



Universidad del Bío-Bío
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería en Maderas
Escuela Ingeniería Civil Química



**EVALUACIÓN DE TÉCNICAS EXPERIMENTALES A
ESCALA DE LABORATORIO E INDUSTRIAL PARA EL
ESTUDIO DE INCRUSTACIONES DE SALES EN
CAÑERÍAS Y EQUIPOS DE PROCESOS**

Informe de Habilitación Profesional presentado en conformidad a los requisitos
para obtener el título de Ingeniero Civil Químico

ESTHEFANIA GABRIELA SALGADO BAEZA

Profesor Tutor: Dr. Jorge H. Saavedra Molina

Profesor Co-tutor: Dr. Pedro G. Toledo Ramírez

Concepción, 7 de Abril del 2021

RESUMEN

Actualmente, la formación de incrustaciones es un problema en las industrias ya que reduce la productividad debido a que los sedimentos pueden obstruir total o parcialmente las tuberías y otros equipos de procesos. Existen variados métodos para la mitigación de estos sedimentos, como el uso de inhibidores o tecnologías físicas. Sin embargo, es necesario conocer los métodos de estudios de incrustaciones, con el fin de conocer las condiciones que se deben dar en un medio para generarlas o saber las características que poseen aquellas que se forman en los equipos.

Este trabajo tuvo como objetivo identificar los métodos de estudios de incrustaciones con el fin de proponer un equipo o análisis adecuado para controlar los depósitos minerales que se forman en las tuberías u otros equipos ya sea en industrias o laboratorios. En consecuencia, se analizan los resultados de distintas investigaciones en donde se utilizaron los métodos de estudios de incrustaciones. Por otro lado, se realizó una comparación económica de los equipos o servicios de análisis de los métodos y finalmente, se compararon en base a ventajas y desventajas. Para esto, se realizaron búsquedas sistemáticas en las principales fuentes de investigación, se recopilaron datos como temperatura, flujo, presión, concentraciones de los iones presentes, tipo de experimentos y detalles de los equipos, categorizando los métodos de estudios de incrustaciones. Luego, se solicitaron datos a empresas nacionales e internacionales de los costos asociados a los equipos o servicios de análisis. De manera adicional a la investigación, se realizó una verificación de la capacidad de generar incrustaciones de las soluciones indicadas en otros estudios.

Respecto a la propuesta del equipo, desde el punto de vista económico los costos variaron según sus especificaciones. Se concluyó que el método de estudio más adecuado respecto a los costos fue el simulador de ensuciamiento de membrana ya que su precio es relativamente bajo y accesible al cliente, además de utilizar bajas cantidades de agua y químicos lo que también conlleva una disminución de gastos. Cabe destacar que, este método coincidió con el mayor rendimiento ya que se obtienen resultados en tiempos cortos y son fáciles de identificar de manera visual y microscópica. Por otro lado, la prueba de bloqueo de tubos presenta resultados de manera rápida debido a las diferencias o caídas de presión. Sin embargo, a pesar de entregar

buenos resultados, su costo de inversión es alto por lo que la adquisición del equipo es adecuado para estudios de nivel industrial.

AGRADECIMIENTOS

Me siento muy agradecida de la Universidad del Bío-Bío, de todos los docentes y trabajadores que aportaron en mi crecimiento tanto personal como profesional. Especialmente a los profesores de la escuela de Ingeniería Civil Química quienes no sólo aportaron con conocimientos sino también con enseñanzas personales. Agradecer a aquellos profesores que me dieron la oportunidad de ser ayudante en donde aprendí a crecer como líder, reforzar conocimientos y encantarme aún más de mi carrera. De modo especial al profesor Jorge Saavedra, por darme la oportunidad de trabajar junto a él y despertar mi interés en el área de investigación y por confiar en mí especialmente en estos tiempos tan complejos para realizar este tipo de trabajos.

Este trabajo va dedicado a mi familia, mis padres Esteban y Claudia por todo lo que han hecho por mí durante toda mi vida, por entregarme valores, por darme amor y siempre apoyarme en todo lo que me he propuesto, todo lo que soy es gracias a ustedes. También, reconocer a mi pololo Raúl, que ha estado en mis mejores y peores momentos apoyándome con palabras de aliento destacando siempre que lo que quiera lo puedo lograr, especialmente en mi transcurso universitario. Agradecer a mi prima Evelyn por inculcarme desde pequeña que tenía que ser una gran profesional y que estudiando podría lograr muchas cosas, gracias por siempre tener tanta fe en mí. Y finalmente, a todos mis tíos y tías que han estado muy orgullosos de mí y me han alentado a seguir luchando por mis sueños.

Respecto a mi vida universitaria, agradecer a mi amiga Camila Bertiola por apoyarme tanto en lo académico como en lo personal. Estoy muy contenta de haber coincidido contigo en esta etapa de mi vida.

Agradecimientos al Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y Minería (CRHIAM) ANID/FONDAP/15130015 por financiamiento y colaboración brindada. En particular, agradezco al profesor Pedro Toledo de la Universidad de Concepción por abrirme las puertas para participar en el centro.

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
RESUMEN	2
AGRADECIMIENTOS	4
TABLA DE CONTENIDOS	5
INDICE DE FIGURAS	7
INDICE DE TABLAS	9
NOMENCLATURA.....	10
1. INTRODUCCIÓN	12
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	15
3.1. Tiempo de inducción	17
3.2. Metaestabilidad	18
3.3. Métodos de control de incrustaciones.....	18
3.3.1. Alterar las características del agua de alimentación.....	19
3.3.2. Optimización de los parámetros operativos y el diseño del sistema.	20
3.3.3. Adición de antiincrustantes.	20
3.4. Métodos de estudios de incrustaciones	21
3.4.1. Microscopía electrónica de barrido acoplada a espectrometría de rayos X (SEM/XRD)	22
3.4.2. Reactor de disco giratorio (SDR)	22
3.4.3. Simulador de ensuciamiento de membranas (MFS).....	25
3.4.4. Tratamiento magnético (AMT)	27
3.4.5. Modelo de condensador-evaporador	28
3.4.6. Ultrasonido	30
3.4.7. Prueba de bloqueo dinámico de tubos	32

3.4.8.	Técnicas electroquímicas.....	34
3.4.9.	Sensores.....	34
3.4.10.	Técnicas radiactivas.....	36
3.4.11.	Otras técnicas: radiografía, tomografía y tecnología “pig”	37
4.	OBJETIVO(S) GENERAL(ES) Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS	38
4.1.	Objetivo general.....	38
4.2.	Objetivos específicos	38
5.	METODOLOGÍA.....	38
5.1.	Recursos materiales y equipamiento.....	38
5.2.	Procedimiento	38
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	40
6.1.	Comparación métodos de estudios de incrustaciones.....	40
6.2.	Recopilación de resultados de los métodos de estudios	45
6.3.	Costos equipamiento.....	51
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	55
7.1	Conclusiones.....	55
7.2	Recomendaciones	55
8.	REFERENCIAS	56
9.	ANEXOS.....	64
	<i>A Revisión bibliográfica (3.2.3).....</i>	<i>64</i>
	<i>B Metodología (5.2).....</i>	<i>66</i>
	<i>C Resultados anexos a la investigación: verificación de soluciones potencialmente incrustantes (6.4).....</i>	<i>69</i>

INDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Esquema de formación de incrustaciones. Obtenida de Antony y colaboradores (2011).	17
Figura 2. Curva de supersaturación. C^* = saturación de equilibrio, t_n = tiempo de nucleación, t_{ind} = tiempo de inducción y t_{ip} = período latente. Obtenida de Mullin (2001).	17
Figura 3. Diagrama de solubilidad-sobresaturación. La línea continua es una curva de solubilidad que representa las temperaturas (T) y concentraciones (c) a las que se produce una cristalización espontánea incontrolada. Obtenida de Mullin (2001).	18
Figura 4. Representación esquemática del reactor de disco giratorio. Obtenida de Cafiero y colaboradores (2002).	24
Figura 5. Diagrama esquemático del equipo experimental: (1) tanque de solución de Na_2SO_4 , (2) tanque de solución de $BaCl_2$, (3) bombas peristálticas, (4) rotámetros, (5) juntas rotativas, (6) motores eléctricos de velocidad variable, (7) poleas, (8) tornillo de regulación de la distancia entre discos, (9) convertidores de frecuencia y panel de control, (10) cámara de policarbonato cilíndrica, (11) disco superior, (12) disco inferior, (13) polietileno frustum, y (14) válvulas de descarga. Obtenida de Farahani y colaboradores (2017).	25
Figura 6. Vista lateral del simulador de ensuciamiento de membranas (MFS) con una ventana transparente. Obtenida de Vrouwenvelder y colaboradores (2006).	27
Figura 7. Esquema del montaje para el tratamiento magnético del agua en circulación. (a) Montaje y (b) disposición de imanes permanentes. Obtenida de Fathi y colaboradores (2006).	28
Figura 8. Modelo de un condensador evaporativo por pulverización: (1) tanque de agua, (2) serpentín de agua, (3) distribuidor de agua, (4) bomba de agua, (5) cámara de aire, (6) válvula de drenaje y (7) válvula de control con un rotámetro. Obtenida de Szymura (2006).	30
Figura 9. Diferentes tipos de generadores de ultrasonidos: (a) baño ultrasónico, (b) bocina ultrasónica y (c) transductor de placa ultrasónica. Obtenido de Kim y Suslick (2018).	31
Figura 10. Esquema del equipo de bloqueo de tubos dinámicos para la prueba de inhibidores de escala. Obtenida de Kelland (2011).	33
Figura 11. Equipo para la prueba de bloqueo dinámico de tubos de los inhibidores de incrustaciones. Obtenida de Kelland (2011).	33

Figura 12. Sensor de fibra óptica de núcleo expuesto para la detección de incrustaciones.
Obtenida de Rostron (2018). 35

INDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Requisitos para un monitor de ensuciamiento ideal (Vrouwenvelder y col., 2006).....	25
Tabla 2. Resumen de ventajas y desventajas de los métodos de estudios de incrustaciones (elaboración propia).....	40
Tabla 3. Comparación de los métodos de estudios respecto al control y estudio de incrustaciones, daños al medio ambiente y tiempo en que se obtienen resultados (elaboración propia).....	43
Tabla 4. Recopilación de resultados de investigaciones de distintos autores utilizando los métodos de estudios (elaboración propia).....	46
Tabla 5. Resumen de los costos económicos de los equipos para estudiar incrustaciones a escala de laboratorio y/o industrial (elaboración propia).....	52

NOMENCLATURA

AIF	Asociación Internacional de Fomento
DAF	Flotación por aire disuelto
MF	Microfiltración
UF	Ultrafiltración
NF	Nanofiltración
HMP	Hexametáfosfato
TPP	Tripolifosfato
ATMP	Aminotris (ácido metilénfosfónico)
HEDP	1-hidroxietano-1,1-bis (ácidos fosfónico)
PBTC	Ácido 2-fosfonobutano 1,2,4-tricarboxílico
PA	Poliectrolitos orgánicos (poliacrilatos)
SEM/XRD	Microscopía electrónica de barrido acoplada a espectrometría de rayos X
SDR	Reactor de disco giratorio
DSDR	Reactor de doble disco giratorio
PSD	Tamaño de partícula más fino (nm)
MFS	Simulador de ensuciamiento de membrana
AMT	Tratamiento magnético
MF	Campo magnético
CaCO₃	Carbonato de calcio
CaSO₄	Sulfato de calcio
BaSO₄	Sulfato de bario
SrSO₄	Sulfato de estroncio

Ca₃PO₄	Fosfato de calcio
(NH₄)₂SO₄	Sulfato de amonio
RO	Ósmosis inversa
CuO	Óxido de cobre
TiO₂	Óxido de titanio
MZW	Ancho de la zona metaestable
SHMP	Hexametáfosfato de sodio
DBP	Subproductos de desinfección
PVC	Policloruro de vinilo
TBT	Tributilestaño
TBT	Tributilina
TPT	Trefiniltina
TSMR	Resonador de modo de cizallamiento de espesor
UV	Radiación ultravioleta
VIS	Radiación visible
IR	Radiación infrarroja
ATR	Sensor de reflectancia total atenuada
ATR-FTIR	Infrarrojo por transformación de Fourier total atenuada
PIG	Pipeline Inspection Gauge (medidor de inspección de tuberías)

1. INTRODUCCIÓN

La formación de incrustaciones se reconoce como uno de los principales problemas de aseguramiento del flujo que afectan la producción de distintas áreas y específicamente en el sector de petróleo y el gas. Los principales problemas de los depósitos de cal en las industrias del petróleo y el gas son la obstrucción del pozo, lo que reduce la vida útil del equipo y afecta la integridad de los componentes, como válvulas, bombas, actuadores hidráulicos, tuberías, entre otros. Las implicaciones económicas surgen de la reducción del flujo del fluido y, por lo tanto, de una menor producción, pero también de los costos de mantenimiento de reemplazar las líneas de producción (Vazirian y col., 2016). Es importante destacar, que el costo anual debido a todos los tipos de incrustaciones en los países industrializados se estima en el 0,25% de su producto interior bruto (PIB), lo que da unos 42,65 mil millones de dólares en 2014 (Herz y col., 2008).

El ensuciamiento se define como la generación de depósitos indeseables en cualquier superficie sumergida en fases líquidas. La incrustación podría explicarse como la creación de depósitos cristalinos duros en la superficie de transferencia de calor durante el calentamiento de una sal inversamente soluble (Bogacz y col., 2017). Los depósitos de incrustaciones inorgánicas como CaCO_3 , BaSO_4 y SrSO_4 , se pueden depositar a lo largo de las vías del agua en las tuberías. En el caso de las incrustaciones de carbonato, estas se generan cuando hay un cambio de temperatura y presión que da como resultado la liberación de dióxido de carbono de la forma acuosa a la forma gaseosa del fluido que fluye. Por otro lado, cuando aparecen los depósitos de sulfato es debido a que se mezclan dos salmueras incompatibles (Vetter, 1976; Moghadesi y col., 2003).

Aplicar recubrimientos superficiales o cambiar la naturaleza físico-química de una superficie puede ser una estrategia potencialmente correcta para reducir la formación de incrustaciones en las superficies (Vazorian y col., 2016), tales como: rugosidad, cinética de cristalización, mojabilidad, tiempo de inducción, entre otros. Por otro lado, existen muchas investigaciones respecto a distintos métodos de control ya sean físicos, mecánicos y químicos, que van desde alterar las características del agua de alimentación (Fatima, Hashaikeh, y Hilal, 2019; Badruzzaman y col., 2019; Henthorne y Boysen, 2015), optimizar los parámetros del sistema (Antony y col., 2011; Goh y col., 2018; Henthorne y Boysen, 2015; Greenlee y col., 2009) o

agregar antiincrustantes (Antony y col., 2011; Tong y col. , 2019; Greenlee y col., 2009), con el fin de retrasar la nucleación y posterior formación de incrustaciones. Sin embargo, es necesario que las empresas e investigadores conozcan las condiciones que se deben cumplir para que se generen los depósitos, para luego analizar las incrustaciones que se generan, su naturaleza y morfología.

Basado en los antecedentes expuestos, la presente habilitación profesional tiene como propósito evaluar los métodos de estudios de incrustaciones con el objetivo de proponer equipos o análisis adecuados según los resultados y los costos de adquisición de éstos, para realizar estudios a nivel de laboratorio e industrial, destacando las ventajas y desventajas que tienen los métodos.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los sedimentos minerales, provenientes principalmente de aguas con alto contenido de electrolitos, generan una acumulación de incrustaciones, esto debido a que se perturba el estado de cualquier fluido natural de tal manera que se excede el límite de solubilidad de uno o más de sus componentes. Dentro de las principales sales incrustantes se encuentran el carbonato de calcio (CaCO_3), sulfato de calcio (CaSO_4), sulfato de bario (BaSO_4), sulfato de estroncio (SrSO_4), silicatos, fosfato de calcio (Ca_3PO_4) y aluminosilicatos (Antony y col., 2011). La formación de carbonato de calcio es uno de los principales problemas del sector del tratamiento de agua y del petróleo. Según estudios realizados, tal es el daño de las incrustaciones de carbonato de calcio que obstruyen más del 40% del área de fluencia de la tubería e impiden el acceso de las herramientas de reparación (Crabtree y Johnson, 1999).

La acumulación de incrustaciones es uno de los problemas que más preocupan a los ingenieros de producción, es por ello que existen muchos trabajos que se centran en buscar las condiciones y parámetros necesarios como temperatura, pH, presión, composición, dureza del agua, entre otros (Setta y Neville, 2011), con el fin de definir aquellas variables que afectan a la morfología y crecimiento de los cristales que componen las incrustaciones, encontrando métodos para su control y/o inhibición. Sin embargo, es necesario conocer las técnicas que existen para estudiar estas incrustaciones tanto a nivel de laboratorio como industrial, ya que al no prevenir o eliminar las incrustaciones de sales se pueden producir daños en las tuberías lo que daría como resultado un flujo de agua reducido, una transferencia de calor reducida en calderas y condensadores y puede disminuir la resistencia mecánica del equipo en contacto con el agua. También puede provocar fallas en las bombas y, finalmente, el cierre completo de las instalaciones lo que conlleva problemas económicos relacionados con el mantenimiento y necesidad de reemplazar el equipo (Setta y Neville, 2011). En consecuencia, tanto empresas como investigadores han decidido estudiar, cuáles son las condiciones y parámetros determinantes en la formación de las incrustaciones por medio de métodos de estudios con el fin de evitar ciertas características y/o conocer las principales sales incrustantes en los procesos que realizan. Finalmente, este trabajo pretende dar respuesta a la problemática respecto a los equipos o análisis más adecuados para el estudio de las incrustaciones a escala de laboratorio e industrial que se generan en cañerías y equipos

de procesos. Además, permitirá conocer los costos económicos asociados y las ventajas y desventajas que tienen unos métodos de estudios sobre otros.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La escasez de agua es una crisis en todo el mundo debido a su creciente demanda, por ello que las comunidades están recurriendo a la desalinización como una estrategia importante para complementar la disminución de las fuentes de agua dulce y garantizar un suministro de agua confiable y resistente a la sequía (Badruzzaman y col., 2019). Según el informe de inventario de desalación mundial de la AIF, la desalación por membrana de alta presión, con nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (RO), es la operación de salación predominante y representa el 55% (RO: 51%; NF: 4%) del agua total producida por desalación correspondiente a 44,1 Mm³/día (Lattemann y col., 2010). Las aplicaciones de desalación se aplican a aguas provenientes del mar, de río y aguas residuales, las cuales poseen una gran cantidad de sedimentos minerales que suelen ser uno de los problemas de producción más preocupantes ya que estos se acumulan y provocan que un conjunto de depósitos se incrusten en las membranas, tuberías de producción, válvulas, bombas, equipamientos, entre otros. La mayor parte de las incrustaciones que se encuentran se forman por la precipitación de minerales presentes en el agua de formación (Crabtree y Johnson, 1999), o bien cuando las sales poco solubles están sobresaturadas y precipitan en la corriente de alimentación cerca o en la superficie de la membrana a medida que la concentración de iones formadores de incrustaciones aumenta más allá de sus niveles de solubilidad (Lee y col., 2020). Por otro lado, las incrustaciones pueden ocurrir también cuando soluciones acuosas que contienen sales con solubilidad inversa ebulen provocando depósitos como el sulfato de calcio (CaSO₄) y carbonato de calcio (CaCO₃), (Esawy y Malayeri, 2016). Estas sales se encuentran dentro de los principales incrustantes, además del sulfato de bario (BaSO₄), sulfato de estroncio (SrSO₄), silicatos, fosfato de calcio (Ca₃PO₄) y aluminosilicatos (Antony y col., 2011).

Existe una amplia gama de procesos industriales que se ven afectados por las cristalizaciones como las plantas de celulosa en donde mayormente los evaporadores se ven afectados por incrustaciones por cristalización (Na₂CO₃ y Na₂SO₄) en el licor negro (Esawy y Malayeri, 2016). Por otro lado, Behbahani y col. (2005) indican que las plantas de producción de ácido fosfórico se ven afectadas en sus intercambiadores de calor lo que produce un mantenimiento

constante ya que estos deben limpiarse cada siete días de operación, lo que conlleva un gran gasto económico. Tal es el daño de la formación de incrustaciones que en el caso del carbonato de calcio en las tuberías de producción obstruye más del 40% del área de fluencia de la tubería e impide el acceso de las herramientas de reparación (Crabtree y Johnson, 1999).

La formación de incrustaciones está relacionado con una variedad de factores entre los más importantes se encuentran los cambios de presión, temperatura, pH, sobresaturación y polarización de concentración (en el caso de formación de incrustaciones en los sistemas de membranas de alta presión). La polarización por concentración es un fenómeno que tiene lugar cuando se produce una separación en la superficie de la membrana, es decir, el solvente atraviesa la membrana y los solutos rechazados se acumulan en la superficie de la membrana lo que puede provocar sobresaturación (Hoek y col., 2008). La sobresaturación ocurre cuando ésta excede un valor crítico, induciendo el crecimiento de los cristales lo que se conoce como nucleación. Existen dos tipos de nucleación: heterogénea (o cristalización superficial) la cual ocurre debido al crecimiento de los depósitos de incrustaciones en la superficie de la membrana, lo que resulta en una disminución del flujo y un bloqueo de la superficie; y la homogénea (o cristalización en masa) en donde las partículas de cristal se forman en la fase masiva a través de una cristalización homogénea y pueden depositarse en las superficies de las membranas como sedimentos para formar una capa que conduce a la disminución del flujo (Antony y col., 2011). Luego los cristales crecen gradualmente a partir de los núcleos y este proceso es irreversible (Al-Roomi y Hussain, 2016; Darton, 2020; Matin, Rahman y Zubair, 2019) (la Figura 1 representa esquemáticamente los procesos de cristalización). Además, existe un tiempo que transcurre desde la creación de la sobresaturación en una solución hasta la detección de una nueva fase sólida tras la nucleación que se denomina tiempo de inducción (Mullin y col., 2001). Por lo tanto, es una medida de la capacidad de una solución sobresaturada de permanecer en el estado de metaestabilidad (Lenka y Sarkar, 2014).

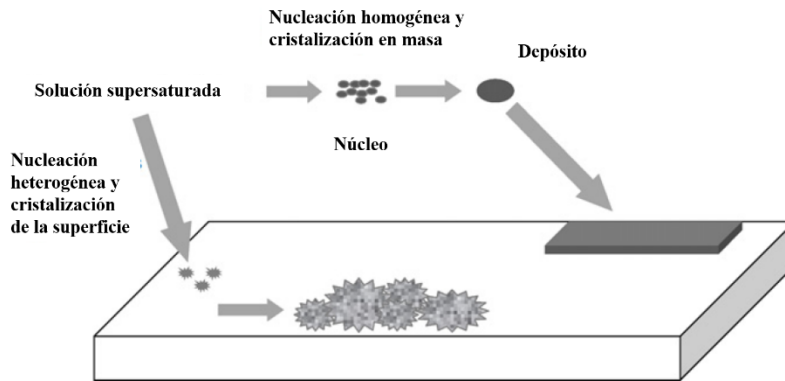


Figura 1. Esquema de formación de incrustaciones. Obtenida de Antony y colaboradores (2011).

3.1. Tiempo de inducción

El tiempo de inducción (t_{ind}) es el tiempo transcurrido entre la sobresaturación y la aparición de los cristales (Figura 2). Se compone de tres partes, incluido el tiempo de relajación (t_r), el tiempo de núcleo estable (t_n) y el tiempo de crecimiento del núcleo (t_g).

El tiempo de inducción se mide mediante observación visual o técnicas analíticas que utilizan mediciones de conducción o dispersión de luz láser. Hay varios factores que afectan en gran medida las mediciones del tiempo de inducción, como la agitación, impurezas, viscosidad de la solución, nivel de sobresaturación, entre otros (Mullin, 2001).

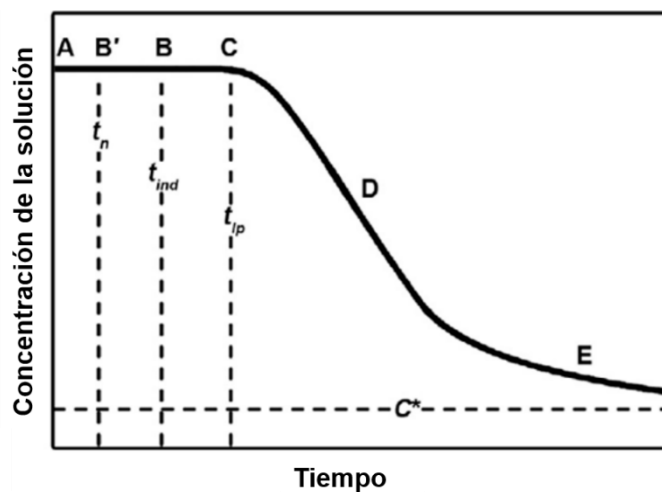


Figura 2. Curva de supersaturación. C^* = saturación de equilibrio, t_n = tiempo de nucleación, t_{ind} = tiempo de inducción y t_{lp} = período latente. Obtenida de Mullin (2001).

Existe un lapso de tiempo entre los puntos de sobresaturación (A) y nucleación (B'). Los núcleos iniciales crecen hasta que alcanzan un tamaño detectable (B). La concentración de la solución permanece relativamente constante durante algún tiempo (C) y luego cambia drásticamente (D) debido al rápido crecimiento de los cristales. Finalmente alcanza la concentración de equilibrio (E).

3.2. Metaestabilidad

El ancho de la zona metaestable (MZW) es el área entre una curva de saturación de equilibrio y el punto de sobresaturación observado experimentalmente en el cual la nucleación ocurre espontáneamente (Figura 3). Para la generación de cristales, el estado de una solución cambia de estable a metaestable a lábil (inestable). Hay varias formas de generar cristales, que incluyen enfriamiento (línea ABCD), evaporación o adición de un antidisolvente (línea AB'C'), una combinación de enfriamiento y evaporación, o enfriamiento y la adición de un antidisolvente (línea AB''C''). (Mullin, 2001).

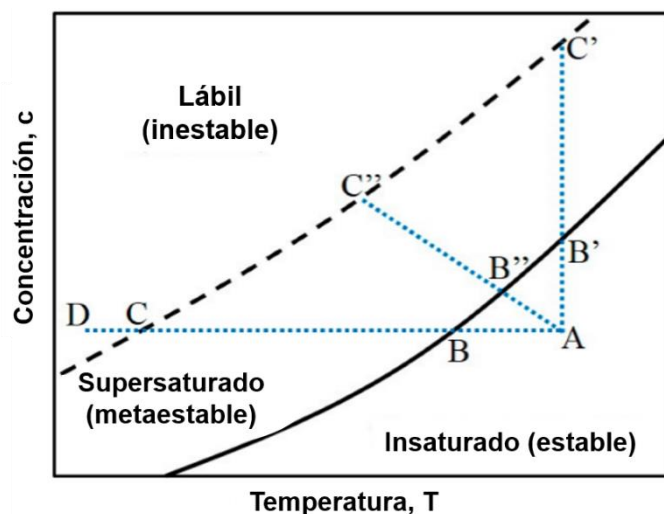


Figura 3. Diagrama de solubilidad-sobresaturación. La línea continua es una curva de solubilidad que representa las temperaturas (T) y concentraciones (c) a las que se produce una cristalización espontánea incontrolada. Obtenida de Mullin (2001).

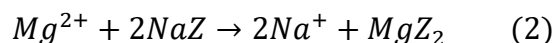
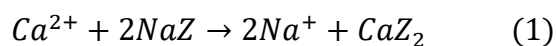
3.3. Métodos de control de incrustaciones

Es sumamente importante controlar las incrustaciones para evitar deterioros en cañerías, tuberías y equipos ya que generaría un mayor costo de limpieza y reparación. Dentro de las principales técnicas de control se encuentran:

3.3.1. Alterar las características del agua de alimentación.

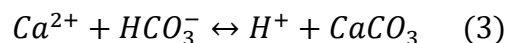
Los estudios de Antony y col. (2011) dicen que la calidad del agua de alimentación se modifica para minimizar la tendencia a la formación de incrustaciones mediante pretratamientos con el fin de limitar la concentración de minerales o reducir la alcalinidad. Entre los principales métodos se encuentran:

- A) Coagulación, en donde se eliminan principalmente las partículas y las materias coloidales, siendo eficaz para minimizar el contenido de hierro y sílice disueltos en el agua de alimentación.
- B) Ablandamiento por intercambio de iones, regenerados con sodio. El sodio adsorbido en la resina de intercambio iónico se intercambia por iones de magnesio y calcio que se concentran en el agua de alimentación. Las ecuaciones para el ablandamiento del agua son:



Cuando todos los iones de sodio han sido reemplazados por calcio y magnesio, la resina (NaZ) debe regenerarse con una solución de salmuera. Este método puede eliminar la necesidad de una alimentación continua de ácido o antiincrustante (Antony y col., 2011).

- C) Acidificación, que implica la reducción del pH del agua de alimentación a 5 - 7 y el aumento de la solubilidad de las incrustaciones alcalinas, especialmente el $CaCO_3$, que es potencial incrustante en todos los tipos de agua de alimentación (Prihasto, Liu y Kim, 2009). La solubilidad de $CaCO_3$ depende del pH:



La adición de H^+ en forma de ácido desplaza el equilibrio hacia la izquierda y mantiene el carbonato de calcio en forma disuelta. Generalmente se usa ácido sulfúrico o ácido clorhídrico para ajustar el pH (Antony y col., 2011).

Siendo éstos parte de las técnicas de pretratamiento convencionales al igual que la cloración, filtración de medios, ozonización, flotación por aire disuelto (DAF), técnicas de ultrasonido y radiación de luz ultravioleta (Fatima, Hashaikeh, y Hilal, 2019). Por otro lado, se encuentran las técnicas de pretratamiento no convencionales, las cuales se basan en la tecnología de membranas, entre ellas se encuentran:

- D) Microfiltración (MF), puede eliminar eficazmente los sólidos en suspensión y las bacterias $\geq 0,1 \mu\text{m}$. Tiene un costo operativo y un costo de reemplazo de la membrana de RO bajo. Sin embargo, es sensible a los agentes oxidantes.
- E) Ultrafiltración (UF), tiene una gran capacidad para rechazar una amplia gama de contaminantes que van desde orgánicos en suspensión, limo, patógenos y virus. Tolerable a variaciones favorables en el agua de alimentación. Por otro lado, la distribución polidispersa del tamaño de poros puede causar incrustaciones irreversibles; desafiantes para controlar la porosidad y el tamaño de los poros. Puede contribuir a la bioincrustación en las membranas de ósmosis inversa durante los períodos de alta floración de algas.
- F) Nanofiltración (NF), capaz de retener sales aniónicas multivalentes y materiales orgánicos de bajo peso molecular. Reduce la formación de incrustaciones en las membranas de ósmosis inversa al eliminar la dureza. Sin embargo, presenta resistencia química y vida útil limitada de las membranas (Fatima y col., 2019).

3.3.2. Optimización de los parámetros operativos y el diseño del sistema.

Otra forma de minimizar la formación de incrustaciones es realizando cambios específicos en el diseño del sistema o sus parámetros operativos para mantener la concentración de minerales formadores de incrustaciones por debajo del límite del umbral crítico o disminuyendo la cinética de formación de incrustaciones. Estos cambios incluyen limitar la recuperación del producto, inversión del flujo de alimentación, desmineralización química intermedia, filtración por rotación, entre otros (Antony y col., 2011).

3.3.3. Adición de antiincrustantes.

Las investigaciones de Yu y colaboradores (2020) exponen que sin duda la adición de antiincrustantes es el método más utilizado para controlar la formación de incrustaciones,

debido a que pueden influir típicamente en la cristalización en masa de la escala de base de iones metálicos al interferir con una o más de las etapas de cristalización, porque estos agentes químicos con varios grupos funcionales como los grupos fosfónico, carboxílico y sulfónico pueden interactuar con la escala que forman sustancias e inhiben la formación de incrustaciones a través de uno o más de los mecanismos de inhibición ampliamente aceptados, que incluyen quelación, dispersión, distorsión de la red y efectos de umbral. Además, este método es preferido por su bajo costo y generalmente requiere concentraciones bajas, es decir, menos de 10 mg/L (Zhang y col., 2015). Los antiincrustantes comerciales de uso común están representados por tres familias químicas: polifosfatos (hexametáfosfato (HMP), tripolifosfato (TPP), etc.), organofosfatos (aminotris (ácido metilfosfónico), ATMP; 1-hidroxietano-1,1-bis (ácido fosfónico), HEDP; ácido 2-fosfonobutano 1,2,4-tricarboxílico (PBTC), etc.) y polielectrolitos orgánicos (poliacrilatos (PA); policarboxisulfonatos) (Popov y col., 2016). Existen variadas investigaciones que estudian la efectividad de los antiincrustantes, una de ellas es el estudio realizado por Flores (2018) en donde evalúa el rendimiento de dos antiincrustantes de tipo polioxiacrilato de bajo peso molecular (POC AS 2020) y alto peso molecular (POC AS 5060) en un sistema de película descendente de agua dura con el fin de determinar la cinética de los depósitos de CaCO_3 y medir la cantidad de CaSO_4 y CaCO_3 generados. En la investigación se concluye que ambas especies antiincrustantes son efectivas para suprimir el crecimiento de cristales, disminuir el espesor de los depósitos y aumentar los tiempos de inducción deteniendo así la formación de incrustaciones.

La Tabla A1 del Anexo A, resume los distintos métodos para controlar el crecimiento de las incrustaciones en membranas.

3.4. Métodos de estudios de incrustaciones

Existen métodos convencionales, geoquímicos y petrográficos que son los comúnmente más utilizados como: el análisis químico del agua según la concentración de iones de la solución a analizar, la detección de la concentración de inhibidores de incrustaciones (el inhibidor que falta se adhiere a las partículas de cal), la inspección visual ya sea por caída de producción/caudal o aumento de presión y finalmente, retirar una sección de la tubería con

el fin de medir el grosor de las incrustaciones generadas y analizar mediante técnicas analíticas (Rostron, 2018).

3.4.1. Microscopía electrónica de barrido acoplada a espectrometría de rayos X (SEM/XRD)

Generalmente, el ensuciamiento por cristalización es promovido por superficies extrañas, especialmente las rugosas, que causan nucleación heterogénea. Bogacz y colaboradores (2017) afirman que la rugosidad es una característica común que influye en la formación de incrustaciones, además de la humectabilidad de la superficie, turbulencia, diferencia de temperatura entre la superficie y solución, concentración de sales, entre otros.

Mediante la microscopía electrónica de barrido, es posible obtener imágenes de gran resolución que permiten identificar las superficies en las que ocurren las incrustaciones. Por otro lado, la difracción de rayos X (XRD) permite la rápida identificación de materiales particulados proporcionando información detallada acerca de la estructura cristalográfica de las fases presentes en las muestras destacando los polimorfos que producen las sales incrustantes más comunes. Como uno de los minerales biológicos más comunes, se ha encontrado el carbonato de calcio, el cual muestra diferentes polimorfos en las estructuras calcáreas de los organismos, éste puede cristalizar como calcita, aragonita o vaterita.

3.4.2. Reactor de disco giratorio (SDR)

Se ha demostrado que los reactores de disco giratorio son muy eficaces como mezcladores de flujo continuo para los procesos de precipitación por lo que se utilizan como un eficaz método de estudio. Los SDR se han utilizado con éxito en una variedad de procesos que dependen de la micromezcla: polimerización, reacciones orgánicas competitivas y reacción-precipitación (Caprariis y col., 2012). Los SDR se clasifican convencionalmente en dos tipos: SDR de película delgada, que consta de un solo disco giratorio y SDR de rotor-estator. Este último consta de un disco giratorio (rotor) y un disco estacionario (estator) cerca del giratorio que son coaxiales (Mirzaei y col., 2020). Los SDR utilizan la aceleración centrífuga para producir películas muy finas (en un rango de espesor de 50 a 500 μm) en la superficie de un disco giratorio, es decir, los SDR analizan el número de partículas que se produce en el disco, dependiendo de la velocidad del éste, la cual se varía por un regulador de control entre 100 y

1000 rpm. Las muestras que se obtienen pueden ser posteriormente analizadas, para conocer la morfología de las incrustaciones que se generaron. Como observaron Jachuck y Ramshaw (1994), esto tiene varias ventajas, entre ellas la capacidad de producir películas extremadamente delgadas incluso para caudales razonablemente grandes, con tiempos de residencia muy cortos. Esto se debe a que, en tales dispositivos, la película líquida no experimenta ninguna caída de presión de la superficie del disco, y la aceleración centrífuga y de cizallamiento es suficiente para asegurar el flujo continuo de la delgada película líquida. Por consiguiente, los reactores de disco giratorio pueden funcionar en modo continuo con menos consumo de energía que los mezcladores tubulares. De hecho, una vez que el disco está en movimiento (alta velocidad de rotación hasta 6000 rpm), se requiere una cantidad relativamente pequeña de energía para mantener el disco en rotación, debido a la alta inercia exhibida por el disco.

Los experimentos de precipitación de sulfato de bario usando un reactor de disco giratorio realizados por Cafiero y colaboradores (2002) se llevaron a cabo en una rotación de disco de 0,5m de diámetro. Una representación esquemática del sistema se muestra en la Figura 4. El disco de latón utilizado en el estudio fue rociado con polvo de bronce de aluminio para crear imperfecciones en la superficie del orden de 100 μm para promover la mezcla en la película líquida. Se usó un motor para hacer funcionar el disco giratorio, este estaba conectado a través de un eje central. La velocidad del disco se varía entre 100 y 1000 rpm usando un regulador de control. Las dos soluciones reactivas acuosas fueron introducidas en la superficie del disco por medio de dos buretas de 56 mL, que están ubicadas a una distancia radial de 0,05m del centro del disco. El lodo precipitado fue recogido en un recipiente.

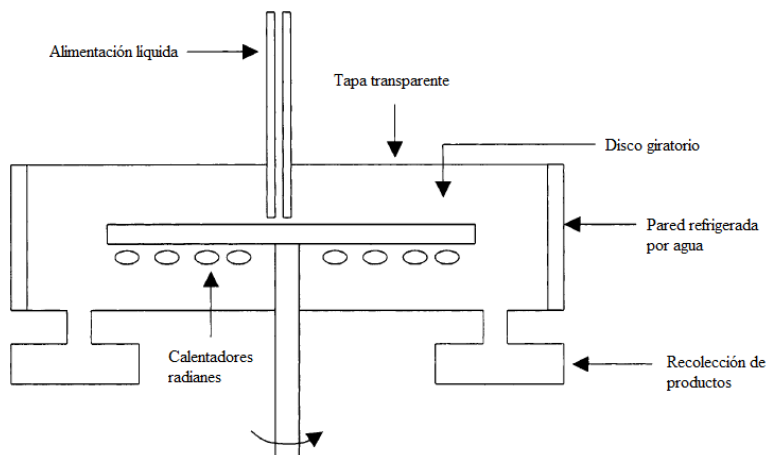


Figura 4. Representación esquemática del reactor de disco giratorio. Obtenida de Cafiero y colaboradores (2002).

Por otro lado, Farahani y colaboradores (2017) propusieron un nuevo reactor de doble disco giratorio (DSDR) el cuál consta de dos discos giratorios coaxiales de aluminio colocados horizontalmente en una cámara cilíndrica transparente de policarbonato. Una parte importante del proceso de precipitación tiene lugar en la región disponible entre los discos. Con esta configuración, los parámetros de funcionamiento del DSDR podrían ajustarse por la distancia entre los discos, la velocidad de rotación de los discos, la ubicación de la alimentación, el número de puntos de alimentación, las concentraciones de reactivos y las tasas de flujo de la alimentación. En la Figura 5, se muestra un diagrama esquemático de la configuración del DSDR.

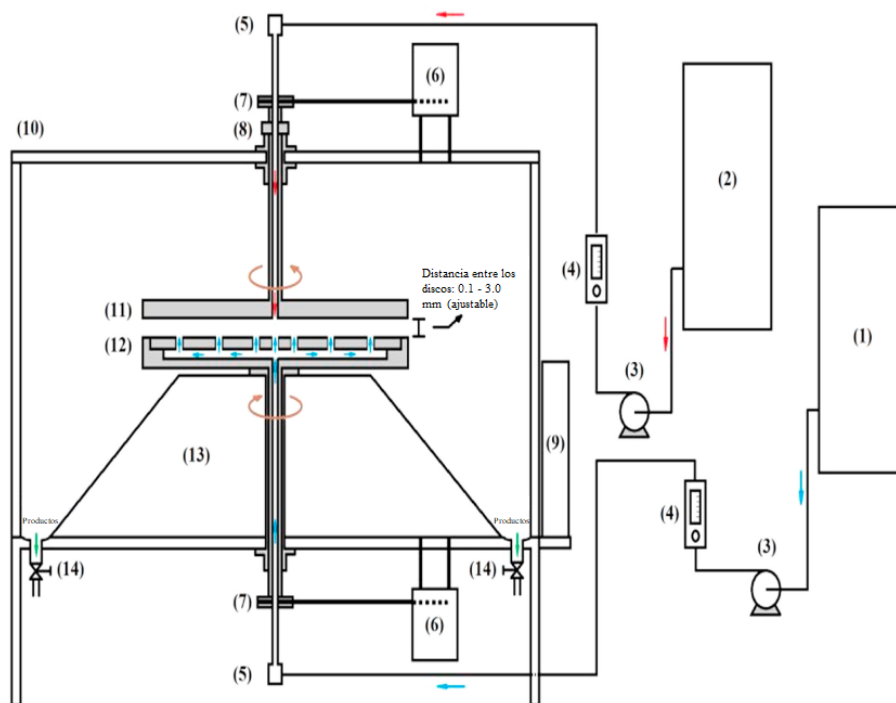


Figura 5. Diagrama esquemático del equipo experimental: (1) tanque de solución de Na_2SO_4 , (2) tanque de solución de BaCl_2 , (3) bombas peristálticas, (4) rotámetros, (5) juntas rotativas, (6) motores eléctricos de velocidad variable, (7) poleas, (8) tornillo de regulación de la distancia entre discos, (9) convertidores de frecuencia y panel de control, (10) cámara de policarbonato cilíndrica, (11) disco superior, (12) disco inferior, (13) polietileno frustum, y (14) válvulas de descarga. Obtenida de Farahani y colaboradores (2017).

3.4.3. Simulador de ensuciamiento de membranas (MFS)

Para un eficiente monitor de incrustaciones se necesitan una serie de requisitos que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Requisitos para un monitor de ensuciamiento ideal (Vrouwenvelder y col., 2006).

Requisitos	Descripción
Representativo	Condiciones idénticas a las del elemento de membrana.
Preciso y reproducible	La herramienta debe estar bien definida.
Evaluación de la pérdida de rendimiento de la membrana	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento de la caída de presión. - Disminución de flujo. - Aumento del paso de sal.

Evaluación de incrustaciones	Inspección in situ, en tiempo real y no destructiva (por ejemplo, visual y microscópicamente). Adecuado para análisis de muestras tomadas.
Fácil de usar	Fácil de manejar, simple y robusto.
Bajos costos	Una pequeña herramienta para realizar investigaciones con un mínimo de agua, productos químicos y tiempo.

El simulador de ensuciamiento de membranas (MFS, siglas en inglés) cumple con esos requisitos por lo que es una herramienta para la validación del ensuciamiento. El MFS utiliza los mismos materiales que las membranas de nanofiltración y ósmosis inversa enrollada en espiral, tiene dimensiones y comportamiento hidrodinámico similares y está equipado con una mirilla (Figura 6).

En el MFS, el ensuciamiento se puede monitorear mediante:

- A) Parámetros operativos como caída de presión,
- B) observaciones no destructivas (visuales y microscópicas) usando la ventana y
- C) análisis de cupones muestreados de la hoja de membrana en el MFS.

Las principales ventajas del simulador son la representatividad de las membranas enrolladas en espiral y el tamaño pequeño que requiere pequeñas cantidades de agua y productos químicos, lo que reduce los costos de investigación y mejora la posibilidad de probar varias unidades MFS en paralelo. Además el MFS se puede solicitar para alerta temprana, caracterización del potencial de ensuciamiento del agua de alimentación, comparación de diferentes esquemas de pretratamiento y evaluación del control de ensuciamiento aplicando diferentes productos químicos (Vrouwenvelder y col., 2006).

El MFS tiene dimensiones externas de 0,07 m x 0,30 m x 0,04 m, con una longitud de membrana efectiva de 0,20 m, y un ancho de 0,04 m. En consecuencia, el flujo de agua necesario es de 15-25 L/h y el uso de productos químicos es bajo. Está construido con dos plantillas de acero inoxidable enlazadas que contienen cupones de membrana, alimentación y espaciador de producto. La altura del canal espaciador de alimentación y el canal espaciador de producto es de 0,80 y 0,25 mm, respectivamente. El MFS está equipado con conectores para alimentación, concentrado y flujo de producto separados. Además, hay conectores para medir la presión de

alimentación y la presión diferencial (caída de presión) a lo largo del MFS tanto en el lado de alimentación como del lado del producto de la membrana. Una ventana transparente permite la realización de observaciones (microscópicas) del espaciador y la membrana durante la operación. El grosor de la ventana permite el uso de un microscopio para la detección del grosor de ensuciamiento en el rango de micrómetros.

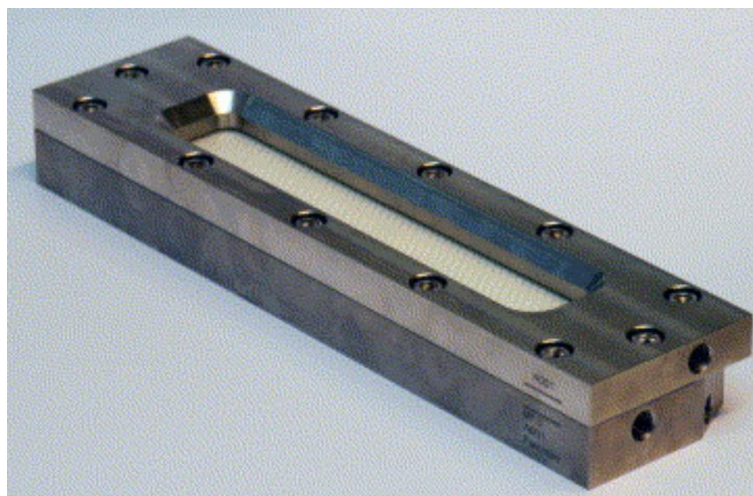


Figura 6. Vista lateral del simulador de ensuciamiento de membranas (MFS) con una ventana transparente. Obtenida de Vrouwenvelder y colaboradores (2006).

3.4.4. Tratamiento magnético (AMT)

El tratamiento magnético anticalcáreo (AMT) de aguas duras se utiliza actualmente para estudiar y prevenir la acumulación de depósitos en las paredes de los sistemas industriales. Este método físico presenta la gran ventaja de evitar el uso de productos químicos como ácidos fuertes o polifosfatos que son costosos y pueden ser dañinos para la vida humana o nocivos para el medio ambiente (Fathi y col., 2006).

Según la literatura, la eficacia del tratamiento magnético depende de numerosos parámetros. Por ejemplo, atribuir el fenómeno a las fuerzas de Lorentz ejercida sobre iones en movimiento o sobre partículas sólidas cargadas. El campo magnético (MF) podría perturbar la doble capa iónica que rodea a las partículas coloidales y su potencial zeta (Higashitani y col., 1993). Según varios autores (Higashitani y col., 1993; Barrett y Parsons, 1998), el MF tendería a reducir la tasa de nucleación y a acelerar el crecimiento de los cristales.

El dispositivo magnético que se ha utilizado en estos estudios, se ha descrito en detalle en el documento de Gabrielli y col. (2001), el cual consiste en una serie de 5 pares de imanes permanentes con caras norte y sur enfrentadas (Figura 7b). Este dispositivo se ubica en un circuito cerrado donde se hace circular agua desde un tanque de vidrio cerrado termostatzado a través de un tubo de plástico de tygon gracias a una bomba volumétrica de engranajes (Figura 7a).

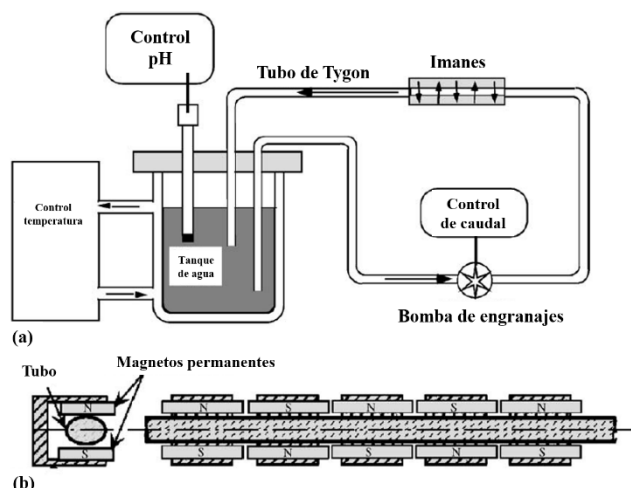


Figura 7. Esquema del montaje para el tratamiento magnético del agua en circulación. (a) Montaje y (b) disposición de imanes permanentes. Obtenida de Fathi y colaboradores (2006).

3.4.5. Modelo de condensador- evaporador

Los condensadores evaporadores de amoníaco se utilizan a menudo en la industria, especialmente en las frigoríficas y plantas dedicadas a la elaboración de frutas y verduras. La aplicación de un intercambiador de este tipo se emplea para estudiar las incrustaciones que se generan en el interior del equipo. El funcionamiento del modelo consiste en bombear vapor de refrigerante (amoníaco) con un compresor al sistema de refrigeración. El vapor condensa a presión y temperatura constante. El calor es absorbido por el aire y el agua en el lado externo de las tuberías. La aplicación de ambos medios está justificada desde el punto de vista termodinámico y económico, ya que son fáciles de conseguir. En el caso del aire no hay prácticamente ningún límite de disponibilidad, aunque desde el punto de vista termodinámico el agua es mucho más aplicable. Sin embargo, los recursos hídricos son limitados.

Szymura (2006) ha elaborado un modelo de intercambiador de calor del tipo de pulverización- evaporación con fines de prueba de estudio para incrustaciones de CaCO_3 . El modelo permite realizar una simulación de los procesos que se desarrollan en una instalación industrial. Este tipo de modelo estudia las incrustaciones que se generan en el equipo según el tiempo de funcionamiento, el cuál varía según las horas en que se dejen reaccionar las soluciones en el interior. Para tener un análisis más detallado, se pueden obtener muestras que posteriormente pueden ser estudiadas.

La Figura 8 presenta un diagrama del modelo, el cual consiste en:

1. Un tanque de agua circulante con una válvula para su drenaje parcial para realizar la eliminación de lodos,
2. un conjunto de tubos de acero que sirven como una bobina con agua en su interior y un termostato conectado al sistema de circulación de agua,
3. canales perforados que distribuyen el agua en la parte superior del intercambiador para rociar uniformemente las tuberías,
4. bomba de agua que hace circular el líquido,
5. cámara de aire para realizar el flujo de aire libre desde el fondo de los tubos hacia arriba,
6. válvula de drenaje para controlar el nivel de condensación del agua de recirculación y,
7. entrada para la corriente de aire dirigida en contra de la corriente de agua que fluye gravitacionalmente.

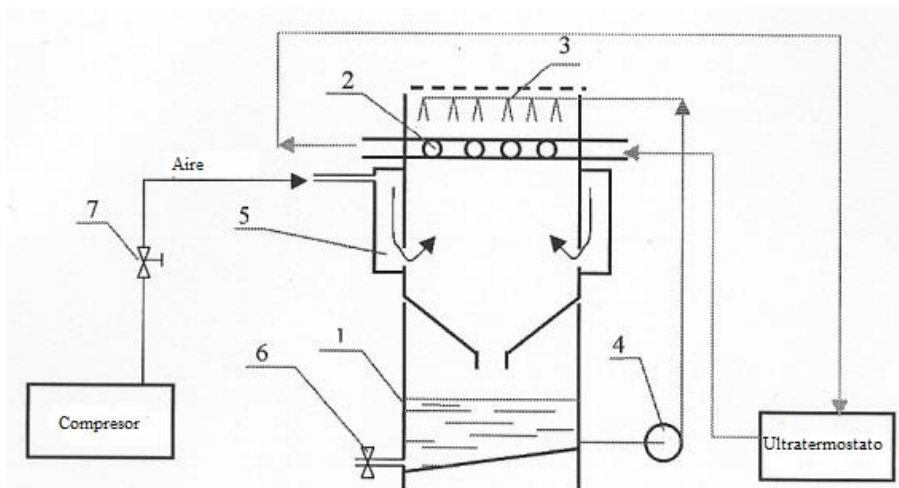


Figura 8. Modelo de un condensador evaporativo por pulverización: (1) tanque de agua, (2) serpentín de agua, (3) distribuidor de agua, (4) bomba de agua, (5) cámara de aire, (6) válvula de drenaje y (7) válvula de control con un rotámetro. Obtenida de Szymura (2006).

3.4.6. Ultrasonido

Cuando se estudian las soluciones que generan cristalización mediante ultrasonido, es probable afectar significativamente las propiedades de los productos cristalinos. La irradiación ultrasónica reduce el tiempo de inducción debido a la mejora de la mezcla a microescala y la turbulencia causada por la cavitación acústica. También, disminuye la zona metaestable esto debido a que durante la sonocristalización, las grietas llenas de gas que rodean las motas de polvo se comportan como nuevos sitios de nucleación que provocan el aumento de la tasa de nucleación. Debido a esos efectos, generalmente produce cristales más pequeños con una distribución de tamaño más estrecha en comparación con las cristalizaciones convencionales. Además, la irradiación ultrasónica puede provocar la fragmentación de los cristales existentes, provocada por colisiones de cristales o sonofragmentación (Kim y Suslick, 2018). Cabe destacar que éste método no solo sirve para estudiar las incrustaciones sino también para controlarlas.

A) Frecuencia de ultrasonido

Los cambios en las frecuencias de los ultrasonidos afectan la dinámica de las burbujas (Nalajala y Moholkar, 2011). A bajas frecuencias ultrasónicas (<100 kHz), las burbujas de cavitación experimentan ondas ultrasónicas de presión positiva y negativa durante períodos

prolongados porque las longitudes de ondas aumentan a medida que disminuyen las frecuencias. Por el contrario, las altas frecuencias ultrasónicas (>200 kHz) acortan la longitud de onda del ultrasonido y reduce la vida útil de la cavidad (Ichitsubo y col., 2004; Nii y Takayanagi, 2014).

B) Intensidades de ultrasonido

Cuando aumentan las intensidades de los ultrasonidos, el tamaño de los cristales generados disminuye. Las intensidades de sonicación aumentadas provocan una mezcla y turbulencia a microescala más vigorosas, lo que hace que los solutos se difundan más rápidamente (Nishida, 2004).

C) Tiempo de sonicación

A medida que aumenta el tiempo de sonicación, los tamaños de los cristales disminuyen y se vuelven más uniformes. Para tiempos cortos, la solución y los precipitantes no se mezclan uniformemente (Li y col., 2003). Los cristales generados a partir de la solución tienen una forma irregular y varios tamaños. Por lo tanto, el tiempo de sonicación prolongado mejora la mezcla y evita que los cristales se agreguen (Li y col., 2013; Belkacem y col., 2015).

D) Tipos de generador de ultrasonido

Existen múltiples tipos de generadores ultrasónicos que proporcionan muchas configuraciones experimentales para la sonocrystalización. Los generadores de ultrasonido suelen ser baños ultrasónicos, bocinas y transductores de placa (Figura 9).



Figura 9. Diferentes tipos de generadores de ultrasonidos: (a) baño ultrasónico, (b) bocina ultrasónica y (c) transductor de placa ultrasónica. Obtenido de Kim y Suslick (2018).

Los baños de sonicación son equipos de laboratorio estándar y se utilizan normalmente para dispersar partículas en líquidos. Estos sonicadores son de fácil acceso, pero solo están

disponibles en configuraciones por lote (Crespo y col., 2010). Las bocinas ultrasónicas también se utilizan para realizar la sonocrystalización y ofrecen configuraciones por lotes o de flujo continuo (Hatkar y Gogate, 2012; Bhoi y Sarkar, 2016). Otro tipo de generador de ultrasonido es el transductor de placa, que genera una amplia gama de frecuencias de ultrasonido. Es esencial para la sonocrystalización cuando se requieren altas frecuencias (>100 kHz). Con el transductor, se usa típicamente una configuración por lotes para la cristalización (Wohlgemuth y col., 2010).

3.4.7. Prueba de bloqueo dinámico de tubos

La prueba de bloqueo de tubos está diseñada para evaluar los inhibidores de incrustaciones en condiciones de flujo dinámico (K.A.T., 2015). Comúnmente, estos equipos están diseñados para funcionar entre 20 y 200°C y presiones de hasta 300-600 bar (4350-8700 psi) (Kelland, 2011).

Para estas pruebas, dos aguas compatibles se calientan por separado mediante bombeo a través de serpentines de precalentamiento, se mezclan y posteriormente se pasa a través de un serpentín calentado de diámetro y longitud fijos.

Se forman cristales de escamas aguas abajo del punto de mezcla y se adhieren a la tubería, reduciendo así el flujo y provocando una presión diferencial a través del serpentín. Esto luego se monitorea con respecto al tiempo para obtener una indicación de la tendencia a la formación de incrustaciones del sistema de agua.

El rendimiento del inhibidor de incrustaciones se evalúa inyectando soluciones inhibidoras de incrustaciones aguas arriba del punto de mezcla de aguas. La repetición de esta medición en un rango de inhibidor identificará la concentración mínima de inhibidor de incrustaciones en las condiciones de prueba especificadas.

Kelland (2011) realizó pruebas de bloqueo de tubos dinámicos de alta presión para determinar el efecto del hierro (divalente y trivalente), calcio, magnesio e iones de sodio en la formación de carbonato de calcio y bario en presencia y ausencia de inhibidores de incrustaciones. Utilizó un esquema que se muestra en la Figura 10, el cual consiste en tres bombas que pueden bombear fluidos hasta 10 mL por minuto a través de un microbobinado de acero inoxidable 316. Esta bobina se coloca en un horno calentado y tiene 3 m de largo

con 1 mm de diámetro interno. El inicio del crecimiento de incrustaciones y la tasa de escalamiento se mide registrando la presión diferencial a través de la bobina. Todos los datos se recogen en un PC usando el software Labview 8.0. El equipo completo se ve en la figura 11.

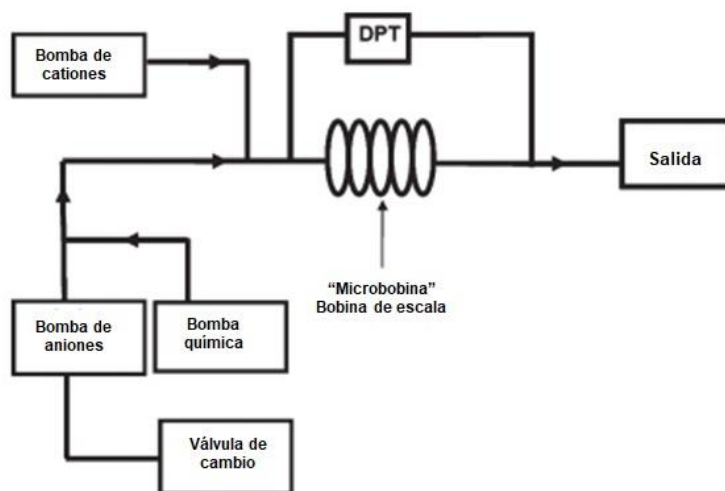


Figura 10. Esquema del equipo de bloqueo de tubos dinámicos para la prueba de inhibidores de escala. Obtenida de Kelland (2011).

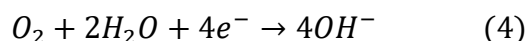


Figura 11. Equipo para la prueba de bloqueo dinámico de tubos de los inhibidores de incrustaciones. Obtenida de Kelland (2011).

3.4.8. Técnicas electroquímicas

Las principales técnicas electroquímicas son: el resonador de modo de cizallamiento de espesor (TSMR), el método del electrodo de disco giratorio y la prueba de potencial de escala conductiométrica.

El TSMR determina la estabilidad de la salmuera o agua que podría generar incrustaciones. Se basa en el uso de un sensor de masa piezoeléctrico para cambio en la frecuencia de resonancia causada por las escamas. Por otro lado, el método del electrodo de disco giratorio determina el grado de deposición de incrustaciones evaluando la reducción de la superficie activa del electrodo y el cambio en la reducción de oxígeno causado por las incrustaciones (Ecc. 4) (Rostron, 2018).



Finalmente, la prueba de potencial de escala conductiométrica proporciona información cuantitativa y de la cantidad de precipitación de incrustaciones. Mide el cambio en la resistividad específica de la salmuera analizada. Este método se utiliza para determinar el potencial de incrustación de $CaCO_3$ en salmueras de campos petrolíferos (Rostron, 2018).

3.4.9. Sensores

- A) Fibra óptica: Las fibras ópticas son fibras dieléctricas flexibles y transparentes que constan de un núcleo sólido rodeado de un material de revestimiento transparente de menor índice de refracción que guía la onda luminosa a través del núcleo. Se puede utilizar una amplia gama de longitudes de onda de fuentes de luz, desde el UV, el VIS y el IR cercano hasta el IR medio (Rostron, 2018). La Figura 12 muestra el esquema del sensor de fibra óptica. El sensor tiene una sección eliminada de la parte de revestimiento en la que la luz puede reflejarse totalmente dentro del núcleo. Cuando la cal se deposita en la superficie de la fibra expuesta parte de la luz guiada será absorbida por el cristal de la cal en lugar de reflejarse en la parte del núcleo debido al índice de refracción más alto que el del núcleo de la fibra. Por lo tanto, se produce una reducción en la radiación transmitida a través del extremo de la fibra, parte de la fibra puede

medirse y utilizarse para estimar la formación de escala (Boerkamp y col., 2013).

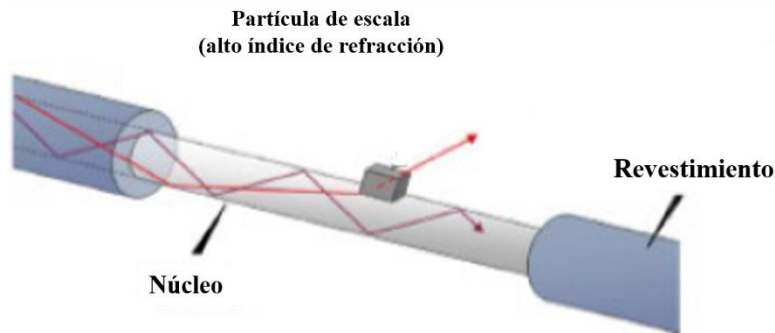


Figura 12. Sensor de fibra óptica de núcleo expuesto para la detección de incrustaciones. Obtenida de Rostron (2018).

- B) Sensor de reflectancia total atenuada (ATR): De forma similar a la fibra óptica, en un determinado ángulo cuando la luz incidente incide en la superficie de la muestra de cristal ATR se produce una reflexión total. La mayor parte de la luz incidente se refleja de nuevo en el cristal, mientras que la pequeña parte se transfiere de nuevo al medio de la muestra o a la superficie del cristal. El sensor espectroscópico medirá directamente la pérdida de energía de la luz incidente y el cambio de la refractancia del material en contacto con la superficie de la sonda. Es importante seleccionar un material de sonda para el ATR según la condición o el entorno en el que se vaya a utilizar (Smith, 2005).
- C) Sensor basado en el calor: La presencia de un depósito de cal en la pared de la tubería, genera una disminución del flujo de calor, debido a que la conductividad térmica de las incrustaciones es menor que la de las paredes de acero. El sensor mide el cambio de temperatura o la disminución del coeficiente de calor (Rostron, 2018).
- D) Otros tipos de sensores son: de conductividad térmica y de turbidez, sin embargo estos sensores no son tan efectivos ya que son fácilmente afectados por los iones de las soluciones a analizar.

3.4.10. Técnicas radiactivas

Dentro de las técnicas radiactivas se encuentran los métodos de interacción de rayos gamma: transmisión de rayos gamma y los rayos gamma de doble y triple energía, los cuáles se diferencian principalmente en qué tipos de revestimientos pueden analizar y qué cuantifican. En el caso de los rayos gamma, se utilizan Cobalto-60 para paredes gruesas o de gran diámetro y Cesio-137 para paredes finas o de grosor normal. Por otro lado, los rayos gamma de doble energía y triple energía, proporcionan mayor información como la naturaleza, cantidad, grosor y tasa de acumulación de las incrustaciones, específicamente los rayos de triple energía (Rostron, 2018).

También se utiliza el método de interacción de neutrones, que logra controlar e identificar incrustaciones. En este método, se coloca una fuente de neutrones fuera de la tubería proporcionando neutrones que pueden interactuar con los materiales dentro de la tubería. Tras esta interacción, parte de los neutrones es adsorbido por la escama y se emiten los rayos gamma característicos. La intensidad de este fotón refleja la cantidad y el grosor de la incrustación, mientras que la energía puede utilizarse para identificar el tipo de escama (Abdul-Majid y col., 1996).

Por otro lado, la técnica de inyección de trazadores consta en inyectar a las tuberías pequeñas cantidades de trazadores de tal modo que la velocidad de pulso de trazador se compara con el pulso del trazador a la entrada de la tubería lo que permite estimar la cantidad de incrustaciones. Es importante destacar que, a medida que aumenta la rugosidad de la tubería, disminuye la concentración del trazador (Rostron, 2018).

Finalmente, la técnica de atenuación nuclear puede utilizarse como técnica de detección para los depósitos de cal que tienen naturalmente componentes radiactivos. Estas técnicas son capaces de visualizar la distribución de las incrustaciones mediante la medición de la atenuación nuclear utilizando un pequeño dispositivo que es portátil y capaz de observar muchos tipos de depósitos de incrustaciones (Rostron, 2018).

3.4.11. Otras técnicas: radiografía, tomografía y tecnología “pig”

Las técnicas de radiografía utilizan radiación electromagnética de alta energía y corta longitud de onda para penetrar el material estudiado. A partir de la variación de la intensidad de la radiación emitida se puede crear una imagen radiográfica. En el caso de tomografía, se utilizan técnicas como: rayos X, reflexión total atenuada, infrarrojo por transformación de Fourier total atenuada (ATR-FTIR) y rayos gamma. Se produce un mapa de densidad exponiendo el material de interés a una fuente de radiación u ondas electromagnéticas o cualquier otro estímulo físico. Finalmente, la tecnología “pig” (Pipeline Inspection Gauge) corresponde a un dispositivo que se desplaza dentro de la tubería visualizando su interior, siendo capaz de limpiar y operar dentro de ésta (Rostron, 2018).

4. OBJETIVO(S) GENERAL(ES) Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS

4.1. Objetivo general:

Analizar los métodos de estudios de incrustaciones con el fin de proponer equipos o análisis adecuados para estudiar los depósitos minerales que se forman en las tuberías u otros equipos ya sea en industrias o laboratorios, en base a ventajas y costos asociados.

4.2. Objetivos específicos:

1. Identificar los principales métodos de control y métodos de estudios de incrustaciones mediante revisión bibliográfica.
2. Comparar los métodos de estudio respecto a las ventajas y desventajas a nivel de operación y económico a escala industrial y de laboratorio.
3. Analizar los resultados que se obtienen en distintas investigaciones respecto a los métodos de estudios de incrustaciones.

5. METODOLOGÍA.

5.1. Recursos materiales y equipamiento

Se utilizaron distintas fuentes para realizar la revisión bibliográfica, entre ellas: Web of Science (WOS), ScienceDirect, Elsevier y American Chemical Society.

En el caso de las revistas, se usaron: Desalinitation, Journal of Membrane Science, Water Research, Industrial & Engineering Chemistry Research, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, Journal of Petroleum Science and Engineering, Corrosion Science, Journal of Cleaner Production, Heliyon, Journal of Colloid and Interface Science, Crystal Growth & Design, Indian Journal of Science and Technology, entre otras.

5.2. Procedimiento

Para recopilar la información respecto a los métodos de estudios, se realizó un análisis sistematizado bibliográfico para encontrar y estudiar las características que tienen las técnicas, se hizo a través de la lectura y revisión. La información se compiló recopilando datos de condiciones, concentraciones, tipo de experimentos y detalles de los equipos, con el objetivo de categorizar los métodos de estudios de incrustaciones.

Luego se realizó una comparación para determinar las ventajas y desventajas que tienen unos métodos sobre otros con la finalidad de establecer las diferencias que hay entre ellos precisando cual es el mejor método de estudio respecto a los siguientes criterios: económico, ambiental, tiempo, cantidad de reactivos para generar soluciones incrustantes, resultados y control/estudio de incrustaciones.

Finalmente se realizó un resumen de los costos de los equipamientos o servicios de análisis. Los datos fueron obtenidos de diferentes empresas nacionales e internacionales que se dedican a comercializar estos equipos a industrias y laboratorios según los requerimientos del comprador.

De manera adicional a este estudio, se realizaron diferentes soluciones descritas en algunas investigaciones para verificar que éstas eran capaces de generar incrustaciones (Ver en la Tabla B1 del Anexo B las condiciones para producir soluciones incrustantes). Específicamente, se utilizó $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, NaHCO_3 , NaCl y Na_2SO_4 . Se realizaron las soluciones con agua potable, a presión atmosférica y a temperatura ambiente, insertando una varilla o trozo de metal de acero inoxidable, con el fin de que al pasar los días se generaran incrustaciones (en la Tabla B2 del Anexo B se encuentran las condiciones que se establecieron y modificaron para generar las soluciones).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Comparación métodos de estudios de incrustaciones

Los métodos investigados a lo largo de este trabajo, si bien logran estudiar las incrustaciones, no todos logran controlar y evitar que se produzcan los sedimentos minerales, lo que conlleva un mayor costo de mantenimiento o reposición de equipos y accesorios. Existen notorias ventajas y desventajas respecto a estos métodos, los cuáles se pueden utilizar en la industria o en el laboratorio, e inclusive en ambos. La Tabla 2 muestra una comparación respecto a las ventajas y desventajas que estos métodos poseen.

Tabla 2. Resumen de ventajas y desventajas de los métodos de estudios de incrustaciones (elaboración propia).

Método de estudio	Ventajas	Desventajas
MFS	Fácil de utilizar ya que posee visibles maneras de caracterizar las incrustaciones; económico; utiliza una cantidad limitada de agua y químicos. Puede utilizarse para cuantificar el ensuciamiento ya que es una herramienta adecuada para la predicción y control de incrustaciones.	Para estudiar el efecto de las incrustaciones biológicas, particuladas y orgánicas es necesaria una configuración de MFS en paralelo, lo que conlleva un mayor costo. Se necesita un diseño apropiado del espaciador de alimentación para mitigar las incrustaciones.
Ultrasonido	Método de control de química libre; posibilidad de ser usado con soluciones sólidas de alta suspensión.	Los estudios respecto al mecanismo de acción de la sonocristalización son incompletos. Los costos son altos en comparación de otros métodos de control.
Tratamiento magnético	El tamaño de los cristales es menor y poseen mayor cristalinidad (se genera un sistema más ordenado). De bajo costo.	En el caso del control de incrustaciones en tuberías, el material de ésta es un parámetro importante y determinante para obtener una mayor efectividad del método.

SEM/XRD	Entrega información detallada de las estructuras cristalográficas de las muestras.	No permite predecir y controlar las incrustaciones que se forman en los equipos y accesorios.
Prueba de bloqueo de tubos	Muy eficiente para evaluar inhibidores de incrustaciones; es capaz de funcionar a altas temperaturas y presiones; y fácil aplicación.	La presión hidrostática suprime la cavitación.
Modelo condensador- evaporador	El sulfato de amonio utilizado en este modelo es la sal más económica para utilizarla en instalaciones industriales.	La selección de una sal de amonio para el modelo puede provocar graves consecuencias corrosivas si es que hay sobredosis en el sistema.
SDR	Utiliza altas velocidades de transferencia y tiempos de mezcla cortos, que proporcionan un rendimiento adecuado para la síntesis de nanopartículas (alta eficiencia de micromezcla).	En comparación a un DSDR, éste último sintetiza partículas más pequeñas con un PSD más estrecho y tiene una mejor eficiencia de micromezcla, es decir, si se mejora el modelo y/o se le agrega un nuevo disco giratorio los resultados serán más óptimos.
Métodos convencionales, geoquímicos y petrográficos	Bajo costo, disponibilidad y fácil aplicación.	No identifica de manera precisa o se sobrestima la situación real de las incrustaciones. No existe gran estabilidad de las muestras en el tiempo.
Técnicas electroquímicas	Medición precisa y rápida utilizando instrumentos de pequeños tamaños.	Inexactitud en resultados en presencia de petróleo o especies disueltas (aceites, arena, etc).
Sensores	Sistemas más baratos en comparación a otras técnicas. El sensor de fibra óptica tiene la capacidad de distinguir entre cristalización en masa o en la superficie. Respecto al sensor de calor, tiene una larga vida útil y no requiere de una nueva instalación de equipos.	En el caso del ATR, no distingue tipos de incrustaciones. El sensor basado en el calor, no ha sido utilizado en presencia de petróleo ni se ha aplicado en oleoductos reales por lo que no se sabe su rendimiento real.

Técnicas radiactivas	Los sistemas tienen una alta precisión, son no intrusivos y en tiempo real.	Utilizan fuentes radiactivas. Se ven afectadas por la presencia de partículas sólidas y polvo. En el caso de la técnica de atenuación nuclear, ésta no puede detectar todos los tipos de incrustaciones.
Técnica de radiografía	Mejoras a lo largo del tiempo, en términos de fuentes y métodos de captura de imágenes.	Técnicas caras y lentas. Sólo refleja una pequeña área de la tubería. Peligro en la radiación.
Tomografía	No utiliza radiación ionizante. Entrega una rápida respuesta. No se afecta el proceso normal.	Baja resolución de la calidad de la imagen.
Tecnología “pig”	Son dispositivos biodegradables. Permite una alerta temprana de la formación de incrustaciones. No es necesario detener el proceso para utilizar el equipo, lo que conlleva una ventaja desde el punto de vista económico.	No son útiles en tuberías secas. Para el uso de limpieza, el gel que utiliza el dispositivo puede generar inutilidad en los inhibidores de corrosión.

Como se dijo anteriormente, no todos los métodos son capaces de predecir y controlar las incrustaciones, por lo que algunos tienen mayor efectividad debido a que permiten realizar ambas funciones: estudiar y controlar los depósitos que se generan. Por otro lado, el rendimiento de los métodos depende del tiempo en que se demoren éstos en entregar los resultados de la generación de los depósitos, ya que los estudios pueden ir desde minutos a días. Finalmente, hay ciertos equipos o análisis que son dañinos al medio ambiente debido a que utilizan químicos perjudiciales para el ser humano y/o la naturaleza. En la Tabla 3, se realiza un análisis comparativo de los métodos de estudios con el fin de distinguir aquellos equipos que entregan resultados más óptimos respecto a control y estudio de incrustaciones, daños al medio ambiente y tiempo en que se obtienen los resultados.

Tabla 3. Comparación de los métodos de estudios respecto al control y estudio de incrustaciones, daños al medio ambiente y tiempo en que se obtienen resultados (elaboración propia).

Métodos de estudios	Control de incrustaciones	Estudio de incrustaciones	Daños al medio ambiente	Tiempo en que se obtienen resultados
MFS	Si	Si	No genera daños ya que utiliza una baja cantidad de químicos.	En tiempo real mediante observaciones in situ, visuales y microscópicas.
Ultrasonido	Si	Si	No genera daños.	Depende de cuánto tiempo se sometan las muestras a ultrasonido. Los resultados se pueden analizar desde el comienzo del análisis.
Tratamiento magnético	Si	Si	No genera daños debido a que evita el uso de químicos nocivos.	Depende de cuánto tiempo se sometan las muestras al tratamiento magnético. Los resultados se pueden analizar desde el comienzo del análisis.
SEM/XRD	No	Si	No genera daños.	SEM: en tiempo real. XRD: ~ 2 a 3 hrs.

Prueba de bloqueo de tubos	No	Si	No genera daños, a menos que se utilicen inhibidores metálicos biocidas contaminantes del medio ambiente marino como tributilestaño (TBT), tributilina (TBT) y trefiniltina (TPT).	Se logran ver las diferencias de presión de 0 a 60 min.
Modelo condensador-enfriador	Si	Si	Si genera daños al medio ambiente ya que utiliza sales de amonio para hidrolizar la solución.	Los resultados se obtienen luego de 5 hrs de funcionamiento del modelo.
SDR	Si	Si	No genera daños.	Depende del tiempo de residencia del fluido en el reactor. Hay casos en que el tiempo de reacción va desde 2 a 20 hrs, sin embargo, eso varía respecto a las especies reaccionantes.

Métodos convencionales, geoquímicos y petrográficos	No	Si	No daños.	genera	Depende del análisis posterior. Control fuera de línea.
Técnicas electroquímicas	No	Si	No daños.	genera	En tiempo real.
Sensores	No	Si	No daños.	genera	En tiempo real de manera in situ.
Técnicas radiactivas	No	Si	Depende de las fuentes radiactivas que utilice.		En tiempo real de manera in situ.
Técnica de radiografía	No	Si	No daños.	genera	En tiempo real de manera in situ.
Tomografía	No	Si	No daños.	genera	En tiempo real de manera in situ.
Tecnología “pig”	No	Si	No daños.	genera	En tiempo real de manera in situ.
	controla incrustaciones, pero permite servicios de limpieza y operación al interior de las tuberías.				

6.2. Recopilación de resultados de los métodos de estudios

Para evaluar la efectividad que poseen los métodos de estudios de incrustaciones que más destacan debido a que son utilizados comúnmente, se recopilaron los principales resultados que se obtuvieron en investigaciones, que se encuentran de manera sintetizada en la Tabla 4, con el fin de elegir aquellos métodos que tienen un mayor rendimiento y mejores resultados.

Tabla 4. Recopilación de resultados de investigaciones de distintos autores utilizando los métodos de estudios (elaboración propia).

Método de estudio	Condiciones	Resultados	Autores
SDR	Velocidad de rotación: 100-1000 rpm. Diámetro del disco: 50 cm. PSD ~ 700 nm (500-1000 nm).	Se logran tiempos de micromezclas más pequeños que el tiempo de inducción para la precipitación de BaSO ₄ . Se sintetizan nanopartículas con tamaños medios de 700 nm.	Cafiero y col. (2002)
	Velocidad de rotación: 500-1500 rpm. Diámetro del disco: 15; 20 cm. PSD ~ 38 nm (20-130 nm).	Se lograron distintas morfologías para los cristales de BaSO ₄ logrando sintetizar nanopartículas con tamaños medios de 38 nm.	Molaei y Vafaeimanesh (2009)
	Velocidad de rotación: 100-5000 rpm. Diámetro del disco: 10 cm. PSD ~ 27 nm.	Sintetizaron nanopartículas de BaSO ₄ con tamaños medios de hasta 27 nm. Concluyen que los SDR podrían ser un equipo apropiado para la síntesis de nanopartículas debido a su alta eficiencia de micromezcla.	Jacobsen y Hinrichsen (2012)
Tratamiento magnético	Dureza del agua: 40°F. Temperatura: 30°C. Tiempo de 15 min en ausencia o presencia de campo magnético. pH de 6 a 7,5. Caudal: 0 a 0,94 dm ³ *min ⁻¹	Los tiempos de inducción tienden a disminuir al aplicar campo magnético, por lo tanto, aumenta la tasa de nucleación.	Fathi y col. (2006)
	Temperatura: 21 ± 0,2 °C. pH: 7,6 ± 0,2. Turbidez: 0,4 ± 0,1 (NTU).	La aplicación de un campo magnético de 14400 G favorece la formación de CaCO ₃ como aragonito. Al no aplicar campo magnético se obtiene principalmente calcita.	Simonic y Urbancl (2017).

	Variación de caudal: 0,5; 1,0; 2,0; 5,0 mL/min (de régimen laminar a turbulento). Campo magnético: 0; 3500; 7000; 14000 G. Tiempo de 0 a 45 min.	Concluyen que, a mayor campo magnético, mayor será el tiempo de inducción, retrasando la deposición de sales en las paredes. A medida que aumenta el campo magnético, aumentan las fuerzas de Lorentz favoreciendo la polarización de iones y evitando la incrustación de BaSO ₄ . Al aumentar la velocidad del fluido, las incrustaciones tienen lugar en tiempos más bajos.	Costa y col. (2019)
SEM/XRD	Para XRD: Temperatura ambiente. Radiación Cu-K _α . Velocidad de 0,25°min ⁻¹ . Rango angular: 10 < 2θ < 100° Para SEM: 5 kV. Aumento de 250 a 9000 veces.	Los patrones XRD y las imágenes SEM indican que el campo magnético interfiere en la disposición cristalina y la morfología de las sales de BaSO ₄ . Al aplicar campo magnético, en el SEM se ven cristales más ordenados y definidos. En el XRD se ven tamaños de cristalitas menores.	Costa y col. (2019)
	Temperatura: 295 K. Para XRD: Rango angular: 10 < 2θ < 80°. Radiación Cu-K _α . Para SEM: 15 kV.	Los resultados del XRD indican que el agua sin tratar tiene mayormente calcita. Al ser alterada por campo magnético, el polimorfo que destaca es la aragonita.	Simonici y Urbancl (2017)
	Para XRD: Radiación Cu-K _α . Velocidad de barrido: 0,04°s ⁻¹ . Para SEM: 15 kV. Barrido de 4000 a 500 cm ⁻¹ .	Al utilizar surfactantes se obtiene vaterita en forma de flor y aragonita en forma de racimo, debido a los tensioactivos. Concluyen que los cristales de CaCO ₃ , se forman por la agregación de unidades en forma de hexágono.	Chen y Nan (2011)

MFS	Caudal: 15-25 L/h. Presión: 100 kPa. Dosificador del inhibidor: 3 mg/L.	El MFS logra detectar y estudiar las incrustaciones en un tiempo más corto en comparación con el desarrollo de la caída de presión. El MFS permite estudiar los depósitos por observaciones visuales, por el aumento de la caída de presión y por el análisis de muestras extraídas (cupones).	Vrouwenveler y col. (2006)
Ultrasonido	Frecuencia ultrasónica: 20 kHz. Intensidad de ultrasonido: 0 a 20 W*cm ⁻² . Tiempo: 10; 20; 30; 45 y 60 min.	Sin sonicación se generó vaterita (forma cinéticamente favorecida). Al aumentar el tiempo o intensidad de sonicación aumenta el porcentaje de calcita (forma termodinámicamente favorecida).	Price y col. (2011)
	Frecuencia ultrasónica: 20 kHz. Amplitud de un procesador ultrasónico de 750 W, se varió de 0% (sin ultrasonido); 21%; 31%; 41%; 51% y 61%.	Al aplicar irradiación ultrasónica se concluyó que el tiempo de inducción de la sonocrystalización es más corto que el de la cristalización con agitación. Además, cuando las ondas de ultrasonido son de alta amplitud, disminuye el tiempo de inducción más que en aquellas de baja amplitud.	Guo y col. (2006)
Modelo condensador- evaporador	Temperatura: 40-60°C. pH de 7,2. Dureza del agua de alimentación: 350 mg CaCO ₃ /dm ³ para el calcio y 350 mg CaCO ₃ /dm ³ para carbonatos. Se agregan 4,25 mol/dm ³ de (NH ₄) ₂ SO ₄ .	Respecto al rendimiento del modelo, cuando la temperatura es de 40°C se forma calcita y monohidratos. Cuando la temperatura fue de 60°C se formó aragonito y monohidratos. Al agregar sulfato de amonio (para hidrolizar la solución), se forman sólo calcitas, es decir, las incrustaciones formadas de CaCO ₃ se desintegran y no se forman nuevas fases sólidas aunque se supere el límite de solubilidad.	Szymura (2006)

Prueba de bloqueo dinámico de tubos	pH: 6,5; 7,5; 8,5. Tiempo de 0 a 60 min. Concentración (mg/L): 0; 2,5; 5; 12,5; 20; 30 y 50.	Mediante este método de estudio, se evalúa el efecto del pH sobre la eficiencia del inhibidor SHMP dependiendo de los cambios en la presión diferencial. Cuando el pH era de 7,5 y 8,5 no se presentaron cambios de manera significativa, sin embargo, cuando el pH es de 6,5 se presentan cambios en la presión. Con base en la NACE 31105 (2005), un inhibidor es eficiente si la presión diferencial no alcanza 1 psi en un intervalo de 60 min, o en un tiempo correspondiente a tres veces el inicio del aumento de presión al blanco.	De Morais y col. (2020)
--	--	---	-------------------------

Respecto a la síntesis de los resultados de la tabla anterior, hay parámetros que determinan si las incrustaciones se forman más rápido o se retarda la formación. En el caso del pH, cuando se encuentra en un rango de 6,5 a 8, las incrustaciones tienden a formarse más fácilmente, sin embargo, se favorece la formación cuando se combinan con otras condiciones importantes como la temperatura, sobresaturación y la dureza de la solución. En relación a la temperatura, la mayoría de los métodos de estudios no utilizan variaciones significativas de temperaturas y se establece en un rango que va desde la temperatura ambiente hasta los 40°C. La sobresaturación y dureza de la solución, facilita la nucleación ya que al aumentar la dureza (hasta dureza moderada: 30 a 50° F (grados franceses)) y aumentar el pH, también aumenta la sobresaturación provocando incrustaciones mediante nucleación homogénea o heterogénea.

En el caso de las variantes específicas de los métodos, al utilizar tratamiento magnético se estudia que al aplicar un campo magnético de aproximadamente 14.000 G, es más factible analizar los polimorfos que se forman. Por otro lado, cuando se estudian las incrustaciones mediante ultrasonido, la frecuencia es coincidente en la mayoría de los estudios, ya que se aplica una frecuencia ultrasónica de 20 kHz. En el caso del SDR, la velocidad de rotación es un parámetro determinante al estudiar los depósitos, a medida que aumentan las revoluciones por minutos y el tamaño del diámetro del disco es menor, el PSD es más pequeño.

Finalmente, respecto a los métodos de estudios a nivel de laboratorio, se encuentran el SDR, el tratamiento magnético, SEM/XRD y el MFS. Por otro lado, a nivel industrial los equipos más adecuados son: ultrasonido, la prueba de bloqueo de tubos y modelo condensador-evaporador. En relación a los métodos de estudios que poseen resultados más óptimos se encuentra la prueba de bloqueo de tubos debido a que se puede utilizar para la evaluación de inhibidores, para la apreciación de la formación de incrustaciones y para analizar las distintas condiciones que se necesitan para generar depósitos de sales, ya sea en aplicaciones industriales como de laboratorio debido a su fácil aplicación, manejo y rapidez en la entrega de resultados. Por otro lado, el MFS es una herramienta adecuada para el estudio y predicción de incrustaciones debido a que se pueden detectar en un tiempo más corto la formación de depósitos. Cabe destacar, que es un equipo fácil de manejar y entrega resultados simples de observar e interpretar. Otro equipo que es óptimo para el estudio de incrustaciones es el SEM/XRD, ya que permite un estudio más completo de la naturaleza y morfología de las incrustaciones, permitiendo conocer los

polimorfos que las componen y las superficies de los depósitos que se generan, los resultados son visualmente claros de interpretar.

6.3. Costos equipamiento

En relación a los costos que poseen los distintos métodos de estudios de incrustaciones, estos varían según las especificaciones que se requieran en el proceso. Por ejemplo, depende del flujo que se haga pasar a través de equipo o tubería, la capacidad que se necesite procesar (volumen), la temperatura e incluso la viscosidad del producto.

En el caso del simulador de ensuciamiento de membrana, este tiene un costo aproximado de \$4.818.649, el cual es comercializado por Global Membrains. Por otro lado, para el tratamiento magnético, la empresa Enecon Chile vende un producto llamado Eneflow 1000, el cual consiste en celdas magnéticas que se utilizan para estudiar y controlar incrustaciones a nivel de laboratorio, este equipo tiene un costo de \$405.000. Para la prueba de bloqueo de tubos, los equipos son fabricados por Scaled Solutions de manera estándar, con la opción de agregar mejoras con costos adicionales dependiendo de la necesidad del cliente. El valor del equipo estándar es de \$35.200.130, el cual tiene un alto valor debido a que operan a altas presiones. El equipo estándar que fue cotizado trabaja en un rango máximo de 1000 psi y 100°C.

Sin embargo, hay equipos que poseen un costo aún más elevado, por lo que una mejor opción es contratar el servicio, el cuál varía según la muestra o el tiempo en que se someta la muestra al análisis. El servicio de análisis del equipo SEM, lo entrega la Universidad del Bío-Bío y el del XRD se puede realizar en el Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA-UDEC). Semejante a estas instituciones, la Unidad de Desarrollo Tecnológico (UDT) posee en sus instalaciones un reactor giratorio de laboratorio, el cuál lo facilitan para investigaciones cobrando según el tiempo en que se utilice el equipo. El valor es de \$60.000 por el día. En la Tabla 5, se pueden ver los precios de algunos métodos de control, las características que poseen los equipos cotizados y las empresas que lo comercializan.

Tabla 5. Resumen de los costos económicos de los equipos para estudiar incrustaciones a escala de laboratorio y/o industrial (elaboración propia).

Equipo	Componentes y/o características	Precio (en pesos chilenos)	Empresa que lo comercializa
Simulador de ensuciamiento de membrana (MFS)	1 MFS con fondo de PVC y parte superior de PMMA (canal de flujo de 40x200 mm; 1 controlador de flujo; 1 monitor de diferencia de presión (resistente al agua de mar); y 1 válvula reductora de presión.	\$4.818.649	Global Membrains
Eneflow 1000	Celdas electromagnéticas que se pueden utilizar para todo tipo de tuberías ya sea cobre, plástico, hierro galvanizado, acero y acero inoxidable de hasta 1,5 pulgadas de diámetro exterior (hasta 2 pulgadas en tubos de PVC).	\$405.000	Enecon Chile
Homogeneizador ultrasónico Cole-Parmer de 750 W con controlador de temperatura; 115 V	Equipo de ultrasonido de 750 W; frecuencia de funcionamiento de 20 kHz; tamaño mínimo y máximo de la muestra de 0,25 y 19000 mL, respectivamente. Potencia de 50/60 Hz.	\$4.983.872	Cole-Parmer
Reactor giratorio de laboratorio	Marca y modelo: Deutsch y Neumann. Capacidad: 4 litros de volumen total. Reactor rotatorio, provisto de calefactores eléctricos, manómetro, termómetro y tomamuestras.	\$60.000 por día	UDT

Condensador evaporativo amoníaco industrial	<p>Motor del ventilador: Motor siemens/weg, bajo nivel de ruido, tipo de flujo axial y ahorro de energía. Bomba de pulverización: motor siemens/weg, fácil de limpiar y clase de alta protección. Rellenos de PVC: material 100% original, larga vida útil y fácil de reemplazar. Bobina del intercambiador de calor: SS304, SS306, acero galvanizado y cobre; alta presión hasta 30 mPa.</p>	<p>\$3.551.500 \$7.103.000</p>	<p>- Heng An</p>
SEM/XRD	<p>El SEM genera una imagen que se visualiza en una pantalla de TV o es fotografiada mediante una cámara adosada al equipo. Con excelente resolución (4nm) y gran profundidad de foco (del orden de 2 micrones). Por otro lado, el XRD permite realizar análisis de identificación de fases cristalinas, semicuantificación de fases, estudios cristalográficos, entre otros.</p>	<p>SEM: \$58.487 por hora (2 UF/h) XRD: \$102.350- \$116.974 por muestra (3,5-4 UF por muestra)</p>	<p>Servicios entregados por UBB y GEA-UDEC.</p>

PRUEBA BLOQUEO TUBOS	DE DE	Sistema estándar que posee: 3 bombas HPLC, tubería de aleación 600 resistente a la corrosión, temperatura controlada mediante software durante las pruebas, transductores de presión absoluta calibrados entre 0 y 6000 psi, transductor de presión diferencial y lectura, calibrados entre 0 y 6000 psi, válvulas de control, manómetros de entrada y salida entre 0 y 6000 psi. Puesta en marcha y pruebas de presión hasta 1000 psi y 100°C.	\$35.200.130	Scaled Solutions
-------------------------------------	------------------	---	--------------	------------------

Respecto a los resultados de la verificación de las soluciones potencialmente incrustantes utilizada en estudios de otros autores, estos se encuentran en el Anexo C.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

7.1 Conclusiones

En base a los datos recopilados a lo largo de este trabajo, se puede concluir que:

Respecto a los costos de adquisición de los equipos, el Eneflow 1000 que se utiliza para tratamiento magnético es el más económico, sin embargo, se recomienda el MFS debido a que entrega mejores resultados de manera visual y microscópica, es más fácil de usar y utiliza bajas cantidades de químicos y agua, por lo que su precio es accesible al cliente. Además, el equipo se puede utilizar en estudios a nivel de laboratorio e industrial.

En relación a los resultados, como se dijo anteriormente el MFS es una buena herramienta para la predicción y control de incrustaciones pero además, la prueba de bloqueo de tubos tiene un buen rendimiento, debido a que gracias a las diferencias o caídas de presión se puede determinar si la solución a estudiar genera incrustaciones. Cabe destacar, que el equipo tiene un alto costo ya que opera a altas presiones. Este tipo de análisis se utiliza actualmente en el área petrolífera.

7.2 Recomendaciones

- Respecto a la búsqueda de soluciones incrustantes, se recomienda que si se mejoran ciertos parámetros como pH, generar una mezcla turbulenta, modificar la temperatura y utilizar un material como aluminio (éste favorece el crecimiento de incrustaciones en su superficie en comparación del acero inoxidable), se hubiese optimizado el tiempo en que se demoró la mezcla en generar los depósitos, éste hubiese sido menor obteniendo una mayor cantidad de incrustaciones y más difíciles de remover. Cabe destacar, que el tiempo es el parámetro más determinante en la formación de incrustaciones, por lo que optimizarlo, mejoraría la cristalización de los depósitos.
- Para tener un estudio más completo respecto a las incrustaciones que se generan en las tuberías u otros equipos de procesos, se recomienda realizar un análisis SEM/XRD posterior al método de estudio seleccionado por el investigador o empresa, que permite conocer la naturaleza, morfología y superficie de los depósitos, con el objetivo de comprender los parámetros determinantes en la formación de las incrustaciones como: temperatura, rugosidad, polimorfos que componen las incrustaciones, entre otros.

8. REFERENCIAS

Abdul-Majid S, Melaibari A, Malki B. Hydrocarbon scale deposits measurements by neutron moderation and capture gamma methods. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 1996; 119(3):433-7. [crossref](#).

Al-hadhrami, L. M., & A. Q. (2010). Role of solution hydrodynamics on the deposition of CaSO₄ scale on copper substrate Role the deposition of of CaSO scale Role of of solution Solution hydrodynamics Hydrodynamics on on the Deposition CaSO 4 4 Scale on on copper substrate Copper Substrate, (September).

Al-roomi, Y. M., & Hussain, K. F. (2016). Potential kinetic model for scaling and scale inhibition mechanism. *DES*, 393, 186–195. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.07.025>

Amor, M. Ben, Zgolli, D., Tlili, M. M., & Manzola, A. S. (2004). Influence of water hardness, substrate nature and temperature on heterogeneous calcium carbonate nucleation. *Desalination*, 166(1–3), 79–84. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.061>

Antony, A., How, J., Gray, S., Childress, A. E., Le-clech, P., & Leslie, G. (2011). Scale formation and control in high pressure membrane water treatment systems : A review. *Journal of Membrane Science*, 383(1–2), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.08.054>

Badruzzaman, M., Voutchkov, N., Weinrich, L., & Jacangelo, J. G. (2019). Selection of pretreatment technologies for seawater reverse osmosis plants : A review. *Desalination*, 449(May 2018), 78–91. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.10.006>

Barrett, R.A., Parsons, S.A. The influence of a magnetic fields on calcium carbonate precipitation. *Water res.*, (1998).

Behbahani, R.M., Jamialahmadi, M., Müller-Steinhagen, H. (2005). Pool boiling heat transfer to phosphoric acid solutions. *Heat Transfer Eng.*, 26, pp.26-34.

Belkacem, N.; Salem, M.A.S.; AlKhatib, H.S. Effect of ultrasound on the physico-chemical properties of poorly soluble drugs: Antisolvent sonocrystallization of ketoprofen. *Powder Technol.* 2015, 285, 16–24.

Boerkamp M, Lamb D, Lye P. An intrinsic exposed core optical fiber sensor as a quantitative surface crystallization monitoring sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2013; 177:964-9. [crossref](#).

Bogacz, W., Lemanowicz, M., Al-rashed, M. H., Nakonieczny, D., Piotrowski, T., & Wójcik, J. (2017). Impact of roughness , wettability and hydrodynamic conditions on the incrustation on stainless steel surfaces. *Applied Thermal Engineering*, 112, 352–361. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.076>

Bhoi, S.; Sarkar, D. Modelling and experimental validation of ultrasound assisted unseeded batch cooling crystallization of L-asparagine monohydrate. *Crystengcomm* 2016, 18, 4863–4874.

Busch, K.W., Busch, M.A. Laborator studies on magnetic water treatment and their relationship to a possible mechanism for scale reduction. *Desalination*, 109(2) (1997), pp. 131-148

Cafiero, L. M., Baffi, G., Chianese, A., & Jachuck, R. J. J. (2002). Process Intensification: Precipitation of Barium Sulfate Using a, 5240–5246.

Caprariis, B. De, Rita, M. Di, Stoller, M., Verdone, N., & Chianese, A. (2012). Reaction-precipitation by a spinning disc reactor : Influence of hydrodynamics on nanoparticles production. *Chemical Engineering Science*, 76, 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.03.043>

Chen, Z., & Nan, Z. (2011). Journal of Colloid and Interface Science Controlling the polymorph and morphology of CaCO₃ crystals using surfactant mixtures. *Journal of Colloid And Interface Science*, 358(2), 416–422. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.02.062>

Costa, Z. S., Meneses, C. T., Castro, B., Serpa, F. S., Franceschi, E., Borges, G. R., ... Salazar-Banda, G. R. (2019). Influence of magnetic field on barium sulfate incrustation from aqueous solutions. *Heliyon*, 5(7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02032>

Crabtree, M., & Johnson, A. (n.d.). La lucha contra las incrustaciones — Remoción y

prevención Trate de imaginar una amenaza capaz de estrangular un pozo productivo en el lapso de 24 horas .

Crespo, R.; Martins, P.M.; Gales, L.; Rocha, F.; Damas, A.M. Potential use of ultrasound to promote protein crystallization. *J. Appl. Crystallogr.* 2010, 43, 1419–1425.

Darton, E.G. (2000). Membrane chemical reseach. *Desalination*, 132, 121-131 (December 2000). [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)00141-7](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)00141-7)

De Moraes, S. C., de Lima, D. F., Ferreira, T. M., Domingos, J. B., de Souza, M. A. F., Castro, B. B., & Balaban, R. de C. (2020). Effect of pH on the efficiency of sodium hexametaphosphate as calcium carbonate scale inhibitor at high temperature and high pressure. *Desalination*, 491(April), 114548. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114548>

Esawy, M., & Malayeri, M. R. (2016). Chemical Engineering Research and Design Modeling of CaSO₄ crystallization fouling of finned tubes during nucleate pool boiling. *Chemical Engineering Research and Design*, 118, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.11.030>

Fathi, A., Mohamed, T., Claude, G., Maurin, G., & Amor, B. (2006). Effect of a magnetic water treatment on homogeneous and heterogeneous precipitation of calcium carbonate, 40, 1941–1950. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.03.013>

Fatima, S., Hashaikeh, R., & Hilal, N. (2019). Reverse osmosis pretreatment technologies and future trends : A comprehensive review. *Desalination*, 452(November 2018), 159–195. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.11.006>

Ferreux, M. Role d'un traitement magnétique sur la cristallogénèse du carbonate de calcium dans les eaux entartrantes. Ph. D. Thesis, University of Besacon, France (1992).

Flores, F.D.J. (2018). Inhibición de incrustación de sales insolubles mediante agentes anti-incrustantes (Tesis de maestría). Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

Gabrielli, C., Jaouhari, R., Maurin, G., & Keddam, M., Magnetic water treatment for scale prevention *Water Res.*, 35 (13) (2001), pp. 3249-3259

Gabrielli, C., Maurin, G., Poindessous, G. & Rosset, R. Nucleation and growth of calcium carbonate by an electrochemical scaling process. *J. Cryst, Growth*, 200 (1-2) (1999), pp. 236

Goh, P. S., Lau, W. J., Othman, M. H. D., & Ismail, A. F. (2018). Membrane fouling in desalination and its mitigation strategies. *Desalination*, 425(August 2017), 130–155. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.018>

Greenlee, L. F., Lawler, D. F., Freeman, B. D., Marrot, B., Moulin, P., & Ce, P. (2009). Reverse osmosis desalination : Water sources , technology , and today ' s challenges. *Water Research*, 43(9), 2317–2348. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.010>

Guo, Z.; Jones, A.G.; Li, N. The effect of ultrasound on the homogeneous nucleation of BaSO₄ during reactive crystallization. *Chem. Eng. Sci.* 2006, 61, 1617–1626.

Hatkar, U.N.; Gogate, P.R. Process intensification of anti-solvent crystallization of salicylic acid using ultrasonic irradiations. *Chem. Eng. Process.* 2012, 57–58, 16–24.

Henthorne, L., & Boysen, B. (2015). State-of-the-art of reverse osmosis desalination pretreatment. *DES*, 356, 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.039>

Herz, M. Malayeri, H. Müller-Steinhagen. Fouling of roughened stainless steel surfaces during convective heat transfer to aqueous solutions. *Energy Convers. Manag.*, 49 (11) (2008), pp. 3381-3386

Higashitani, K., Kage, A., Katamura, S., Imai, K. & Hatade, S., Effect of a magnetic field on the formation of CaCO₃ particles. *Journal of colloid and interface science* 156, 90-95 (1993)

Hoek, E. M. V, Allred, J., Knoell, T., & Jeong, B. (2008). Modeling the effects of fouling on full-scale reverse osmosis processes, 314, 33–49. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.01.025>

Ichitsubo, T.; Matsubara, E.; Kai, S.; Hirao, M. Ultrasound-induced crystallization around the glass transition temperature for Pd₄₀Ni₄₀P₂₀ metallic glass. *Acta Mater.* 2004, 52, 423–429.

Jachuck, R. J. J.; Ramshaw, C. Process Intensification: Heat Transfer Characteristics of Tailored Rotating Surfaces. *Heat Recovery Syst., CHP* 1994, 14 (5), 475.

Jacobsen, N.C. & Hinrichsen, O. (2012). Micromixing efficiency of a spinning disk reactor. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 51, 36, 11643-11652. <https://doi.org/10.1021/ie300411b>

K.A.T. (2015). OILFIELD SCALE. Retrieved January 19, 2021, from <http://www.kat-lab.com/scale.html>

Kelland, M. A. (2011). Effect of Various Cations on the Formation of Calcium Carbonate and Barium Sulfate Scale with and without Scale Inhibitors, 5852–5861.

Kim, H. N., & Suslick, K. S. (2018). The Effects of Ultrasound on Crystals : <https://doi.org/10.3390/cryst8070280>

Lattemann, S., Kennedy, M., Schippers, J., & Amy, G. (2010). Chapter 2 Global Desalination Situation. *Sustainability Science and Engineering*, 7-39. [https://doi.org/10.1016/S1871-2711\(09\)00202-5](https://doi.org/10.1016/S1871-2711(09)00202-5).

Lee, H., Amin, M., Baker, T., & Sarathy, S. (2020). Separation and Purification Technology A comparative study of RO membrane scale inhibitors in wastewater reclamation: Antiscalants versus pH adjustment. *Separation and Purification Technology*, 240(November 2019), 116549. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116549>

Lenka, M., & Sarkar, D. (2014). Determination of metastable zone width , induction period and primary nucleation kinetics for cooling crystallization of L -asparaginenohydrate. *Journal of Crystal Growth*, 408, 85–90. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2014.09.027>

Li, J.Q.; Bao, Y.; Wang, J.K. Effects of sonocrystallization on the crystal size distribution of cloxacillin benzathine crystals. *Chem. Eng. Technol.* 2013, 36, 1341–1346.

Li, H.; Wang, J.K.; Bao, Y.; Guo, Z.C.; Zhang, M.Y. Rapid sonocrystallization in the salting-out process. *J. Cryst. Growth* 2003, 247, 192–198.

Lungader Madsen, H.E. Influence of magnetic field on the precipitation of some inorganic salts. *J. Cryst. Growth*, 152 (1995), pp. 94-100

Matin, A., Rahman, F., & Zubair, S. M. (2019). Scaling of reverse osmosis membranes used in water desalination : Phenomena , impact , and control ; future directions, 455(December 2018), 135–157. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.12.009>

Mirzaei, M., Dehkordi, A. M., & Farahani, H. B. (2020). Chemical Engineering and Processing - Process Intensification Mixing in a novel double coaxial spinning disks reactor. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, (xxxx), 108228. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108228>

Moghadasi, J., Jamialahmadi, M., Müller-Steinhagen, H., Sharif, A., Ghalambor, A., Izadpanah, M., Motaie, E., 2003b. Scale formation in Iranian oil reservoir and production equipment during water injection. In: *Proceedings of International Symposium on Oilfield Scale: Society of Petroleum Engineers*.

Molaei Dehkordi, A. & Vafaeimanesh, A.(2009). Synthesis of barium sulfate nanoparticles using a spinning disk reactor: effects of supersaturation, disk rotation speed, free ion ratio, and disk diameter. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 48, pp. 7574-7580 <https://doi.org/10.1021/ie801799v>

Mullin, J.W. *Crystallization* (Cuarta ed.), Butterworth-Heinemann, Oxford (2001), pag.201.

NACE 0374, *Laboratory Screening Tests to Determine the Ability of Scale Inhibitors to Prevent the Precipitation of Calcium Sulfate and Calcium Carbonate from Solution for Oil and Gas Production Systems*, (2016).

Nalajala, V.S.; Moholkar, V.S. Investigations in the physical mechanism of sonocrystallization. *Ultrason. Sonochem.* 2011, 18, 345–355.

Nii, S.; Takayanagi, S. Growth and size control in anti-solvent crystallization of glycine with high frequency ultrasound. *Ultrason. Sonochem.* 2014, 21, 1182–1186.

Nishida, I. Precipitation of calcium carbonate by ultrasonic irradiation. *Ultrason. Sonochem.* 2004, 11, 423–428.

Plumber, L.N., Busenberg, E. The solubilities of calcite, aragonite and vaterite in CO₂-H₂O

solutions between 0 and 90°C, and an evaluation of the aqueous model for the system CaCO₃-CO₂-H₂O. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 46 (1982), pp. 1011-1040

Popov, K., Rudakova, G., Larchenko, V., Tusheva, M., Kamagurov, S., Dikareva, J., & Kovaleva, N. (2016). A Comparative Performance Evaluation of Some Novel (Green) and Traditional Antiscalants in Calcium Sulfate Scaling, 2016.

Price, G.J.; Mahon, M.F.; Shannon, J.; Cooper, C. Composition of calcium carbonate polymorphs precipitated using ultrasound. *Cryst. Growth Des.* 2011, 11, 39–44.

Prihasto, N., Liu, Q., & Kim, S. (2009). Pre-treatment strategies for seawater desalination by reverse osmosis system. *DES*, 249(1), 308–316. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.09.010>

Quddus, A., & Al-hadhrami, L. M. (2009). Hydrodynamically deposited CaCO₃ and CaSO₄ scales, 246, 526–533. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.09.010>

Rostron, P. (2018). Critical Review of Pipeline Scale Measurement Technologies. *Indian Journal of Science and Technology*, 11(17), 1–18. <https://doi.org/10.17485/ijst/2018/v11i17/121459>

Setta, F., & Neville, A. (2011). Efficiency assessment of inhibitors on CaCO₃ precipitation kinetics in the bulk and deposition on a stainless steel surface (316 L), 281, 340–347. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.08.021>

Simonič, M., & Urbančl, D. (2017). Alternating magnetic field influence on scaling in pump diffusers. *Journal of Cleaner Production*, 156, 445–450. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.080>

Smith JK. Real-time on-line sensing and control of mineral scale deposition from formation fluids. Google Patents. 2005; p. 1-11.

Szymura, T. (2006). Research on incrustation in a model evaporative cooler. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 40 (2006), 99-108

O.J. Vetter. Oilfield Scale—Can We Handle It? *Pet. Technol.*, 28 (12) (1976), pp. 1-402

Vazirian, M. M., Charpentier, T. V. J., de Oliveira Penna, M., & Neville, A. (2016). Surface

inorganic scale formation in oil and gas industry: As adhesion and deposition processes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 137, 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.11.005>

Vrouwenvelder, J. S., Paassen, J. A. M. Van, Wessels, L. P., Dam, A. F. Van, & Bakker, S. M. (2006). The Membrane Fouling Simulator : A practical tool for fouling prediction and control, 281, 316–324. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.03.046>

Wohlgemuth, K.; Ruether, F.; Schembecker, G. Sonocrystallization and crystallization with gassing of adipic acid. *Chem. Eng. Sci.* 2010, 65, 1016–1027.

Yu, W., Song, D., Chen, W., & Yang, H. (2020). Antiscalants in RO membrane scaling control *. *Water Research*, 183, 115985. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115985>

Zhang, P., Knötig, P., Gray, S., & Duke, M. (2015). Scale reduction and cleaning techniques during direct contact membrane distillation of seawater reverse osmosis brine. *DES*, 374, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.07.005>

Zhu, T., Wang, L., Sun, W., Wang, M., Tian, J., & Yang, Z. (2018). The role of corrosion inhibition in the mitigation of CaCO₃ scaling on steel surface. *Corrosion Science*, 140(June), 182–195. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.06.003>

9. ANEXOS

A Revisión bibliográfica (3.2.3)

Tabla 1. Técnicas y/o métodos de control de crecimiento de incrustaciones (Yu y col., 2020).

Técnicas	Observaciones	Ventajas	Desventajas	Referencias
Modificación de las características del agua de alimentación.	Uso de técnicas convencionales como: coagulación/floculación, acidificación, filtración, entre otros; y no-convencionales (basados en tecnologías de membrana) tales como microfiltración (MF), ultrafiltración (UF) y nanofiltración (NF).	Capaces de retener las sales incrustantes. Controla la bioincrustación. Fáciles de instalar y poner en funcionamiento.	Algunas técnicas forman DBP (subproductos de desinfección) cancerígenos. Altos costos económicos ya que en algunos casos se requieren nuevos equipos. Problemas de corrosión.	Fatima, Hashaikeh, y Hilal, 2019; Badruzzaman y col., 2019; Henthorne y Boysen, 2015.
Optimización de los parámetros operativos y el diseño del sistema	Se estudia la calidad del agua de alimentación y las condiciones que se aplican al sistema como la presión y flujo. Se varía la configuración de la limpieza de la membrana recuperando objetivo.	Mejoras en la superficie de la membrana debido a menor incrustación.	Daños en la membrana debido a la limpieza frecuente a altas presiones. Se utiliza un alto consumo de energía.	Antony y col., 2011; Goh y col., 2018; Henthorne y Boysen, 2015; Greenlee y col., 2009.

Adición de antiincrustantes	Estabilizar las incrustaciones retrasando el inicio de nucleación o retardando el crecimiento de cristales mediante mecanismos de inhibición como quelación, dispersión, distorsión cristalina y efecto de umbral.	las	Eficaz para inhibir incrustaciones de sales. Se utilizan en pequeñas dosis.	para	Aumento de costos operativos y ensuciamiento de membrana (contribuyen a la bioincrustación).	Antony y col., 2011; Tong y col., 2019; Greenlee y col., 2009.
------------------------------------	--	-----	---	------	--	--

B Metodología (5.2)

Tabla B1. Soluciones incrustables y condiciones utilizadas en estudios (elaboración propia).

Autores	Reactivos	Cantidad utilizada	Condiciones
Zhu y col., 2018	Salmuera A: NaCl y CaCl ₂ •2H ₂ O Salmuera B: NaHCO ₃ y NaCl	En 1L NaCl = 17,11 g (A); 17,28 g (B) CaCl ₂ •2H ₂ O = 5,28 g NaHCO ₃ = 2,56 g	Se mezclaron 250 mL de la salmuera A y 250 mL de la salmuera B preparadas con agua desionizada. El pH inicial que se utilizó fue de 6,9 ± 0,2 a temperatura ambiente.
Al-Hadharami y Quddus, 2010	CaCl ₂ •2H ₂ O y Na ₂ SO ₄	Preparación en 1L: (1) 0,03 mol/L → 4,41 g CaCl ₂ •2H ₂ O y 4,26 g Na ₂ SO ₄	Se realizaron las pruebas a 60-70°C y a presión atmosférica por 6 horas. La velocidad de rotación se estableció entre 100-2000 rpm.
Quddus y Al-Hadharami, 2009	CaCl ₂ •2H ₂ O, Na ₂ SO ₄ y NaHCO ₃	Preparaciones en 10L: (1) 0,0008 mol/L: 0,888 g de CaCl ₂ y 0,848 g de Na ₂ CO ₃ (2) 0,03 mol/L: 33,297 g CaCl ₂ y 42,612 g Na ₂ SO ₄	Los experimentos se llevaron a cabo a una temperatura de 60°C y a presión atmosférica. Se fijó una velocidad de rotación de 500 rpm.

Tabla B2. Diluciones experimentales realizadas para generar incrustaciones (elaboración propia).

Dilución	Reactivos	Condiciones aplicadas	Autores
(1) Diluida 20 veces	(1) Salmuera 0,86 g NaCl	A: Temperatura ambiente y presión atmosférica.	Zhu y col., 2018
(2) Diluida 10 veces	(1) $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Salmuera 0,86 g NaCl y 0,13 g NaHCO_3 (2) Salmuera 1,71 g NaCl y 1,06 g $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Salmuera 1,73 g NaCl y 0,26 g NaHCO_3	B: Solución en 1 L con agua potable y sin agitación.	
(1) 0,015 mol/L	(1) 2,21 g $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Temperatura ambiente y presión atmosférica.	Al-Hadharami y Quddus, 2010
(2) 0,0075 mol/L	2,1 g Na_2SO_4		
(3) 0,00375 mol/L	(2) 1,10 g $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y 1 g Na_2SO_4	Solución en 1 L con agua potable y sin agitación.	
(4) 0,001875 mol/L	(3) 0,55 g $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y 0,53 g Na_2SO_4 (4) 0,28 g $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y 0,27 g Na_2SO_4		

(1) 0,0008 mol/L	(1) 0,12 g	Temperatura	Quddus y Al-
(2) 0,015 mol/L	CaCl ₂ •2H ₂ O y	ambiente y presión	Hadharami,
(3) 0,006 mol/L	0,07 g NaHCO ₃	atmosférica.	2009
	(2) 2,21 g	Solución en 1L con	
	CaCl ₂ •2H ₂ O y	agua potable y sin	
	2,13 g Na ₂ SO ₄	agitación	
	(3) 0,88 g		
	CaCl ₂ •2H ₂ O y		
	0,85 g Na ₂ SO ₄		

C Resultados anexos a la investigación: verificación de soluciones potencialmente incrustantes (6.4)

Respecto a las soluciones incrustantes preparadas de manera adicional a la investigación, se obtuvieron variados resultados ya que algunas soluciones generaron cristales mediante nucleación homogénea y otras no generaron incrustaciones y sólo presentaron turbidez en la muestra. Sin embargo, en dos soluciones se presentaron incrustaciones fuertes mediante nucleación heterogénea.

La Figura C1 muestra las incrustaciones que se generaron al mezclar una razón 0,03 mol/L de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y Na_2SO_4 , equivalente a 4,5 g aproximadamente de cada reactivo (Al-Hadharami y Quddus, 2010). La solución se dejó reaccionar por 6 días a temperatura ambiente y presión atmosférica.

Uno de los factores que influyó principalmente en la formación de incrustaciones fue el tiempo en que se dejó reaccionar la solución ya que al no establecer otras condiciones como temperatura, pH y agitación, el crecimiento se demoró más, es decir, el tiempo de inducción fue más largo en comparación de otras soluciones incrustantes.

En el caso de la agitación, los estudios realizados por Quddus y Al-Hadharami (2009), indicaron que las incrustaciones de CaSO_4 tienden a generarse cuando la mezcla es turbulenta debido a la agitación siendo éste un importante factor hidrodinámico, esto se debe a que las especies más activas de formación de incrustaciones son adsorbidas en la superficie que finalmente se adhiere y se depositan en el sustrato. Cabe destacar, que si el material hubiese sido aluminio, se podrían haber generado más incrustaciones que en el acero inoxidable.



Figura C1. Incrustaciones de sulfato de calcio (CaSO_4)

Por otro lado, la solución basada en los estudios de Zhu y col. (2018) generaron incrustaciones débiles y mediante nucleación homogénea. En cambio al diluir 20 veces, las incrustaciones que se generaron fueron fuertes y en la superficie del metal, lo que se puede observar en la Figura C2. Esta solución se dejó reaccionar por aproximadamente 3 días a temperatura ambiente y presión atmosférica.

Respecto a los resultados obtenidos en la Figura C2, las incrustaciones no fueron generadas por la solución original por distintos factores: uno de ellos es que el pH no se reguló ya que en el estudio se especifica que se debe ajustar a $6,9 \pm 0,1$ utilizando HCl. Por otro lado, las soluciones fueron preparadas con agua potable por lo que poseía iones y eso influye en la formación de los cristales. Cabe destacar que las salmueras no se filtraron antes de mezclarlas, lo cual también puede influir en la solución incrustante.

Sin embargo, cuando se diluyó la solución 20 veces también se modificó la dureza ya que originalmente ésta tenía una dureza de 3,6 g/L (3600 mg/L) y luego de 0,18 g/L (180 mg/L) al diluirla. Según estudios de Amor y colaboradores (2004) la precipitación heterogénea de CaCO_3 aumenta cuando las durezas del agua son débiles. Dentro de sus resultados, obtuvieron que cuando la dureza era de 0,2 g/L, el porcentaje de precipitación heterogénea era de un 98%, destacando de las otras durezas que presentaron menor precipitación (0,3 g/L; 0,4 g/L; 0,5 g/L y 93%; 86% y 73%, respectivamente).



Figura C2. Incrustaciones de carbonato de calcio (CaCO_3).