UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

ARTHUR MILLER COSME GUIMARÃES SOARES

TRATAMENTO ELETROMAGNÉTICO DA ÁGUA PRODUZIDA PARA GERAÇÃO DE VAPOR

NATAL-RN
DEZEMBRO / 2015

TRATAMENTO ELETROMAGNÉTICO DA ÁGUA PRODUZIDA PARA GERAÇÃO DE VAPOR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN como requisito parcial na obtenção do título de Engenheiro de Petróleo.

Orientador: Prof. Dr. Wilaci Eutrópio Fernandes Júnior

NATAL/RN

DEZEMBRO / 2015

TRATAMENTO ELETROMAGNÉTICO DA ÁGUA PRODUZIDA PARA GERAÇÃO DE VAPOR

Esta monografia foi avaliada e considerada adequada como requisito parcial na obtenção do título de Engenheiro de Petróleo pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Natal / RN

Dezembro / 2015.

Prof. Dr. Wilaci Eutropio Fernandes Júnior
Orientador- UFRN

Prof. Dr. Lindemberg de Jesus Nogueira Duarte
Membro Examinador – UFRN

Prof. Dra. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli
Membro Examinador – UFRN

Dedico este trabalho primeiramente a **Deus** por me ajudar dando força e orientação na execução desta atividade. Aos meus **pais** que os amo incondicionalmente e que me apoiaram em todo momento e a todos que de alguma forma contribuiu para realização deste sonho, meu muito obrigado.

AGRADECIMENTOS:

Agradeço primeiramente a **Deus** por toda força, orientação e discernimento que me possibilitaram realizar este sonho.

Aos meus pais **Maria da Conceição Guimarães Soares e Antonio Cosme Soares Filho**, que sempre me incentivaram na execução desta tarefa. Amo muito vocês.

A minha namorada **Rayane Alves Torres**, que em todo tempo me deu apoio moral e emocional para realização deste trabalho.

Agradecer ao Prof. Dr. **Wilaci Eutrópio Fernandes Júnior** por toda a força que me deu, e por me ajudar todas as vezes que precisei. Obrigado por tudo.

Aos meus **amigos**, por estar do meu lado todas as vezes que precisei, e por sua amizade.

Enfim, agradeço a todos.

SOARES, Arthur Miller Cosme Guimarães - "TRATAMENTO ELETROMAGNÉTICO DA ÁGUA PRODUZIDA PARA GERAÇÃO DE VAPOR". Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal – RN, Brasil.

Orientador: Profº. Drº. Wilaci Eutrópio Fernandes Júnior

RESUMO

A literatura científica já reconhece o papel positivo do campo magnético na redução da incrustação de carbonato de cálcio em tubulações onde a água passa por algum aquecimento. Entretanto, não há modelo teórico que explique satisfatoriamente o fenômeno. A observação dos resultados é feita de forma empírica através de experimentos e ensaios, porém a repetibilidade desses ensaios são muito baixas. Ainda assim, a atenção dada ao tratamento por campo magnético tem aumentado nos últimos anos como um método de combate e prevenção da incrustação em geradores de vapor. Por isso, uma revisão da literatura foi realizada para buscar explicações e resultados sobre o tratamento por campo magnético. Sendo encontrada como evidência mais amplamente reconhecida na literatura, o aumento da fração de aragonita em detrimento de calcita, quando a água de alimentação de geradores de vapor, são expostas ao campo magnético. Assim, diminuindo as incrustações, uma vez que a aragonita é um cristal mais mole e menos aderente as paredes das tubulações. Sendo, portanto, facilmente removida, até mesmo pelo fluxo da água. Uma outra característica observada é o fenômeno do "efeito memória", ou seja, a água permanece tratada mesmo horas depois de cessada a aplicação do campo magnético. O presente trabalho resume o levantamento bibliográfico sobre o tratamento por campo magnético e abordagens de ensaios e experimentos em escala não laboratorial realizados por vários autores estudados. Também é discutido a aplicação do tratamento eletromagnético na indústria do petróleo. Sendo utilizado para o tratamento da água produzida na geração de vapor com a finalidade da injeção em poços, numa recuperação térmica pela injeção de vapor. No entanto, mais testes experimentais são recomendados para otimizar e comprovar a eficácia do tratamento eletromagnético na indústria do petróleo.

Palavra Chave: Água produzida; incrustação; tratamento eletromagnético; geradores de vapor; injeção de vapor.

ABSTRACT

The scientific literature already recognizes the positive role of the magnetic field in reducing calcium carbonate scale in pipes where the passing water goes through some heating. However, there is no theoretical model that satisfactorily explains the phenomenon. The observation of the results is done empirically through tests and trials, but the repeatability of these tests are very low. Even so, the attention paid to treatment by magnetic field has increased during the last few years as a scale prevention method in steam boilers. Hence, a literature review was carried out to seek explanations and results about treatment by magnetic field. It was found as the most widely recognized evidence in the literature, the increase of aragonite fraction instead of calcite, when the steam boiler feed water is exposed to the magnetic field. Thus, there is reducing scale, since the aragonite is a less hard crystal and less adherent to the walls of the pipes. Aragonite crystal are easily removed, even by water flow. Another feature observed is the phenomenon of "memory effect", in other the words, the the water remains treated, even hours after the application of the magnetic field. The current paper summarizes the literature survey about treatment by magnetic field and expresses the results of experimental tests on boilers made by several authors, it also discusses the application of the electromagnetic treatment in the oil industry. It is used to treat the water produced by steam boiler with the purpose of reinjection of wells, in a thermal recovery by steam injection. Nonetheless, further investigation is recommended to optimize and verify the effectiveness of the electromagnetic treatment in the oil industry.

Keyword: Produced water; scale; electromagnetic treatment; steam boilers; steam injection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 –Tubo de caldeira incrustado com produtos de corrosão 17
Figura 02 – Caldeira contendo elevada quantidade de lama de origem argilosa..... 19
Figura 03 – Parte inferior de caldeira, mostrando tubos incrustados (dureza) acúmulo de lama e depósitos no fundo.....19
Figura 04 – Processo de condicionamento da água.....24
Figura 05 – Remoção das incrustações 24
Figura 06 – Micrografia dos cristais de cálcio depositados, sem o uso de equipamento eletromagnético 26
Figura 07 – Micrografia dos cristais de cálcio depositados, com o uso de equipamento eletromagnético.....26
Figura 08 – Equipamento magnético 28
Figura 09 – Ilustraçao instalação equipamento magnético.....28
Figura 10 – Ilustração instalação equipamento magnético no sistema de aquecedor de água.....29
Figura 11 – Instalação equipamento eletromagnético SCALEWatcher 30
Figura 12 – Instalação equipamento eletromagnético Águabranda.....30
Figura 13a – Caldeira flamotubular 35
Figura 13b – Caldeira flamotubular 35
Figura 14a – Caldeira Aquatubular 36
Figura 14b – Caldeira Aquatubular 36
Figura 15 – Tubulões 37
Figura 16 – Esquema do processo de injeção continua de vapor 38
Figura 17a – Localização de instalação dos dispositivos eletromagnético numa caldeira industrial.....43
Figura 17b – Localização de instalação dos dispositivos eletromagnético numa caldeira industrial.....43
Figura 18 – Esquema do teste de controle de incrustação.....45
Figura 19a – Concentração média de cálcio e de zinco da água de alimentação durante cada experiência.....46

Figura 19b – Média da alcalinidade e pH da água de alimentação durante cada experiência 47

Figura 20a – Equipamentos eletromagnético 49

Figura 20b – Equipamentos eletromagnético 49

Figura 21 – Caldeira utilizada no experimento de Tuv Nel. 51

Figura 22 – Imagem tabela de análise química da água tratada para o experimento de Tuv Nel..... 52

Figura 23 – Imagem tabela de análise química da água tratada para o novo ensaio do dispositivo A 53

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Classificação da dureza 16
Tabela 02 - Relação entre a espessura de incrustação o seu proporcional aumento de energia.....20
Tabela 03 – Propriedades físicas de calcita e da aragonita 26
Tabela 04 - Quantidade de ímãs em função do diâmetro da tubulação.....29
Tabela 05 - Tipos de equipamentos para tubulações até 4.....33
Tabela 06 - Tipos de equipamentos para tubulações de 4” até 16”.....33
Tabela 07– Relação de proporção de aragonita / calcita.....44
Tabela 08 – A composição de água da torneira utilizada no experimento de Lipus e Dobersek 45
Tabela 09 – Análise química da água de alimentação utilizada no experimento de Smothers et al.....50
Tabela 10 – Análise química da água não tratada para o experimento de Tuv Nel....52
Tabela 11 – Ensaio referente aos parâmetros presentes na água de produção.....55
Tabela 12 – Ensaio referente aos compostos inorgânicos presentes na água de produção.....56

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11

2 OBJETIVOS 13

2.1 OBJETIVOS GERAIS 13

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 13

3 REFERENCIAL TEÓRICO 14

3.1 ÁGUA PRODUZIDA 14

3.2 ÁGUA DURA 16

3.3 INCRUSTAÇÃO 17

3.3.1 INCRUSTAÇÃO EM CALDEIRAS 19

3.4 TRATAMENTO POR CAMPO MAGNÉTICO 21

3.4.1 INTRODUÇÃO 21

3.4.2 APLICAÇÕES 22

3.4.3 VANTAGENS 23

3.4.4 TIPOS DE EQUIPAMENTOS 27

3.4.4.1 Equipamentos magnéticos *27*

3.4.4.2 Equipamentos eletromagnéticos 29

3.5 GERADOR DE VAPOR 33

3.6 MÉTODO ESPECIAL DE RECUPERAÇÃO (INJEÇÃO DE VAPOR) 37

4 METODOLOGIA 40

5 ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÕES 41

5.1 ESTUDO NO EFEITO MAGNÉTICO EM OUTRAS PROPRIEDADES DA ÁGUA 41

5.2 TRATAMENTO ELETROMAGNÉTICO NAS CALDEIRAS 42

5.3 TRATAMENTO ELETROMAGNÉTICO PARA ÁGUA PRODUZIDA 54

6 CONCLUSÕES 59

7 REFERÊNCIAS 61

1. INTRODUÇÃO

A produção de água, seja ela conata do reservatório ou proveniente de injeção com objetivo de recuperação suplementar de óleo, é uma realidade inerente à produção de petróleo, sendo que em muitos casos seu volume chega a ser muito maior que o do óleo produzido.

Geralmente as águas produzidas, depois de tratadas, são injetadas em poços, descartadas para mananciais ou poços, ou ainda destinadas para reuso industrial. Uma das possíveis formas de reuso da água produzida tratada é a geração de vapor para injeção contínua ou cíclica em poços com petróleo de alta viscosidade e de difícil recuperação.

Na indústria do petróleo, a água de alimentação para geração de vapor geralmente é obtida de rios e mananciais, causando impactos ambientais e sociais. A utilização da água produzida como alimentação das caldeiras, pode diminuir esses impactos, porém a água produzida está longe de ser composta apenas de Hidrogênio e Oxigênio, apresenta em sua composição, inúmeros sais em dissolução como Cloretos, Sulfatos, Carbonatos e Bicarbonatos, bem como outros minerais não dissolvidos, mas em suspensão. Dependendo do tipo e quantidade de sais e sólidos acima mencionados contidos na água, esta atacará quimicamente as paredes internas das tubulações de ferro e aço, provocando a corrosão. Tanto os sais em dissolução como os sólidos em suspensão tendem a se depositar nas paredes internas dos dutos, e esse problema aumenta com o aumento da temperatura da água, provocando as incrustações.

Incrustação em tubulações é um grande problema para a indústria, prejudicando a vazão de água em caldeiras. Estima-se que, só na Inglaterra, a incrustação custa, anualmente, 1 bilhão de libras (cerca de R$ 5.700.000.000,00 ou U$$ 1.500.000.000,00). A incrustação pode ser formada por distintas espécies químicas, tais como sulfato de cálcio, sulfato de bário, fosfato de cálcio, hidróxido de magnésio, fosfato de zinco, hidróxido de ferro, sílica, mas o carbonato de cálcio é a fonte mais comum (BAKER, 1996 apud COSTA, 2006). Os casos mais graves estão associados à cristalização de carbonato de cálcio

em situações de aquecimento de água dura, pois a solubilidade do carbonato cai com o aumento da temperatura.

Portanto, é necessário um tratamento cuidadoso da água de alimentação de caldeiras a vapor para evitar as incrustações das superfícies de transferência de calor. A incrustação pode levar ao superaquecimento das superfícies de caldeira e isso pode resultar em falha catastrófica.

Nesse contexto, o presente trabalho pretende discutir os estudos do tratamento por campo magnético para uso no combate e prevenção da incrustação em tubulações externas e tubos internos dos geradores de vapor.

Entretanto até o momento não foi possível identificar na teoria científica se há explicação para o fenômeno do efeito do campo magnético na alteração do comportamento das soluções aquosas. Vasta literatura científica já foi publicada sobre o tema, sendo a grande maioria com uma abordagem empírica, buscando determinar em quais circunstâncias ocorre o fenômeno.

Portanto, o presente trabalho, irá realizar revisões bibliográficas e abordagens de ensaios e experimentos em escala não laboratorial realizados por vários autores estudados. Além disso, discutir as aplicações do tratamento eletromagnético na indústria do petróleo para o tratamento da água produzida na geração de vapor objetivando a injeção dos poços, numa recuperação especial com injeção de vapor.

2. OBJETIVO

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Fazer uma revisão da literatura sobre o tratamento por campo magnético e sua aplicação na indústria no combate e prevenção da incrustação em caldeiras e trocadores de calor.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar a possível eficácia do condicionamento da água produzida através do tratamento eletromagnético para o combate e prevenção das incrustações nas tubulações externas e tubos internos dos geradores de vapor.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 ÁGUA PRODUZIDA

De acordo com Barros (2005 apud PONTES, 2010, p.21):

> A origem da água produzida está associada diretamente à origem do petróleo. Os hidrocarbonetos são formados por uma mistura complexa de compostos de carbono e hidrogênio. Podem se encontrar em estado sólido, liquido ou gasoso, dependendo de sua composição pressão e temperatura. Esta matéria orgânica foi originada no fundo de antigos oceanos, onde plantas e micro animais morreram e ficaram depositados em forma de sedimentos. Por ação de bactérias, temperatura e pressão, dar-se origem ao petróleo nas rochas chamadas de geradoras. Após a ocorrência deste cenário, a compressão destas matrizes gerou pressão e temperatura suficientes para a migração do gás e do petróleo para rochas porosas e permeáveis adjacentes, chamada de migração primária. Essas rochas adjacentes também eram de origem sedimentar e depositaram-se em um meio marinho, tendo seus poros cheios de água com graus variados de salinidade. Em seguida deu-se a segunda migração de petróleo e gás, que é a segregação através da água, até encontrarem uma rocha selante ou trapa, onde o movimento é interrompido em função das rochas capeadoras. Cabe ressaltar que o petróleo segregado permanece em contato com a linha d'água do aquífero, de onde recebe pressão e o gás pode estar dissolvido no petróleo ou se apresentar com uma camada independente entre o óleo e a rocha selante. Essa água do aquífero é a que será produzida por ocasião da produção de óleo.

A maioria dos poços produz água, inicialmente em quantidades pequenas, à medida que a produção continua, a pressão do reservatório na proximidade dos poços vai diminuindo. Esta queda de pressão provoca um movimento nos fluidos do reservatório, alterando o nível de contato óleo/água. Por meio desta movimentação, a água atinge o poço e passa a ser produzida, fazendo-se necessário um sistema de separação óleo/água e posteriormente o descarte/reuso dessa água.

"A composição química da água produzida depende fortemente do campo gerador do óleo, pois a água esteve em contato com as formações geológicas por milhões de anos". (CENPES, 2005 apud SOARES, 2013, p.18).

> A água produzida contém quantidades variadas de gases dissolvidos (CO, CO_2, H_2S), compostos orgânicos incluindo hidrocarbonetos dissolvidos, ácidos, fenóis, sólidos em suspensão (areia, lodo, argilas, outros silicatos, gipsita), metais

> pesados e produtos químicos adicionados nos diversos processos de produção (desemulsificantes, antiespumantes, surfactantes, floculantes, inibidores de corrosão). (CENPES, 2005 apud PONTES, 2010, p.22).

Estes compostos tornam a água produzida imprópria para consumo humano e animal.

A água produzida também possui uma grande quantidade de sais solúveis como carbonatos, sulfatos e cloretos de sódio, potássio, cálcio e magnésio. “Esta composição favorece a corrosão, que é principalmente associada aos cloretos, e a incrustação que está associada aos sulfatos e carbonatos. ” (LIMA, 1996 apud FERNANDES JR, 2006, p.7)

Segundo Azevedo (1998 apud BEZERRA, 2004), as águas de produção são consideradas o rejeito de maior volume em todo processo de exploração e produção do petróleo, configurando-se assim como um grande problema ambiental, operacional e gerencial. “A quantidade de água produzida associada com o óleo varia muito, podendo alcançar valores superiores a 90% do que é produzido ao fim de vida produtiva do poço.” (THOMAS et al, 2001 apud BEZERRA, 2004, p.9).

> A presença da água é indesejada porque acarreta um superdimensionamento de tubulações, bombas, tanques; maior custo d.e transporte; maiores gastos de energia com transporte e armazenamento; problemas no refino; corrosão e incrustação nos equipamentos de produção e transporte. (CHAPMAN, 1976 apud FERNANDES JR, 2006, p.7).

Após tratamento adequado, a água produzida pode ser utilizada na injeção de poços ou descartada via emissário diretamente no mar ou efluentes, acarretando ainda mais custos.

De acordo Lima (1996 apud FERNANDES JR, 2006) as causas para produção de água contida no reservatório são:

- Poços de petróleo perfurados próximos à interface óleo/água,
- Poços produtores de óleo em etapa posterior de produção (campos maduros), em que houve avanço da frente de água até a coluna produtora,
- Falhas no revestimento dos poços,

- Recuperação secundária, onde água na forma líquida ou de vapor é injetada no reservatório para aumentar ou mesmo manter a produção de óleo.

Segundo Fernandes JR (2006), Além destas causas, é possível que a formação de cones de água devido à ascensão da interface água/óleo, também possibilite a produção de água.

3.2 ÁGUA DURA

As águas, estão longe de serem compostas apenas de Hidrogênio e Oxigênio, apresentam em sua composição, inúmeros sais em dissolução como Cloretos, Sulfatos, Carbonatos e Bicarbonatos, bem como outros minerais não dissolvidos, mas em suspensão.

Os sais mais encontrados são os carbonatos de cálcio e de magnésio que se apresentam dissolvidos e que caracterizam o nome água dura. São eles que se depositam nas tubulações das torres de resfriamento, caldeiras, trocadores de calor e tantos outros equipamentos, danificando os mesmos e comprometendo sua eficiência.

“A gravidade do problema de incrustação depende da ‘dureza’ da água: quanto mais ‘dura’, maior a incrustação que ela promove. A dureza da água é uma medida da quantidade de sais dissolvidos. ” (LANDGRAF et al., 2004, p.1)

Segundo Junior Martinelli (2003 apud COSTA, 2006) as águas podem ser classificadas quanto à sua dureza, conforme a tabela 01:

TABELA 01 – CLASSIFICAÇÃO DA DUREZA.

Classificação da água	Dureza da água mg/L ($CaCO_3$)
mole	menor que 50
moderada	entre 50 e 150
dura	entre 150 e 300
muito dura	maior que 300

Fonte: Junior Martinelli (2003 apud COSTA, 2006)

A dureza é expressa em partes por milhão (ppm) de massa de sólidos dissolvidos ou em miligramas por litro. É identificada como dura uma água com quantidades iguais ou superiores a 150ppm. Por exemplo, uma água com 175ppm de dureza já exige o uso de tratamento químico. (LANDGRAF et al, 2004).

3.3 INCRUSTAÇÃO

Na água produzida pela indústria do petróleo são encontradas diversas substâncias dissolvidas como sais e óxidos, porém podem precipitar formando as incrustações e gerando um grande problema para a indústria, pois prejudica a vazão de água e transferência de calor em geradores de vapor e centrais de aquecimento.

A incrustação é a formação e acumulação de camadas de distintos compostos químicos que ocorrem naturalmente aderindo a superfícies sólidas, como tubos, equipamentos e aparelhos. (como pode ser observado na figura 1)

FIGURA 01: TUBO DE CALDEIRA INCRUSTADO COM PRODUTOS DE CORROSÃO.

Fonte: Trovati (2010, p.36)

Segundo Trovati (2010), os principais responsáveis pela formação de incrustações são:

- Sais de cálcio e magnésio (dureza), principalmente o carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e o sulfato de cálcio ($CaSO_4$)

- Sílica solúvel (SIO_2) e silicatos ($SiO_3{}^{2-}$) de vários cátions. A sílica solúvel é oriunda da dissolução de parte da própria areia e rochas com quais a água mantém contato.
- Óxidos de ferro, tais como o Fe_2O_3 e de outros metais (cobre, zinco) originado principalmente de processos corrosivos nas tubulações.

De acordo com Landgraf et al. (2004), os casos mais graves estão associados à cristalização de carbonato de cálcio.

As solubilidades são influenciadas basicamente pela temperatura, concentração e pH. Por exemplo, os níveis de pH mais elevados da água produzida, podem proibir o cálcio de dissolver, fazendo com que ocorra a precipitação e consequentemente a ligação com íons carregados negativamente para formar carbonato de cálcio. Com relação ao aquecimento de água dura, a solubilidade do carbonato cai com o aumento da temperatura.

Já com relação a concentração dos sais como o cálcio e magnésio, quando a água se torna supersaturada com estes minerais não poderá mais dissolver quantidades em excesso desses elementos, assim, precipitando esses minerais.

> Normalmente esta precipitação ocorre sob a forma de cristais bem ordenados, capazes de se fixarem firmemente as superfícies internas da tubulação. A ordenação existente na estrutura cristalina permite um rápido desenvolvimento da incrustação. (TROVATI, 2010, p.32)

De acordo com Trovati (2010), pela coloração resultante e o peso da incrustação formada, pode-se grosseiramente estimar sua origem e composição química:

- Material de coloração marrom claro pode indicar argila e sólidos suspensos, ou também produtos de corrosão (Fe_2O_3); (Figura 02)
- Compostos esbranquiçados ou levemente acinzentados são normalmente formados por cálcio e magnésio; (Figura 03)
- Incrustações esverdeadas ou cinzentas e pesadas indicam ocorrência de sílica;

- Depósitos negros e leves, apontam a presença de material orgânico, enquanto que os pesados, indicam a presença de produtos de corrosão (ferro (Fe_3O_4), sendo possível sua detecção através de um imã).
- Depósitos de coloração verde ou azul intensa indicam presença de cobre.

FIGURA 02: CALDEIRA CONTENDO ELEVADA QUANTIDADE DE LAMA DE ORIGEM ARGILOSA.

Fonte: Trovati (2010, p.35)

FIGURA 03: PARTE INFERIOR DE CALDEIRA, MOSTRANDO TUBOS INCRUSTADOS (DUREZA) ACÚMULO DE LAMA E DEPÓSITOS NO FUNDO

Fonte: Trovati (2010, p.36)

3.3.1 INCRUSTAÇÕES EM CALDEIRAS

Os sais minerais podem produzir problemas no interior dos geradores de vapor, isso ocorre porque, ao serem submetidos a valores mais elevados de temperatura e pressão, assumem comportamentos muitas vezes indesejáveis

nas superfícies de troca térmica, por exemplo, formando as incrustações, as corrosões e o arraste de água para o vapor.

A concentração crescente desses sais na água da caldeira, devido à evaporação contínua da água, faz com que esses compostos solúveis atinjam seu limite de solubilidade numa dada temperatura, precipitando-os.

Nos geradores de vapor, segundo Júnior Martinelli (2003 apud COSTA, 2006), as incrustações irão reduzir a capacidade de transferência de calor, atuando como um isolante térmico de baixa condutividade, reduzindo a taxa de transferências de calor, contribuindo para aumento do consumo de combustível ou energia elétrica do sistema. A tabela 2 mostra uma relação entre a espessura de incrustação e o seu proporcional aumento de energia. Por exemplo, um gerador de vapor com uma tubulação que tem espessura de 1/32 polegadas de incrustação irá ter um aumento de 8,5% do consumo de energia, para gerar a mesma quantidade de vapor do que uma caldeira que não contém incrustação em sua tubulação.

TABELA 02 - RELAÇÃO ENTRE A ESPESSURA DE INCRUSTAÇÃO O SEU PROPORCIONAL AUMENTO DE ENERGIA

Densidades de Incrustação (polegadas)	Consumo de Energia Aumento (%)
1/32	8,5
1/16	12,5
1/8	25
¼	40

Fonte: Vidaurre (2008)

A incrustação apesar de ser mais frequentemente encontradas no interior das caldeiras, também pode ocorrer na seção pré e pós-caldeira. Em caldeiras operando a baixa e média pressões essas incrustações podem ocorrer na seção pós-caldeira e caldeira, enquanto nas caldeiras operando a alta pressão geralmente só ocorrem na caldeira mesmo. (COSTA, 2006).

Conforme Costa (2006), a formação das incrustações acontece devido aos seguintes fatores:

- Excesso de impurezas na água;
- Transferência de produtos de corrosão de um local a outro;

- Inadequação da aplicação de produtos destinados ao tratamento químico da água;

> Entre as impurezas encontradas nos tubos das caldeiras, provenientes de sais minerais dissolvidos encontrados na água, pode-se citar: carbonato de cálcio, sulfato de cálcio, silicatos de cálcio e magnésio, silicatos complexos contendo ferro, alumina, cálcio e sódio, borras de fosfatos de cálcio ou magnésio e óxidos de ferro não protetores. (COSTA, 2006).

Outro problema causado pela incrustação é a restrição parcial ou total da água no interior das caldeiras. Isso ocorre quando a espessura da incrustação está quase fechando a tubulação. Com isso, há uma redução do volume disponível para água e essa restrição ao fluxo pode causar separação prematura do vapor, superaquecimento e aumento das taxas de formação da incrustação. Causando problemas de segurança operacional, além de provocar paradas desnecessárias e elevando os custos de manutenção. De maneira geral, as incrustações são indesejáveis e é o principal foco dos programas de tratamento de águas dos sistemas de geração de vapor.

3.4 TRATAMENTO POR CAMPO MAGNÉTICO

3.4.1 INTRODUÇÃO

Uma solução alternativa para combate e prevenção da incrustação, é a aplicação de campo magnético, objeto de estudo deste trabalho.

O tratamento por campo magnético da água é um recurso simples no qual a água passa através de um campo magnético e altera algumas de suas propriedades físico-químicas. O belga Theophile Vermeiren pesquisou uma solução para as dificuldades de remoção de incrustação dos equipamentos de processos industriais, e chegou à conclusão de que líquidos condicionados por campos magnéticos poderiam evitar essas incrustações, principalmente em se tratando da água. Em 1952, Vermeiren patenteou este tratamento magnético, utilizado na prevenção de sedimentação e remoção de sedimentos acumulados

na água, sendo então reconhecido como descobridor do fato de que campo magnéticos afetam as propriedades da água.

O efeito mais estudado e encontrado na literatura, da ação do campo magnético sobre sistemas químicos, é o que diz respeito à inibição de incrustações. No entanto, o fenômeno ainda é pouco estudado no meio cientifico, principalmente no Brasil. (PORTO, 1998; FREITAS,1999; BARBOZA, 2002 apud COSTA, 2006). “A maioria dos estudos sobre esse fenômeno é realizada em sistemas dinâmicos, que utilizam o condicionamento magnético apenas em escala de bancada de laboratório” (BAKER, 1996; BOGOTIN, 1999 apud COSTA, 2006, p.21).

> Apesar de muitas evidencias experimentais e relatos de alterações do comportamento da agua tratada magneticamente nas mais diversas áreas, não há um embasamento conceitual ou qualquer explicação para tais efeitos nos trabalhos em questão. (PORTO, 1998, p.16)

“No entanto, a despeito da falta de mecanismos ou modelos que expliquem tais comportamentos, os efeitos e benefícios provenientes dos tratamentos magnéticos em água estão sendo amplamente utilizados em grande escala e a nível comercial.” (PORTO, 1998, p.16)

3.4.2 APLICAÇÕES

Aplicações segundo Vidaurre (2008), pode ser em geradores de vapor, caldeiras; indústrias; hospitais; hotéis; restaurantes; lavanderias; complexos turísticos e esportivos; sistemas de rega agrícola e ornamental; lares em geral, ou em qualquer aplicação onde esteja presente a água e haja problemas de incrustações.

O baixo custo dessa alternativa vem impulsionando o uso de sistemas com tratamento por campo magnético no controle da incrustação.

3.4.3 VANTAGENS

De acordo com a Aguabranda ltda, as vantagens são:

- Eliminação da incrustação já existente, uma vez que irá reduzir a formação de calcita (cristal de carbonato de cálcio duro) e assim mantendo o circuito de água livre de incrustações;
- Ecologicamente correto, não contamina as fontes de água pois não existe a adição de produtos químicos (os anti incrustantes);
- Redução do custo de instalação, operacional e de energia, proporcionando rápido retorno do investimento;
- Eliminação dos riscos de danos aos equipamentos, aumentando sua vida útil;
- Facilidade de instalação, sem a necessidade de alterar o circuito já existente;
- Economiza combustível nas caldeiras e melhora a eficiência dos equipamentos, propiciando uma troca de calor mais eficiente.

"Vasta literatura científica já foi publicada sobre o tema, a grande maioria com uma abordagem empírica, buscando determinar em quais circunstâncias ocorre o fenômeno. Os resultados, entretanto, têm sido desencontrados." (LANDGRAF et al., 2004, p.2).

Segundo Kronenber (1993 apud COSTA, 2006), o tratamento por campo magnético consiste em íons da água passando pelo condicionador magnético, como pode ser observado na figura 04, assim moléculas da água e os íons presentes na solução que fluem através da tubulação são magnetizadas dentro da tubulação. Como consequência, a incrustação existente vai sendo removida lentamente pelos novos núcleos de cristais formados.

FIGURA 04 – PROCESSO DE CONDICIONAMENTO DA ÁGUA

Fonte: BONAQUA (2003 apud COSTA, 2006)

FIGURA 05 – REMOÇÃO DAS INCRUSTAÇÕES

Fonte: BONAQUA (2003 apud COSTA, 2006)

Na experiência realizada por Kronenber (1993 apud COSTA, 2006) para o condicionamento da água, foram utilizados campos magnéticos da ordem de 0,5 a 1,4T, colocados conforme a figura 04 e 05.

Na figura 05, pode ser observada que as paredes da tubulação estão limpas. A remoção da incrustação está vinculada à velocidade do fluxo pela formação dos cristais em forma esférica. O fluxo de água remove por colisão a incrustação existente. “Seria como converter as incrustações de volta ao estado dissociado” (QUINN; MOLDEN; SANDERSON, 1997 apud COSTA, 2006, p.71).

Até o momento, só foi sistematicamente comprovado o efeito da exposição ao campo magnético no tipo de carbonato formado. Outros efeitos têm sido mencionados (alteração do pH, da condutividade elétrica, da tensão superficial), mas nenhum deles está comprovado.

Segundo Landgraf et al. (2004), uma das poucas evidencias reprodutíveis é o efeito do campo magnético sobre a forma cristalina do carbonato formado, seja o carbonato estável, calcita, ou os carbonatos metaestáveis, aragonita.

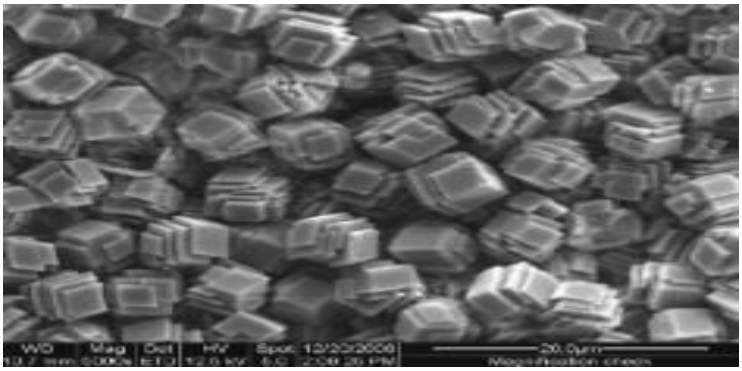
Naturalmente, a cristalização do carbonato de cálcio dá origem à calcita. Esse composto forma-se em todas as direções, em torno de um íon original. “A calcita ocorre em maior concentração e, através de suas pontas, os cristais fixam-se uns aos outros nas paredes das tubulações, formando uma camada calcaria, denominada incrustação. ” (COSTA, 2006, p.68)

Para o pesquisador e inventor Pandolfo (2003 apud SCHALY; BRESCIANI; GUARDANI, 2014),

> quando o campo magnético é aplicado na água carbonatada, há a formação de carbonato de cálcio na forma de pequenos cristais, como se fossem pequenas sementes que vão crescendo ao longo do tempo no interior do líquido. Esses pequenos grãos dão origem ao cristal na forma de aragonita que é mais mole do que a calcita.

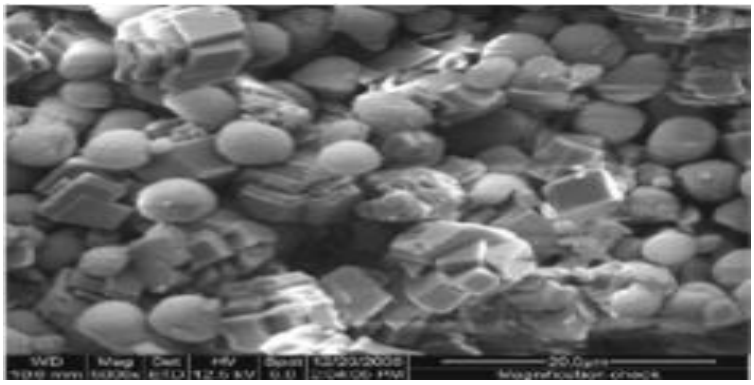
De acordo com Vidaurre (2008), a relação, em porcentagem (%), de formação de cristais de Calcita/Aragonita é de 80/20 como pode ser observado na figura 06 praticamente só um tipo de cristal (calcita), enquanto a relação de formação de cristais de calcita/Aragonita após o tratamento por campo magnético é de 30/70, podendo ser observado na figura 07 maior quantidade de cristais redondos (aragonita).

FIGURA 06 – MICROGRAFIA DOS CRISTAIS DE CÁLCIO DEPOSITADOS, SEM O USO DO TRATAMENTO POR CAMPO MAGNÉTICO.



Fonte: LI et al (2007 apud LAUXEN, 2014).

FIGURA 07 – MICROGRAFIA DOS CRISTAIS DE CÁLCIO DEPOSITADOS, COM O USO DO TRATAMENTO POR CAMPO MAGNÉTICO.



Fonte: LI et al (2007 apud LAUXEN, 2014).

Na tabela 03 é possível observar as propriedades da calcita e da aragonita, conforme informado em BESSLER e RODRIGUES (2008 apud LAUXEN, 2014).

TABELA 03: PROPRIEDADES FÍSICAS DE CALCITA E DA ARAGONITA

Propriedade	Calcita	Aragonita
Massa especifica (g / cm³)	2,711	2,944
Sistema cristalino	Trigonal	Ortorrômbico
Forma cristalina mais comum	Romboedros ou prismas	Prismas aciculares
Solubilidade em água a 25°C e 1 bar (g/100g de água)	8,35	8,22

Fonte: Bessler e Rodrigues (2008 apud LAUXEN, 2014)

Uma outra característica intrigante é o “efeito memória”, ou seja, a água continuará com o comportamento alterado mesmo horas depois de cessada a aplicação do campo magnético. Analisando alguns catálogos de equipamentos magnéticos e eletromagnéticos, chegou-se a uma média de permanência do efeito memória de 48 a 72 horas.

Segundo Baker e Judd (1996 apud COSTA, 2006), a falta de aceitabilidade desses fenômenos é devido à ausência de um modelo que explique como esses processos funcionam.

Klassen (1981 apud COSTA, 2006) resumiu três fatores principais responsáveis pela baixa reprodutibilidade dos experimentos: variação da composição da água (obtida de diversas fontes durante o período em que se realiza os experimentos); o impacto de efeitos externos que não são levados em consideração e, finalmente, as diferenças nas condições do tratamento e das medidas.

3.4.4 TIPOS DE EQUIPAMENTOS

O condicionamento magnético da água pode ser realizado por dois tipos de equipamentos: equipamento Magnético e equipamento Eletromagnético

Estes equipamentos irão gerar campo magnético/eletromagnético focalizados para tratar magneticamente a água.

3.4.4.1 Equipamento magnético

Os equipamentos magnéticos utilizam imãs, como pode ser observado na figura 08. Funcionam usando o poder do magnetismo que é gerado por um indutor magnético conhecido como ímã permanente de força industrial e campo magnético focalizado.

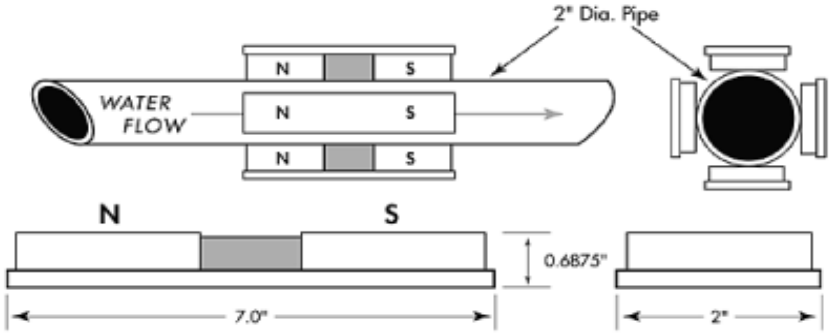
FIGURA 08– EQUIPAMENTO MAGNÉTICO.

Fonte: Hidromag (2012)

São instalados em pares e frente a frente, em forma de sanduíche, ao redor de qualquer tubulação. (Como pode ser observado na figura 08). A direção do fluxo da vazão de água deve ser a partir do polo Norte magnético para polo magnético do Sul. A ilustração da figura 09 mostra a correta aplicação deste ímã para a tubulação.

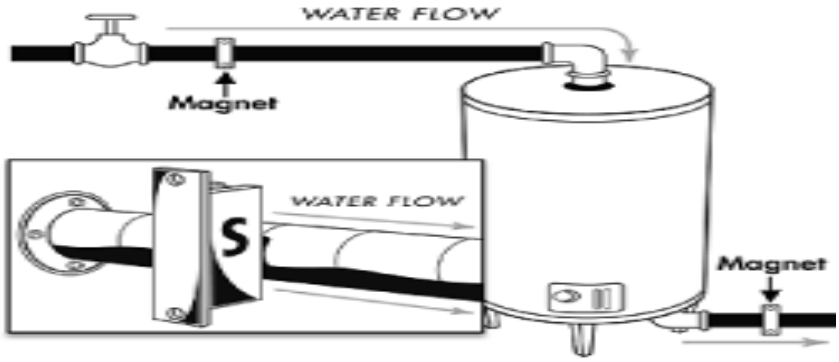
Em geral, os ímãs devem ser instalados na tubulação entre a válvula principal e os trocadores de calor. Em aquecedores de água, uma unidade secundária pode ser instalada em tubulação que sai do aquecedor, se necessário. (Figura 10).

FIGURA 09 – ILUSTRAÇÃO INSTALAÇÃO EQUIPAMENTO MAGNÉTICO



Fonte: Masters magnetic (2012)

FIGURA 10 – ILUSTRAÇÃO INSTALAÇÃO EQUIPAMENTO MAGNÉTICO NO SISTEMA DE AQUECEDOR DE ÁGUA



Fonte: Masters magnetic (2012)

A quantidade necessária de imãs irá depender do diâmetro da tubulação. Como pode ser observado na tabela 04:

TABELA 04 – QUANTIDADE DE ÍMÃS EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DA TUBULAÇÃO.

Equipamento	Diâmetro da tubulação (in)	Quantidade de imãs	Dimensões do IMÃ		
			Altura (in)	Largura (in)	Comprimento (in)
WTM4	0.5	1-2	1.00	1.00	4.50
WTM4	0.75	1-2	1.00	1.00	4.50
WTM4	1.0	2	1.00	1.00	4.50
WTM802	2.0	4	0.68	2.00	7.00
WTM1863	3.0	4	1.25	2.00	7.00
WTM1863	6.0	8	1.25	2.00	13.00
WTM186X2	8.0	12	2.37	2.00	13.50

Fonte: Masters magnetic (2012)

Normalmente os dispositivos magnéticos consegue tratar a água dura ao longo de 30 metros de tubulação**,** ficando a água magnetizada por 48 horas a 72 horas, de acordo com a velocidade do fluxo de água.

3.4.4.2 Equipamentos Eletromagnético

Imãs permanentes só são eficazes dentro de uma certa "janela" de fluxo, portanto num maior ou menor fluxo de água fora da janela, o desempenho cai para zero. Esta é uma das razões pelo qual é utilizado equipamentos

eletromagnéticos (figura 11) para melhorar o desempenho do tratamento por campo magnético da água dura.

FIGURA 11 – EQUIPAMENTO ELETROMAGNÉTICO.

Fonte: ScaleWatcher (2012)

O tratamento eletromagnético é regido pela equação da Força de Lorentz permite variações na velocidade instantânea de uma carregada partícula (a taxa de fluxo de água). Variando a frequência do campo eletromagnético, uma força pode ser transmitida para as partículas carregadas dentro do campo magnético. Assim, o tratamento terá uma eficácia mesmo com uma grande variação do fluxo de água.

FIGURA 12 – INSTALAÇÃO EQUIPAMENTO ELETROMAGNÉTICO.

Fonte: AGUABRANDA (2012)

Os equipamentos eletromagnéticos são compostos de uma câmara de tratamento e um quadro de comando (figura 12) que fornece energia para que esta câmara gere um campo magnético semelhante ao de um ímã. No interior da câmara são utilizadas bobinas (solenoides) para induzir continuamente um campo eletromagnético que exerce uma força sobre partículas carregadas, ou seja, os íons de cálcio e de magnésio. Essa força é chamada de Força Lorentz, descreve a força total sobre partículas carregadas e íons em um campo eletromagnético.

Segundo Lauxen (2014), a equação de Lorentz é muito útil na determinação dos percursos que partículas carregadas (como sólidos dissolvidos presentes na água), tomam quando se movem através do campo eletromagnético. Assim, as partículas e íons na água estão sujeitas a esta Força Lorentz.

$$F = q\,[\,E + (v\,x\,B)]$$

F é a força em newtons (N); E é o campo elétrico em volts/m; B é o campo magnético em teslas (T); q é a carga eléctrica das partículas em coulombs (C); v é a velocidade instantânea da partícula em m/s;

A intensidade de campo magnético (B) é calculado como:

$$B = \mu_0 * H$$

Onde μ_0 é a permeabilidade no vácuo ($\mu_0 = 4\pi\,x\,10^{-7}\ {}^{H}/_{m}$) e H é o campo magnético.

E o campo magnético (H) para solenoides é definido como:

$$H = \frac{N\,I}{h}\,r$$

Onde N é o número de espiras, I é a corrente elétrica (Ampère (A)), h e r são, respectivamente, o comprimento e o raio do solenoide.

Como consequência da lei de Faraday, surge um fator indutivo sobre as partículas que melhora o deslocamento das partículas.

$$L = \frac{\int B\ * H\ dv}{I^2}$$

Onde L é a indutância (unidade: Henry (H)). Lembrando que os indutores armazenam energia num campo magnético.

Este equipamento tem a vantagem de oferecer muito mais eficiência do que o imã devido à condição de se ajustar a intensidade do campo magnético conforme as características da água a ser tratada. É a variável de V, a velocidade instantânea, na equação da força de Lorentz, que dita o quanto campo

eletromagnético deve também variar para acomodar diferentes velocidades de fluxo de água.

Assim, o dispositivo mantém o bicarbonato de cálcio soluto até temperaturas de 65-70°C, para além do qual há uma precipitação de cristais de aragonita microscópicas que permanecem em suspensão e não aderem às paredes removido da pressão da água em movimento. Além disso, em aplicações nas quais as incrustações calcárias já estão formadas, o dispositivo induz uma progressiva redução e desaparecimento no tempo.

Algumas restrições operacionais são:

- A água pode ser utilizada em tubos de qualquer secção, porém as pressões devem ser compreendidas entre 3 e 100 atm.
- O dispositivo tem um funcionamento ótimo em todas as situações em que não há nenhuma estagnação de água porque, mesmo no caso da precipitação de aragonita este é levado por a pressão do líquido em movimento.
- Conveniente que, onde há situações de água ainda submetidos a estresse térmico (por exemplo, as temperaturas de aquecedor de água), não sejam excedidos de 65-70°C.

O efeito do condicionamento da água induzida pelo dispositivo é durável ao longo do tempo, mesmo a uma distância de quilômetros de dutos. No entanto situações de estresse térmico ou mecânico pode trazer a água para o cancelamento original ou diminuir consideravelmente os efeitos do dispositivo. Por esta razão, deve ser colocado a montante e a jusante das bombas de pressão e tanques ou todos aqueles dispositivos em que há fortes saltos pressão ou calor.

A tabela 05 e 06 mostra um catalogo da empresa Sonical para equipamentos eletromagnéticos, no qual pode observar a quantidade de potência necessária em função do diametro da tubulação.

TABELA 05 – TIPOS DE EQUIPAMENTOS PARA TUBULAÇÕES ATÉ 4".

Codice	Descrizione	Φ (pollici)	Portata (l/min)	Alimentazione	Potenza (watt)
1037.FI	Water Scale Filettato	3/8"	18	220 V – 50 Hz	40
1050.FI	Water Scale Filettato	½"	22	220 V – 50 Hz	50
1075.FI	Water Scale Filettato	¾"	50	220 V – 50 Hz	60
1100.FI	Water Scale Filettato	1"	90	220 V – 50 Hz	90
1150.FI	Water Scale Filettato	1" ½	200	220 V – 50 Hz	130
1200.FI	Water Scale Filettato	2"	350	220 V – 50 Hz	145
1200.FL	Water Scale Flangiato	2"	350	220 V – 50 Hz	145
1250.FL	Water Scale Flangiato	2" ½	550	220 V – 50 Hz	208
1300.FL	Water Scale Flangiato	3"	800	220 V – 50 Hz	270
1400.FL	Water Scale Flangiato	4"	1400	220 V – 50 Hz	303

Fonte: SoniCAL (2012).

TABELA 06 – TIPOS DE EQUIPAMENTOS PARA TUBULAÇÕES DE 4" ATÉ 16 "

Codice	Descrizione	Φ (pollici)	Portata (l/min)	Alimentazione	Potenza (watt)
4.STEL.FL	Water Scale Flangiato	4"	114,3	220 V – 50 Hz	360
5.STEL.FL	Water Scale Flangiato	5"	139,7	220 V – 50 Hz	450
6.STEL.FL	Water Scale Flangiato	6"	168,3	220 V – 50 Hz	600
8.STEL.FL	Water Scale Flangiato	8"	219,1	220 V – 50 Hz	700
10.STEL.FL	Water Scale Flangiato	10"	273	220 V – 50 Hz	850
12.STEL.FL	Water Scale Flangiato	12"	323,9	220 V – 50 Hz	1050
14.STEL.FL	Water Scale Flangiato	14"	355,6	220 V – 50 Hz	1100
16.STEL.FL	Water Scale Flangiato	16"	406	220 V – 50 Hz	1250

Fonte: SoniCAL (2012)

3.5 GERADOR DE VAPOR

Os geradores de vapor são equipamentos conhecidos popularmente como caldeiras de vapor. Estes equipamentos segundo Sulato (2015, p.2), "podem ser considerados como sendo trocadores de calor complexos que produzem vapor de água sob pressões superiores a atmosférica a partir da energia de um combustível e de um elemento comburente (ar). "

> Caldeiras de vapor são essencialmente recipientes pressurizados no qual a água é introduzida e pela aplicação continua de energia é evaporada. A água evaporada é chamada de vapor, consistindo um dos fluidos de trabalho mais empregados na indústria. A forma de vapor tem alto conteúdo de energia por unidade de massa e volume. (SULATO, 2015, p.3).

O vapor pode ser utilizado das seguintes formas, como vapor saturado ou como vapor superaquecido.

De acordo com Sulato (2015, p.8), o vapor saturado é “amplamente utilizado na grande maioria das industrias e processos, pois tem a grande vantagem em manter temperatura constante durante a condensação a pressão constante.” “A faixa de temperaturas até 170 ºC utiliza vapor saturado até 10 kgf/cm^2, cuja temperatura de saturação é 183 ºC. Nesta faixa está a grande maioria de pequenos e médios consumidores de vapor.” (BIZZO, 2003, p.66).

“O vapor superaquecido é aquele que possui temperatura mais elevada geralmente na faixa de 400 ºC a 560 ºC. Para obtê-lo, é necessário aquecer o vapor saturado, mantendo inalterada a sua pressão.” (SULATO, 2015, p.9) “O vapor passa a condição de superaquecimento quando ultrapassa temperaturas de saturação de uma determinada pressão. O vapor superaquecido é isento de umidade e comporta-se nas tubulações como gás.” (SULATO, 2015, p.10).

De acordo com Sulato (2015) os geradores de vapor são classificados por diversos quesitos, por exemplo quanto a fonte de aquecimento: elétricas (eletrodo submerso); combustíveis sólidos (carvão, biomassa), líquidos (óleo combustível) ou gasosos (GN e GLP); reatores nucleares.

Podem ser classificados quanto a Natureza da aplicação: fixas; portáteis; locomóveis (geração de força e energia), marítimas. Porém as classificações mais importantes para os geradores de vapor são em relação a pressão de trabalho e quanto a posição dos gases quentes.

Conforme Bizzo (2003), na utilização industrial, pode-se arbitrar uma classificação de geradores de vapor em relação a pressão de trabalho:

- Baixa pressão: até 10 kgf/cm²
- Média pressão: de 11 a 40 kgf/cm²
- Alta pressão: maior que 40 kgf/cm²

Lembrando que esta classificação é arbitrária, porém representativa da faixa de utilização de vapor na indústria.

E quanto a posição dos gases quentes:

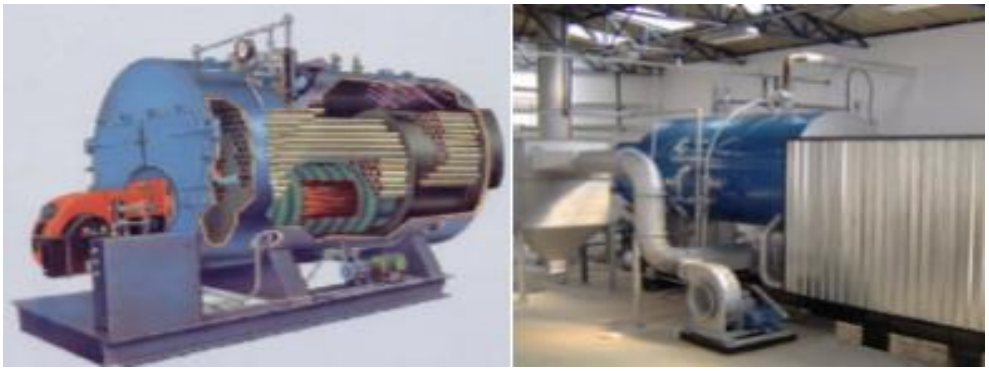
- Flamotubulares: onde os gases de combustão circulam por dentro de tubos, vaporizando a água que fica por fora dos mesmos.
- Aquatubulares: onde os gases circulam por fora dos tubos, e a vaporização da água se dá dentro dos mesmos.

Segundo Sulato (2015), pode-se dizer que os geradores de vapor flamotubulares (figura 13) são caldeiras de fácil construção e operação, mas tendem a apresentar:

- Baixa produção de vapor – cerca de 10 ton/h
- Baixa pressão de operação – 15 kgf/cm² a 20 kgf/cm².

Tendo como principais vantagens: os custos de aquisição mais baixo; exigem pouca alvenaria e atendem bem a aumentos instantâneos de demanda de vapor. Enquanto como desvantagens, apresentam: baixo rendimento térmico; limitação de pressão de operação baixa taxa de vaporização (kg de vapor/m².h); (SULATO, 2015).

FIGURA 13a e 13b – CALDEIRAS FLAMOTUBULAR



Fonte: Sulato, (2015).

Os geradores de vapor que são utilizados nos métodos especiais de recuperação através da injeção de vapor são as caldeiras do tipo aquatubulares. (Figura 14a e 14b). Segundo SULATO (2015), essas caldeiras são mais difíceis de serem construídas e necessitam de maior controle na operação. Suas características operacionais são:

- Alta produção de vapor - normalmente entre 15 e 150 ton/h, podendo chegar a 750ton/h;
- Alta pressão de operação - normalmente entre 90 kgf/cm² e 100kgf/cm².

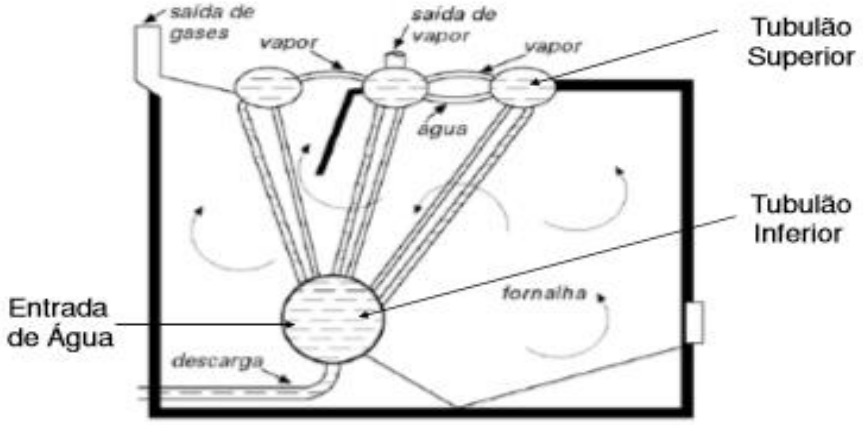
A produção de vapor nesse tipo de caldeira ocorre nos tubos que interligam dois (paredes de água) ou mais reservatórios cilíndricos, chamados tubulões. (Figura 15). Tubulão superior é onde ocorre a separação da fase líquida e do vapor e Tubulão inferior é onde é feita a adição de água e decantação e purga do material sólido e em suspensão. (SULATO, 2015).

Sabe-se que a circulação da água nas caldeiras ocorre por diferenças de densidade, provocada pelo aquecimento da água e vaporização, ou seja, circulação natural. Entretanto, se a circulação for deficiente poderá ocorrer um superaquecimento localizado, com consequente ruptura dos tubos. (SULATO, 2015).

FIGURA 14a e 14b – CALDEIRAS AQUATUBULARES

Fonte: Sulato (2015).

FIGURA 15 – TUBULÕES.



Fonte: Sulato (2015).

De acordo com Bizzo (2003), em relação ao modo de transferência de calor no interior de caldeira existem normalmente duas seções: na seção de radiação, ocorre a troca de calor por radiação direta da chama aos tubos de água, os quais geralmente delimitam a câmara de combustão. Na seção de convecção, ocorre a troca de calor por convecção forçada dos gases quentes que saíram da câmara de combustão atravessando um banco de tubos de água.

Segundo Sulato (2015) o gerador de vapor do tipo aquatubular apresenta como vantagens: alto rendimento térmico; altas pressões de operação; relativa facilidade de inspeção; relativa facilidade para instalação de economizador, superaquecedor e pré-aquecedor. Entretanto as principais desvantagens das caldeiras deste tipo são: custo de aquisição alto; custo de manutenção alto; exigem muita alvenaria.

3.6 MÉTODOS ESPECIAIS DE RECUPERAÇÃO (INJEÇÃO DE VAPOR)

Como citado anteriormente a água é o meio básico usado nos métodos térmicos de geração de calor na superfície através de um gerador de vapor. Ela pode ser aquecida até a temperatura de vapor ou convertida para vapor. Após atingir a temperatura de ebulição, o fornecimento continuado de calor converte cada vez mais água para vapor nessa temperatura.

O objetivo da recuperação térmica é aquecer o óleo existente no reservatório para aumentar a sua produção. A injeção de vapor é um método de especial de recuperação, que consiste em uma injeção desse fluido. Segundo Rosa (2006), na injeção contínua de vapor os poços injetor e produtor são diferentes, conforme ilustra a figura 16. Ao ser injetado vapor no reservatório uma zona de vapor se forma em torno do poço injetor, a qual se expande com a contínua injeção. Nessa zona a temperatura é aproximadamente aquela do vapor injetado na superfície, adiante da zona de vapor forma-se uma zona de água condensada.

FIGURA 16 – ESQUEMA DO PROCESSO DE INJEÇÃO CONTINUA DE VAPOR.

Fonte: Amaral (2013).

A quantidade de calor recebida e retida pela formação produtora determina a resposta ao processo de injeção de vapor. As perdas de calor durante a injeção de vapor são uma função da temperatura de injeção, das características do reservatório e do equipamento usado. As perdas na superfície e no poço podem ser parcialmente controladas, mas nas condições de reservatórios essas perdas não podem ser controladas, sendo consideradas críticas na determinação da viabilidade do projeto.

As perdas de calor do gerador de vapor até o poço injetor dependem do tipo e do comprimento das linhas. Os geradores devem ficar próximos dos poços de injeção e as perdas na linha podem ser posteriormente minimizadas por

isolamento ou enterramento. Além da profundidade, as perdas de calor no poço dependem do tipo de completação do poço, incluindo diâmetro e tipo de revestimento. Para projetos de injeção de vapor os poços de injeção usualmente são completados de uma maneira que minimiza as perdas de calor.

Conforme Rosa (2006), as seguintes características são favoráveis ao método de injeção de vapor:

- Óleos viscosos entre 10 e 20 °API são mais suscetíveis à redução de viscosidade pelo calor.
- Reservatórios com menos de 3000 ft (900 m) de profundidade minimizam as perdas de calor. Portanto, mais calor pode ser transportado por unidade de massa de vapor injetado em reservatórios rasos, de baixa pressão, do que em zonas mais profundas a altas pressões.
- Permeabilidade maior ou igual a 500 mD auxilia o fluxo de óleos viscosos.
- Espessuras de arenito excedendo 30 ft (9 m) a 50 ft (15 m) geralmente são necessárias para limitar as perdas de calor da formação em projetos de injeção de vapor.

O método de injeção de vapor é vantajoso por fornecer maiores vazões de injeção de calor do que outros métodos térmicos. Assim, mais calor é aplicado rapidamente ao reservatório e a eficiência de deslocamento é aumentada pelo calor à proporção que mais óleo flui.

Entretanto, as desvantagens são as perdas de calor gerado na superfície a alto custo, são significativas nas linhas de injeção, nos poços e na formação. Por causa disso, o calor não pode ser utilizado em reservatórios profundos, de pequena espessura ou que tenham baixa permeabilidade. As operações a altas temperaturas no gerador de vapor acarretam riscos de segurança. A falha na cimentação em poços de completação convencional é frequente sob operações térmicas. Os poços novos devem ser completados e equipados para operar a altas temperaturas.

4. METODOLOGIA

Este trabalho caracteriza-se por uma revisão bibliográfica da literatura, havendo sido realizado um levantamento bibliográfico sobre o tratamento da água por campo magnético. Foram utilizadas publicações ou estudos nos idiomas inglês e português, a saber: monografias, dissertações, teses, catálogo de empresas, artigos.

Na etapa de análise e interpretação de resultados foi realizada uma leitura analítica de artigos com a finalidade de obter informações contida nas fontes de forma que estas possibilitassem a obtenção de resultados e conclusões. Foram utilizadas 2 dissertações e 1 artigo, que tratavam sobre os efeitos magnético em algumas propriedades da água através de experimentos em escala laboratorial utilizando o tratamento eletromagnético. Foram utilizados 5 artigos para abordar sobre experimentos em escala não laboratorial realizados em caldeiras e utilizando o equipamento eletromagnético para tratar a água magneticamente.

Na etapa de discussão de resultados foram analisadas e discutidas as abordagens acima citadas a partir do referencial teórico relativo ao tema do estudo. Posteriormente sendo sugerido algumas faixas de eficácia para o tratamento eletromagnético. Ao final, foi analisada e discutida a eficácia da aplicação do campo magnético para condicionar magneticamente a água produzida do Petróleo para geração de vapor.

5. ANÁLISES DE RESULTADOS E DISCUSSÕES

A cristalização do carbonato de cálcio dá origem à calcita. Esse composto forma-se em todas as direções, em torno de um íon original.

Porém, a aragonita é a forma do cristal predominante na temperatura acima de 80 °C; no entanto, conforme Ogino et al. (1987 apud SCHYALY; BRESCIANI; GUARDANI, 2014), após 1.000 minutos converte-se totalmente aragonita em calcita, que é a forma mais dura de cristalização.

> Com base nas afirmações dos trabalhos de Cho et al. (2005) e de Pandolfo (2003) é possível afirmar que o tratamento eletromagnético favorece a precipitação do carbonato de cálcio diminuindo a disponibilidade dos íons para formar a incrustação nas paredes das tubulações. (SCHALY; BRESCIANI; GUARDANI, 2014, p.2).

Conforme Landgraf et al. (2004), essa precipitação do carbonato de cálcio vai depender da temperatura de cristalização da fase, pois entre 80 e 100 °C, ocorre uma inversão. Ao ser aplicado campo magnético é normal formar a aragonita, porém formará calcita. Entretanto, é relevante destacar que não foi encontrada uma explicação para o fenômeno.

Analisando essas informações pode se concluir que o tratamento eletromagnético só deverá ser aplicado a uma temperatura da água de até 70ºC, uma vez que assim o campo magnético irá atuar naturalmente nos cristais de carbonato de cálcio transformando calcita em aragonita. Entretanto, se for aplicado o tratamento eletromagnético a uma temperatura da água acima de 80ºC irá ocorrer a inversão como foi dito por Landgraf et al. (2004), resultando em maiores quantidades de incrustação pelo cristal calcita de carbonato de cálcio.

5.1 ESTUDO NO EFEITO MAGNÉTICO EM OUTRAS PROPRIEDADES DA ÁGUA

Outros efeitos têm sido mencionados na literatura (alteração do pH, da condutividade elétrica, da tensão superficial), mas nenhum deles está comprovado.

No experimento de Porto (1998) foi aplicado um baixo campo elétrico magnético sendo observado o aumento de condutividade elétrica, porém não se observou o aumento da tensão superficial. “Apesar de alguns autores afirmarem que a tensão superficial da água varia substancialmente quando esta é submetida a campos magnéticos.” (PORTO, 1998, p.87).

No experimento de Landgraf et al. (2004) também não foi notado nenhum efeito do campo magnético na tensão superficial. Porém em relação ao pH, os valores são sistematicamente maiores após a aplicação do campo, mas a variação é da ordem de 0,1. A variação do pH ocorreu sendo o oposto da variação da condutividade (quando a variação do pH crescia, a variação da condutividade diminuía). Porém não foi observado mudança da condutividade elétrica após a aplicação do campo magnético. Landgraf et al. (2004) concluiu que as medidas apresentaram baixa repetibilidade, porém não foram identificadas quais as variáveis de procedimento que provocaram tal baixa repetibilidade. “Admitindo que o efeito do campo magnético nas incrustações existe, mas ainda não sabe quais as propriedades físicas realmente são afetadas pela exposição a campo magnético.” (LANDGRAF et al, 2004, p.11)

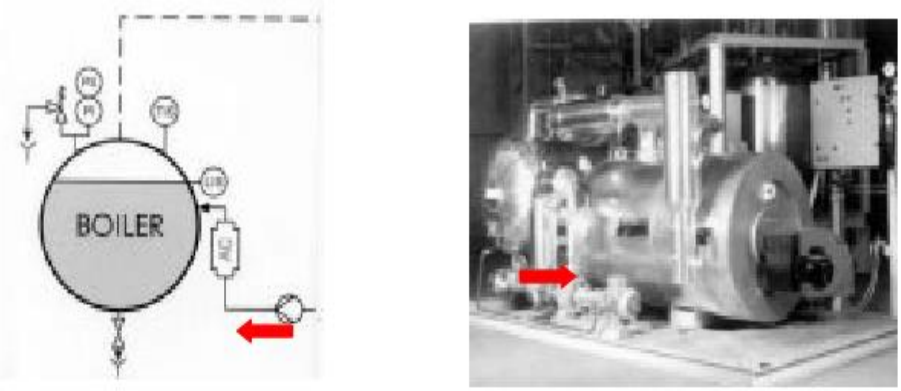
Já no experimento de Costa (2006), foram realizados dois ensaios (um sem aplicação de campo magnético e outro com aplicação de campo magnético), foram observados alguns resultados em relação ao pH, condutividade elétrica, dureza e sólidos totais. Em relação ao pH não se identificou diferença entre os dois ensaios. A condutividade elétrica também não mostra diferença após aplicado o campo magnético. Entretanto, na dureza e os sólidos totais foram observadas variações, onde o experimento com aplicação campo magnético apresenta significativamente menor dureza e menor teor de sólidos, “esta constatação induz que o campo magnético pode aparentemente abrandar a água.” (COSTA, 2006, p.118)

5.2 TRATAMENTO ELETROMAGNÉTICO EM CALDEIRAS

Nesse tópico será apresentado cinco experimentos para observar o efeito do campo magnético na prevenção de incrustações em escala industrial, realizado em caldeiras.

No teste de Gholizadeh, Arabashahi e Benam (2005), foi realizado um experimento numa caldeira, utilizando um equipamento eletromagnético que pode ser observado na figura 17a e 17b. o equipamento produziu campo magnético estático, com intensidade de cerca de 0,6 TESLA e com uma área de campo magnético cerca de 1,25 cm².

FIGURA 17a e 17b - LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÃO DOS DISPOSITIVOS ELETROMAGNÉTICO NUMA CALDEIRA INDUSTRIAL.



Fonte: Gholizadeh, Arabashahi e Benam (2005)

Foi utilizada uma água de torneira com fluxo de 96 m³/d para ser utilizada como água de alimentação da caldeira, onde a direção do fluxo de água foi ajustada para ser perpendicular ao campo magnético. Um filtro de aço inoxidável foi colocado no interior do equipamento para capturar as impurezas em suspensão presentes na água.

A cada três meses foram analisadas e estudadas as condições internas da tubulação e as condições internadas da caldeira e as propriedades químicas da água. O teste durou cerca de 1 ano, sendo observado as seguintes conclusões:

- O tratamento eletromagnético da água exige um fluxo suficientemente rápido e contínuo do fluido. Se as forças de Lorentz são responsáveis pela ação do dispositivo, o fluxo contínuo de fluido é necessário para gerar essas forças.
- Após a análise química da incrustação foi observada que a proporção de aragonita / calcita foi notavelmente aumentada no tratamento magnético.

Portanto, confirmando que a presença do campo magnético muda o sentido do crescimento do cristal para a aragonita, que é um tipo de escala mais suave, menos propensos a formar uma incrustação e que pode ser facilmente removido. (Tabela 07).

- Comparando as incrustações formadas na superfície das caldeiras antes e após os tratamentos eletromagnéticos, verificou-se uma diminuição significativa de incrustação.
- As condições internas de tubulação e as condições internas da caldeira foram encontradas bem protegidos contra a formação de incrustações e corrosão interna.

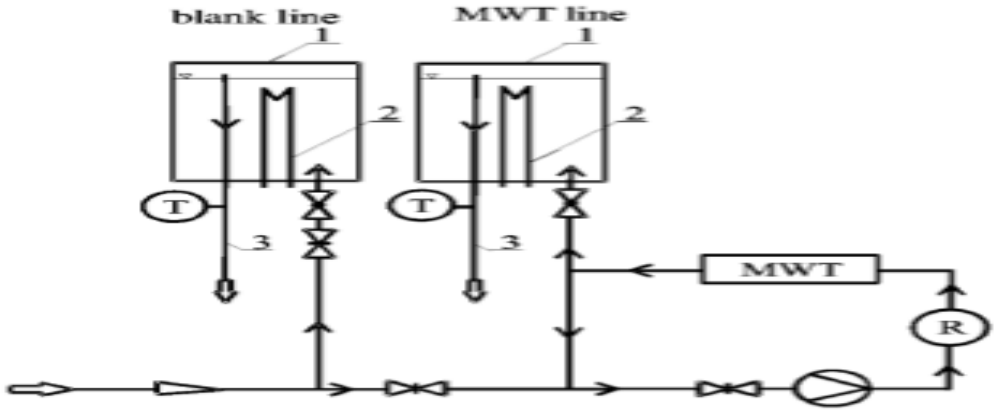
TABELA 07 – RELAÇÃO DE PROPORÇÃO DE ARAGONITA / CALCITA.

Forma dos cristais de $CaCO_3$	**Calcita %**	**Aragonita %**
Água da torneira	65	35
Água tratada magneticamente	27	73

Fonte: Gholizadeh, Arabashahi e Benam (2005)

No teste de Lipus e Dobersek (2007), foram utilizadas duas caldeiras idênticas para comparar os valores das incrustações, onde em uma caldeira foi instalado um dispositivo eletromagnético para tratar a água e na outra caldeira foi utilizada água não tratada para realização do ensaio. (Podendo ser observada a ilustração esquemática na figura 18). Ambas as caldeiras foram alimentadas por água da torneira com um fluxo de 15 m³/d, com dureza de cerca de 250 ppm $CaCO_3$, pH de 7,5 e outros valores podem ser observado na tabela 08. Na caldeira que utilizou o dispositivo eletromagnético água circulou com uma velocidade de 1,25 m/s, uma vez que o equipamento utilizado tinha uma faixa de eficácia que era entre 0,5 a 2 m/s.

FIGURA 18 – ESQUEMA DO TESTE DE CONTROLE DE INCRUSTAÇÃO



Fonte: Lipus e Dobersek (2007)

A tabela 8 mostra a análise da composição quimica da água, utilizada como alimentação da caldeira no teste de Lipus e Dobersek (2007):

TABELA 08 – A COMPOSIÇÃO DE ÁGUA DA TORNEIRA UTILIZADA NO EXPERIMENTO DE LIPUS E DOBERSEK.

Cations	c (mmol/l)	Anions	c (mmol/l)
Ca^{2+}	1.80	Cl^-	0.61
Mg^{2+}	0.71	NO_3^-	0.34
Na^+	0.04	SO_4^{2-}	0.10
K^+	0.02	free CO_2	0.45

Fonte: Lipus e Dobersek (2007)

Após a realização do teste, foi observado que a caldeira que não foi beneficiada com o tratamento eletromagnético da água apresentou incrustação no tubo de saída de forma abundante e compacta, com uma espessura de 3,5 mm. Enquanto na caldeira que utilizou o tratamento eletromagnético, a quantidade de incrustação foi cerca de 70% menor e a espessura foi cerca de 2,5 vezes menor em relação ao ocorrido na caldeira da água não tratada, essa redução em conduções industriais pode acarretar em fornecer cerca de 50% a mais de troca de calor. Após análise química das incrustações, observou-se que as concentrações eram semelhantes, porém havia uma diferença de peso entre as incrustações pois de alguma forma parte da incrustação foi levado pelo fluxo de água.

Analisando essa informação pode-se dizer que isto ocorreu devido a aplicação do campo magnético, modificar a estrutura do cristal de carbonato de

cálcio, transformando calcita em aragonita, que é um cristal mais fácil de ser removido, uma vez que até o próprio fluxo de água pode remover essa aragonita.

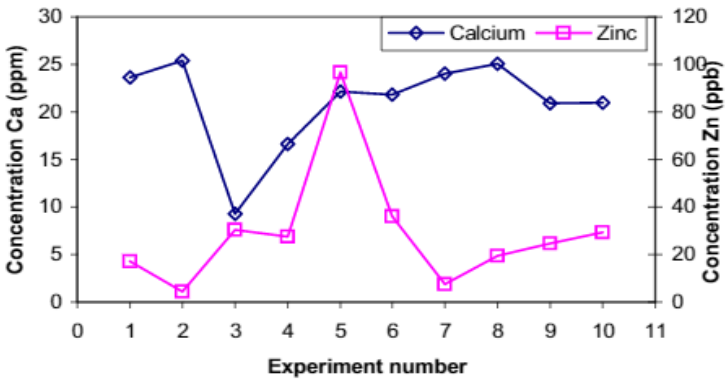
Portanto é observado no experimento de Lipus e Dobersek (2007) que o tratamento eletromagnético pode reduzir a espessura de incrustação na superfície de aquecimento, inibindo a formação de novas incrustações e dissolvendo as já existentes.

No experimento de Smith, Coetzee e Meyer (2006), foram realizadas uma série de 10 ensaios, em cada ensaio foram utilizadas duas caldeiras aquecidas eletricamente.

Do 1º ao 3º ensaio, a água não foi tratada magneticamente, pois esses ensaios tinham o objetivo de determinar a repetibilidade das incrustações. Do 4º ao 6º ensaio, foi aplicado o tratamento eletromagnético da água, porém apenas uma das caldeiras (dispositivo eletromagnético instalado na tubulação da caldeira 2). O 7º ensaio, utilizou água não tratada com os mesmos objetivos dos ensaios 1, 2, e 3. Do 8º ao 10º ensaio, foi aplicado o tratamento eletromagnético novamente em apenas uma das caldeiras, porém o dispositivo eletromagnético foi instalado na tubulação da caldeira 1.

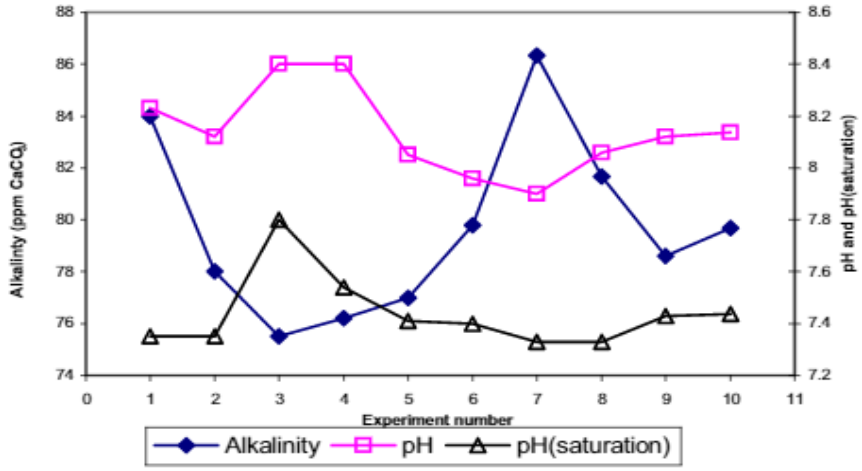
A água utilizada na alimentação das caldeiras foi do abastecimento municipal de água de Johanesburgo (África do Sul) e com uma velocidade de 1,75 m/s. Alguns parâmetros da qualidade da água são observados nos gráficos das figuras 19a e 19b.

FIGURA 19a – CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE CÁLCIO E DE ZINCO DA ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO DURANTE CADA EXPERIÊNCIA.



Fonte: Smith, Coetzee e Meyer (2006)

FIGURA 19b – MÉDIA DA ALCALINIDADE E PH DA ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO DURANTE CADA EXPERIÊNCIA.



Fonte: Smith, Coetzee e Meyer (2006)

Após analisar os gráficos do experimento de Smith, Coetzee e Meyer (2006), utilizando de média aritmética simples (entre valores das concentrações e quantidade de ensaios) pôde chegar as concentrações médias de cálcio em 20 ppm, zinco em 30,5 ppb, alcalinidade em 79,4 de ppm de $CaCO_3$ e pH de 8,15. Observando a figura 19b, pode-se dizer que o pH nunca passou 8,8 o que teria aumentado a solubilidade de $CaCO_3$ com isso diminuindo as incrustações. Não houve alterações significativas na alcalinidade, pois não houve um repetibilidade dos valores durante os ensaios.

O resultado do 1º ensaio foi a diferença de apenas 1,3 % da massa de cálcio entre as duas caldeiras. Enquanto no 2º e 3º ensaio, a diferença foi de apenas 5,3 % e 0,42 %, respectivamente. Analisando esses valores e concluindo que a reprodutibilidade dos ensaios foi aceitável, uma vez que estava praticamente formando a mesma quantidade de incrustações nas duas caldeiras quando não se utilizava o tratamento eletromagnético. Nos 4º, 5º e 6º ensaio, a diferença da massa de cálcio entre as caldeiras foi de 70 %, 33 %, 31 %, respectivamente. Analisando esses valores pode-se concluir que o tratamento eletromagnético teve uma certa eficácia com relação a redução das incrustações, porém no 5º ensaio ocorreu uma grande redução atingindo os mesmos valores obtidos no experimento de Lipus e Dobersek (2007) citado anteriormente, onde também ocorreu a diferença de 70 % da incrustação entre

as duas caldeiras do experimento. No 7º ensaio a diferença foi de 3,7 %, como este ensaio tinha o mesmo objetivo dos 3 primeiros ensaios e os valores foram próximo, então conclui-se que a reprodutibilidade desse 7º ensaio também foi aceitável. Enquanto nos últimos ensaios, de número 8, 9 e 10, a diferença da massa de cálcio nas caldeiras foi de 17 %, 17 %, 32 %, respectivamente. Confirmando também que o tratamento eletromagnético teve uma certa eficácia em relação a redução da massa de cálcio.

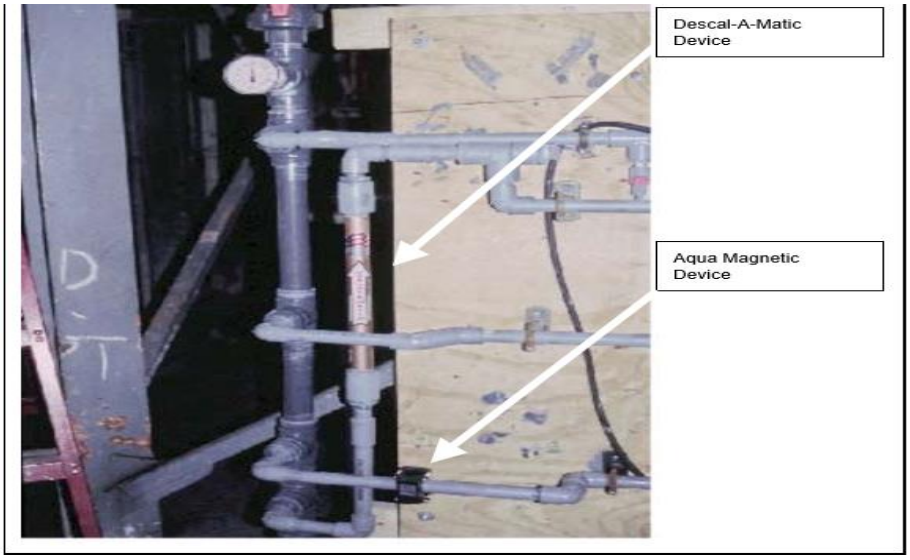
Uma das explicações para a diminuição da massa do precipitado de cálcio, pode ser por conter pequenas quantidades de íons metálicos como o zinco, pois pode reduzir a velocidade de nucleação do carbonato de cálcio $CaCO_3$.

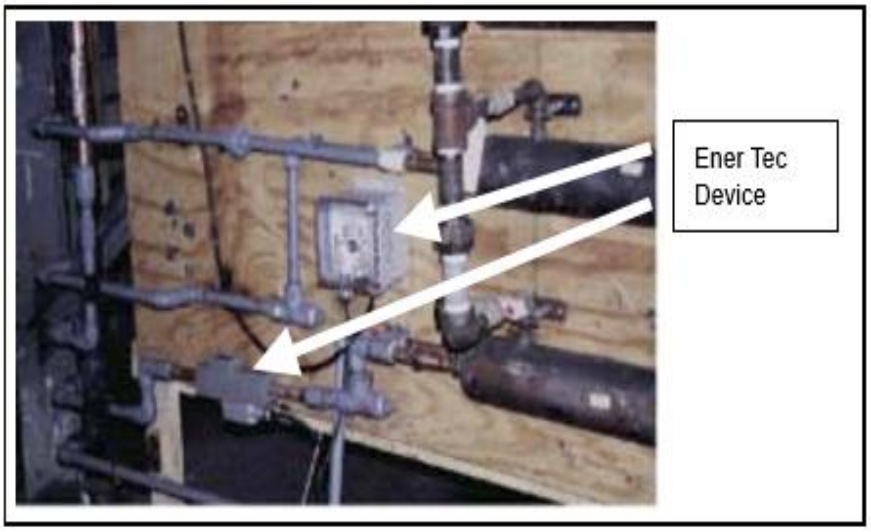
Portanto, para os 6 ensaios (4º, 5º, 6º, 8º, 9º e 10º ensaio) do experimento de Smith, Coetzee e Meyer (2006) utilizando o tratamento eletromagnético a redução da incrustação foi em média de 36 %, concluindo que a redução foi significativa e o tratamento eletromagnético teve eficácia nesse experimento.

Entretanto nos testes de Smothers et al. (2001) e Tuv Nel (2008) o tratamento eletromagnético não foi eficaz.

No teste realizado por Smothers et al. (2001), foram utilizados 3 dispositivos eletromagnético de marcas diferentes para o tratamento eletromagnético da água em caldeiras (figuras 20a e 20b).

FIGURA 20a e 20b – EQUIPAMENTOS ELETROMAGNÉTICO.





Fonte: Smothers et al. (2001).

Foram realizados 3 ensaios e em cada ensaio foram utilizadas duas caldeiras (uma com aplicação do tratamento eletromagnético e outra utilizando água não tratada). A água de alimentação foi utilizada do rio Mississipi (Estados Unidos da América) com um fluxo de 11 m³/d. Pode ser observada a composição da água na tabela 09:

TABELA 09 – ANALISE QUÍMICA DA ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO UTILIZADA NO EXPERIMENTO DE SMOTHERS et al.

Date	09/03/99	09/09/99	09/22/99	10/01/99	10/08/99	10/15/99	11/02/99
M Alkalinity (as $CaCO_3$)	138	134	140	136	144	142	148
Hardness (as $CaCO_3$)	206.7	207.8	220.1	213.6	224.2	220.9	210.0
Calcium (as Ca)	54.80	55.10	56.20	53.80	57.50	56.20	50.20
Magnesium (as Mg)	16.20	16.30	18.50	18.40	18.70	18.70	17.60
Sulfate (as SO_4)	55	57	52	48	50	55	46
Chloride (as Cl)	25	24	35	31	32	26	25
Nitrate (as NO_3)	7.3	6.7	6.5	6.3	6.2	6.1	6.0
Iron (as Fe)	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
Copper (as Cu)	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00
Zinc (as Zn)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sodium (as Na)	10.0	10.3	10.7	10.7	11.3	10.9	12.0
Manganese (Mn)	0.007	0.004	0.006	0.005	0.006	0.005	0.008
Total Dissolved Solids	272	276	313	270	265	282	258
pH	7.61	7.69	7.64	7.71	7.72	7.86	7.71
Temperature (°C)	27.0	27.2	22.1	20.6	17.7	17.7	15.1
Silica (as SiO_2)	9.6	9.3	9.2	7.3	7.7	7.8	7.1
Ammonia (as NH_4)	3.9	4.0	8.1	6.8	4.6	4.0	2.3
Conductivity (μS/cm)	453	459	505	517	544	476	472
Results are mg/L except for conductivity, pH, and temperature. No significant amount of phosphate was found in any of the samples.							

Fonte: Smothers et al. (2001).

Segundo Smothers et al. (2001) os flocos de incrustação eram visíveis durante todo o teste. Enquanto para os três ensaios (cada ensaio com um dispositivo eletromagnético de marca diferente) a cristal do carbonato de cálcio foi a calcita, uma vez que era para ter sido alterado para aragonita com o tratamento eletromagnético da água, mas isso não ocorreu. Analisando esse resultado pode-se concluir que ocorreu algum fator que não foi detectado no experimento, uma vez que para ocorrer essa inversão de aragonita para calcita, a água deveria está a uma temperatura acima de 80 ºC e observando a tabela 09, a temperatura da água não passou dos 30 ºC.

As diferenças da incrustação entre as caldeiras utilizadas em cada ensaio foram bem pequenas, para os dispositivos utilizados nos ensaios 1 e 2, ocorreu uma redução de apenas 3,8% e 3,3%, respectivamente. Enquanto com o dispositivo 3, não ocorreu uma redução significativa da incrustação.

Portanto para o experimento de Smothers et al. (2001), concluiu-se que nos ensaios a incrustação foi produzida constantemente durante toda a tubulação e caldeira, tornando eficaz isolante térmico. Concluindo que o teste não indica nenhuma vantagem para o tratamento eletromagnético.

No experimento de Tuv Nel (2008), foram realizados 4 ensaios em uma caldeira (figura 21) com pressão de 10 bar, 250 kW/m² de fluxo de calor, e potência máxima. Cada ensaio foi utilizado um dispositivo eletromagnético de marca diferente. (Para não citar os nomes das marcas foram chamados de dispositivos A, B, C e D). Após os ensaios, foi verificado que os dispositivos B, C e D não tiveram nenhuma influência sobre o controle das incrustações, porém o dispositivo A, mostrou algum efeito benéfico.

FIGURA 21 – CALDEIRA UTILIZADA NO EXPERIMENTO DE TUV NEL

Fonte: Tuv Nel (2008).

A análise química da água pode ser observada na tabela 10 (para água não tratada) e figura 22 (mostra imagem da tabela para a água tratada com os dispositivos eletromagnético).

TABELA 10 – ANÁLISE QUÍMICA DA ÁGUA NÃO TRATADA PARA O EXPERIMENTO DE TUV NEL.

		Untreated Water				
			Feedtank			*Boiler*
Component	*Unit*	*23/02/04 pre-trial*	*23/03/04*	*27/03/04 Post-trial*	*07/06/04 Post-trial*	*12/03/04*
pH			8.1			9.6
TDS	ppm		385			1750
Conductivity	uS/cm	500	560	600	650	2500
Total hardness	ppm $CaCO_3$	142	104	151	187	119
Total alkalinity	ppm HCO_3		12			4
Calcium	ppm		44			120
Copper	ppm		0.02			0.03
Iron	ppm		0.11			0.15
Potassium	ppm		3.9			28
Magnesium	ppm		9.6			1
Manganese	ppm		0.02			<0.01
Sodium	ppm		53			370
Silicon	ppm					
Chloride	ppm		110			580
Nitrite	ppm		<1			<1
Nitrate	ppm		<5			<5
Sulphate	ppm		18			66

Fonte: Tuv Nel (2008).

FIGURA 22 – IMAGEM DA TABELA DA ANÁLISE QUÍMICA DA ÁGUA TRATADA PARA O EXPERIMENTO DE TUV NEL

		Device A					*Device B*			*Device C*			*Device D*		
		Feedtank			*Boiler*		*Feedtank*	*Boiler*		*Feedtank*	*Boiler*		*Feedtank*	*Boiler*	
		19/08/04	*17/09/04*	*26/08/04*	*09/09/04*	*17/09/04*	*25/08/05*	*25/08/05*	*28/08/05*	*09/08/05*	*09/08/05*	*14/08/05*	*21/04/05*	*21/04/05*	*27/04/05*
Component	*Unit*						*pre-trial*	*pre-trial*	*post-trial*	*pre-trial*	*pre-trial*	*post-trial*	*pre-trial*	*pre-trial*	*post-trial*
pH		7.06	7.9	10.9	10.9	11.1	8.2	9.7	10.5	7.8	10.4	10.2	8.2	10.6	10.3
TDS	ppm	455	385	1610	1750	1750	522	715	1720	594	894	2360	644	1220	1930
Conductivity	uS/cm	651	564	2300	2480	2480	717	1009	2430	816	1261	3260	900	1668	2690
Total hardness	ppm $CaCO_3$	210	180	64	44	44	133	92	79	129	112	135	145	116	130
Total alkalinity	ppm HCO_3		240	182		182	24.46	3.05	4.2	22.81	3.41	3.66	15.49	3.29	3.66
Calcium	ppm		55.31	18.93		25.7	87	70	61	83	89	94	100	90	97
Copper	ppm		0.51	0.03		0.05	0.05	0.06	0.02	0.02	0.01	<0.01	0.02	0.01	<0.01
Iron	ppm		3.5	0.77		2.89	0.08	0.1	<0.03	0.09	0.21	0.07	0.11	0.25	0.05
Potassium	ppm		3.66	30.55		33.69	4	9.3	33	4.2	11	30	4.1	14	21
Magnesium	ppm		8.68	1.68		4.2	12	0.71	0.84	13	1.8	2.1	15	1.6	1.7
Manganese	ppm		0.12	0.02		0.07	0.26	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.21	<0.01	<0.01
Sodium	ppm		51.24	402.1		462.1	50	110	330	62	140	430	72	200	350
Silicon	ppm		5.76	2.85		3.93	4.3	0.71	0.51	4.2	0.21	0.5	4.4	0.22	0.38
Chloride	ppm		50	390		410	67	150	550	102	242	840	107	368	690
Nitrite	ppm		<0.3	<0.3		<0.3	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<1
Nitrate	ppm		7.9	14		<0.5	<1	<1	<1	<1	<1	0.43	0.11	<1	<0.1
Sulphate	ppm		14	140		120	86	180	180	83	180	140	110	170	110

Fonte: Tuv Nel (2008).

Observando a tabela 10 da análise química da água sem tratamento, notou-se uma dureza elevada da água, tendo como principal componente o carbonato de cálcio. Entretanto observando a figura 22, notou-se que a concentração de ferro no dispositivo A foi maior do que com os outros

dispositivos. Portanto analisando esses resultados pode-se concluir que os níveis de concentrações de ferro podem ser significativos, uma vez que por conter pequenas quantidades de íons metálicos como o ferro, pode reduzir a velocidade de nucleação do $CaCO_3$, tornando o dispositivo A eficaz no tratamento da redução da incrustação.

Porém a relação entre uma maior concentração de ferro e a melhora na eficiência do dispositivo A, não foi conclusiva. Então foi realizado um novo ensaio com o dispositivo A, com o objetivo de avaliar a relação entre a concentração de ferro e a eficiência do dispositivo A, foi utilizado uma concentração de ferro menor do que a concentração observada no ensaio anterior do dispositivo A, pois caso tivesse alguma relação, a eficiência também iria diminuir. Porém para acontecer a diminuição da concentração de ferro, toda a composição da água foi alterada também, como pode ser observado na figura 23.

FIGURA 23- IMAGEM DA TABELA DA ANÁLISE QUÍMICA DA ÁGUA TRATADA PARA O NOVO ENSAIO DO DISPOSITIVO A.

Component	Unit	Initial device trials					Repeat trials				
		Feedtank		Boiler			Feedtank			Boiler	
		190804	170904	260804	080904	170904	221106	71206	151206	71206	151206
							1	2	3	2	3
pH		7.06	7.9	10.9	10.9	11.1	7.3	7.7	7.7	11	11
TDS	ppm	455	385	1610	1750	1750	66	170	220	1200	1100
Conductivity	uS/cm	651	564	2300	2480	2480	120	290	380	2100	1900
Total hardness	ppm $CaCO_3$	210	180	64	44	44	50	99	110	240	73
Total alkalinity	ppm HCO_3		240	182		182	30	90	100	52	44
Calcium	ppm		55.31	18.93		25.7	17	33	37	80	28
Copper	ppm		0.51	0.03		0.05	0.3	0.25	0.21	0.42	0.03
Iron	ppm		3.5	0.77		2.89	6.3	1.9	1.4	11	0.23
Potassium	ppm		3.66	30.55		33.69	0.57	2.6	3.7	34	39
Magnesium	ppm		8.68	1.68		4.2	1.7	3.9	4.7	10	0.61
Manganese	ppm		0.12	0.02		0.07	0.05	0.08	0.17	0.34	0.01
Sodium	ppm		51.24	402.1		462.1	5.5	26	33	370	350
Silicon	ppm		5.76	2.85		3.93	2	2.7	2.9	4.6	0.9
Chloride	ppm		50	390		410	6.3	29	37	450	390
Nitrite	ppm		<0.3	<0.3		<0.3	0.43	0.27	0.22	3.6	0.2
Nitrate	ppm		7.9	14		<0.5	1.1	0.57	0.85	13	4.6
Sulphate	ppm		14	140		120	21	30	36	190	230

Fonte: Tuv Nel (2008).

O dispositivo A não foi eficaz para o ensaio com essa nova composição da água. Concluindo que a capacidade dos dispositivos eletromagnéticos em controlar a incrustação é criticamente dependente da composição da água de alimentação. Segundo Tuv Nel (2008), para confirmar a eficácia dos dispositivos

seria necessários testes de 14 meses sendo realizado na instalação industrial para qual foram solicitadas, pois confirmaria a segurança de operação por um período correspondente ao ciclo de inspeção de caldeiras.

5.3 TRATAMENTO ELETROMAGNÉTICO PARA ÁGUA PRODUZIDA

Analisando os resultados obtidos nos experimentos de Gholizadeh, Arabshahi, Benam (2005), Lipus e Dobersek (2007), Smith, Coetzee, Meyer (2006), Smothers et al. (2001) e Tuv Nel (2008), principalmente os experimentos em que o tratamento eletromagnético foi eficaz, pode-se sugerir algumas faixas de eficácia. Se a água de alimentação de uma caldeira estiver dentro dessas faixas, o tratamento eletromagnético terá grande possibilidade de ser eficiente nessa água.

As faixas de eficácia são:

- Vazão: 15 a 100 m³/d
- Velocidade da água: 0,5 a 2 m/s
- Dureza: 200 a 250 ppm
- pH: 7,5 a 8,4

Lembrando que essas faixas foram feitas baseando-se apenas nos dado e resultados obtidos nos experimentos citados neste trabalho.

Como o trabalho é voltado para uma aplicação na indústria do petróleo. Pode-se comparar os dados e resultados obtidos nos experimentos apresentados anteriormente com dados e características da água produzida do petróleo. Fazendo algumas associações e relações de proporcionalidade, poderá concluir se o tratamento eletromagnético terá uma eficácia ao tratar a água produzida para geração de vapor.

Analisando as tabelas 11 e 12, pode-se observar que a composição dessa água produzida terá uma certa tendência a formar incrustações do tipo Carbonato de cálcio [$CaCO_3$], sulfato de cálcio [$CaSO_4$], Brucita [$Mg(OH)_2$], o ferro tende a formar o Hidróxido ferroso [$Fe(OH)_2$], e o cobre também tende a formar incrustações.

Por ser observado uma concentração elevada de dureza, a incrustação principal e mais comum na água produzida será a de carbonato de cálcio, como citado anteriormente esse tipo de incrustação é a mais comum nos geradores de vapor.

As tabelas 11 e 12 exibem as análises físico-químicas que se referem aos parâmetros presentes na água produzida com traços de óleo, que é recebida pela UTPF do polo industrial de Guamaré. Os dados apresentados foram fornecidos pela empresa PETROBRAS, ao órgão ambiental estadual competente, IDEMA, relacionados à composição da água produzida em um trimestre, de 1º de novembro de 2014 a 31 de janeiro de 2015.

TABELA 11 - ENSAIO REFERENTE AOS PARÂMETROS PRESENTES NA ÁGUA DE PRODUÇÃO.

Parâmetros	Situação	Unidades
DBO 5 (entrada)	55,11	mg/L
DBO 5 (saída)	19,05	mg/L
Eficiência de remoção de DBO	65	%
DQO	58,000	mg/L
Material Sedimentável	0,2	ml/L
Dureza Total (CaCO3)	795,0	mg/L
Oxigênio dissolvido	0,150	mg/L
Ph	6,83	-
Salinidade (NaCl)	3839,21	mg/L
Sólidos Suspensos	8,630	mg/L
Sólidos Totais Dissolvidos	5089	mg/L
Temperatura	38	°C
Turbidez	2,48	UNT

Fonte: IDEMA

TABELA 12 - ENSAIO REFERENTE AOS COMPOSTOS INORGÂNICOS PRESENTES NA ÁGUA DE PRODUÇÃO.

Parâmetros	Resultados (mg/L)
Arsênio total	< 0,0037
Bário total	1,777
Boro total	< 0,2
Cádmio total	< 0,0002
Chumbo total	< 0,0026
Cianeto livre	< 0,0025
Cianeto total	< 0,0025
Cobre dissolvido	< 0,0011
Cromo hexavalente	0,05
Cromo trivalente	< 0,05
Estanho total	< 0,0015
Ferro dissolvido	0,0308
Fluoreto total	1,841
Índice de Fenóis	0,192
Manganês dissolvido	0,271
Mercúrio total	< 0,0017
Níquel total	< 0,0008
Nitrato	0,3317
Nitrito	< 0,1665
Nitrogênio Amoniacal Total	4,80
Prata total	< 0,0023
Selênio total	< 0,0100
Sulfeto	0,47500
Zinco total	0,011

Fonte: IDEMA

Comparando as tabelas 11 e 12 com as tabelas 08, 09, 10, e as figuras 22 e 23 pode-se observar uma semelhança com a figura 22 que é uma imagem da tabela da análise química da água tratada para o experimento de Tuv Nel (2008). Portanto foi observada uma semelhança entre a composição química da água produzida mostrada nas tabelas 11 e 12 e a análise química da água utilizada no tratamento eletromagnético do dispositivo A do experimento de Tuv Nel (2008).

O tratamento eletromagnético seria utilizado com objetivo de abrandamento (diminuição da dureza) da água produzida e o combate e prevenção das incrustações, pois observando a tabela 11 pode notar-se uma elevada dureza na água produzida.

Os dispositivos eletromagnéticos devem ser instalados a montante da caldeira de geração de vapor, porém a jusante da bomba que irá bombear a água produzida para o gerador de vapor. Contudo para o caso da indústria do petróleo, os dispositivos eletromagnéticos devem ser mais potentes e em maiores quantidades, uma vez que estamos tratando de uma grande escala industrial com dureza e vazões elevadas, sendo propício a formação de grande quantidade de incrustação. Segundo Pereira Jr *et al*. (2008) é utilizado em torno de 500 m³/d de água produzida para geração de vapor em Fazenda Belém (Aracati/CE).

Considerando que a dureza da água produzida é medida em ppm de carbonato de cálcio, então ao sofrer aquecimento, a solubilidade do $CaCO_3$ irá diminuir (inversamente proporcional a temperatura) e precipitará cristais de carbonato de cálcio, chamado calcita, que são compostos mais duros e aderente a tubulação, formando as incrustações. Entretanto ao utilizar o tratamento eletromagnético, a força de Lorentz através do campo eletromagnético irá agir nos cátions e ânions presente na água produzida, principalmente no carbonato de cálcio (Ca^{2+} e CO_3^-) antecipando a nucleação e cristalização. Formando um outro tipo de cristal de carbonato de cálcio, chamado aragonita, uma forma menos dura que a calcita e mais fácil de ser removida, essa remoção pode até ser feita pelo próprio fluxo da água, onde esses cristais ficarão suspensos na água, sendo retirada por filtros e/ou pelas purgas dos geradores de vapor.

O tratamento eletromagnético também irá prevenir a formação de novas incrustações, pois ocorrerá um fenômeno com a água produzida que estará recebendo o tratamento, chamado efeito memória. Segundo Landgraf et al. (2004), até o momento não há teoria científica que explique esse efeito. Porém explicam que mesmo após cessar o tratamento, a água irá permanecer com o efeito do tratamento por um período em torno de 48 a 72 horas.

A desvantagem do tratamento eletromagnético é que na literatura cientifica não há modelo teórico que explique satisfatoriamente o fenômeno. Sendo utilizada apenas uma abordagem empírica e experimental.

Mas se realizar uma breve comparação, da aplicação do tratamento na água produzida com o tratamento eletromagnético utilizado com o dispositivo A no experimento de Tuv Nel (2008), uma análise pode ser conclusiva erroneamente pois por terem composições semelhante, não quer dizer que o tratamento eletromagnético na água produzida utilizando o mesmo dispositivo A irá ser eficaz igualmente ao experimento de Tuv Nel (2008).

Segundo Tuv Nel (2008), a capacidade dos dispositivos eletromagnéticos em controlar a incrustação é criticamente dependente da composição da água de alimentação. Portanto para uma instalação industrial com água de alimentação sendo a água produzida referente a composição da tabela 11 e 12, teria que ser necessários testes e ensaios durante um período correspondente ao ciclo de inspeção dos geradores de vapor para analisar a eficácia do tratamento eletromagnético da água produzida para geração de vapor.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado um estudo do tratamento por campo magnético tendo como objetivo o combate e prevenção da incrustação em tubulações e geradores de vapor. A incrustação é um dos principais problemas industriais, e na indústria do petróleo não seria diferente, uma vez que a água produzida contém uma elevada concentração de carbonato de cálcio, sendo considerado de dureza elevada como pode ser observado na tabela 11.

Os fabricantes dos dispositivos eletromagnéticos vendem seus produtos com inúmeras eficácias, por exemplo, abrandamento da água (diminuição da dureza), efeito memoria, aumento de pH, redução da tensão superficial e etc., porém a literatura cientifica não confirma e nem comprova essas afirmações, uma vez que tudo é observado apenas de forma empírica através de experimentos e ensaios, mas a repetibilidade e reprodutibilidade desses experimentos são muito baixas.

Através das tabelas 11 e 12, obtivemos a análise química da composição da água produzida no polo industrial de Guamaré, foi feito uma comparação com as águas de alimentações dos experimentos apresentado neste trabalho, e sendo observado uma semelhança com a água de alimentação do dispositivo A do experimento de Tuv Nel (2008).

Apesar do ensaio com o dispositivo A ter tido uma eficácia no experimento de Tuv Nel (2008), o tratamento eletromagnético da água produzida como água de alimentação de uma caldeira, utilizando o mesmo dispositivo A não pode se afirmar que irá ter uma eficácia. Uma vez que a capacidade dos dispositivos eletromagnéticos em controlar a incrustação é criticamente dependente da composição da água de alimentação. Portanto tendo que realizar teste e ensaios diretamente com água produzida, que provavelmente terá que ser usado dispositivos mais potentes e/ou em maiores quantidades, uma vez que a escala industrial é maior sendo as tubulações de maiores diâmetros e com maiores vazões.

Teoricamente o tratamento eletromagnético na água produzida poderá ser eficaz, porém é não uma afirmação conclusiva, uma vez que neste trabalho não

foram feitos testes laboratoriais e nem ensaios de campos, para comprar a eficácia do tratamento na prática. Neste trabalho consiste apenas em um estudo teórico.

Ficando sugestões para os próximos estudos nessa área, realizar teste laboratoriais com água produzida do petróleo, para observar como o campo magnético irá atuar, na pratica, numa água com composição contendo dureza bastante elevada e metais, e óleo e graxas. E o mais importante, fazer testes de campo nas instalações a qual pretende utilizar o tratamento eletromagnético. Realizando testes longos, em torno de um período de 14 meses (ciclo de manutenção de uma caldeira), para comprovar a eficácia dos dispositivos eletromagnéticos em uma grande escala industrial.

7. REFERÊNCIAS

ÁGUABRANDA – **Tratamento de águas industriais**. Disponível em: < http://aguabranda.com.br/Index_Eletromagnetico.asp > acesso em 25 ago. 2015.

BEZERRA, M. A. S. **Desenvolvimento de um Destilador Solar para Tratamento de Águas de Produção de Petróleo com Vistas a sua Utilização na Agricultura e Geração de Vapor.** 90 f. Dissertação de Mestrado. Programa de PósGraduação na Engenharia Química. Área de Concentração: Aplicação da Engenharia Ambiental na Preservação de Recursos Naturais do Rio Grande do Norte. UFRN. 2004.

BIZZO, W. A. **Geração, distribuição e utilização do vapor**. EM 722, 2003, cap. 4.

COSTA, W. **Estudo do condicionamento magnético da água para fins industriais**. Dissertação de mestrado em Engenharia de Processos químicos e bioquímicos, Centro Universitário do instituto Mauá de tecnologia, 2006.

FERNANDES JUNIOR, W. E. **Projeto e Operação em Escala Semi-industrial de um Equipamento para Tratamento de Águas Produzidas na Indústria do Petróleo Utilizando Nova Tecnologia: Misturador-Decantador à Inversão de Fases**. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2006.

GHOLIZADEH M.; ARABSHAHI H.; BENAM M.R. **The effect of magnetic field on scale prevention in the industrial boilers**. International Journal of Applied Chemistry, Vol.1 No.1, pp. 84-89, 2005.

HIDROMAG - Disponível em: < http://www.hidromag.com/tecno.php > acesso em 20 ago. 2015.

LANDGRAF, F.G.V.; GARCIA, P. M. P.; POÇO, J. G. & GIULIETTU, M. **Efeito do campo Magnético em soluções aquosas.** Trabalho adaptado do apresentado no CBECIMAT 2004 – Porto Alegre – RS.

LAUXEN, D. H. **Avaliação do pré-tratamento eletromagnético para o processo de osmose inversa.** Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

LIPUS L. C.; DOBERSEK D. **Influence of magnetic field on the aragonite precipitation**. Chemical engineering science 62. pp. 2090-2095, 2007.

PONTES, J. P. S. D. **Tratamento eletroquímico da água produzida sintética para remoção de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos**. Dissertação de mestrado, programa de Pós-graduação em Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.

PORTO, M. E. G. **Alterações de propriedade biológicas e físico-químicas da água induzidas por campos magnéticos**. Dissertação de mestrado, 1998, Unicamp, Campinas.

PEREIRA JR, O. A.; TROVALLONI, A. M.; NASCIMENTO, J. F.; MELO, M. V.; SANTOS, L. A. D. **Eliminação de captação de aqüífero via reúso da água produzida para fins de geração de vapor no campo de fazenda Belém**. 6 f. trabalho apresentado no XV CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. 2008.

SCALEWATCHER – **How scalewatcher works**. Disponível em: < http://purewater-airfilters.com/pages/How-Scalewatcher-Works.html > acesso em 25 ago. 2015.

SCHALY, R; BRESCIANI, É.; GUARDANI, R. **Estudo da viabilidade de tratamento físico para água de resfriamento**. Trabalho adaptado do apresentado no COBEQ 2014 – Florianopolis – SC

SMITH, C.; COETZEE, P.P**.;** MEYER, J. P. **The effectiveness of a magnetic physical water treatment device on scaling in domestic hot-water storage tanks.** ISSN 0378-4738 = Water SA Vol. 29 No. 3, 2006.

SMOTHERS K. W.; CURTISS, C. D.; GARD, B. T.; STRAUSS, R. H.; HOCK, V. F. **Demonstration and evaluation of magnetic descalers**. 104 f, 2001

SOARES, L. L. **Projeto conceitual de um sistema de tratamento e reaproveitamento da água produzida de petróleo disposta em um aterro industrial real.** 55 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia do Petróleo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. 2013.

SONICAL: **Catalogo Prodotti Sonical**, 2012

SULATO, A. A. **Apostila – Máquinas térmicas AT – 101**. Curso de Engenharia Industrial Madereira, Universidade Federal do Paraná. 2015, 40 f.

THE MAGNET SOURCE – **Water treatment magnets**. Disponível em: < http://www.magnetsource.com/Catalog%20PDFs/watermags.pdf > acesso em 20 ago. 2015.

TROVATI, J. **Apostila - Tratamento de água para geração de vapor: caldeiras**. Curso on-line "tratamento de água – geração de vapor". 80 f.

TUV NEL. **Treatment of feed water for steam boilers using magnetic devices**. Program for the Health and safety executive 2008. East Kilbride, Glasgow. 61 f. 2008.

VIDAURRE, C. G. **Uso da tecnologia magnética para tratar água.** 5 f. Disponivel em: < http://www.hidromag.com/tecno.php > acesso em: 15 ago. 2015.