**SIMPOSIO INTERNACIONAL DE QUÍMICA (SIQ)**

**El agua y los campos eléctricos y magnéticos. Actualización de los mecanismos de interacción.**

***Water and electric and magnetic fields. Update of the interaction mechanisms.***

MsC. Nuria de los Ángeles Vaillant López1, Dr. C. Guillermo Ribeaux Kindelán2, Dr. C. Fidel Gilart González2

1Universidad Tecnológica de la Habana CUJAE, Centro de Investigaciones Hidráulicas CIH, Facultad de Ingeniería Civil, Tel. 72663306, email: nuriavl@civil.cujae.edu.cu

 2Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado CNEA, Universidad de Oriente. Tel. 22601390, email: ribeaux@uo.edu.cu,

**Resumen:**

Los problemas en la industria derivados de las incrustaciones por el grado de dureza de las aguas, provocan inconvenientes como la reducción progresiva del diámetro interior de los tubos, averías en los equipos debido a sobrecalentamientos locales, aumento de la corrosión por debajo de las incrustaciones, incremento de las pérdidas de presión, reducción de la transferencia de calor, gastos de mantenimiento y descenso de la producción. Los métodos tradicionales para la eliminación de las incrustaciones se basan en lavados químicos que traen consigo grandes inversiones y daños al medio ambiente. Esto hace necesario, la implementación de nuevas tecnologías, basadas en procesos físicos como es el Tratamiento Magnético (TM), una tecnología limpia, de rápida amortización, sin consumo adicional de energía, y de fácil y sencilla aplicación, por lo que ha sido reconocida a nivel mundial desde inicios del siglo XX. Los mecanismos de acción del campo magnético con el agua son aún poco conocidos. En el presente trabajo se revisan brevemente la estructura y características físico químicas del agua y su interacción con el campo eléctrico y magnético; además del estado actual de las investigaciones acerca de los fundamentos físicos del TM del agua. Se concluye destacando que estos mecanismos de acción pueden estar basados en la influencia de los estados electrónicos a nivel molecular, la interacción con el espín de los protones y las fuerzas sobre los iones en movimiento ordenado en la solución y sobre las partículas magnéticas (Magnetohidrodinámica y cambios en el potencial Z).

**Palabras claves:** calidad del agua, dureza total, tratamiento magnético, eliminación de incrustaciones

***Abstract***

*The problems in the industry derived from the incrustations by the degree of hardness of the waters, cause disadvantages such as the progressive reduction of the inner diameter of the pipes, breakdowns in the equipment due to local overheating, increased corrosion under the incrustations, increase in pressure losses, reduction of heat transfer, maintenance costs and decrease in production. Traditional methods for scale removal are based on chemical washes that result in large investments and damage to the environment. This makes necessary the implementation of new technologies, based on physical processes such as Magnetic Treatment (MT), a clean technology, quick amortization, no additional energy consumption, and easy and simple application, which has been recognized worldwide since the beginning of the 20th century. The mechanisms of action of the magnetic field with water are still poorly understood. In the present work we briefly review what the literature covers in relation to the interaction of water with the electric and magnetic field; besides the current state of the investigations about the physical foundations of the MT of the water. It is concluded that these mechanisms of action can be based on the influence of the electronic states at the molecular level, the interaction with the spin of the protons and the forces on the ions in orderly movement in the solution and on the magnetic particles (Magnetohydrodynamics and changes in potential Z).*

***Keywords:*** *water quality, total hardness, magnetic treatment, scale removal*

# Introducción

El agua juega un papel fundamental en los procesos fisicoquímicos, biológicos y geomorfológicos de la tierra. El agua como solvente universal, cuando la encontramos en la naturaleza no es el compuesto químico H ₂O puro, sino que tiene porciones de materias extrañas en suspensión y disolución, además de organismos vivos y residuos de origen orgánico, unos beneficiosos (sodio, calcio, cloro, fósforo, azufre, magnesio, potasio, hierro, entre otras) y otras perjudiciales (sustancias radioactivas, mercurio, plomo, arsénico, pesticidas u organismos patógenos).

La concentración de sustancias disueltas en el agua varía dependiendo de la localización geográfica y la estación del año. Los iones calcio y magnesio son de los componentes químicos más importantes presentes en las aguas de consumo público y constituyen el mayor porcentaje de lo que se conoce como dureza del agua que, aunque no es un elemento de mucha importancia sanitaria, por sus implicaciones económicas y las molestias que ocasiona en la población, provoca que el ablandamiento del agua sea una de las operaciones que se realice con bastante frecuencia.

Las aguas duras producen incrustaciones y taponamiento en instalaciones, tuberías, bombas de agua, griferías, sanitarios, calentadores de agua, calderas de calefacción e incluso en teteras y cafeteras, en los agujeros de la ducha o los de la plancha. Todo esto provoca averías en electrodomésticos, estropea las resistencias, bloquea las instalaciones, aumenta los costos energéticos, y conduce a la reposición prematura de instalaciones, electrodomésticos y maquinaria en general; problemas que se pueden ver acelerados cuando la temperatura del agua es más elevada, porque el calor favorece el proceso de precipitación del carbonato cálcico.

En la literatura consultada, se habla también de la relación del consumo de aguas duras con la alimentación, **[**[**1**](#_ENREF_1)**] [**[**2**](#_ENREF_2)**] [**[**3**](#_ENREF_3)**]** con algunas enfermedades renales, **[**[**4**](#_ENREF_4)**] [**[**5**](#_ENREF_5)**] [**[**6**](#_ENREF_6)**]** cardiovasculares **[**[**7**](#_ENREF_7)**] [**[**8**](#_ENREF_8)**] [**[**9**](#_ENREF_9)**]** diferentes tipos de cáncer, **[**[**10**](#_ENREF_10)**] [**[**11**](#_ENREF_11)**] [**[**12**](#_ENREF_12)**]** de la piel **[**[**13**](#_ENREF_13)**]** y de la sangre **[**[**14**](#_ENREF_14)**]**.

Por tal motivo el agua debe someterse generalmente a una serie de procesos que la acondicionen o ablanden, con el fin de lograr una eficiencia y costos óptimos para la producción, aspectos que no se circunscriben al agua para consumo humano o industrial, sino incluso al agua de consumo animal o para el riego.

Existen varios métodos para el ablandamiento del agua, entre ellos: El proceso Cal – Carbonato (o Cal – Soda), Intercambio Iónico, Procesos de Membranas (microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y la osmosis inversa), Evaporación – Condensación, el uso de zeolitas naturales entre los más conocidos. Pero estos métodos presentan muchos inconvenientes relacionados con el alto costo de los reactivos, constante supervisión y mantenimiento, altos niveles de pre tratamiento, el manejo de sus aguas de desecho contaminantes, y hasta altos costos de inversión inicial y de operación, indistintamente.

Por esta razón, es de vital importancia, el uso de tecnologías limpias como el Tratamiento Magnético, de fácil aplicación, rápida amortización, sin consumo adicional de energía y resultados comprobados. El tratamiento magnético se ha utilizado desde mediados del siglo XX, y en la actualidad se expanden rápidamente en países industrializados (Japón y Estados Unidos fundamentalmente). En Cuba, el Centro de Electromagnetismo Aplicado (CNEA) líder del desarrollo de esta tecnología, la ha aplicado en sistemas ingenieros industriales desde 1992, en el sector agrícola desde el 2000 y en el pecuario-avícola desde el 2009. Son numerosos los ejemplos bien documentados donde el resultado como método anti-incrustante y en otros usos ha sido satisfactorio. **[**[**15**](#_ENREF_15)**] [**[**16**](#_ENREF_16)**] [**[**17**](#_ENREF_17)**] [**[**18**](#_ENREF_18)**] [**[**19**](#_ENREF_19)**] [**[**20**](#_ENREF_20)**] [**[**21**](#_ENREF_21)**] [**[**22**](#_ENREF_22)**].**

A pesar del tiempo acontecido desde las primeras instalaciones de acondicionadores magnéticos, esta tecnología no ha perdido actualidad. De forma general, no existen dudas de la efectividad del tratamiento magnético, pero si existe desconocimiento o discrepancia en la explicación del fenómeno que se observa. En el presente trabajo se revisan las teorías relacionadas con la interacción del agua con el campo eléctrico y magnético; además del resultado de las investigaciones más actualizadas acerca de los fundamentos físicos del TM del agua que permitirán acercarnos a sus posibles mecanismos de acción.

# 2.Tratamiento magnético del agua

**2.1 Antecedentes**

La observación del efecto de los campos magnéticos en el tratamiento magnético del agua es conocida desde el siglo XIX, no obstante, la actualización de esta técnica se acredita en 1945, al ingeniero belga, Theo I. S. Bermeiren **[**[**23**](#_ENREF_23)**]** que tuvo la brillante idea de utilizar el fenómeno descubierto por Michael Faraday para el tratamiento del agua industrial. En 1957 también propuso la primera aplicación práctica para el control de incrustaciones.

En Cuba se tiene referencia del uso del tratamiento magnético desde antes del triunfo de la Revolución. En la década del 90 se introduce su uso en los sistemas de intercambio de calor en todo el país, logrando su generalización.**[**[**24**](#_ENREF_24)**]**

La tecnología del tratamiento magnético del agua está respaldada por más de 350 patentes en alrededor de 15 países que la han monopolizado a partir del conocimiento y las investigaciones científicas realizadas. Pero muchas veces con ánimos comerciales, se le atribuyen al agua que ha sido tratada magnéticamente, propiedades mágicas, y abunda el uso de terminología pseudocientífica, que contribuye a que esta técnica sea tomada con escepticismo en la comunidad científica.

En la literatura científica se debate como explicar satisfactoriamente los fenómenos observados: si la causa recae sobre posibles cambios en la estructura del agua en sí misma, o a la influencia de las impurezas presentes en ella, e incluso, si depende del material de la tubería por donde corre el fluido.

El tratamiento magnético (TM) consiste en hacer pasar un fluido a determinada velocidad, por una distribución espacial determinada de un campo magnético (CM), producida en general por imanes permanentes. El efecto fundamental observado con el TM al agua, es la reducción de las incrustaciones de sales e incluso la disolución de las mismas (fundamentalmente carbonatos de calcio y magnesio) en las paredes de tuberías de abasto de agua e intercambiadores de calor.

Está bien establecido por todos los estudios realizados, que se observa la aceleración de la formación de cristales del tipo aragonita en la misma medida en que se intensifica la inducción del campo magnético al que se somete el agua; y en ausencia del mismo, los cristales formados eran del tipo calcita. **[**[**25**](#_ENREF_25)**] [**[**26**](#_ENREF_26)**]**



Figura 1. Cristales de calcita y aragonito fuente [[15](#_ENREF_15)]

Cuando el agua circula por el campo magnético creado por los acondicionadores, sobre los iones de las sales que están disueltos en el agua, inciden las líneas del campo magnético, surgiendo fuerzas que los mueven de su posición de equilibrio y, se dice que el agua modifica algunas propiedades físico-químicas como, el pH, la solubilidad, la susceptibilidad magnética, la conductividad eléctrica y la velocidad de cristalización, entre otras.

**2.2** **Efectos del campo magnético sobre la cristalización del carbonato de calcio disuelto en agua**

Es conocido que el CaCO3, una de las sales incrustantes posee 3 variedades morfológicas: calcita, aragonita y vaterita y que esta última es raramente encontrada. La calcita es un tipo de cristal que al precipitar se adhiere a las superficies de transferencia de calor como incrustación de difícil remoción, pero la aragonita precipita como partículas suspendidas en el agua y se adhiere poco sobre dichas superficies, formando granos de menor tamaño o depósitos de una incrustación suave, estable con la temperatura.

Según E.J. Florestano y colaboradores [**29**], la aragonita es una forma de cristalización metaestable del CaCO3 que se transforma en calcita, una forma más estable, en un tiempo de vida media de 24 horas. Pero cuando el pH de la solución es mayor de 9, la transformación ocurre muy rápido y puede ser completada en una hora. En las calderas, donde se opera a presiones mayores de 200 lb/pulg2 y temperaturas por encima de 195 0C, el tratamiento magnético no ha dado resultados satisfactorios probablemente porque la aragonita se descompone muy velozmente.

Coey y Cass **[**[**27**](#_ENREF_27)**]** reportan el aumento de la proporción de cristales del tipo aragonita respecto al tipo calcita (A/C) definiendo que es máximo (algo más del 50%) cerca de las 40 horas después del tratamiento magnético. En este experimento, la cristalización del CaCO3 que se obtiene por evaporación del agua a 80ºC permanece si se reposa el agua después del tratamiento hasta 200 horas. También se varió la velocidad del agua desde 0.04 m/s hasta 1.2 m/s y según los autores no se encontró una clara correlación entre velocidad y la relación calcita/aragonita después de la evaporación del agua.

Entre 2001 y 2008 Kobe y colaboradores **[**[**28-31**](#_ENREF_28)**]** preparan una solución de 300 ppm de CaCO3 a partir de agua pura. Aplicaron campo magnético desde 0.4 hasta 1.3 T y la velocidad del agua fue fijada a 0.1 m/s. Se utilizó un método de precipitación de los cristales de CaCO3 por vía química y no por calentamiento del agua, recogiéndose los cristales por filtración de las soluciones. Mediante DRX y Microscopía electrónica de transmisión prueban que con el TM se forman fundamentalmente aragonita y vaterita. También se demuestra que los cambios en cristalización dependen de la magnitud de la inducción magnética utilizada en el TM.

Ko Higashitani y col. **[**[**32**](#_ENREF_32)**]** observaron, que a partir de CaCl2 y Na2CO3 a 30º C, se aceleraba la formación de cristales del tipo aragonita en la misma medida que se intensificaba la inducción del campo magnético a la que se sometían las sustancias reaccionantes; y en ausencia del mismo, los cristales formados eran del tipo calcita.

Y. Wang y col. **[**[**33**](#_ENREF_33)**]** indagaron en la cristalización del CaCO3, a partir de CaCl2 y Na2CO3 a 30º C, bajo la influencia del campo magnético, y observaron que los cristales formados, después de agitar las sustancias reaccionantes por 1 min., tenían formas rómbicas y esféricas. Los primeros son calcita y los últimos podrían ser vaterita. El tamaño del grano fue de 5 a 10 μm. Pero, en presencia del campo magnético, la mayoría de los cristales tenían formas irregulares (aragonita) y su diámetro (1 μm) era muy pequeño para identificar su estructura por microscopía óptica. Ellos asocian que este pequeño tamaño de partícula se deba a la rápida nucleación y precipitación de los cristales.

En el 2001 Gabrielli y colaboradores **[**[**34**](#_ENREF_34)**]** estudian el problema pero desde una aproximación electroquímica. Miden, con un electrodo selectivo de Ca2+, la cantidad de calcio iónico después del TM y la deposición electroquímica del CaCO3 en un electrodo, mediante una sensible balanza de cuarzo. Esta da la cantidad de CaCO3 depositado en función del tiempo. La idea es que, si el TM promueve la cristalización del CaCO3 disuelto, la cantidad de Calcio iónico debe disminuir después de realizado este y la capacidad de esta agua, que ha perdido calcio iónico, para depositar CaCO3 en la interfase agua metal, debe disminuir. Los autores también encuentran mayor efecto en la disminución del calcio iónico cuando hay mayor gradiente de campo.

### 2.3 Mecanismos de interacción

Teniendo en cuenta que existen diversas teorías que intentan explicar el efecto del TM sobre el agua, y que a pesar de los años transcurridos desde que se iniciara el uso del TM para eliminar las incrustaciones en las tuberías, el tema no ha perdido vigencia; los autores han realizado una revisión y actualización de las investigaciones acerca de los fundamentos físicos del TM del agua.

Para una mejor comprensión, se ha dado un orden a las mismas, teniendo en cuenta sus aspectos fundamentales, respetando a sus autores y sin analizarlos críticamente. La intención de este trabajo es exponer cada una de esas hipótesis mostrando la variedad de criterios al respecto.

* + 1. **Magnetohidrodinámica.**

**Presencia de coloides.**

Krylov y col.**[**[**35**](#_ENREF_35)**]** descubrieron que la sobresaturación del CaCO3 y la presencia de partículas dispersas de CaCO3 son condiciones necesarias para un tratamiento magnético exitoso. También observaron que se incrementa la velocidad de coagulación de dichas partículas con el aumento de la inducción del campo y de la velocidad del flujo de la dispersión a través del campo magnético.

**Nano burbujas gaseosas**

M. Colic y col. **[**[**36**](#_ENREF_36)**]** proponen un modelo para explicar la memoria del TM mediante las alteraciones que produce el TM en la interfase gas / liquido en el seno del agua, basándose en que gases disueltos en el agua como el CO2, promueve variaciones en la estructura del agua, en dependencia de su cantidad disuelta en el agua, en la magnitud del efecto del TM. Proponen que el efecto del TM probablemente ocurre debido a la formación o existencia de nano burbujas en el agua. Los autores reconocen el carácter especulativo de su propuesta que incluye el cambio de la estructura del agua en la interfase gas líquido y en el propio seno de la misma.

**Potencial electrocinético y magnetohidrodinámica.**

El principio general de operación de la tecnología del tratamiento magnético, para inhibir la formación de incrustaciones es el resultado de colisiones debido a la presencia de la Fuerza de Lorentz, entre el campo magnético y las partículas cargadas que se mueven en su área de incidencia.**[**[**37**](#_ENREF_37)**] [**[**38**](#_ENREF_38)**] [**[**35**](#_ENREF_35)**]**

Cuando los iones pasan a través del campo magnético aparece una fuerza que actúa sobre ellos, de lo que resulta que los iones con carga positiva (calcio y magnesio, entre otros) y los iones cargados negativamente (principalmente, carbonato y sulfato) se dirigen al encuentro los unos de los otros, consiguiéndose un incremento en la velocidad de los mismos y por consiguiente un aumento en la frecuencia de las colisiones, formándose un compuesto insoluble. Este proceso será más eficiente mientras mayor sea la dureza del agua, porque habrá mayor número de iones presentes en la solución. También a mayor temperatura, menor solubilidad, por tanto, en corrientes térmicamente inducidas, es más probable que los iones colisionen en las proximidades de la superficie, donde habrá mayor proceso de crecimiento de cristales.

Por esta razón los acondicionadores se instalan en las áreas de temperaturas más bajas, así, al formarse las partículas insolubles, éstas no se adhieren cuando llegan a las superficies del intercambiador de calor ya que los cristales formados, bajo estas condiciones, no son incrustantes y precipitan en el seno de la solución.**[**[**39**](#_ENREF_39)**]**

K. W. Busch y col. **[**[**38**](#_ENREF_38)**]** y M.R. Powell **[**[**40**](#_ENREF_40)**]** midieron indistintamente las incrustaciones formadas por la destilación de agua dura previamente preparada, con y sin tratamiento magnético previo, y se observó una reducción del 22% en la formación de incrustaciones cuando se usó el acondicionamiento magnético del agua. En otro experimento paralelo, pero sin generar campo magnético, se obtuvo disminución de un 17% de incrustaciones. Ellos especulan que la turbulencia del fluido creada por las piezas polares dentro del dispositivo puede ser la causa principal de este cambio, dejando el 5% restante para la acción del campo magnético sobre las sales presentes.

Steve Lower **[**[**41**](#_ENREF_41)**]** asegura sin embargo que lo anterior solo se cumple en el vacío. En soluciones, los iones se encuentran demasiado hidratados por las moléculas de agua atadas a ellos y, muy bien “enjaulados” por los enlaces de hidrógeno que les rodean para que ocurra cualquier desviación de su trayectoria debido a su paso por el imán. Plantea también que los iones con cargas contrarias van al encuentro unos a otros por los movimientos térmicos aleatorios y forman pares iónicos complejos como el CaCO3 el cual puede existir indefinidamente como una entidad estable sin precipitar.

Krilov y col. **[**[**35**](#_ENREF_35)**]** consideran que la fuerza de Lorentz aplicada a los iones presentes en la solución es despreciable en comparación con la fuerza provocada por el movimiento térmico de los iones debido a la pequeña carga de los mismos. Para que el efecto fuera apreciable el desplazamiento iónico de Lorentz debiera ser comparable con la longitud de difusión media durante el tiempo de retención. Esta interacción es, sin embargo, mucho mayor con las partículas dispersas las cuales están cargadas en toda su superficie y sí podría ocurrir entonces algún efecto.

Lipus y colaboradores **[**[**37**](#_ENREF_37)**]** y Coetzee **[**[**42**](#_ENREF_42)**]** siguiendo este mismo principio de la magnetohidrodinámica plantean que el efecto recae sobre las impurezas dispersas siempre presentes en el agua.

J. M. D Coey y col. **[**[**27**](#_ENREF_27)**]** creen que por una analogía con el efecto Hall, esta fuerza puede modificar la concentración local de iones, pero solo en el rango micromolar, lo que es tres órdenes inferiores a la concentración de calcio en un agua tratada.

Kenneth W. Busch y colaboradores **[**[**43**](#_ENREF_43)**]** asumen que la corriente inducida retorna por la tubería metálica y produce cambios locales de pH, cerca de la superficie de la tubería que pudieran explicar los cambios en la cristalización del Ca.

S. Kobe y colaboradores **[**[**31**](#_ENREF_31)**]** propusieron un mecanismo basado en la ideas de Landau, donde la turbulencia en un fluido conductor puede proporcionar fluctuaciones bastante grandes del campo magnético en el interior del fluido. La propuesta de estos autores es que el TM puede cambiar el patrón de fluctuaciones a favor de que se produzcan campos locales de 45 T que es lo que se necesitaría para producir por vía magnética una variación de energía libre que explique el cambio de calcita a aragonita.

Teniendo en cuenta los experimentos de E.J. Florestano y colaboradores**, [**[**44**](#_ENREF_44)**]** y K.J.Kronemberg **[**[**45**](#_ENREF_45)**]** quizás la fuerza de Lorentz actuando de algún modo sobre los iones que conforman el cristal en su superficie de crecimiento, cause modificaciones en los gérmenes cristalinos lo cual podría explicar el cambio morfológico de calcita a aragonita en la cristalización del CaCO3.

**Diamagnetismo**

Según Crites and Stephenson **[**[**46**](#_ENREF_46)**]** la mayoría de los sólidos que forman incrustaciones son diamagnéticos y este tipo de sustancias no poseen un momento magnético permanente, por lo que pueden perder su polaridad debido a cambios macroscópicos como la variación de la temperatura y la presión. Cuando ellas no están sometidas al campo magnético, pierden la posibilidad de repelerse entre sí y se agrupan formando enjambres, los cuales llegan a ser tan grandes que no se pueden mantener suspendidos en el fluido y precipitan formando incrustaciones. Si estas sustancias se someten a la acción del campo magnético, adquirirán la polaridad del campo (polarización inducida) y se repelerán entre sí, suprimiendo la posibilidad de agruparse y, por consiguiente, manteniéndose suspendidas en el fluido. Como resultado de esta interacción, se elimina la posterior formación de incrustaciones y la ya existente.

**Tensión superficial**

En las páginas web de MAG-SOL **[**[**47**](#_ENREF_47)**]** y Operation of the Care Free Water Conditioner **[**[**48**](#_ENREF_48)**]** se plantea que el agua bajo el efecto del campo magnético disminuye su tensión superficial, debido a que la fuerza de cohesión entre sus moléculas hace que su superficie se comporte como una película delgada y elástica. Las moléculas que se encuentran debajo de la superficie están sometidas a esta interacción en todas las direcciones, pero las que se encuentran en la superficie son atraídas solamente por las que están debajo y a los lados. Esta atracción crea un constante estirón de las moléculas superficiales.

Todas las aguas se encuentran tensadas en su superficie, lo cual interfiere con su habilidad para limpiar (p.e: las superficies intercambiadoras de calor). El agua que tenga una menor tensión superficial será más humectante; o sea, sus moléculas se dispersarán con mayor facilidad, alejándose las unas de las otras e incrementándose la posibilidad de limpiar los minerales incrustados. **[**[**39**](#_ENREF_39)**]**

El agua dura mostrará una tensión superficial mayor que el agua blanda por su alto contenido de minerales. Así, las moléculas de la superficie ya no sólo sentirán la atracción de sus vecinas, sino que también, bajo ciertas condiciones mencionadas arriba, la presión de los enjambres o agrupaciones de moléculas de las sales minerales las cuales tratarán de atravesar la misma para solidificarse sobre las superficies de intercambio de calor. Sin embargo, el uso de TM servirá para reducir la tensión superficial del agua al romper los enjambres de moléculas diamagnéticas y convertirlos en sustancias iónicamente disueltas orientadas magnéticamente, dejando libre la superficie del agua de la presencia de minerales y haciendo que la misma sea más humectante. Además, los minerales, en este nuevo estado, son incapaces de precipitar como incrustación de difícil remoción. De la misma manera, se disolverá paulatinamente aquella incrustación que ya esté formada. **[**[**39**](#_ENREF_39)**]**

El profesor K. W. Busch, de la Universidad de Baylor, Texas, presentó un trabajo en el que se indicó un mecanismo verosímil, basado en principios sólidos de la inducción electromagnética y la magnetohidrodinámica, pero planteó fundamentalmente que: “puede haber todo un manojo de efectos ocurriendo a la vez”.

* + 1. **Otras hipótesis**

**Efectos de los campos eléctricos intensos sobre los enlaces por puentes de hidrógeno.**

Se ha reportado que los campos eléctricos de intensidad ~105 V/m debilitan a los enlaces de hidrógeno entre las moléculas de agua, siendo capaces de destruirlos bajo determinadas condiciones. En particular los campos eléctricos con intensidad ~109 V/mdisminuyen la constante dieléctrica del agua, destruyendo parcial o completamente la red de enlaces de hidrógeno, y afectan los puentes de hidrógeno de una manera anisótropa, fortaleciendo los enlaces de hidrógeno paralelos y debilitando los ortogonales.**[**[**49**](#_ENREF_49)**] [**[**50**](#_ENREF_50)**]**

**Espín del protón.**

En el trabajo deH. E. Lundager Madsen **[**[**51**](#_ENREF_51)**]** se presenta una hipótesis cualitativa basada en la influencia del campo magnético sobre el espín de los hidronios. Estos intervienen en la reacción de formacióndel CaCO3 y la orientación del espín podría influir en la velocidad de la reacción. Los autores dan el argumento adicional de que el tiempo de relajación de los estados del espín del hidrógeno en el agua puede ser de varios segundos.

**Influencia del material de la tubería en el tratamiento magnético del agua**

Al aplicar el tratamiento magnético haciendo pasar el líquido repetidamente por la tubería, Gabrielli y colaboradores **[**[**34**](#_ENREF_34)**]** encontraron resultados diferentes utilizando tuberías de acero inoxidable, cobre y dos diferentes tipos de cloruro de vinilo (uno transparente y flexible y el otro rígido y opaco, de los usados en plomería).

Aparecen reducciones del contenido de Ca2+ de un 28% para el acero y el cobre, mientras que para el PVC duro fue de 18% y prácticamente cero para el PVC blando. Explican el fenómeno a partir de la existencia de potenciales de flujo en la tubería que dependen de la velocidad y de la perturbación del perfil de flujo a aplicar el campo magnético.

El efecto combinado podría hacer variar la distribución de carga de las cercanías de las superficies de contacto, alterando el equilibrio iónico local en las paredes y generando núcleos por precipitación. La aparición de núcleos sólidos en las paredes formaría semillas que facilitarían el crecimiento posterior de las partículas del carbonato. Como el potencial depende tanto de la velocidad como del material de la tubería, esto podría explicar las diferencias que se observan cuando varía el material de la tubería.

El profesor Donaldson de la Universidad de Brunel y Ko. Higashitani de la Universidad de Kyoto estuvieron de acuerdo en que el efecto principal podría estar en las superficies del sistema. Sin embargo, el primero estuvo a favor de un escenario de redistribución de las cargas mientras que el segundo se pronunció por cambios semipermanentes en la naturaleza del agua adsorbida.

El profesor Paul Cotzee, RAU, Sudáfrica, **[**[**42**](#_ENREF_42)**]** ha encontrado una correlación positiva entre el régimen de liberación de zinc por parte de la tubería y la efectividad del acondicionador.

Como se ha visto, son varios los mecanismos propuestos. Pero ninguno es totalmente comprensivo y tampoco puede responder a todos los efectos. En los primeros trabajos de los pioneros en la temática, se sustentaba la idea de la ocurrencia de cambios en la estructura del agua como resultado de la exposición al campo magnético. Sin embargo, esta hipótesis ha sido ampliamente refutada en trabajos posteriores.

En trabajos más recientes se proponen modelos que soportan la teoría de un incremento de la nucleación en el seno de la solución, pero, científicos europeos, sobre la base actual de la teoría de cristalización, han concluido que cualquier efecto sobre la nucleación heterogénea tendría un tiempo de relajación de nanosegundos y que sería improbable algún efecto sobre la nucleación aún después de la exposición a un campo relativamente fuerte (5000 gauss).

Muchos creen que la razón por la que aparece una incrustación suave resulta solamente por cambios magnéticamente inducidos en el cristal (p.e: de calcita a aragonita). Sin embargo, esto es también improbable ya que muchos otros factores (especialmente la presencia de contaminantes, el calor o la presión) influyen en la forma de cristalización del carbonato de calcio. Además, la aragonita ha probado ser un depósito problemático ya que cristaliza a temperaturas y presiones bajas. También se plantea **[**[**42**](#_ENREF_42)**]** la influencia de contaminantes (Fe 2+ y Zn 2+) introducidos en el proceso de corrosión inducida por el tratamiento magnético o por una lenta liberación de éstos desde la superficie del acondicionador.

# 3. Conclusiones

El siguiente trabajo constituye una actualización en el estudio de los mecanismos de interacción del agua con los campos magnéticos. Teniendo en cuenta las observaciones experimentales realizadas por varios estudios sobre este tema, los autores han definido los siguientes hechos: El TM altera la cristalización del calcio iónico disuelto en el agua, induciendo a la formación de cristales fundamentalmente de aragonita; el efecto del TM depende de la intensidad y del gradiente del campo aplicado; los efectos del TM parecen depender de la velocidad y turbulencia del fluido a través de este, los efectos perduran horas después de realizado el TM. (memoria).

Para tratar de explicar los efectos del tratamiento magnético en el agua se definen como mecanismos de interacción más probables: la influencia en los estados electrónicos a nivel molecular, interacción con el espín de los protones, y fuerzas sobre los iones en movimiento ordenado en la solución y sobre las partículas magnéticas (Magnetohidrodinámica y cambios en el potencial Z).

**4. Referencias bibliográficas**

1. Haring B. Changes in the mineral Composition of food as a result of cooking in hard and soft waters, in National Institute for Water Supply. 1981: The Netherlands. p. 33-35

2. Kozisek F. Health significance of drinking water calcium and magnesium. 2003.

3. Castro R. Evaluación del crecimiento de alevines de tres especies de Tilapia (Oreochromis sp.) en aguas duras en la región de Cañada, Oaxaca, México. AquaTIC, 2004. 20: p. 38-43.

4. Schwartz B. Calcium nephrolithiasis: effect of water hardness on urinary electrolytes. Urology, 2002. 60: p. 23-27.

5. Mora D. et al. Cálculo en las vías urinarias y su relación con el consumo de calcio en el agua bebida en Costa Rica. 2000: San José. Costa Rica.

6. Medina E, Real E, Orozco S. Prevalencia y factores de riesgo en Yucatán, México, para litiasis urinaria. Salud Pública México, 2003. 44 (6): p. 541-545.

7. Monarca S. Donato F. Drinking-water hardness and cardiovascular diseases: A review of epidemiological studies, in World Health Organization (WHO). 2004. p. 1979-2004.

8. MINSAL, M.D.S. Documento Excel “Base de datos de muertes cardiovasculares por comunas. Chile. Editor. 2004.

9. Nerbrand C. et al. The influence of calcium and magnesium in drinking water and diet on cardiovascular risk factors in individuals living in hard and soft water areas with differences in cardiovascular mortality. BMC Public Health, 2003. 3.

10. Yang C. et al. Pancreatic cancer mortality and total hardness in Taiwan’s drinking water. J. Toxicol. Environ. Health, 1999. 56(361-369).

11. YANG, C. et al Calcium and magnesium in drinking water and the risk of death from breast cancer. J Toxicol Environ Health, 2000. 60: p. 231-241.

12. YANG C, et al. Calcium and magnesium in drinking water and risk of death from prostate cancer. J Toxicol Environ Health, 2000. 60: p. 17-26.

13. Neira, M. Dureza en aguas de consumo humano y uso industrial, impactos y medidas de mitigación. Estudio de caso: Chile., in Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. 2016, Universidad de Chile: Santiago de Chile.

14. Cañas Pérez, R. Evaluación del riesgo de metahemoglobinemia en lactantes por exposiciones a nitratos a través del agua de consumo., in Agua y Salud. Serie Salud Ambiental. 1992, INHEM La Habana.

15. Gálvez Vidaurre, C. Uso del desincrustante magnético (DM) para mejorar la calidad del agua en la industria in Ingeniería Industrial 2010, Skynet Environmental Perú. p. 139-154.

16. Espinoza, M.A. Tecnología del Tratamiento Magnético del Agua. 2019.

17. Arias Gilart, F. et al. Efecto de un campo magnético estático en la tensión superficial del diésel y su atomización. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. 2018. p. 25-34.

18. Arias Gilart, F. et al. Disminución de las emisiones de monóxido de carbono con el tratamiento magnético del combustible. Centro Azúcar 2018. p. 21-31.

19. Campo Sofia, M. et al. Tratamiento magnético sobre parámetros físico-químicos de muestras de petróleo, in Tecnología Química. 2015, Facultad de Ingeniería Química. Universidad de Oriente: Santiago de Cuba, Cuba.

20. Kindelán, G. Efecto de un campo magnético estático sobre la cristalización de la sacarosa en solución in Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado 2011, Universidad de Oriente: Santiago de Cuba

21. Insua A. et al. Efecto del agua tratada magnéticamente sobre los procesos biológicos in REDVET. Revista electrónica de Veterinaria. 2009.

22. Zavaleta M, Rivas E, Mendoza A, Tinoco S. Efecto de campo magnético en el tratamiento de aguas duras., in TECNIA. 1998, Universidad Nacional de Ingeniería: Lima. Perú. p. 69-76.

23. Vermeiren, T. Magnetic treatment of liquids for scale and corrosion prevention. Anti-Corrosion Methods and Materials. Vol. 5 Iss: 7. 1958.

24. Anuario Azucarero de Cuba. 1953.

25. Higachitani, K. et al. Effects of Magnetic Field on the formation of CaCO3 Particles, Colloids and Interface. 156: p. 90-95.

26. Parsons, S. Overview of Recent Magnetic Treatment Research at Cranfield University, in MAG-3. 1999, Cranfield University Press.

27. Coey, J. Cass, S. Magnetic Water Treatment. Journal of Magnetism and Magnetic materials 2000. 209(1-3): p. 71-74.

28. Cefalas A. Kobe, S. et al. Nanocrystallization of CaCO3 at solid/liquid interfaces in magnetic field: A quantum approach. Applied Surface Science, 2008. 254.

29. Kobe, S. et al. The influence of the magnetic field on the crystallisation form of calcium carbonate and the testing of a magnetic water-treatment device, in Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2001. p. pags 71-76.

30. Kobe, S. et al. Control over nanocrystalization in turbulent flow in the presence of magnetic fields. Materials Science and Engineering, 2003. 23.

31. S. Kobe, Cefalas, E. et al. Nucleation and crystallization of CaCO3 in applied magnetic fields. Crystal Engineering 2002. 5: p. 243-253.

32. Higashitani K. et al. Effects of a magnetic field on the formation of CaCO3 particles, in J. Colloids and Interface Sc. p. 90 - 95.

33. Wang Y. et al. Rapid onset of calcium carbonate crystallisation under the influence on a magnetic field. Water Research,, 1997. Vol.31, No.2: p. 346 - 350.

34. C. Gabrielli. et al. Magnetic water treatment for scale prevention. 2001. Water Research 35 No. 13 en A. González Arias, Lo cierto y lo falso en el tratamiento magnético del agua y los combustibles in Rev. Cub. Física. 2008. p. 3249-3259

35. Krylov O. et al. Electronnaya Obrabotka Materialov. 1987. 2: p. 53-56.

36. Miroslav Colic et al. The elusive mechanism of the magnetic ‘memory’ of water, Colloids and surfases. Physicochemical and Engineering Aspects, 1999. 154: p. 167–174.

37. Lipuš L. K.J. Garbai L. Magnetic water treatment for scale prevention. Hungarian Journal of Industrial Chemistry, 1998. Vol.26: p. 109 - 112.

38. Busch K. et al. Design of a test loop for the evaluation of magnetic treatment devices. TransIChemE, 1997. 75 Part B Mayo.

39. Berenguer, A. y colaboradores. Actualidad internacional del tratamiento magnético para el control de incrustaciones. Revisión. 2000, Centro Nacional de Electromagnetismo aplicado (CNEA): Universidad de Oriente. p. 1-12.

40. Powell, M. R. Magnetic Water and Fuel Treatment, in Skeptical Inquirer,. CSICOP.

41. Magnetic water treatment and other scams. <http://www.sfu.ca/chemcai/magscams/magscams.html>

42. Coetzee. The Role of Zinc in Physical Water Conditioning, in MAG-3. 1999., Cranfield University Press.

43. Busch, K. Marianna A. Laboratory studies on magnetic water treatment and their relationship to a possible mechanism for scale reduction. Desalination, 1997. 109: p. 131-148.

44. Florestano, E. et al Magnetic Water Treatment in Lieu of Chemicals. <http://www.exicom.org/cew/oct96/mag.htm>.

45. Magnetic Water Treatment De-Mystified. <http://www.green-bar.com/demys.html>.

46. Crites, W. Stephenson, R. Magnetic Fluid Conditioning Systems, in Green Country Environmental Associates LLC, Magnetic Fluid Conditioning and Filtration Solutions.

47. Hard Water Problems: How They Affect Our Daily Lives. Available from: <http://www.mag-sol.cnchost.com/hardwhy.htm>.

48. Electrochemical Water Conditioning, Operation of the Care Free Water Conditioner. Technical Data. . Available from: <http://www.carefreewaterproducts.com/technica.htm>.

49. Danielewicz-Ferchmin. Water at ions, biomolecules and charged surfaces. Phys. Chem. Liquids, 2004. 42: p. 1-36.

50. Vegiri, A. Reorientational relaxation and rotational-translational coupling in water clusters in a d.c. external electric field. J. Mol. Liq, 2004. 110: p. 155 -168

51. Madsen, H.E.L. Solution growth; industrial, biological and molecular crystallization Influence of magnetic field on the precipitation of some inorganic salts Journal of Crystal Growth, 1995. Volume 152(1-2): p. 94-100.