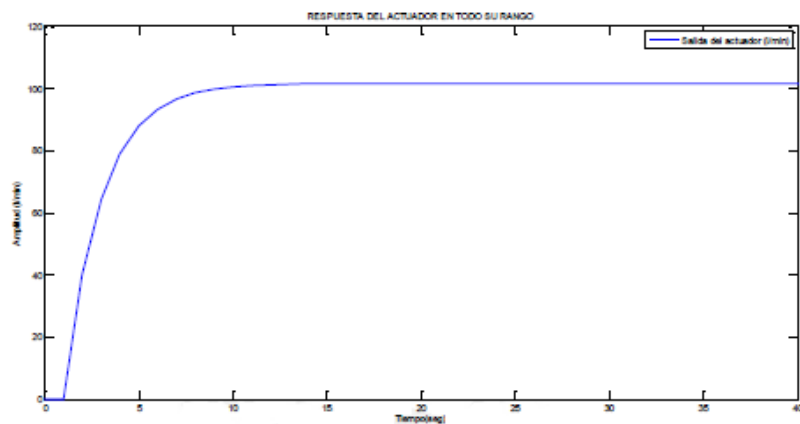


Figura 61: RESPUESTA DEL ACTUADOR EN UNA APERTURA DEL 0 AL 100%

3.9.4. Proceso:

Un proceso es un conjunto de operaciones unitarias necesarias para modificar las características de las materias primas. Dichas características pueden ser de naturaleza muy variada, tales como: la forma, la densidad, la conductividad, la temperatura, etc.

III. Metodología

Como hemos estudiado anteriormente un sistema de desalación es actualmente necesario para equilibrar la falta de agua en el planeta. En esta tesis usaremos el sistema de osmosis inversa, el cual actualmente es el más usado y rentable.

Una planta de desalación por osmosis inversa tiene varias partes como se menciona a continuación.

- 1.- Sistema de captación de agua de mar
- 2.- Pretratamiento
- 3.- Acondicionamiento químico
- 4.- Osmosis inversa
- 5.- Postratamiento
- 6.- Sistema de evacuación de salmuera
- 7.- Tratamiento de fangos y efluentes

La siguiente figura muestra el diagrama de flujo de una desaladora de agua de mar por ósmosis inversa:

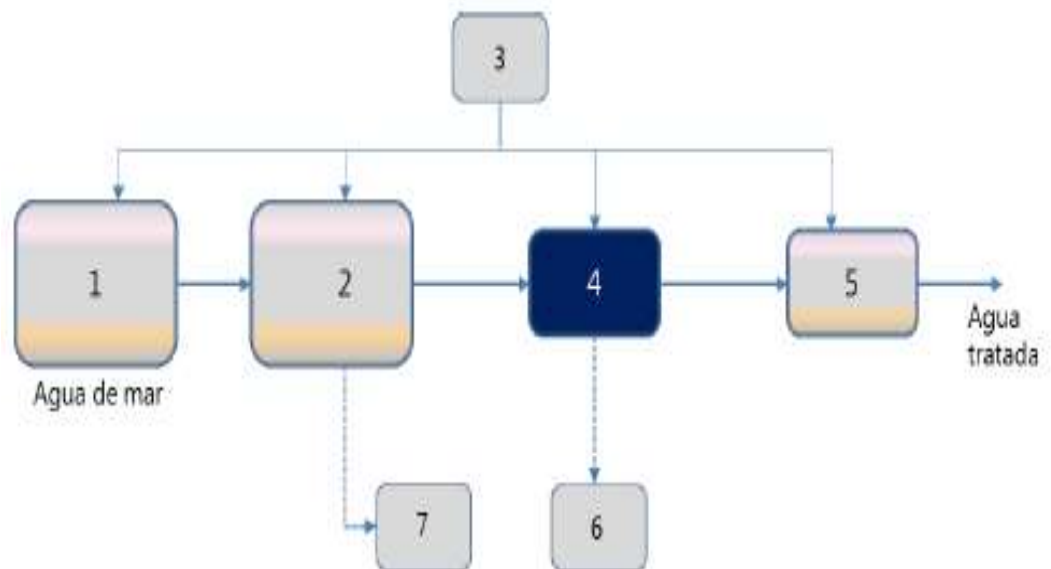


Figura 62: DIAGRAMA DE FLUJO DE UNA DESALADORA DE AGUA DE MAR POR ÓSMOSIS INVERSA

A continuación, detallaremos cada una de las partes de un sistema de osmosis inversa como se menciona en el diagrama de flujo de la figura 62.

1. Sistema de captación de agua de mar:

El sistema de captación de agua de mar es el punto de partida de una planta desaladora; principalmente hay dos tipos de sistemas de captación (Missimer, Ghaffour, Dehwah, Rachman, Maliva, & Amy, 2013):

1.1. Toma abierta:

Una toma abierta consiste en una o varias torres de captación situadas en el interior del mar una distancia entre varios cientos de metros hasta varios kilómetros, desde donde se envía el agua a través de una conducción hasta el pretratamiento. Este tipo de sistemas tiene una parte marítima y otra parte terrestre (Dreizin, Tenne, & Hoffman, 2008).

1.2. Pozos o canteras de captación

Una captación mediante pozos consiste en tomar el agua de mar de una perforación situada normalmente en la playa o un lugar cercano a ella, y desde ahí mediante un bombeo enviarla al pretratamiento de la desaladora. En este caso, todo el sistema está en tierra, no hay parte marítima (Voutchkov, 2005).

2. Pretratamiento:

El pretratamiento es el método utilizado para proteger las membranas que se usan en el sistema de osmosis inversa.

Normalmente, antes del pretratamiento hay un bombeo de agua bruta y a partir de él uno o varios de los siguientes procesos (Prihasto, Liu, & Kim, 2009)

2.1. Desbaste grueso:

Como su propio nombre lo dice en esta parte del pretratamiento se tiene que separar objetos de gran tamaño que provocarían obstrucción en los procesos siguientes.

Este proceso permite evacuar objetos grandes del agua el cual es necesario para ser tratado y como ya es conocido el mar actualmente está cubierto por la contaminación del hombre por lo tanto es importante este proceso en el pretratamiento. Para este proceso usaremos rejillas que están formadas por barrotes paralelos.

Las rejas pueden ser:

- ❖ De gruesos: distancia entre barrotes de 5-10 cm ó de finos: distancia entre barrotes de 1,5-3 cm
- ❖ Fijas ó Móviles
- ❖ Horizontales, Verticales, Inclínadas ó Curvas.

En función de la forma en que se realiza la retirada de sólidos retenidos, las rejas se clasifican:

- Rejas de limpieza manual
- Rejas de limpieza automática.

2.2. Tamizado:

Este es el proceso donde a través de la suspensión o flotación de sólidos estos son separados para evitar la obstrucción de las tuberías y evitar el daño de las bombas. Además consiste en pasar por un tamiz por el cual pasan partículas de menor tamaño.

2.3. Flotación por aire disuelto

Este proceso consiste en separar sólidos de un líquido mediante el uso de burbujas de aire muy finas. Estas burbujas se adhieren a la materia en suspensión – sin importar si se trata de algas, aceite u otro contaminante – reduciendo su densidad. Las burbujas flotantes hacen que las partículas se eleven a la superficie.

2.4. Decantación:

Es una técnica que consiste en separar un sólido mezclado con un líquido el cual es insoluble o inmiscible (que no se pueden mezclar).

2.4.1. Decantación un Líquido

Para separar líquidos que no son solubles, como por ejemplo agua y aceite, es necesario introducir la mezcla en un recipiente llamado embudo de decantación y dejar que repose hasta que los líquidos se separen en dos capas.

2.5. Filtración sobre arena o sobre lecho multicapa:

Se utiliza esta filtración cuando la dimensión de las partículas contenidas en el agua es relativamente pequeña.

Para que esta filtración sea eficaz, es preciso que las materias puedan penetrar profundamente dentro del lecho y no bloquearlo en su superficie.

2.5.1. Filtración lenta:

Tiene por objeto la depuración de las aguas de superficie, sin coagulación ni decantación previa. Estos filtros están contruidos de tal forma que el agua fluye muy despacio a través de un lecho de arena fina, quedando retenidas en la superficie del filtro las partículas de mayor tamaño.

2.5.2. Filtración rápida:

En el proceso de filtración rápida, el agua atraviesa el lecho filtrante a velocidades de 4 a 50 m/h. La arena, que es el material más empleado como medio filtrante, suele reposar sobre un lecho de grava que impide que el material más fino pase al fondo del filtro.

El tamaño efectivo de la arena de la capa filtrante oscila entre 0.5 y 1.5 mm de diámetro, mientras que el tamaño de la grava de la base puede oscilar entre 35 y 130 mm, dispuesta en capas de menor a mayor grosor.

2.6. Ultrafiltración

Se trata de un proceso de filtración de membrana que se elimina sólidos suspendidos, bacterias, virus, endotoxinas y más para producir agua de alta pureza con una baja densidad de sedimentos. Pueden retener partículas de 0.001 – 0.1 μm micras en un fluido.

2.7. Filtros de cartucho

Las unidades de la filtración del cartucho funcionan generalmente con la más eficacia posible y económicamente en los usos que tienen niveles de la contaminación de menos de 100 PPM. Para usos más pesados de la contaminación, los cartuchos se utilizan normalmente como filtros finales de refinamiento.

Los primeros procesos eliminan la materia de mayor tamaño y los últimos eliminan sólidos en suspensión más pequeños. La última barrera de protección antes de las membranas de ósmosis inversa suelen ser unos filtros de cartucho que no dejan pasar los sólidos con un tamaño mayor de 5 micras

3. Acondicionamiento químico:

En este proceso se realiza el acondicionamiento químico en todo el sistema para regular y obtener las características necesarias para el proceso de ósmosis inversa y sobre todo para el uso adecuado de las membranas.

Algunas de las dosificaciones de reactivos más habituales son las siguientes:

- Dosificación de cloro o hipoclorito sódico en el sistema de captación
- Dosificación de un coagulante, habitualmente cloruro férrico, en pretratamiento para mejorar el rendimiento de procesos como la flotación, filtración o ultrafiltración
- Dosificación de un ayudante de coagulación en pretratamiento
- Dosificación de un ácido en pretratamiento, normalmente ácido sulfúrico, para trabajar a un pH óptimo para la coagulación.
- Dosificación de bisulfito sódico antes de la entrada a la ósmosis para eliminar el cloro residual que pueda contener el agua y así evitar dañar las membranas [81]
- Dosificación de un anti-incrustante a la entrada a la ósmosis para evitar la precipitación de compuestos que produzcan incrustaciones en las membranas
- Dosificación de hidróxido sódico a la entrada de la ósmosis para trabajar a un pH óptimo

Las dosis más habituales de los principales reactivos son las siguientes:

Reactivo químico		Dosis (mg/l)
BIOCIDAD	CLORO	0,5-6
REDUCTOR DE CLORO	BISULFATO SODICO	3 - 19
Coagulante	Cloruro Férrico	0,8 -25
Ayudante de Coagulación		0,2 - 4
Ácido Sulfúrico		6,6 - 100
Inhibidores de incrustaciones	Hexametáfosfato sodico	2 - 10
	Ácido poliacrílico	2,9
	Fosfatos	1,4

Tabla 8: Dosis de reactivos habituales en una desaladora por ósmosis inversa [82]

3.1. PH:

En el caso del PH que como sabemos oscila entre el 7.5 y 8.4 en el agua de mar y este varía de acuerdo con la temperatura, presión o profundidad y salinidad.

Como se va a trabajar en estas condiciones el funcionamiento de la membrana no será óptimo, se pueden formar incrustaciones de carbonato de calcio y la velocidad de hidrólisis de las membranas varía. Para evitar todos estos efectos negativos, hay que acidificar el agua hasta llegar a valores que oscilan entre pH 5 y 6. El acidificante más comúnmente utilizado es el ácido sulfúrico, aunque también se puede utilizar el ácido clorhídrico.

3.2. Temperatura

La temperatura del Océano Pacífico varía entre $-0,6^{\circ}\text{C}$ y $29,8^{\circ}\text{C}$, aunque si tomamos como referencia los valores de zonas cercanas a la costa varía entre 10°C y $29,8^{\circ}\text{C}$

3.3. Sistema de calefacción de agua:

En este caso se utilizará un tanque de paso y una resistencia para el calentamiento del agua y así lograr el mejor rendimiento de la membrana que se elija en el sistema de osmosis inversa.

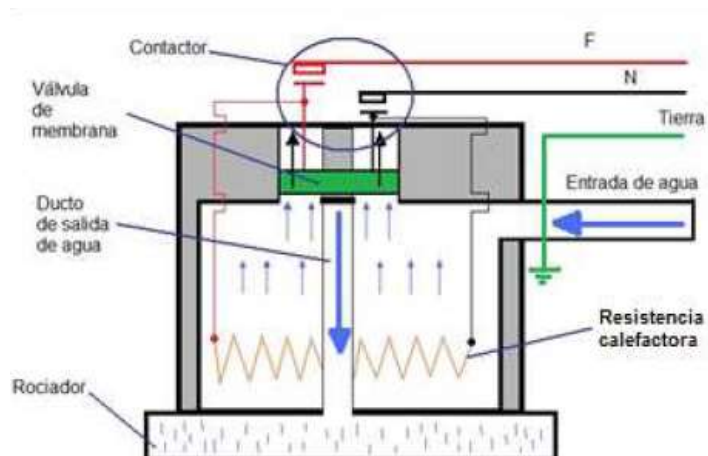


Figura 63: SISTEMA DE CALEFACCIÓN DE AGUA

4. Ósmosis Inversa:

Para esta parte de la tesis utilizaremos un modelo obtenido por Alatiqi para plantas desalinizadoras (Alatiqi, 1999), ya que este modelo es tomado como referencia para realizar estudios más avanzados en la desalinización de agua de mar por ósmosis inversa.

El modelo de estudio se presenta en la Figura 64.

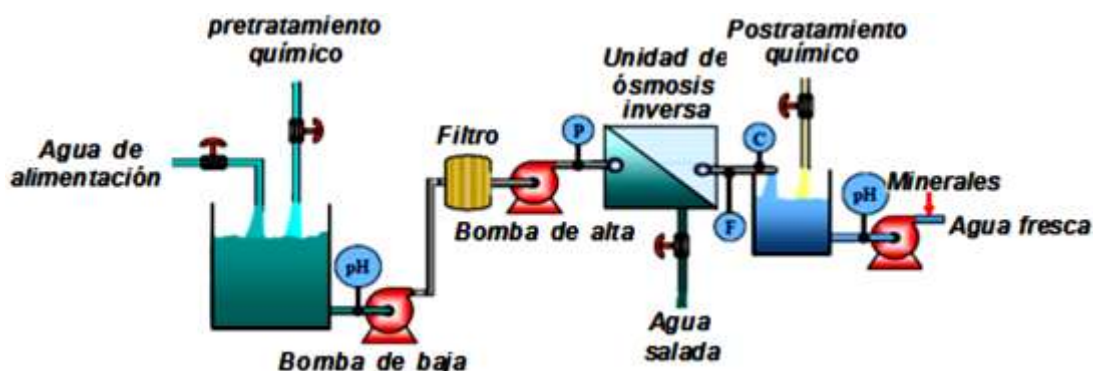


Figura 64: PLANTA DE DESALINIZACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA.

Como también ya se ha estudiado anteriormente el sistema de ósmosis inversa se basa en el uso de membranas para filtrar el agua de mar. En esta tesis se enfocará en hacer más eficiente este sistema.

En 1885, Van't Hoff publicó la relación existente entre la presión osmótica y la concentración de soluto de una disolución:

$$\pi = R * T * M \quad (4)$$

Donde:

π : presión osmótica de la solución (atm)

R : constante universal de los gases ideales (0,082 atm·l·K⁻¹·mol⁻¹)

T : temperatura absoluta (K)

M : molaridad de la solución (mol/l)

Conocida la concentración de cada uno de los constituyentes del agua de mar, se puede obtener de manera rápida y aproximada la presión osmótica de dicha solución a partir de la siguiente expresión [54]

$$\pi = 0.08308 * \Phi * (t + 273.16) * \sum m_i \quad (5)$$

Dónde:

π : presión osmótica de la solución (bar)

Φ : coeficiente osmótico (en agua de mar 0,902)

t : temperatura del agua de mar (°C)

m_i : suma de las molaridades de todos los constituyentes de la solución

Siendo:

$$m_i = \frac{C_i}{1000 * Pm_i * \left(\frac{10^6 - SDT}{10^6} \right)}$$

A continuación, se definen varios parámetros básicos que se utilizan a lo largo de la tesis y que se muestran en el siguiente esquema [52]:

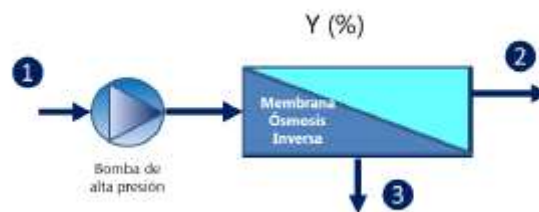


Figura 65: RELACIÓN DE CAUDALES EN UNA MEMBRANA DE ÓSMOSIS INVERSA

1. Entrada de agua al proceso de ósmosis inversa. También denominada “agua de aporte”, o “agua bruta”. Es el agua de mar que a su paso a través de la bomba de alta presión tiene la presión suficiente para que se produzca el fenómeno de la ósmosis inversa. Este lado de la membrana trabaja a una presión muy alta por lo que se la denomina “lado de alta”.
Normalmente, el agua de mar ha tenido un pretratamiento previo antes de la entrada a las membranas (ver capítulo 2.6)
2. Salida de agua producto. También denominada “permeado” o “agua osmotizada”. Es el lado de la membrana que tras el proceso de ósmosis queda con una concentración muy baja de sales. Es la zona que tiene baja presión por lo que se le denomina “lado de baja” de las membranas.
3. Concentrado de la ósmosis. También denominado “rechazo” o “salmuera” es la solución con alta concentración en sales, resultado del fenómeno de ósmosis inversa. Esta zona de la membrana trabaja a una presión similar a la de aporte descontando las pérdidas de carga y ensuciamiento de las membranas.

Y (%) Conversión. También denominado factor de conversión o porcentaje de recuperación. Es la relación porcentual entre el caudal de permeado y el caudal de agua de entrada al proceso de ósmosis inversa:

$$Y(\%) = \frac{Q_2}{Q_1} * 100$$

Donde:

Q: Caudal (m3/h)

F: Flujo de permeado. Es el caudal de permeado por unidad de superficie de membrana. Es un parámetro básico a la hora de diseñar un proceso de ósmosis inversa. Sus unidades habituales son l/m2/h aunque por simplificación en bibliografía se puede encontrar como lmh. También es común encontrarlo en bibliografía anglosajona como gmd (galones/m2/día)

Ps: Porcentaje de paso de sales. Las membranas de ósmosis inversa dejan pasar a través de la misma una pequeña cantidad de sales. El Ps es la relación porcentual entre la concentración de sales en el permeado y la concentración de sales en el agua de entrada a la ósmosis:

$$P_s(\%) = \frac{C_2}{C_1} * 100$$

Dónde:

C₁: Concentración de sales en la entrada a la OI (mg/l o cualquier otra unidad de concentración)

C₂: Concentración de sales en el permeado (mg/l o cualquier otra unidad de concentración)

Rs: Porcentaje de rechazo de sales. Es la relación porcentual entre la concentración de sales en la salmuera y la concentración de sales en el agua de entrada a la ósmosis.

$$R_s(\%) = \frac{C_3}{C_1} * 100 = \frac{C_2 - C_1}{C_1} * 100$$

Dónde:

C₃: Concentración de sales en la salmuera (mg/l o cualquier otra unidad de concentración)

4.1. Membranas de ósmosis inversa:

Las membranas de ósmosis inversa se pueden clasificar en diferentes grupos dependiendo de su composición química y naturaleza. Desde un punto de vista industrial, existen distintas

configuraciones dependiendo de la forma y como se realiza la empaquetadura para convertirla en una unidad de proceso que maximice el flujo de agua y el rechazo de sales. [56][57]

Dependiendo de la composición química se pueden clasificar en:

- **Orgánicas**
 - ✓ Acetato de celulosa [58][59]
 - ✓ Poliamidas aromáticas [60][61][62]
 - ✓ Otras (Polietilamina, polihidroxietil metacrilato, polifurano sulfonado, Poliacrilonitrilo, Polibencimidazola, Polisulfona) [29]
- **Inorgánicas**

Las membranas orgánicas están fabricadas con un polímero o copolímero orgánico. Las más utilizadas se obtienen a partir poliamidas aromáticas o acetato de celulosa. [63]

La primera membrana semipermeable asimétrica de ósmosis inversa se obtuvo a partir de una mezcla de acetatos de celulosa. El acetato de celulosa se obtiene a partir de la celulosa de la madera o el algodón, tratándola posteriormente hasta obtener las características de permeabilidad y rechazo de sales adecuadas.

A partir de este material se desarrolló el triacetato de celulosa que permite trabajar en una gama más amplia de pH.

Las membranas de poliamida aromática están basadas en dos polímeros de características similares: poliéter-urea y poliamida aromática lineal. Estas membranas tienen una alta estabilidad química, alto porcentaje de rechazo de sales, no biodegradabilidad y presiones de trabajo reducidas. Como inconveniente, son muy sensibles a oxidantes y tienen posibilidad de ensuciamiento y desarrollo biológico.

Las membranas inorgánicas tienen dos inconvenientes que limitan su campo de aplicación: la resistencia a la temperatura y la estabilidad química. Los materiales utilizados o en investigación son cerámicos, vidrio, fosfocenos y carbonos.

Dependiendo de la naturaleza se pueden clasificar en:

- Integrales (también denominadas asimétricas) [55]
- Compuestas de capa fina [64]

Las membranas están fabricadas con una capa activa y una capa soporte porosa. En el caso de las membranas integrales, el material de ambas capas es el mismo polímero y tienen la misma composición química y la única diferencia es la porosidad de cada capa. El espesor de la capa activa es del orden de 0,25 micras y el de la capa soporte de 99,75 micras.

Las membranas compuestas de capa fina (TFC – Thin Film Composite en bibliografía anglosajona) se pueden considerar como un avance tecnológico de las membranas integrales. En estas membranas, la capa activa y el material soporte están fabricadas con materiales diferentes. La membrana tiene tres capas: la capa superior o capa activa, una capa intermedia que hace de soporte de la capa activa y una capa inferior que le confiere resistencia mecánica a la membrana.

Estas membranas tienen una serie de ventajas que las hacen muy interesantes para distintas aplicaciones. Cada capa puede diseñarse y fabricarse por separado, lo cual permite variar tanto el espesor como la porosidad de la capa activa, y en consecuencia el porcentaje de rechazo de sales y el flujo de permeado.

Dependiendo de la configuración de la membrana se pueden clasificar en [52][55]:

- Plato-marco
- Tubular
- Fibra hueca
- Arrollamiento espiral

Las primeras membranas de ósmosis tenían una configuración plato-marco o tubular. Consistían en membranas con forma de lámina plana de distintas formas geométricas o membranas en forma de tubo hueco.

Las membranas de fibra hueca tienen el aspecto de un cabello humano, y se componen de una capa activa muy densa en la parte exterior y una estructura soporte porosa en la parte interior. Estas membranas son del tipo integral, es decir, con el mismo material en la capa activa y en la capa soporte. Este tipo de membranas se agrupan dentro de recipientes a presión por los que circula el agua bruta a presión; por el interior de las membranas circula el permeado.

Las membranas con una configuración de arrollamiento espiral son las más utilizadas en la actualidad. Se fabrican de manera que se colocan dos láminas enfrentadas y opuestas entre sí con un espaciador entre medias que actúa como un canal para que circule el permeado por él. Tres de los cuatro extremos de esta lámina se sellan y el último se conecta a un tubo que recoge el permeado. Alrededor de este tubo de permeado se enrolla el conjunto de láminas unido a otro espaciador en forma de red plástica que sirve como canal de entrada de agua de mar. Este arrollamiento es lo que forma la espiral. Todo el conjunto se completa con unas piezas plásticas en los extremos y se cubre exteriormente con un recubrimiento de epoxy-fibra de vidrio que asegura el elemento.



Figura 66: MEMBRANA DE ARROLLAMIENTO ESPIRAL [21]

4.2. Agrupación de membranas

Las membranas de ósmosis inversa habitualmente no trabajan por separado, sino que se agrupan entre ellas en dos posibles configuraciones:

- Agrupación en serie
- Agrupación en paralelo

Cuando las membranas se agrupan en serie (figura 67), el caudal de rechazo de la primera membrana pasa a ser el caudal de alimentación de la siguiente membrana, y así sucesivamente. El permeado de cada una de las membranas se recoge en un tubo común a todas ellas, y en él se produce una mezcla.

Las membranas espirales actuales trabajan con unas conversiones máximas del 13% por lo que, si se pretende diseñar con conversiones superiores, es necesario agrupar membranas en serie.

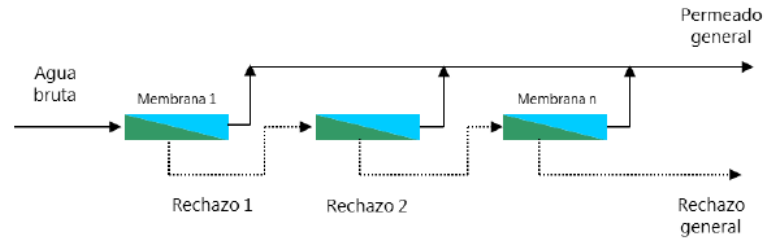


Figura 67: AGRUPACIÓN DE MEMBRANAS EN SERIE

Cuando las membranas se agrupan en paralelo (figura 68), el caudal de rechazo de cada membrana se recoge en un tubo común y de la misma manera, el caudal de permeado de cada membrana se recoge en otro tubo común. Con esta configuración, se consigue aumentar el caudal de producción de un sistema de membranas de ósmosis inversa.

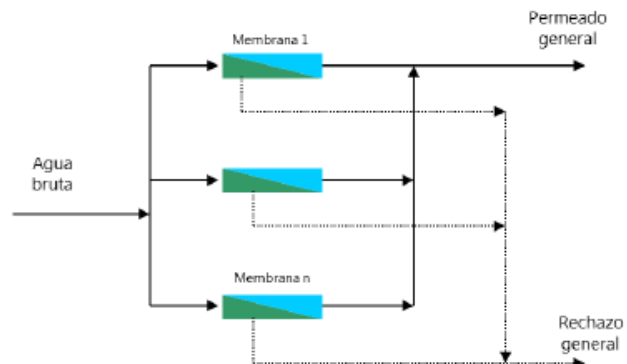


Figura 68: AGRUPACIÓN DE MEMBRANAS EN PARALELO

4.3. Esquema básico de un proceso de ósmosis inversa

Desde un punto de vista industrial, a la hora de diseñar un proceso de ósmosis inversa interesa aumentar la conversión y el caudal de permeado, por lo que la mayoría de los diseños están basados en una mezcla de agrupaciones de membranas en serie, en el interior de tubos de presión, que a su vez se agrupan entre sí en paralelo formando lo que se denomina un rack de ósmosis inversa.

Estos tubos están compuestos de una entrada y dos salidas:

- La entrada es agua de mar con una presión superior a la presión osmótica. Esta presión es aportada por una bomba de alta presión.
- La salida 1, es el permeado del proceso con una concentración muy baja en sales. La presión de este fluido es muy baja.
- La salida 2 es el rechazo del proceso con una concentración muy alta en sales. La presión de este fluido es similar a la presión de entrada, descontando las pérdidas de carga producidas en el circuito. En plantas industriales, el diseño más habitual de procesos de ósmosis inversa de agua de mar se realiza con 6, 7 u 8 membranas en el interior de cada tubo de presión.

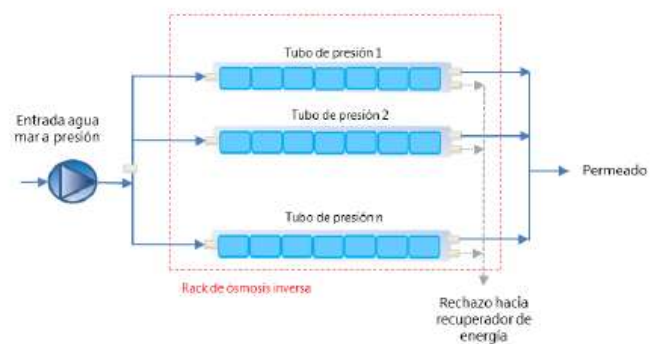


Figura 69: ESQUEMA BÁSICO DE UN RACK DE ÓSMOSIS INVERSA DE AGUA DE MAR

4.4. Concepto de etapa y de paso:

Etapa y paso son dos conceptos muy utilizados a la hora de diseñar un proceso de desalación de agua de mar por ósmosis inversa a nivel industrial. [65][66]

4.4.1. Etapa:

Hace referencia al tratamiento del rechazo, de manera que en un proceso con N etapas, el rechazo de la primera etapa alimenta la segunda etapa; el rechazo de la segunda alimenta a la tercera etapa y así sucesivamente hasta la etapa N. El permeado de cada una de las etapas se recoge en un colector común (figura 70) De este modo, se

logra aumentar la conversión de todo el sistema, aunque la alimentación de cada una de las sucesivas etapas tiene una salinidad superior y por tanto es necesaria una mayor presión para superar la presión osmótica de la solución. Por esta razón, es habitual la instalación de bombas elevadoras de presión (en bibliografía anglosajona bomba “booster”) entre cada una de las etapas.

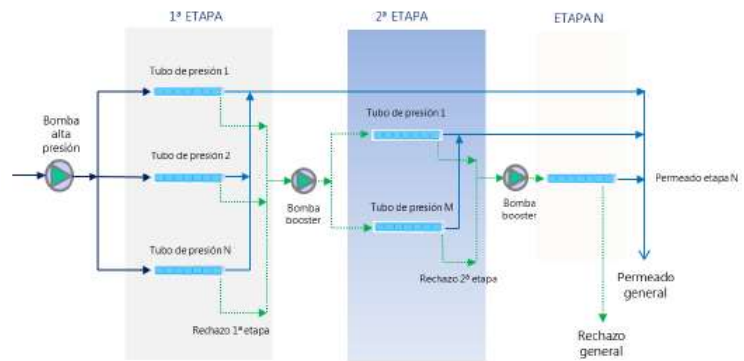


Figura 70: PROCESO DE ÓSMOSIS INVERSA EN N ETAPAS

4.4.2. Paso:

Hace referencia al tratamiento del permeado, de manera que, en un proceso con N pasos, el permeado del primer paso alimenta el segundo; el permeado del segundo alimentaría el tercero y así sucesivamente hasta el paso N (figura 71). De este modo, se logra mejorar la calidad de agua tratada. El permeado de un proceso de ósmosis tiene una presión muy baja por lo que es necesario realizar un bombeo cada vez que pasamos de un paso a otro.

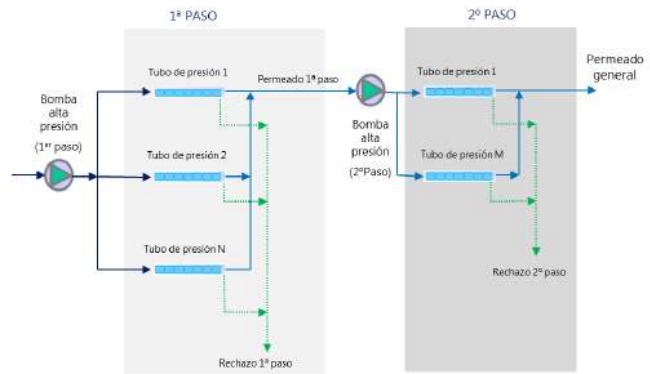


Figura 71: PROCESO DE ÓSMOSIS INVERSA EN 2 PASOS.

En la práctica, en procesos con agua mar es difícil encontrar más de dos pasos, debido a que la salinidad después de un segundo paso es muy baja.

En este caso el rechazo de cada uno de los pasos tiene una concentración de sales muy diferente. El primer paso tiene una concentración muy elevada, al contrario que el resto de los pasos, los cuales tienen una concentración muy baja, por lo que el rechazo del primer paso se envía a un equipo recuperador de energía o directamente al colector de salida de salmuera y el rechazo del resto de pasos se puede recircular a cabeza de la instalación o directamente al colector de salmuera.

4.5. Influencia de distintos factores en el rechazo de sales

En un proceso de desalación por ósmosis inversa, el agua bruta es agua de mar de alta salinidad (normalmente entre 30.000 y 40.000 mg/l) y el agua tratada es agua dulce de muy baja salinidad (menor de 1.000 mg/l) con lo cual es importante obtener el máximo rechazo de sales en el proceso de desalación.

A continuación, se muestra la influencia que tienen en el rechazo de sales los siguientes parámetros:

- Temperatura
- Salinidad del agua de entrada
- Presión
- Conversión del sistema

Un aumento de la temperatura, con el resto de los parámetros constantes, hace que se reduzca el rechazo de sales, y por tanto, se obtiene un agua con peor calidad, entendiendo en este caso como peor calidad un aumento de la concentración de sales.

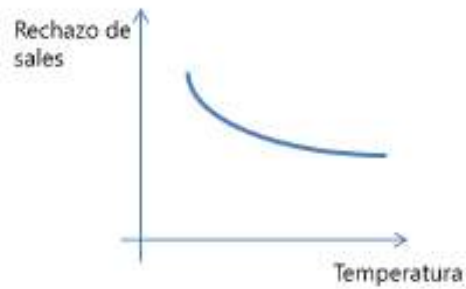


Figura 72: INFLUENCIA DE LA T° EN EL RECHAZO DE SALES DE UNA MEMBRANA

Un aumento de la salinidad del agua bruta provoca una reducción del rechazo de sales tal y como se ve en la figura siguiente:



Figura 73: INFLUENCIA DE LA SALINIDAD DE ENTRADA EN EL RECHAZO DE SALES DE UNA MEMBRANA

Al aumentar la presión efectiva de alimentación a las membranas, aumenta el rechazo de sales y por tanto se obtiene un agua de menor salinidad.

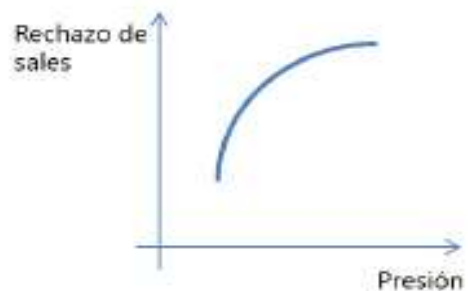


Figura 74: INFLUENCIA DE LA PRESIÓN DE ENTRADA EN EL RECHAZO DE SALES DE UNA MEMBRANA

Al aumentar la conversión el rechazo de sales decrece ligeramente hasta llegar a un punto en el cual la presión osmótica del rechazo es tan alta como la presión de alimentación a las membranas; al llegar a ese punto el rechazo de sales disminuye de una manera brusca y se para el proceso.

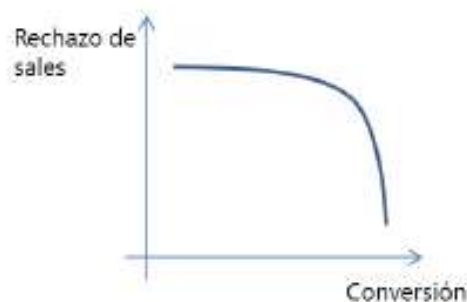


Figura 75: INFLUENCIA DE LA CONVERSIÓN EN EL RECHAZO DE SALES DE LA MEMBRANA

El proceso de ósmosis inversa es el encargado de eliminar las sales disueltas que contiene el agua bruta. Tiene dos flujos de salida: por un lado, el permeado que se envía al postratamiento y por otro lado el rechazo, que sale de la planta desaladora a través del sistema de evacuación de salmuera.

5. Post tratamiento

El postratamiento de una desaladora es necesario debido a que el permeado de la ósmosis inversa tiene un pH ácido y un comportamiento agresivo, por lo que es necesario realizar una dosificación de CO₂ y de un compuesto que contenga calcio para incrementar el pH del agua y que este sea lo más próximo al pH de saturación, o lo que es lo mismo, que tenga un índice de Langelier lo más cercano a cero, lo cual quiere decir que el agua tratada no es ni agresiva ni incrustante. [83] [84] [85]

El sistema de evacuación de salmuera está compuesto por la conducción o conducciones desde el rechazo de las membranas de ósmosis inversa hasta el mar. Antes de su vertido, es normal que disponga de una serie de difusores cuya misión es asegurar una buena mezcla con el agua del mar y así mantener el ecosistema marino. [86][87][88]

El tratamiento de fangos y efluentes está compuesto de diferentes procesos en los cuales se concentra el residuo extraído del pretratamiento y postratamiento antes de su envío al destino final, que en muchas ocasiones es un vertedero.

Para completar la descripción de una planta desaladora típica es necesario añadir toda la obra civil de la misma, los equipos eléctricos que alimentan cada una de las máquinas de la instalación, y el sistema de control que se encarga del funcionamiento de esta.

El tamaño del postratamiento es independiente de la conversión del proceso de ósmosis inversa, pero para el resto de los procesos, tiene una influencia muy grande.

- El postratamiento consiste, habitualmente, en una remineralización del agua osmostizada a la cual se le añade principalmente dióxido de carbono y un reactivo que contenga calcio, como dióxido de calcio o calcita.
- En el tratamiento de fangos, se dosifica un coagulante y un polielectrolito para mejorar el rendimiento del proceso.

Un aumento de la conversión conlleva una reducción del tamaño los siguientes procesos:

- Captación del agua de mar
- Pretratamiento
- Acondicionamiento químico
- Sistema de rechazo de salmuera
- Tratamiento de fangos y efluentes

La figura 2.36 y la tabla 2.4 muestran a modo de ejemplo la influencia que tiene pasar de una conversión del 45% a una conversión del 60% en el diseño de una instalación que produce 100 m³/d. El diseño del pretratamiento con una conversión del 60% es un 25% menor que si se realiza el diseño con una conversión del 45%

6. Instrumentos de campo.

6.1. Transmisores:

Si bien los sensores miden variables, estas no necesariamente van a mostrar el resultado medido de forma directa. Muchos sensores tienen retardos o no linealidades dependiendo del rango de operación o variable a medir.

Los sensores pueden presentar comportamientos lineales, logarítmicos, exponenciales o potenciales (Figura 76).

Sin embargo, la mayoría de los sensores utilizados en el campo industrial presentan un rango de operación lineal en el cual se recomienda trabajar.

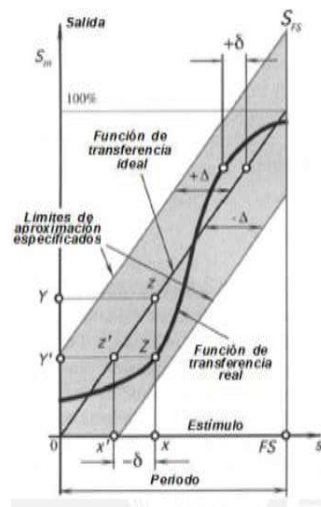


Figura 76: COMPORTAMIENTO REAL E IDEAL DE UN SENSOR

Para entender el funcionamiento de un dispositivo de campo (sensor o actuador), se puede realizar el modelamiento mediante ecuaciones matemáticas o mediante datos. Cada método tiene ventajas y desventajas; sin embargo, la forma más sencilla de realizar el modelamiento de un sensor es por medio de datos y asociación a una función (ver Figura 77).

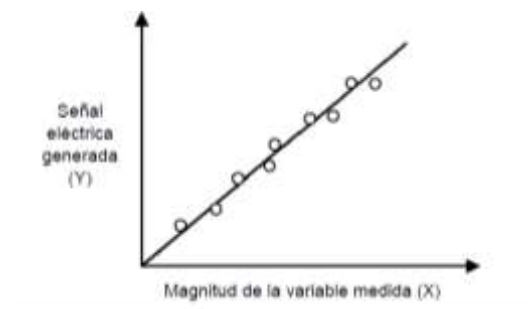


Figura 77: RELACIÓN DE MEDIDAS PARA LA ASOCIACIÓN A UNA FUNCIÓN

Si se realizan pruebas con el mismo sensor sujeto a diferentes condiciones, las medidas presentadas no siempre van a ser las mismas, pues la influencia de interferencia electromagnética, temperatura u otra variable desconocida,

puede afectar el desempeño del sensor, como se muestra en la Figura 78.

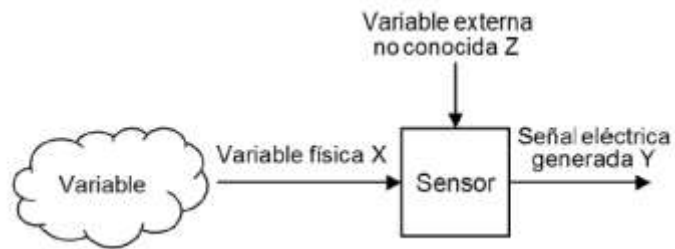


Figura 78: MEDICIÓN DE UNA VARIABLE POR UN SENSOR

Algunas características estáticas de los sensores se mencionan a continuación:

Rango de entrada: El mínimo y máximo valor de la variable física a medir.

Rango de salida: El mínimo y máximo valor que entrega el sensor. Este valor normalmente trabaja bajo un estándar, dentro de los más conocidos se tiene:

Rango de 0 – 20mA.

Rango de 4 – 20mA.

Rango de -10 – 10V.

Rango de 0 – 10V.

Rango de 0 – 5V.

Sensibilidad: Es la capacidad que tiene el sensor para detectar una variación en la variable medida.

Linealidad: El acercamiento que tiene un sensor a comportarse como una recta.

Monotonidad: Es la relación que existe entre la variable medida y la señal eléctrica generada. Si se incrementa el valor de la variable, entonces se incrementa la señal eléctrica generada y viceversa.

Histéresis: Se refiere a la diferencia de dos valores de señal eléctrica generada para una misma magnitud medida, dependiendo de la trayectoria (crecimiento o decrecimiento). Este comportamiento normalmente se presenta en materiales ferromagnéticos.

A pesar de que los sensores presentan comportamiento no lineal (en el mundo todas las variables tienen un grado de no

linealidad), estos se suelen considerar como lineales, de manera que pueden ser representados por una ecuación diferencial lineal (2.6). En la práctica los sensores se representan como un sistema de orden cero, primer orden y segundo orden, ya que es muy raro encontrar sistemas de orden superior.

$$a_k \frac{d^k y(t)}{dt^k} + \dots + a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{d^1 y(t)}{dt^1} + a_0 y(t) = x(t)$$

Se debe entender que los sensores son estudiados como sistemas causales; es decir, las condiciones iniciales de operación son cero.

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación 2.6, se obtiene:

$$L\{a_k \frac{d^k y(t)}{dt^k} + \dots + a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t)\} = L\{x(t)\}$$

$$L(a_k s^k + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + a_0)Y(s) = X(s)$$

$$G(s) = \frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{1}{a_k s^k + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$$

La ubicación de los polos de la ecuación (2.7), en el plano imaginario, permite conocer el comportamiento dinámico del sensor. Este comportamiento dinámico puede ser estable, oscilatorio, integral (positivo o negativo) o inestable, como se muestra en la Figura 79.

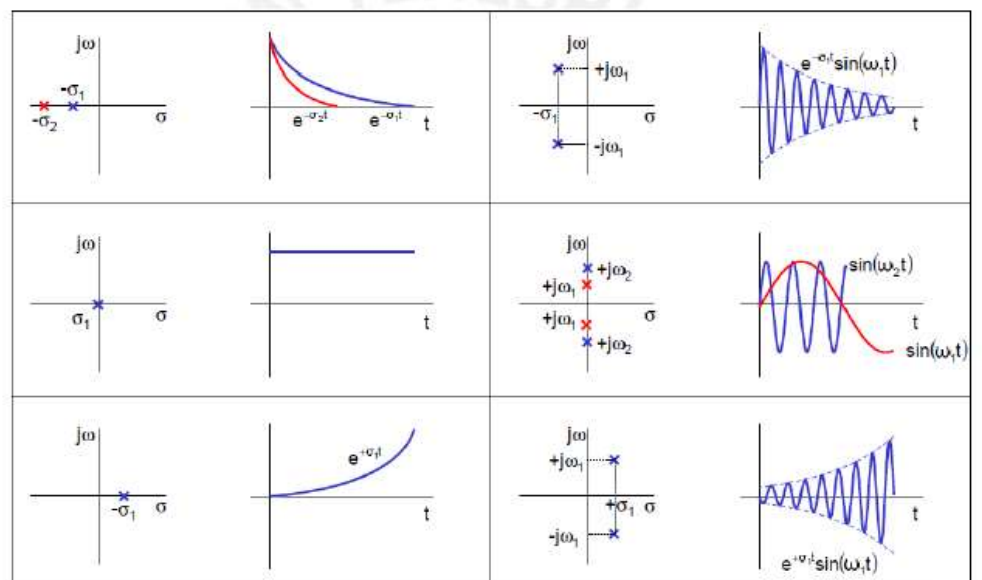


Figura 79: POSIBLE COMPORTAMIENTO DEL SENSOR DE ACUERDO CON LA UBICACIÓN DE SUS POLOS EN EL PLANO IMAGINARIO

De acuerdo con las características mencionadas en los manuales de los transmisores con los que se trabaja, todos los

sensores presentan rangos de linealidad y funciones de compensación interna por efecto de la temperatura sobre la variable medida. Por esta razón todos los sensores se consideran de orden cero (ecuación 2.8) o de primer orden (ecuación 2.9), dependiendo de la existencia de retardo en la medición y generación de señal eléctrica.

$$G(s) = \frac{X(s)}{Y(s)} = K$$

$$G(s) = \frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{1}{a_1s + a_0} = \frac{K}{ts + 1}$$

Donde:

K: Ganancia estática que viene de la relación de la magnitud de la variable medida y la magnitud de la señal generada.

τ : Es la constante de tiempo, indicada por el fabricante, la cual determina la dinámica del sistema.

Para hallar ganancia K en los transmisores en estudio, se debe tener en cuenta la ecuación de la recta generada de la Figura 80.

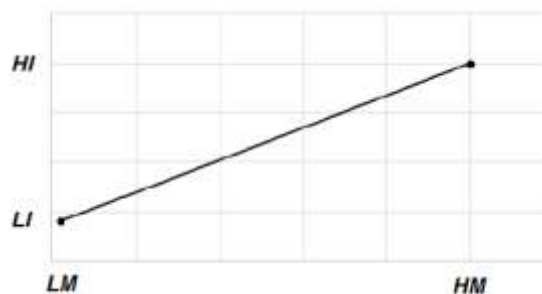


Figura 80: RELACIÓN DE GANANCIA DEL TRANSMISOR

Donde:

LM: Medida mínima del transmisor

HM: Medida máxima del transmisor

LI: Mínima salida del transmisor

HI: Máxima salida del transmisor

Con estos datos se puede calcular la ganancia del transmisor, y por ende, la función de transferencia del transmisor:

$$S = \frac{m(M - LM)}{ts + 1} + LI$$

Donde:

I: Señal de salida del transmisor

M: Variable medida por el transmisor

m: pendiente de la recta:

$$m = \frac{HI - LI}{HM - LM}$$

Con la función de transferencia (ecuación 2.10), se desarrolla un diagrama de bloques (ver Figura 81) en Simulink, con el cual se van a realizar las simulaciones de las funciones de transferencia de los transmisores para validarlos.

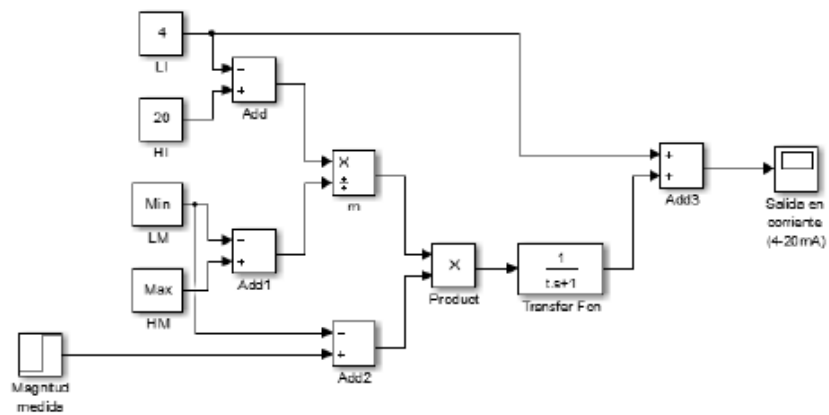


Figura 81: DIAGRAMA DE BLOQUES PARA TRANSMISORES EN SIMULINK

6.1.1. Transmisor de flujo de la planta desalinizadora piloto

Este dispositivo es un flujómetro electromagnético que consiste en un sensor y un transmisor, el cual mide el flujo de un líquido conductivo que pasa a través de un campo magnético (ver Figura 81).

La ley de inducción de Faraday afirma que el desplazamiento de una barra conductora, a través de un campo magnético, induce una tensión eléctrica. Este principio de dínamo rige también la forma en que funcionan los flujómetros electromagnéticos.

Cuando las partículas cargadas eléctricamente atraviesan el campo magnético generado por dos bobinas, se induce una tensión eléctrica. Esta tensión inducida, que se toma entre dos electrodos de medición, es directamente proporcional a la velocidad del flujo y, por consiguiente, al flujo volumétrico (Rossemount, 2011).

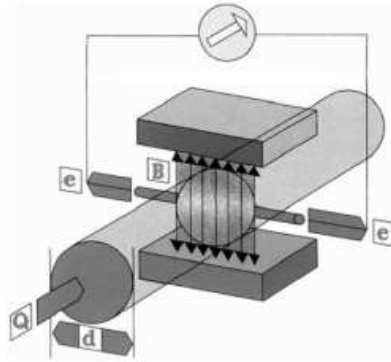


Figura 82: PRINCIPIO DE MEDICIÓN DEL FLUJÓMETRO ELECTROMAGNÉTICO

De acuerdo con la Figura 79 se llega a producir una relación entre el flujo que atraviesa el campo magnético y la corriente medida por los electrodos mediante la siguiente ecuación:

$$e = kBQd$$

Donde:

- e: emf generada en los electrodos (V).
- k: Constante de medición.
- B: Fuerza del campo magnético (Wb).
- Q: Tasa de flujo volumétrico (m^3/s).
- d: Espacio entre los electrodos (m).

El campo magnético se genera mediante una corriente continua pulsante de polaridad alterna para asegurar la estabilidad del punto cero y conseguir que la medición sea insensible a líquidos no homogéneos o con varias fases y, asimismo, pueda efectuarse en líquidos de baja conductividad ($> 5\mu s/cm$).

De acuerdo con el manual de referencia 00809-0100-4662, Rev DA (Rossemount, 2011) este instrumento tiene las siguientes características:

- Máximo tiempo de respuesta: 50ms.
- Señal de salida: 4 – 20mA.

- Magnitud medida: 3.529 – 141.15l/m.

Luego, tomando como referencia la ecuación (2.10), se determina la función de transferencia para este transmisor:

$$G(s) = \frac{0.1163}{0.05s + 1} + 4$$

Al realizar una simulación de la función de transferencia del transmisor, en Matlab, se obtiene la respuesta mostrada Figura 83.

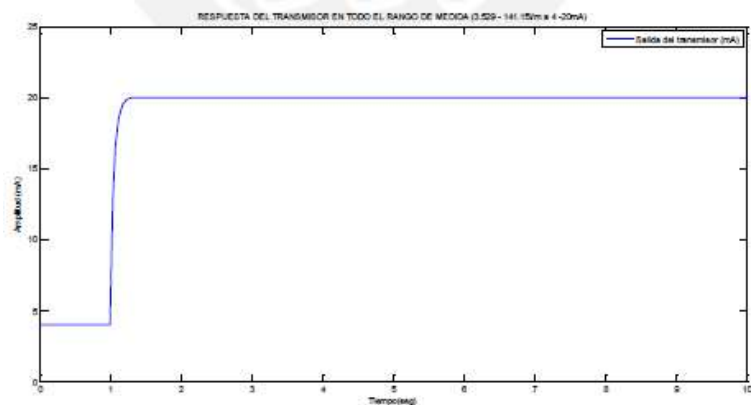


Figura 83: RESPUESTA DEL TRANSMISOR EN TODO SU RANGO

6.1.2. Transmisor de presión de la planta desalinizadora piloto

Este dispositivo mide la presión haciendo uso de un sensor piezoresistivo, el cual se basa en la medida de la variación de resistencia inducida por la deformación en función de la presión (ver Figura 83).

Una tracción del conductor aumenta la longitud y reduce la superficie de sección con la consecuencia de un aumento en la resistencia eléctrica. Una deformación en el recalcado tiene el efecto contrario (Rossemount, 2013).

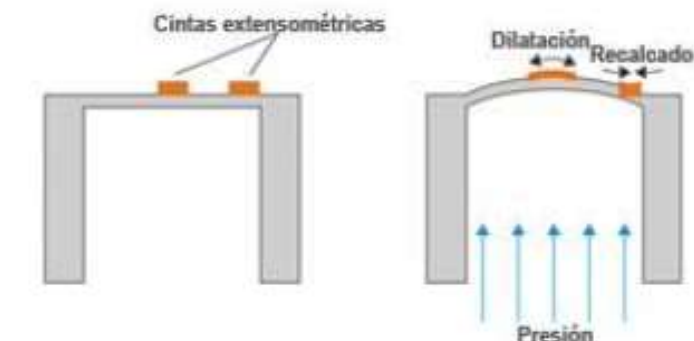


Figura 84: OPERACIÓN DEL SENSOR PIEZORESISTIVO

Para la realización del principio de medición se utiliza un cuerpo base que se deforma de manera controlada al someterle presión. A menudo este cuerpo consiste en una membrana con una cinta semiconductora incorporada en forma de microestructura.

La ecuación que relaciona la resistencia con los cambios en la presión viene dada por la siguiente ecuación:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Donde:

- R: Resistencia eléctrica.
- ρ : Resistencia específica.
- l: Longitud.
- A: Superficie de sección.

Dado que la microestructura no ofrece gran resistencia al contacto de numerosos medios, esta es encapsulada para la mayoría de las aplicaciones, donde la transmisión mediante aceite.

Para los transmisores Rossemount 2051, la presión es aplicada al diafragma. El aceite contrae el sensor y produce una variación de voltaje. Luego, esta señal es tratada por el procesador de señales.

La señal tratada es utilizada por el microprocesador para calcular la salida del transmisor. Finalmente, esta señal es enviada al conversor D/A, el cual vuelve a convertir la señal a analógica y la superpone a la señal HART en la línea de 4 – 20mA, como se muestra en la Figura 85.

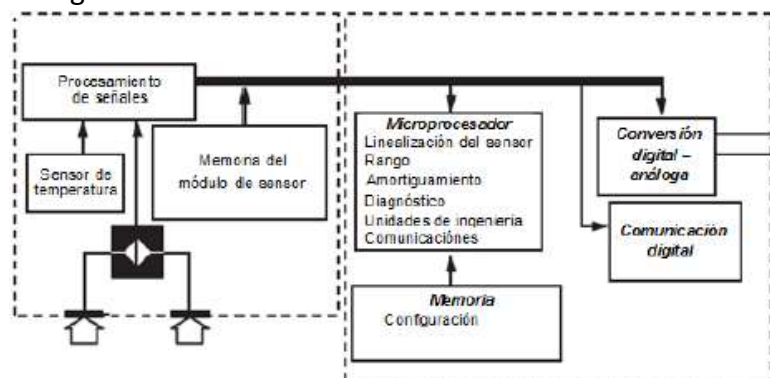


Figura 85: OPERACIÓN DEL TRANSMISOR DE PRESIÓN ROSSEMOUNT 2051 (ROSSEMOUNT, 2013)

De acuerdo con el manual de referencia 00809-0100-4107, Rev BA (Rossemount, 2013) este instrumento tiene las siguientes características:

- Máximo tiempo de respuesta: 160ms.
- Señal de salida: 4 – 20mA.
- Magnitud medida: 0 – 10000psi.

Luego, tomando como referencia la ecuación (2.10), se determina la función de transferencia para este transmisor:

$$G(s) = \frac{0.00160}{0.16s + 1} + 4$$

Al realizar una simulación de la función de transferencia del transmisor, en Matlab, se obtiene la respuesta mostrada en la Figura 86.

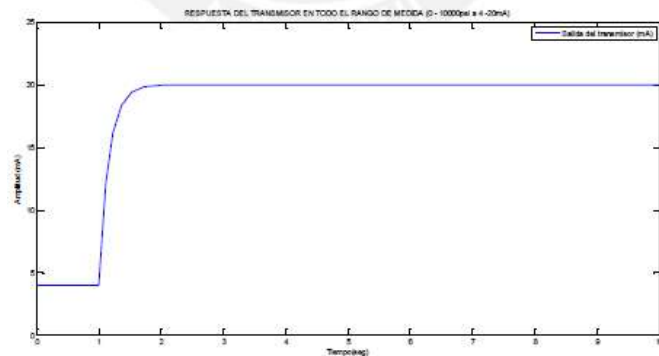


Figura 86: RESPUESTA DEL TRANSMISOR EN TODO SU RANGO

6.1.3. Transmisor de temperatura de la planta desalinizadora piloto

Este dispositivo mide la temperatura haciendo uso de un sensor termo resistivo (RDT) de tipo Pt 100 (ver Figura 87).

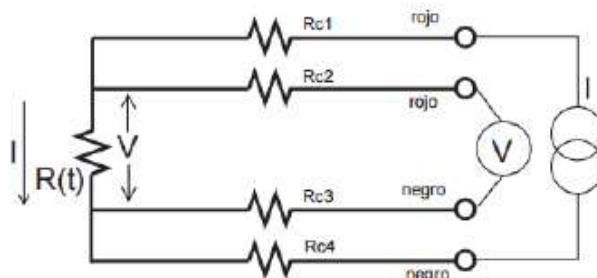


Figura 87: CONEXIÓN A 4 HILOS DE UNA PT100

El Pt100 consiste en un alambre de platino que a 0°C tiene 100ohms de resistencia y que, al aumentar su temperatura, aumenta su resistencia eléctrica. El

instrumento utilizado en este trabajo utiliza un Pt100 en conexión a 4 hilos (Rossemount, 2015).

De acuerdo con el manual de referencia 00809-0200-4728, Rev RA (Rossemount, 2015) este instrumento tiene las siguientes características:

- Máximo tiempo de respuesta: 500ms.
- Señal de salida: 4 – 20mA.
- Magnitud medida: 0 – 100°C.

Luego, tomando como referencia la ecuación (2.10), se determina la función de transferencia para este transmisor:

$$G(s) = \frac{0.160}{0.5s + 1} + 4$$

Al realizar una simulación de la función de transferencia del transmisor, en Matlab, se obtiene la respuesta mostrada en la Figura 88.

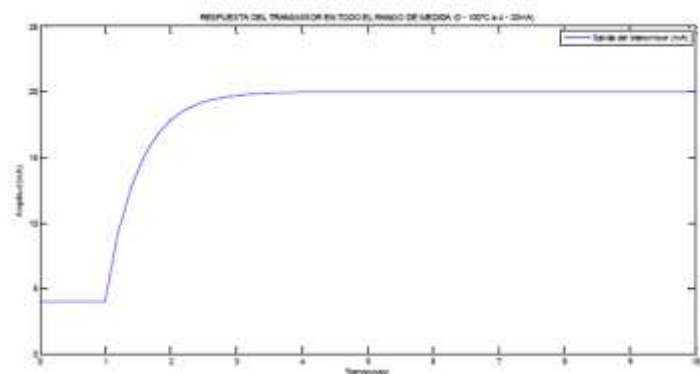


Figura 88: RESPUESTA DEL TRANSMISOR EN TODO SU RANGO

6.1.4. Sensor de PH de la planta desalinizadora piloto:

Este dispositivo utiliza un electrodo de vidrio y un electrodo de referencia para medir el PH. Los dos electrodos vienen montados juntos como se muestra en la Figura 89 (Rossemount, 2014).

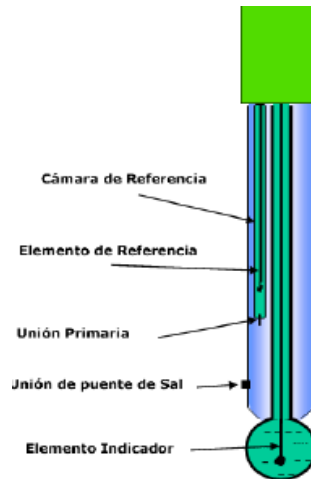


Figura 89: ELECTRODO COMBINADO PARA MEDICIÓN DE PH

El PH se determina midiendo el potencial generado (en milivolts) por el electrodo de vidrio, este potencial se compara con un potencial constante generado por el electrodo de referencia, el cual se encuentra en contacto con el fluido, formando un puente salino.

Este sensor envía la señal medida a un analizador (Rossemount Analytical 1056), el cual realiza una compensación de temperatura mediante un factor de compensación. El analizador también permite enviar la señal por corriente (4 – 20mA) o por protocolo HART.

De acuerdo conl manual de instrucción PN 51-1056, Rev J (Rossemount, 2014) este instrumento tiene las siguientes características:

- Máximo tiempo de respuesta: 5s.
- Señal de salida: 4 – 20mA.
- Magnitud medida: 0 – 14.

Luego, tomando como referencia la ecuación (2.10), se determina la función de transferencia para este transmisor:

$$G(s) = \frac{1.1429}{5s + 1} + 4$$

Al realizar una simulación de la función de transferencia del transmisor, en Matlab, se obtiene la respuesta mostrada en la Figura 90.

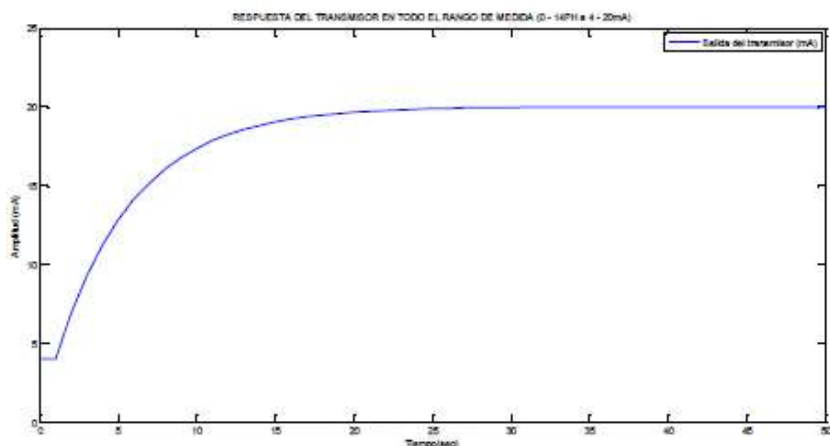


Figura 90: RESPUESTA DEL SENSOR EN TODO SU RANGO

6.1.5. Sensor de Conductividad de la planta desalinizador piloto

Este dispositivo realiza la medida de la conductividad eléctrica del agua haciendo uso de dos electrodos ubicados en forma opuesta. Luego, se aplica una magnitud de voltaje AC, el cual genera una corriente en el medio. Esto hace que los cationes y aniones que contiene el medio se muevan de un electrodo hacia otro, generando un medio conductivo (a mayor cantidad de cationes y aniones, mayor será la corriente generada y viceversa). Ver Figura 91. (Rossemount, 2014).

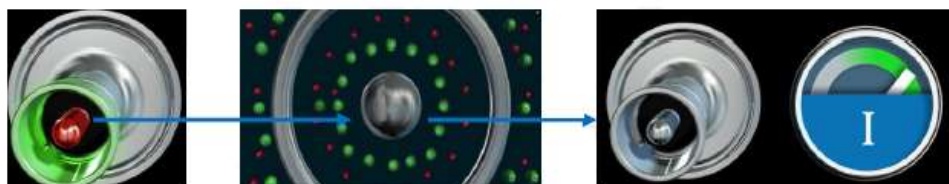


Figura 91: PROCESO DE MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DE UN FLUIDO.

Este sensor envía la señal medida a un analizador (Rossemount Analytical 1056), el cual realiza una compensación de temperatura mediante un factor de compensación. El analizador también permite enviar la señal por corriente (4 – 20mA) o por protocolo HART.

De acuerdo con el manual de instrucción PN 51-1056, Rev J (Rossemount, 2014) este instrumento tiene las siguientes características:

- Máximo tiempo de respuesta: 3s.
- Señal de salida: 4 – 20mA.

- Magnitud medida: 0 – 600mS/cm.

Luego, tomando como referencia la ecuación 10, se determina la función de transferencia para este transmisor:

$$G(s) = \frac{0.0267}{3s + 1} + 4$$

Al realizar una simulación de la función de transferencia del transmisor, en Matlab, se obtiene la respuesta mostrada en la Figura 92.

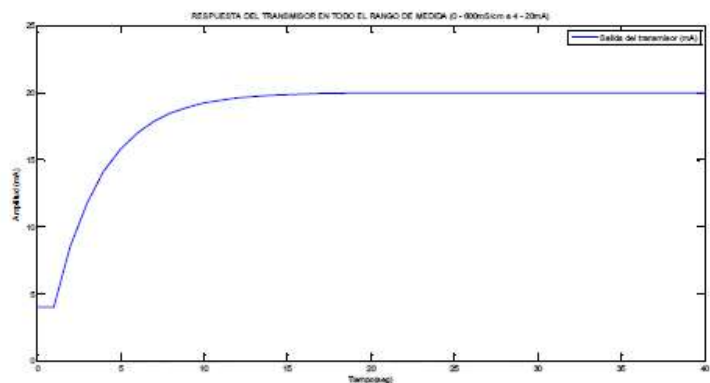


Figura 92: RESPUESTA DEL SENSOR EN TODO SU RANGO

6.2. Actuadores:

6.2.1. Válvulas de control proporcional:

Las válvulas de control proporcional generan una acción de variación de flujo de un fluido mediante la oposición al mismo. Básicamente se componen de dos partes como se muestra en la Figura 93.

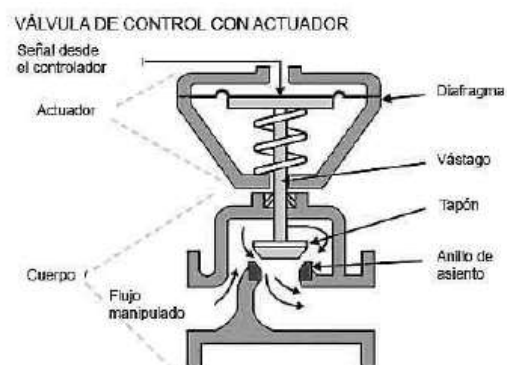


Figura 93: ACTUADOR Y CUERPO DE VÁLVULA

Al producirse un movimiento en el vástago, se produce una diferencia de presión en el cuerpo y, por ende, una variación en el flujo de salida.

La relación directa entre el movimiento del vástago y el flujo de salida se da en base a la dinámica de la válvula, la cual puede ser radical, lineal o isoporcentual (Fisher, 2013), como se muestra en la Figura 94.

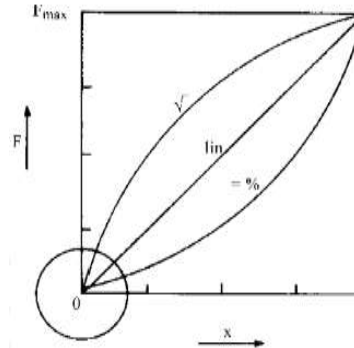


Figura 94: DINÁMICA DE UNA VÁLVULA DE CONTROL PROPORCIONAL

En este trabajo, las dos válvulas en estudio son lineales, por lo que su dinámica se representa mediante la siguiente ecuación:

$$G_v(s) = \frac{K_a K_v}{T_v s + 1}$$

Donde:

- K_a : Ganancia del actuador.
- $K_a = \frac{\text{Rango de variación del desplazamiento del vástago}}{\text{Rango de variación de salida del controlador}}$
- K_v : Ganancia del cuerpo de válvula.
- $K_p = \frac{\text{variación del flujo a la salida de la válvula}}{\text{Rango de variación del desplazamiento del vástago}}$
- T_v : Constante de tiempo de la válvula Dada por el

En la práctica, las válvulas de control proporcional generan una pérdida de presión del fluido que atraviesa el cuerpo de la válvula, por lo que su representación práctica se muestra en la Figura 95.

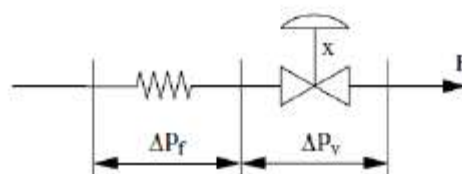


Figura 95: REPRESENTACIÓN PRÁCTICA DE UNA VÁLVULA DE CONTROL

A la pérdida de presión se le denomina resistencia hidráulica (R_H), y relaciona el flujo a una variación de presión mediante la ecuación 20 (Fisher, 2013).

$$\Delta P_f = R_H F$$

Adicionando la ecuación 20 a la ecuación 17, se obtiene la ecuación 21, la cual representa el comportamiento dinámico de una válvula de control proporcional lineal en la práctica:

$$G_V(s) = \frac{K_a K_v}{T_v s + 1} + \frac{1}{R_H}$$

Finalmente, se construye un diagrama de bloques con base en la ecuación (2.21) para realizar simulaciones de las válvulas de control en estudio (ver Figura 96).

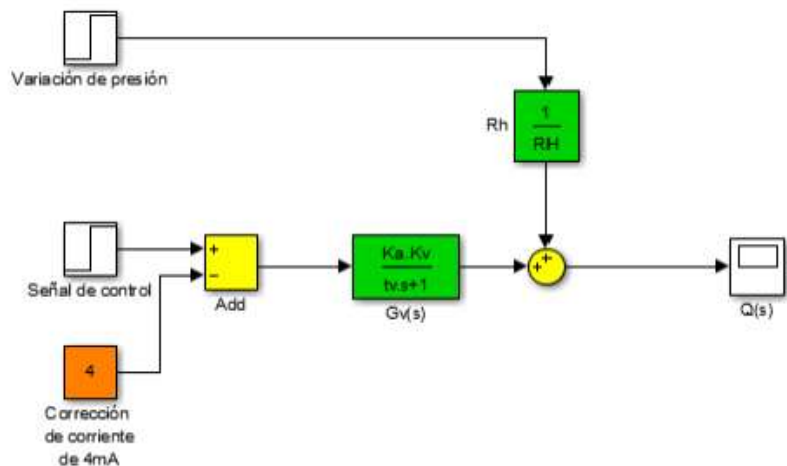


Figura 96: DINÁMICA DE UNA VÁLVULA DE CONTROL PROPORCIONAL LINEAL

6.2.2. Válvula de control proporcional eléctrica de la planta desalinizadora piloto

Esta válvula trabaja en un rango lineal y con control por tiempo de acuerdo con el manual del fabricante (válvula web). Las características se presentan en la tabla

MODELO	VB030	VB060	VB110	VB190	VB270	VB350
TIEMPO DE APERTURA	8	9	27	27	50	50
TORQUE	266	530	975	1680	2390	3100
VOLTAJE HT	100-240VAC					
MAXIMA CORRIENTE HT	0.38-0.25	0.75-038				
MAXIMA POTENCIA HT	38-60VA	75-90VA				
FRECUENCIA	50/60 Hz					
VOLTAJE LT	24V AC/DC					
MAXIMA CORRIENTE LT	1.25	1.25	2.25	2.25	2.25	2.25
MAXIMA POTENCIA LT	30VA	30VA	55VA	55VA	55VA	55VA

Tabla 7: Tipo de válvula y sus características.

Como la válvula se maneja bajo una relación, se debe crear una función que exprese el tiempo con el porcentaje de apertura mediante la gráfica presentada en la Figura 97.

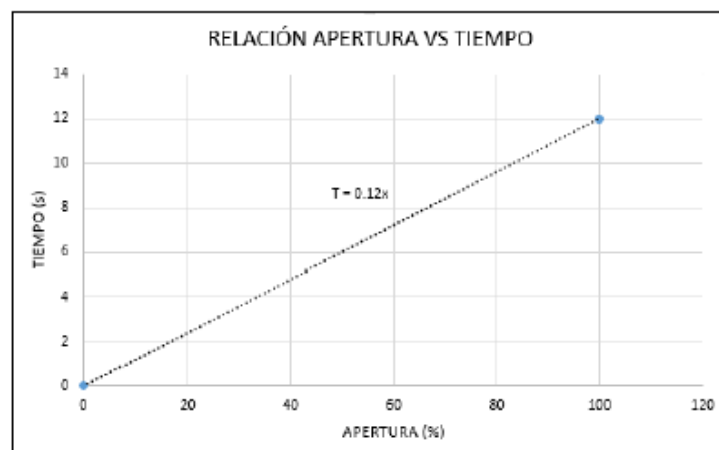


Figura 97: RELACIÓN ENTRE TIEMPO Y PORCENTAJE DE APERTURA

Con la relación de tiempo y porcentaje de apertura se obtiene una ecuación de orden cero, representada por:

$$T = \frac{T_{MAX}}{100\%} SP$$

Donde:

- T: Señal de apertura de la válvula en segundos.
- T_MAX: Tiempo para abrir la válvula al máximo.
- SP: Punto de operación de la válvula.

6.2.3. Válvula de control proporcional neumática de la planta de temperatura piloto

De acuerdo con el manual de referencia 52.124CVF_SVF (Baumann, 2015), la válvula de control proporcional de la planta de temperatura piloto presenta las siguientes características:

- Máximo tiempo de respuesta: 2s.
- Señal de entrada: 4 – 20mA.
- Dimensión del vástago: 12.7mm
- Resistencia hidráulica: 100
- Ganancia del cuerpo de válvula: 8.

Luego, tomando como referencia la ecuación 21, se determina la función de transferencia para este transmisor:

$$G(s) = \frac{6.35}{2s + 1} + \frac{1}{100}$$

Al realizar una simulación de la función de transferencia del transmisor, en Matlab, se obtiene la respuesta mostrada en la Figura 98.

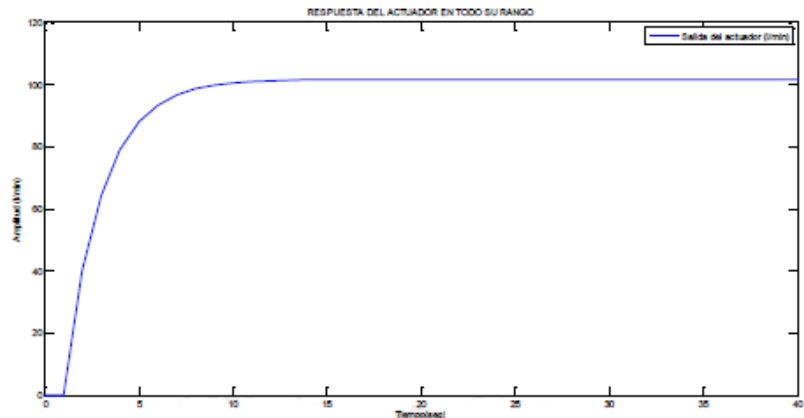


Figura 98: RESPUESTA DEL ACTUADOR EN UNA APERTURA DEL 0 AL 100%

IV. Implementación.

En este capítulo se implementará el sistema necesario para el mejor funcionamiento del sistema de ósmosis inversa.

Deseamos que las condiciones iniciales sean óptimas para una mejor producción de agua potable.

El modelo de estudio se presenta en la Figura 99:

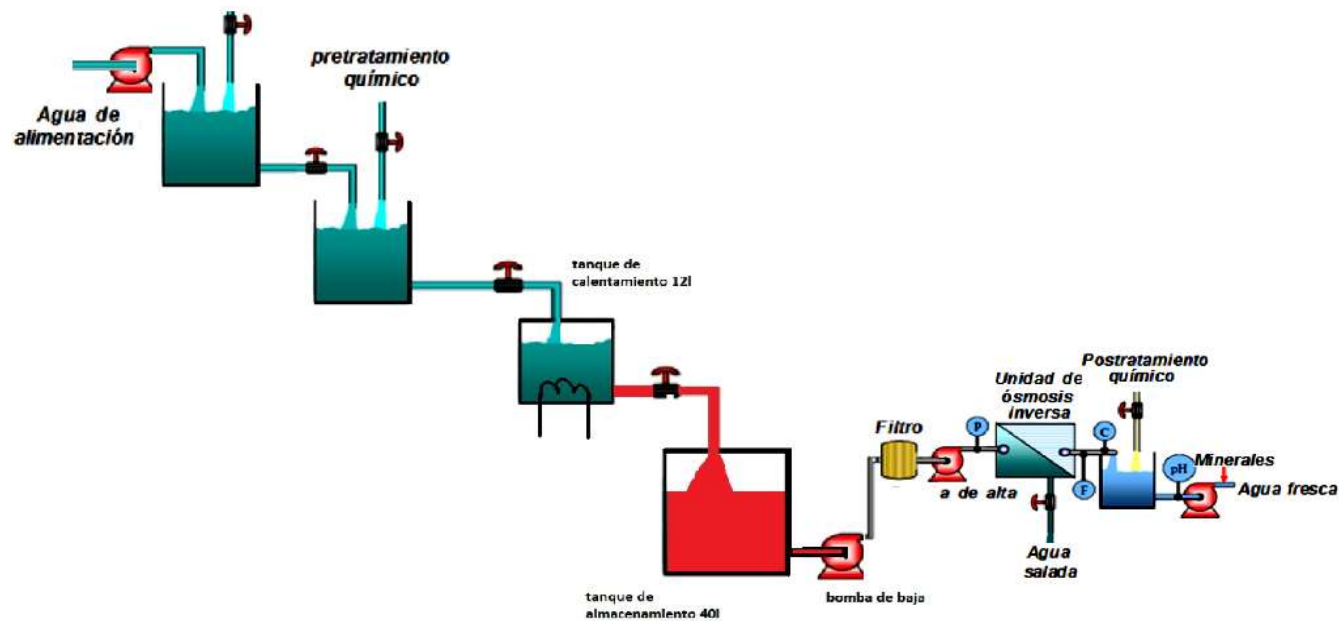


Figura 99: PLANTA DE DESALINIZACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA

El diagrama de la Figura 99. representa, una planta de desalinización de agua de mar por ósmosis inversa.

1. aptación del agua de mar:

En este caso se utilizará un sistema de cantera de captación ya que en este caso la tesis en mención se basa en el Diseño de una planta piloto desalinizadora de agua controlada por un Sistema HMI/SCADA

2. Pretratamiento:

En este caso utilizaremos el sistema de tamizado para separar partículas en suspensión para evitar la obstrucción de tuberías y el daño a la bomba de presión.

Así también un sistema de ultrafiltración retener partículas de 0.001 – 0.1 μm micras en un fluido.

3. Acondicionamiento químico:

De acuerdo con los valores obtenidos la salinidad del mar varía entre 30.000 mg/l y 40.000 mg/l

Las dosis más habituales de los principales reactivos son las siguientes:

Reactivo químico		Dosis (mg/l)
BIOCIDAD	CLORO	0,5-6
REDUCTOR DE CLORO	BISULFATO SODICO	3 - 19
Coagulante	Cloruro Férrico	0,8 -25
Ayudante de Coagulación		0,2 - 4
Ácido Sulfúrico		6,6 - 100
Inhibidores de incrustaciones	Hexametafosfato sodico	2 - 10
	Ácido poli acrílico	2,9
	Fosfatos	1,4

TABLA 8. DOSIS DE REACTIVOS HABITUALES EN UNA DESALADORA POR ÓSMOSIS INVERSA

De acuerdo con las recomendaciones de la OMS y de acuerdo con la normativa española y Europea.

Estos valores son iguales o inferiores a los valores máximos permitidos en la Normativa Española (RD 140/2003), la Normativa Europea (Directiva Europea 98/83 CEE) o los parámetros recomendados por la Organización Mundial de la Salud para aguas de consumo humano.

3.1. PH.

En este caso debemos llegar al PH adecuado pedido por la membrana en este caso 7 si sabemos que el PH del litoral peruano en especial de la zona norte según el Sistema Nacional De Información Ambiental (SINIA), varía entre 7.5 y

8.4 entonces para llegar al PH necesario se realizara el acondicionamiento químico arriba mencionado.

3.2. Temperatura

La temperatura en la costa norte del país varía entre 19°C y 21°C según el Instituto del Mar Peruano (IMARPE) entonces se tendrá que hacer un proceso previo para llegar a 25°C el cual es la temperatura adecuada para el funcionamiento óptimo de la membrana en el sistema de osmosis inversa.

Según lo visto en el capítulo anterior utilizaremos una caja de paso donde está ubicada una resistencia que calentara el agua para llegar a los 25 °C y mantenerlo así para obtener la mejor función de los equipos de osmosis inversa. En este caso utilizaremos un sistema de calefacción de agua con un recipiente donde se almacenará el agua a la temperatura adecuada para que este sistema tenga su mejor utilidad.

Para esto primero debemos obtener la función de transferencia de nuestra caldera.

Si la función de transferencia está dada por la figura 100

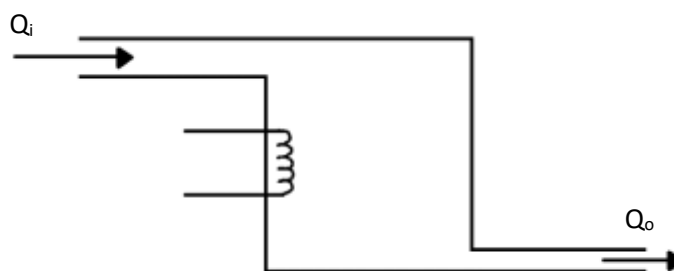


Figura 100: SISTEMA DE CALENTAMIENTO CON RESISTENCIA

Teniendo en cuenta este sistema detallado en el capítulo anterior entonces nuestra función de transferencia será iguala a:

$$T_o(s) = \frac{R}{RCs + 1} Q(s)$$

$$GC_p = \frac{1}{R}$$

$$C = Mc$$

Si G es el flujo del agua de mar tenemos que el flujo que va a necesitar nuestro sistema de osmosis inversa es de 12l/min.

Si el flujo que deseamos está en unidades de kg/s. entonces cambiaremos las unidades:

$$12 \text{ l/min} = 0.0002 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$0.0002 \text{ m}^3/\text{s} = 0.20 \text{ kg/s}$$

Entonces:

$$G = 0.20 \text{ kg/s}$$

Ahora hallaremos el calor específico del agua a 19°C teniendo en cuenta que lo deseamos en (kcal/kg°C):

$$C_p = 4,182 \text{ kJ/K.kg}$$

Si conocemos que:

$$1 \text{ J/K.kg} = 0.00023884 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$$

Entonces pasando el calor específico del agua a 19°C a las unidades necesarias tendremos que:

$$C_p = 0.998 \text{ kcal/}^\circ\text{C.kg}$$

Ahora hallaremos la resistencia térmica en (°C.s/kcal)

$$GC_p = \frac{1}{R}$$

$$R = \frac{1}{GC_p}$$

Al remplazar los valores obtenidos anteriormente obtendremos:

$$R = \frac{1}{0.20 * 0.998}$$

$$R = \frac{1}{0.1996}$$

$$R = 5.010^\circ\text{C.s/kcal}$$

Para hallar C debemos saber la masa que está en kg si la fórmula para hallarlo es:

$$C = MC_p$$

Si la cantidad de agua necesaria es de 12l y esto equivale a 0.012m^3 entonces la masa será igual a:

$$M = \rho V$$

$$M = 998.49 * 0.012$$

$$M = 11.98 \text{ kg}$$

Entonces reemplazando los valores hallados en la ecuación:

$$C = 11.98 * 0.998$$

$$C = 11.96 \text{ kcal}/^\circ\text{C}$$

Ahora reemplazaremos los valores encontrados en nuestra función de transferencia:

$$T_o(s) = \frac{R}{RCs + 1} Q(s)$$

$$T_o(s) = \frac{5.01}{5.01(11.96)s + 1} Q(s)$$

$$T_o(s) = \frac{5.01}{59.92s + 1} Q(s)$$

Para nuestro PI por cancelación de polos tenemos que:

$$P(s) = \frac{5.01}{59.92s + 1} \text{ y } C(s) = \frac{K_c(T_i s + 1)}{T_i s}$$

Si el $T_i=59.92$ entonces reemplazamos en $C(s)$:

$$C(s) = \frac{K_c(59.92s + 1)}{59.92s}$$

Para $H(s)$ reemplazamos:

$$H(s) = \frac{1}{\frac{59.92}{5.01K_c}s + 1}$$

De la ecuación anterior podemos obtener:

$$\tau_d = \frac{59.92}{5.01K_c}$$

Si:

$$\tau_d = 0.25$$

En la ecuación anterior reemplazamos:

$$K_c = \frac{59.92}{5.01\tau_d} = \frac{59.92}{5.01 * 0.25}$$

$$K_c = 47.84$$

Entonces el C_s es igual a:

$$C(s) = \frac{47.84(59.92s + 1)}{59.92s}$$

$$C(s) = \frac{59.92s + 1}{1.25s}$$

4. Osmosis Inversa:

En esta tesis el sistema de osmosis inversa no será necesario conocer su funcionamiento ya que es un sistema conocido y muy bien estudiado y el objetivo de esta tesis es el óptimo funcionamiento para ello es necesario solo conocer el caudal de entrada para hacer los cálculos necesarios para el sistema de post-tratamiento.

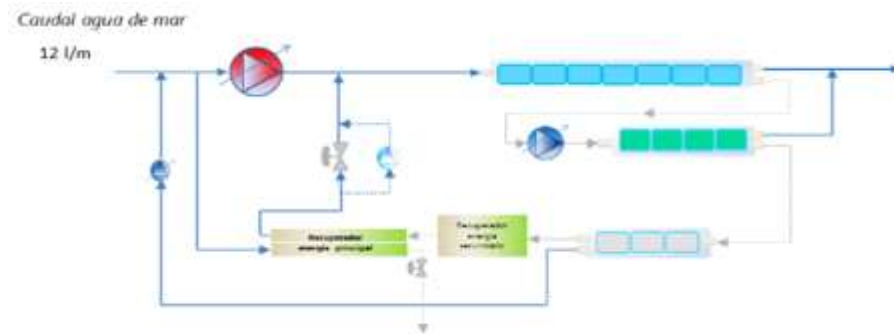


Figura 101: SISTEMA ÓSMOSIS INVERSA

4.1. Membrana de osmosis inversa:

En este caso utilizaremos la membrana de tipo arrollamiento espiral, esta membrana tiene las siguientes características:

- PH: 7
- Temperatura: 25°C
- Presión: 35 bar.

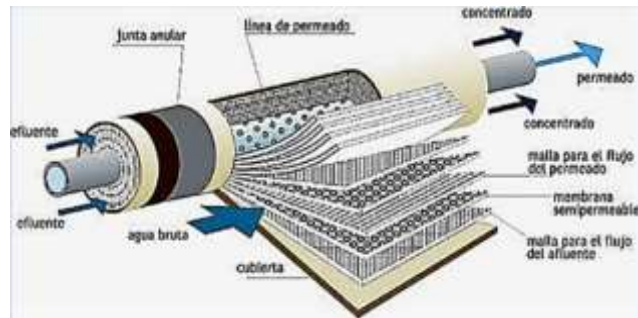


Figura 102: MEMBRABA PARA EL SISTEMA DE OSMOSIS INVERSA

4.2. Agrupación de membranas:

En este caso utilizaremos membranas en serie para mejorar el rendimiento del sistema.

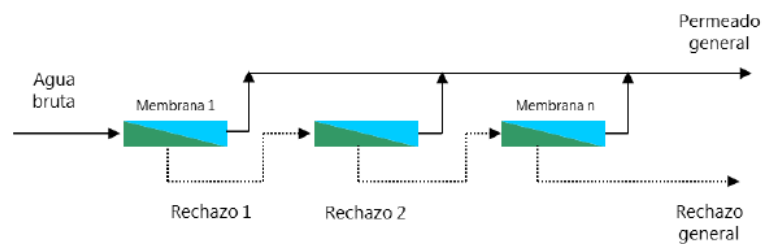


Figura 103: AGRUPACIÓN DE MEMBRANAS EN SERIE

5. Post tratamiento:

En este caso se verifica el PH del agua antes de ser distribuido.

6. Instrumentos en campo:

6.1. Transmisores.

En este caso utilizaremos el siguiente equipo que mide varios parámetros y ello nos ayudara a saber cuándo actuar.



Figura 104: MEDIDOR MULTI PARAMÉTRICO DE CALIDAD DE AGUA. U53G

Medidor multi paramétrico de calidad de agua. U53G

Mide 11 parámetros: pH, ORP (Potencial de Oxidación Reducción), Oxígeno Disuelto, Conductividad, Salinidad, TDS (Sólidos Disueltos Totales), Gravedad específica de Agua de mar, Temperatura, Turbidez (lámpara de tungsteno), profundidad del agua y GPS.

Diseño y rendimiento que hace las mediciones fáciles para una gran variedad de aplicaciones.

Con este medidor multiparamétrico de alto desempeño podrá monitorear, coleccionar, y almacenar hasta 11 parámetros de calidad de agua simultáneamente. Las mediciones incluyen pH, ORP, oxígeno disuelto, salinidad, TDS, gravedad específica del agua de mar, temperatura, turbidez, y profundidad del agua. La unidad a prueba de agua está diseñada para ser fácil de operar y de uso rudo, haciéndola ideal para el trabajo de campo – para muestras de ríos, agua del subsuelo, posos, lagos, drenajes, aguas residuales, entre otras aplicaciones ecológicas y agrícolas. Refiérase a la tabla al pie de esta página para ayudarlo a decidir qué modelo se ajusta mejor a sus necesidades.

La Unidad de Control Incluye:

- Pantalla con iluminación de fondo fácil de leer
- Pantalla con 11 parámetros simultáneos
- Auto calibración para pH, oxígeno disuelto, turbidez, y profundidad

- Operación a una mano
- Conector de conexión rápida (cable a la unidad de control)
- Cubierta resistente a golpes

La Sonda Incluye:

- Sensor de turbidez ultra sensible
- Mínimo mantenimiento del sensor de oxígeno disuelto con tapón de membrana enroscable
- Resistente a químicos de materiales de construcción
- Sensores que se cambian en el campo

Párametros U53G	Rango de medida
pH	0 a 14
ORP	-2000 a +2000 mV
Oxígeno Disuelto	0 a 50.0 mg/L
Conductividad	0.0 mS/cm a 99.9 mS/m
Salinidad	0 a 70 ppt
TDS	0 a 100 g/L
Gravedad Específica de Agua de Mar	0 a 50
Temperatura	-5 a 55 °C
Turbidez (lámpara de tungsteno)	0 a 1000 NTU
Profundidad del agua	0 a 30 metros
GPS	SI

Tabla 9: Medidor multi paramétrico

Sensor de nivel por ultrasonidos:



Figura 105: SENSOR DE NIVEL ULTRASÓNICO

Medidores de nivel de tipo ultrasónico, flotación o piezoresistivo. Ultrasonidos: sondas ultrasónicas de cuarzo con rango de medida hasta 15 metros. Unidad electrónica de microprocesador con control de bomba opcional. Error máximo 0.4%. Salida 4-20 mA. Flotador: acero inoxidable, indicador de nivel en amplio cuadrante. Transmisión de la señal 4-20 mA opcional. Piezoresistivo: sonda de nivel piezoresistiva para pozos con extenso rango de medición (más de 250 m de profundidad). Incluye cable especial con tubo de compensación de la presión. Salida 4-20 mA. Alimentación 24 VDC.

- Tecnología: por ultrasonidos, piezorresistivo, de flotador
- Medio: para líquido
- Aplicaciones: para tanque
- Rango de niveles: 40 m (131'02")
- Presión de proceso: Máx.: 600 bar (8.702,26 psi)
Mín.: 0,1 bar (1,45 psi)

Sensor de temperatura:



Figura 106: SENSOR DE TEMPERATURA

El DS18B20 ofrece 9 a 12 bits lecturas de temperatura más una interfaz 1-Wire, por lo que sólo un hilo debe conectarse desde un microprocesador central.

Dimensiones: Esta sonda tiene 7 mm de diámetro y aproximadamente 26 mm de largo, la longitud total incluyendo cables es de 182 cm.

Características:

- Voltaje de entrada 3.0-5.5V
- Impermeable

- Rango de temperatura de -55 ° C hasta + 125 ° C
- Precisión de $\pm 0,5$ ° C a -10 ° C
- 1 interfaz de alambre

Transmisor de presión (presostato):



Figura 107: TRANSMISOR DE PRESIÓN.

Hex 24 con sensor de cerámica en tecnología de capa gruesa

Transmisores de presión electrónicos de precio muy atractivo

Gran protección contra sobrepresiones (hasta el doble)

Transmisores pequeños y compactos

Gran variedad de opciones de conexión electrónicas y mecánicas

Alto grado de adaptabilidad a sus exigencias (soluciones a medida)

Sensor de cerámica en tecnología de capa gruesa

Carcasa de acero inoxidable (1.4305), otras a petición

- Tipo: relativa
- Tecnología: de cerámica
- Señal de salida: con salida analógica
- Montaje: roscado
- Otras características: de acero inoxidable, compacto, con estabilidad a largo plazo, alta sobrepresión, para líquido y gas, IP67
- Temperatura de proceso: Máx.: 70 °C (158 °F), Mín.: 0 °C (32 °F)
- Rango de presión: Máx.: 250 bar (3.625,94 psi) Mín.: 0 bar (0 psi)

6.2. Actuadores.

Electroválvula:



Figura 108: ELECTROVÁLVULA

La EV210A abarca una gran variedad de válvulas solenoide de pequeño tamaño, de 2/2 vías y de activación directa que se utiliza en equipos industriales. Su diseño compacto, junto con una amplia gama de bobinas, permite a la EV210A abarcar una gran cantidad de aplicaciones industriales. 2/2 vías Dimensiones compactas Accionamiento directo DN 1.2 - DN 3.5 G 1/8 a G 1/4 pulgadas Cuerpo de la válvula de latón o acero inoxidable Versiones NC (normalmente cerrada) y NO (normalmente abierta)

- Modo de funcionamiento: de control directo
- Vías/posiciones: de 2/2 vías
- Función: NC, NA
- Configuración: compacta, de pequeñas dimensiones
- Presión: Máx.: 30 bar (435,1 psi) Mín.: 0 bar (0 psi)

Electrobomba:



Figura 109: ELECTROBOMBA

Utilización: Trasiego: agua, agua de mar, fueloil, gasoil, aceite (80 mm²/s) Industria, agricultura, obras públicas...

Características:

- Bomba autoalimentada
- Posibilidad de invertir el flujo (doble sentido de rotación)
- Temperatura ambiente comprendida entre -15°C y 40°C
- Humedad relativa máxima 80%
- Temperatura máxima del fluido 130°C
- Altura máxima de aspiración: 5 m

Calentador de agua:



Logalux SM

Figura 110: CALENTADOR DE AGUA

Preparado con cople necesario para conectar la recirculación del agua de servicio. Termopozo incorporado para insertar el sensor de temperatura.

Provisto de registro superior e inferior para facilitar el almacenamiento.

Interacumulador vertical con capacidad de almacenamiento de agua: 160, 200, 300, 400, 500, 750, 1000 Lts.

Incorpora un ánodo de magnesio de sacrificio que atrae las sales y evita que se forme sarro.

V. Resultados:

Como nuestro sistema se basa en el pretratamiento los resultados que obtenemos en el Matlab y en la simulación son:

1. Sistema de calentamiento de agua:

En la función de transferencia obtenemos siendo:

$$T_o(s) = \frac{5.01}{59.92s + 1} Q(s)$$

Ubicación del polo:

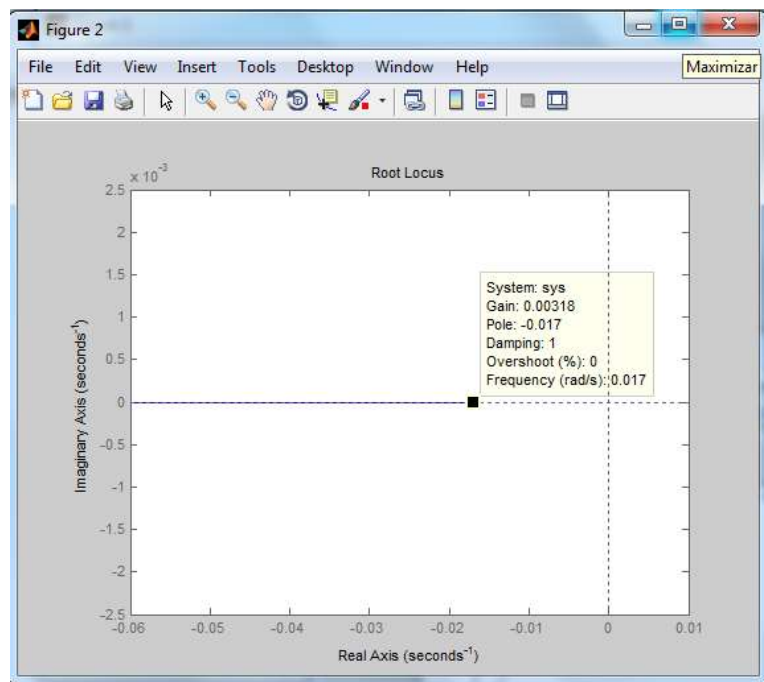


Figura 111: RESPUESTA AL ESCALÓN DE LA PLANTA EN LAZO ABIERTO

Función de transferencia:

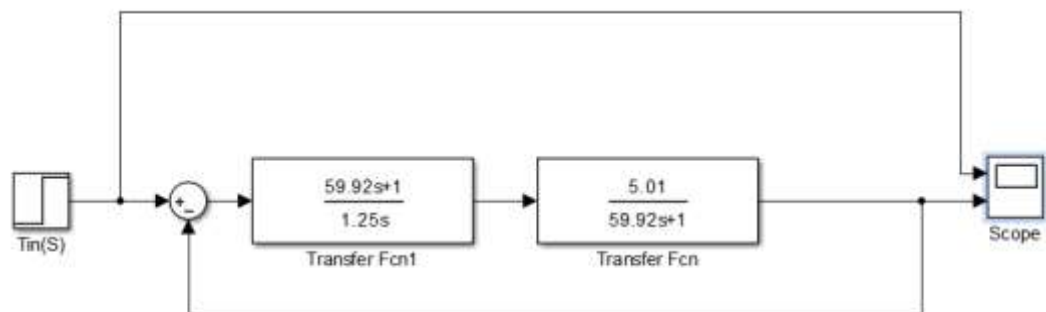


Figura 112: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

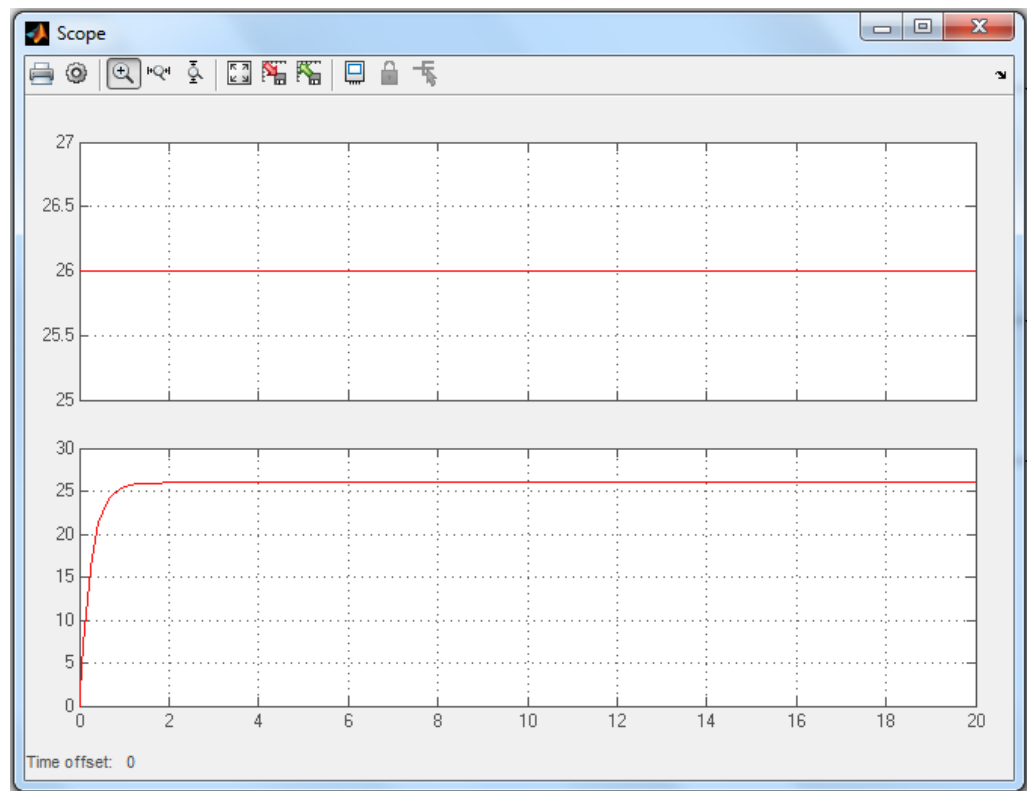


Figura 113: RESPUESTA AL ESCALÓN EN LAZO CERRADO

2. SIMULACIÓN:

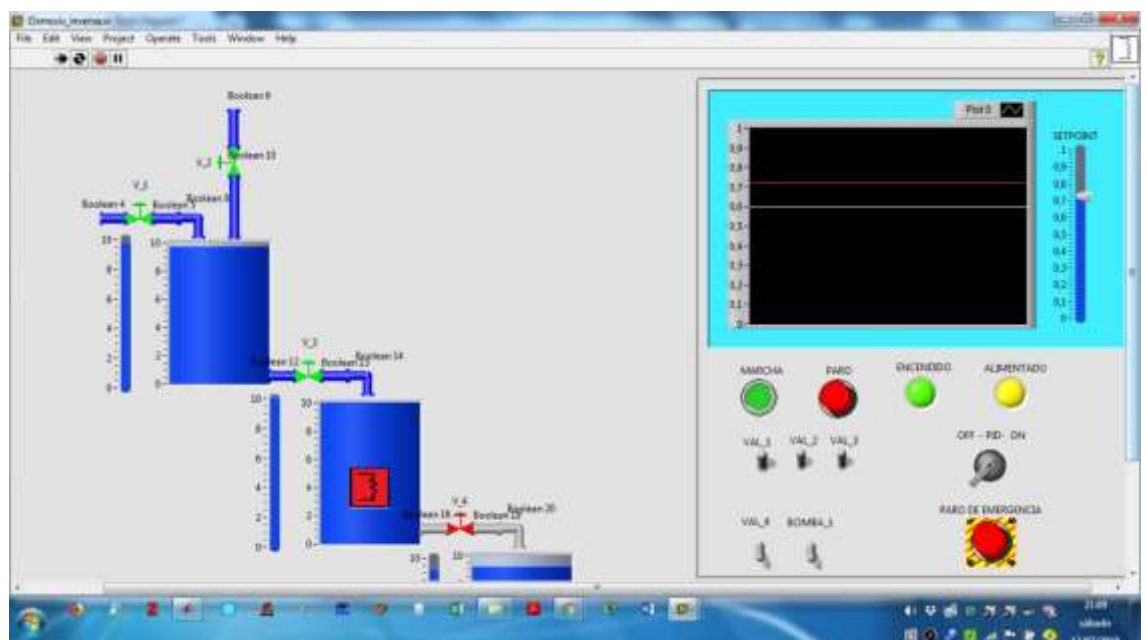


Figura 114: SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA (SIMULIK)

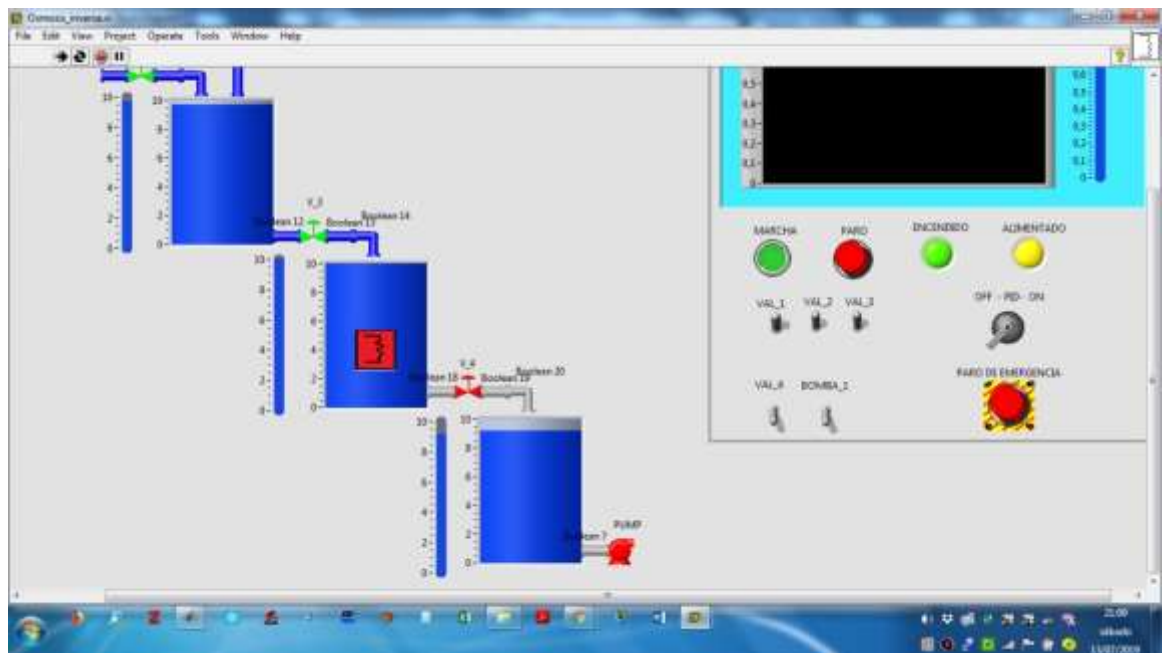


Figura 115: SISTEMA DE CALENTAMIENTO Y ALMACENAMIENTO PARA EL SISTEMA OSMOSIS INVERSA

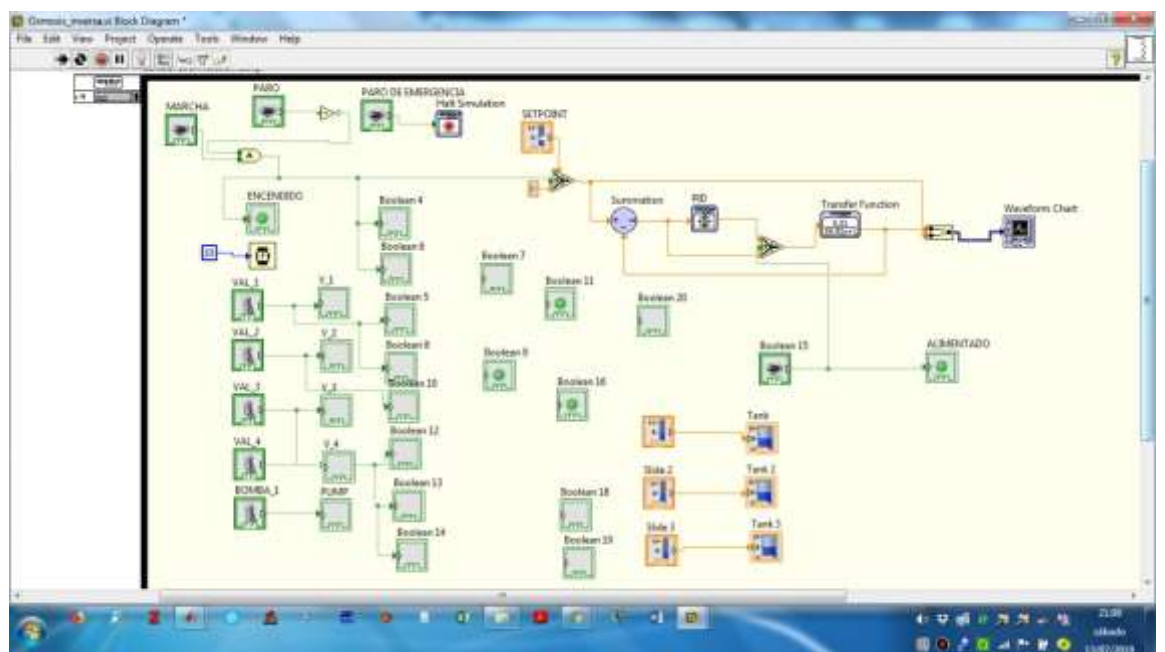


Figura 116: LÓGICA DEL SISTEMA

VI. Conclusiones y recomendaciones:

1. Podemos concluir que el sistema de osmosis inversa actualmente es un método que se usa en la mayor parte del mundo para aplicaciones industriales.
2. Este método puede ser utilizado en lugares donde el agua potable es escaso en ciudades con sequia así también para barcos o navíos en alta mar.
3. Se recomienda tener cuidado con la elección de las membranas a utilizar ya que de ellas depende las características necesarias para la construcción o cambio del sistema.
4. La temperatura del agua, salinidad y pH depende de la profundidad de donde son recogidos.

VII. BIBLIOGRAFIA.

- Alatiqi, I., Ettouney, H., & El-Dessouky, H. (1999). *Process control in water desalination industry: an overview*. *Desalination*, 126(1-3), 15–32. doi:10.1016/s0011-9164(99)00151-4
- Alatiqi, I. M., Ghabris, A. H., & Ebrahim, S. (1989). *System identification and control of reverse osmosis desalination*. *Desalination*, 75, 119–140. doi:10.1016/0011-9164(89)85009-x
- Armijo Castro, F. (2012). *Cien años de análisis de las Aguas Mineromedicinales*. Madrid: Balnea.
- AWWA RF., Lyonnaise des Eaux. y WRCSA. (1999). *Tratamiento del agua por procesos de membranas: principios procesos y aplicaciones*. Madrid: McGraw-Hill.
- Cabrera Garcia, J. (2015). *Proceso de desalacion de agua de mar mediante un sistema de osmosis inversa de muy alta conversion en tres etapas con recirculacion de permeado y doble sistema de recuperacion de energía* (Tesis doctoral). Recuperado de https://addi.ehu.es/bitstream/10810/18530/1/TESIS_CABERO_GARCIA_JULEN.pdf
- Degremont, (2014). *Manual técnico del agua*. España: Grupo de comunicación Loyola.
- Dreizin, Y., Tenne, A., & Hoffman, D. (2008). *Integrating large scale seawater desalination plants within Israel's water supply system*. *Desalination*, 220(1-3), 132–149. doi: 10.1016/j.desal.2007.01.028
- Dupont Ryan R., Eisenberg T. y Middlebrooks Joe E. (1982). Reverse osmosis in the treatment of drinking wáter. *Utah Water Reseach Laboratory*, 2-5. Recuperado de https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1504&context=water_rep
- El-Saied, H., Basta, A. H., Barsoum, B. N., & Elberry, M. M. (2003). *Cellulose membranes for reverse osmosis Part I. RO cellulose acetate membranes including a composite with polypropylene*. *Desalination*, 159(2), 171–181. doi:10.1016/s0011-9164(03)90069-5
- Farinñas Iglesias, M. (1999). *Osmosis inversa, fundamentos, tecnología y aplicaciones*. España: McGraw-Hill Interamericana de España.
- Forchhammer, G. (1865). On the composition of sea-water in the different parts of the ocean. *Philosophical Transactions*, 155, 203-262. Recuperado de https://www.jstor.org/stable/108888?seq=1#metadata_info_tab_contents
- García, L. y Gómez, C. (2001). Perspectives of Solar- Assisted Seawater Distillation. *Desalination*, 136(1-3), 213-218. doi:10.1016/s0011-9164(01)00183-7
- Garcia P. (2015). Principios Basicos Del Tratamiento Del Agua Por Osmosis Inversa. Tesacua. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/370191259/Principios-Basicos-Del-Tratamiento-Del-Agua-Por-Osmosis-Inversa>

- Gorgojo, P., Jimenez-Solomon, M. F., & Livingston, A. G. (2014). *Polyamide thin film composite membranes on cross-linked polyimide supports: Improvement of RO performance via activating solvent*. *Desalination*, 344, 181–188.doi:10.1016/j.desal.2014.02.009
- Lee, K. P., Arnot, T. C., y Mattia, D. (2011). *A review of reverse osmosis membrane materials for desalination—Development to date and future potential*. *Journal of Membrane Science*, 370(1-2), 1–22.doi:10.1016/j.memsci.2010.12.036
- Lewis, E. L., y Perkin, R. G. (1981). The practical salinity scale 1978: conversion of existing data. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 28(4), 307–328. doi:10.1016/0198-0149(81)90002-9
- Lopez, J. C., (2009). *Guia-Basica-Calderas-Condensacion*. Madrid:.fenercom.
- Medina San Juan, J. (2000). *Desalación de aguas salobres y de mar*. Madrid: S.A. Mundi-Prensa Libros.
- Missimer, T. M., Ghaffour, N., Dehwah, A. H. A., Rachman, R., Maliva, R. G., & Amy, G. (2013). *Subsurface intakes for seawater reverse osmosis facilities: Capacity limitation, water quality improvement, and economics*. *Desalination*, 322, 37–51.doi: 10.1016/j.desal.2013.04.021
- Moss, S.A. y Nagpal, N.K. (2003) Ambient Water Quality Guidelines for Boron. *Water protection section ministry of water, land and air protection*. British Columbia, Water Protection Section
- Micale, G., Rizzuti, L., & Cipollina, A. (Eds.). (2009). *Seawater Desalination. Green Energy and Technology*.doi:10.1007/978-3-642-01150-4
- Mulder, M. (1991). *Basic principles of membrane technology*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Naday, N. (1999). Boron removal from seawater reverse osmosis permeate utilizing selective ion exchange resin. *Desalination*, 124(1-3), 131–135.doi:10.1016/s0011-9164(99)00097-1
- NASA (27-de febrero de 2013). *Aquarius observa cambios en la salinidad de los océanos*. Recuperado de https://www.nasa.gov/mission_pages/aquarius/news/data-first-year-es.html
- Ogata, K. (1998). *Ingeniería de control moderna*. Madrid, Pearson Educación
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Madrid, Pearson Educación
- Öztürk, N., Kavak, D. y Köse, T. E. (2008). Boron removal from aqueous solution by reverse osmosis. *Desalination*, 223(1-3), 1–9. doi: 10.1016/j.desal.2007.01.178

- Pellon, I. (2002). Lavoisier y la revolución química. *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, 1(2), 40-49. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/881223.pdf>
- Prihasto, N., Liu, Q.-F., & Kim, S.-H. (2009). *Pre-treatment strategies for seawater desalination by reverse osmosis system*. *Desalination*, 249(1), 308–316. doi: 10.1016/j.desal.2008.09.010
- Ramillo, L., Gomez, S. y Coppari, N. (2003). Tecnologías de Proceso para desalinización de aguas. *CNEA*, 3(9), 22.
- Redondo, J., Busch, M. y De Witte, J.-P. (2003). Boron removal from seawater using FILMTECTM high rejection SWRO membranes. *Desalination*, 156(1-3), 229–238. doi: 10.1016/s0011-9164(03)00345-x
- Riordan, M., Hoddson, L. y Herring, C. (1999). The invention of the transistor. *Mod. Phys*, 71(2), s336-s345. doi:10.1103/revmodphys.71. Recuperado de <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.71.S336>
- Romero, J. (2016). Desarrollo de un sistema de supervisión y monitoreo con implementación de módulos de detección de fallas para una planta piloto desalinizadora de agua de mar (Tesis de magister). Pontificia Universidad Católica Del Perú. Recuperada de http://tesis.pucp.edu.pe:8080/repositorio/bitstream/handle/123456789/6741/ROMERO_JULIO_DESARROLLO_SISTEMA_SUPERVISION.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Spiegler, KS. y Laird, ADK. (1980). *Principles of desalination*. USA: Academic Press Inc.
- Sverdrup, H., Johnson, M. y Fleming, R. (1942). *The Oceans Their Physics, Chemistry, and General Biology*. New York: Prentice-Hall, Inc.
- Timco, G. W., y Frederking, R. M. W. (1996). *A review of sea ice density*. *Cold Regions Science and Technology*, 24(1), 1–6. doi:10.1016/0165-232x(95)00007-x
- UNESCO, (1987). International oceanographic tables. *UNESCO Technical papers in marine science*, 4, 28. Recuperado de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000076307/PDF/076307qaab.pdf.multi>
- Ures, P. R., Jacome, B. A., y Suarez, L. J. (2015). *Filtración en membranas y osmosis inversa (FT-TER-005)*. España universidad la Coruña Inditex. Recuperado de <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Filtración+en+membrana+y+ósmosis+inversa.pdf/c6e09095-3730-c07e-42e8-3f9db4f7e28b>
- Voutchkov, N. (2005). *SWRO desalination process: on the beach – seawater intakes*. *Filtration & Separation*, 42(8), 24–27. doi:10.1016/s0015-1882(05)70657-1
- Voutchkov N. (2013). *Desalination engineering planning and design*, USA: The McGraw – Hill Companies.

Werlinger, C., Alveal, K. y Romo, H. (2004). *Biología marina y oceanografía : conceptos y procesos*. Chile: Concepción : Gobierno de Chile, Consejo Nacional del Libro y la Lectura.

Weiss, R. F. (1970). *The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater*. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 17(4), 721–735. doi:10.1016/0011-7471(70)90037-9

World ocean atlas (2013). *National Oceanic and Atmospheric Administration* recuperado de <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/world-ocean-atlas-2013-woa13>

Zander, AK., Elimelech, M., Furukawa, DH., Gleick, P., Herd, KR., Jones, KL., Rolchigo, P., Sethi, S., Tonner, J., Vaux, HJ., Weis, JS., WW Wood. (2008). *Desalination, a national perspective*. The National Academies Press.. DOI: <https://doi.org/10.17226/12184>