

**Análisis de Alternativas para la Remoción de Cloruros presentes en las Aguas Residuales
Industriales de Producción del Campo Cicuco Ecopetrol S.A.**

Autores:

Rafael Jarava Galván

Irlanda Patricia Planeta Barros

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Ingeniería Ambiental

Valledupar, Cesar

2017

**Análisis de Alternativas para la Remoción de Cloruros presentes en las Aguas Residuales
Industriales de Producción del Campo Cicuco Ecopetrol S.A.**

Rafael Jarava Galván

Irlanda Patricia Planeta Barros

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniería Ambiental

Directora:

**Aleana Beatriz Cahuana Mojica, Ingeniera Ambiental y Sanitaria, Especialista en
Gestión Ambiental**

Asesor externo:

Luis Arturo Gómez López, Ingeniero de Petróleo

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Ingeniería Ambiental

Valledupar, Cesar

2017

Agradecimientos

A Dios, por ser mi inspiración cada día para superarme como persona y profesional.

A mi familia, por brindarme su apoyo incondicional.

A todos aquellos que contribuyeron de alguna manera para lograr este trabajo, mi más profunda gratitud.

Rafael Jarava Galvan

Primero quiero darle gracias a Dios por permitir alcanzar un logro más en mi vida,

A mi mamá Doris Barros y hermanos Israel y Maciel, por darme la motivación para seguir cada día adelante creciendo como persona y profesional.

A mi papá, que aunque no está siempre ilumina el camino y me ayuda a perseverar.

A mis mentores, que durante el transcurso de este proyecto contribuyeron para alcanzar este objetivo, uno de los tantos que vendrán.

A todos, muchas gracias.

Irlanda Patricia Pianeta Barros

Tabla de Contenido

Introducción	12
Planteamiento del Problema	14
Justificación	17
Objetivos	21
Objetivo general	21
Objetivos específicos	21
Marco Referencial	22
Antecedente	22
Marco Teórico	27
Agua de producción	27
Agua residual	27
Ciclo del agua Residual Industrial de Producción	28
Sistema de agua en un campo Petrolero Maduro	29
Características fisicoquímicas del agua proveniente de los acuíferos subterráneos	30
Caracterización del Agua Residual Industrial de Campo Cicuco.	30
Propiedades fisicoquímicas del agua residual industrial	32
Propiedades físicas	32
Tratamiento de aguas residuales industriales	38
Alternativas de procesos para la remoción y/o la disposición de cloruros.	39
Método Análisis Ponderado	61
Diseño de Filtros para Pre-tratamiento	63
Simulación del Proceso: WINFLOWS ®	64
Demostración interfaz Winflows 3.3.2 ®.	65
Características de iconos de izquierda a derecha.	66
Marco Conceptual	77
Marco legal	82

Constitución Política de Colombia del 1991	82
Leyes	83
Decretos	83
Resoluciones	85
Autos	87
Marco Institucional	88
Misión y Visión	89
Estructura Local.	90
Reseña Histórica	91
Marco Metodológico	94
Metodología de la Investigación	94
Tipo de Metodología	94
Línea de Investigación	95
Población y Muestra	95
Fases de la Investigación	95
Fase I: Analizar las concentraciones de los parámetros de cloruro vertidas por el campo Cicuco en las aguas del río Chicagua, cuerpo receptor del vertimiento entre los años 2005 a 2016.	95
Fase II: Evaluar los métodos de osmosis inversa e intercambio iónico mediante análisis numéricos, como alternativas para la remoción de cloruros.	96
Fase III: Seleccionar a partir de un análisis técnico, la alternativa apropiada para la remoción de cloruros en aguas residuales industriales de producción del Campo Cicuco.	96
Resultados y Análisis	98
Fase I: Analizar las concentraciones de los parámetros de cloruro vertidas por el Campo Cicuco entre los años 2005 a 2016	98
Análisis Estadístico de la concentración de cloruros en Campo Cicuco.	107
Fase II: Evaluar los métodos de osmosis inversa e intercambio iónico mediante análisis numéricos, como alternativas para la remoción de cloruros	108
Análisis de la Filosofía Operacional del Sistema de agua residual industrial en la Estación Cicuco.	108

Diagrama de Procesos de Fluidos del Campos Cicuco.	110
Sistema de agua residual industrial de Producción de Campo Cicuco.	112
Análisis Técnico Comparativo Ponderado de las Técnicas de Osmosis Inversa e Intercambio Iónico.	120
Fase III Seleccionar a partir del análisis técnico, la alternativa apropiada para la remoción de cloruros en aguas residuales industriales de producción del Campo Cicuco	132
Implementación de Pretratamiento Lecho Filtrante.	134
Selección del Sistema de Remoción de Cloruros.	138
Modelación o Simulación del Proceso: WINFLOWS ® ARI Campo Cicuco	142
Conclusiones	178
Recomendaciones	181
Bibliografía	182
Apéndice A AUTORIZACION DE MANEJO DE INFORMACIÓN MONITOREOS AMBIENTALES ECP	185
Apéndice B EQUIPO OSMOSIS INVERSA SEAPRO-E-210	186
Apéndice C RESOLUCIÓN NUMERO 0631 MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE	187
Apéndice D MANUAL WINFLOWS HELP	188
Apéndice E FICHA TÉCNICA	189
Apéndice F PARÁMETROS DE OPERACIÓN Y MEMBRANAS	190

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Propiedades Petrofísicas – Campo Cicuco</i>	30
Tabla 2 <i>Propiedades de los Fluidos</i>	30
Tabla 3 <i>Caracterización Aguas residuales Industriales punto de vertimiento río Chicagua 2016, comparación Resolución 631 de 2015</i>	31
Tabla 4 <i>Lista abreviada de iones, partículas y microorganismos retenidos mediante el proceso de osmosis inversa</i>	54
Tabla 5 <i>Características de las resinas de intercambio iónico empleadas en los procesos de tratamiento de aguas</i>	59
Tabla 6 <i>Calificación de Ventajas y Desventajas</i>	62
Tabla 7 <i>Definición de opciones Diagrama de Flujo – Flowsheet</i>	69
Tabla 8 <i>Definición de opciones</i>	73
Tabla 9 <i>Opciones de ayuda</i>	75
Tabla 10 <i>Caracterización parámetros fisicoquímicos cuerpo de aguas superficial río Chicagua 2016, comparación Resolución 0631 del 17 de Marzo 2015</i>	99
Tabla 11 <i>Resolución 0631 de Marzo de 2015 Minambiente</i>	100
Tabla 12 <i>Histograma de Cloruros años 2005-2016, Campo Cicuco</i>	106
Tabla 13 <i>Identificación, georreferenciación y observaciones puntos de monitoreo ARI y aguas superficiales campo Cicuco</i>	111
Tabla 14 <i>Calificación de Ventajas y Desventajas</i>	121
Tabla 15 <i>Análisis Cuantitativo de la Osmosis Inversa</i>	128
Tabla 16 <i>Análisis Cuantitativo del Intercambio Iónico</i>	129
Tabla 17 <i>Selección del Sistema de Remoción</i>	132
Tabla 18 <i>Bombas</i>	138
Tabla 19 <i>Tubería</i>	139
Tabla 20 <i>Válvulas</i>	139
Tabla 21 <i>Hidráulica</i>	140
Tabla 22 <i>Parámetros para cargar datos en alimentación</i>	146

Tabla 23 <i>Especificaciones técnica Tipos de Sistema RO</i>	153
Tabla 24 Resumen datos de entrada.....	162
Tabla 25 Resumen de resultados.....	165
Tabla 26 Resultados por corrientes.....	168
Tabla 27 <i>Comparación de parámetros, norma ambiental-simulación</i>	169
Tabla 28 Sección Capex/Opex.....	174
Tabla 29 <i>Caudal de permeado por hora, mes y año</i>	175
Tabla 30 <i>Capex inicial y Opex por año</i>	175
Tabla 31 <i>Análisis Financiero</i>	176

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Ciclo del Agua Residual Industrial de Producción</i>	28
Figura 2 Sistema del manejo de Agua de un campo petrolero maduro	29
<i>Figura 3 Principio de la Electrodialisis</i>	40
Figura 4 Estanques de evaporación.....	43
Figura 5 Evaporadores mecánicos para la industria del petróleo	44
Figura 6 Esquemas de los fenómenos de ósmosis y ósmosis inversa	47
Figura 7 Esquema del proceso industrial de la ósmosis inversa	48
Figura 8 Esquema Intercambio Iónico	56
Figura 9 Diseño del Filtro	63
Figura 10 Software Winflows	64
Figura 11 Barra de herramientas.....	65
Figura 12 Barra de Herramientas	66
Figura 13 Menú comandos.....	67
Figura 14 Archivo (File)	67
Figura 15 Vista (View)	68
Figura 16 Diagrama de flujo (Flowsheet).....	69
Figura 17 Datos de entrada (Input)	71
Figura 18 Informes (Reports).....	72
Figura 19 Opciones (Options).....	73
Figura 20 Idioma (Language)	75
Figura 21 Ayuda (Help)	75
Figura 22 Estructura general Ecopetrol S.A.	90
Figura 23 Estructura local, Vicepresidencia de Desarrollo y Producción	90
Figura 24 Comportamiento de Cloruros Vs Concentración Permisible, años 2005-2016. Campo Cicuco	107
Figura 25 Proceso de fluidos Campo Cicuco.....	111

Figura 26 Sistema de Agua Residual Industrial, Campo Cicuco.....	113
Figura 27 Nodo 1: Registro Tanques de Almacenamiento y Medidor de Drenaje.....	114
Figura 28 Separador API	115
Figura 29 Sistema de Compuertas Separador API.....	116
Figura 30 Skimeers y Registro API	116
Figura 31 Nodo 2	117
Figura 32 Piscinas de Oxidación.....	117
Figura 33 Nodo 3	118
Figura 34 Entrada de la Piscina N. 2.....	118
Figura 35 Piscina N. 2: Aireación.....	119
Figura 36 Nodo 5, Medidor de Vertimiento	120
Figura 37 Materiales filtrantes	135
Figura 38 Acomodación de materiales filtrantes	136
Figura 39 Filtro de Pretratamiento.....	137
Figura 40 Instalación de Filtros	137
Figura 41 Bombas de vertimiento, sistema ARI. Estación Cicuco.....	139
Figura 42 Nodo N. 5	140
Figura 43 Propuesta instalación Sistema de osmosis inversa	141
Figura 44 Software Winflows.....	142
Figura 45 Interfaz winflows estándar	142
Figura 46 Información del proyecto	143
Figura 47 Configuración diagrama de flujo.....	144
Figura 48 Alimentación (Feed).....	145
Figura 49 Ingreso de parámetros en la alimentación	147
Figura 50 Balance iónico	148
Figura 51 Parámetros de flujo.....	149
Figura 52 Dosificación.....	149
Figura 53 Selección sistema RO.....	150

Figura 54 Tipos de sistemas RO	150
Figura 55 Selección del tipo de Sistema RO: Sea Pro E-210	154
Figura 56 Diagrama de flujo de la Estación Cicuco	155
Figura 57 Datos de bomba de suministro al sistema RO	156
Figura 58 Resultados, primera corrida.....	157
Figura 59 Errores y advertencias primera corrida.....	157
Figura 60 Cambio de porcentaje de recuperación.....	158
Figura 61 Resultados, primera corrida corregida.....	159
Figura 62 Diseño final del diagrama de sistema de RO.....	160
Figura 63 Calculo Capex y Opex.....	161
Figura 64 Comparativo Norma-Permeado.....	164
Figura 65 Comparativo Condiciones iniciales y finales, concentración de cloruros	167
Figura 66 Comparativo Norma-Condiciones iniciales y finales pH.....	169
Figura 67 Parámetros operacionales	170
Figura 68 Desempeño Presión de entrada, Concentración TDS y Cl-, respecto al tiempo	171
Figura 69 Desempeño Presión de entrada, Concentración TDS y Cl-, respecto a la temperatura	172
Figura 70 Desempeño Presión de entrada, Concentración TDS y Cl-, respecto a la temperatura, rango de 35°C a 40°C	173
Figura 71 Análisis Financiero.....	177

Introducción

Toda influencia antrópica desencadena sinergia con el entorno natural, al punto de llegar al aprovechamiento desmesurado de los recursos, aumentando el desequilibrio sistemático del ambiente a corto, mediano y largo plazo, razón por el cual las diferentes ramas del saber están comprometidas en la búsqueda de alternativas de prevención, minimización y/o eliminación de dichos impactos al ambiente, basados en la implementación de tecnologías y buenas prácticas eco eficientes que permitan revertir de una u otra forma las alteraciones al entorno.

Con los avances industriales de los últimos 200 años, el hombre ha buscado satisfacer sus necesidades de una fuente de generación de recursos energéticos para abastecer la demanda mundial, el Hidrocarburos (Petróleo y Gas) se han convertido en recursos insignias para tal fin; sin embargo, su explotación viene acompañada en cantidades considerables de agua, ya que este tipo yacimientos generalmente están asociados a presencia de acuíferos.

El agua extraída del proceso en superficie (Agua Residual Industrial de producción) se convierte en un residuo el cual se debe tratar en todos sus parámetros físico-químicos para su disposición o vertimientos en superficies de aguas y/o uso en otras actividades como riego, usos industriales o inyección a las formaciones acuíferas, es decir, debe pasar de residuo a recurso bajo la normatividad de leyes ambientales vigentes para su disposición final.

Dicha agua residual estará compuesta por sustancias orgánicas e inorgánicas solubles que al contacto con el cuerpo de agua, se van homogenizando hasta llegar al límite donde alcanza su saturación, alterando la característica físico-química.

Para el caso específico de la investigación el Campo Cicuco perteneciente a Ecopetrol S.A. las formaciones productoras que lo abastecen presentan asociaciones de acuíferos cuyos niveles de Cloruros (Cl-) son sumamente elevados, traduciendo en taponamientos de tubería de producción por incrustación y altas concentraciones por encima de lo permitido por la Normatividad Ambiental Colombiana en el vertimiento que se hace al Rio Chicagua, afectando de esta manera el equilibrio ecológico de la biota perteneciente al área de influencia, es por eso, que esta propuesta investigativa en modalidad de trabajo de Grado propone dos métodos como alternativas para remover este parámetro a sus niveles permisibles por ley y trayendo consigo beneficios tanto para la parte técnica del campo como para la biota circunstante.

Planteamiento del Problema

El agua solvente universal por naturaleza, por su característica fisicoquímica es susceptible a disociarse y/o asociarse a diferentes iones que alteran su composición química, dentro de los muchos compuestos salinos existentes, el ion cloruro Cl^- en altas concentraciones se convierte en un contaminante emergente cuya presencia es desapercibida e irrelevante a simple vista, no obstante el impactos a la biota acuática y daños a la salud son perceptibles ya que conducen al deterioro de la calidad de las aguas superficiales receptoras, en este caso en ríos, caños, o peor aún en lagunas o ciénagas con poco movimiento de corriente, llevándola hasta el punto de transformar un recurso en residuo.

Favorablemente en Colombia existen normativas ambientales que regula las concentraciones máximas permisible de parámetros físico químicos para vertimiento puntual a cuerpos de aguas superficiales. La Resolución 0631 del 17 de Marzo del 2015, emanada por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible en el artículo 11 hace referencia a los vertimientos de ARnD a cuerpos de aguas superficiales donde se incluye el parámetro Cloruros, y donde señala que para la actividad de hidrocarburos específicamente para el proceso del área Upstream (exploración y producción) el valor máximo permisible es de 1200 mg/L, correspondiente a las actividades propias del área seleccionada para la investigación (MINAMBIENTE, 2015).

El campo Cicuco de acuerdo a su actividad económica genera grandes volúmenes de aguas residuales industriales, la cual es vertida al río Chicagua previa autorización y permisos ambientales emitidos por la Corporación Ambiental del Sur de Bolívar - CSB y por imposición

de la misma se debe realizar un programa anual de caracterización fisicoquímica al cuerpo de agua.

Para el caso puntual de la investigación durante los años del 2005 al 2016 ha tenido una concentración aproximada de Cloruro de 12.527 mg/L promedio, considerándose como agua salobre o salmuera, cabe resaltar que previos al vertimiento es realizado tratamientos físicos químicos para el control de otros parámetros tales como fenol, bario, solidos suspendidos, grasas y aceites, pero de los cuales el parámetro cloruro no estaba dentro de la normativa regulatoria en años anteriores a la resolución antes mencionada, lo cual está muy por encima del valor máximo permisible por normativa vigente. Esto permite concluir rápidamente que el impacto ambiental de la biota del área influencia está fuertemente afectada por las altas concentraciones de cloruro, y de igual manera, técnicamente los problemas operacionales de producción del Campo Cicuco han sido afectados por la precipitación de esta especie química.

Por todo lo anteriormente mencionado, esta investigación plantea las siguientes hipótesis

¿Qué tipo de alternativa de remoción de cloruros en aguas residuales industriales es la apropiada de acuerdo a la infraestructura operacional en el Campo de Producción Cicuco?

¿Qué incidencia tiene el parámetro cloruro con el impacto ambiental al cuerpo de agua receptor del vertimiento? ¿A través de las técnicas propuestas planteadas se logrará el cumplimiento de la normativa vigente Resolución 0631 de 2015, donde establece el valor máximo permisible de los parámetros para vertimiento de aguas residuales industriales proveniente de la industria de hidrocarburo?, a través de las alternativas propuestas se podría dar soluciones concretas en las cuales se puedan beneficiar prioritariamente, la biota ecológica, las comunidades circundantes

aguas abajo aledaña al punto de vertimiento del Rio Chicagua tanto como las operaciones de producción del Campo.

Justificación

En la industria petrolera, el proceso de extracción de hidrocarburo, es uno de los generadores de mayor volumen de agua residual, tanto así que a nivel mundial la producción asciende aproximadamente a 270 millones de barriles de agua diarios, de una producción aproximada de 83 millones de barriles diarios de hidrocarburo separado, dichos volumen de agua son provenientes de acuíferos (Richard, 2010). De esta manera, podemos dimensionar el impacto técnico y económico que representa el tratamiento del Agua Residual Industrial de producción a los sistemas de producción petrolera.

Las Aguas Residuales Industriales procedentes de la extracción de hidrocarburo, genera diversos contaminantes que afectan notoriamente los ecosistemas acuático y terrestres; este tipo de vertimientos afectan con mayor proporción los recursos hídricos del cuerpo de agua superficiales el cual es el receptor de las descargas del proceso industrial, en este caso específico el Rio Chicagua; el cual es septentrional al municipio de Cicuco Bolívar, en la depresión Momposina del Valle inferior del Magdalena, cuenca sedimentaria rica en recursos naturales renovables y no renovables dentro de ellos el petróleo. Cicuco cuenta con un complejo petrolero denominado Campo de Producción Cicuco - Boquete que comprende los municipios de Cicuco, Talaigua y Mompox. Este Campo inició su exploración y explotación desde los años 1950 por la empresa COLPET siendo uno de los principales productores en Colombia por las características cromatografías del hidrocarburo extraído por ser liviano, fácil de transportar y de extraer.

El Campo Cicuco – Boquete o simplemente Campo Cicuco, cuenta con un permiso de vertimiento otorgados según normativa ambiental Colombiana con una secuencia cronología de:

Resolución 224 del 2008 por la Corporación Autónoma Regional del Sur de Bolívar CSB, el cual fue modificada por el Auto 213 del 26 de Junio del 2013, que considera: Por medio el cual se inicia el trámite y se toman otras determinaciones “Ecopetrol S.A. mediante el escrito radicado en la CSB con el No. 7075 del 25 de junio de 2013 solicita modificación del permiso de vertimiento de Aguas residuales al río Chicagua”. (Ecopetrol S.A., 2015) de ampliación del caudal y vigencia por 10 años, como respuesta a dicha solicitud se establece el nuevo edicto Resolución No 336 de Noviembre de 2013. Otorgar a la empresa Colombiana de petróleos ECOPETROL S.A., la modificación del permiso de vertimiento de Aguas Residuales Industriales al río Chicagua, para el campo Cicuco – Boquete, localizado en el municipio de Cicuco Bolívar, por el término de cinco (05) años, y caudal de 22 L/s, el cual fue otorgado con la resolución No. 224 de 2008.

Los altos índices de cloruros disueltos en las aguas extraídas de los pozos de producción Cicuco-Boquete hace necesario que se evalúen las alternativas que permitan el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente para el vertimiento de ARI a fuentes hídricas naturales superficiales, según la Resolución 631 del 17 de Marzo de 2015 Artículo 11 se considera los “Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domesticas – ARnD a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con hidrocarburo (petróleo crudo, gas natural y derivados”. (Ecopetrol S.A., 2015) (p.12). Por ende, se requieren de tratamientos no convencionales para cumplir con los parámetros permisibles indicados en la dicha resolución, ya que el no cumplimiento genera sanciones económicas y de repercusión legal, sin desconocer los impactos que se genera por esta actividad al medio ambiente, afectando notoriamente los ecosistemas endémicos del área de influencia, así mismo la salubridad de las poblaciones cercanas que se abastecen de este recurso.

En contexto, dentro de la operación de la extracción de hidrocarburo, en la planta industrial del campo Cicuco, el agua residual generada en la producción es tratada mediante procesos físicos-químico (separador API y piscina de oxidación), el cual es un tratamiento físico que involucra técnicas de separación gravitacional de aceite y sólidos principalmente, este método permite la presencia de altos niveles de cloruro, sulfatos y otros elementos, del cual son tratados con prioridad el fenol, bario, solidos suspendidos, grasas y aceites entre otros, establecidos en el Artículo 72 del Decreto 1594/84 del Ministerio de Salud (INS, 1984). Pero se evidencia el incumplimiento de la normativa legal vigente, Resolución 631 de marzo del 2015 Artículo 11 “Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domesticas ARnD a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con hidrocarburos (petróleo crudo, gas natural y derivados). Para el caso puntual de investigación proceso de Producción Upstream (Exploración y producción) parámetro Cloruros donde se ha evidenciado en los últimos años que superan el valor máximo permisible para la normativa citada anteriormente de 1200 mg/L.

Las afectaciones de los altos niveles de cloruros en las ARI se ve reflejados posibles causas de daños en las conducciones y estructuras metálicas en la operación así como para el suministro de agua residencial, además de causar un impacto severo en la biota acuática, ya que al aumentar los iones de sales disueltas, aumenta la dureza y conductividad del cuerpo de agua receptor, lo que hace que se proliferen organismos que afectan la especies endémica y el equilibrio del ecosistema, no siendo menos importante la afectación a la salubridad de los habitantes de las zona rural aledañas al afluente que consumen el agua sin ningún post tratamiento, lo que conlleva al aumento del índice de riesgo para la calidad del agua para consumo humano IRCA, para el caso puntual parámetro Cloruro (Cl-) puntaje 1, y de acuerdo a la misma el valor máximo

aceptables para consumo humano es de 250 mg/L, observándose notoriamente que dicha agua supera el valor máximo permisible para el cumplimiento de la normativa y para el consumo humano.

Según el decreto 1076 de 2015, artículo 38, 39 los valores máximos admisibles para los cuerpos de aguas superficiales, dicho índice mencionado anteriormente, no presenta un alto riesgo para los asentamientos humanos, lo que hace necesario continuar con el control y la vigilancia, no obstante para la biota acuática circundante presenta riesgos elevados ya que este impide el crecimiento de las especies endémicas del cuerpo de agua.

De acuerdo a la información secundaria compilada se analizarán dos (2) alternativas de minimización de los niveles de cloruro en las aguas residuales industriales, que permitan establecer el nivel de remoción y factibilidad económica, para el cumplimiento de la normativa legal vigente teniendo en cuenta la cadena de procesos y la infraestructura existente en el área.

Objetivos

Objetivo general

- Determinar las alternativas para la remoción de cloruros presentes en las Aguas Residuales Industriales de producción del Campo Cicuco.

Objetivos específicos

- Analizar las concentraciones de los parámetros de Cloruro vertidas por el Campo Cicuco en las aguas del Río Chicagua, cuerpo receptor del vertimiento entre los años 2005 a 2016.
- Evaluar los métodos de Osmosis Inversa e Intercambio Iónico mediante análisis numéricos, como alternativas para la remoción de cloruros.
- Seleccionar a través de un análisis técnico y económico, la alternativa apropiada para la remoción de cloruros en Aguas Residuales Industriales de producción del Campo Cicuco.

Marco Referencial

Antecedente

Por medio del análisis documental se pudo identificar las diferentes técnicas de desalinización de aguas residual industrial, que permitan constar su eficiencia y utilidad en las diferentes industrias, para el caso puntual de la investigación la industria de hidrocarburo, a través de casos puntuales que focalice las variables fundamentales para el caso de estudio.

De acuerdo con Jaume & Pico (2009), en la publicación de la revista DYNA Ingeniería e Industria Depuración de aguas residuales por proceso de membranas. Caso de industria Petroquímica, presenta a través de las diferentes técnicas de desalinización existentes, un estudio de factibilidad de acuerdo a diferentes variables presentes en la caracterización del agua residual industrial proveniente de la actividad petroquímica, para el caso puntual este presenta un caudal elevado, con altos índices de contaminación de (DQO,COT,GYA,TDS;SS y pH elevados mayores de 7) el cual es vertida directamente al mar desde la estación depuradora después del tratamiento biológico. Como técnica para la disminución de los parámetros existentes selecciona la Osmosis Inversa como tratamiento terciario por presentar costo aceptables, fácil operatividad y bajo consumo energético a las ARI proveniente del efluente de la industria petroquímica Jaume & Pico (2009) toma como referencia el efluente de aguas residuales industria petroquímica y aguas municipales donde a través de ensayo con diferentes niveles de filtración entre 200 – 20 un analiza la reducción de SDI, el porcentaje de ensuciamiento y eficiencia de las membranas de Osmosis Inversa.

De acuerdo a los ensayos realizados crean una prueba piloto diseñada y construida en el Departamento de Ingeniería Química y Nuclear de la UPV, con un sistema de recirculación total de modo que la corriente del permeado y concentrado retornan a un tanque de alimentación de 60 L para mantener la concentración y diferentes variables de operatividad tales como bomba, pistones, válvulas entre otros. Como resultados obtenidos de la investigación deducen que la capacidad separadora de las membranas logra una remoción óptima de los parámetros contaminantes en ambos efluentes de acuerdo a su caracterización inicial, mostrando los resultados de los ensayos a una escala industrial a través de la simulación para el ARI petroquímica se debe seccionar en dos etapas del RO, y expresa la característica de la planta para ambos efluentes. Para el caso del presente trabajo investigativo, dado que las ARI proveniente de la industria del hidrocarburo, presentan la características semejante de contaminante, permite tener en cuenta el grado de eficiencia de las técnicas seleccionadas y las variables para la selección de la tecnología apropiada en a las aguas residuales del Campo Cicuco.

Según Gómez & Vera (2013) en el artículo científico Simulación del pretratamiento de agua de mar para su desalación a través del presente artículo, el autor presenta alternativas de tratamiento de agua del mar, utilizando dos técnicas de pretratamiento de desalinización basadas en la filtración convencional de lechos mixto de arena sílice y arena, con una cámara de 17.50 cm con 1.0 diámetro de cilindro de 6.33 cm, y de una capa de arena de espesor de 4.0 cm con 1.0 diámetro de partícula de 0.5 mm posterior se realiza la separación por una membrana de ultrafiltración y micro filtración que permite la remoción de iones de sales disueltos y establece el grado de eficiencia entre las dos alternativas; como resultado de la investigación a través del software Rosa obtuvieron las características del diseño de la membrana, las fases necesarias para la implementación de la Osmosis Inversa y su utilización en el turismo de la población de

Cayeria Norte de Villa Claro. Si bien es cierto que la actividad económica difiere en la utilización y las características, el agua de mar presenta alto grado de iones de sal, por tal razón se pretende analizar la viabilidad de implementación de la filtración convencional para la depuración de las trazas de sólidos suspendidos, grasas y aceite que residuos del pretratamiento del ARI del campo Cicuco.

Santana (2012) realizó un ensayo sobre el análisis y simulación de la tecnología de ósmosis inversa con fuentes energéticas no convencionales presenta en el desarrollo de esta tesis doctoral es estudiar la viabilidad técnica del accionamiento de sistemas de ósmosis inversa por medio de fuentes energéticas no convencionales en distintos supuestos, es decir, pretende realizar un análisis minucioso del comportamiento de membranas comerciales y de la respuesta que ofrece una planta piloto de Osmosis Inversa trabajando en régimen discontinuo, constantes paradas y fluctuaciones sucesivas en presión y caudal conforme a los datos de simulación de potencia procedente de energías renovables (disponibilidad energía eólica y fotovoltaica), sin adquisición de equipos productores de energía lo que haría que el sistema se incrementaran los costos. Este autor plantea el análisis climático, radiación solar y disponibilidad del viento en áreas geográficas determinadas, simultáneamente un estudio de las cualidades técnicas de las turbinas del viento comerciales y evaluar sus parámetros operacionales, la dispersión de energía, potencia nominal y capacidad de trabajo, con datos recopilados para diseñar los cálculos de disponibilidad de potencia en potencia real a aplicarse en la planta, diseño de software específico para ordenar la interface y para el control del variador de velocidad que actúa sobre el motor de la bomba de alta presión. Como resultado el autor estableció a través de la simulación de los datos analizados el modo y funcionamiento en función de trabajo de la RO Osmosis inversa, previamente sometida a ensayos para realizar la prueba y error de la metodología, utilizando membranas

comerciales, operando a diferentes presiones y velocidades, para la posterior aplicabilidad en la planta experimental OPRODES.

Asegurado el objetivo de suministro de energía, el punto a seguir fue diseñar una planta de Osmosis Inversa que tenga una gran flexibilidad de trabajo conforme a los modos de funcionamiento estudiados para la planta piloto y las variables establecidas, especialmente la funcionalidad del variador de velocidad, la capacidad de adaptación de la membrana, la actuación de la bomba de alta presión. Se hizo un análisis de sensibilidad de funcionamiento de la planta con la aportación de las potencias obtenidas de la simulación de los sistemas de energías renovables; aportaciones de día, mes y estación con promedios de potencia mala, buena y óptima, con las respectivas paradas y arranques y actuando entre presiones de 35 bar hasta 80 bar con cambios en los rpm aportados en períodos de tiempo inicialmente cada minuto (los primeros tres meses) y cada 5 minutos los otros 3 meses posteriores. Para el caso de la investigación planteada, el diagrama operativo del Campo Cicuco, utiliza el gas extraído para la auto generación de energía, lo que permite reducir el valor de Opex en cuanto el consumo energético utilizado los equipos existe.

Jaime & Pico (2009) en su trabajo de grado titulado “Diseño de la planta de Tratamiento de Agua residuales y de Producción evaluando las diferentes alternativas Nacionales y Extranjeras aplicación Campo Colorado” permite identificar las técnicas y equipos apropiados para el manejo de aguas residuales en la industria petrolera, para su disposición final, para el caso particular del autor Campo Colorado, el agua residual es vertida a un cuerpo de aguas superficiales, dicha agua debe cumplir con los parámetros regulados por la normativa legal vigente para realizar su disposición y causar la menor afectación al afluente y a la biota acuática.

Para ello Jaime & Pico (2009) proponen implementar una prueba piloto de Micro burbuja NEW DIAF que permite realizar pretratamiento a las ARI en los pozos Llanito, Suria, Payoa y Arauca, pozos productores, y remover los parámetros sobresaturados, dicha prueba se fundamenta en la utilización lechos filtrantes de cascara de nuez de la palma africana, que permite la disminución de los parámetros SST, G&A, y el fenoles a través de dosificación de químico, como fase final del tratamiento proponen la implementación de las técnicas de remoción combinada in situ electrodiálisis y Osmosis Inversa, previamente evaluando las condiciones operativas y la viabilidad económica existentes del Campo Colorado. Teniendo en cuenta el enfoque del autor este proyecto de investigación planteado, propone de la implementación una de las técnicas propuestas, bajo las mismas condiciones operativa, menor consumo de energía, menor costo en la compra de insumos y el grado de eficiencia de una de las técnica es del 99%, ya que a través de la implementación de lechos filtrantes y oxigenación continua, se puede disminuir los parámetros como SST, GyA, Cloruros, fenol y barios entre otros.

Marco Teórico

Agua de producción

Término usado en la industria petrolera para describir el agua que se produce junto con el petróleo y el gas. Los yacimientos de petróleo y gas tienen capas con agua natural (agua formada) que yace debajo de los hidrocarburos. Los yacimientos petrolíferos contienen generalmente grandes cantidades de agua, al contrario que los yacimientos de gas. Para lograr una máxima recuperación de petróleo en los pozos, se inyecta agua adicional dentro del pozo, que obliga al petróleo a salir a la superficie. Estas dos aguas, la producida y la inyectada, acaban saliendo a la superficie junto con el petróleo y, a medida que el pozo de petróleo se empobrece, la proporción de agua producida con el petróleo aumenta.

De manera más detallada, la producción de hidrocarburos y agua de Campo Cicuco corresponde a la formación geológica Ciénaga de Oro, en su intervalo superior conforma una zona de generación de hidrocarburos en el área centro-sur de la cuenca del Plato, hacia el sector más profundo, el cual se extiende entre los pozos Apure-1 y 2 (noroccidente), Flor del Monte (suroccidente), Pijiño-1 (sur) y El Castillo-1. En el sector más profundo de esta zona de generación se espera que las rocas estén hacia el final de la ventana de generación de hidrocarburos en fase de expulsión de hidrocarburos gaseosos.

Agua residual

Son las aguas que proceden de cualquier actividad industrial en cuyo proceso se utilice el agua ya sea de producción, transformación o manipulación, incluyéndose los líquidos residuales,

aguas de proceso y aguas de drenaje. Cada tipo de actividad industrial, según el proceso, vierte un agua residual caracterizada por una contaminación tipo determinada.

Ciclo del agua Residual Industrial de Producción

El Tratamiento de agua producida junto con la evaluación técnica del yacimiento es el análisis integrado de rentabilidad, productividad y factor de recobro de un campo petrolero. En la Figura 1 se observa el papel que desempeña el proceso de producción de petróleo, la formación productora es barrida por el agua, desplazando al hidrocarburo y generando el flujo, este proceso es exitoso hasta el punto donde la producción de petróleo en superficie disminuye y aumenta la de agua, es decir, aumenta el corte de agua, y los sistemas de tratamiento colapsan su capacidad operacional, posteriormente el agua es separada del crudo y muchas veces se opta por reinyectarse para mantener la presión de los yacimientos como plan técnico de aprovechamiento.

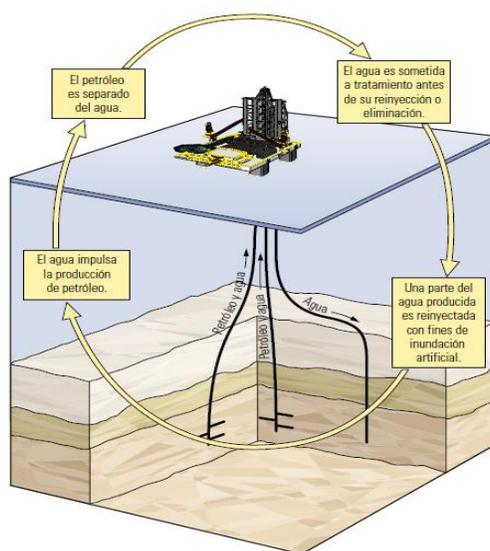


Figura 1 Ciclo del Agua Residual Industrial de Producción

Fuente: Richard (2010)

Sistema de agua en un campo Petrolero Maduro

En la Figura 2, se muestra la complejidad del sistema de agua en un campo petrolero maduro como Campo Cicuco. El agua forma parte integrante, y a menudo necesaria, del proceso de producción. Durante la producción, el petróleo es barrido del yacimiento y es reemplazado por agua natural o inyectada. Este proceso raramente es uniforme, la heterogeneidad de la formación puede conducir la incursión prematura de agua y a problemas relacionados con el agua de fondo de pozo. Los pozos de producción e inyección son vigilados rutinariamente y manejados para minimizar la relación agua/petróleo, maximizar la eficiencia de barrido vertical y optimizar la producción de petróleo. Los sistemas de superficie pueden ser complejos y deben ser diseñados para manejar y tratar los volúmenes de agua que entran y salen del sistema de producción. La calidad del agua descargada al medio ambiente, eliminada por métodos convencionales o desviados para ser reutilizada como agua de inyección del yacimiento y para otras aplicaciones alternativas, es controlada y vigilada rutinariamente.

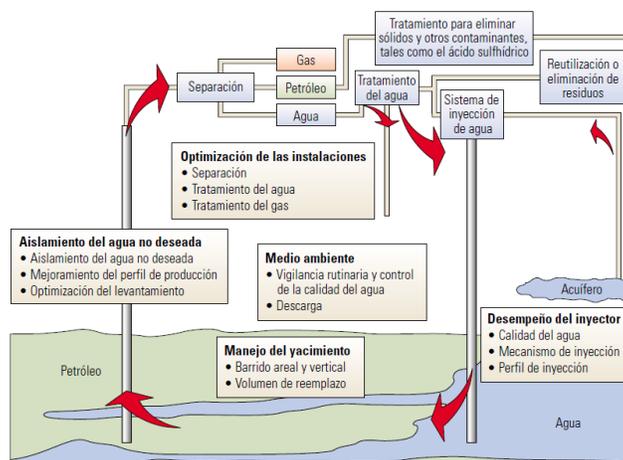


Figura 2 Sistema del manejo de Agua de un campo petrolero maduro

Fuente: Richard (2010)

Características fisicoquímicas del agua proveniente de los acuíferos subterráneos

Caracterización del Agua Residual Industrial de Campo Cicuco.

Las aguas de acuíferos subterráneos poseen cierta característica de acuerdo a la cuenca de su interés, lo que hace que dicha agua de producción será separada con ese tipo de características petrofísicas para el caso puntual la Cuenca del Valle Inferior del Magdalena Medio posee las siguientes características.

Tabla 1 *Propiedades Petrofísicas – Campo Cicuco*

Parámetros	Caliza	Clásticos
Áreas (acres)	6709	4769
Volumen (acre-pie)	440840	153783
Porosidad prom. (%)	10	18,9
Permeabilidad (md)	1,5	1,5
Swc (%)	30	30

Fuente: Plata (2014)

Tabla 2 *Propiedades de los Fluidos*

Parámetros	Valor
Temperatura de yacimiento	185
Presión inicial (psl) a 8000 ft	4470
Presión de burbuja (psl) a 8000 ft	3710
Gravedad API	43.8
Salinidad cl – 1 (ppm)	13500
Factor volumétrico @ Py (RBL/STB)	1.879
Factor volumétrico @ Pb (RBL/STB)	1.916
Rs (SCF/STB)	2037
Viscosidad (cp) a 3710 psi	0.16
Mecanismo de producción	Gas en solución
Sistema de levantamiento	Gas lift
Tipo de fluido	Petróleo volátil

Fuente: Plata (2014)

Después de analizar los resultados de los monitoreos ambientales realizados por la operación a través de comparación de la calidad del agua con lo exigido por la resolución 0631 de 2015, se

puede evidenciar que el parámetro de Cloruros (7366 mg/L) de las Aguas de Vertimiento al Río Chicagua se encuentra por fuera de los rangos admisible parámetros exigidos. Ver Tabla 7.

Las posibles variables de incidencia de la carga contaminante son:

- Características propias del agua proveniente del yacimiento.
- Presencia de Bacterias Sulfato reductoras en las aguas provenientes de la exploración y explotación petrolífera.
- Baja eficiencia en la aireación del volumen contenido en las piscinas.
- Acidificación del agua por el tratamiento químico para control de Bario.
- Utilización de compuestos derivados durante el proceso de tratamiento.

Tabla 3 Caracterización Aguas residuales Industriales punto de vertimiento río Chicagua 2016, comparación Resolución 631 de 2015.

Parámetros	Unidades	Técnica analítica	Punto de vertimiento al Río Chicagua día 3	Res. 0631 de Minambiente 2015. Art. 11 – Actividad de Hidrocarburos
			Código 11044	Producción (UPSTREAM)
Hora	h.		10:30 – 16:30	N.E.
Temperatura ambiente	°C	Termométrico	36,1	N.E.
Temperatura muestra	°C	Termométrico	32,73	40,00
pH	Unidades	Electrométrico	6,72	6,00 – 9,00
Conductividad eléctrica	µS/cm	Electrométrico	33767	N.E.
Oxígeno disuelto	mg/L O ₂	Luminiscencia	3	N.E.
Caudal	L/s	Volumétrico	*	N.E.
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	Volumétrico	420	Análisis y reporte
Dureza total	mg/L CaCO ₃	Volumétrico – EDTA	9490	Análisis y reporte
Cloruros	mg/L Cl ⁻	Argentométrico	7366	1 200,000

Sulfuros	mg/L S-2	Yodométrico	<1,00	1
Solidos disueltos totales	mg/L	Electrométrico	17453	N.E.
Solidos suspendidos totales	mg/L	Secado a 103 – 105 °C	57	50
Solidos totales	mg/L	Secado a 103 – 105 °C	17600	N.E.
DBO5	mg/L O ₂	Incubación 5 días electrodo de membrana	255	60
DQO	mg/L O ₂	Reflujo cerrado – volumétrico	412	180
Bario	mg/L	E.A.A.	<0,60	Análisis y reporte
Cadmio	mg/L	E.A.A.	<0,010	0,1
Cromo Total	mg/L	E.A.A.	<0,11	0,5
Cromo Hexavalente	mg/L	Colorimétrico	<0,030	N.E.
Plomo	mg/L	E.A.A.	<0,050	0,1
Vanadio	mg/L	E.A.A.	<0,10	1
Zinc	mg/L	E.A.A.	<0,12	3
Grasas y Aceites	mg/L	Partición/infrarrojo	1,84	15
Hidrocarburos no Polares	mg/L	Cromatografía de gases – FID	1,2	N.E.
Compuestos Fenólicos	mg/L	Cromatografía de gases	<0,010	N.E.
Compuestos Orgánicos Volátiles	mg/L	Cromatografía de gases – FID	<0,012	N.E.

Fuente: MCS (2016)

Propiedades fisicoquímicas del agua residual industrial

Propiedades físicas

Es todo aquella característica que se puede modificar sin alterar su composición molecular, en este caso el compuesto H₂O agua.

“El agua es un líquido inodoro e insípido. A la presión atmosférica (760 mm de mercurio), el punto de fusión del agua pura es de 0 °C y el punto de ebullición es de 100 °C, alcanza su densidad máxima a una temperatura de 4 °C (1g/cc)”.

Temperatura: la temperatura es una unidad medida de calor de un sistema o partícula, para el caso de agua de producción, la temperatura influye en la generación de escamas, solubilidad de gases y precipitación de compuestos, que componen un cuerpo en un instante de tiempo.

De acuerdo al muestreo aleatorio realizado en los diferentes puntos de monitoreos, se puede observar que la temperatura promedio en el punto de vertimiento Río Chicagua cuerpo receptor, tiene una temperatura de 36.1 °C, lo que concluye que cumple con los valores máximos permisibles 40°C según la Resolución 0631 de marzo de 2015.

Conductividad: unidad de medida que permite cuantificar la capacidad que tiene el agua para transmitir el paso de la corriente eléctrica a través de sus moléculas, debido a la presencia de iones disueltos es directamente proporcional con la concentración de sales y sólidos totales disueltos (TDS) o (STD) con la cuantificación de la solubilidad de sustancias tales como carbono, hidrogeno, oxígeno, nitrógenos, fosforo y azufre, se puede determinar si el agua posee cierto grado de resistividad debido a que no forma soluciones acuosas lo contrario de los compuestos inorgánicos que aumentan la conductividad del agua.

La importancia de verificación y control para el tratamiento del agua de producción permite identificar la concentración de sales disueltas, para tratamientos posteriores, el parámetro de salinidad medido en el número de gramos de cloruro de sodio por kilogramo de muestra expresado en partes por mil, el agua producida.

De acuerdo al análisis del parámetro realizado en los monitoreos ambientales, se deduce que el agua vertida al cuerpo de agua Río Chicagua presenta una conductividad alta ya que los niveles de sales disueltas (Cl-) es de 7366 y se encuentra dentro del rango de agua salobre o

salmuera, lo que indica el incumplimiento del valor máximo permisible para consumo humano 250 ppm y vertimiento a cuerpo de aguas superficiales 1200 ppm según la normativa legal ambiental Resolución 0631 de 2015.

Gravedad específica: la gravedad específica es la comparación que existe entre la densidad del fluido de interés y la densidad de un fluido de referencia o patrón, normalmente se utiliza el agua pura es el fluido de referencia a 60 °F y 14,69 psia. Esta propiedad está dada por la Ecuación 1. El agua en presencia de hidrocarburo, presenta una disminución en la gravedad específica a diferencia de los SD que hace que aumente.

Ecuación 1 *Fluido*

$$GE = \frac{\rho_{\text{liquido}}}{\rho_{\text{agua @60°F y 14,7 psi}}}$$

Fuente: Kurt (2006)

Sólidos disueltos totales: según Romero (1996) es una medida que permite la suma de aniones y cationes de materia que permanece como residuo después de evaporación y secado a 103°C, este valor incluye tantos materiales disueltos como suspendidos que se encuentran en el agua.

También se podría decir que son todos los residuos sólidos filtrables a través de una membrana que permita la separación que tiene poros de 2µm o menos de diámetro.

Propiedades químicas: Son aquellas características químicas presentes en el agua, y que al ser modificada alteran su estructura y composición.

Contenido de grasas y aceites: según Romero (1996), las grasas y aceites se cuantifican la cantidad de emulsiones presentes en el agua e identificar la presencia de taponamiento por aceites para determinar la necesidad del pre-tratamiento, la eficiencia de los procesos de remoción y el grado de contaminación debido a estos compuestos.

En el caso puntual del proceso de estudio, este parámetro es tratado previamente a través de procesos físico según monitoreo ambiental se cumple con el valor máximo permisible 15 mg/L ya que este se encuentra en 1.84 mg/L en el punto de vertimiento.

Hidrocarburos totales: los hidrocarburos totales son una mezcla de productos químicos compuestos principalmente de hidrógeno y carbono que provienen originalmente del petróleo crudo. Esta propiedad se determina por medio del método estándar 5520- F y el método SM-5520-C.

Demanda bioquímica de oxígeno: es el oxígeno necesario para oxidar la materia mediante oxidación por dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4). La demanda bioquímica de oxígeno permite medir a través de la descomposición de la materia orgánica, el grado de contaminación que se va a generar en los afluentes hídrico al realizar el vertimiento de las aguas industriales. Para el caso del área de estudio según la resolución 0631 de 2015 no cumple con los niveles máximos permisibles ya que este se encuentra 255 mg/L O^2 y el valor máximo es 60 mg/L O^2 . Y una Demanda química de oxígeno para el proceso de UPSTREAM Producción, el DQO para en el punto de vertimiento no cumple con los niveles máximos permisibles ya que este se encuentra 418 mg/L O^2 y el valor máximo es 180 mg/L O^2 .

pH: potencial de hidrógeno o potencial de hidrogeniones (pondus hydrogenii). La sigla del latín pondus, n. = peso; potentia, f. = potencia; hydrogenium, n. = hidrógeno). Este término fue acuñado por el bioquímico danés S. P. L. Sørensen (1868-1939), quien lo definió en 1909 como el opuesto del logaritmo en base 10 o el logaritmo negativo, de la actividad de los iones hidrógeno.

Medida de acidez o alcalinidad de una disolución: El pH indica la concentración de iones hidrógeno $[H]^+$ presentes en determinadas disoluciones, este cuantifica qué tan ácida o alcalina es una sustancia, donde los ácidos fuertes tienen una alta concentración de hidronio y los ácidos débiles tienen concentraciones bajas,

La importancia del pH en el tratamiento de agua de producción radica en determinar la tendencia incrustante o corrosiva del agua que se está tratando, y con esto establecer si los equipos y tuberías deben llevar algún recubrimiento especial o si se le debe adicionar algún inhibidor de corrosión o incrustación a la corriente de agua. Esta tendencia se establece por medio de índices como el de Langelier.

De acuerdo a lo antes mencionado el agua residual industrial proveniente de la separación del crudo extraído del Campo Cicuco, presenta un pH promedio de 6.72 de acuerdo al último monitoreo realizado, lo que indica que dicho parámetro cumple con el valor máximo permisible de 6 – 9 según la Resolución 0631 del 2015.

Aniones: iones con carga negativa presente en el agua. El análisis de cloruros determina una medida específica en salinidad en el agua producida por la industria del petróleo.

Cloro: el ion Cloruro es el principal componente de las aguas extraídas de campos petroleros, la mayor fuente de cloruros es el NaCl índice de salinidad que según sea la concentración puede determinarse como:

Agua Dulce 0 – 2000 ppm

Agua Salobre de 2000 a 5000 ppm

Agua Salada 5000 a 40.000 ppm

Salmuera > 40.000 ppm

Alcalinidad: la alcalinidad es la medida de la capacidad de una sustancia para neutralizar un ácido, equivalente a su contenido de iones OH. Esta propiedad está directamente relacionada con la concentración de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos.

Carbonatos y bicarbonatos: la alcalinidad del agua es debido a la salinidad de ácido carbónico bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos. Este influencia directamente en la coagulación y ablandamiento del agua así como la prevención de la corrosión.

Sulfatos: sales procedente de rocas sedimentarias, que derivan del ácido sulfúrico (H_2SO_4) que reacciona principalmente con base o con metales, el agua naturalmente posee de 2 a 150 ppm y el agua de mar de 150 a 3000 ppm, de acuerdo a su procedencia el agua de yacimientos en función del calcio podría impartirle un carácter ácido al agua, siendo este el sulfato de calcio y magnesio los que constituye la dureza del agua y le da la característica de un sabor amargo al agua.

Dureza total: la dureza es la concentración de iones de sales compuestas por elementos metálicos no alcalinos como calcio, magnesio, estroncio y bario presentes en el agua.

Generalmente la dureza representa solamente la concentración de iones de calcio, magnesio y bicarbonato expresada en carbonato de calcio (CaCO_3), los cuales son proporcionales a la formación de incrustaciones calcáreas. La dureza se determina por medio de la Ecuación 2.

Ecuación 2 Dureza

$$\underline{Dureza\ total = Dureza\ por\ Ca + Dureza\ por\ Mg}$$

El agua se clasifica según su dureza en muy suave de 0-15 ppm de CaCO_3 , suave de 16 a 75 ppm de CaCO_3 , media con un contenido de CaCO_3 de 76 a 100 ppm, dura de 101-150 ppm de CaCO_3 y muy dura con contenidos mayores a 150 ppm de CaCO_3 .

Cationes: es la sumatoria de Iones de carga positiva presente en el agua, las concentraciones de cationes es una medida específica de salinidad predominante en las aguas procedentes de la industria petrolera, entre ellas las predominantes para dicha agua son sodio, magnesio y calcio.

Tratamiento de aguas residuales industriales

Procesos fisicoquímicos y biológicos que se realiza a las aguas provenientes del aprovechamiento en una actividad antrópica con el fin de eliminar los contaminantes presente en el agua efluente para apta para el consumo humano o sub proceso.

Unos de los contaminantes relevantes en las aguas residuales industriales de hidrocarburo proveniente de la separación del petróleo – agua son las sales disueltas entre ellas el cloruro, para ello se observaran las diferentes alternativas de remoción relacionadas a continuación:

Alternativas de procesos para la remoción y/o la disposición de cloruros.

- Inyección (injection disposal)
- Electrodiálisis y electrodiálisis inversa
- Evaporación
- Osmosis inversa
- Intercambio iónico

Inyección (Injection Disposal).

La inyección como medida de disposición final del agua de producción, también conocida como *Injection disposal*, es el conjunto de acciones, equipos y operaciones que se requieren para confinar el agua en una formación de un yacimiento que garantice la permanencia del fluido inyectado, sin generar problemas operativos en el campo petrolero o contaminación de aguas subterráneas circundantes. El éxito de esta técnica se logra con un estudio completo del yacimiento y de la formación receptora para confinar el agua. De este estudio depende la vida útil del proyecto, la capacidad de inyectividad de la formación, la presión de fractura y la presión de inyección máxima a trabajar. En segunda instancia es necesario definir el campo y el pozo, o pozos, que serán convertidos a inyectoras, regularmente con este propósito se utilizan pozos secos, abandonados, o con muy baja producción.

Para asegurar que las características del agua de reinyección sean óptimas es indispensable realizar procesos de tratamiento primario, secundario y terciario, que permitan remover las grasas y aceites, sólidos suspendidos, materia orgánica, reducir el tamaño de las partículas mediante filtración y aplicar aditivos como los secuestrantes de oxígeno. Adicionalmente se usan

biosidas para eliminar la posibilidad de crecimiento de bacterias que causan taponamiento de los poros de la formación y problemas de corrosión en las tuberías.

Electrodialisis (ED) y Electrodialisis Inversa (EDR).

Es un proceso de separación electroquímica en el cual los iones se transfieren a través de una membrana de intercambio iónico por medio de un voltaje de corriente continua (DC). El proceso utiliza una fuerza impulsora para transferir especies iónicas del agua fuente a través del cátodo (iones cargados positivamente) y el ánodo (iones cargados negativamente) a una corriente de aguas residuales de concentrado, creando una corriente más diluida (Ver Figura 3):

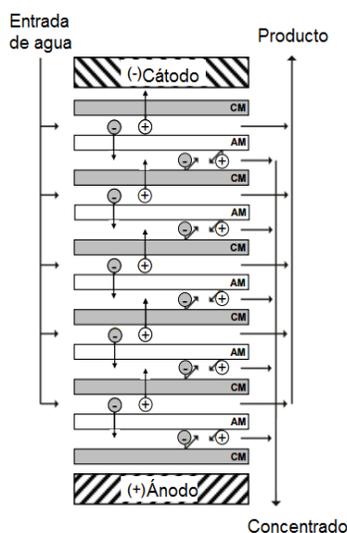


Figura 3 Principio de la Electrodialisis

Fuente: Valero, Angel, & Ramón (2011)

La tecnología ED elimina selectivamente los sólidos disueltos, basándose en su carga eléctrica, transfiriendo los iones de agua salobre a través de una membrana de intercambio iónico semipermeable cargada con un potencial eléctrico. El agua de alimentación se separa en los siguientes tres tipos de agua.

- Agua producto, que tiene una aceptable baja conductividad y nivel de TDS;
- Salmuera, o concentrado, que es el agua que recibe los iones de agua salobre; y
- Agua de alimentación del electrodo, que es el agua que pasa directamente sobre los electrodos que crean el potencial eléctrico.

EDR es una variación en el proceso ED, que utiliza la inversión de la polaridad del electrodo para limpiar automáticamente las superficies de la membrana. EDR funciona de la misma manera que ED, excepto que la polaridad de la corriente continua se invierte de dos a cuatro veces por hora. Cuando se invierte la polaridad, los compartimentos de agua de fuente diluida y de concentrado también se invierten y también lo son las reacciones químicas en los electrodos. Esta inversión de polaridad ayuda a prevenir la formación de incrustaciones en las membranas. La configuración es muy similar a un sistema ED excepto por la presencia de válvulas de inversión.

Sin embargo, es importante resaltar que estas técnicas están limitadas por la gran cantidad de energía que consumen o requieren para producir la corriente constante que impulsa la purificación y bombea el agua a través del sistema y por la dificultad que se presenta para el cambio de las membranas y resinas. Es por esto, que no son recomendados para aguas con más de 5000 mg/L de cloruros ya que el gasto de energía y membranas en el proceso es directamente proporcional a la cantidad de sales a separar.

Evaporación.

La evaporación es un proceso natural de transformación de agua en forma líquida en vapor de agua; la evaporación depende de la humedad local, la temperatura y el viento. En climas más secos por lo general, es más favorable la evaporación.

El método consiste en la vaporización del líquido contenido en una solución (lodo, fango, lechada, etc.) para retener la concentración del material sólido, a base de aplicar una potente fuente generadora de calor, puede ser natural o inducida. El proceso es válido cuando uno de los componentes es mínimamente volátil. En muchos casos, el líquido que se evapora es agua, y se utiliza esta tecnología para concentrar los componentes no volátiles.

Evaporación térmica.

La evaporación puede ser térmica o mecánica. La evaporación térmica es un proceso físico cercano a la destilación, que consiste en pasar de forma gradual un líquido a estado gaseoso mediante la aplicación de la suficiente energía en forma de calor, para vencer la tensión superficial del mismo. Como método para separar el agua de los componentes con los que ésta se encuentra mezclada, la evaporación térmica puede ser uno de los más efectivos, pero los altos costos de energía de la evaporación simple a presión atmosférica, lo convierten en un proceso inaceptable económicamente.

La industria trabaja con varias formas de evaporación y cada técnica busca la mayor eficiencia, de modo que se mejoren las posibilidades de ser aplicada en los diferentes sectores.

La evaporación térmica es una técnica que en la industria petrolera colombiana no se ha implementado a gran escala, ya que los costos de la energía que requiere son muy elevados. Así mismo, teniendo en cuenta que actualmente existen otras técnicas para la reutilización y/o disposición del agua y que el exceso de gas en los campos petroleros es utilizado para generar energía eléctrica, la evaporación térmica queda como un sistema poco atractivo, de alto costo, que las empresas no consideran entre sus opciones.

Evaporación por estanque y mecánica.

Uno de los métodos más sencillos es la evaporación por estanque, la cual requiere un espacio relativamente grande diseñado para evaporar eficientemente el agua mediante la energía solar. Están diseñados para prevenir la infiltración subterránea de agua o la migración hacia abajo del agua dependiendo de la calidad del agua producida. Es una tecnología favorable para climas cálidos y secos debido al potencial de altos índices de evaporación. Los estanques de evaporación son típicamente económicos y se han empleado para el tratamiento de agua producida en el sitio y fuera del sitio. Los estanques suelen estar cubiertos con redes para prevenir problemas potenciales a las aves acuáticas migratorias causadas por contaminantes en el agua producida. En la Figura 4 se puede ver los estanques de evaporación al aire libre.



Figura 4 Estanques de evaporación

Fuente: CLEVERLY (2014)

La evaporación mecánica se basa en la atomización o pulverización del agua a temperatura ambiente, haciendo pasar la misma de forma controlada por un rotor que gira a determinadas revoluciones por minutos impulsando el agua contra una platina con orificios de diámetros controlados, donde el agua impacta y sale disparada por unas boquillas que la lanzan al medio en tamaños promedio de 150 micras, aproximadamente a 4 metros de altura, formando una nube o neblina, tan fina que al entrar en contacto con la masa de aire con bajo contenido de humedad de la atmosfera, se integra rápidamente a la misma. (Ver figura 5).



Figura 5 Evaporadores mecánicos para la industria del petróleo

Fuente: CLEVERLY (2014)

La evaporación se ha usado durante muchos años. En Alberta, se permite colocar hasta 100 barriles/mes por instalación en una piscina, siempre que ésta sea impermeable y lo suficientemente grande como para almacenar la posible lluvia, y permitir su evaporación. Evidentemente, las restricciones de volumen hacen que este método de eliminación sea poco práctico, excepto para situaciones a corto plazo, o para casos en que los volúmenes de producción y los volúmenes de agua esperados sean extremadamente bajos y las consideraciones económicas indiquen la bondad de la evaporación o el abandono del pozo.

Osmosis Inversa (RO):

La ósmosis inversa es un proceso en el que el agua que contiene sales inorgánicas (minerales), sólidos suspendidos, compuestos orgánicos solubles e insolubles, microorganismos acuáticos y gases disueltos (denominados colectivamente constituyentes de agua de fuente o contaminantes) se somete a presión a través de una membrana semipermeable, esta se refiere a una membrana que selectivamente permite que el agua pase a través de ella a una velocidad mucho más alta que la velocidad de transferencia de cualquier componente contenido en el agua. Dependiendo de su tamaño y carga eléctrica, la mayoría de los constituyentes del agua son retenidos (rechazados) en el lado de alimentación de la membrana RO mientras que el agua purificada (permeado) pasa a través de la membrana.

Las membranas RO pueden rechazar partículas y sólidos disueltos de prácticamente cualquier tamaño. Sin embargo, no rechazan bien los gases, debido a su pequeño tamaño molecular. Por lo general, las membranas RO eliminan más del 90 por ciento de compuestos de 200 daltons (Da) o más. Un Da es igual a $1,666054 \times 10^{-24}$ g. En términos de tamaño físico, las membranas RO pueden rechazar sólidos mayores que 1 (Angstrom) Å. Esto significa que pueden eliminar prácticamente todos los sólidos suspendidos, protozoos (es decir, Giardia y Cryptosporidium), bacterias, virus y otros patógenos humanos contenidos en el agua fuente.

Mientras que las membranas RO pueden retener sólidos en partículas y disueltos, están diseñadas para rechazar principalmente compuestos solubles (iones minerales). La estructura y configuración de las membranas RO es tal que no pueden almacenar y retirar de su superficie grandes cantidades de sólidos suspendidos. Si se deja en el agua de fuente, las partículas sólidas se acumularán y rápidamente tapan la superficie de las membranas RO, no permitiendo que las

membranas mantengan un proceso continuo de desalación en estado estacionario. Por lo tanto, los sólidos en suspensión (partículas) contenidos en el agua de fuente utilizada para la desalinización tienen que ser eliminados antes de que alcancen las membranas RO.\

Principio de la osmosis inversa.

La tecnología de la ósmosis inversa se basa en el proceso de ósmosis, un fenómeno natural que ocurre cuando, a través de una membrana semipermeable, el agua fluye desde la solución de menor salinidad hasta otra de mayor concentración salina. Es un fenómeno que tiene lugar en diversos procesos naturales como, por ejemplo, en la entrada de agua a través de la membrana celular de los seres vivos.

Un sistema que presenta dos concentraciones separadas por una membrana intentará alcanzar el equilibrio natural. El flujo del solvente se da espontáneamente hacia la concentración más concentrada y se detendrá cuando se alcance un equilibrio entre ambas concentraciones. La fuerza natural que provoca ese movimiento se conoce como presión osmótica y está relacionada con la concentración de sales en el interior de ambas soluciones.

En la Figura 6 se puede observar como en el proceso natural de la Osmosis, la solución diluida ejerce una presión sobre el sistema cuando el solvente intenta pasar por la membrana semipermeable hacia la solución concentrada. Se denomina Osmosis Inversa al proceso contrario, cuando se aplica una presión controlada a la solución concentrada y se hace pasar el solvente hacia la solución diluida. La presión natural ejercida en el proceso de la osmosis se denomina presión osmótica (π) y se da por la diferencia de altura a ambos lados de las soluciones cuando se alcanza el equilibrio.

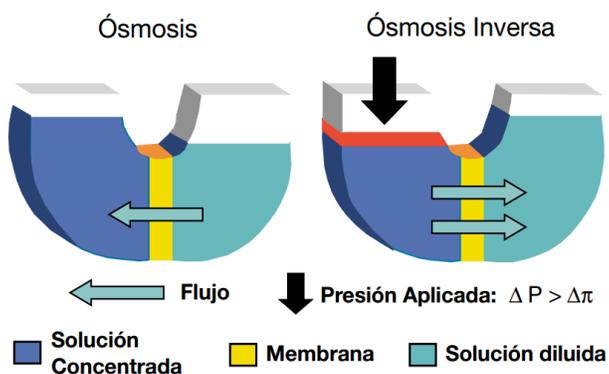


Figura 6 Esquemas de los fenómenos de ósmosis y ósmosis inversa

Fuente: Snoeyink (2003)

En el caso del fenómeno de la ósmosis, para una solución de agua pura (concentración $C_1=0$), la presión osmótica sería la diferencia de alturas que existiría entre ambos lados de la membrana cuando se alcanzase el equilibrio. La presión osmótica del agua pura se considera nula por convenio. Para el caso en que C_1 fuese distinta de 0, la diferencia de alturas cuando se alcanzara el equilibrio sería igual a la diferencia de las presiones osmóticas de las dos soluciones ($\Delta\pi = \pi_2 - \pi_1$). Si se aplica a la solución más concentrada (C_2) una presión (ΔP) superior a la diferencia de presiones osmóticas ($\Delta\pi$), el flujo del líquido se daría de la solución más concentrada a la más diluida, alcanzándose el proceso de osmosis inversa.

La diferencia de presión ($\Delta\pi$) está determinada por la cantidad total de sólidos disueltos al lado concentrado de la solución. Entre mayor sea la cantidad total de sólidos disueltos, mayor es la presión osmótica. Para determinar el valor de la presión osmótica se cuenta con la ecuación de Van't Hoff (Ecuación 3), cuya expresión tiene la forma:

Ecuación 3 Presión osmótica

$$\pi = iCRT$$

π = Presión osmótica.

C = concentración molar del soluto.

i = número de iones formados dada una disociación de la molécula del soluto.

R = Constante de los gases.

Descripción del proceso: El esquema conceptual mostrado en la Figura

X para la ósmosis inversa, desde el punto de vista industrial, se representa en la Figura 7.

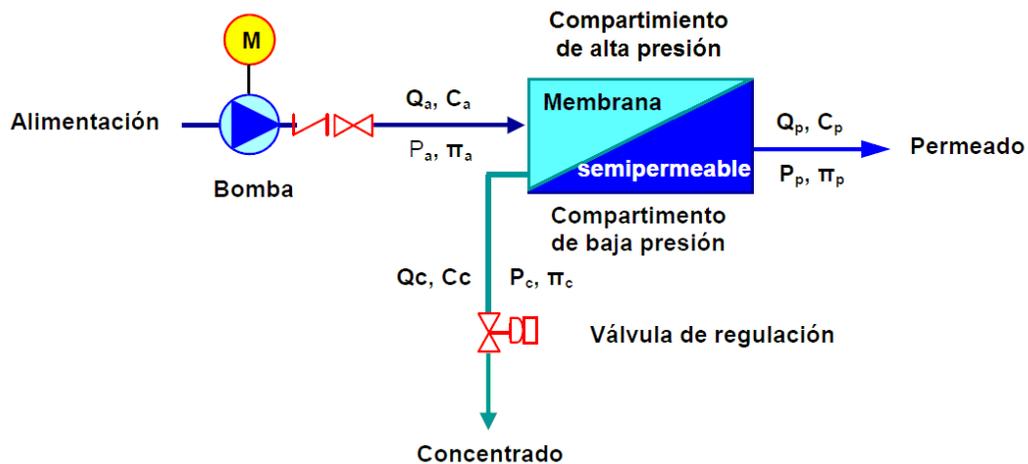


Figura 7 Esquema del proceso industrial de la ósmosis inversa

Fuente: García (2013)

El esquema básico del proceso requiere de una bomba que envía la alimentación hacia una membrana semipermeable para mantener elevada la presión en uno de los lados, con lo que una parte del solvente y una cantidad muy pequeña de soluto atraviesan la membrana.

A continuación, se definen cada una de las soluciones representadas en la Figura 7:

Alimentación: Es la solución que llega a las membranas de ósmosis inversa. La nomenclatura que se utiliza para esta solución es:

- Caudal: Q_f
- Concentración: C_f
- Presión hidráulica: P_f
- Presión osmótica: π_f

Producto o permeado: Es la solución que se obtiene al otro lado de la membrana, después de atravesarla. La nomenclatura utilizada es:

- Caudal: Q_p
- Concentración: C_p
- Presión hidráulica: P_p
- Presión osmótica: π_p

Concentrado: Es la solución más concentrada que no puede atravesar la membrana. También se le suele llamar rechazo o salmuera de rechazo. La nomenclatura utilizada es:

- Caudal: Q_c
- Concentración: C_c

- Presión hidráulica: P_c
- Presión osmótica: π_c

Así mismo, las variables y ecuaciones involucradas en el proceso son las siguientes:

Coefficiente de permeabilidad de la membrana (A).

Es el volumen de solvente (agua) que atraviesa la membrana por unidad de superficie, unidad de tiempo y unidad de presión a temperatura y salinidad, determinadas y constantes. Suele medirse en $m^3 / (m^2 \cdot \text{día} \cdot \text{bar})$.

Factor de recuperación (Y).

El factor de recuperación es el porcentaje de permeado que se obtiene a partir de determinado caudal de alimentación. Por tanto, es el cociente entre el caudal de permeado y el caudal de aportación que llega a las membranas, está expresado en porcentaje (Ecuación 4).

Ecuación 4 *Factor de recuperación*

$$Y = 100 \cdot \frac{\text{Caudal de permeado}}{\text{Caudal de aportación}} = 100 \cdot \frac{Q_p}{Q_f}$$

Se llama conversión al porcentaje de recuperación expresado en tanto por uno, se representa por (Ecuación 3):

Ecuación 5 *Conversión*

$$y = \frac{Q_p}{Q_f}$$

Factor de rechazo de sales (R): el rechazo de sales de las membranas y de un sistema de membranas, es el factor que determina la calidad final del permeado de un sistema de ósmosis inversa. Con lo cual es el parámetro más importante de la membrana y se basa en el proceso de fabricación y en los polímeros que forman la membrana.

La fórmula que determina el factor de rechazo de sales (R) es:

Ecuación 6 *Factor de rechazo de sales*

$$R = 100 \cdot \frac{C_f - C_p}{C_f}$$

El rechazo de sales en tanto por uno (r) es:

$$r = \frac{C_f - C_p}{C_f} = 1 - \frac{C_p}{C_f}$$

Deduciéndose que:

$$C_p = (1 - r)C_a$$

Porcentaje de paso de sales (Ps): Es el cociente entre la concentración de sales en el permeado y en la alimentación. Está dada por:

Ecuación 7 *Porcentaje de paso de sales*

$$PS = 100 \cdot \frac{C_p}{C_f}$$

El paso de sales en tanto por uno es:

$$P_s = \frac{C_p}{C_f}$$

Realizando la sustitución de los valores en la ecuación se obtiene:

$$r = 1 - P_s$$

$$C_p = P_s \cdot C_f$$

Factor de concentración: Es el número de veces que se concentran las sales en el rechazo de la ósmosis inversa. Su valor es igual al cociente entre las concentraciones de sales en el concentrado y en la alimentación.

Ecuación 8 Factor de concentración

$$F_c = \frac{C_c}{C_f}$$

Ec. 11

Relación entre los distintos Parámetros: Considerando constante la densidad de las distintas soluciones, se pueden establecer las siguientes relaciones.

Ecuación 9 *Conservación del solvente*

Conservación del solvente: $Q_f = Q_p + Q_c$

Ecuación 10 *Conservación del soluto*

$$\text{Conservación del soluto: } Q_f C_f = Q_p C_p + Q_c C_c$$

$$Q_p = y Q_f$$

A partir de las ecuaciones anteriores:

$$Q_c = (1 - y) Q_f$$

$$C_c = \frac{1 - (1 - y)y}{1 - y} C_f$$

$$F_c = \frac{1 - (1 - y)y}{1 - y}$$

Características de la osmosis inversa.

El tratamiento por osmosis inversa reduce la concentración de *sólidos totales disueltos*, incluyendo una variedad de *iones*, metales y partículas muy pequeñas en suspensión como los asbestos. También remueve contaminantes orgánicos, algunos detergentes y pesticidas específicos. En la tabla 6 se detallan iones, partículas y microorganismos retenidos mediante el proceso de osmosis inversa.

En el tratamiento de cloruros, el proceso de osmosis inversa es el adecuado debido a su alto contenido de remoción de solidos disueltos, con una capacidad de remoción de un 90-99.5%. Actualmente en el mundo, el 60% de plantas de desalación son de osmosis inversa.

Tabla 4 Lista abreviada de iones, partículas y microorganismos retenidos mediante el proceso de osmosis inversa

Iones y metales	Compuestos orgánicos
Arsénico – Bario – Bicarbonato – Cadmio – Calcio - Carbonato – Cloruro – Cromo – Cobre – Fluoruro - Hierro – Plomo – Magnesio – Manganeso – Mercurio Nitrato – Potasio – Radio – Selenio – Sodio – Sulfato	Benzeno – Tetracloruro de carbono – Diclorobenzeno - Tolueno – Tricloroetileno
Partículas y microorganismos	Pesticidas
Asbestos – Cysts (protozoos) – bacterias – hongos	1,2,4- triclorobenzeno – 2,4-D – Atrazina – Endrin - Heptachlor – Lindane – Pentaclorofenol

El proceso de osmosis inversa tiene las siguientes características que lo hacen un buen método para la eliminación de cloruros:

- Permite remover la mayoría de los sólidos (inorgánicos u orgánicos) disueltos en el agua (99%).
- Proceso de purificación de forma continua.
- Tecnología simple, que no requiere de mucho mantenimiento.
- Es modular y necesita poco espacio, de acuerdo a los caudales deseados.

Intercambio Iónico.

Se conoce como intercambio iónico al cambio de iones entre un sólido (material de intercambio iónico o resina) y un líquido en el que no hay un cambio permanente en la estructura

del sólido. El intercambio iónico se usa en el tratamiento de aguas y también sirve como método de separación para muchos procesos en los que intervienen otros líquidos. Su principal campo de aplicación es el ablandamiento del agua empleada en los hogares, y la producción de agua blanda y desmineralizada en la industria: como por ejemplo en las centrales térmicas, refinerías, en la industria química, así como también en aplicaciones especiales como la síntesis química, investigación médica, procesos de la industria alimentaria, minería, agricultura y en una gran variedad de otras aplicaciones. La utilidad del intercambio iónico reside en la capacidad de usar y reutilizar el material de intercambio iónico mediante su regeneración

El intercambio iónico es un proceso unitario en el que los iones de las diferentes especies en disolución desplazan a los iones insolubles de un determinado material de intercambio. El uso más extendido de este proceso es el ablandamiento de aguas residuales industriales. en el que los iones sódicos de la resina catiónica de intercambio sustituyen los iones de calcio y magnesio presentes en el agua, reduciendo por lo tanto su dureza. Para la reducción de sólidos disueltos totales, es necesario utilizar tanto resinas de intercambio aniónico como resinas de intercambio catiónico. Primeramente, el agua residual se hace circular a través de un intercambiador de Cationes, en el que los iones positivos se sustituyen por iones hidrógeno. El efluente del intercambio catiónico se hace pasar por una resina de intercambio aniónico, proceso en el que los iones aniónicos se sustituyen por iones hidróxilo. Por lo tanto, los sólidos en suspensión se sustituyen por iones hidrógeno e hidróxilo que reaccionan para formar moléculas de agua (Ver Figura 8).

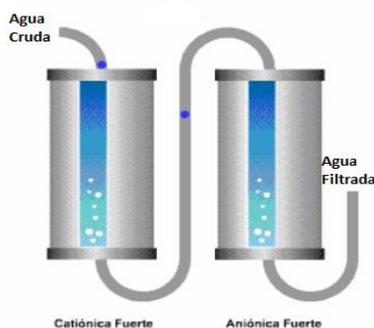


Figura 8 Esquema Intercambio Iónico

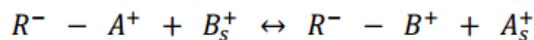
Fuente: autores

La eficacia de este proceso depende de diversos factores:

- La afinidad de la resina con los iones de la disolución.
- El pH del medio.
- La temperatura.
- La concentración de la disolución.
- La difusión (dimensión del ion, carga electrostática, temperatura, estructura y tamaño del poro de la resina).

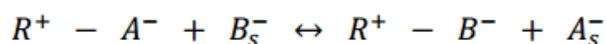
Fundamentalmente, el proceso de intercambio de iones consiste en sustituir en una disolución uno o varios de sus iones (los que resulta dañinos para el medioambiente) por otros que sean inocuos. No se trata de un simple paso de iones, unos en un sentido y otros en el contrario, a través de una superficie del sólido intercambiador, sino que el proceso se inicia por una adsorción a la que sigue una reacción química.

La retención de iones de carga positiva se da mediante el intercambio con iones de carga positiva de del intercambiador iónico, generalmente sólido, cargado negativamente. Dando lugar a la reacción de intercambio catiónico.

Ecuación 11 Intercambio catiónico

Donde R- representa al intercambiador catiónico, A+ al catión intercambiable del intercambiador y B+ s al catión intercambiable de la disolución que pasa por el sólido; por simplicidad se ha representado al catión como monovalente, pero puede tener cualquier carga.

La retención de iones de cargas negativas se da mediante el intercambio con iones de carga negativas de del intercambiador iónico, generalmente sólido, cargado positivamente. Dando lugar a la reacción de intercambio aniónico.

Ecuación 12 Intercambio aniónico

Donde R+ representa al intercambiador aniónico, A- al anión intercambiable del sólido y B- s al anión intercambiable de la disolución que pasa por el sólido; por simplicidad se ha representado al anión como monovalente, pero puede tener cualquier carga.

Tipos de resinas de intercambio iónico.

La mayor parte de los materiales de intercambio iónico que se utilizan actualmente en aplicaciones industriales son compuestos sintéticos denominados tradicionalmente resinas. Las resinas de intercambio se obtienen por copolimerización de estireno y vinilbenceno, o bien a partir de materiales acrílicos.

Las resinas de intercambio iónico se pueden clasificarse según su estructura química y las propiedades ácidas o básicas que exhiban sus grupos funcionales. Según lo anterior, se definen cuatro categorías de resinas:

- **Resinas catiónicas ácido fuerte:** se caracterizan por tener grupos sulfónicos $-SO_3^-$ como grupos funcionales. Los grupos sulfónicos se comportan como ácidos fuertes, que en disolución acuosa se presentan totalmente hidrolizados. Las resinas de esta categoría son monofuncionales, y sus propiedades químicas y físicas varían en función de la relación de copolimerización entre divinilbenceno y estireno, que oscila entre el 6 y el 16 %. Las resinas ácido fuerte atraen iones cargados positivamente, que intercambian por protones o sodio, dependiendo de su presentación en forma ácida o sal sódica.
- **Resinas catiónicas ácido débil:** Son resinas caracterizadas por la presencia del grupo carboxilo $-COO^-$ como grupo funcional. Retienen cationes en equilibrio con otros ácidos débiles en la disolución, como bicarbonatos, pero no pueden intercambiar iones que se encuentren en equilibrio con aniones de ácidos fuertes. Su regeneración es más fácil, alcanzándose tasas próximas a la regeneración máxima.
- **Resinas aniónicas base fuerte:** Llevan iones de amonio cuaternario en su estructura como grupos funcionales. Se unen a los aniones disueltos, liberando alcalinidad a la disolución. Se subdividen en dos clases, denominadas respectivamente Tipo 1 y Tipo 2, en función de que incorporen a su estructura grupos alcohol $-OH$, lo que les hace diferir en varios aspectos. Las resinas aniónicas base fuerte de Tipo 1 son bases fuertes de menor capacidad de intercambio, con una baja eficiencia de regeneración. Las resinas aniónicas base fuerte de Tipo 2 incorporan los residuos alcohólicos y exhiben una basicidad algo

menor, lo que eleva tanto su capacidad de intercambio como la eficiencia de la regeneración con respecto a las de Tipo 1.

- **Resinas aniónicas base débil:** Llevan grupos amino en su estructura. No son capaces de retener aniones de ácidos débiles, como silicatos o bicarbonatos. Son sensibles a la hidrólisis por parte de los iones del agua, lo que las hace más fácilmente regenerables.

La Tabla 5 muestra el resumen de las características principales y las reacciones de equilibrio de intercambio de las cuatro categorías de resinas descritas, así como la naturaleza de las soluciones que dan pie a su regeneración y el tipo de iones que son capaces de intercambiar.

Tabla 5 Características de las resinas de intercambio iónico empleadas en los procesos de tratamiento de aguas.

Tipo de resina	Reacción fundamental de intercambio iónico	Iones regenerantes (X ⁺)	pK	Capacidad de intercambio meq/l	Iones eliminados
Catiónica ácido fuerte	$n[\text{RSO}_3^-]\text{X}^+ + \text{M}^{n+} \leftrightarrow [\text{nRSO}_3^-]\text{M}^{n+} + \text{nX}^+$	H ⁺ o Na ⁺	<0	1,7 – 2,2	Forma H ⁺ : cualquier catión Forma Na ⁺ : cationes divalentes
Catiónica ácido débil	$n[\text{RCOO}^-]\text{X}^+ + \text{M}^{n+} \leftrightarrow [\text{nRCOO}^-]\text{M}^{n+} + \text{nX}^+$	H ⁺	4 - 5	4 – 4,5	Cationes divalentes >> cationes monovalentes
Aniónica base fuerte – Tipo 1	$n[\text{R}(\text{CH}_3)_3\text{N}^+]\text{X}^- + \text{A}^{n-} \leftrightarrow [\text{nR}(\text{CH}_3)_3\text{N}^+]\text{A}^{n-} + \text{nX}^-$	OH ⁻ o Cl ⁻	<13	1 – 1.4	Forma OH ⁻ : cualquier anión Forma Cl ⁻ : sulfato, nitrato, perclorato...
Aniónica base fuerte – Tipo 2	$n[\text{R}(\text{CH}_3)_2(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})\text{N}^+]\text{X}^- + \text{A}^{n-} \leftrightarrow [\text{nR}(\text{CH}_3)_2(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})\text{N}^+]\text{A}^{n-} + \text{nX}^-$	OH ⁻ o Cl ⁻	<13	2 – 2,5	Forma OH ⁻ : cualquier anión Forma Cl ⁻ : sulfato, nitrato, perclorato...
Aniónica base débil	$[\text{R}(\text{CH}_3)_2\text{N}]\text{HX} + \text{HA} \leftrightarrow [\text{R}(\text{CH}_3)_2\text{N}]\text{HA} + \text{HX}$	OH ⁻	5,7 – 7,3	2 – 3	Aniones divalentes >> aniones monovalentes

X: catión no metálico; M: catión metálico; N: nitrógeno; A: anión.

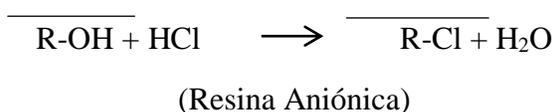
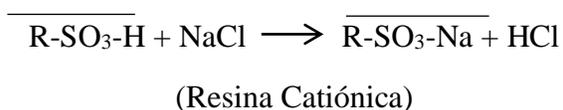
Los términos entre corchetes representan la parte estructural sólida de la resina

Fuente: Crittenden, Keiran, & JT Jordan (2005)

Desmineralización.

En el proceso de intercambio iónico la eliminación de los cloruros se conoce como desmineralización del agua. El proceso para retirar el catión Sodio (Na^+) y el anión Cloruro (Cl^-) se realiza mediante una resina aniónica de base fuerte y una resina catiónica de ácido fuerte y se lleva a cabo mediante las siguientes reacciones:

Ecuación 13 *Desmineralización*



Las instalaciones en la industria para desmineralizar el agua son muy variadas, pero las configuraciones más habituales son:

- Doble columna (catión – anión)
- Triple columna (catión – anión – catión)
- Cuatro columnas (catión – anión – catión – anión)
- Doble columna (catión – anión) y lecho mixto.

A continuación, se detallan las variables y ecuaciones fundamentales del intercambio iónico:

Volumen del lecho de resina. El volumen del lecho depende de la tasa de flujo de servicio que maneja la resina y el caudal de operación de la corriente seleccionada. Contando con estos dos valores, se halla el volumen del lecho mediante la ecuación:

Ecuación 14 *Volumen del lecho de resina*

$$SFR = \frac{\text{Caudal de servicio } (Q_1)}{\text{Volumen de resina } V_{(R)}} \left[\frac{m^3 \text{ de agua}}{m^3 \text{ de resina} * \text{hora}} \right]$$

SFR (service flow rate), es la tasa de flujo de servicio, El rango de esta variable está referenciado en la ficha técnica de la resina.

Tamaño de lecho y tasas de flujo. Una profundidad del lecho de resinas de 30 pulgadas (76 cm) se considera usualmente como mínima, y lechos tan profundos como de 12 pies0 (3,67 m) no son infrecuentes. El tiempo de contacto de lecho vacío (EBCT) escogido determina el volumen de resina requerido y está normalmente en la banda de 1,5 a 7,5 min. El recíproco o inverso del EBCT es la tasa de flujo de servicio (SFR) o tasa de agotamiento, y su rango aceptado es de 1 a 5 gpm/pie³.

Ecuación 15 *Tiempo de contacto de lecho vacío*

$$EBCT = \frac{V_R}{Q_F} = \text{tiempo de detención del medio de fluido en un lecho vacío}$$

Ecuación 16 *Tasa de caudal de servicio*

$$\text{Tasa de caudal de servicio} = SFR = \frac{1}{EBCT} = \frac{Q_1}{V_R}$$

Método Análisis Ponderado

Mediante la metodología de análisis cualitativo y cuantitativo, se establecerá las ventajas y desventajas que presenta cada sistema de remoción de cloruros. Para ello se ha diseñado un análisis de viabilidad que cuantifica las ventajas y desventajas de cada uno, donde 5 es la

máxima calificación y 0 es la mínima (Ver tabla 6). De acuerdo al estado del arte anteriormente descrito (Fase 2), a cada sistema de remoción se les asignó 6 ventajas y 6 desventajas, las cuales son promediadas como “Ponderado Parcial” (Ver Ecuación 25 y 26) respectivamente y se cuantifica la viabilidad, “Ponderado Total” (Ver Ecuación 27), como un Error Relativo sin valor absoluto, ya que el Ponderado Total puede ser negativo, donde el valor exacto corresponde al promedio de la ventajas y el valor experimental al promedio de las desventajas. Donde el resultado más viable es el “Ponderado Total” mayor que tienda a 1, ya que representa mayor impacto de las ventajas sobre las desventajas.

Tabla 6 *Calificación de Ventajas y Desventajas*

Valor	Ventaja	Desventaja
5	Impacto positivo	Impacto negativo
0	Impacto negativo	Impacto positivo

Fuente: autores

Ecuación 17 *Cálculo Ponderado Parcial Ventajas:*

$$Pp = \frac{\sum_1^n \text{Valor Ventaja}}{n}$$

Ecuación 18 *Cálculo Ponderado Parcial Desventajas:*

$$Pp = \frac{\sum_1^n \text{Valor Desventaja}}{n}$$

Donde n es el número de ventajas y desventajas respectivamente, en este caso 6.

Ecuación 19 *Cálculo Ponderado Total:*

$$Pt = \frac{PpVentajas - PpDesventajas}{PpVentajas}$$

Diseño de Filtros para Pre-tratamiento

Para implementar cualquier sistema de tratamiento de agua residual, este debe cumplir con ciertos parámetros que permitan el buen funcionamiento del sistema, referente a la remoción de iones y sales, se hace indispensable que el agua a tratar presente la menor contaminación de sólidos suspendidos, grasas y aceites, DBO, DQO entre otros. Para ello una de las técnicas de menor costo y de alta eficiencia apropiada para el sistema de pre-tratamiento utilizado es el diseño de lechos filtrantes que se basa en organizar los materiales de menor a mayor según la capacidad de adsorción y de mayor a menor según el espacio vacío (poros) del material filtrante. La figura 9 muestra el diseño donde la dirección de flujo es perpendicular a los filtros, pasando primero por una sección de pasto seco, luego de cascarilla de arroz y finalmente aserrín, siguiendo las definiciones y criterios de filtración anteriormente descritos.



Figura 9 Diseño del Filtro

Fuente: autores

Simulación del Proceso: WINFLOWS ®

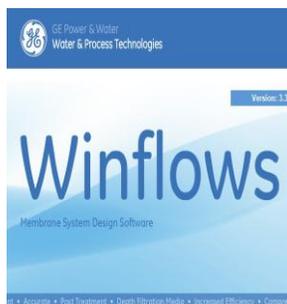


Figura 10 Software Winflows

Fuente: General Electrics Corp (2007)

El simulador usado, Winflows ®, de la compañía General Electrics es un software en el cual los usuarios pueden desarrollar el diseño de sus propios sistemas de osmosis inversa, y posteriormente adquirir el equipo por medio de la compañía, o armarlo por sí mismo.

Winflows 3.2.2 proporciona un medio rápido para desarrollar diseños funcionales de sistemas de desalinización (concentraciones de cloruros). El usuario debe poseer una familiaridad básica con los principios del diseño del sistema de ósmosis inversa y el conocimiento del rendimiento requerido del sistema considerado.

WINFLOWS 3.2.2 es una herramienta de software utilizada para diseñar aplicaciones de ósmosis inversa o RO (Reverse Osmosis). Este programa fue diseñado para permitir un diseño fácil, rápido e intuitivo de sistemas de ósmosis inversa. Se puede utilizar para diseñar un sistema integrado de desalinización, haciendo uso de las siguientes características complementarias junto con el sistema de RO.

- Dosificación química - alimentación y producto.
- Herramienta Argo Analyzer, para la selección antiscalete.

- Filtros tipo cartucho.
- Electro desionización (EDI) para la corriente de permeado.
- Dispositivos de recuperación de energía - Intercambiadores de trabajo y presión, turbocompresores y rueda Pelton.
- Opciones de reciclaje de bypass y concentrado.
- Opción de permeado dividido.
- Mezcla de múltiples análisis de agua de alimentación.

El software está configurado en idioma Inglés, por lo tanto, la interface será mostradas en dicho idioma.

Demostración interfaz Winflows 3.3.2 ®.

- Barra herramientas - Principal (Main).



Figura 11 Barra de herramientas

Fuente: General Electrics Corp (2007)

Características de iconos de izquierda a derecha:

- Crear un nuevo proyecto de Winflows
- Abrir un archivo existente de Winflows
- Guardar archivo

- Calculadora
- Asistente de diseño
- Diseño automático
- Comprobar actualizaciones de la base de datos Web

Barra de Herramientas – Diagrama de fluido (Flowsheet).

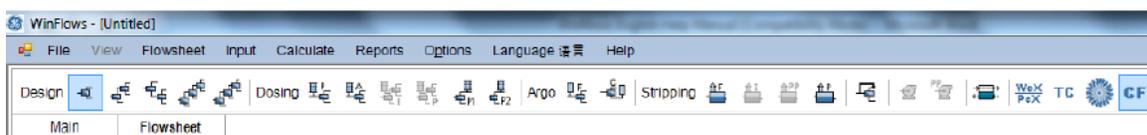


Figura 12 Barra de Herramientas

Fuente: General Electrics Corp (2007)

Características de iconos de izquierda a derecha.

Diseño (Desing): sistema de RO a un paso, dos pasos, dos etapas, tres pasos, tres pasos con retroalimentación.

Dosificación (Dosing): alimentación previa a la dosificación, alimentación después de la dosificación, dosificación intermedia, dosificación previa al producto, dosificación del producto.

Argo: analizador Argo para agua de alimentación, analizador Argo para concentrado final.

Separador (Stripping): separador de alimentación, separador intermedio, separador de pre-productos, separador de producto, bypass de alimentación, bomba intermedia, bomba de preproducto, EDI, intercambiadores de trabajo y presión, Turbo Cargador, Rueda Pelton y Filtros tipo cartucho.

Menú Comandos.

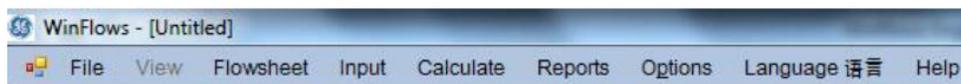


Figura 13 Menú comandos

Fuente: General Electrics Corp (2007)

El usuario puede acceder a todos los potenciales y funciones de Winflows mediante el uso del teclado y los comandos de la barra de menús. La barra de menús consta de 9 menús. La siguiente es una breve descripción de cada uno de los menús y sus comandos relacionados.

Menu 1: Archivo (File).

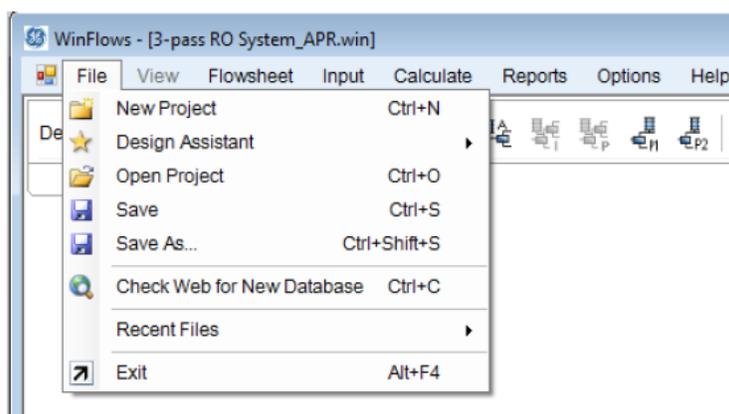


Figura 14 Archivo (File)

Fuente: General Electrics Corp (2007)

Nuevo proyecto (New Project): Iniciar nuevo proyecto.

Asistente de diseño (Desing assistant): Conduce automáticamente al usuario a través de los parámetros generales del diseño del sistema, paso a paso.

Abrir proyecto (Open Project): Abre un proyecto existente previamente.

Guardar (Guardar): Guarda el archivo activado.

Guardar como (Save as): Guarda el archivo en otra ubicación y/o nombre.

Revisar en internet para nueva base de datos (Check web for new database): Dirije al usuario a la pagina de internet de Winflows para actualizar base de datos.

Archivos recientes (Recent files): Genera una lista de archivo recientemente usados.

Salir (Exit): Salir de Winflows.

Menu 2: Vista (View).

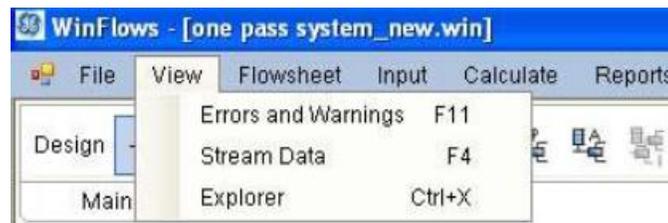


Figura 15 Vista (View)

Fuente: General Electrics Corp (2007)

Errores y advertencias (Errors and warnings): Permite ver los errores de diseño y de cálculo.

Datos de alimentación (Stream data): Ver los datos de alimentación.

Explorar (Explorer): Ver el estado de los índices / parámetros críticos. Viene automáticamente después de que los cálculos estén terminados.

Menú 3: Diagrama de flujo (Flowsheet).

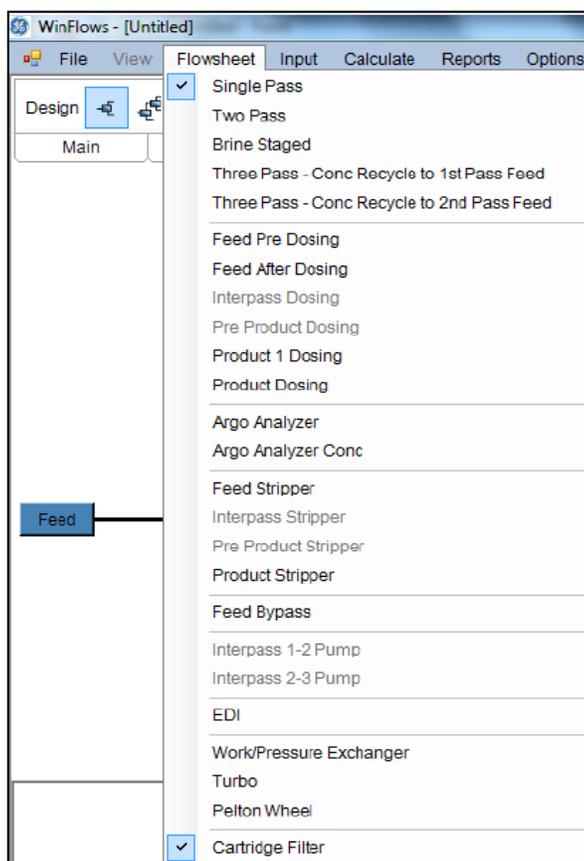


Figura 16 Diagrama de flujo (Flowsheet)

Fuente: General Electrics Corp (2007)

Tabla 7 Definición de opciones Diagrama de Flujo – Flowsheet

Definición de opciones Diagrama de Flujo – Flowsheet

Un paso, dos pasos, dos etapas, tres pasos -
retroalimentado, tres pasos – Inter.

(Single Pass, Two Pass, Two Stage, Three
pass - Feed, Three Pass – Inter)

Seleccione la arquitectura del diseño.

Alimentación previa a la dosificación,
Alimentación después de la dosificación,

Dosificación intermedia, Dosificación previa al producto, Dosificación del producto.

(Feed Pre Dosing, Feed After Dosing, Interpass Dosing, Pre Product Dosing, Product 1 Dosing, Product Dosing).

Seleccione la dosificación química deseada. Las opciones disponibles dependen de la arquitectura del sistema.

Analizador Argo para agua de alimentación, analizador Argo para concentrado final.

(Argo Analyzer, Argo Analyzer in Concentrate).

Seleccione el Analizador Argo en la corriente de alimentación que va a la RO y en el concentrado final dejando el sistema para determinar un antiescalante (químico que no permite generación de escamas) adecuado.

Separador de alimentación, separador intermedio, separador de pre-productos, separador de producto.

(Feed Stripper, Interpass Stripper, Pre Product Stripper, Product Stripper).

Seleccionar dónde aplicar separación de corrientes con CO₂. Las opciones disponibles dependen de la arquitectura del sistema.

Bypass de alimentación.

(Feed Bypass).

Seleccione bypass del agua de alimentación para ser mezclado con el permeado de la etapa final

Bomba intermedia, bomba de pre-producto.

(High Pressure Pump, Interpass Pump, Pre Product Pump)

Seleccione el uso de una bomba entre los arreglos del paso 1 y paso 2.

Seleccione el EDI en la línea de productos .División de permeado 1 y división de

EDI.

permeado 2.

Intercambiadores de trabajo y presión,
Turbo Cargador, Rueda Pelton.

(Work and Pressure Exchanger, Turbo
Charger, Pelton Wheel)

Seleccione la Intercambiadora de trabajo /
Intercambiador de presión / Ruedas Pelton
en la primera pasada, donde se utiliza la
corriente de concentrado para presurizar la
parte de la corriente de alimentación que
fluye a través de ellos.

Filtros tipo cartucho (Cartridge Filters).

Seleccione la opción de elegir diferentes
filtros de cartucho.

Fuente: General Electrics Corp (2007)

Menú 4: Datos de entrada (Input).

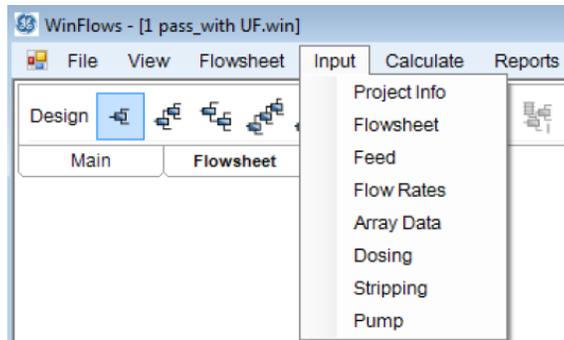


Figura 17 Datos de entrada (Input)

Fuente: General Electrics Corp (2007)

Información del proyecto, Diagrama de flujo, Alimentación, Flujo, Datos del arreglo,
Dosificación, Separación, Bomba (Project Info, Flowsheet, Feed, Flow Rates, Array Data,
Dosing, Stripping, Pump): El usuario puede seleccionar el cuadro de diálogo (ventana) que

permite la entrada de datos detallados para el tema de interés. Las ventanas tienen botones de comando y etiquetas claras.

Menú 5: Calcular (Calculate).

Este botón ejecuta los cálculos según las entradas dadas. Los cálculos también se pueden realizar utilizando el atajo de teclado de "ALT + C". El cálculo RO principal tiene que realizarse primero antes de calcular otras características como EDI, Intercambiadores de presión, Argo Analyzer, etc.

Menú 6: Informes (Reports)

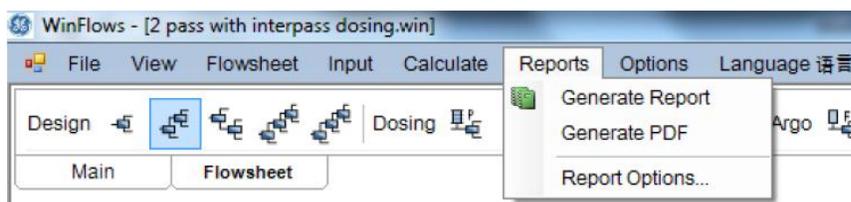


Figura 18 Informes (Reports)

Fuente: General Electrics Corp (2007)

Generar informe (generate report): Esta función generará el informe para la proyección, con todos los datos de entrada y salida, en formato Excel y PDF.

Opciones de informe (Report options): El usuario puede seleccionar las secciones del informe que deben generarse.

Menú 7: Opciones (Options).

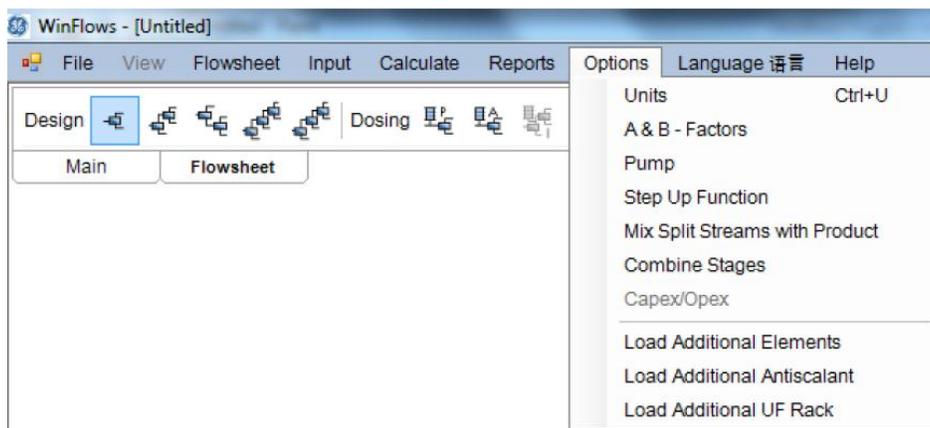


Figura 19 Opciones (Options)

Fuente: General Electrics Corp (2007)

Tabla 8 Definición de opciones

Definición de opciones	
Unidades (Units):	El usuario puede seleccionar las unidades de temperatura, presión, flujo, flujo de elementos y potencia.
Factores A & B (A & B Factors):	El usuario puede seleccionar como entradas los valores de edad o A y B de los elementos utilizados para el diseño de RO
Bomba (Presión específica de alimentación) Pump (Specify Feed Pressure)	El usuario puede especificar (sólo para un diseño de paso único) la presión de descarga para la bomba de alta presión.
Proyección (Step Up Function):	El usuario puede realizar análisis de sensibilidad para toda la proyección a

Corriente Separación mezclada con product. (Mix Split Stream with Product)	diversos valores de temperatura y edad del elemento y ver el efecto sobre la presión de alimentación, el TDS y la concentración de cloruro de permeado.
Etapas/Pasos combinados (Combine Stages):	El usuario puede mezclar los dos o más de los flujos de división con el flujo de producto en la proyección y los resultados se mostrarán en el informe como flujos mixtos. El usuario puede combinar una o más etapas juntas en el informe basándose en los criterios de etapas adyacentes, máximo de ocho etapas, una caída de presión nula a través de las etapas y una presión de permeado igual.
Gastos de equipos / Gastos operativos (Capex / Opex):	El usuario puede calcular los gastos de membranas, bombas separadores como Capex. El Opex es estimado como gastos operacionales.
Cargar elementos adicionales (Load Additional Elements).	El usuario mediante contraseña generadas por la compañía puede adicionar nuevas opciones al software.
Cargar elementos antiescalante (Load Additional Antiscalant)	Este menú se utiliza para añadir el Antiescalante adicional introduciendo la contraseña.

Menú 8: Idioma (Language).

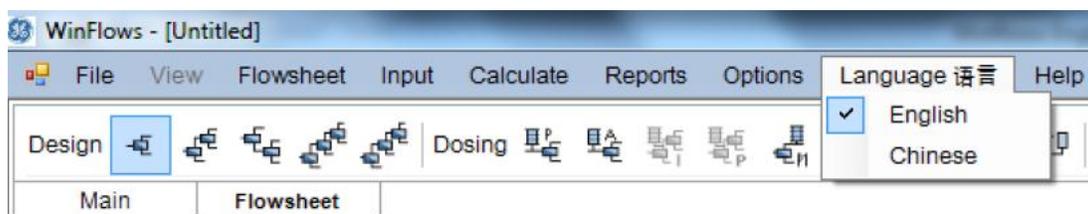


Figura 20 Idioma (Language)

Fuente: General Electrics Corp (2007)

Menú 9: Ayuda (Help).

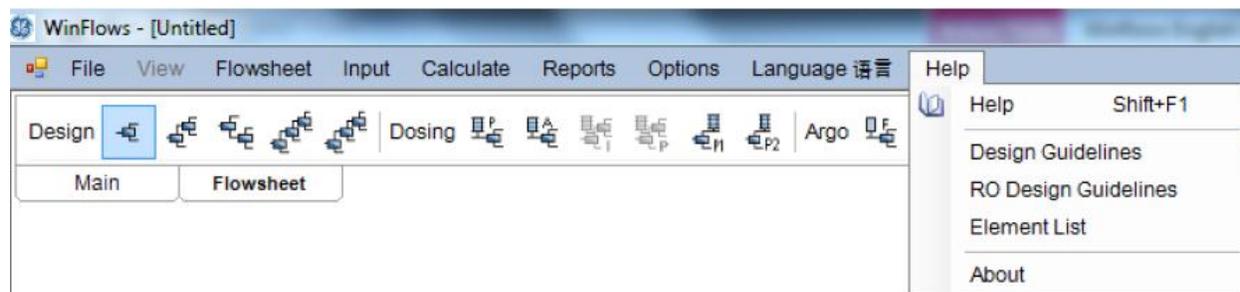


Figura 21 Ayuda (Help)

Fuente: General Electrics Corp (2007)

Tabla 9 Opciones de ayuda

Opciones de ayuda	
Ayuda (Help):	Abre documento de soporte técnico en pdf.
Guia de diseño (Desing guidelines).	Abre diseños permitidos para RO.
Consejos de diseño (RO Design Guideline Tips):	Abre el informe acerca de "Consejos sobre el diseño de unidades RO que funcionan en aguas naturales con menos de 5000 mg / L TDS"

Lista de elementos. (Elements list)

Abrir elementos (filtros) disponibles en la aplicación.

Acerca (About)

Abre la ventana "Acerca de Winflows".
Esta ventana contiene información sobre la versión y los derechos de autor.

Fuente: General Electrics Corp (2007)

Marco Conceptual

Acuífero: Formaciones geológicas en las cuales se encuentra agua y que son permeables permitiendo el almacenamiento de agua en espacios subterráneos.

Agua salobre: es aquella que tiene más sales disueltas que el **agua dulce**, pero menos que el **aguade mar** generalmente de 0.5 a 30 g/L.

Alimentación de Osmosis Inversa: Agua que entra al sistema de ósmosis inversa de Pozo, Río, Mar o agua Salubre luego del pre-tratamiento acondicionado el cual varía acorde al tipo de agua.

Anión: Un anión es un ion (o ión) con carga eléctrica negativa, es decir, que ha ganado electrones. Los aniones monoatómicos se describen con un estado de oxidación negativo.

API: American Petroleum Institute, conocido comúnmente como API, en español Instituto Americano del Petróleo, es la principal asociación comercial de los EE. UU.

ARI: Agua Residual Industrial.

ARnD: Aguas residuales no domésticas.

CAPEX: Costo del desarrollo o Inversión en bienes del Capital.

Catión: Un catión es un ion con carga eléctrica positiva, es decir, que ha perdido electrones. Los cationes se describen con un estado de oxidación positivo.

Cloruros: Compuestos que llevan un átomo de cloro en estado de oxidación formal -1. Por lo tanto corresponden al estado de oxidación más bajo de este elemento ya que tiene completada la capa de valencia con ocho electrones.

Concentrado o rechazo: Agua de arrastre a la salida del sistema, que contiene las sales que han sido separadas por las membranas.

CSB: Ente de control ambiental Departamental Corporación Autónoma Regional del Sur de Bolívar.

Cuenca petrolífera: Zonas que han sido geológicamente favorables para la formación y acumulación de hidrocarburos. En ellas se encuentran grandes yacimientos de petróleo.

Cuerpos de agua superficiales: Ríos, embalses, lagunas o cuerpos de aguas naturales o artificiales pero de agua dulce. Esta norma no fija parámetros para el mar ni para las infraestructuras. Minambiente (2015).

Desalinización: Proceso mediante el cual se elimina la sal del agua.

Deionización: Proceso que sirve para eliminar todas las sustancias ionizadas de una solución.

Gas Natural: El gas natural constituye una importante fuente de energía fósil liberada por su combustión.

Impacto ambiental: efecto de la actividad antropogénica que genera alteración del medio.

Incrustación: Capa de residuos minerales que se forma en la superficie material.

IO: Intercambio Iónico.

Ion: Partícula cargada eléctricamente constituida por un átomo o molécula que no es eléctricamente neutro. Conceptualmente esto se puede entender como que, a partir de un estado neutro de un átomo o partícula, se han ganado o perdido electrones; este fenómeno se conoce como ionización.

IRCA: Índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano.

Lentico: Son cuerpos de agua cerrados que permanecen en un mismo lugar sin correr ni fluido.

Lotico: aguas superficial relativamente estancadas tales como lagos, lagunas, estanques.

Membrana: Capa de poco espesor que adquiere fácil movilidad y es observada mayormente para crear secciones de separación o adhesión.

Modelación: Método mediante el cual se crea una representación.

OI: Osmosis Inversa.

OPEX: Operating expense Costo de Operación.

RO: Osmosis Inversa.

Permeabilidad: La permeabilidad es la capacidad que tiene un material de permitirle a un flujo que lo atraviese sin alterar su estructura interna.

Petróleo: Mezcla de compuestos orgánicos, principalmente hidrocarburos insolubles en agua. También es conocido como petróleo crudo o simplemente crudo.

PMA: Plan de Manejo Ambiental.

Porosidad: Fracción de huecos es una medida de espacios vacíos en un material, y es una fracción del volumen de huecos sobre el volumen total, entre 0-1, o como un porcentaje entre 0-100 %. El término se utiliza en varios campos, incluyendo farmacia, cerámica, metalurgia, materiales, fabricación, ciencias de la tierra, mecánica de suelos e ingeniería.

Pozo Petrolero: obra de ingeniería encaminada a poner en contacto un yacimiento de hidrocarburos con la superficie.

Pretratamiento: Es el primer paso de acondicionamiento para el tratamiento de las aguas residuales.

Producto: Agua permeada a través de la membrana la cual es baja en Sales y que puede ser utilizada desde para una caldera hasta para fines farmacéuticos con el tratamiento correspondiente.

Receptor de agua: descarga un efluente de aguas servidas.

Recuperación OI: Eficiencia del sistema, medida como el porcentaje de la alimentación que se transforma en producto. % de Recuperación = $\text{Flujo de producto} / \text{Flujo de alimentación} \times 100$.

Resina: Secreción orgánica que producen muchas plantas, particularmente los árboles del tipo conífera. Es muy valorada por sus propiedades químicas y sus usos asociados, como por ejemplo la producción de barnices, adhesivos y aditivos alimenticios. También es un constituyente habitual de perfumes o incienso. En muchos países, entre ellos España, es frecuente referirse a la "resina" como "resina de pino" ya que esta conífera es su principal fuente.

Salmuera: Solución formada por altas concentraciones de cloruro de sodio (NaCl), sal común, en agua (H₂O). Se puede encontrar en condiciones naturales.

Saturación: Estado de una disolución que ya no acepta más cantidad de la sustancia que disuelve.

Septentrional: Ubicación cardinal al norte.

Simulador: es un sistema que ambienta el comportamiento en ciertas condiciones, lo que permite combinar partes mecánicas o electrónicas y para recrear y precisar una realidad.

Solubilidad: Medida de la capacidad de disolverse de una determinada sustancia (solute) en un determinado medio (disolvente). Implícitamente se corresponde con la máxima

cantidad de soluto que se puede disolver en una cantidad determinada de disolvente, a determinadas condiciones de Temperatura, e incluso Presión.

UPSTREAM: En la industria petrolera corresponde a los proceso de Exploración, perforación y extracción del hidrocarburo.

Vertimiento: Descarga final a un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido (MINAMBIENTE, 2015).

Vertimiento puntual: Es el que se realiza a partir de un medio de conducción, del cual se puede precisar el punto exacto de descarga al cuerpo de agua, al alcantarillado o al suelo (MINAMBIENTE, 2015).

WINFLOWS: Software de simulación de Osmosis Inversa del proveedor General Electric en su versión 3.3.2 version 1 guia 2017.

Marco legal

La normatividad básica ambiental que regula el manejo, conservación y protección de los sistemas hídricos y vertimiento de agua residual industrial en Colombia se relacionan a continuación:

Constitución Política de Colombia del 1991

Los artículos 79 y 80 establece que es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación ambiental para garantizar el derecho de todas las personas a gozar de un ambiente sano y planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución; debiendo prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados. Así como también garantizar la calidad de agua para consumo humano y, en general, para las demás actividades en que su uso es necesario.

Así mismo, regular entre otros aspectos, la clasificación de las aguas, señalar las que deben ser objeto de protección y control especial, fijar su destinación y posibilidades de aprovechamiento, estableciendo la calidad de las mismas y ejerciendo control sobre los vertimientos que se introduzcan en las aguas superficiales o subterráneas, interiores o marinas, a fin de que estas no se conviertan en focos de contaminación que pongan en riesgo los ciclos biológicos, el normal desarrollo de las especies y la capacidad oxigenante y reguladora de los cuerpos de agua.

Leyes

- **Ley 23 del 19 de Diciembre de 1973**, del Congreso de la Republica, por el cual se Plantea la necesidad de proteger los recursos naturales renovables, fija límites mínimos de contaminación y establece sanciones por violación de las normas. Se faculta al Presidente de la República para expedir el Código de los Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente.
- **Ley 9 de 1979**, Congreso de la República por medio del cual se establece la no podrán utilizarse las aguas como sitio de disposición final de residuos sólidos, salvo los casos que autorice el Ministerio de Salud y se prohíbe la descarga de residuos líquidos en las calles, calzadas, canales o sistemas de alcantarillado de aguas lluvias.
- **Ley 99 del 22 de Diciembre de 1993**, del Congreso de la República, Por la cual se crea el MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental - SINA- y se dictan otras disposiciones.

Decretos

- **Decreto 1541 de 1978**, de la Presidencia de la República, art. 211, 223, 238, Se prohíbe verter, sin tratamiento, residuos sólidos, líquidos o gaseoso, que puedan contaminar o eutróficar las aguas, causar daño o poner en peligro la salud humana o el normal desarrollo de la flora o fauna, o impedir u obstaculizar su empleo para otros usos. El grado de tratamiento para cada tipo de vertimiento dependerá de la destinación e los tramos o cuerpo de aguas, de los efectos para la salud y de las implicaciones ecológicas y económicas. En todo sistema de alcantarillado se deberán someter los residuos líquidos a

un tratamiento que garantice la conservación de las características de la corriente receptora.

- **Decreto 1594 de 1984**, de la Presidencia de la República, art. 20 Establece las sustancias de interés sanitario. Art. 21. Entiéndase por usuario de interés sanitario aquél cuyos vertimientos contengan las sustancias señaladas en el artículo 20.
- **Decreto 3100 de 2003**, de la Presidencia de la República, art. 18, 21, 22, 30. Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones.
- **Decreto 1575 de 2007**, de la Presidencia de la República, por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.
- **Decreto 1324 de 2007**, del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, por el cual se crea el registro de usuarios del recurso hídrico y se dictan otras disposiciones. Derogado por el Decreto 303 de 2012.
- **Decreto 3930 de 2010**, del Ministerio del Medio Ambiente y Salud, art. 24, 25, 38, 41, 44. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo 11 del Título VI-Parte 11I- Libro 11 del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones".
- **Decreto 4728 de 2010**, del Ministerio del Medio Ambiente y Salud, por el cual se modifica parcialmente el Decreto 3930 de 2010.
- **Decreto 303 de 2012**, del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, art. 1,4. Por el cual se reglamenta parcialmente el artículo 64 del Decreto -Ley 2811 de 1974 en relación con el Registro de Usuarios del Recurso Hídrico y se dictan otras disposiciones deroga

las disposiciones que le sean contrarias, en especial el decreto 1324 de 2007 y el inciso segundo del artículo 74 del Decreto 3930 de 2010.

- **Decreto 2667 de 2012**, del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, art. 10, 18, 21, 22. "Por el cual se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones".
- **Decreto 1076 mayo 26 del 2015**, del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo sostenible, "Por el cual expide el decreto único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible".

Resoluciones

- **Resolución 486 de 1996**, de la Corporación Autónoma Regional del Sur de Bolívar, por el cual la CSB con la Resolución 486 del 11 de Diciembre de 1996, concedió a Ecopetrol S.A. permiso de vertimiento para verter sus aguas residuales de la actividad industrial del Campo Cicuco Boquete, por un término de cinco (5) años.
- **Resolución 281 de 2001**, de la Corporación Autónoma Regional del Sur de Bolívar, por el cual concede a Ecopetrol S.A. permiso provisional para vertimiento para el Campo Cicuco - Boquete, por el termino de seis (6) meses contados a partir del vencimiento del permiso concedido mediante la resolución 486 de 1996 y se exige la presentación de un Plan de Cumplimiento. En este acto se requirió de Ecopetrol S.A.
- **Resolución 165 del 20 de Marzo de 2002**, de la Corporación Autónoma Regional del Sur de Bolívar, Se suspende a Ecopetrol S.A. el permiso provisional, por no haber presentado el Plan de Cumplimiento, exigido por la CSB en el término establecido.

- **Resolución 165 del 20 de Marzo de 2002 Modificación 19 de septiembre 2005**, de la Corporación autónoma Regional del Sur de Bolívar, Con el escrito radicado en la CAR el 19 de septiembre de 2005 Ecopetrol S.A. solicitó renovación de los siguientes permisos. Concesión de agua Subterránea vertimiento de aguas residuales, manejo y disposición de residuos sólidos y emisiones atmosférica.
- **Resolución 224 del 2008**, de la Corporación Autónoma Regional del Sur de Bolívar, por medio del cual se otorga unos permisos ambientales y se toman otras determinaciones.
- **Resolución 165 del 20 de Marzo de 2002 Modificación 20 de febrero 2006**, Corporación Autónoma Regional del Sur de Bolívar, por medio del oficio del 20 de febrero de 2006 le envía a Ecopetrol S.A. los formularios Únicos Nacionales para solicitud de los permisos relacionados a la excepción de los residuos sólidos que no requiere el mismo.
- **Resolución 0075 de 2011**, del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, por la cual se adopta el formato de reporte sobre el cumplimiento de la norma de vertimiento puntual a alcantarillado público.
- **Resolución 336 del 06 de noviembre de 2013**, de la Corporación Autónoma Regional del Sur de Bolívar, por medio de la cual se otorga un permiso de vertimiento. El plan de muestreo llevado a cabo fue el N° 018-15.
- **Resolución 631 de 2015**, del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

Autos

- **Auto No. 104 del 2006**, Por medio del cual se tramita solicitud de renovación de permisos ambientales y se realiza el cobro por concepto de los servicios de evaluación y seguimiento ambiental.
- **Auto No. 086 de 2011**, La Corporación Autónoma del Sur de Bolívar mediante Auto No 086 del 17 de Mayo de 2011, en su artículo primero requirió a ECOPETROL S.A para el trámite del permiso de Aguas Residuales Domesticas: Concepto sobre uso del suelo expedido por la autoridad municipal competente. Plan de contingencia para la prevención y control de derrames. Evaluación ambiental del vertimiento.
- **Auto No. 0213 de 2013**, Ecopetrol S.A. Mediante escrito radicado en la CSB con el No. 7075 del 25 de junio de 2013, solicita modificación del permiso de vertimiento de aguas residuales Industriales al Rio Chicagua.

Marco Institucional

Para el desarrollo del proyecto investigativo se tiene en cuenta las empresas con influencia en el área de estudio; dando como relevante la empresa Ecopetrol S.A. siendo la más grandes de Colombia en el sector del petróleo y gas de naturaleza jurídica de sociedad económica mixta, de carácter comercial bajo la forma de sociedad anónima, vinculada al Ministerio de Minas y Energía, de conformidad con lo establecido en la Ley 1118 de 2006, regida por los Estatutos Sociales que se encuentran contenidos en la Escritura Pública No. 5314 del 14 de diciembre de 2007 creada bajo la reversión al estado Colombiano de la Concesión de Mares el 25 de agosto de 1951; con aproximadamente 65 años en la industria ha logrado posicionarse a nivel nacional e internacional, en los procesos de exploración, producción, refinación, transporte y comercialización del hidrocarburo siendo ubicado sus campos de extracción en el centro, sur, oriente y norte de Colombia; cuenta con dos refinerías (Barrancabermeja y Cartagena) y tres puertos para exportación e importación de combustibles y crudos en ambas costas (Coveñas y Cartagena, en el Mar Caribe, y Tumaco, en el Océano Pacífico). También es dueña de la mayor parte de los oleoductos y poliductos del país que intercomunican los sistemas de producción con los grandes centros de consumo y los terminales marítimos, incursionado en el negocio de los biocombustibles y la expansión de territorios en los países de Brasil, Perú y el golfo de México Estados Unidos.

Misión y Visión

Misión 2015 -2020

Trabajamos todos los días para construir un mejor futuro:

- Rentable y sostenible.
- Con una operación sana, limpia y segura.
- Asegurando la excelencia operacional y la transparencia en cada una de nuestras acciones.
- Construyendo relaciones de mutuo beneficio con los grupos de interés.

Visión 2015 -2020

Ecopetrol será una compañía integrada de clase mundial de petróleo y gas, orientada a la generación de valor y sostenibilidad, con foco en Exploración y Producción, comprometida con su entorno y soportada en su talento humano y la excelencia operacional.

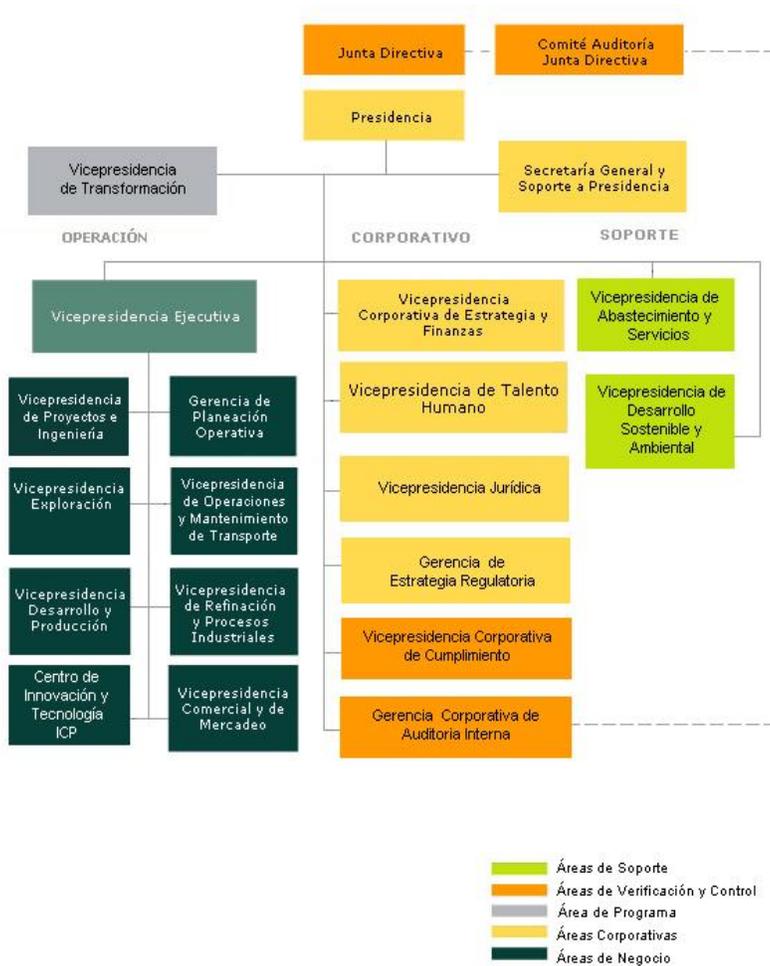


Figura 22 Estructura general Ecopetrol S.A.

Fuente: ECOPETROL (2017)

Estructura Local.



Figura 23 Estructura local, Vicepresidencia de Desarrollo y Producción

Fuente: ECOPETROL (2017)

Reseña Histórica

El campo de Cicuco fue descubierto por la Empresa Colombian Petroleum Company “COLPET”, en el año de 1956, se inician las perforaciones con el pozo Cicuco No. 1 en el año de 1957, este descubrimiento es desarrollado con el Campo de Boquete, Zenón y Boquilla, determinándose la Caliza productora a una profundidad de 8200 ft (pies) promedio. En el año de 1990, fue descubierto por ECOPETROL un nuevo yacimiento y fue perforado el pozo Momposina No.1, el cual fue clasificado por el Ministerio de Minas y Energía como pozo Gasífero. En Cicuco fueron perforados 28 Pozos, Boquete 23 Pozos, Zenón 2 Pozos y Boquilla 3 Pozos. Los completamientos de los pozos terminan Hueco Abierto (Open Hold) y revestidos con Liner Ranurado.

Inicialmente los Pozos al ser perforados produjeron en Flujo Natural los cuales ponían superficie Crudo, Gas Húmedo y Agua de formación, posteriormente al ir perdiendo fuerza de impulso (presión), hubo la necesidad de instalar Diseños de Levantamiento Artificial en el cual se determinó por el método de Gas Lift inyectado a la formación por Compresores. El API corregido del crudo es de 41.5°. Los campos descubiertos entran en comercialización en el año de 1958 con un contrato de asociación por 20 años con la Nación Colombiana, este contrato venció en el año de 1975 año en el cual entra la Nación Colombiana a seguir explotando hasta nuestros días. En la actualidad continua en producción los Campos Cicuco con once pozos en producción y Boquete con ocho. En el año de 1962 entra en funcionamiento la Planta de Gas Húmedo la cual es instalada con el propósito de extraer los productos ricos del Gas Húmedo (propano, butano y gasolina natural) como también extraer la humedad del gas y poder entregar

un Gas Lift completamente seco con el fin de poder inyectarlo al sistema de válvulas de los diseños de levantamiento artificial.

Actualmente la producción promedio del campo Cicuco de crudo 650 BOPD, existen 19 pozos activos de los cuales pertenecen 11 pozos pertenecen al Campo Cicuco (C-2, C-3, C-4, C-8, C-15, C-18, C-20, C-22, C-23, C-29, C-32) y los 8 pozos restantes hacen parte del Campo Boquete (B-2, B-4, B-8, B-9, B-11, B-14, B-18 y B-19).

El campo fue explotado bajo la modalidad de concesión conocida como Cicuco Violo y luego revirtió a ECOPETROL el 20 de octubre de 1976. La concesión Cicuco Violo comprende una serie de campos aledaños tales Cicuco, Boquete, Zenón, Boquilla, Violo y Momposina, éste último descubierto por ECOPETROL en 1990. Para aprovechar la explotación de gas y de condensados se construyó una planta de Gas con capacidad de 40 millones de pies cúbicos por día para obtener productos livianos como G.L.P y Gasolina Natural. En 1977 se hicieron contratos con PROMIGAS (anteriormente GASNACOL) para prestar los servicios de transporte y distribución de gas hasta Barranquilla, comprensión del mismo para levantamiento artificial en Cicuco y distribución de gas procedente de El Difícil.

El aprovechamiento del gas operó desde 1977 hasta 1982. PROMIGAS ESP continuó con el servicio de compresión de gas en los campos de Cicuco, Boquete y Zenón hasta 1997, fecha en la cual ECOPETROL suspendió el contrato y construyó su propia planta compresora. Con el descubrimiento del campo Momposina en 1990, Ecopetrol inició hacia 1994 las facilidades para producir el gas de Momposina-1 con un estimativo de producción de 1.5 MPCD.

El 7 de julio de 1956 se inició la perforación del pozo descubridor Cicuco-1. Fue terminado en la Caliza Cicuco a 8115 ft de profundidad con una producción de 195 BOPD. Entre 1956 y 1960 se perforaron un total de 24 pozos de los cuales 21 resultaron productores y 3 fueron improductivos, alcanzando una producción máxima de 26800 bpd en enero de 1960.

A la fecha en el Campo Cicuco se han perforado 30 pozos de los cuales solo 7 pozos permanecen activos, 2 de ellos cerrados temporalmente por su alta producción de agua. El campo Boquete, entró en operación el 8 de agosto de 1961, con la perforación del pozo Boquete-1, el cual fue completado a 8086 ft con una producción 344 BOPD en la Caliza Cicuco equivalente. Para el desarrollo del campo se perforaron 24 pozos entre 1961 y 1977 alcanzando una producción máxima de 6400 bpd en mayo de 1973, actualmente 8 pozos se encuentran activos, sin embargo a la fecha el campo se encuentra cerrado por fallas en el sistema de compresión.

A mediados de 1967 y 1975 para reactivar los pozos que por su baja presión de yacimiento habían dejado de fluir, se inició la instalación del gas lift en los campos de Cicuco y Boquete respectivamente. El 20 de octubre de 1976 quedó ejecutoriada la Resolución No. 004213 expediente mediante la cual se le aceptó a la COLPET la renuncia expresa e incondicional del contrato de la Concesión Cicuco-Violo y está pasó a ECOPETROL -Distrito Norte-ida por el Ministerio de Minas y energía con fecha del 29 de septiembre de 1976.

Marco Metodológico

Metodología de la Investigación

La propuesta planteada en el trabajo de investigación, es asociada a la metodología correlacional, ya que permite dar respuestas a las hipótesis desde la perspectiva del análisis del comportamiento de las variables, abordando un valor explicativo parcial de las mismas (Hernandez, Fernandez & Baptista, 2006).

De acuerdo a lo antes expuesto se busca a través de la investigación de las diferentes técnicas de remoción de cloruros, se pretende analizar las variables técnica operacional del sistema en el Campo de producción Cicuco, que permita la viabilidad para el cumplimiento de los valores máximos permisibles de cloruros para el vertimiento a cuerpos de aguas superficiales relacionada en la normativa ambiental vigente Resolución 0631 de 2015.

Tipo de Metodología

La investigación planteada presenta una técnica mixta cuantitativa y cualitativa que permite analizar a través de la valoración de conceptos técnicos la alternativa apropiada para la remoción de cloruros en las ARI con el objetivo de conocer el comportamiento de las variables y su incidencia, con un diseño No experimental ya que no hay manipulación de las variables dado que el objeto del estudio proviene de mediciones previamente realizadas en el área de estudio por la empresa seleccionada para la investigación.

Línea de Investigación

El proyecto de Investigación como opción de grado se encuentra encaminado en la Línea de Investigación de Gestión y Manejo Ambiental, y Biotecnología del Semillero de Investigación GAMUD TAYRONA.

Población y Muestra

La población beneficiada corresponde aproximadamente de 300 habitantes del corregimiento de San Javier aguas abajo del punto de vertimiento del río Chicagua ya que por las carencias de agua potable, los habitantes se abastecen de agua en el afluente hídrico.

Fases de la Investigación

El proceso de análisis de la investigación se divide en tres fases:

Fase I: Analizar las concentraciones de los parámetros de cloruro vertidas por el campo Cicuco en las aguas del río Chicagua, cuerpo receptor del vertimiento entre los años 2005 a 2016.

Para el cumplimiento de los objetivos propuesto en la fase 1 se realizará las siguientes actividades tales como:

- Se revisará la bibliografía existente de los monitoreos ambientales de las aguas residuales industriales del Campo Cicuco correspondiente a los años 2005 al 2016.
- Se revisará la normativa legal ambiental vigente Resolución 0631 de 2015 Minambiente.

- Luego de la revisión bibliográfica se tomará los resultados del monitoreo del parámetro cloruro correspondiente del 2005 al 2016, para la digitación en Excel para alimentación del histograma.
- Se graficará el comportamiento del parámetro cloruro versus valor máximo permisible resolución 0631 del 2015 Minambiente.

Fase II: Evaluar los métodos de osmosis inversa e intercambio iónico mediante análisis numéricos, como alternativas para la remoción de cloruros.

Para el cumplimiento de los objetivos propuesto en la fase 2 se realizará las siguientes actividades:

- Se analizará operacionalmente el sistema de Aguas Residuales Industriales de la Estación Campo Cicuco.
- Se Analizará el Diagrama de Proceso de Fluidos del Campo Cicuco.
- Se analizará el estado actual operacional del Sistema de Aguas Residuales Industriales del Campo Cicuco.
- Se implementará la metodología de análisis técnico comparativo de Ponderación.
- Se justificará la valoración asignada a cada ventaja y desventaja de las técnicas IO y RO.
- Se realizará análisis cuantitativo del IO y RO.

Fase III: Seleccionar a partir de un análisis técnico, la alternativa apropiada para la remoción de cloruros en aguas residuales industriales de producción del Campo Cicuco.

Para el cumplimiento de los objetivos propuesto en la fase 3 se realizará las siguientes actividades:

- A través del análisis técnico comparativo ponderado, evaluado en la fase anterior se seleccionará la técnica de remoción de cloruro apropiada para el sistema de agua residuales proveniente del Campo Cicuco.
- Se propondrá la implementación del Sistema de Pre Tratamiento para la remoción de residuos de SS, GyA para el cumplimiento de los parámetros necesarios para la implementación de un sistema de remoción de Cloruros.
- Se propondrá la Instalación de Equipo RO.
- Se simulará el equipo propuesto para la implementación de la técnica de RO a través de software.

Resultados y Análisis

Como resultado de las fases propuestas se obtiene el desarrollo de las siguientes actividades:

Fase I: Analizar las concentraciones de los parámetros de cloruro vertidas por el Campo Cicuco entre los años 2005 a 2016

Se revisó la bibliografía existente de los monitoreos ambientales de las aguas residuales industriales del Campo Cicuco correspondiente a los años 2005 al 2016, donde se observó los altos índices del parámetro cloruro presente en las aguas residuales vertidas al río Chicagua, lo que incumple la normativa ambiental colombiana Resolución 0631 del 2015 capítulo 6 artículo 11 para la actividad de hidrocarburo del proceso de USPTREAM del Ministerio de Ambiente.

Para el análisis se tomó datos de concentraciones de cloruros durante los años 2005 al 2016; el tipo de muestreo compuesto utilizado para el monitoreo permite establecer varios resultados del mismo punto para lo cual se optó hacer un promedio por año y calcular.

Cabe resaltar que el parámetro no se encontraba bajo la regulación normativa ambiental colombiana, el cual fue incluido a partir de la Resolución 631 de Marzo de 2015.

De acuerdo a la caracterización fisicoquímica del cuerpo de agua río Chicagua, se puede observar que los valores fluctúan notoriamente antes y después del punto mezcla, lo que permite deducir que ésta se ve afectada ya que en el punto de vertimiento sobre pasa los niveles admisibles al decreto 1076 del 2015 valor máximo permisible 250 mg/L Cl⁻ para el consumo de agua.

Sólidos disueltos totales	mg/L	Electrométrico	23333	21187	22467	21700	22433	17453	N.E.
Sólidos suspendidos totales	mg/L	Secado a 103 – 105 °C	223	256	145	96	127	57	50
Sólidos totales	mg/L	Secado a 103 – 105 °C	24000	21800	22600	21900	22500	17600	N.E.
DBO5	mg/L O ₂	Incubación 5 días electrodo de membrana	241	219	528	388	260	255	60
DQO	mg/L O ₂	Reflujo cerrado – volumétrico	388	353	777	747	419	412	180
Bario	mg/L	E.A.A.	<0,60	<0,60	<0,60	<0,60	<0,60	<0,60	Análisis y reporte
Cadmio	mg/L	E.A.A.	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	0,1

Fuente: MCS (2016)

Tabla 11 Resolución 0631 de Marzo de 2015 Minambiente

Parámetro	Unidades	Exploración (UPSTREAM)	Producción (UPSTREAM)	Refino	Venta y distribución (DOWNSTREAM)	Transporte y almacenamiento (MIDSTREAM)
pH	Unidades de pH	6,00 – 9,00	6,00 – 9,00	6,00 – 9,00	6,00 – 9,00	6,00 – 9,00
Demanda Química de Oxígeno	mg/L O ₂	400,00	180,00	400,00	180,00	180,00

(DQO)

Demanda

Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	200,00	60,00	200,00	60,00	60,00
---	---------------------	--------	-------	--------	-------	-------

Sólidos

Suspendidos Totales (SST)	mg/L	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
---------------------------	------	-------	-------	-------	-------	-------

Sólidos

Sedimentales (SSED)	mL/L	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
---------------------	------	------	------	------	------	------

Grasas y aceites	mg/L	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
------------------	------	-------	-------	-------	-------	-------

Fenoles	mg/L	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
---------	------	------	------	------	------	------

Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)

mg/L	Análisis y Reporte				
------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------

Hidrocarburos

Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
-----------------------------	------	-------	-------	-------	-------	-------

Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	
Compuestos Organicos Halogenados Absorbibles (AOX)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte		
Compuestos de Fósforo						
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte				
Ortofosfatos (P-PO ₄ ⁻³)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte		
Compuestos de Nitrógeno						

Nitratos (N-NO ₃)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte		
Nitrógeno Amoniacal (N- NH ₃)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte		
Nitrógeno Total (T)	mg/L	10,00	10,00	10,00 o 40,00 si en proceso de refino se incluyen actividades de hidrogenación	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Iones						
Cianuro Total (CN ⁻)	mg/L	1,00	1,00	1,00		
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	1.200,00	1.200,00	500,00	250,00	250,00
Fluoruros (F ⁻)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte		
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	300,00	300,00	500,00	250,00	250,00

Sulfuros S ²⁻	mg/L	1,00	1,00	1,00
--------------------------	------	------	------	------

Metales y metaloides

Arsénico (AS)	mg/L	0,10	0,10	0,10
Bario (BA)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Cadmio (Cd)	mg/L	0,10	0,10	0,10
Cinc (Zn)	mg/L	3,00	3,00	3,00
Cobre (Cu)	mg/L	1,00	1,00	1,00
Cromo (Cr)	mg/L	0,50	0,50	0,50
Hierro (Fe)	mg/L	3,00	3,00	3,00
Mercurio (Hg)	mg/L	0,01	0,01	0,01
Níquel (Ni)	mg/L	0,50	0,50	0,50
Plata (Ag)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Plomo (Pb)	mg/L	0,20	0,20	0,10
Selenio (Se)	mg/L	0,20	0,20	0,20

Vanadio (V)	mg/L	1,00	1,00	1,00
-------------	------	------	------	------

Otros parámetro para análisis y reportes

Acidez Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte				
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte				
Dureza Cálctica	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte				
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte				
Color Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm)	m ⁻¹	Análisis y Reporte				

Tabla 12 *Histograma de Cloruros años 2005-2016, Campo Cicuco*

AÑO	Cl- [ppm]	NORMA [ppm]	DESFASE (%)
2005	12702	1200	958,5
2006	12449	1200	937,4
2007	11940	1200	895,0
2008	12912	1200	976,0
2009	12743	1200	961,9
2010	12306	1200	925,5
2011	12250	1200	920,8
2012	12883	1200	973,6
2013	12844	1200	970,3
2014	12084	1200	907,0
2015	13074	1200	989,5
2016	7366	1200	513,8

Fuente: MCS (2016)

De manera gráfica se puede observar la magnitud de desfase entre las concentraciones vertidas y permitidas a partir de la normativa regulatoria, lo cual concluye que se requiere de manera urgente un sistema de tratamiento de cloruros para adaptarse a la norma legal ambiental (ver Gráfico 1).

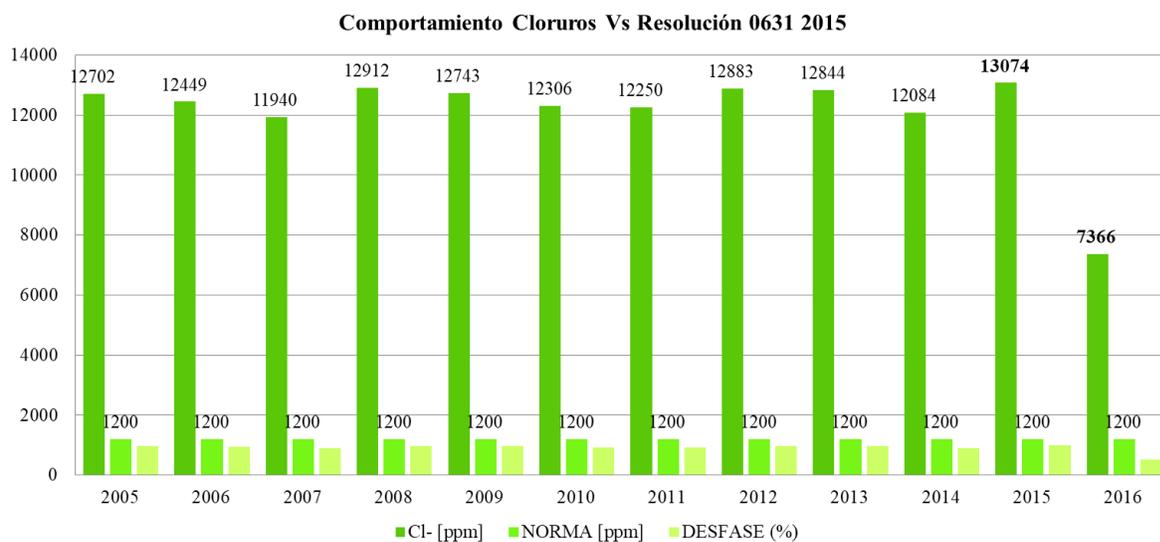


Figura 24 Comportamiento de Cloruros Vs Concentración Permissible, años 2005-2016. Campo Cicuco

Fuente: autores

Análisis Estadístico de la concentración de cloruros en Campo Cicuco.

Un adecuado tratamiento en las aguas residuales industriales para una buena reutilización es fundamental su transformación ya que tiene como objetivo mejorar la calidad del efluente de aguas residuales. En Colombia se utiliza en varias regiones para verter el agua de producción en ríos y otros cuerpos hídricos. Sin embargo, para evitar que esto se convierta en un riesgo ambiental, la industria petrolera está trabajando en nuevos proyectos para llegar a cero vertimientos y así convertir el agua de producción nuevamente en un valioso recurso renovable.

La idea es verter el agua en afluentes naturales, bajo las condiciones y a las distancias establecidas por las autoridades ambientales competentes en el ámbito regional, esta es tratada mediante procesos químicos y físicos que remueven el mayor número de contaminantes para así dar cumplimiento a la normatividad existente en materia ambiental.

El agua de producción ha sido considerada durante mucho tiempo como un subproducto en la industria petrolera, que acarrea múltiples inconvenientes, es por eso que en este caso se busca la remoción de Cloruros presentes en las aguas Residuales Industriales buscando una aplicación de un método u otro dependiendo fundamentalmente de la concentración del contaminante y del caudal de efluente, por tal fin, se ha investigado acerca de los registros históricos (histogramas) de los últimos 10 años y comparados con la normatividad de la legislación colombiana.

Fase II: Evaluar los métodos de osmosis inversa e intercambio iónico mediante análisis numéricos, como alternativas para la remoción de cloruros

Como resultado se obtuvo el análisis operacional el sistema de Aguas Residuales Industriales y de fluidos de la Estación Campo Cicuco, que permitió a través de análisis técnico comparativo ponderado dar la valoración teniendo en cuenta el estado actual de los equipos y sistemas de operación lo que fue un factor decisivo en la selección de la técnica apropiada para la remoción de cloruro en las ARI de la Estación Campo Cicuco.

Análisis de la Filosofía Operacional del Sistema de agua residual industrial en la Estación Cicuco.

La producción de Petróleo, Gas y Agua del Campo Cicuco está asociada a la unidad litológica Caliza de Cicuco, la cual presenta una textura finamente cristalina, con miembros de caliza arcillosa, caliza pura, caliza arenosa a conglomericata, por lo general estas calizas son densas y duras, con contenido fosilífero; por ende, los altos aportes de contenido de iones carbonatos, bicarbonatos y cloruros son inevitables desde el yacimiento.

Desde los pozos, las facilidades de Superficie del Campo Cicuco están compuestas principalmente por dos estaciones para la recolección y tratamiento de crudo. Una estación central en Cicuco y una estación satélite en Boquete.

Las Facilidades de Boquete recogen 8 pozos de Boquete,(B-2,-B-4,B-8, B-9, B- 11, B-14, B-18, B-19). Estos pozos son recibidos en dos separadores verticales bifásicos, (100-110 psia & 85°F). De estos separadores existe un separador general de 60"x15 y un separador de prueba de 48"x12'. De estos dos separadores se recoge una línea de gas de 8'' y aproximadamente 10 Km que envía el gas a la Estación Central de Cicuco.

Los líquidos son recolectados dentro de las facilidades de boquete en un tanque cilíndrico de 1000 Bls. De este tanque se bombean los líquidos por medio de una bomba Duplex Garden Denver 120 HP, hasta las facilidades de Cicuco. Las facilidades Centrales de Cicuco reciben los fluidos de Boquete y los pozos de Cicuco y los distribuyen de la siguiente manera: Los fluidos de Boquete se recogen en un tanque de 1500 Bls para su separación final agua aceite y final exportación.

Los once pozos de Cicuco comprenden: C-2, C-3, C-4, C-8, C-15 C-18, C-20, C- 22 C-23, C-29, C-32, de los cuales dos se encuentran inactivos (C-2, C-29, C-20) y uno cerrado temporalmente (C-15).

Las facilidades de producción cuentan con un manifold donde recibe los pozos productores, Estación Cicuco, seguidamente el fluido pasa a 3 separadores bifásicos (fluido-gas). Los líquidos son enviados a un Gun barrel de 5000 Bls en donde se realiza la separación agua aceite, el crudo rebosa con un BSW (Cantidad de Agua y Sedimentos) por debajo de 0.5%, hasta esta

parte del proceso el agua acompaña a los hidrocarburos ya que comienza su drenaje hacia el sistema ARI (Ver Figura 10).

Diagrama de Procesos de Fluidos del Campos Cicuco.

Dentro del diagrama de procesos industriales de la planta de producción Campo Cicuco existe para el tratamiento de las ARI un sistema que permite mantener los niveles permisibles de las aguas provenientes de los pozos de producción pasan a través de un separador líquido-gas, de allí las aguas se dirigen a un tanque de almacenamiento (principal), donde se realiza la separación de crudo/agua, el crudo sale por rebose hacia otro tanque de almacenamiento. Las aguas drenadas caen a un registro a la salida del área de tanques 1 de almacenamiento de crudo (1500-3, 1500-4, 900-1, 5000-1 y 5000-2); luego pasan al registro de entrada del API, donde se encuentran con las aguas drenadas del tanque 55000-1. A la salida al separador API se aplica sulfato de aluminio para tratar el Bario. Al llegar a la piscina de oxidación No. 1, por peso el agua sale y el crudo queda en las trampas API capturado por los skimmers, el cual es bombeado nuevamente al tanque principal de separación de aguas (TK 5000-1) y el agua que cursa en la piscina, se limpia mediante la separación de la nata (salmuera). Seguidamente, el agua pasa por canaletas hacia la piscina de oxidación No. 2 teniendo contacto con hipoclorito de sodio para el tratamiento de fenoles. En la piscina de oxidación No. 2 se complementa el proceso de oxigenación del agua con aireadores. Luego se vierten las aguas tratadas al río Chicagua por medio de bombas de transferencia, cuando el agua de la piscina alcanza cierta altura.



Figura 25 Proceso de fluidos Campo Cicuco

Fuente: ECOPEPETROL (2017)

Tabla 13 Identificación, georreferenciación y observaciones puntos de monitoreo ARI y aguas superficiales campo Cicuco

IDENTIFICACIÓN	COORDENADAS	
	NORTE	OESTE
Entrada al separador API	09°15'30.3	074°39'06.0
Canal de paso piscuna 1 hacia la piscina de oxidación 2	09°15'29.3"	074°39'06.8"
Punto de Vertimiento al río Chicagua	09°14'50.6"	074°39'17.8"
Aguas Superficiales		
Río Chicagua 100m aguas arriba del punto de Vertimiento	09°14'47.2"	074°39'17.0"
Río Chicagua punto de mezcla	09°14'50.6"	074°39'17.8"
Río Chicagua 100m aguas abajo del punto de vertimiento	09°14'53.1"	074°39'19.9"

Fuente: ECOPEPETROL (2017)

Sistema de agua residual industrial de Producción de Campo Cicuco.

En el campo Cicuco actualmente se cuenta con dos Baterías una ubicada en Cicuco y otra en Boquete, en donde se reciben los diferentes fluidos producidos por el Subsuelo (Gas, Petróleo, y Agua de formación) provenientes de cada uno de los pozos Cicuco y Boquete, que entran por Serpentin o Manifold a los Separadores Bifásicos Verticales de los cuales en la actualidad existen 3 (tres) en la batería de Cicuco y 2 (dos) en la batería de Boquete.

En la Batería de Boquete los separadores están diseñados para trabajar a una presión máxima de 150 psia, de ahí en adelante se dispara la Válvula de Alivio o Seguridad, la cual se encuentra conectada para el caso de Boquete a la misma línea de 12” que lleva a la Batería de Cicuco el Gas Húmedo y la de Cicuco es descargada a la salida del drenaje de los tanques de almacenamiento de crudo. En la Batería de Boquete existe un Separador General y uno de Prueba, los fluidos que llegan a esa Batería son separados, los líquidos salen por la parte inferior delantera y se reciben en un tanque general de 1000 Bls.

Adicional al Tanque General de 1000 bls, se construyó un Tanque de prueba con capacidad de 650 bls. En el momento de realizar las pruebas de pozo de Boquete se cuenta con un medidor de flujo “DANIEL MRT 97” que permite corroborar el caudal de líquido que aporta el pozo durante la prueba. Los líquidos recibidos en la batería Boquete son bombeados por una Bomba GARDNER-DENVER de desplazamiento positivo con dos pistones de 2” de diámetro, a la Batería de Cicuco en donde son separados (crudo y agua) por el método de Gun-Barrel.

Los fluidos que producen los pozos de Cicuco y Boquete que llegan a la batería de Cicuco, pasan por un proceso de separación gravitacional, por el tanque 5000-1 para Cicuco y 1500-3

para Boquete. Las aguas de formación son enviadas a una Piscina Separadora agua-aceite (piscina A.P.I), luego a una piscina de oxidación. Posteriormente esta agua es vertida al Rio Chicagua por medio de una Bomba Centrifuga de 75 HP, permiso otorgado por la Corporación Autónoma Regional del Sur de Bolívar – CSB en la resolución 336 de 2013 con vigencia 5 años (Ver figura 5).

Con el fin de tener un mejor entendimiento del Sistema ARI de Campo Cicuco, se ha implementado una serie de nodos en sentido aguas abajo desde la salida de Sistema de Tanques hasta el Vertimiento hacia el Rio Chicagua (Ver figura 25).

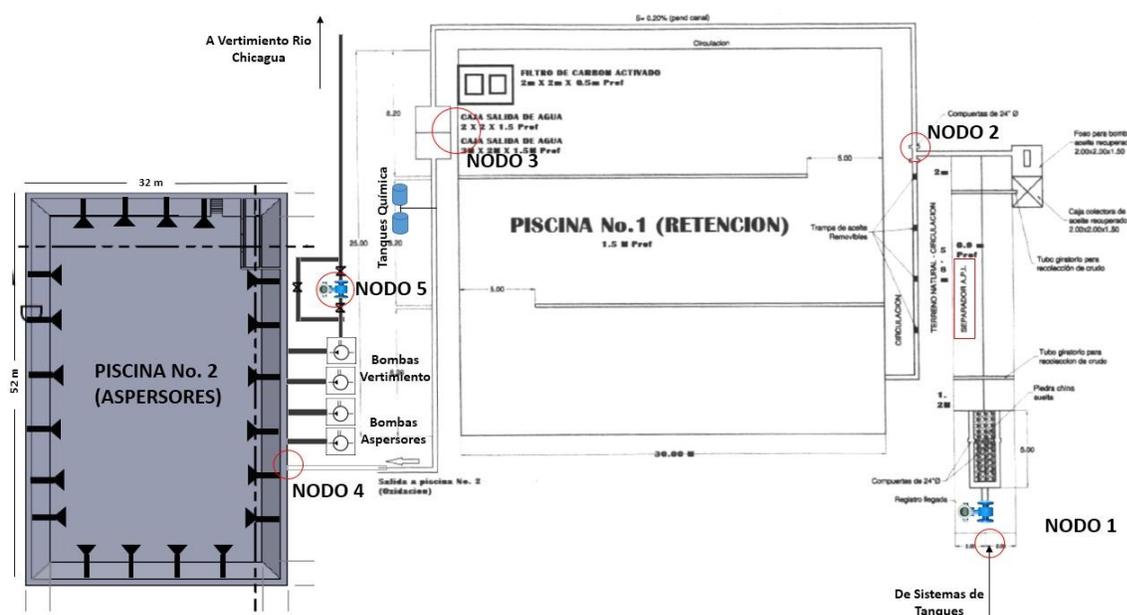


Figura 26 Sistema de Agua Residual Industrial, Campo Cicuco

Fuente: autores

El Nodo 1 es representado por el Medidor de Caudal después del Registro de drenaje del Sistema de tanques.

- El Nodo 2 es representado por la salida del separador API.
- El Nodo 3 es la caja se salida de aguas de la Piscina N. 1, Retención.
- El nodo 4 es representado por el final del canal que une la Piscina 1 con la Piscina 2.
- El nodo 5 es representado por el medidor de vertimiento.

Siguiendo el esquema de la figura 28, el agua en condiciones normales sale por la pierna de agua del Gun Barrel hacia los separadores API por drenaje gravitacional, a la salida de Sistema de Tanques, se encuentra un registro en el cual se unen todos los drenajes del sistema de Tanques, después el sistema continua con una línea de 4" el cual tiene un Medidor de Caudal con sistema by pass (Nodo 1, Figura 27), el rango de caudal se encuentra entre 0,004 y 0,005 m³/s, y el volumen diario registrado es de 1200 a 1400 m³.



Figura 27 Nodo 1: Registro Tanques de Almacenamiento y Medidor de Drenaje

Fuente: autores

Posterior al medidor, el drenaje entra al Sistema de Agua Residual donde se encuentra otro Registro, el cual conecta con las conexiones de drenaje de agua (natas) de los tanques de Almacenamiento de Condensados.

Entre el Nodo 1 y Nodo 2, se encuentra el separador API , la primera parte está formada por dos canales divididos por una pared de concreto, la segunda parte está dividida de la primera por un sistema de compuertas que pueden controlar el paso del drenaje, al final del separador API se encuentran dos (tubos con ranuras) los cuales reciben las grasas y aceites direccionándolos con ayuda del personal de mantenimiento hacia el Registro API y posteriormente a los tanques de almacenamiento de crudo, el agua por gravedad pasa por una serie de conductos que se encuentran debajo de los skimmers (Figura 30), atravesando la pared que separan el Separador API con el canal que se dirige hacia la piscina N. 1.



Figura 28 Separador API

Fuente: autores



Figura 29 Sistema de Compuertas Separador API

Fuente: autores



Figura 30 Skimeers y Registro API

Fuente: autores

El Nodo 2 es la entrada del canal perimetral de la piscina N. 1, este tiene dos funciones, primero, dirigir el drenaje hacia esta piscina cuya función es permitir que se decanten los sedimentos y partículas lodosas mediante un sistema de 3 canales, aplicando tratamientos de floculación y sedimentación para disminuir los parámetros de TDS, grasas y aceites; segundo, dirigir el drenaje hacia el canal perimetral que rodea la piscina cuando esta se encuentre en

mantenimiento. El tiempo de retención depende de los parámetros operacionales como caudal, aperturas de válvulas y compuertas.



Figura 31 Nodo 2

Fuente: autores

Actualmente la Piscina N. 1 esta deshabilitada debido a una contingencia temporal para almacenar Borras (Material lodoso saturado con Petróleo), por ende, el flujo sistema ese adaptó por el canal perimetral ya mencionado.



Figura 32 Piscinas de Oxidación

Fuente: autores

El canal perimetral permite conectar el nodo 2 y 3, con el 4 el cual es la entrada de la Piscina N. 2, (Ver Figura 33) a través de este es adicionada el agente químico oxidante por gravedad durante 4 horas el cual controla el parámetro de fenoles.



Figura 33 Nodo 3

Fuente: autores



Figura 34 Entrada de la Piscina N. 2.

Fuente: autores

La Piscina N. 2 tiene un sistema de oxigenación por medio de 20 Aspersores ubicados perimetralmente y una bomba electro-sumergible de 25 HP ubicada en el centro de esta, trabajando las 24 horas del día, el periodo de vertimiento se realiza entre las 7:00 am y 12:00 por medio de dos bombas de 10 HP, las cuales trabajan en periodos intercalados.

En este nodo no llegan natas de aceite y grasas a la Piscina N. 2 (Aireación), por lo cualitativamente se observa que el efecto de pretratamiento con los filtros propuestos funciona; sin embargo, estos deben ser respaldados con análisis cuantitativos de TDS. (Solidos Disueltos Suspendidos).



Figura 35 Piscina N. 2: Aireación

Fuente: autores

Finalmente, el Nodo 5 está ubicado en el medidor de vertimiento, el cual tiene un sistema by pass, el rango de caudal esta entre 0,04 y 0,05 m³, y los volúmenes diarios son entre 800 y 1000 m³. La figura 26 muestra el esquema by pass del medidor, en este punto se propone instalar el sistema de tratamiento, sea osmosis inversa o intercambio iónico ya que está después de las bombas de vertimiento y antes del medidor, esto permite aprovechar la mayor energía hidráulica

posible y verificar el estado del sistema de tratamiento por medio del caudal promedio histórico y nuevo caudal con el sistema de tratamiento.



Figura 36 Nodo 5, Medidor de Vertimiento

Fuente: autores

Análisis Técnico Comparativo Ponderado de las Técnicas de Osmosis Inversa e Intercambio Iónico.

Mediante el análisis descriptivo, se analizó las ventajas y desventajas que presenta cada sistema de remoción de cloruros. Se ha diseñado un análisis de viabilidad que cuantifica las ventajas y desventajas de cada uno, donde 5 es la máxima calificación y 0 es la mínima (Ver tabla 9). De acuerdo al estado del arte anteriormente descrito, a cada sistema de remoción se les asignó 6 ventajas y 6 desventajas, las cuales son promediadas como “Ponderado Parcial” (Ver Ecuación 25 y 26) respectivamente y se cuantifica la viabilidad, “Ponderado Total” (Ver Ecuación 27), como un Error Relativo sin valor absoluto, ya que el Ponderado Total puede ser negativo, donde el valor exacto corresponde al promedio de la ventajas y el valor experimental al promedio de las desventajas.

En resumen:

Calificación de Ventajas y Desventajas:

Tabla 14 *Calificación de Ventajas y Desventajas*

Valor	Ventaja	Desventaja
5	Impacto positivo	Impacto negativo
0	Impacto negativo	Impacto positivo

Fuente: autores

El resultado más viable es el “Ponderado Total” mayor que tienda a 1, ya que representa mayor impacto de las ventajas sobre las desventajas.

Justificación Ventajas del Sistema de Osmosis Inversa.

Utilizan unas membranas llamadas semi-permeables que trabajan con altas y bajas concentraciones de salinidad, dejan pasar el agua en tanto que retienen del 90-99% de todos los elementos minerales disueltos, del 95-99% de la mayoría de los elementos químicos y el 100% de las materias coloidales más finas (bacterias, virus, sílice coloidal).

Calificación: 5

Justificación: Es altamente eficiente tener un sistema de remoción mayor al 90% de los Sólidos Disueltos Totales TDS (sales minerales y material orgánico), independiente de las concentraciones y alimentación.

En el caso de que un simple paso de ósmosis inversa no alcance para cumplir con la calidad del agua requerida, se puede utilizar como pulido: segundo paso de ósmosis inversa, lecho mixto o incluso sistemas de electrodeionización:

Calificación: 3

Justificación: Lo ideal sería que con un solo paso independientemente de la alimentación pudiera remover más del 90% de valores de TDS.

- **Bajo costo de Producción:**

Calificación: 5

Justificación: Es importante debido a que la viabilidad es técnico-económico.

- **Producción continua:**

Calificación: 5

Justificación: Sólo se requiere realizar paradas para mantenimientos preventivos.

- **Espacio Reducido:**

Calificación: 5

Justificación: No se necesita grandes áreas para su implementación, de igual manera el transporte de las unidades es mucho más flexible.

- **Proceso Limpio, sin efluentes ácidos o alcalinos:**

Calificación: 5

Justificación: A diferencia del intercambio iónico, la osmosis inversa genera un permeado sin sustancias de diferente naturaleza a la de la alimentación.

Justificación Desventajas del Sistema de Osmosis Inversa.

- **Reducción del pH del agua:**

Calificación: 3

Justificación: Esta reducción genera gastos debido al post-tratamiento alcalino que se debe inducir el permeado para mantener el pH en los parámetros legales; sin embargo, si el valor es entre 6 y 7, el permeado puede nivelarse en este patrón una vez se mezcle con las aguas del río donde será vertido.

- **Proceso volumétrico, en el cual la calidad de salida depende de la calidad agua de alimentación:**

Calificación: 3

Justificación: Se debe hacer un pretratamiento para optimizar el proceso.

- **Generación de corriente de alta concentración de sólidos disueltos:**

Calificación: 2

Justificación: Esta corriente, concentrado, no se verterá junto con el permeado, volverá al sistema para ser tratada nuevamente.

- **Algunos minerales alcalinos beneficiosos también se quitan junto con otros minerales nocivos, lo que hace el agua más ácida:**

Calificación: 2

Justificación: El proceso de remoción es tan eficiente de manera que es necesario hacer un postratamiento para aumentar algunos parámetros físico-químicos debido al uso que se vaya a dar; sin embargo, el río donde será vertida el agua ayudará a aumentar los niveles de estos parámetros.

- **Mantenimiento preventivo constante de las membranas para evitar disminución de la eficiencia:**

Calificación: 2

Justificación: Se debe estar vigilando constantemente el porcentaje de remoción, una vez baje del 90%, se tiene que hacer mantenimiento a las membranas; sin embargo, estos mantenimientos son normales para cualquier sistema de remoción.

- **Se necesita electricidad para el bombeo y presurización:**

Calificación: 3

Justificación: La energía consumida respecto al sistema de intercambio iónico es mayor debido a que se necesita superar el valor de presión osmótica.

Justificación Ventajas del Sistema de Intercambio Iónico.

- **Muy buena calidad producida a la salida del tren de intercambio iónico:**

Calificación: 5

Justificación: Es un sistema de alta eficiencia mayor al 80% enfocado a la remoción iónica.

- **Útil cuando la salinidad del agua de alimentación es baja:**

Calificación: 3

Justificación: La salinidad del agua de alimentación generada de los pozos de Campo Cicuco es alta.

- **Facilidad de automatización:**

Calificación: 5

Justificación: A diferencia del sistema de Osmosis Inversa (caudal y presión), solo se necesita automatizar el paso del caudal.

- **Las resinas son muy estables químicamente, de larga duración y fácil regeneración:**

Calificación: 5

Justificación: Las resinas son análogas a las membranas del sistema de Osmosis Inversa, en este caso el mantenimiento realizado es de regeneración, es decir, cuando ya no tengan capacidad de intercambiar iones.

- **No se desperdicia agua como rechazo:**

Calificación: 5

Justificación: A diferencia del otro sistema, toda el agua de alimentación es tratada en un solo paso.

- **Se necesita electricidad sólo para bombeo:**

Calificación: 4

Justificación: Es una ventaja respecto al otro sistema, ya que no se consumirá para presurizar; sin embargo, es un consumo adicional.

Justificación Desventajas del Sistema de Intercambio Iónico.

- **Debe haber disponibilidad en planta de los regenerantes:**

Calificación: 4

Justificación: Es un gran consumo, ya que los regenerantes son sustancias líquidas que permiten remover los iones intercambiados por las resinas en el proceso de remoción y colocar los iones H⁺ y OH⁻ para la reutilización del sistema, aumenta los costos.

- **Capacitar apropiadamente a los operarios que trabajarán con las columnas de intercambio iónico en el correcto manipuleo, almacenamiento y cuestiones de seguridad de los productos utilizados:**

Calificación: 3

Justificación: Este sistema requiere mayor cuidado de procedimiento debido a uso de resinas, regeneradores y automatización del sistema.

- **Proceso Sucio, con efluentes alcalinos y ácidos:**

Calificación: 5

Justificación: Es más viable generar efluentes con índices de bajos parámetros físico-químicos que con altos, los tratamientos son más costosos.

- **No elimina las bacterias, las sustancias orgánicas, las partículas o los pirógenos de forma efectiva:**

Calificación: 5

Justificación: Esta en una gran falencia respecto al otro sistema, representa mayores gastos de post-tratamiento.

- **Mayor costo de producción cuando la alimentación es alta:**

Calificación: 5

Justificación: La alimentación del vertimiento del sistema ARI de Campo Cicuco supera los 800 gpm, esto significa mayores números de resinas y regeneradores.

Análisis Cuantitativo de la Osmosis Inversa.

Tabla 15 *Análisis Cuantitativo de la Osmosis Inversa*

Sistema de remoción	Ventajas	Calificación Máximo: 5 – Mínimo: 0	Desventajas	Calificación Máximo: 5 – Mínimo: 0
Osmosis inversa	Utilización de membranas llamadas semi-permeables que trabajan con altas y bajas concentraciones de salinidad, dejan pasar el agua en tanto que retienen del 90 – 99% de todos los elementos minerales disueltos, del 95 – 99% de la mayoría de los elementos químicos y el 100% de las materias coloidales más finas (bacterias, virus, sílice coloidal)	5	Reduccion del pH del agua	3
	En el caso de que un simple paso de osmosis inversa no alcance para cumplir con la calidad del agua requerida, se puede utilizar como pulido: segundo paso de osmosis inversa, lecho mixto o incluso sistemas de electrodeionización	3	Proceso volumétrico, en el cual la calidad de salida depende de la calidad de agua de alimentación	3
	Bajo costo de producción	5	Generación de corriente de alta concentración	2

			de sólidos disueltos	
			Algunos minerales alcalinos beneficiosos también se quitan junto con otros minerales nocivos, lo que hace el agua más ácida.	2
	Producción continua	5		
			Mantenimiento preventivo constante de las membranas para evitar disminución de la eficiencia	2
	Espacio reducido	5		
			Se necesita electricidad para el bombeo y presurización	3
	Proceso limpio, sin efluentes ácidos o alcalinos	4		
Ponderación parcial		4,5		2,5
Ponderación total			0,44	

Análisis Cuantitativo del Intercambio Iónico.

Tabla 16 *Análisis Cuantitativo del Intercambio Iónico*

Sistema de remoción	Ventajas	Calificación Máximo: 5 – Mínimo: 0	Desventajas	Calificación Máximo: 5 – Mínimo: 0
----------------------------	-----------------	---	--------------------	---

Intercambio Iónico	Muy buena calidad producida a la salida del tren de intercambio iónico	5	Debe haber disponibilidad en planta de los regenerantes	4
	Útil cuando la salinidad del agua de alimentación es baja	3	Capacitar apropiadamente a los operarios que trabajarán con las columnas de intercambio iónico en el correcto manipuleo, almacenamiento y cuestiones de seguridad de los productos utilizados	3
	Facilidad de automatización	5	Proceso sucio, con efluentes alcalinos y ácidos	5
	Las resinas son muy estables químicamente, de larga duración y fácil regeneración	5	Se debe considerar en el diseño el tiempo perdido para regeneración del lecho	3
	No se desperdicia agua como rechazo	5	No elimina las bacterias, las sustancias orgánicas, las partículas o los pirógenos de forma efectiva	5
	Se necesita electricidad solo para bombeo	4	Mayor costo de producción cuando la alimentación es	5

		alta
Ponderación parcial	4,5	4,2
Ponderación total		0,07

Teniendo en cuenta que el valor de 5,0 es un valor de impacto positivo en las ventajas y de impacto negativo en las desventajas, el sistema de Osmosis Inversa es el más viable para aplicar en el Sistema ARI de Campo Cicuco.

A pesar que los dos sistemas tienen el mismo valor Ponderado Parcial en Ventajas; en las desventajas, el Sistema de Intercambio Iónico refleja grandes falencias en cuanto a la calidad del permeado, mantenimiento y capacidad operacional volumétrica, esto se cuantifica con un valor Ponderado Parcial de 4,2 respecto a 2,5 del Sistema de Osmosis Inversa.

Finalmente, la Ponderación Total, teniendo en cuenta que todo valor mayor y que por ende tiende a 1 representa el sistema más viable, refleja claramente que el Sistema de Osmosis Inversa con un valor de 0,44 es el seleccionado respecto al Sistema de Intercambio Iónico con valor de 0,07.

Además se menciona que para valores mayores de 5000 ppm de TDS (sólidos disueltos totales) y 5 ppm de TSS (sólidos suspendidos totales), el Sistema de Intercambio Iónico económicamente no es viable, esto se contrasta con la realidad del agua de vertimiento de Campo Cicuco en 17453 ppm de TDS y 50 ppm de TSS.

Tabla 17 Selección del Sistema de Remoción

Sistema	Ponderación total	Viabilidad de Selección
Osmosis Inversa	0,44	OK
Intercambio Iónico	0,07	-

Fase III Seleccionar a partir del análisis técnico, la alternativa apropiada para la remoción de cloruros en aguas residuales industriales de producción del Campo Cicuco

Posterior al análisis técnico comparativo ponderado realizado en la fase anterior, se tomó como factor relevante para la selección de la alternativa las variables de la caracterización fisicoquímica del agua residual, el volumen del caudal, la generación de residuos, los equipos y sistemas existentes en el proceso, además de la eficiencia de remoción; como resultado las siguientes consideraciones:

- **Consideración Técnica Osmosis Inversa:**

El proceso de osmosis inversa tiene las siguientes características que lo hacen un buen método para la eliminación de cloruros ya que permite remover la mayoría de los sólidos (inorgánicos u orgánicos) disueltos en el agua (99%) incluyendo las sales. El proceso de purificación es de forma continua, la tecnología simple, que no requiere de mucho mantenimiento, es modular y necesita poco espacio, de acuerdo a los caudales deseados.

- **Consideraciones técnicas Intercambio Iónico:**

Esta tecnología presenta aplicabilidad limitada ya que no es capaz de eliminar los niveles de sólidos totales disueltos (TDS) por encima de aproximadamente 5.000 mg/L. Se considera que el

intercambio iónico presenta un límite económico a partir de 800 mg/L de TDS. Las soluciones de alto TDS superiores a 3000 mg/L pueden causar problemas de autoregeneración ya que las unidades de intercambio iónico también son sensibles a la presencia de iones competidores. Por ejemplo, el influente con altos niveles de dureza competirá con otros cationes (iones positivos) por el espacio en el medio de intercambio, y el medio de intercambio debe regenerarse más frecuentemente, lo que acarrearía mayor costo por el cambio permanente de las mismas.

Otra de las razones por la cual este sistema no es apto para la implementación en la remoción de cloruros en ARI se debe a que los residuos de intercambio iónico son altamente concentrados y requieren una eliminación cuidadosa, además el total de sólidos suspendidos (TSS) que se pueden eliminar por filtración no . Estos sólidos no se disuelven en el agua y no se eliminarán mediante resina de intercambio iónico. Las altas concentraciones de TSS requieren filtración adicional. Los niveles no deben ser superiores a 5 mg/L entrando en el intercambiador de iones. El agua residual a tratar tiene 50 mg/L de TDS.

Se requiere de pretratamiento adicional con químicos de altos costos para que el agua ARI cumpla con las características para la implementación del tratamiento de intercambio iónico.

De acuerdo a lo antes indicado, se concluye que la técnica apropiada teniendo en cuenta la caracterización de las ARI y sistemas existentes, es la Osmosis Inversa, y a la vez se propone la implementación de un sistema de pretratamiento de remoción de trazas de grasas y aceites residuales del sistema a través de un lecho filtrante que permita cumplir con las condiciones necesarias para la posible implementación de un sistema de tratamiento de Osmosis Inversa.

Implementación de Pretratamiento Lecho Filtrante.

Las condiciones operacionales del Sistema ARI se han visto afectada por diferentes procesos dentro del plan operativo, por tal razón no se cuenta con la disponibilidad operacional de la Piscina No. 1; por ende, el canal perimetral debe adaptarse para mitigar tal impacto. Se ha propuesto conjuntamente con el Frente de Ingeniería de la actual Operadora Contratista de Campo Cicuco, implementar 4 filtros a lo largo del canal perimetral entre el Nodo 2 y 3, con el fin de disminuir principalmente los parámetros de grasas, aceites y sólidos disueltos, lo permite que el agua residual cumpla con las condiciones necesarias, además de disminuir los costos operacionales y de post tratamiento para la Osmosis Inversa.

El pretratamiento de las aguas que alimenta un sistema de remoción es indispensable para minimizar problemas de taponamiento (fouling) a causa de las partículas suspendidas o de deposición (scaling) por las sales disueltas, que afectan la vida útil de la membrana y su rendimiento.

Operativamente, la disminución del rendimiento del proceso ocurre porque el aumento de las sustancias depositadas sobre la superficie de las membranas para la osmosis inversa genera una polarización de éstas, lo que provoca un aumento del paso de las sales (cloruros) y una disminución de la productividad. Además, dichas sustancias atrapadas originan aumentos localizados de la pérdida de carga dando lugar a un reparto irregular de los flujos a través de las membranas. Esta irregularidad en el reparto de los flujos acelerará la concentración por polarización y el ensuciamiento de la membrana.

El pretratamiento implementado se diseñó con residuos reciclables de otras actividades de bajo costo mencionados en estudios y pruebas para filtración de aguas residuales.

Sacos de Figue: Su uso se enfoca en almacenar los materiales filtrantes; sin embargo, aportan filtración debido al material de fibra vegetal del cual están hechos.

Cascarilla de Arroz: Material Adsorbente que permite la retención de material disuelto o suspendido en el agua, con afinidad orgánica e inorgánica.

Aserrín: Material Adsorbente con características de retener nano partículas de afinidad inorgánica.

Pasto Seco: Material filtrante usado para amortiguar el flujo del fluido a la entrada del filtro y permitir mayor tiempo de retención en el mismo, de igual manera, permite retención debido a su naturaleza fibra vegetal adsorbente.



Figura 37 Materiales filtrantes

Fuente: autores

Diseño de Filtros para Pretratamiento.

El diseño de los filtros se basa en organizar los materiales de menor a mayor según la capacidad de adsorción y de mayor a menor según el espacio vacío (poros) del material filtrante. La figura 36 muestra el diseño donde la dirección de flujo es perpendicular a los filtros, pasando primero por una sección de pasto seco, luego de cascarilla de arroz y finalmente aserrín, siguiendo las definiciones y criterios de filtración anteriormente descritos.

Los materiales se agregaron en cantidad proporcionada en forma de capas verticales dentro de los sacos de fique, en el orden anteriormente descrito. La Figura 37 muestra cómo se realizó el procedimiento: Primero se agregó de la capa aserrín y se compacto con una pala; segundo, sobre la capa de aserrín se adicionó la capa de cascarilla de arroz, posteriormente se introdujo un tubo de hierro en el fondo del saco con el fin de darle estabilidad vertical; tercero, se agregó la capa de pasto seco.



Figura 38 Acomodación de materiales filtrantes

Fuente: autores

Finalmente se le hace tres trenzados a los filtros con alambre para que los materiales conserven sus respectivas posiciones; además, se hace un trenzado en la parte superior con el fin

de sujetar el filtro con un soporte tubular, de esta manera se elaboran 4 filtros de pretratamiento (Ver Figura 38).



Figura 39 Filtro de Pretratamiento

Fuente: autores

Adecuación de Filtros en el Canal Perimetral.

Una vez los filtros de pretratamiento terminados, se procede a instalarlos en el canal perimetral a distancias equidistantes. En total se instalaron cuatro filtros, los cuales generan acumulamiento de grasas y aceites permitiendo que el personal de mantenimiento del sistema A.R.I lo pueda remover diariamente al igual que en el separador API.



Figura 40 Instalación de Filtros

Fuente: autores

Continuando con la descripción de la filosofía operacional del sistema ARI. el nodo está ubicado al final del último canal de la piscina N. 1 y entrada de canal perimetral, este está conformado por una serie de conductos atravesando la pared que divide la piscina con el canal, al igual que los conductos del separador API permiten el paso de drenaje (agua); sin embargo, por condiciones operativas de contingencia están cerrados. En el nodo No. 5 en la se puede observar que no se evidencia natas de aceite y grasas a la Piscina N. 2 (Aireación), por lo que se puede indicar cualitativamente que el efecto de pretratamiento con los filtros propuestos funciona en la remoción de los trazas; sin embargo, estos deben ser respaldados con análisis cuantitativos de TDS. (Solidos Disueltos Suspendidos).

Selección del Sistema de Remoción de Cloruros.

Variables Operacionales.

De acuerdo con la sección *Filosofía Operacional del Sistema de Agua Residual Industrial en la Estación Cicuco*, el sistema se ha dividido en 5 (cinco) nodos. La instalación del equipo de osmosis inversa se ejecutaría en el nodo N. 5, medidor de vertimiento. Por lo tanto, las variables operacionales se basarán en este nodo resumiéndose en las siguientes tablas.

Tabla 18 Bombas

Tipo de Bomba	Marca	Modelo	Potencia	RPM
Centrifuga	Goulds	Westinghouse	75 HP	1800
		WEG		RPM

Fuente: Confipetrol (2013)



Figura 41 Bombas de vertimiento, sistema ARI. Estación Cicuco

Fuente: autores

Tabla 19 *Tubería*

	Díámetro
Tubería	4 "

Fuente: autores

Tabla 20 *Válvulas*

Válvula de corte	Tipo	Cantidad	Medidor
	Compuerta	3	FLUJO 1

Fuente: autores

Tabla 21 Hidráulica

Hidráulica	Caudal Promedio		Presión	
		0,05 m ³ /s	25 in Hg	50 PSI

Fuente: autores

Propuesta de Instalación equipo de Osmosis Inversa.

Actualmente el Nodo N. 5, es representado en el diagrama, donde el agua de producción llega tratada física y químicamente particularmente para este estudio de investigación, esta agua representaría el agua pre tratada para los sistemas de osmosis inversa.

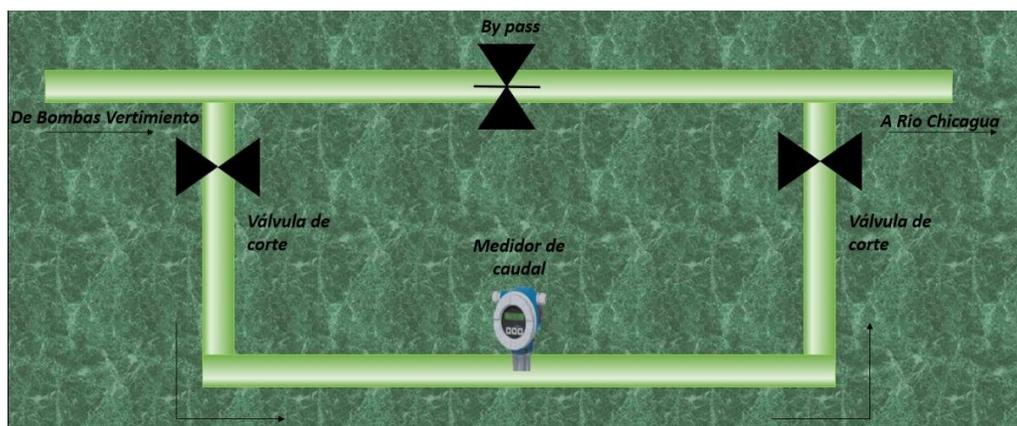


Figura 42 Nodo N. 5

Fuente: autores

La propuesta de instalación del sistema de osmosis inversa en el nodo N. 5 sugiere ubicarlo en el lugar donde se encuentra el medidor de vertimiento debido a su posición estratégica entre válvulas de corte tipo compuerta a la entrada y salida, la posición del *by pass* continuaría en el mismo punto y el medidor de caudal de vertimiento sería ubicado a la salida del nodo para que siga cumpliendo la función de fiscalizar el agua de vertimiento.

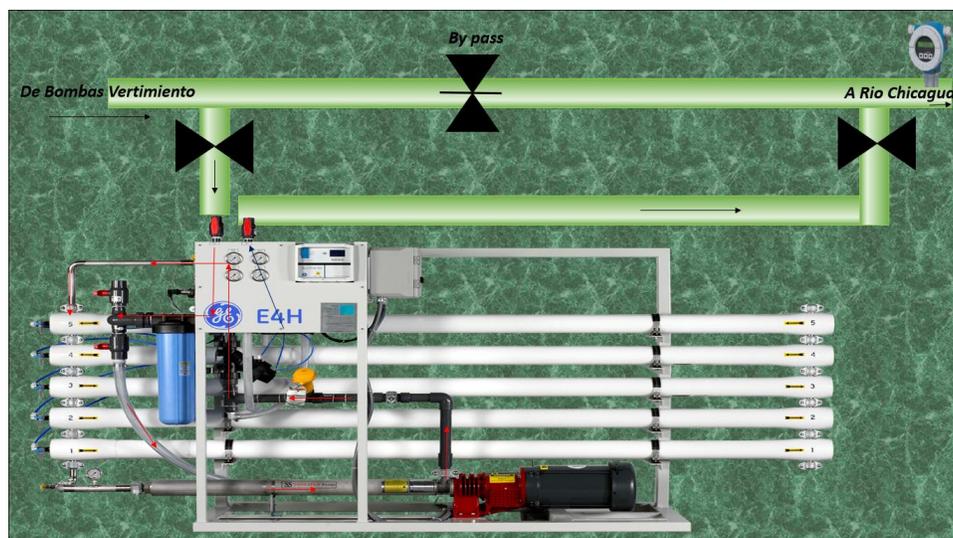


Figura 43 Propuesta instalación Sistema de osmosis inversa

Fuente: autores

La figura 42 muestra un modelo típico de sistema RO de la compañía General Electric[®], las líneas rojas indican la dirección del fluido a lo largo del sistema, entrando por el monitor de variables operacionales (presión, temperatura, caudal, etc), ingresa a un sistema suavizador para disminuir la dureza del agua, pasa por la bomba interna del sistema para presurizar y superar la presión osmótica requerida, luego pasa por el sistema de Cilindros contenedores (vassels) de filtros (elements), en este caso son los cinco cilindros blancos y finalmente pasa por el monitor de variables operaciones para ser dirigida al vertimiento.

Modelación o Simulación del Proceso: WINFLOWS® ARI Campo Cicuco



Figura 44 Software Winflows

Los procesos simulados de Winflows están regidos por las ecuaciones descritas en la sección *Descripción del Proceso* (Ec. 2 – Ec. 17). Una vez abierto el software, aparecerá la interfaz estándar como lo muestra la figura 44.

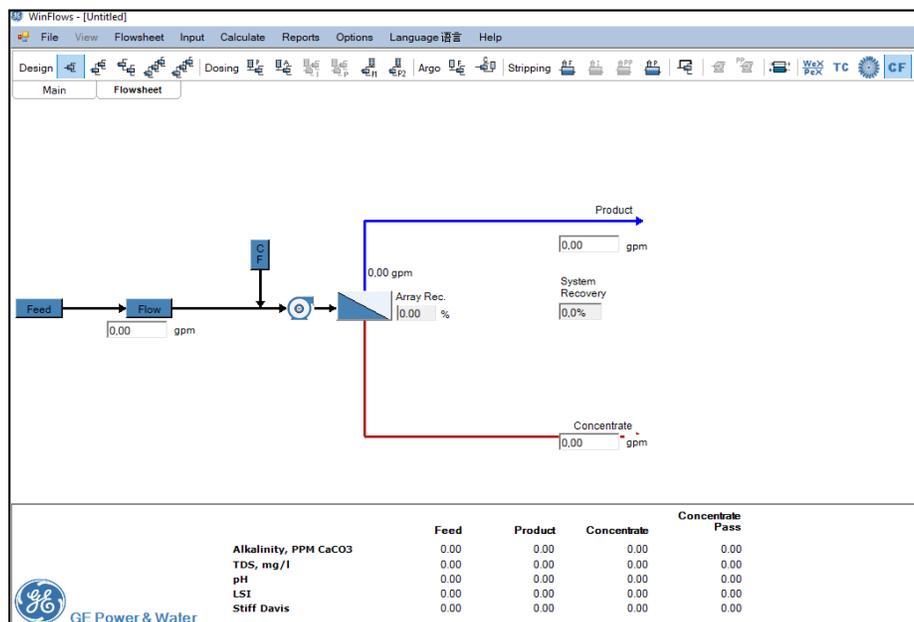


Figura 45 Interfaz winflows estándar

Fuente: General Electrics Corp (2007)

Por efecto, esta interfaz no tiene información cargada, solamente propone un arreglo de un paso o etapa, que consta de una alimentación (feed) la cual proviene de la línea “*De bombas vertimiento*”, en esta misma opción cargaremos los valores físico-químicos reportados para el sistema ARI del año 2016; flujo (flow) y bomba (pump) donde se cargará datos hidráulicos ; los filtros tipo cartucho no se necesitarán porque esto son utilizados como pretratamiento y en realidad ya fueron instalados en el sistema ARI (Implementación pretratamiento); seguidamente esta la opción de RO la cual permite seleccionar el mejor sistema de osmosis inversa fabricado por General Electrics ®, finalmente se obtendrán dos salidas, el permeado (agua tratada) y el concentrado (agua no tratada).

Para empezar, se sugiere optar por la *opción File – Desing assistant – Winflows projects wizard*, el cual permite ser guiado paso a paso para la creación del proyecto. Se le pedirá ingresar información del proyecto.

Figura 46 Información del proyecto

Fuente: autores

El asistente de diseño le guiará, paso a seguir, configurar diagrama de flujo. En esta opción se recomienda sólo configurar el arreglo del sistema, para efecto de usar un solo sistema de RO activaremos *Single Pass* – RO de un paso o etapa, las demás configuraciones pueden ser añadidas una vez se corra el proyecto como mejoras.

The image shows a 'Flowsheet Configuration' dialog box with the following settings:

- Flowsheet Type:**
 - Single Pass
 - Two Pass
 - Brine Staged
 - Three Pass-Conc recycle to 1st pass feed
 - Three Pass-Conc recycle to 2nd pass feed
- Options:**
 - Dosing:**
 - After Feed Dosing
 - Pre Feed Dosing
 - Interpass Dosing
 - Product 1 Dosing
 - Product 2 Dosing
 - Pre Product Dosing
 - Argo Analyzer Feed
 - Argo Analyzer Conc
 - Stripper:**
 - Feed Stripper
 - Interpass Stripper
 - Product Stripper
 - Pre Product Stripper
 - Others:**
 - Feed Bypass
 - Interpass Pump
 - Pre Product Pump
 - EDI
 - Energy Recovery Device:**
 - None
 - Work/Pressure Exchanger
 - Turbo
 - Pelton Wheel

Navigation buttons at the bottom: << Back, Exit, Next >>

Figura 47 Configuración diagrama de flujo

Fuente: autores

La siguiente opción es ingresar los parámetros físico-químicos de la alimentación (feed).

Water Type

Feed Water Analysis

Select Water Source: Brackish Surfacewater (Conventional)

Select Water Type: User Defined

Ion	mg/l	meq/l	ppm as CaCO3
Calcium (Ca)	0.00	0.0000	0.00
Magnesium (Mg)	0.00	0.0000	0.00
Sodium (Na)	0.00	0.0000	0.00
Potassium (K)	0.00	0.0000	0.00
Ammonia - N (NH4)	0.00	0.0000	0.00
Barium (Ba)	0.00	0.0000	0.00
Strontium (Sr)	0.00	0.0000	0.00
Iron (Fe)	0.00	0.0000	0.00
Manganese (Mn)	0.00	0.0000	0.00
Total Cations	0.00	0.0000	0.00
Sulfate (SO4)	0.00	0.0000	0.00
Chloride (Cl)	0.00	0.0000	0.00
Fluoride (F)	0.00	0.0000	0.00
Nitrate (NO3)	0.00	0.0000	0.00
Bromide (Br)	0.00	0.0000	0.00
Phosphate (PO4)	0.00	0.0000	0.00
Boron (B)	0.00	0.0000	0.00
Silica (SiO2)	0.00	0.0000	0.00
Hydrogen Sulfide (H2S)	0.00	0.0000	0.00
Bicarbonate (HCO3)	0.00	0.0000	0.00
Carbon Dioxide (CO2)	0.00	0.0000	0.00
Carbonate (CO3)	0.00	0.0000	0.00
Total Anions	0.00	0.0000	0.00

Note :- Alkalinity is user-input
Execute 'Balance' button first. If required, click on 'Add Sodium/Chloride'

Parameters

Total Alkalinity (ppm CaCO3):

TDS (mg/l): 0.00

pH: 0

Temperature (C): 25

SDI: 0

Recovery (%): 75

Saturation Data (Feed Water)

BaSO4: 0.00 %

CaF2: 0.00 %

CaSO4: 0.00 %

SiO2: 0.00 %

SrSO4: 0.00 %

Struvite: 0.000 %

LSI: 0.00

Stiff-Davis Index: 0.00

Osmotic Pressure: 0.00 psi

Conductivity at 25C: 0.0 μ S/cm

Density: 0.0 kg/m3

Buttons: Multiple Feed, Design Guidelines, Add Sodium, Add Chloride, Clear Values, Balance, Export, Import, Cancel, OK

Figura 48 Alimentación (Feed)

Fuente: General Electric Corp (2007)

Los parámetros de la tabla 22 para cargar los datos en la alimentación son los siguientes:

Tabla 22 *Parámetros para cargar datos en alimentación*

Parámetro	mg/L (ppm)
Bario (Ba ⁺)	0,6
Cloruros (Cl ⁻)	7366
Ácido Sulfhídrico (H ₂ S)	1,00
Temperatura	36,1
pH	6,72
CaCO ₃	420

Fuente: General Electrics Corp (2007)

Se debe seleccionar la fuente de agua (Select water source) con el fin de permitirle al software mayor afinidad con la realidad del sistema, en efecto, se seleccionó “Brackish wellwater”, haciendo referencia al agua salobre obtenida desde pozos; en cuanto a selección del tipo de agua (Select water type), no se selecciona ninguna opción (user defined) porque esto evita que se carguen datos por defecto.

El valor de SDI el cual es el Índice de Densidad de Solidos, a pesar que no está registrado en la tabla 7, tiene un rango permisible de 1 a 5, por defecto colocaremos 3.

Water Type X

Feed Water Analysis

Select Water Source:

Select Water Type:

Ion	mg/l	meq/l	ppm as CaCO3
Calcium (Ca)	0.00	0.0000	0.00
Magnesium (Mg)	0.00	0.0000	0.00
Sodium (Na)	0.00	0.0000	0.00
Potassium (K)	0.00	0.0000	0.00
Ammonia - N (NH4)	0.00	0.0000	0.00
Barium (Ba)	0.60	0.0087	0.44
Strontium (Sr)	0.00	0.0000	0.00
Iron (Fe)	0.00	0.0000	0.00
Manganese (Mn)	0.00	0.0000	0.00
Total Cations	0.60	0.0090	0.45
Sulfate (SO4)	0.00	0.0000	0.00
Chloride (Cl)	7366.00	207.7680	10397.44
Fluoride (F)	0.00	0.0000	0.00
Nitrate (NO3)	0.00	0.0000	0.00
Bromide (Br)	0.00	0.0000	0.00
Phosphate (PO4)	0.00	0.0000	0.00
Boron (B)	0.00	0.0000	0.00
Silica (SiO2)	0.00	0.0000	0.00
Hydrogen Sulfide (H2S)	1.00	0.0293	1.47
Bicarbonate (HCO3)	0.00	0.0000	0.00
Carbon Dioxide (CO2)	0.00	0.0000	0.00
Carbonate (CO3)	0.00	0.0000	0.00
Total Anions	7367.00	207.7975	10398.92

Note :- Alkalinity is user-input
Execute 'Balance' button first. If required, click on 'Add Sodium/Chloride'

Parameters

Total Alkalinity (ppm CaCO3):

TDS (mg/l):

pH:

Temperature (C):

SDI:

Recovery (%):

Saturation Data (Feed Water)

BaSO4: 0.00 %

CaF2: 0.00 %

CaSO4: 0.00 %

SiO2: 0.00 %

SrSO4: 0.00 %

Struvite: 0.00 %

LSI: -43.28

Stiff-Davis Index: 0.00

Osmotic Pressure: 150.81 psi

Conductivity at 25C: 21642 µS/cm

Density: 998.8 kg/m3

Buttons: Export, Import, Multiple Feed, Design Guidelines, Add Sodium, Add Chloride, Clear Values, Balance, << Back, Exit, Next >>

Figura 49 Ingreso de parámetros en la alimentación

Fuente: General Electrics Corp (2007)

Electroquímicamente el agua siempre es neutra, es decir, independientemente de su pureza, disolverá todas las sustancias solubles en ella en la misma concentración de iones positivos (cationes) y negativos (aniones). En un análisis, la suma de las concentraciones de los aniones expresados en meq/L, debe ser prácticamente igual que la suma de las concentraciones de los cationes expresados en meq/L. En caso contrario el agua no estaría equilibrada y el análisis no será coherente.

Una vez cargados los datos en la alimentación, se procede balancear iónicamente (Balance), permitiendo cuantificar el peso equivalente y la concentración de los correspondientes cationes y aniones ingresados y generados (Na, HCO₃, CO₂, CO₃) por defecto por el balance iónico del software.

Water Type ×

Feed Water Analysis

Select Water Source: Brackish Wellwater

Select Water Type: User Defined

Ion	mg/l	meq/l	ppm as CaCO3
Calcium (Ca)	0.00	0.0000	0.00
Magnesium (Mg)	0.00	0.0000	0.00
Sodium (Na)	4969.33	216.1520	10817.00
Potassium (K)	0.00	0.0000	0.00
Ammonia - N (NH4)	0.00	0.0000	0.00
Barium (Ba)	0.60	0.0087	0.44
Strontium (Sr)	0.00	0.0000	0.00
Iron (Fe)	0.00	0.0000	0.00
Manganese (Mn)	0.00	0.0000	0.00
Total Cations	4969.93	216.1609	10817.45
Sulfate (SO4)	0.00	0.0000	0.00
Chloride (Cl)	7366.00	207.7680	10397.44
Fluoride (F)	0.00	0.0000	0.00
Nitrate (NO3)	0.00	0.0000	0.00
Bromide (Br)	0.00	0.0000	0.00
Phosphate (PO4)	0.00	0.0000	0.00
Boron (B)	0.00	0.0000	0.00
Silica (SiO2)	0.00	0.0000	0.00
Hydrogen Sulfide (H2S)	1.00	0.0157	0.78
Bicarbonate (HCO3)	510.36	8.3643	418.58
Carbon Dioxide (CO2)	83.53	0.0000	0.00
Carbonate (CO3)	0.38	0.0128	0.64
Total Anions	7877.75	216.1609	10817.45

Note :- Alkalinity is user-input
Execute 'Balance' button first. If required, click on 'Add Sodium/Chloride'

Parameters

Total Alkalinity (ppm CaCO3) 420

TDS (mg/l) 12847.68

pH 6.72

Temperature (C) 36.1

SDI 3

Recovery (%) 75

Saturation Data (Feed Water)

BaSO4 0.00 %

CaF2 0.00 %

CaSO4 0.00 %

SiO2 0.00 %

SrSO4 0.00 %

Struvite 0.000 %

LSI -43.28

Stiff-Davis Index 0.00

Osmotic Pressure 150,36 psi

Conductivity at 25C 21582 µS/cm

Density 1002,5 kg/m3

Multiple Feed

Design Guidelines

Add Sodium

Add Chloride

Clear Values

Balance

Export Import

<< Back Exit Next >>

Figura 50 Balance iónico

Fuente: autores

En la figura 47 se puede observar que el peso equivalente de aniones y cationes es igual, por lo tanto se ha balanceado iónicamente el agua analizada según datos de la tabla 7, además, por defecto se genera el valor TDS (Sólidos disueltos totales) correspondiente a la suma de aniones y cationes; de igual manera se generan datos LSI (Índice de saturación Langelier) como índice de la capacidad corrosiva (valores menores a -1,5) e incrustante (valores mayores a 1,5), el valor generado demuestra que el agua a tratar es agresivamente corrosiva; valor de presión osmótica como presión mínima en el sistema de RO para poder generar filtración, y valor de la densidad del agua.

El asistente continuó en la sección parámetros de flujo (Flow rates), a partir de la tabla 15 se ingresa el caudal de alimentación en 0,05 m³/s correspondiente a 800 gpm, se recomienda dejar

las demás opciones por defecto y modificarlas una vez seleccionado el sistema RO y corrido el proyecto.

Flow Rates

Flow

Specify Product gpm

Specify Feed gpm

Specify Concentrate gpm

RO Recoveries

Recovery %

Concentrate Recycle

Specify Flow Rate Specify Percent

RO1 to RO1Feed %

Feed Bypass

Specify Flow Rate gpm

Specify Percent %

<< Back Exit Next >>

Figura 51 Parámetros de flujo

Fuente: autores

De igual manera, la opción de dosificación química se deja sin modificar hasta una vez seleccionado el sistema RO y corrido el software.

Dosing

PreFeed AfterFeed Product 1 Product 2

Chemical

Option

Target pH

Hardness Leakage (ppm as CaCO₃)

Alkalinity

LSI

<< Back Next >>

Figura 52 Dosificación

Fuente: autores

En el siguiente paso, el asistente le solicitará diseñar el sistema de RO, para esto el usuario debe estar familiarizado con los modelos de los sistemas RO (RO Machine Model) ya que existen sistemas para ser aplicados desde un sencillo grifo o dispensador para consumo de agua potable hasta para el tratamiento de plantas de tratamientos residuales de una ciudad.

RO Element Data

Pass 1

RO Parameters

RO Machine Model: None

Permeate Flow: 0.00 gpm

Split Permeate (Upstream Part) (gpm) 0.00

Permeate bypass (gpm) 0.00

None

Recycle Permeate from Last Stage to Feed Pump

Stage	Pressure Vessels	Elements Per Vessel	Application	Element Group	Element Model	Element Age (yr)	Flux Annual % Change	Salt Passage Annual % Change	Permeate Pressure (psi)	Interstage Pressure Loss (psi)	Interstage Boost Pressure (psi)	Boost Energy Efficiency %	Element Info
1	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...
2	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...
3	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...
4	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...
5	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...
6	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...

Check Web for New Database | Element Age Calculator | << Back | Exit | Finish

Type

Area: 0 | Rejection: 0

Nominal Flow: 0 | Test TDS, mg/L: 0

Test Pressure: 0 | Max Pressure: 0

Figura 53 Selección sistema RO

Fuente: autores

Existen 97 configuraciones de sistemas de RO propuestos por General Electric[®], los cuales esta agrupados en 6 tipos.

RO Element Data

Pass 1

RO Parameters

RO Machine Model: None

Permeate Flow: 0.00 gpm

Split Permeate (Upstream Part) (gpm) 0.00

Permeate bypass (gpm) 0.00

None

Recycle Permeate from Last Stage to Feed Pump

Stage	Pressure Vessels	Elements Per Vessel	Application	Element Group	Element Model	Element Age (yr)	Flux Annual % Change	Salt Passage Annual % Change	Permeate Pressure (psi)	Interstage Pressure Loss (psi)	Interstage Boost Pressure (psi)	Boost Energy Efficiency %	Element Info
1	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...
2	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...
3	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...
4	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...
5	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...
6	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...

Check Web for New Database | Element Age Calculator | << Back | Exit | Finish

Type

Area: 0 | Rejection: 0

Nominal Flow: 0 | Test TDS, mg/L: 0

Test Pressure: 0 | Max Pressure: 0

Figura 54 Tipos de sistemas RO

Fuente: autores

Los rangos de las especificaciones de cada uno de los tipos se resumirán en el Cuadro 1:

Tipo	E	PRO	AP8	TITAN	SEA PRO	SEA TEACH
Aplicaciones	Tratamientos de alimentos		Tratamientos de alimentos		Sistemas industriales	Sistemas industriales
	Agua potable	Agua potable	Agua potable	Municipios hasta 5000 habitantes	Agua potable	Desalinación de agua de mar
	Agua para alimentación de calderas	Suministros residenciales	Agua para alimentación de calderas	Agua potable	Municipios hasta 10000 habitantes	Municipios hasta 15000 habitantes
	Pre-tratamiento de Intercambio iónico	Industria de menor escala	Pre-tratamiento de Intercambio iónico			
Parámetros de operación						
Presión de operación (PSI)	100-200	120-220	130-160	140-350	400-800	400-1200
Temperatura de operación (°C)	5-35	2-30	13-30	16-25	15-32	18-45
Máxima capacidad TDS (ppm)	500	2000	2000	1500-2500	47000	37000-48000
Rechazo TDS RO	90-95	97-99	95-98	97-99	97-99	>98
Caudal de entrada (gpm)	0,9-1,3	50-500	60-205	120-700	600-900	600-1100

Presión de entrada (PSI)	40-90	30-60	30	30	30	30
Especificaciones de flujo						
Recuperación (%)	65-75	75	75-80	66-75	35	45-35
Flujo permeado (gpm)	0,8-1,3	50-500	66-264	130-300	400-500	450-550
Flujo concentrado (gpm)	0,4-0,5	20-150	18-66	43-217	766	500-600
Bombas potencia						
Potencia	230 VAC – 50 Hz	-	480VAC-60Hz	50-60HP	380VAC-50 Hz	400V-50Hz
Energía consumo (KW)	0,55-1	11-37	15-37	-	-	-
Elementos membrana y filtros						
Cantidad	1-2	12-108	12-48	36-180	210	252
Arreglo	1	1-9	1-6	1-12	1-30	1-36
Dimensiones y pesos						
Alto (mm)	1400-1500	2000-2475	228-193	50	Según diseño	Según diseño
Ancho (mm)	500-600	800-1850	473-473	25	Según diseño	Según diseño
Largo (mm)	320-400	4900-7080	170-100	150	Según diseño	Según diseño

Peso (Kg)

90-115

1543-6143

1750-5200

3000-9000

Según diseño

Según diseño

Equipo

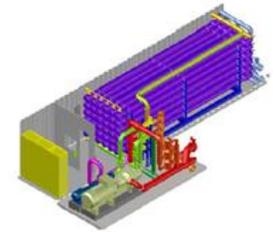


Tabla 23 Especificaciones técnica Tipos de Sistema RO

Después de hacer el análisis técnico de cada uno de los tipos de sistema de RO, se ha seleccionado aplicar el tipo SEA PRO debido que tiene un rango de aceptación de TDS hasta 47000 ppm, caudal de entrada hasta 900 gpm y presión de entrada mínima de 30 PSI y temperatura de operación entre 15 y 40 °C, cumpliendo con las condiciones actuales del sistema ARI de la Estación Cicuco.

The screenshot shows the 'RO Element Data' window with the following configuration:

- Pass 1**
- RO Parameters:**
 - RO Machine Model: SeaPRO-E-210
 - Perm Flow: 460.00 gpm
 - Recycle Permeate from Last Stage to Feed Pump:
 - Split Permeate (Upstream Part) (gpm): 0.00
 - Permeate bypass (gpm): 0.00
 - None:

Stage	Pressure Vessels	Elements Per Vessel	Application	Element Group	Element Model	Element Age (yr)	Flux Annual % Change	Salt Passage Annual % Change	Permeate Pressure (psi)	Interstage Pressure Loss (psi)	Interstage Boost Pressure (psi)	Boost Energy Efficiency %	Element Info
1	16	6	Seawater RO	High Rejection	AD-440	0.00	3.00	5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...
2	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...
3	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...
4	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...
5	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...
6	0	0				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...

Buttons: Check Web for New Database, Element Age Calculator, Cancel, OK

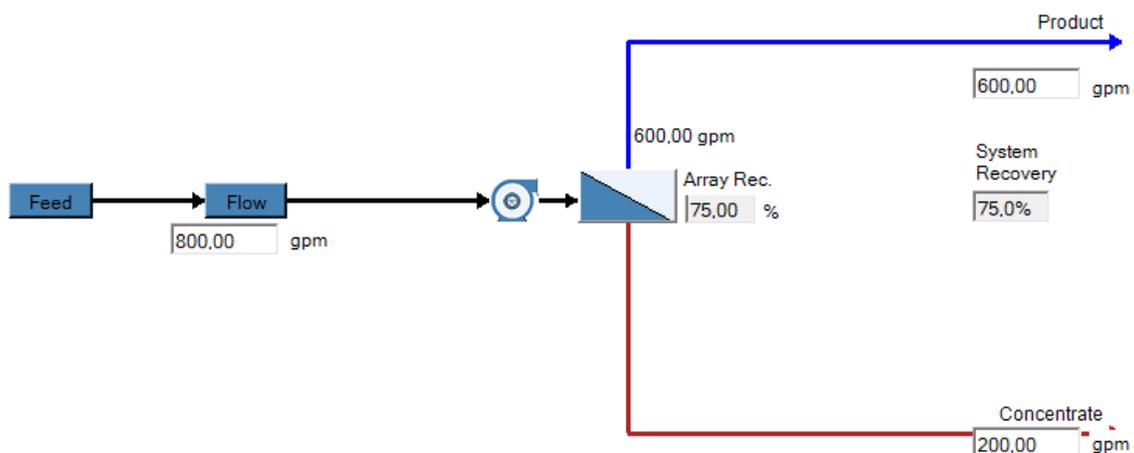
Type		
Area	0	Rejection
Nominal Flow	0	Test TDS, mg/L
Test Pressure	0	Max Pressure

Figura 55 Selección del tipo de Sistema RO: Sea Pro E-210

Fuente: autores

El sistema RO Sea Pro E-210 está conformado por 16 cilindros (Pressure vessels) contenedores de los 6 filtros (element per vessel: AD-440) de RO respectivamente, para un total de 96 filtros. El diagrama generado es el que se muestra en la figura 53.

En resumen, el actual diseño tiene una alimentación de 800 gpm, los cuales son distribuidos en 75% hacia el permeado y el resto hacia el concentrado, con una bomba de 50 psi de presión de succión.



	Feed	Product	Concentrate
Alkalinity, PPM CaCO ₃	420.00	0.00	0.00
TDS, mg/l	12847.68	0.00	0.00
pH	6.72	0.00	0.00
LSI	-43.28	0.00	0.00
Stiff Davis	0.00	0.00	0.00



Figura 56 Diagrama de flujo de la Estación Cicuco

Fuente: autores

Respecto a la bomba, se configura a una presión de succión de 50 PSI, que se puede observar en cuadro en el cuadro operacional.

Parameter	Value	Unit
Flow Rate	0.0	gpm
Discharge Pressure	0.000	psi
Inlet Pressure	50.00	psi
Power	0.00	kW
Energy Consumption (per unit permeate flow)	0.00	KWh/m ³
Auto Efficiencies	<input checked="" type="checkbox"/>	
Pump Efficiency	75	%
Motor Efficiency	96	%
VFD Efficiency	97	%

Figura 57 Datos de bomba de suministro al sistema RO

Fuente: autores

Finalmente, para correr el proyecto diseñado se da click en la opción CALCULATE, y este generará resultados inmediatamente del diseño.

Normalmente después de la primera corrida, el software reporta los errores y advertencias, como se puede ver en la figura 60, en la esquina superior derecha se ven reflejado.

Explorer

Press to See Errors/Warnings

System Data

	Flow (gpm)	TDS (mg/l)	Temperature, C	Recovery, %	Feed Pressure, psi	Permeate Flux, gfd	
						Avg.	Element Max
Feed	800.00	12847.68					
Product	0.00	0.00					
Final Downstream Perm	0.00	0.00					
Concentrate	200.52	50806.39					
System			36.1	0.0			
RO-1			36.1	0.0	596.34	NaN	45.03

RO-1

Stage-1

Element No.	Feed Flow (gpm)	Perm Flow (gpm)	% Recovery	Conc. Pol	Feed Pressure (psi)	Net Pressure (psi)	DP (psi)	Flux (gfd)	AValue (µm/(s-MPa))
1	26.67	8.66	32.49	1.18	596.34	377.65	1.13	28.6	5.41
2	18.00	6.22	34.57	1.23	595.21	269.93	0.66	20.5	5.41
3	11.78	0.00	0.00	1.21	594.55	594.31	0.48	45.0	5.41
4	11.78	0.00	0.00	0.00	594.07	0.00	0.00	0.0	5.41
5	11.78	3.34	28.38	1.24	594.07	144.39	0.40	10.9	5.41
6	8.44	1.29	15.32	1.09	593.67	55.46	0.28	4.2	5.41
7	7.15	0.47	6.51	1.03	593.39	20.04	0.24	1.5	5.41

Ion	Feed (mg/l)	Perm. (mg/l)	Conc. (mg/l)
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	0.00	0.00	0.00
Na	4969.34	12.31	7354.33
K	0.00	0.00	0.00
NH4	0.00	0.00	0.00
Ba	0.60	0.00	0.89
Sr	0.00	0.00	0.00
Fe	0.00	0.00	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00
SO4	0.00	0.00	0.00
Cl	7366.00	17.67	10901.54
F	0.00	0.00	0.00
NO3	0.00	0.00	0.00
Br	0.00	0.00	0.00
PO4	0.00	0.00	0.00
B	0.00	0.00	0.00
SiO2	0.00	0.00	0.00
H2S	1.00	1.00	1.00
HCO3	510.36	3.34	754.59
CO2	83.53	82.45	83.65
CO3	0.38	0.00	0.84
TDS	12847.68	34.32	19013.19
pH	6.72	4.76	6.84
Pl. psi	150.34	1.12	221.85
Cond	21582	73	30813

Figura 58 Resultados, primera corrida

Fuente: autores

En la figura 61, se puede observar detalladamente los errores reportados, básicamente el error se enfoca en revisar el porcentaje de recuperación y ajustar los parámetros lo más que se pueda respecto a la especificación técnica sugerida anteriormente.

Calculation Errors & Warnings

Warnings and Errors Summary Note: Double Click on Error to see detailed message.

WARNING!! The Permeate Flux of at least one Element is higher than recommended.

WARNING!! Recovery for element-1 of stage-1 in RO-1 exceeds the limit specified.

WARNING!! Conc Flow rate of at least one element is low.

WARNING!! The Permeate Flow Rate for at least one element is zero.

Figura 59 Errores y advertencias primera corrida

Fuente: autores

Por experiencia del autor en el manejo del software, se pudo establecer que los errores y advertencias efectivamente se centraban en el porcentaje de recuperación, se iteró hasta el máximo porcentaje permitido, 59% (figura 62).

Flow Rates

Flow

Specify Product gpm

Specify Feed gpm

Specify Concentrate gpm

RO Recoveries

Recovery %

Concentrate Recycle

Specify Flow Rate Specify Percent

RO1 to RO1Feed gpm

Feed Bypass

Specify Flow Rate gpm

Specify Percent %

Cancel OK

Figura 60 Cambio de porcentaje de recuperación

Fuente: autores

En la figura 63 se puede observar que no se encontró ningún error y/o advertencia por parte del software, lo cual indica que el diseño está técnicamente bien planteado.

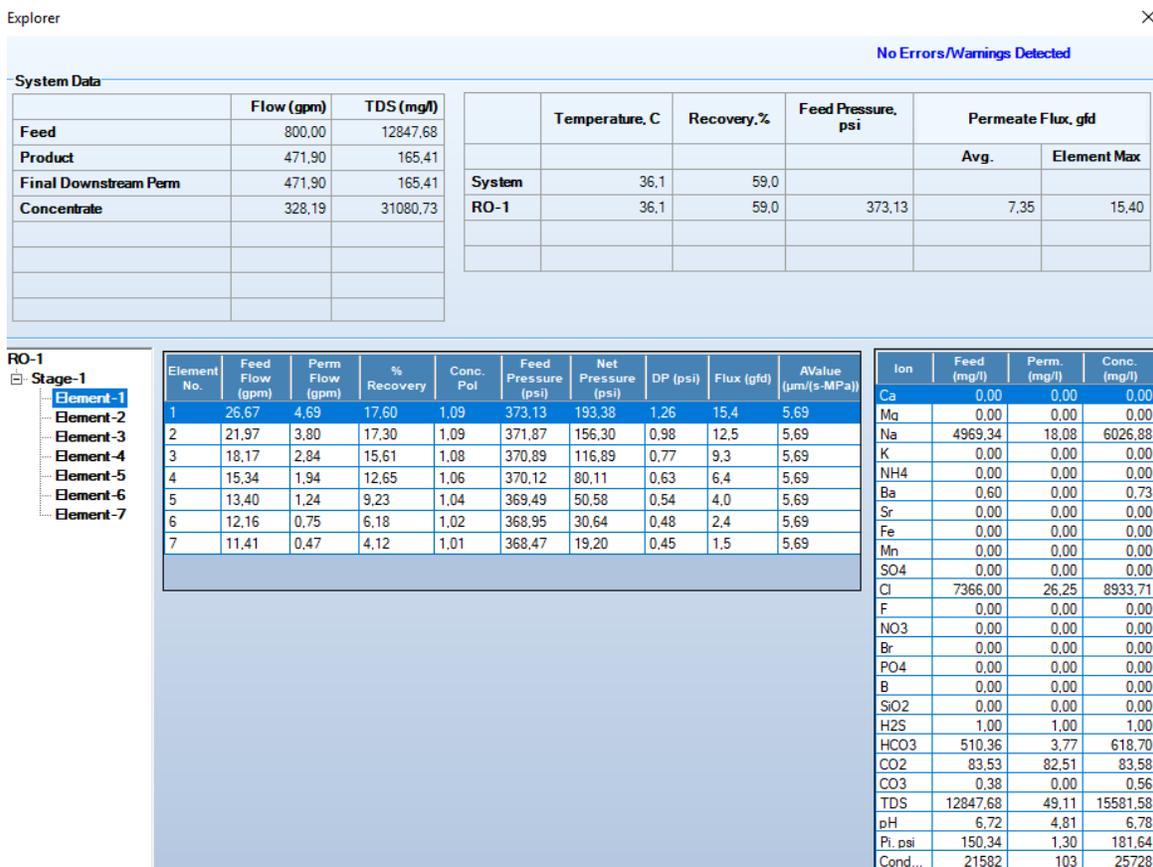


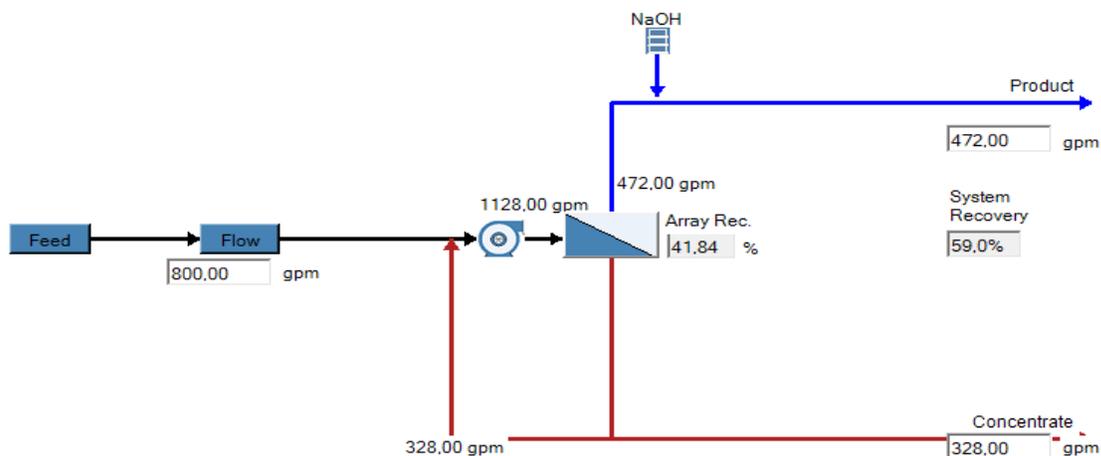
Figura 61 Resultados, primera corrida corregida

Fuente: autores

En los resultados de la figura 63, además del aviso del buen diseño del sistema, se puede observar el comportamiento de las concentraciones iónicas del sistema, para nuestro interés, el ion Cloruro. El agua de alimento que proviene de las bombas de vertimiento entra al sistema de RO y pasa a los 16 cilindros (vassels) que contienen los filtros (elementos), estos cilindros pueden estar configurados en un arreglo de 6X5, entrando en contacto dentro de cada cilindro desde el primer filtro hasta el séptimo.

Para finalizar, se adicionan dos tratamientos de soda caustica (NaOH) después de la alimentación y a la salida del permeado para tener controlado el pH sobre 7,0; de igual manera se

adiciona un tratamiento antiescalante después de la alimentación para evitar agresivas incrustaciones dentro del sistema de RO. También se instala el diseño de recirculación (reciclaje) de la mitad del concentrado (50%), dirigiendo el restante para los canales perimetrales de la piscina de retención o piscina n.1.



	Feed	Product	Concentrate
Alkalinity, PPM CaCO₃	0.89	1.31	0.86
TDS, mg/l	12101.66	77.26	29372.67
pH	6.72	7.60	6.76
LSI	-43.28	-42.40	-43.24
Stiff Davis	0.00	0.00	0.00



GE Power & Water

Figura 62 Diseño final del diagrama de sistema de RO

Fuente: autores

Financieramente, el software brinda la opción de cálculo del Capex (Costo de inversión en equipos) y Opex (Costo de operación), siguiendo los costos de los accesorios que conforman el sistema RO en la página web de General Electric, se obtiene el siguiente análisis (Figura 65).

CapEx/OpEx ×

CapEx

Elements & Housings

Name	Element Count	No. of Housing	Element Cost (\$)	Housing Cost (\$)	Element Lifetime (years)	Housing Lifetime (years)	Total Element Cost (\$)	Total Housing Cost (\$)	Element Cost/m3 (\$)	Housing Cost / m3 (\$)
AD-440	96,00	16,00	300,00	600,00	3,00	15,00	28800,00	9600,00	0,01	0,00

Product Flow (m3/h) Total Element and Housing Cost per m3 (\$)

Annual Operating Time (days)

Chemical Dosing

Name	Mass Flow Rate (kg/h)	Cost/kg (\$)	Cost/m3 product (\$)
NaOH	9,82	0,12	0,01
NaOH	2,15	0,00	0,00
MDC120	0,30	0,00	0,00

Total Chemical Cost/m3 (\$)

Pump

Name	Energy Consumption (kwh/m3)	Cost of Power (\$/kwh)	Cost/m3 product (\$)
HP Pump	0,93	0,00	0,00

Total Pump Cost/m3 (\$)

Stripper

Number of Strippers selected

Cost Per Stripper (\$)

Total Cost (\$)

Stripper Life (years)

Total Cost per m3 Product (\$)

Result

Total Equipment Cost (\$)

Total Operating Cost/m3 (\$)

Figura 63 Calculo Capex y Opex

Fuente: autores

Finalmente, el software brinda la opción de generar un reporte general en la opción *Reports*, en base de este se realizará el análisis técnico y financiero del proyecto.

Análisis Técnico.

El reporte generado (archivo en Excel) está dividido en 5 secciones, la primera es Resumen de los datos de entrada (Figura 61), en esta sección muestra toda la información que ingresamos al software: Información del proyecto, configuración de sistema de RO, información de parámetros físico-químicos, información de flujo y porcentajes de recuperación, cantidad de cilindros (vassels-housing) contenedores de filtros (elements) y tratamientos químicos (dosificación).

GE Water										
Winflows Version 3.3.2					DataBase Version 3.15					
Input Data Summary										
Project Information										
Project Name	TRATAMIENTO ARI - EST. CICUCO									
Engineer	IRALANDA PIANETA									
Location	CICUCO, BOLIVAR, COLOMBIA									
Mail ID	irlanda.pianeta@ecopetrol.com.co									
Phone No.										
Comments	DISEÑO DE SISTEMA DE OSMOSIS INVERSA PARA TRATAMIENTO DE CLORUROS Y TDS. ARI ESTACIÓN									
Flowsheet Configuration										
Flowsheet Type	Single Pass Flowsheet	Feed Dosing	No							
Feed Stripping	No	AfterFeed Dosing	No							
Product Stripping	No	Product Dosing 1	Yes							
Raw Feed Bypass	No	Product Dosing 2	No							
RO1 to RO1 Recycle	Yes	Interpass Pumping								
RO2 to RO2 Recycle		PreProduct Pumping								
RO2 to RO1 Recycle		RO3 to RO1 Recycle								
RO3 to RO3 Recycle										
Feed Information										
Temperature, C	36,10	RO-1: 36,10								
Feed pH	: 6,72	Silt Density Index :	3,00							
Feed Stream Composition(mg/l): Source - Brackish Wellwater										
Calcium (Ca)	0,00	Sulfate (SO4)	0,00							
Magnesium (Mg)	0,00	Chloride (Cl)	7366,00							
Sodium (Na)	4776,80	Fluoride (F)	0,00							
Potassium (K)	0,00	Nitrate (NO3)	0,00							
Ammonia - N (NH4)	0,00	Bromide (Br)	0,00							
Barium (Ba)	0,60	Phosphate (PO4)	0,00							
Strontium (Sr)	0,00	Boron (B)	0,00							
Iron (Fe)	0,00	Silica (SiO2)	0,00							
Manganese (Mn)	0,00	Hydrogen Sulfide (H2S)	1,00							
		Bicarbonate (HCO3)	0,00							
		Carbon Dioxide (CO2)	0,00							
		Carbonate (CO3)	0,00							
Flow Rate Specifications										
Feed Flow:	800,00 gpm									
Recovery %	RO1	59,00	RO2	RO3						
RO1 to RO1 Recycle:	50,00 %									
First Pass Array Data										
					Pre-stage Pressure Change, psi		Permeate Pressure	Annual Change %		
Stage	Housing	Elements	Element Type	Element Age (yr)	Boost	Drop	psi	A-Value	B-Value	
1	16	6	AD-440	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	5,00	
Dosing Specification										
Product Dosing 1 to	7.6 pH using Sodium Hydroxide									

Tabla 24 Resumen datos de entrada

Fuente: autores

La segunda sección, Resumen de Resultados (figura 66), muestra la distribución de los flujos de salida (permeado o producto y concentrado) según el porcentaje de recuperación, de igual manera, el parámetro de TDS, el cual es un parámetro de referencia debido que es la suma de las cargas aniónicas y cationica del sistema.

Igualmente muestra que el sistema está diseñado en una etapa conformado por 30 cilindros contenedores y 96 filtros distribuidos en ellos, señala la identificación de los elementos (AD-440) importante al momento de buscar especificaciones técnicas.

Por último, el análisis de concentración iónica en cada una de las corrientes (Producto-Permeado, feed-alimentación, conc-concentrado).

Para nuestro caso, el punto de interés principalmente está en la remoción de cloruros, el cual finaliza en 45,89 ppm, permitiendo estar dentro de lo establecido por la norma ambiental Colombia, Resolución 631 del 17 de Marzo de 2015, artículo 11, actividad de hidrocarburos, la cual exige para área el producción de hidrocarburos concentraciones por debajo de 1200 ppm, satisfactoriamente 12 veces por debajo del valor máximo permitido.

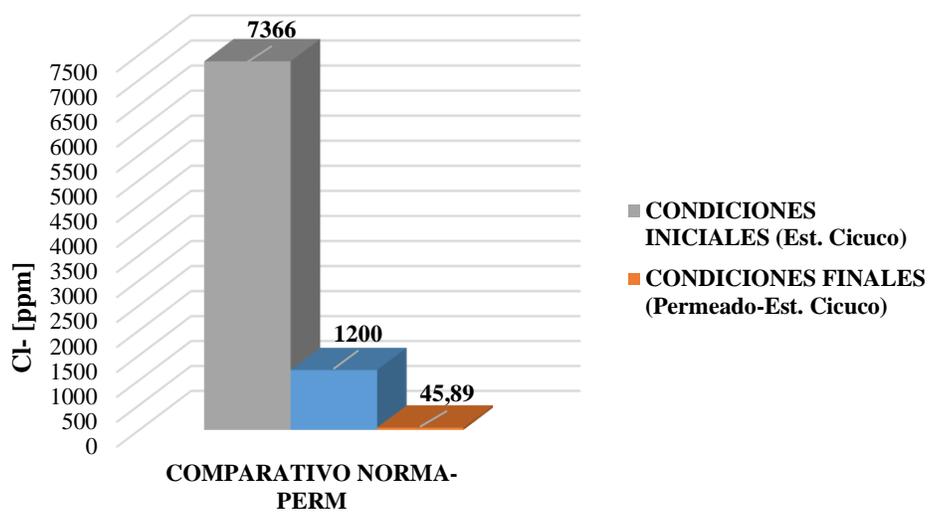


Figura 64 Comparativo Norma-Permeado

Fuente: autores

GE Water													
Winflows Version 3.3.2					DataBase Version 3.15								
Results Summary													
Flow Data			gpm			Analytical Data			mg/L				
Raw Feed:	800,00		Raw Feed TDS			12144,40							
Product:	471,82		Product TDS			77,26							
Concentrate:	328,28		Concentrate TDS			29372,67							
System Data					Single Pass Design								
Temperature:	C	RO-1: 36,10			System Rec.			59,0%					
Average Flux (gfd), Pass and Stage													
Pass	Average		Stage 1										
Pass 1	16,09		16,09										
Array Data													
Recovery %:								41,84	Conc. TDS(mg/l):	29372,67	Conc. Flow:	656,57 gpm	Pass 1
Stage	Total		Element Type	Flow, gpm		Pressure, psi		Perm TDS					
	Housing	Element		Feed	Perm	Feed	DP	mg/l					
1	16	96	AD-440	1128,28	471,82	508,56	21,93	77,05					
Total	16		96										
Analytical data													
Cation	mg/l			Anion	mg/l								
	Product	Feed	Conc		Product	Feed	Conc						
Ca	0,00	0,00	0,00	SO4	0,00	0,00	0,00						
Mg	0,00	0,00	0,00	Cl	45,89	10387,13	17816,78						
Na	30,36	6735,79	11553,45	F	0,00	0,00	0,00						
K	0,00	0,00	0,00	NO3	0,00	0,00	0,00						
NH4	0,00	0,00	0,00	Br	0,00	0,00	0,00						
Ba	0,00	0,85	1,46	PO4	0,00	0,00	0,00						
Sr	0,00	0,00	0,00	B	0,00	0,00	0,00						
Fe	0,00	0,00	0,00	SiO2	0,00	0,00	0,00						
Mn	0,00	0,00	0,00	H2S	1,00	0,99	0,99						
TDS mg/l	77,26	17124,76	29372,67	HCO3	0,00	0,00	0,00						
pH	7,60	6,80	6,76	CO2	0,00	0,00	0,00						
				CO3	0,00	0,00	0,00						

Tabla 25 Resumen de resultados

Fuente: autores

El reporte entrega una sección de resultados más detalla, corriente por corriente (figura 68), donde se puede apreciar las concentraciones iónicas iniciales (Total Feed), concentraciones iónicas antes del primer tratamiento (Predosed feed), concentraciones iónicas al ingresar al sistema RO (RO1 feed), es importante tener en cuenta la recirculación o reciclaje que se está

suministrando desde el concentrado y la concentración iónica del permeado (Final Downstream Perm).

Para calcular el porcentaje de remoción, se utilizará la siguiente ecuación (Ec. 28):

$$\%R[Cl^-] = \left| \frac{[Cl_i^-] - [Cl_f^-]}{[Cl_i^-]} \right| * 100$$

Ec. 28

Donde:

%R=Porcentaje de remoción ion Cloruro (|Valor absoluto|).

$[Cl_f^-]$ = *Concentración final de cloruros.*

$[Cl_i^-]$ = *Concentración inicial de cloruros*

$$\%R[Cl^-] = \left| \frac{[7366] - [45,89]}{[7366]} \right| * 100 = \mathbf{99.4\%}$$

Este valor es viable ya que cumple con las condiciones técnicas del porcentaje de rechazo de los filtros (elementos) descritas en la tabla 19 (97-99,5%) y con la normatividad ambiental.

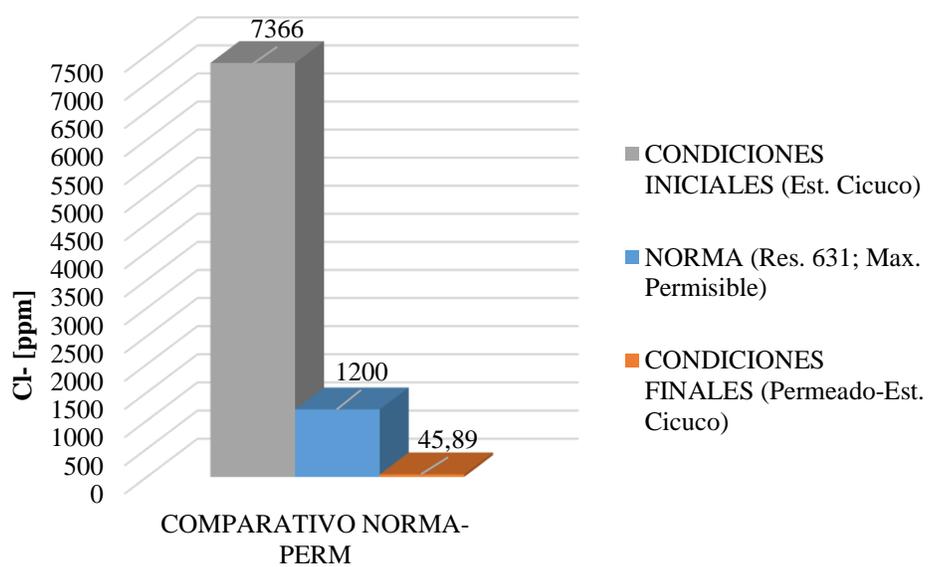


Figura 65 Comparativo Condiciones iniciales y finales, concentración de cloruros

Fuente: autores

GE Water					
Winflows Version 3.3.2			DataBase Version 3.15		
Streams Analytical Data					
Ions, mg/l		Total Feed	RO1 Feed	Final Downstream Perm	Product
Calcium		0,00	0,00	0,00	0,00
Magnesium		0,00	0,00	0,00	0,00
Sodium		4759,98	6735,79	30,16	30,36
Potassium		0,00	0,00	0,00	0,00
Ammonia - N (NH4)		0,00	0,00	0,00	0,00
Barium		0,60	0,85	0,00	0,00
Strontium		0,00	0,00	0,00	0,00
Iron		0,00	0,00	0,00	0,00
Manganese		0,00	0,00	0,00	0,00
Sulfate		0,00	0,00	0,00	0,00
Chloride		7340,08	10387,13	45,89	45,89
Fluoride		0,00	0,00	0,00	0,00
Nitrate		0,00	0,00	0,00	0,00
Bromide		0,00	0,00	0,00	0,00
Phosphate		0,00	0,00	0,00	0,00
Boron		0,00	0,00	0,00	0,00
Silica		0,00	0,00	0,00	0,00
Hydrogen Sulfide		1,00	0,99	1,00	1,00
Bicarbonate		0,00	0,00	0,00	0,00
Carbon Dioxide		0,00	0,00	0,00	0,00
Carbonate		0,00	0,00	0,00	0,00
TDS, mg/l		12101,66	17124,76	77,05	77,26
Flow	gpm	800,00	1128,28	471,82	471,82
Temperature	C	36,10	36,10	36,10	36,10
Pressure	psi	0,00	508,56	0,00	0,00
Osm. Pressure	psi	143,51	202,69	0,97	0,97
pH		6,72	6,80	6,94	7,60
Conductivity at 25C	µS/cm	20979,00	28755,00	162,00	163,00

Tabla 26 Resultados por corrientes

Fuente: autores

De acuerdo el marco legal ambiental los parámetros que se pueden comparar respecto a los arrojados por la simulación son los siguientes (tabla 23):

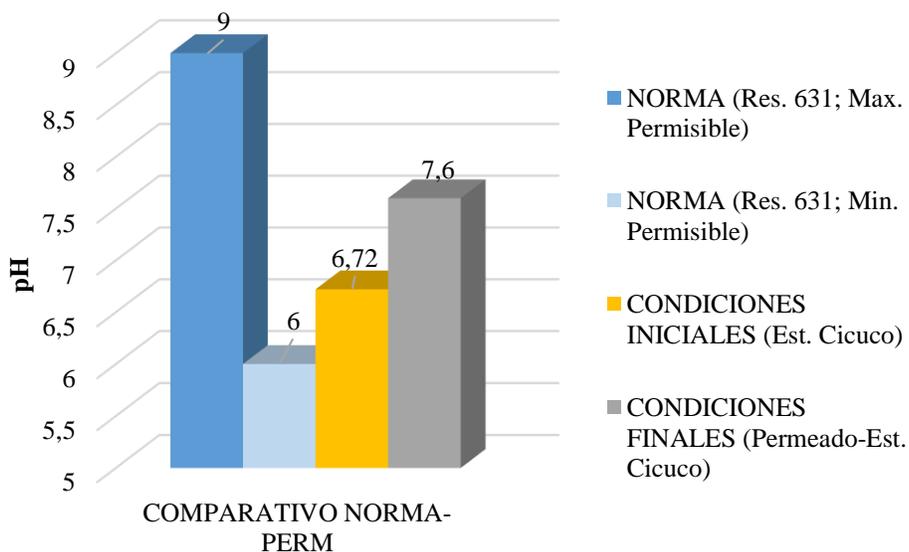
Tabla 27 Comparación de parámetros, norma ambiental-simulación

Parámetro	Res. 631	Perm.	En norma
Cl-	<1200	103,03	SI
pH	6 – 9	7,6	SI

Fuente: Autor de Proyecto (2017).

El parámetro de pH es muy importante debido que es referente de la naturaleza acida o básica del agua, valores por encima de 7,0 son óptimos para calidad del agua, además, a partir de este se puede inferir el comportamiento y estimaciones de concentraciones de otros parámetros, en caso de los cloruros, el comportamiento es inverso.

El Grafico 4 muestra el mejoramiento del índice de pH en base a los tratamientos químicos propuestos en la simulación.

**Figura 66** Comparativo Norma-Condiciones iniciales y finales pH

Fuente: autores

El último reporte técnico generado es la sección de *Procesos* la cual muestra el diagrama de flujo del proceso en una imagen, los valores operativos del sistema de RO: Presión, temperatura, caudal, recuperación, concentración de TDS. Parámetros operacionales de la bomba, es importante señalar que la presión de entrada es igual a la presión generada de descarga por las bombas de vertimientos y la energía eléctrica es suministrada por generadores de combustible gas natural, obtenido de los pozos del campo. Además del suministro de dosificación para el tratamiento químico propuesto.

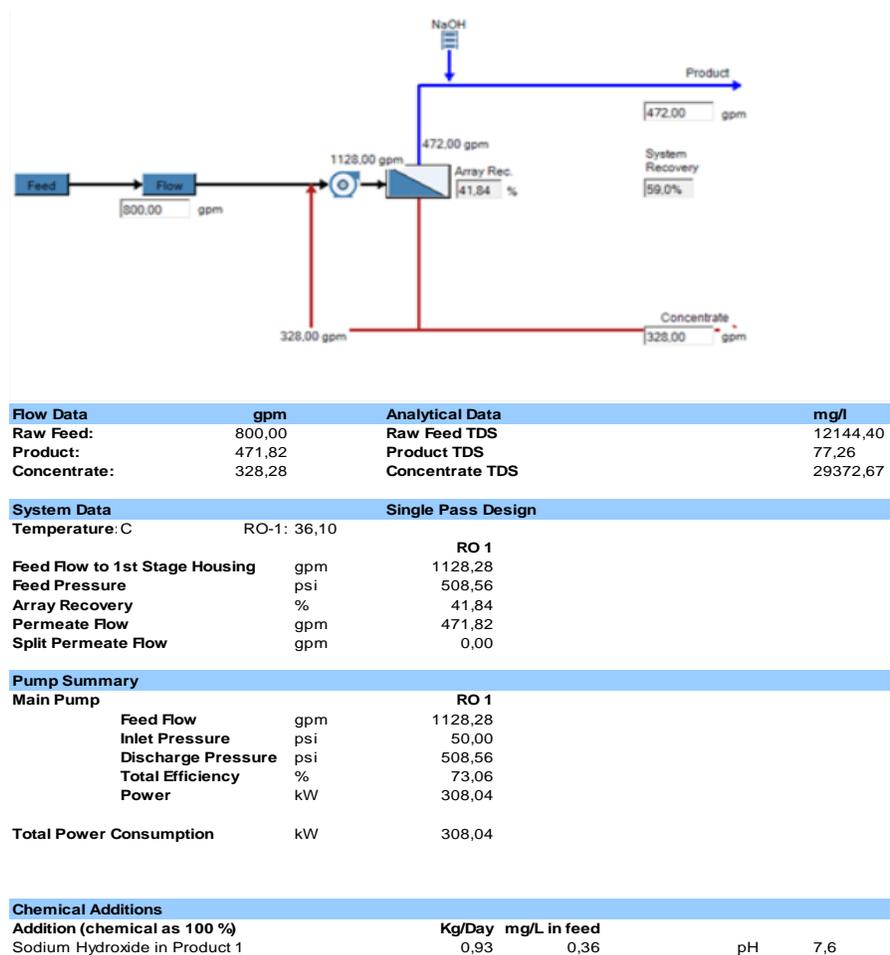


Figura 67 Parámetros operacionales

Fuente: autores

Desempeño Sistema SEA-PRO E-210.

El software tiene la opción de mostrar el desempeño del sistema RO seleccionado en función del tiempo y temperatura para proyectar el comportamiento de la presión de entrada, la cual es un indicador del estado de los filtros, a mayor presión, mayor taponamiento de los poros debido al acumulamiento de cargas iónicas; de igual manera, el software también ofrece la proyección de la concentración de TDS y del anión Cloruro, foco principal de esta investigación.

Step Up Function ×

Independent Variable <input type="radio"/> Feed Temperature <input checked="" type="radio"/> Element Age	Range Min. <input type="text" value="0"/> years Max. <input type="text" value="3"/> years	No. of Points <input type="text" value="5"/> (Max 5)
Feed Pressure <input checked="" type="checkbox"/> RO1 <input type="checkbox"/> RO2 <input type="checkbox"/> RO3	Product Variables <input checked="" type="checkbox"/> TDS <input checked="" type="checkbox"/> Chloride Concentration	
Refresh		Print

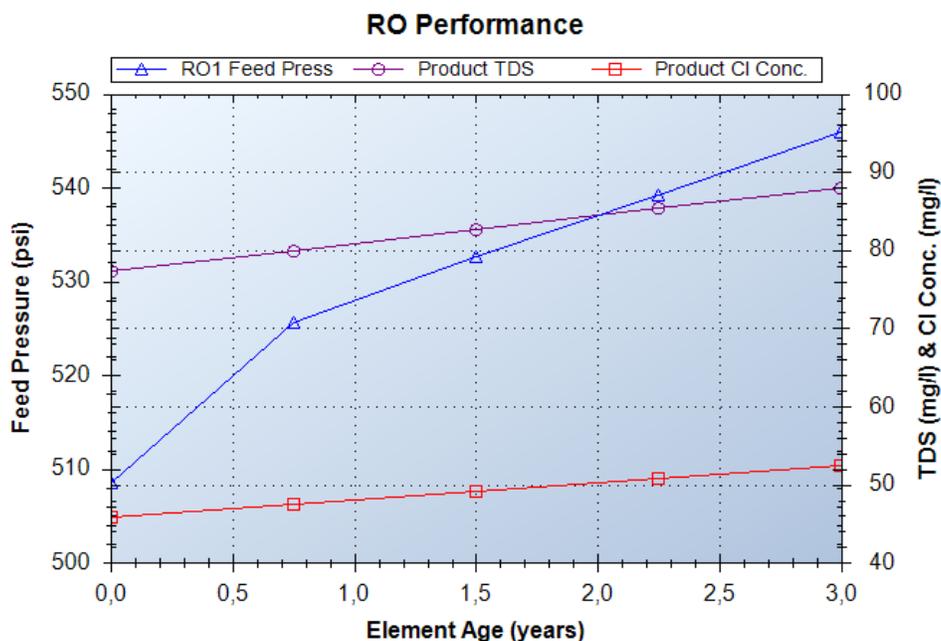


Figura 68 Desempeño Presión de entrada, Concentración TDS y Cl-, respecto al tiempo

Fuente: autores

En la figura 73 se puede observar la curva de color rojo, correspondiente a la concentración de cloruros a la salida del sistema, con proyección de 45,89 ppm para $t=0$ años a 52,5 ppm a $t=3$ años (tiempo de vida útil de los filtros), este comportamiento indica que si se mantienen las verificaciones diarias y los mantenimientos preventivos, se podría ahorrar los gastos de Capex por cambio de filtros, ya que el tope sería 1200 ppm que exige la normatividad ambiental colombiana; proporcionalmente la curva morada correspondiente a los TDS tiene el mismo comportamiento.

La curva azul, Presión de Entrada, tiene una proyección de 480 PSI a 560 PSI durante los tres años, indicando una elevación por acumulación de cargas que son removidas en cada mantenimiento preventivo, se debe recordar que la mínima presión requerida de entrada es de 30 PSI y la máxima presión operativa es de 800 PSI.

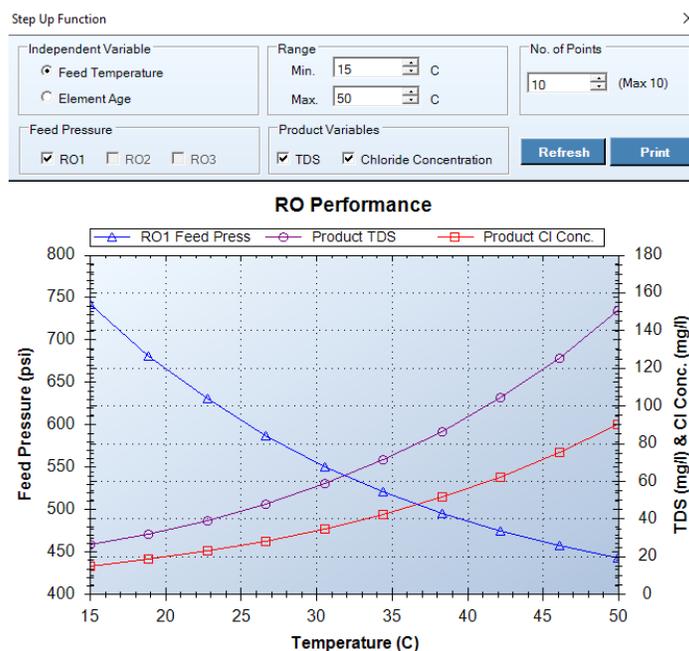


Figura 69 Desempeño Presión de entrada, Concentración TDS y Cl-, respecto a la temperatura

Fuente: autores

La Figura 74, muestra el comportamiento de presión de entrada, concentración de TDS y Cl- en función de la temperatura. La temperatura de referencia es la ingresada en el base de datos 36.1 °C , mostrándonos un comportamiento inverso para la presión de entrada y directo para las concentraciones de TDS y Cl-. A mayor temperatura se disminuye la presión de entrada, lo que quiere decir que hay menor taponamiento de los filtros, por ende, es beneficioso; sin embargo, aumenta las concentraciones iónicas en estudio, para determinar el punto óptimo para ambos parámetros, se disminuyó el rango de temperatura de 35°C a 40 °C de la gráfica 6 para verificar la temperatura en la cual se cruzan las dos curvas, la cual es 38,75 °C (Grafica 7).

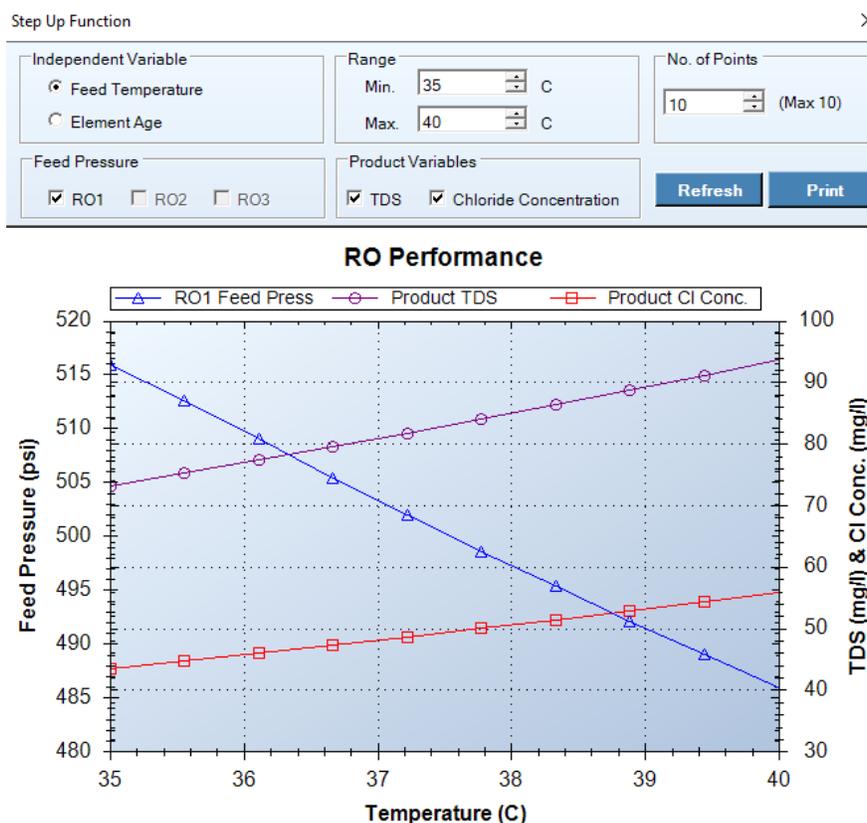


Figura 70 Desempeño Presión de entrada, Concentración TDS y Cl-, respecto a la temperatura, rango de 35°C a 40°C

Fuente: autores

Análisis Financiero.

Además de las secciones técnicas generadas por el reporte, los datos suministrados en la sección Capex/Opex generan una sección financiera resumida en la figura 76.

GE Water										
Winflows Version 3.3.2					DataBase Version 3.15					
Capex/Opex										
Elements and Housing										
Product Flow (m3/hr):		107,16								
Annual Operating time (days):		350,00								
Capital Expenditures										
Element Name	Count		Cost (\$)		LifeTime (yr)		Total Cost (\$)		Total Cost/m3 (\$)	
	Element	Pressure Vessel	Element	Vessel	Element	Vessel	Element	Vessel	Element	Vessel
AD-440	96	16	300,00	600,00	3,00	15,00	28800,00	9600,00	0,01	0,0007
Total				600,00			28800,00	9600,00	0,01	0,0007
Dosing				Pumping						
Chemical	Cost/kg (\$)	Consumption (kg/hr)	Cost/m3 (\$)	Pump	Energy Consumption (kwh/m3)	Cost of Power (\$/kwh)	Cost/m3			
NaOH	0,12	9,82	0,01	HP Pump	0,93	0,00	0,00			
NaOH	0,00	2,15	0,00							
MDC120	0,00	0,30	0,00							
Total Dosing Cost/m3 Product (\$):			0,01	Total Pump Cost/m3 Product (\$):			0,00			
Stripping										
Total Strippers:			0							
Cost/Stripper (\$):			0,00							
Stripper Lifetime (yrs):			0,00							
Total Stripper Cost (\$):			0,00							
Cost/m3 Product (\$):			0,00							
Total										
Total Equipment Cost (\$):			38400,00							
Total Operating Cost/m3 Product (\$):			0,02							

Tabla 28 Sección Capex/Opex

Fuente: autores

El cálculo del Capex (Capital expenses) o gastos de inversión de equipos, en este caso el sistema RO PRO SEA E-210 se calcula en base de los costos y cantidades de los Filtros (elements) y Cilindros contenedores de filtros (Pressure vassels), para un total de 38.400USD (115.000.000 COP).

El cálculo de Opex (Operation expenses) o gastos de operación están en base del costo de los filtros, cilindros, química para tratamiento, consumo de energía de bombas, separadores de corrientes y mantenimiento (strippers) en función de metro cubico tratado en 350 días al año (se excluyen 15 días como tiempo distribuido durante todo el año para verificaciones programadas

del equipo). Como se ha mencionado anteriormente la energía eléctrica es autoabastecida por generadores de energía a gas natural proveniente de los pozos del campo, por ende, no tiene costo de operación, de igual manera, no se incluyeron los separadores de corrientes. El Opex calculado es de 0,02 USD/m³.

Para estandarizar el costo de inversión por año, se calculó el caudal por año y posteriormente el Opex por año.

Tabla 29 Caudal de permeado por hora, mes y año

Caudal	
107	m ³ /h
77.148	m ³ /mes
925.776	m ³ /año

Fuente: autores

Tabla 30 Capex inicial y Opex por año

Capex inicial y Opex por año		
Cilindros	9.600	
Filtros	28.800	USD
Capex	38.400	
	0,020	USD/m ³
Opex	1543	USD/mes
	18.516	USD/año

Fuente: autores

Es importante señalar que el tiempo de vida útil de las membranas es de 3 años y de los cilindros contenedores es de 15 (dependiendo del uso y mantenimientos preventivos). Por ende, el Capex (Costos de capital - maquinaria, equipos) es de 81.000 USD debido a la suma de

28.800 USD de los filtros y 9.600 de los cilindros; sin embargo, el análisis financiero está en base del tiempo de vida útil. En cuanto al Opex (Costos de operación) es de 18.516 USD por año. La tabla 25 y figura 77 muestran el análisis financiero estimado para una proyección de 10 años.

Tabla 31 *Análisis Financiero*

Año	Capex	Opex	Inversión total
0	38.400	18.516	56.916
1	-	18.516	18.516
2	-	18.516	18.516
3	28.800	18.516	47.316
4	-	18.516	18.516
5	-	18.516	18.516
6	28.800	18.516	47.316
7	-	18.516	18.516
8	-	18.516	18.516
9	28.800	18.516	47.316
10	-	18.516	18.516

Fuente: autores

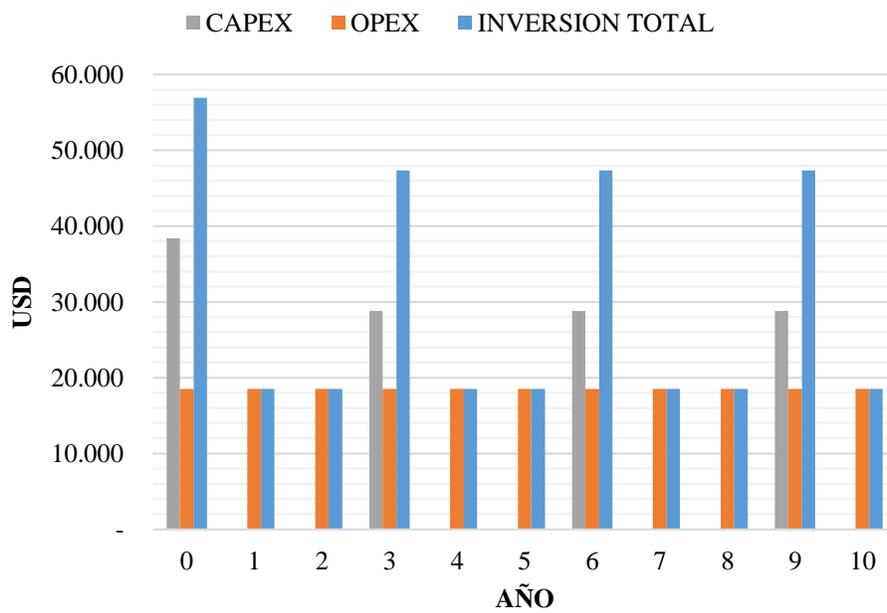


Figura 71 Análisis Financiero

Fuente: autores

Conclusiones

El sistema de osmosis inversa (RO) propuesto mediante la simulación en el software Winflows® es un método eficiente para disminuir la concentración de cloruros del agua de producción de Campo Cicuco, el cual permitió disminuir desde 7366 ppm hasta 45,89 ppm, con un porcentaje de remoción de 99,4%.

La concentración final de cloruros, luego de la implementación de la alternativa permite que este parámetro entre en el rango de aceptación de la Resolución 631 del 17 de Marzo de 2015, la cual exige concentraciones menores de 1200 ppm, estando 26 veces por debajo del valor máximo permitido.

La temperatura de operación óptima es de 38,75 °C debido que en este punto converge la curva de presión de entrada y concentración de cloruros, permitiendo operar a una presión menor a la generada en la simulación inicial y un leve incremento de concentración de cloruros que no afecta los parámetros permitidos exigidos por ley.

El sistema de osmosis inversa (RO) remueve los sólidos disueltos totales (TDS), por ende, el porcentaje de rechazo también aplica para cada uno de los cationes y aniones disueltos en el agua, permitiendo mejorar otros parámetros a parte de la concentración de cloruros, como el pH y la dureza.

Es importante crear un sistema de pretratamiento como el diseñado e instalado en esta investigación, estos detalles ayudan a mejorar el tiempo de vida del sistema de osmosis inversa (RO), ya que este tipo de pretratamientos disminuyen considerablemente sólidos suspendido, sólidos sedimentable, grasas y aceites.

A pesar que el análisis financiero no cuenta con una fuente de ingresos directos para compensar la inversión del sistema, este se ve reflejado en el cumplimiento de la normativa evitando sanciones económicas y legales para la empresa.

La disminución de los cloruros en la ARI vertidas al río Chicagua, permite la recuperación de la biota acuática ya que disminuye la dureza y conductividad del agua lo que permite la proliferación de las especies endémicas, logrando un impacto positivo para el ambiente aguas abajo.

Los asentamientos humanos captadores del agua del río Chicagua mejoraran notoriamente los IRCA para el parámetro cloruro ya que este baja considerablemente sobre los niveles permisibles para consumo.

El sistema RO es económicamente viable ya que permite la utilización de los equipos existentes auto generadores de energía.

Se disminuirá el mantenimiento de los sistemas de redes domiciliarias del servicio de agua, ya que al presentar disminución de cloruros baja los niveles de corrosividad ya que este penetra en la capa protectora de la interface del óxido mental y producirá menos incrustaciones al sistema.

La recirculación al sistema del concentrado permite abarcar en mayor porcentaje la remoción de cloruros.

No se genera residuos en el flujo del sistema, lo que hace que la tecnología sea ambientalmente amigable con el ambiente a comparación de otros sistemas.

Recomendaciones

Es importante incluir en los monitoreos los demás parámetros físico-químicos que hacen falta en la lista de alimentación del software, de esta manera se genera mayor precisión en la simulación.

Realizar alianzas estratégicas con compañías como General Electric®[®], la aplicación de este tipo de tecnologías limpias que ayuden a mejorar la calidad del medio ambiente son retribuidas a nivel de conciencia ambiental y en impuestos gubernamentales.

Capacitar al personal técnico del Sistema de ARI de la Estación Cicuco en la implementación de lechos filtrantes con material reciclable que ayuden a remover parámetros contaminantes de las aguas de producción y disminuir el impacto ambiental; de igual manera, explicarles el funcionamiento del software para que tengan conocimientos de este tipo de tecnologías.

Bibliografía

CLEVERLY, W. (2014). Kalgoorlie, Western Australia.

Crittenden, D., Keiran, T., & JT Jordan, M. (2005). CH5+: Chemistry's chameleon unmasked. *Journal of the American Chemical Society*, 4954-4958.

ECOPETROL. (2017). *Ecopetrol*. Recuperado el 16 de Marzo de 2017, de <http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es>

Ecopetrol S.A. (2015). *Reporte Concentración de Cloruros a la CSB por parte de Campo Cicuco*
Ecopetrol S.A. 2015.

García, J. (2013). *Análisis y simulación de la tecnología de ósmosis inversa con fuentes energéticas no convencionales*. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

García, J., Arnal, j., López, F., & León, M. (2013). Depuración de aguas residuales por procesos de membrana. Caso de una industria petroquímica. *DYNA-Ingeniería e Industria*, 88(1).

General Electrics Corp. (15 de Septiembre de 2007). WINFLOWS 3.3.2 ®.

Gómez, Y., & Vera, L. (2013). Simulación del pretratamiento de agua de mar para su desalación. *Tecnología Química*, 305-314.

INS. (1984). Decreto 1594. Colombia: Instituto Nacional de Salud.

Jaime, D., & Pico, M. (2009). Diseño de la planta de Tratamiento de Agua residuales y de Producción evaluando las diferentes alternativas Nacionales y Extranjeras aplicación

Campo Colorado. *Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingeniería Físico química.*

Kurt, R. (2006). *Termodinámica. 6 ed.* Wisconsin: Pearson educación.

MCS. (2016). Consultoría y Monitoreo Ambiental S.A.S., ANTEK S.A.

MINAMBIENTE. (7 de Marzo de 2015). Resolución 631. *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.* Bogotá, Colombia.

Moreno, J., & Ussa, J. (2008). Valoración Económica de Pasivos Ambientales Estudio de Caso: Pasivos Generados por el Campo Petrolero Cicuci-Boquete, Mompós, Colombia. *Colombia forestal*, 93-112.

Plata, M. (2014). *Evaluación y mejoramiento del Sistema de Levantamiento de Gas Lift, Campo Cicuco.* Ecopetrol S.A. Ecopetrol S.A.

Richard, A. (2010). Manejo de la Producción de Agua: De Residuo o Re uso. *Oilfield Review Schlumberger.*

Rios, C., Rodríguez, Y., Salinas, L., & Vargas, L. (2012). Adsorbentes a base de cascarilla de arroz en la retención de cromo de efluentes de la industria de curtiembres. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial: BSAA*, 146-156.

Rolle, K. (2006). *Termodinámica.* Termodinámica.

Romero, J. (1996). *Acuaquímica: contaminación del agua. Tratamiento de agua.* Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, CO. (I. 958-95742-5-4, Ed.) Editorial Presencia.

Snoeyink, V. (2003). Química del agua. *Limusa*.

Torres, P., Cruz, H., & Patiño, P. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano: Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 79-94.

Valero, F., Angel, B., & Ramón, A. (2011). Electrodialysis technology-theory and applications. *Desalination, trends and technologies. InTech*.

Vásquez. (2014). Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares -GIEM. *Universidad de Antioquia*.

Veil, J., Puder, M., Elcock, D., & Redweik, J. (2004). A white paper describing produced water from production of crude oil, natural gas, and coal bed methane. (No. ANL/EA/RP-112631). *Argonne National Lab., IL (US)*.

Apéndice A AUTORIZACION DE MANEJO DE INFORMACIÓN MONITOREOS AMBIENTALES ECP

Radicado Nro: **2-2016-051-69** Para responder citelo
Ecopetrol - CGC-CAMPO CICUCO
Fecha: Jul 15 2016 9:05AM
Dependencia: ESTUDIANTE UNAD
Destino: IRLANDA P PLANETA BARROS
Original Folios: 1 Anexos: 1



2-2016-051-69
Cicuco, 15 de Julio de 2016



Señores:

IRLANDA P. PLANETA BARROS
Estudiante Ingeniería Ambiental UNAD
RAFAEL JARAVA GALVAN
Estudiante Ingeniería Ambiental UNAD

Asunto: Respuesta a Solicitud de Información, radicado No. 1-2016-051-820

Respetados Señores,

Atendiendo a la comunicación del asunto, recibida en el Centro de Gestión de Correspondencia de la Coordinación de Producción Cicuco, el día 15 de Julio del año en curso, mediante la cual se solicita:

Acceso a la base de datos históricos del monitoreo de las Aguas Residuales Industriales del Campo Cicuco y con su correspondiente autorización de uso para efectos netamente académicos, comprendiendo el año de inicio de los monitoreos hasta la actualidad.

En relación con la petición anterior, nos permitimos dar respuesta a sus requerimientos en los siguientes términos.

1. Se hará entrega de los monitoreos de las Aguas Residuales Industriales realizados en la Coordinación de Producción Cicuco correspondientes a los años 2010 - 2015 en medio magnético.
2. La información suministrada será estrictamente utilizada para el fin descrito en la solicitud. Queda prohibida la reproducción parcial o total sin la autorización de ECOPETROL S.A.

En los anteriores términos esperamos haber dado respuesta clara y de utilidad a su solicitud.

Atentamente;

FAURICIO ROMERO ALVAREZ
Coordinador Campo Cicuco
Ecopetrol S.A.

Anexos: 1 CD

Cicuco – Bolívar, Colombia
Teléfono (095-6875544)

Apéndice B EQUIPO OSMOSIS INVERSA SEAPRO-E-210

GE Power & Water
Water & Process Technologies

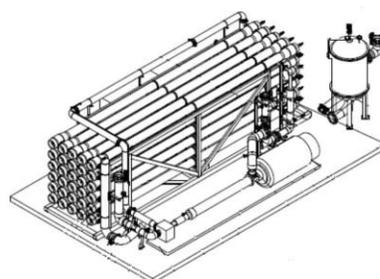
Fact Sheet

SeaPRO* E-Series

2500 m³/day (460 gpm) Seawater Desalination Machine

General Features

- Major components skid-mounted for easy installation and dependable operation
- Variable frequency drive (VFD) for high pressure pump optimal control, energy efficiency and constant water production
- Simple manual control for the system, and Hand/Auto control for remote starting and stopping of the system



Operating Parameters

Recovery 45%
 Design temp 25°C (77°F)
 Operating range 15-32°C (59-90°F) ¹⁾
 Design Feed TDS 45k ppm
 Nominal rejection 99%
 Minimum inlet pressure 2 bar (30 PSIG)

¹⁾ Varying the operating temperature may affect permeate rate

- Standard package includes energy recovery device for operating cost savings
- Flow and Conductivity 4-20mA signals available for remote monitoring/recording

Materials of Construction

High-pressure piping Sch 40 SS Duplex 2205
 Low-pressure piping Sch 80 PVC DIN PN10/16
 Frame Anti-corrosion treated carbon steel
 Frame Finish 2-coat epoxy painted & blue finish
 Enclosures IP55 carbon steel
 Membranes AD-400
 Membrane Housing FRP 8in-1200psi-7M (82 bar)
 Cartridge Filters 5-micron nominal, Hytrex*
 Cartridge Filter Housing FRP

Table 1: Standard Instrumentation

Flow (magnetic)	Permeate, Concentrate
Conductivity	Permeate
Pressure Switch	Feed LP, Feed HP, Concentrate, Permeate
Pressure Indicators	Pre-filter, Post-filter, Pump suction, Pump discharge, ERD HP discharge, ERD LP discharge, Permeate, Concentrate

a product of
ecomaginationSM



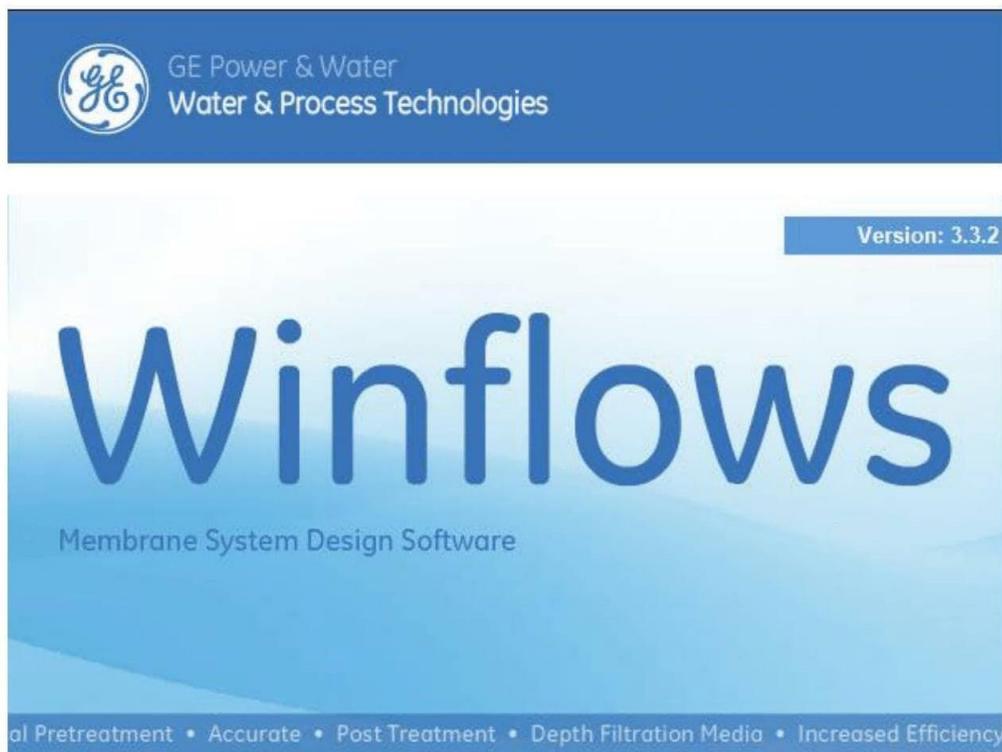
Find a contact near you by visiting www.gewater.com and clicking on "Contact Us".
 * Trademark of General Electric Company; may be registered in one or more countries.
 ©2013, General Electric Company. All rights reserved.

**Apéndice C RESOLUCIÓN NUMERO 0631 MINISTERIO DE AMBIENTE Y
DESARROLLO SOSTENIBLE**

 MINAMBIENTE
MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE
RESOLUCIÓN No. 0631
(7 MAR 2015)
<p>"Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones"</p>
EL MINISTRO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE
<p>En uso de sus facultades legales y en especial las conferidas por el numeral 25 del artículo 5 de la Ley 99 de 1993 y el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010 modificado por el artículo 1 del Decreto 4728 de 2010 y,</p>
CONSIDERANDO:
<p>Que el artículo 49 de la Constitución Política establece que el saneamiento ambiental es un servicio público a cargo del Estado.</p>
<p>Que los artículos 79 y 80 de la Constitución Política establecen como obligación del Estado, proteger la diversidad e integridad del ambiente; fomentar la educación ambiental; prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental; imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados.</p>
<p>Que de acuerdo con el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010, modificado por el artículo 1 del Decreto 4728 de 2010, corresponde al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, fijar los parámetros y los valores límites máximos permisibles que deberán cumplir los vertimientos puntuales a las aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.</p>
<p>Que el artículo 5 de la Ley 99 de 1993 establece que el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible tiene entre sus funciones, regular las condiciones generales para el saneamiento del medio ambiente y dictar regulaciones de carácter general tendientes a controlar y reducir la contaminación hídrica en todo el territorio nacional (numerales 2 y 11).</p>
<p>En mérito de lo expuesto,</p>
RESUELVE:
CAPÍTULO I DISPOSICIONES GENERALES
<p>ARTÍCULO 1. Objeto y Ámbito de Aplicación. La presente Resolución establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles que deberán cumplir quienes</p>

Apéndice D MANUAL WINFLOWS HELP

1. INTRODUCTION TO WINFLOWS



WINFLOWS © GE Power and Water, Water & Process Technologies.

Software code developed by GE ITC India.

This tool was developed in Visual Studio in .net platform.

Winflows 3.2.2 provides a rapid means for developing functional desalination system designs.

The user is assumed to possess basic familiarity with the principles of reverse osmosis system design and knowledge of required performance of the system under consideration. Further help and discussion may be found through links to the following sections.

Apéndice E FICHA TÉCNICA

GE Power & Water
Water & Process Technologies

Fact Sheet

SeaPRO* Series 60 Hz

Seawater Desalination Machines
35,000 ppm NaCl 100-300 gpm (22.7-68.1 m³/hr)



Basic Features (BAS)

- GE Fanuc Quick Panel 7-inch color display. Primarily text operating screens, Touchscreen controls.
- GE Fanuc Micro VersaMax processor
- 4-20 mA instruments displayed on instrument center
- Variable frequency drive (VFD) for high pressure pump
- Motor starter for boost pump
- Stand alone master control enclosure, skid mounted local control enclosure with terminal strips
- Membrane/energy recovery device (ERD)/boost pump and HP pump/prefilter located on separate skids

Premium Features (PRE)

- GE Fanuc QuickPanel 12-inch color display. Text and pictorial operating screens. Touchscreen controls.
- GE Fanuc VersaMax processor
- 4-20 mA instruments on touchscreen
- Primary and final pressure transmitters
- Variable frequency drive (VFD) for high pressure pump
- Motor starter for boost pump
- Automated valves and control for feed flush upon shut down
- Stand alone master control enclosure, local control enclosure with remote I/O
- Membrane/energy recovery device (ERD)/boost pump and HP pump/prefilter located on separate skids

a product of
ecomagination™



Find a contact near you by visiting www.gewater.com and clicking on "Contact Us".
* Trademark of General Electric Company, may be registered in one or more countries.
©2014, General Electric Company. All rights reserved.

FS1017EN.doc Sep-14

Apéndice F PARÁMETROS DE OPERACIÓN Y MEMBRANAS

Operating Parameters

Design Feed TDS	35,000 ppm NaCl
Maximum Recovery	45%
Nominal Rejection	95-98%
Operating Temperature	35 to 85°F (1.6 to 29.4°C)
Minimum Inlet Pressure	30 psig (2 Bar)
Design Temperature	77°F (25°C)

Instrumentation

Flow Meters.....	Permeate, concentrate, low pressure (LP) ERD inlet, high pressure (HP) ERD outlet
Conductivity.....	Permeate
pH	Feed
Pressure.....	Pre-filter, post-filter, primary, final, permeate, concentrate, LP ERD inlet, LP ERD outlet, HP ERD inlet, HP ERD outlet (PRE Feature= Primary, Final transmitter)
Pressure Switches.....	Feed, permeate, concentrate, HP ERD out/boost pump in
Instrument Center	Thornton M800

Materials of Construction

Frame	Painted Carbon Steel
Cartridge Filter	RO.Zs 05-40, 5-micron nominal
Cartridge Filter Housing	GRP (glass reinforced plastic)
Membrane Elements	AD-400
Membrane Housing	FRP
Low Pressure Pipe	Schedule 80 PVC
High Pressure Pipe	Duplex 2205
Enclosures	NEMA 4

Options Available

- Multi-Media filters
- Clean-in-Place (CIP) units
- Chemical feed systems
- Transfer pumps and storage tanks

Documentation Included

- Operation and maintenance manual
- Control narrative
- Drawings: piping and instrumentation, electrical and general dimensional

SeaPRO Models

MODEL	SeaPRO-42	SeaPRO-63	SeaPRO-84	SeaPRO-126
Permeate rate:	144k gpd 100 gpm (22.7 m ³ /hr) 122 gpm (27.7 m ³ /hr)	216k gpd 150 gpm (34.1 m ³ /hr) 183 gpm (41.6 m ³ /hr)	288k gpd 200 gpm (45.4 m ³ /hr) 244 gpm (55.4 m ³ /hr)	432k gpd 300 gpm (68.1 m ³ /hr) 367 gpm (83.4 m ³ /hr)
Concentrate Rate:	222 gpm (50.4 m ³ /hr)	333 gpm (75.6 m ³ /hr)	444 gpm (100.8 m ³ /hr)	667 gpm (151.5 m ³ /hr)
Feed Rate:				
Pumps and Motors				
Manufacturer:	Fedco	Fedco	Fedco	Fedco
Quantity:	2	2	2	2
HP Pump HP and type:	100 HP (75 kW) TEFC	150 HP (110 kW) TEFC	200 HP (150 kW) TEFC	250 HP (186 kW) TEFC
Boost Pump HP and Type:	10 HP (7.5 kW) TEFC	15 HP (11.1 kW) TEFC	15 HP (11.1 kW) TEFC	20 HP (15 kW) TEFC
Energy Recovery Booster				
Model:	PX-140S	PX-220	PX-140S	PX-140S
Manufacturer:	ERI	ERI	ERI	ERI
Quantity:	1	1	2	3
Membrane Elements and Housings				
Membranes Quantity:	42	63	84	126
Memb. Housing Style:	7 element long, 4 port 6, parallel	7 element long, 4 port 9, parallel	7 element long, 4 port 12, parallel	7 element long, 4 port 18, parallel
Banking Arrangement:				

MODEL	SeaPRO-42	SeaPRO-63	SeaPRO-84	SeaPRO-126
Cartridge Filtration				
Cartridge Filter:	ROZs05-40	ROZs05-40	ROZs05-40	ROZs05-40
Filter Length:	40" (102 cm)	40" (102 cm)	40" (102 cm)	40" (102 cm)
Filter Quantity:	22 per change out	54 per change out	54 per change out	80 per change out
Installation and Utility Requirements				
Inlet:	4.0" flange	4.0" flange	6.0" flange	6.0" flange
Permeate:	3.0" flange	3.0" flange	4.0" flange	4.0" flange
Concentrate:	3.0" flange	3.0" flange	4.0" flange	6.0" flange
Inlet Water Pressure:	30 psig, minimum	30 psig, minimum	30 psig, minimum	30 psig, minimum
Air Pressure:	100 psig, oil-free	100 psig, oil-free	100 psig, oil-free	100 psig, oil-free
Drain to be Sized for:	223 gpm (50.6 m ³ /hr)	334 gpm (75.9 m ³ /hr)	445 gpm (101.1 m ³ /hr)	667 gpm (151.5 m ³ /hr)
Power:	230/460 VAC, 3-phase, 60Hz	230/460 VAC, 3-phase, 60Hz	230/460 VAC, 3-phase, 60Hz	230/460 VAC, 3-phase, 60Hz
Control Circuit:	120 VAC, 1-phase, 60Hz	120 VAC, 1-phase, 60Hz	120 VAC, 1-phase, 60Hz	120 VAC, 1-phase, 60Hz
SeaPRO Skid				
Membrane/ERD Skid				
Height:	82" (208 cm)	83" (211 cm)	88" (224 cm)	88" (224 cm)
Width:	77" (196 cm)	77" (196 cm)	77" (196 cm)	90" (229 cm)
Depth:	324" (823 cm)	324" (823 cm)	324" (823 cm)	324" (823 cm)
Weight Estimate for Shipping Purposes:	9850 lb (4475 kg)	12,375 lb (5625 kg)	15,450 lb (7025 kg)	20,250 lb (9200 kg)
Pump/Prefilter Skid				
Height:	78" (198cm)	93" (237cm)	93" (237cm)	102" (258cm)
Width:	77" (196 cm)	77" (196 cm)	77" (196 cm)	78" (198 cm)
Depth:	199" (506 cm)	198" (504 cm)	229" (582 cm)	223" (566 cm)
Weight Estimate for Shipping Purposes:	4900 lb (2225 kg)	5,900 lb (2,675 kg)	6,275 lb (2,850 kg)	7,095 lb (3,220 kg)
Membranes:	1,680 lb (760 kg)	2,520 lb (1,140 kg)	3,360 lb (1,525 kg)	5,040 lb (2,285 kg)



