

PRINCÍPIOS BÁSICOS DE TRATAMENTO DE ÁGUAS INDUSTRIAIS

Metalclean Produtos Químicos Ltda.
Avenida Emilio Chechinato, n.º 4.035 – Bairro das Chaves
Itupeva/SP – CEP: 13.295-000
Tel.: (11) 4591-3736
e-mail: mc@metalcleanaguas.com.br
site: www.metalcleanaguas.com.br

ÍNDICE

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO AO ESTUDO DAS ÁGUAS

1. Propriedades físicas.....	4
2. Propriedades químicas.....	6
3. Propriedades biológicas.....	8
4. Principais contaminantes.....	9

CAPÍTULO II – TRATAMENTO EXTERNO DAS ÁGUAS

1. Introdução.....	12
2. Processos de tratamento externo.....	12

CAPÍTULO III – TEORIA DA INCRUSTACÃO

1. Introdução.....	17
2. Agentes de incrustação.....	17
3. Métodos de controle da incrustação.....	19

CAPÍTULO IV – ESTUDO DA CORROSÃO DE SISTEMAS DE ÁGUAS INDUSTRIAIS

1. Introdução.....	21
2. Conceitos básicos.....	21

CAPÍTULO V – CONTROLE MICROBIOLÓGICO

1. Introdução.....	28
2. Os microorganismos.....	28
3. Cinética do desenvolvimento microbiológico.....	29
4. Problemas causados por microorganismos.....	31
5. Produtos de tratamento.....	32

CAPÍTULO VI – SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

1. Introdução.....	33
2. Tipos de sistemas.....	33
3. Noções gerais sobre torres de resfriamento.....	35
4. Tipos de torres de resfriamento e sua características.....	36
5. Controles de tratamento e dosagens de produtos.....	39

CAPÍTULO VII – SISTEMAS DE GERAÇÃO DE VAPOR

1. Introdução.....	44
2. O fenômeno da combustão.....	44
3. Os componentes de um sistema gerador de vapor.....	47
4. Equações de balanço de massa em geradores de vapor	49
5. Métodos de controle em sistemas de geração de vapor.....	50
6. Sistemas de descargas.....	52
7. Alimentação dos produtos químicos recomendados.....	54
8. Pré-limpeza e pré-tratamento de caldeiras.....	55
9. Proteção de caldeiras paradas.....	56
10. Inspeções de segurança.....	58
11. Controles analíticos.....	59

APÊNDICES

APÊNDICE “A” – Especificações de resinas.

APÊNDICE “B” – Esquema típico de um equipamento de troca iônica.

APÊNDICE “C” – Diagrama esquemático de um desmineralizador de leito misto.

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO AO ESTUDO DAS ÁGUAS

1. PROPRIEDADES FÍSICAS DA ÁGUA

A água, líquido indispensável à vida, é o resultado da combinação entre dois átomos de hidrogênio (H) e um átomo de oxigênio (O), tendo como fórmula química H_2O . As ligações entre os átomos de hidrogênio e oxigênio são representadas por um modelo triangular, conforme a figura 1.

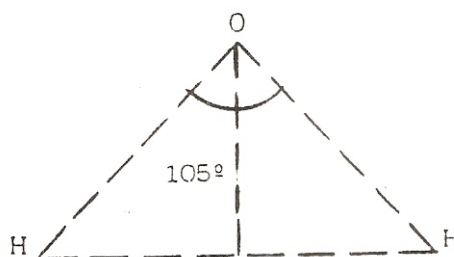


Figura 1

A estrutura da molécula da água depende do estado físico em que ela se encontra. Esses estados físicos vão determinar certas propriedades, que estudaremos a seguir.

1.1. ESTADOS FÍSICOS DA ÁGUA

a) ESTADO SÓLIDO

No estado sólido, as moléculas da água estão fortemente agregadas, através de forças denominadas de Coesão. A estrutura cristalina é representada por uma molécula central de água e quatro moléculas periféricas resultando em uma conformação tetraédrica.

b) ESTADO LÍQUIDO

Quando se encontra no estado líquido, a força de coesão entre suas moléculas diminui consideravelmente, surgindo então, as ligações de hidrogênio (ou pontes de hidrogênio), que consistem em um átomo de hidrogênio de determinada molécula, ligar-se ao átomo similar da molécula vizinha.

c) ESTADO GASOSO (VAPOR)

Quando no estado gasoso, as moléculas da água estão num processo de desorganização e em grande velocidade de deslocamento. A estrutura cristalina pode ser representada exatamente como nos mostra a figura 1, já apresentada.

1.2. CALOR LATENTE

Essa propriedade é definida como sendo a quantidade de calor fornecida a determinado corpo, a fim de que haja mudança em seu estado físico, sem que isso implique em variação na sua temperatura.

a) CALOR DE FUSÃO

É a quantidade de calor fornecida a um corpo, para sua passagem do estado sólido ao estado líquido. O calor de fusão é da ordem de, aproximadamente 80 Kcal/kg, ou seja, para que 1,0 kg de água passe do estado sólido para o líquido é necessário o fornecimento de uma quantidade de calor de 80 Kcal. O Kcal é a unidade de quantidade de calor no sistema MKS.

b) CALOR DE VAPORIZAÇÃO

É definido como sendo a quantidade de energia, em forma de calor, cedida a um corpo, para que o mesmo passe do estado líquido para o estado de vapor. Para a água, o valor desta grandeza é de, aproximadamente, 540 Kcal / kg.

1.3. TENSÃO SUPERFICIAL

Por definição, a tensão superficial é uma força de tração T , exercida sobre a superfície de um líquido, com a finalidade de reduzir ao máximo o seu volume. A unidade dessa grandeza no sistema MKS, é o N/cm^2 .

Para a água a $18^\circ C$, a tensão superficial é de $7,3 \times 10^{-4} N/cm^2$. A presença de sais dissolvidos aumenta consideravelmente a tensão superficial de uma solução. Como exemplo, podemos citar uma solução de cloreto de sódio (NaCl), que com concentração de 1 mol/l, possui uma tensão superficial da ordem de $7,46 \times 10^{-4} N/cm^2$.

O aumento da tensão superficial, tendo a causar a formação de espumas em sistemas de tratamento de águas industriais. Os produtos utilizados para diminuir essa tensão superficial são denominados TENSO-ATIVOS.

1.4. CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

É definida como a facilidade que uma solução aquosa oferece à passagem de uma corrente elétrica. A presença de compostos iônicos, como os sais dissolvidos em determinadas soluções, ou seja, quanto maior a condutividade de determinadas soluções, maior a presença de eletrólitos.

2. PROPRIEDADES QUÍMICAS DA ÁGUA

2.1. SOLUBILIDADE DE UMA SUBSTÂNCIA

Sabemos que toda matéria existente na natureza é composta de átomos que se combinam com outros, resultando em moléculas, mais complexas. Já descrevemos que o fator determinante do estado físico da matéria, é a interação que existe entre átomos e moléculas. Essas forças de interação podem ser classificadas como:

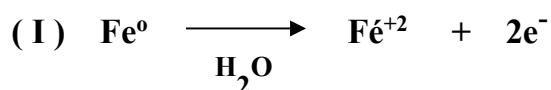
- a) Ligações interatômicas – são as ligações covalentes ou iônicas, caracterizadas por fortes ligações químicas;
- b) Ligações intermoleculares – determinadas pelas ligações de coesão entre as moléculas como, por exemplo, as pontes de hidrogênio;
- c) Ligações de fraca atração – representadas pelas forças de Vander Waals.

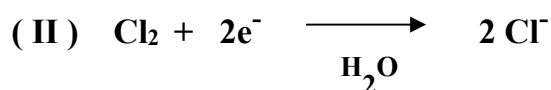
Quando um corpo é imerso em solução aquosa, e há a destruição dessas forças de coesão citadas, dizemos que ocorreu o fenômeno da dissociação. A água, sendo um composto bipolar, possui a propriedade de destruir, total ou parcialmente, as diversas ligações entre átomos e moléculas, dando origem a novas ligações e novas estruturas. Nesse caso, dizemos que ocorreu uma reação química verdadeira, ou uma solvatação. Quando a solvatação é completa, o fenômeno é denominado de DISSOLUÇÃO. O corpo que “sofre” a dissolução é denominado SOLUTO, e o meio no qual ele é imerso, SOLVENTE.

Cada substância possui uma capacidade própria de dissolução, que é definida como COEFICIENTE DE SOLUBILIDADE, e que varia de acordo com o estado físico e a composição química de cada substância.

2.2. OXI-REDUÇÃO

Para um melhor entendimento deste tópico, vamos apresentar alguns conceitos básicos sobre o fenômeno da oxi-redução, a partir das seguintes reações químicas:



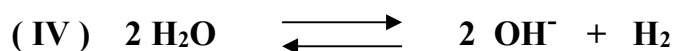
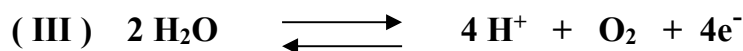


Podemos observar que nas duas equações apresentadas, os átomos de ferro e cloro saíram de seus estados fundamentais, para se tornarem os íons ferro e cloreto. Estas reações são ditas de ionização ou dissociação iônica.

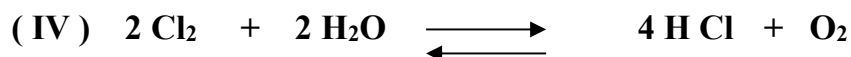
Na equação (I), percebemos que o átomo de ferro, para se transformar no íon Fe^{+2} , perdeu dois elétrons. Neste caso, dizemos que houve uma reação de oxidação. Em todas as reações de oxidação, sempre há perdas de elétrons, e o elemento que sofre a oxidação é denominado REDUTOR.

Na equação (II), contrariamente, o átomo de cloro passa de seu estado fundamental para o de íon cloreto (Cl^-), com conseqüente ganho de elétrons. Estas reações são definidas como de redução, posto que há ganho de elétrons. O elemento que sofre a redução é denominado de OXIDANTE.

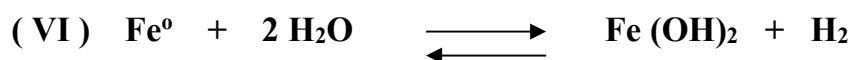
A água pode participar de reações de oxi-redução, a partir das seguintes reações:



Na equação (III), podemos perceber que a água cedeu elétrons, ou seja, é redutora. A reação é de oxidação e o elemento que irá receber estes elétrons será oxidante. A partir dessas observações, podemos concluir que em presença de água, um elemento oxidante sempre libera oxigênio. Para ilustrar este nosso raciocínio, apresentamos a seguinte reação:



Para a equação (IV), seguindo o mesmo raciocínio anterior, a água é receptora de elétrons e a reação é chamada de redução. A água, neste caso, é denominada oxidante e o elemento doador desses elétrons, é chamada de redutor. Concluímos, então, que todo elemento redutor em presença da água, libera Hidrogênio. A equação abaixo ilustra o que foi descrito:



O estudo da oxi-redução tem grande importância no fenômeno da corrosão, assunto que será detalhado no capítulo IV.

3. PROPRIEDADES BIOLÓGICAS DA ÁGUA

3.1. O METABOLISMO CELULAR

A água é o elemento essencial aos seres vivos, participando ativamente do metabolismo celular. Sabemos que as células necessitam de nutrientes para efetuar o seu desenvolvimento. Esses nutrientes são obtidos através de reações químicas denominadas de reações de síntese ou metabolismo. Quando a reação de síntese é exotérmica, dizemos que houve um catabolismo, ou metabolismo catabólico, classificando de anabolismo, ou metabolismo anabólico, aquelas reações endotérmicas. Com relação ao seu metabolismo, os seres vivos podem ser classificados em:

a) SERES AUTÓTROFOS

São aqueles cuja energia necessária para efetuar seu metabolismo é extraída do meio exterior. Essa energia pode ser luminosa ou de origem química. Quando as reações de síntese são obtidas a partir de energia luminosa, dizemos que houve ocorrência da fotossíntese e esses seres autótrofos são designados por fotótrofos ou organismos clorofilados; em contra-partida quando a energia necessária for de origem química, os seres autótrofos são denominados quimiotrófos ou não-clorofilados, como é o caso de diversas bactérias.

b) SERES HETERÓTROFOS

São aqueles que se utilizam de substâncias nutritivas e, através de reações de oxidação (exotérmicas), transformam-se em substâncias mais simples. Como exemplo, podemos citar os animais, vírus, bactérias e cogumelos

3.2. OS MICROORGANISMOS

Existe na Natureza, organismos microscópicos, originários, tanto no reino animal como vegetal. No estudo de tratamento de águas, esses microorganismos são de extrema importância, haja visto esses seres vivos sintetizarem substâncias causadoras de fenômenos indesejáveis no sistema de tratamento. Detalharemos mais esse assunto no capítulo V deste trabalho.

4. PRINCIPAIS CONTAMINANTES DA ÁGUA

4.1. FONTES DE CAPTAÇÃO

As águas naturais possuem duas origens, com características distintas:

a) ÁGUAS SUPERFICIAIS

São aquelas originárias da superfície da crosta terrestre, como os mares, rios, lagos, etc. Geralmente, possuem as seguintes características:

- Baixos teores de sólidos dissolvidos;
- Altos teores de sólidos suspensos;
- Conteúdo de matéria orgânica elevado;
- Temperatura variável;
- Saturação de oxigênio dissolvido.

b) ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

São as águas provenientes de reservatórios subterrâneos, cuja composição é mais constante ao isolamento com a superfície. Entre suas características principais, podemos citar:

- Altos teores de sólidos dissolvidos;
- Baixo conteúdo de matéria orgânica;
- Temperatura constante;
- Altos teores de gás carbônico.

4.2. AS IMPUREZAS NAS ÁGUAS

Os elementos, dissolvidos ou em suspensão, presentes nas águas industriais, podem ocasionar diversos problemas operacionais nos sistemas geradores de vapor e de resfriamento. Entre as impurezas mais comuns presentes nessas águas, podemos citar as seguintes:

a) DUREZA

A dureza é definida como a soma das concentrações de determinados cátions de metais polivalentes como Cálcio Ca^{2+} , Magnésio Mg^{2+} , Ferro Fe^{2+} , e Fe^{3+} , Alumínio Al^{3+} , Manganês Mn^{2+} e outros. Para as características das águas no Brasil, a dureza total leva em consideração apenas as concentrações do Cálcio Ca^{2+} , e Magnésio Mg^{2+} , conforme a equação:

(VII) $D_t = D(\text{Ca}) + D(\text{Mg})$, onde:

- D_t – Dureza Total
- $D(\text{Ca})$ – Dureza de Cálcio
- $D(\text{Mg})$ – Dureza de Magnésio

A dureza em águas industriais pode provocar inúmeros contratempos, já que os sais de Cálcio e Magnésio tendem a formar depósitos e incrustações em superfície de troca térmica, causando perda de eficiência nos sistemas de tratamento, além do fenômeno da corrosão, resultando em prejuízos consideráveis.

A unidade adotada universalmente para se medir a dureza, é que denominamos partes por milhão (ppm), que matematicamente equivale à unidade de miligrama por litro (mg/L) e é sempre expressa em termos de ppm de Carbonato de Cálcio (CaCO_3).

b) ALCALINIDADE

A alcalinidade indica a capacidade de reação de um meio às alterações de pH, quando da adição de um ácido. Existem três tipos de alcalinidade:

- **ALCALINIDADE TOTAL (M)**

Geralmente devida aos bicarbonatos de Cálcio, Magnésio e Sódio (Na). Os bicarbonatos possuem as mesmas inconveniências dos sais de Cálcio e Magnésio, acrescidas da indesejável liberação de gás carbônico que, dissolvido em água, torna o meio extremamente corrosivo.

- **ALCALINIDADE HIDRÓXIDA (OH)**

Deve-se, exclusivamente, à presença dos íons hidroxila (OH^-) na água, causada pela adição de hidróxido de sódio (NaOH) em sistemas de tratamento de águas industriais, não sendo encontradas normalmente em águas naturais.

- **ALCALINIDADE PARCIAL (P)**

É a soma da alcalinidade hidróxida com a metade do valor auferido à alcalinidade aos carbonatos.

c) SÓLIDOS DISSOLVIDOS

Os sólidos dissolvidos são agregados às águas pela dissolução de materiais do solo e pela contaminação do ar. Para tratamento de águas industriais, a presença

desses sólidos é medida através da condutividade elétrica. Sua concentração é expressa em ppm de carbonato de Cálcio (CaCO_3).

d) GASES DISSOLVIDOS

A concentração de gases dissolvidos nas águas vai depender, em muito, de sua fonte de captação. As águas superficiais possuem um elevado teor de oxigênio dissolvido, para uma baixa concentração de gás carbônico, diferentemente das águas subterrâneas que contêm altos teores de gás carbônico, metano e gás sulfídrico, provenientes da decomposição de matéria orgânica, e baixos teores de oxigênio dissolvidos. Passaremos a descrever os principais inconvenientes desses compostos, quando presentes em águas industriais.

- **OXIGÊNIO DISSOLVIDO**

Presentes nas águas em forma de O_2 , este elemento, quando em determinadas concentrações, leva ao aparecimento da corrosão. Este assunto será tratado com mais detalhes no capítulo sobre corrosão.

- **GÁS CARBÔNICO**

O gás carbônico é encontrado nas águas diluído em concentrações que variam de 2 a 15 ppm. A presença desse composto pode ocasionar severa corrosão ao Ferro e ligas de Cobre, materiais que compõe as linhas e equipamentos dos sistemas de tratamento.

e) FERRO

Elemento indesejável em águas industriais, o Ferro, geralmente presente em forma de bicarbonatos, é responsável pela formação de depósitos em superfícies metálicas, causando ainda a degradação de determinados, tipos de resinas, principalmente as aniônicas, nos sistemas de desmineralização.

f) CLORETOS

Compostos clorados são utilizados para desinfecção das águas. Entretanto, quando a concentração desses compostos alcança valores elevados, podem originar problemas de corrosão.

g) SÍLICA

Composto pouco solúvel em água, a sílica provoca incrustações duríssimas em sistemas de troca térmica, sendo sua remoção difícilíssima. Normalmente se encontra sob a forma de ácido e silicato solúveis.

h) SULFATOS

As Águas sulfatadas originam problemas de corrosão, semelhantes àqueles causados pela dureza. Estão presentes sob a forma de sulfato de Cálcio (CaSO_4), sulfato de Magnésio (MgSO_4) e sulfato de Sódio (NaSO_4).

CAPÍTULO II – TRATAMENTO EXTERNO DAS ÁGUAS

1. INTRODUÇÃO

Como vimos no capítulo anterior, as águas são originárias de duas fontes, superficiais e subterrâneas, contendo, cada uma delas, composições variáveis dependendo devido a vários aspectos já mencionados. Sabemos, também que a água é composta de determinados componentes que tendem a causar problemas de natureza as mais diversas em sistemas de tratamento de águas industriais. Os tratamentos externos visam a remoção do máximo possível dessas impurezas presentes.

2. PROCESSOS DE TRATAMENTO EXTERNO

2.1. DEFINIÇÃO

Definem-se por tratamento externo, os processos químicos e físicos utilizados com a finalidade de melhorar as características gerais da água, seja para consumo humano ou industrial. Nesse nosso trabalho, nos preocuparemos, essencialmente, com a utilização das águas para fins industriais.

2.2. CLARIFICAÇÃO

A clarificação tem por objetivo primordial, a remoção de sólidos em suspensão e partículas coloidais presente nas águas. Este tratamento, na realidade, é composto de três etapas que passaremos a descrever agora.

a) COAGULAÇÃO

A coagulação consiste em se adicionar à água, produtos químicos capazes de neutralizar os colóides presentes, geralmente de cargas negativas, atuando sobre os mesmos e gerando um precipitado.

b) FLOCULAÇÃO

É um processo efetuado logo após a coagulação, com o objetivo de agregar as partículas precipitadas no processo de coagulação, resultando em um aumento de peso, volume e coesão das mesmas. Através da floculação as partículas vão se tornando cada vez maiores, facilitando o processo de sedimentação de componentes.

c) DECANTAÇÃO

A decantação consiste na deposição dos materiais em suspensão na água. Os flocos gerados no processo anterior vão se sedimentando e a água clarificada se eleva, separando-se do material decantado, que é descartado como dejetos. Este material descartado é denominado de lodo ou lama.

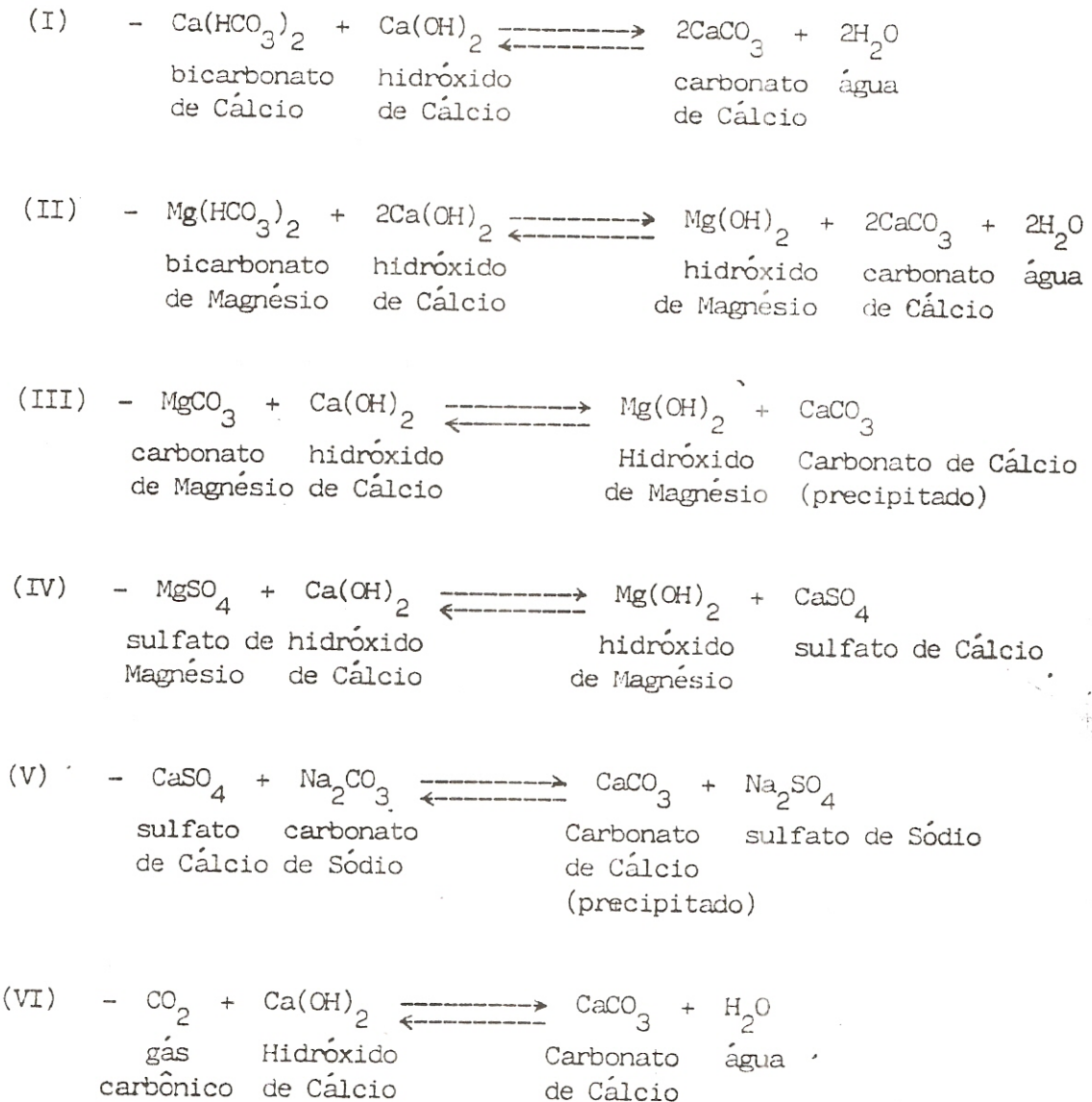
2.3. ABRANDAMENTO COM CAL

Este processo visa a remoção dos íons de Cálcio (Ca^{2+}) e Magnésio (Mg^{2+}), presente nas águas. Esses íons, como sabemos, estão presentes, majoritariamente, sob as formas de bicarbonatos, sulfatos e cloretos. Existem duas formas de se efetuar o abrandamento com cal:

a) ABRANDAMENTO COM CAL À FRIO

O tratamento é efetuado a partir da adição de uma solução de Óxido de Cálcio (CaO) e Carbonato de Sódio (Na_2SO_3) à água a ser abrandada. A quantidade a ser adicionada é função das durezas de Cálcio e Magnésio.

As equações que se seguem nos fornecem as reações básicas ocorridas nos processos de abrandamento com cal a frio.



É importante ressaltar que quando a dureza do magnésio for maior que a do cálcio, será necessária a adição de um coagulante, que irá atuar também, na sedimentação de precipitados mais finos gerados no processo.

b) ABRANDAMENTO COM CAL QUENTE

Aplicado no abrandamento de águas de reposição de sistemas geradores de vapor, esse processo é mais efetivo que o citado anteriormente. Aqui, a água, a uma temperatura de 100° C, é tratada com óxido de cálcio, resultando em uma redução no teor de sílica.

2.4. FILTRACÃO

Consta de uma passagem sólido-líquido através de um meio poroso, que retêm os sólidos, dando lugar à passagem do líquido. Os equipamentos destinados a este processo são denominados filtros, e poderíamos classificá-los de acordo com o seguinte:

a) FILTROS DE GRAVIDADE

São aqueles que a água flui somente devido à ação gravitacional.

b) FILTROS DE PRESSÃO

Nestes equipamentos, a água tem o seu fluxo forçado pela ação de uma bomba que impulsiona este fluxo através do filtro de pressão.

c) FILTROS DE CARVÃO ATIVO

São aqueles cujo meio filtrante é composto de carvão ativo granulado. Além da retenção de compostos oxidantes, esses equipamentos são utilizados, também, no processo de remoção de sabores, odores e outras impurezas presentes na água.

2.5. ABRANDAMENTO POR TROCA IÔNICA

Este processo é efetuado a partir de resinas sintéticas, que comportam em suas estruturas moleculares, radicais ácidos ou básicos com o objetivo de permutar, sem modificação aparente de seu aspecto físico, os íons negativos e positivos, agregados a seus radicais, pelos ânions e cátions existente na água a ser tratada. Neste estudo sobre resinas, vamos apresentar os tipos mais comumente empregados nos sistemas de tratamento de águas industriais e os mecanismos para sua operação.

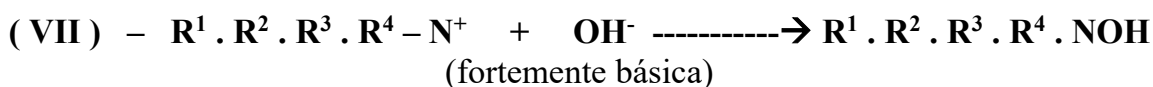
a) RESINAS CATIONICAS

São caracterizadas pela presença, em sua estrutura molecular, de radicais ácidos tipo HSO_3^- (sulfônicos) ou COOH^- (carboxílicos), cuja a finalidade é a remoção, total ou parcial, dos cátions presente na água, (especificamente os cátions Ca^{+2} , Mg^{+2} e Na^+). Quando o grupo funcional ativo das resinas é o HSO_3^- , são denominadas de fortemente ácidas. Por outro lado, quando o grupo o grupo funcional ativo é o COOH^- , as resinas são chamadas de fracamente ácidas. Estas últimas podem atuar nas formas Na^+ e H^+ , sendo que a aplicação deverá ser específica para cada caso; as do tipo Na, são utilizadas no abrandamento de águas ricas em sais de

sódio, enquanto as atuam, sob a forma de H^+ , são utilizadas para a redução da alcalinidade.

b) RESINAS ANIÔNICAS

São compostas de radicais com funções básicas como as do tipo NH_3H com capacidade de fixarem os ânions minerais ou orgânicos e trocá-los através de ânions semelhantes ou de íon hidroxila (OH^-). Estão classificadas em fortemente básicas, NH_4 caracterizadas por apresentarem o grupo amônio quaternário e reterem os íons de hidroxilas, e fracamente básicas que reagem em presença de ácidos fortes. As reações dessas resinas podem ser representadas pelas seguintes equações.



2.6. DESMINERALIZAÇÃO

O processo de desmineralização pode ser definido como a passagem de água através de um trocador catiônico sob a forma H^+ seguida da passagem através de um trocador aniônico sob a forma de OH^- , resultando na remoção de todos os sais presentes.

No final deste trabalho, incluímos os tipos e características de resinas, bem como os esquemas utilizados no abrandamento e desmineralização.

2.7. REGENERAÇÃO DAS RESINAS DE TROCA IÔNICA

As resinas de troca iônica são de grande durabilidade, quando bem mantidas. Entretanto, com a frequência do uso, elas atingem um determinado grau de saturação, perdendo a eficiência na troca. Este fato pode ser observado através da análise de dureza da água antes e depois do equipamento trocadores de íons.

A regeneração tem por finalidade reativar essa capacidade de troca através de soluções ditas regenerantes, e obedece aos seguintes procedimentos operacionais.

a) LAVAGEM EM CONTRAFLUXO

Quando de seu funcionamento normal, os trocadores de íons são atravessados pela água a ser tratada, em fluxo descendente. Após a sua saturação, a primeira operação efetuada é a de lavagem em contrafluxo, que consta da inversão do sentido

do fluxo original, com o objetivo de se romper partículas em suspensão que ficaram acumuladas (as resinas são um bom meio filtrante), além de promover uma distribuição uniforme dos grânulos em seu leito.

b) ADICÃO DE SOLUÇÃO REGENERANTE

Após a lavagem em contrafluxo, faz-se passar uma solução regenerante (Cloreto de sódio, ácido sulfúrico, ácido clorídrico, etc, dependendo do tipo de resina) em fluxo descendente, como em operação normal, a fim de restaurar a capacidade de troca.

c) LAVAGEM LENTA

Consiste em se adicionar determinada quantidade de água, em fluxo descendente, com o objetivo de deslocar o agente químico de regeneração.

d) LAVAGEM RÁPIDA

Através de um fluxo descendente e rápido, a água remove o excesso de regenerante existente, dando por terminado o ciclo regenerativo.

CAPÍTULO III – TEORIA DA INCRUSTAÇÃO

1. INTRODUÇÃO

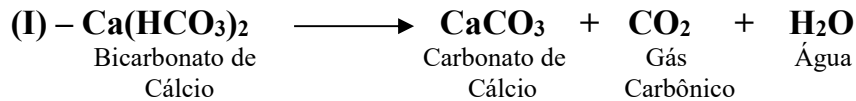
As incrustações são devidas ao depósito, sobre as superfícies dos metais, de precipitados cristalinos, dificultando a transmissão de calor, provocando superaquecimentos localizados e originando fenômenos de corrosão.

Neste capítulo estaremos discutindo os principais agentes causadores de depósitos, bem como os meios de prevenção empregados em sistemas de resfriamento e geração de vapor.

2. AGENTES DE INCRUSTAÇÃO

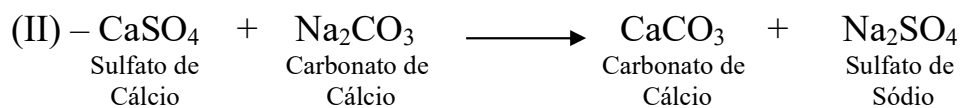
2.1. CARBONATO DE CÁLCIO (CaCO₃)

Formado a partir do bicarbonato de Cálcio (Ca(HCO₃)₂) presentes nas águas de alimentação, o carbonato de Cálcio é o tipo de incrustação mais detectado nos sistemas de tratamento de águas industriais. Através de uma elevação de temperatura ou aumento de pH do meio, este composto é produzido a partir da seguinte equação:



2.2. SULFATO DE CÁLCIO (CaSO₄)

O sulfato de Cálcio, devido à sua insolubilidade a altas temperaturas se precipita rapidamente e, a menos que seja convertido em outra forma, por tratamento químico ou removido da água durante a sua formação, tende a causar severas incrustações. Geralmente se utiliza o carbonato de Sódio, como agente de abrandamento, para transformar o sulfato de Cálcio em carbonato de Cálcio, segundo a reação:



Por possuir coeficiente de solubilidade negativo, ou seja, a sua solubilidade diminui com o aumento de temperatura, o sulfato de Cálcio tende a causar maiores problemas em sistemas de geração de vapor.

2.3. SÍLICA

A sílica se apresenta nas águas sob as formas de silicatos de Cálcio e Magnésio, que proporcionam incrustações duríssimas e de difícil remoção nos sistemas de tratamento.

2.4. FOSFATOS

Ao se adicionar produtos à base de fosfatos, como agentes anti-incrustantes, devemos proceder a um controle rigoroso, haja visto que a reversão dos fosfatos em ortofosfatos, quando em concentração elevadas deste último, pode provocar o aparecimento de depósitos. Este fato é explicado pela baixa solubilidade de ortofosfato.

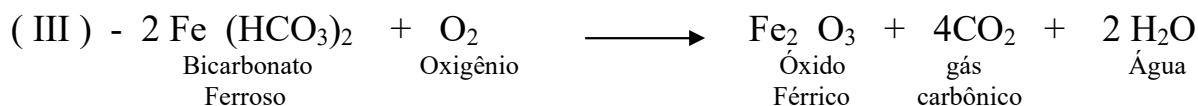
Em pequenas concentrações, porém, os ortofosfatos são coadjuvantes no processo de inibição das incrustações.

2.5. MAGNÉSIO

Apesar de sua concentração ser baixa em relação à do Cálcio, o Magnésio pode provocar depósitos. Entretanto, essa possibilidade se torna remota, devido ao fato da solubilidade desse elemento ser maior que a do Cálcio, o que resulta em precipitação preferencial deste último.

2.6. FERRO

São encontrados comumente sob a forma de bicarbonatos, com tendência a formarem depósitos em superfícies de troca de calor, como em tubulações de caldeiras e resfriamento. A reação pode ser representada como abaixo:



3. MÉTODOS DE CONTROLE DA INCRUSTACÃO

Com o desenvolvimento da tecnologia de tratamento de águas, os métodos de controle da incrustação foram sendo aperfeiçoados, de forma que podemos contar, atualmente, com várias opções de tratamento.

a) TRATAMENTO EXTERNO

Os processos de tratamento externo, já discutidos no capítulo II visam limitar as concentrações das impurezas presentes nas águas que alimentam os sistemas de refrigeração e geração de vapor.

b) TRATAMENTO INTERNO ANTI-INCRUSTANTE

Esse tratamento interno é baseado na adição de produtos químicos específicos com a finalidade de inibir o processo de formação de depósitos.

3.1. PROGRAMAS DE TRATAMENTO INTERNO

a) AGENTES QUELANTES

Os agentes quelantes possuem a propriedade de formar complexos solúveis com os cátions metálicos (Ca^{+2} , MG^{+2} , Fe^{+3} , etc.). Os compostos atualmente empregados são o NTA e EDTA. As concentrações desses produtos devem ser bem estipuladas, a fim de não se tornar anti-econômico o tratamento, ou causarem reações químicas secundárias que podem provocar corrosão.

b) POLIFOSFATOS

Os polifosfatos não são mais utilizados como há algum tempo atrás, devido ao aparecimento de produtos mais eficazes. O grande problema desses compostos se deve à sua reversão a ortofosfatos que, além de causar a ineficiência do produto, pode servir de nutriente aos microorganismos presentes no meio.

c) LIGNOSULFATO

Empregados como dispersantes, os lignosulfatos geram uma forma de repulsão entre as partículas em suspensão, reduzindo a força de atração entre elas e retardando o processo de deposição.

d) FOSFONATOS

Devido a sua estabilidade em relação à reversão e hidrólise, os fosfonatos se constituem em excelentes agentes anti-incrustantes.

e) POLIACRILATOS ANIÔNICOS

A atuação desses compostos se baseia na adsorção de cátions metálicos causadores de incrustação, dificultando a formação do cristal e inibindo, assim, a deposição dos mesmos.

f) DISPERSANTES ORGÂNICOS NÃO TÔNICOS

Esses compostos são adicionados ao tratamento com o objetivo de dispersar materiais orgânicos em suspensão como óleos, microorganismos, etc..

g) AGENTES AGLOMERANTES CATIÔNICOS

Inversamente aos dispersantes orgânicos, os agentes aglomerantes catiônicos atuam através da neutralização das cargas negativas das partículas existentes em suspensão, promovendo a formação de flocos não aderentes às superfícies metálicas. O inconveniente desses compostos é o acúmulo dos flocos em regiões de baixa velocidade de escoamento, o que pode acarretar problemas futuros.

h) MISTURAS SINÉRGICAS

A necessidade de se obter produtos cada vez mais eficientes com o objetivo de reduzir os custos de tratamento levou ao desenvolvimento de compostos combinados, denominados de misturas sinérgicas. Um exemplo típico desta composição são os produtos a base de fosfatos-quelantes, muito utilizados atualmente. No entanto, essas combinações necessitam de cuidados específicos, pois os elementos formadores das misturas podem entrar em regime de competição pelos cátions metálicos, gerando novos problemas, em vez de solucioná-los.

CAPÍTULO IV – ESTUDO DA CORROSÃO EM SISTEMAS DE ÁGUAS INDUSTRIAIS

1. INTRODUÇÃO

O fenômeno da corrosão se reveste de grande importância em tratamento de águas industriais, motivo pelo qual esforços são conjugados por especialistas de todo o mundo, na busca de soluções que visam eliminar, ao Máximo as perdas ocasionadas por este fenômeno.

Inúmeras são as origens da corrosão e isto dificulta o seu controle adequado. As conseqüências, entretanto, são sobejamente conhecidas, pois as perdas econômicas derivadas deste fenômeno são consideráveis nas mais diversas atividades industriais.

Nosso objetivo neste capítulo, é fornecer alguns conceitos básicos, que permitem uma melhor compreensão do processo de corrosão, bem como dos métodos de controle atualmente empregados.

2. CONCEITOS BÁSICOS

Iniciaremos nosso estudo conceituando os fundamentos básicos que facilitarão o entendimento dos mecanismos que reagem as reações de corrosão.

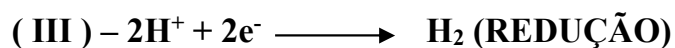
2.1. OXIDAÇÃO-REDUÇÃO

No capítulo I, ao estudarmos as características das águas, discutimos a oxidação e definimos princípios que lembraremos agora.

Seja a equação seguinte:



Esta equação é dita de oxi-redução, pois as equações parciais podem ser representadas como se segue:



Pelo que já sabemos, na equação (II) houve perda de elétrons pelo Ferro, ocorrendo uma reação de oxidação, tendo o Ferro como agente redutor. Na equação (III) o Hidrogênio, que obteve ganho de elétrons, sofreu redução, sendo o agente oxidante. De tudo isto que expomos, podemos concluir:

- a) A substância, ou íon, que sofre oxidação, contém o elemento redutor;
- b) A substância, ou íon, que sofre redução, contém o elemento oxidante.

2.2. POTENCIAL DE ELETRODO

Quando um metal é imerso em uma solução eletrolítica desse mesmo metal, estabelece-se uma diferença de potencial entre a fase sólida (metal) e a fase líquida (solução). A este sistema metal-solução (ver fig. 2) dá-se o nome de eletrodo. A teoria que explica o aparecimento desta diferença de potencial admite o aparecimento de uma carga elétrica na superfície do metal por excesso ou falta de elétrons. A região da interface, que pertence a solução, contém moléculas do eletrólito que apresentam dipolos. Estes dipolos se orientam na interface de acordo com o sinal da carga existente na superfície metálica e nela ficam adsorvidas. Na superfície metálica ficam também adsorvidas alguns íons existentes na solução, sejam do metal ou do solvente. Alguns íons do metal existentes na solução, e que não estão adsorvidos, ficam livres e outros ficam envolvidos pelas moléculas polares do solvente e se situam em regiões mais afastadas da superfície metálica. Esta situação constitui uma dupla camada em estado de equilíbrio dinâmico de modo a não interferir no prosseguimento da transferência de carga elétrica até que o equilíbrio seja perturbado.

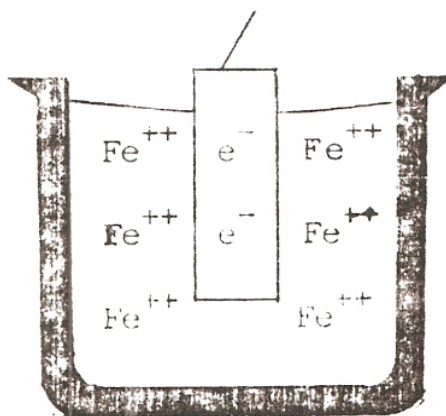


FIGURA 2

Em conclusão a isto que expomos, podemos ter três situações:

- a) Quando o potencial dos íons metálicos em solução for maior que a dos íons na lâmina metálica, ocorre uma transferência de íons da solução para a lâmina, que terá excesso de carga positiva e com potencial elétrico mais elevado. A transferência se dá até o equilíbrio ser alcançado no meio;
- b) Quando o potencial dos íons metálicos na rede cristalina do metal for maior que aquele dos íons metálicos em solução, a transferência será espontânea desses íons para a solução e a lâmina metálica fica com excesso de elétrons que não podem existir livres na solução e permanecem no metal. A transferência se processa até que o potencial da lâmina metálica se iguale ao potencial da solução, e a lâmina terá adquirido o potencial elétrico negativo em relação à solução;
- c) Se o potencial da lâmina for equivalente ao potencial da solução desde o início do processo, não haverá transferência entre as fases.

2.3. POTENCIAL DE ELETRODO PADRÃO

O potencial de eletrodo indica a medida da facilidade com que os átomos do eletrodo metálico perdem elétrons ou da facilidade com que os íons recebem esses elétrons.

Quando um metal está imerso em uma solução de concentração 1m de seus íons, o potencial, medido em volts, é denominado potencial de eletrodo padrão.

Para se medir o potencial de eletrodo de um elemento, liga-se este a um segundo eletrodo, denominado eletrodo padrão de hidrogênio que, por convenção, possui potencial nulo. Desta forma são medidos os diversos potenciais de eletrodos que for relacionados em uma tabela designada por tabela de potenciais de eletrodo. A partir dos dados dessa tabela, pode-se prever as diversas reações de oxidação-redução.

Com relação ao nosso assunto específico, podemos dizer que o processo de corrosão é considerado como um conjunto de reações químicas heterogêneas ou reações eletroquímicas que se passam geralmente na superfície de separação entre o metal e o meio corrosivo. Estas reações se dão através da oxidação de metais, que são os agentes redutores, que cedem elétrons a determinada substância, o oxidante, existente no meio corrosivo. Logo, podemos dizer que a corrosão é um modo de desintegração do metal, progredindo através de sua superfície.

2.4. MECANISMO ELETROQUÍMICO DA CORROSÃO

As três etapas principais do processo eletroquímico da corrosão são:

a) PROCESSO ANÓDICO

Consiste na transferência dos íons para a solução eletrolítica.

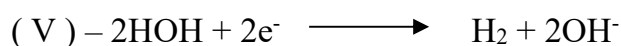


Na equação acima, observa-se que o anodo de Ferro cederá os elétrons que migraram para o cátodo. Esta reação é anódica, ou seja, de oxidação.

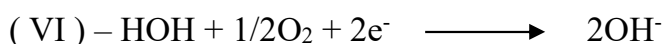
b) PROCESSO CATÓDICO

Os íons ou moléculas presentes na solução eletrolítica recebem os elétrons na área catódica. As reações catódicas, de redução, podem ser conduzidas nos seguintes meios:

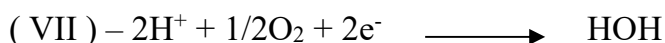
- MEIO BÁSICO, NÃO AERADO



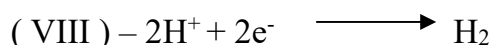
- MEIO BÁSICO, AERADO



- MEIO ÁCIDO AERADO



- MEIO ÁCIDO, NÃO AERADO



As equações acima descritas, explicam o mecanismo da corrosão eletroquímica.

2.5. FORMAS DE CORROSÃO

Existem diferentes e variadas formas de corrosão, e vamos apresentar as principais, de acordo com os nossos objetivos:

a) CORROSÃO UNIFORME

É aquela que se estende por toda a superfície dos metais, devido à existência de áreas anódicas e catódicas sob diferença de potencial.

b) CORROSÃO POR PLACAS

Este tipo de corrosão atua em determinadas áreas dos metais, produzindo escavações com placas.

c) CORROSÃO POR METAIS DISSIMILARES

Ocorre quando da existência de uma diferença de potencial entre dois metais diferentes em contato direto numa água contendo sais dissolvidos. Para esta situação, o metal menos nobre se comporta como ânodo e se corrói.

d) CORROSÃO POR TENSÃO

Pode ser devida a falhas ocorridas no projeto da caldeira ou de um tratamento térmico inadequado das chapas e tubos metálicos.

2.6. AGENTES DA CORROSÃO

a) OXIGÊNIO DISSOLVIDO

O oxigênio é um agente corrosivo e é considerado como fator de controle do processo, podendo acelerá-lo ou retardá-lo, dependendo de sua ação:

* Como despolarizante na área catódica é retardador e se houver processo corrosivo por aeração diferencial, se torna acelerador.

b) ALTAS CONCENTRAÇÕES DE CLORETOS

Em concentrações elevadas, os cloretos reagem com o ferro nas regiões onde a camada de magnetita foi rompida. Há a destruição das películas protetoras de inibidores convencionais.

c) SÓLIDOS EM SUSPENSÃO

Por possuírem tendência a se depositarem, podem provocar corrosão por aeração diferencial.

d) MICROORGANISMOS

A presença de microorganismos nas águas pode levar à corrosão, devido ao fato de que existem várias desses espécimes que tornam o meio ácido como, por exemplo, as bactérias oxidantes de enxofre e as ferrobactérias.

e) CHOQUES TÉRMICOS

A temperatura pode afetar consideravelmente os sistemas de tratamento. Já vimos que as reações de corrosão agem mais rapidamente à temperatura elevadas, assim como a solubilidade de alguns sais decresce com o crescimento desta grandeza.

f) COMBUSTÍVEL RESIDUAL

As impurezas contidas em combustíveis residuais (tais como enxofre e vanádio), podem acarretar problemas de corrosão em sistemas de geração de vapor.

2.7. MÉTODOS DE CONTROLE DA CORROSÃO

a) CONTROLE DE QUALIDADE DA ÁGUA

É fundamental a qualidade das águas de alimentação, visto que várias impurezas podem ser removidas no processo de tratamento externo, já discutido no capítulo II.

b) INIBIDORES DE CORROSÃO

Vários são os produtos utilizados no combate a corrosão e vamos especificar os de maiores utilização atualmente:

- **CROMATOS**

Compostos altamente efetivos no combate à corrosão, os cromatos e dicromatos vem tendo o seu emprego reduzido em face de sua toxicidade. Outros inconvenientes na adoção destes produtos são a suscetibilidade da película protetora formada à ação de íons cloretos e a agentes redutores. Quando utilizados em concentrações abaixo de 200ppm, em formulações não sinérgicas, podem causar corrosão, em vez de evitá-la.

- **SAIS DE ZINCO**

Esses compostos atuam através da precipitação de hidróxido de zinco sobre as áreas catódicas.

- **POLIFOSFATOS**

Os compostos de polifosfatos geram uma película protetora sobre as superfícies metálicas, tendo, porém, o inconveniente da reversão a ortofosfatos, o que configura a formação de depósitos.

- **FOSFONATOS**

Com mecanismo de inibição semelhante aos fosfatos, possuem a vantagem de ser mais resistentes ao fenômeno da reversão. Atuam melhor quando combinados com outros inibidores, formando as misturas sinérgicas.

- **HIDRAZINA E SULFITOS**

Possuindo mecanismos de ação semelhantes, esses dois compostos são utilizados no combate ao oxigênio dissolvido com vantagem para a hidrazina que, por ser um produto volátil, não contribui para o aumento do teor de sólidos dissolvidos.

- **AMINAS E AMIDAS FÍLMICAS**

Utilizadas na proteção dos equipamentos e linhas da seção pós-caldeira, formando um filme protetor.

- **AMINAS DE NEUTRALIZAÇÃO**

CAPÍTULO V – CONTROLE MICROBIOLÓGICO

1. INTRODUÇÃO

Os microorganismos estão presentes em todos os segmentos da Natureza e são caracterizados pela imensa variedade de suas espécies. Particularmente em sistemas de resfriamento, o estudo desses organismos microbiológicos se reveste de fundamental importância, pelos problemas que podem causar, interferindo no bom funcionamento dos diversos processos industriais.

Vamos discutir neste capítulo os tipos mais comuns de microorganismos em sistemas de resfriamento, os problemas que podem causar e os meios efetivos de combatê-los.

2. OS MICROORGANISMOS

No que se refere o tratamento de águas industriais, os tipos de microorganismos mais comuns são os que apresentamos agora:

2.1. ALGAS

São organismos vegetais simples, clorofilados, desprovidos de raízes, folhas ou caule, que se desenvolvem em meios aquosos. Apresentam motilidade, isto é, capacidade de se auto-locomoverem, sendo que os presentes em águas de resfriamento possuem motilidade transitória.

As algas requerem os seguintes fatores para seu desenvolvimento:

a) LUZ SOLAR

A luz solar é o fator primordial para a ocorrência do fenômeno da fotossíntese, quando as algas retiram energia para sintetizam seu próprio alimento.

b) UMIDADE

As algas necessitam de meio aquoso para sobreviver, pois se alimentam de nutrientes dissolvidos na umidade.

c) AR

No processo da fotossíntese, o dióxido de carbono é transformado em carboidratos nas células das algas.

d) pH

As algas não são muito suscetíveis a pequenas variações de pH, crescendo numa faixa que varia de 5,9 a 9,0.

e) TEMPERATURA

A influência da temperatura depende do tipo de alga presente no meio, existindo uma temperatura padrão de crescimento.

f) NUTRIENTES QUÍMICOS

O nutriente químico, mais importante no desenvolvimento das algas são os fosfatos, devendo-se ter o máximo de cuidado com produtos inibidores de corrosão com base nesses compostos.

2.2. FUNGOS

Como as algas, são vegetais simples e não clorofilados, requerendo os mesmos fatores para seu desenvolvimento.

2.3. BACTÉRIAS

São organismos vegetais, aclorofilados e unicelulares. Com relação aos fatores básicos para desenvolvimento, além daqueles já citados para as algas, as bactérias utilizam as enzimas como catalisadores para a produção de energia e alimento.

3. CINÉTICA DO DESENVOLVIMENTO MICROBIOLÓGICO

A cinética do desenvolvimento microbiológico pode ser resumida em quatro fases distintas, a saber:

3.1. FASE DE ACLIMATAÇÃO OU LAG-PHASE

Nesta fase os microrganismos entram em processo de adaptação às condições físicas ambientais, tendo suas células aumentadas de tamanho, em relação às dimensões normais. Nesse estágio há uma intensa atividade metabólica, com síntese de novos protoplasmas, em detrimento da divisão celular, um pouco lenta, isto é, há toda uma preocupação para o desenvolvimento.

3.2. FASE EXPONENCIAL OU LONG-PHASE

A velocidade de crescimento, sob condições propícias, alcança o valor máximo nesta fase, quando as células se dividem sob aumento constante. Esta velocidade será tanto maior quanto maior for a presença de nutrientes no meio considerado.

3.3. FASE ESTACIONÁRIA OU STATIONARY-PHASE

Neste período, face ao aumento da população microbiológica, há uma grande competição pelos nutrientes que, levados à exaustão, tendem a gradualizar o crescimento, devido a um certo equilíbrio entre as taxas de reprodução e mortalidade.

3.4. FASE DE DECLÍNIO OU DEATH-PHASE

Esta é fase em que, seja pela exaustão de nutrientes, ou pela adoção de inibidores, o processo de reprodução entra em declínio, com o número de células vivas decrescendo geometricamente, na proporção inversa da fase de crescimento. Há, no entanto, determinados microrganismos, como as bactérias formadoras de endosporos que, através de um processo de inatividade, podem evitar o surgimento dessa fase de declínio. O gráfico abaixo apresenta de forma bastante objetiva a cinética do desenvolvimento microbiológico.

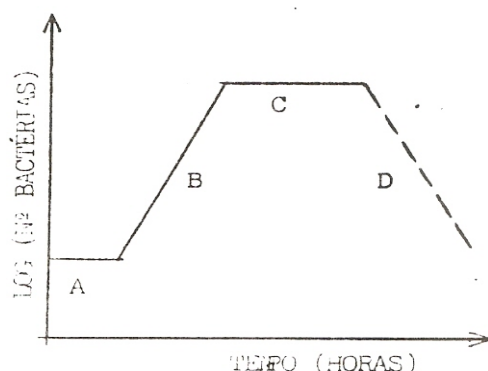
*** TERMINOLOGIA**

A – FASE DE ACLIMATAÇÃO OU LAG-PHASE

B – FASE EXPONENCIAL OU LOG-PHASE

C – FASE ESTACIONÁRIA OU STATIONARY-PHASE

D – FASE DE DECLÍNIO OU DEATH-PHASE



4. PROBLEMAS CAUSADOS POR MICRORGANISMOS

A proliferação de microrganismos vem causar sérias conseqüências nos sistemas de resfriamento e, dentre as principais, podemos destacar:

4.1. LIMOS BIOLÓGICOS

É o processo de formação de uma massa microbiológica que resulta em considerável perda de transferência de calor por parte dos equipamentos de troca térmica.

4.2. OBSTRUÇÃO E DEPÓSITOS RESIDUAIS

Vêm a ser causado pelo acúmulo de uma flora microbiológica que tende a se desenvolver em torres de resfriamento, especialmente nos enchimentos das mesmas, e em componentes do sistema, servindo como meio de transporte para substâncias orgânicas não microbiológicas, atraindo-as e provocando obstruções e depósitos, comprometendo, desta forma, a eficiência na troca-térmica. A bem da verdade, há que se dizer que os depósitos e obstruções são causados prioritariamente, pelos materiais inorgânicos não microbiológicos, mas em contrapartida, tais depósitos e obstruções não surgiriam, se não houvesse a formação de microflora biológica.

4.3. DETERIORIZAÇÃO DA MADEIRA

Quando a madeira é constituinte do material de enchimento de uma torre de resfriamento, esta se expõe a ataques de microrganismos que tendem a provocar uma reação de hidrólise nas fibras de celulose do material considerado, destruindo assim, sua estrutura e comprometendo o equipamento. Esta atividade microbiológica sobre a madeira tem origem, principalmente na água do mar.

4.4. CORROSÃO INDUZIDA POR MICRORGANISMOS

A presença de bactérias redutoras de sulfato, oxidantes de ferro, e microrganismo formadores de limo, são os principais fatores causadores de corrosão em sistemas de resfriamento, fenômeno este que resulta em deteriorização de todos os componentes do sistema considerado.

5. PRODUTOS DE TRATAMENTO

O tratamento eficiente na inibição do processo de desenvolvimento microbiológico, sempre deverá prever uma limpeza mecânica e química dos sistemas, além de um tratamento contínuo de manutenção.

Do ponto de vista químico, são utilizados microbicidas de amplos espectros de atuação, que agem através de vários tipos de mecanismos, de acordo com sua formulação básica, sempre com os mesmos objetivos:

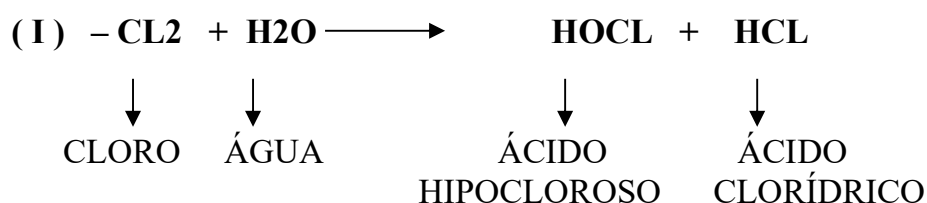
- Eliminar o processo de desenvolvimento da população microbiológica.

5.1. COMPOSTOS CLORADOS

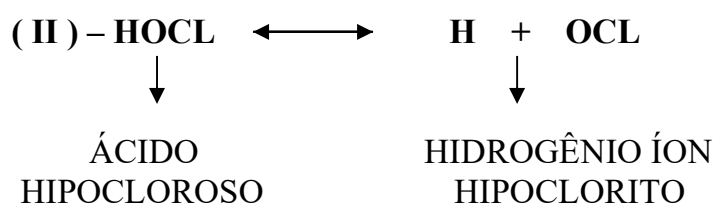
Os compostos clorados, ao serem adicionados a água em sistemas de resfriamento, sofrem um processo de hidrólise, originando dois ácidos:

- Hipocloroso e Clorídrico.

A reação pode ser representada pelas equações abaixo.



O ácido hipocloroso se ioniza, então, produzindo a reação:



5.2. SAIS QUATERNÁRIO DE AMÔNIO

São agentes químicos tenso-ativos de natureza catiônica. Esses compostos são altamente ativos, quanto em meio alcalino no combate ao desenvolvimento de algas e bactérias.

5.3. COMPOSTOS ORGANO-SULFUROSOS

Os produtos à base de compostos organo-sulfurosos, atuam como “Venenos” enzimáticos, inibindo o metabolismo e o desenvolvimento celular. Podem ser empregados isoladamente, ou combinados.

5.4. POLICLOROFENATOS

Possuem amplo espectro de atuação, não sendo afetados de modo sensível pela presença de quantidades elevadas de matéria orgânica presente na água. Apesar de sua efetividade comprovada, seu uso tem sido restrito devido a geração de problemas ambientais.

5.5. COMPOSTOS ORGANO-ESTANOSOS

Utilizados especificamente para combate de fungos, em sistemas onde há presença de madeira. A inconveniência reside no fato de sua velocidade de extermínio ser baixa e não ser biodegradável.

CAPÍTULO VI – SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

1. INTRODUÇÃO

A natureza dos aparelhos a serem resfriados é extremamente variada. Neste tópico, gostaríamos de apresentar os mais comumente utilizados nos processos industriais:

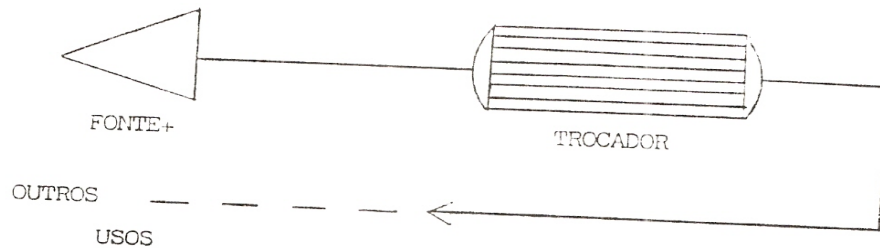
- a) Condensadores e trocadores de calor;
- b) Refrigeração de óleo, ar, gás e de líquido;
- c) Motores e compressores;
- d) Auto-forros, forros, laminadores, etc;
- e) Reatores químicos.

O processo de troca térmica consiste na circulação de água fria através de um circuito (aberto, semi-aberto ou fechado), passando por entre equipamentos a serem resfriados. Em contato com as superfícies aquecidas de tais equipamentos, a temperatura da água se eleva, resfriando os trocadores térmicos.

2. TIPOS DE SISTEMAS

2.1. SISTEMAS ABERTOS

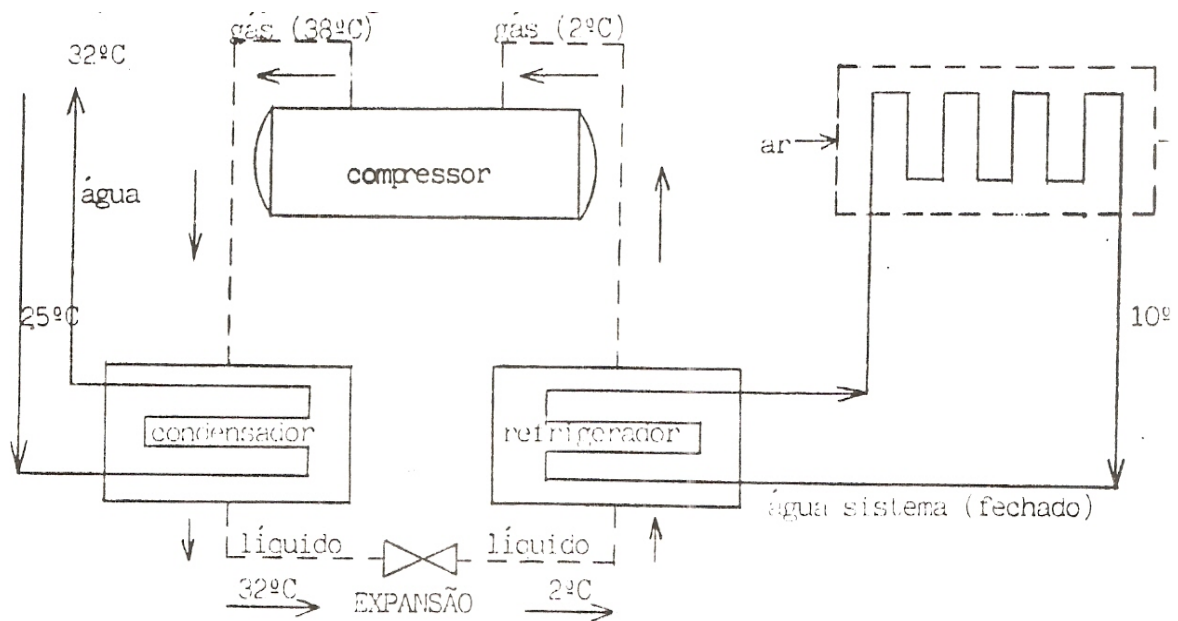
Nesses sistemas, a água percorre o circuito, efetua a troca térmica, e é descartada para outras finalidades, ou seja, não há reutilização da água. A figura 2 ilustra um desses sistemas



(FIGURA 2)

2.2. SISTEMAS FECHADOS

Em sistemas fechados, a água troca calor com os equipamentos componentes do circuito, é resfriada pelo contato com um fluido (água ou ar), e retorna novamente ao circuito, sem contato com o meio exterior. Devido a este caráter de isolamento, as perdas são mínimas e a contaminação com os agentes poluentes do meio-ambiente são remotas. Um tipo de sistema fechado é representado pela figura 3.

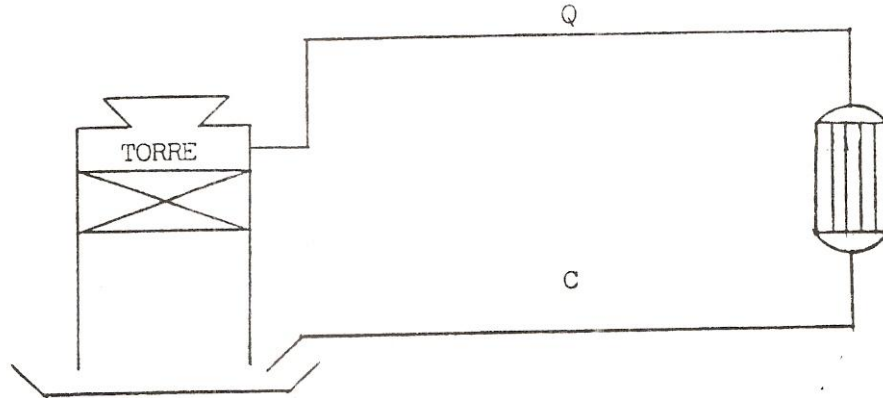


(FIGURA 3)

2.3. SISTEMAS SEMI-ABERTOS

Nos sistemas semi-abertos, a água percorre o circuito, efetua a troca térmica, sai aquecida e é resfriada em equipamentos denominados torre de resfriamento, em

contato com o meio-ambiente, que causa o indesejável aparecimento de microorganismos. Os sistemas semi-abertos são amplamente utilizados por permitirem a reutilização da água do processo. Por possuírem equações de balanço complexas, esses sistemas serão tratados com especial atenção neste capítulo. A figura 4 apresenta um esquema genérico de um sistema desse tipo.

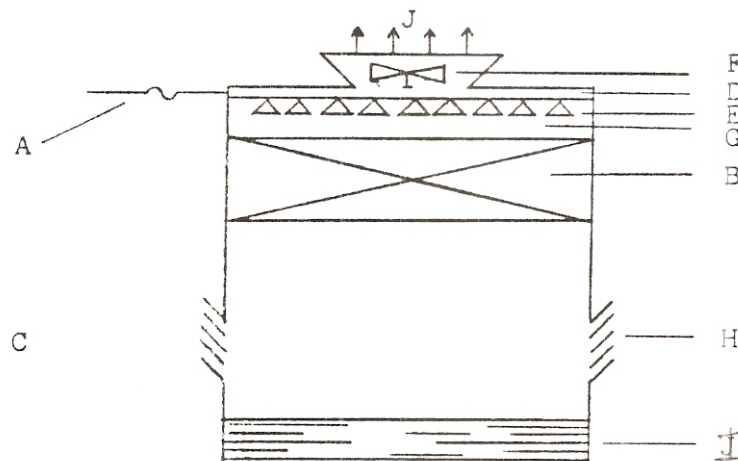


(FIGURA 4)

3. NOÇÕES GERAIS SOBRE TORRES DE RESFRIAMENTO

3.1. INTRODUÇÃO

Antes de descrevermos os tipos usuais de torres, vamos mostrar os componentes principais desses equipamentos, através da figura 5



(FIGURA 5)

a) TERMINOLOGIA

- A - Tubulação de distribuição;
- B - Enchimento;
- C - Venezianas;
- D - Eliminadores de respingos;
- E - Câmara plenum

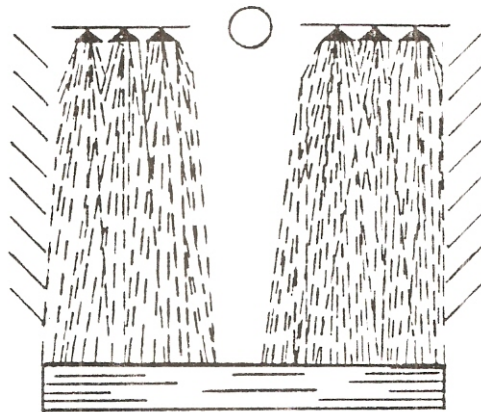
- F - Ventilador
- G - Bicos atomizadores
- H - Entrada de ar
- I - Bacia de captação de água fria
- J - Saída de ar

4. TIPOS DE TORRES DE RESFRIAMENTO E SUAS CARACTERÍSTICAS

4.1. TORRES DE VENTILAÇÃO NATURAL

O esquema deste tipo de equipamento vai ser mostrado na figura 6. As venezianas laterais têm dupla finalidade:

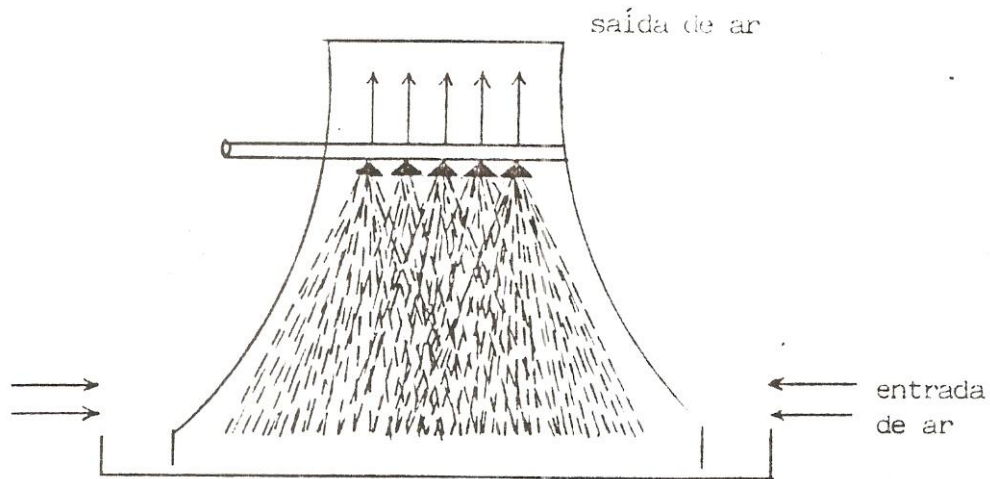
- a) Orientam e auxiliam a passagem do ar
- b) Reduzem as perdas de água por respingos.



(FIGURA 6)

4.2. TORRES DE TIRAGEM NATURAL

Nesse tipo de torre, o ar frio penetra por baixo da torre e é aquecido pela troca térmica com água proveniente do sistema. O ar quente, com baixa densidade, se eleva, criando uma zona de baixa pressão na parte inferior da torre, casando a entrada de mais ar frio, processando o resfriamento. A estrutura hiperbólica do equipamento, facilita a tiragem do ar quente (figura 7).



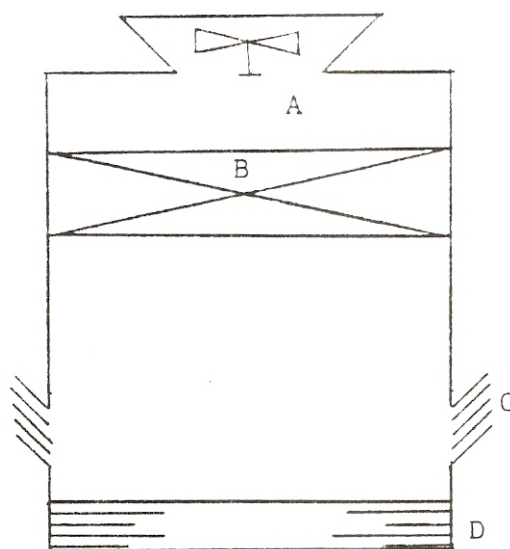
(FIGURA 7)

4.3. TORRES DE TIRAGEM MECÂNICA

Nessas torres, a retirada de ar é auxiliada por um ventilador, fator que causa um aumento da vazão e conseqüentemente, da velocidade de troca térmica. A tiragem mecânica é dita forçada quando o ventilador é localizado na entrada de ar e induzida, quando o ventilador encontra-se à saída de ar da torre.

a) TORRES DE RESFRIAMENTO EM CONTRA-CORRENTE (COUNTER-FLOW)

A água cai através do enchimento, num percurso vertical, e o ar utilizado para resfriamento se eleva na torre, sentido oposto (figura 8).



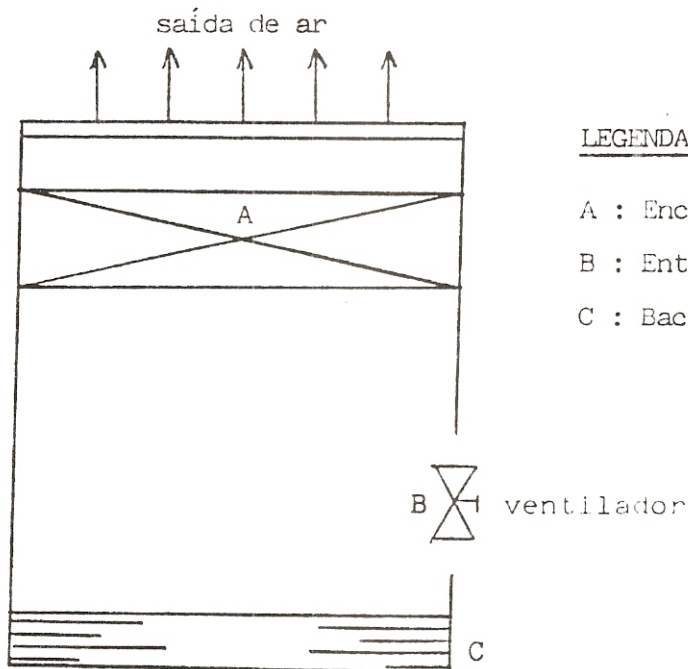
LEGENDA

- A : Ventilador
- B : Enchimento da Torre
- C : Venezianas
- D : Bacia da Torre

(FIGURA 8)

b) TORRES DE RESFRIAMENTO EM CONTRA-CORRENTE (COUNTER-FLOW)

A água cai verticalmente através do enchimento e é resfriada pelo ar em trajetória perpendicular (figura 9).



LEGENDA

A : Enchimento da Torre

B : Entrada de ar

C : Bacia da Torre

(FIGURA 9)

4.4. CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS E ECONÔMICAS DAS TORRES DE RESFRIAMENTO

Existem muitas controvérsias acerca de qual o melhor material a ser utilizado na construção de uma torre. Não vamos entrar no mérito da questão e nos limitaremos a fornecer um quadro com as características das matérias-primas mais utilizadas atualmente (plástico e madeira).

CARACTERÍSTICA	MADEIRA	PLÁSTICO
DURABILIDADE	A mesma	A mesma
PESO	Maior	Menor
MONTAGEM	Mais difícil e demorada	Mais fácil
APARÊNCIA VISUAL	Razoável	Boa
PREÇO	Mais barato	Mais caro
MANUTENÇÃO	Mais simples	Mais complicado
INFLAMABILIDADE	Reduzida	Grande, se o material não for auto-extinguível.

5. CONTROLES DE TRATAMENTO E DOSAGENS DE PRODUTOS

5.1. INTRODUÇÃO

Este tópico apresenta os métodos usuais de controle e os cálculos efetuados para as corretas dosagens dos produtos recomendados. Por exigir uma maior complexibilidade em seu estudo, os sistemas semi-abertos serão discutidos com maiores detalhes sem, no entanto, prejuízo dos demais sistemas.

5.2. SISTEMAS ABERTOS

Devido ao fato de que a água de refrigeração não é reutilizada no circuito, um tratamento químico convencional seria bastante dispendioso, em termos de custos. Isto não quer dizer que não seja feito um controle eficiente do sistema, muito pelo contrário, deve-se buscar o tratamento mais adequado para cada caso específico, como já foi executado em clientes que nos solicitaram um estudo específico sobre o caso.

As dosagens também devem ser específicas para cada caso, variando em função do tratamento que se deseja e das condições técnico-operacionais dos sistemas avaliados.

a) CONTROLE DE CORROSÃO

Este controle é muito importante, posto que a corrosão, como vimos no capítulo IV, pode causar obstrução nas linhas e equipamentos dos sistemas de resfriamento, prejudicando a eficiência na troca térmica.

Uma boa alternativa, se não deseja o tratamento baseado em produtos químicos, é efetuar-se o controle da corrosão através de ajustes, do pH do meio considerado tornando-o levemente alcalino. Um excesso de alcalinidade, entretanto, pode levar a problemas de incrustações e, por isso, este controle deve ser feito com bastante rigor. A utilização dos índices de estabilidade de Langelier e Ryznard contribuição, em muito, no controle.

Além desses procedimentos acima mencionados, é fundamental a escolha de materiais (metais) resistentes a este tipo de fenômeno.

b) CONTROLE MICROBIOLÓGICO

Em sistemas abertos, o controle microbiológico é geralmente feito à base de compostos clorados. A vantagem destes produtos é o baixo custo com que são oferecidos no mercado. Outros produtos microbiocidas, porém, poderão ser usados, se assim justificarem os custos.

5.3. SISTEMAS FECHADOS

Os sistemas fechados, por não entrarem em contato com o meio ambiente, e seus agentes poluentes, são caracterizados por perdas mínimas, conseqüentemente, pouca água de reposição se torne necessária, proporcionando um eficiente controle das impurezas presentes.

a) CONTROLE DE CORROSÃO

O Controle da corrosão é feito mediante um tratamento sistemático com produtos químicos, já mencionado no capítulo IV. Ao serem dosados os produtos, deverão sempre levar em consideração a temperatura e o tempo de retenção dos sistemas fechados.

b) CONTROLE DE DEPÓSITO

Para se avaliar as possíveis ocorrências de depósitos em sistemas fechados, devemos levar em consideração qual a finalidade e especificação do sistema.

Em sistemas de água gelada, são muito remotas as possibilidades de ocorrência deste fenômeno, em virtude da temperatura baixa da operação, que resulta na não ultrapassagem da solubilidade dos sais presentes.

Em sistemas de água quente, existe a eventualidade de formação de depósitos, em face da temperatura de trabalho dos mesmos alcançarem valores bem maiores que nos sistemas de água gelada.

A adição de produtos anti-incrustantes em doses controladas, proporcionam um controle bastante eficaz dos problemas eventualmente presentes.

c) CONTROLE MICROBIOLÓGICO

Por não estar em contato com o meio exterior, esses sistemas apresentam muito pouco desenvolvimento microbiológico e, na eventualidade de existirem, seu controle se torna bem mais fácil que o empregado nos sistemas semi-abertos, por exemplo.

d) CÁLCULO PARA AS DOSAGENS

As dosagens de produtos químicos podem ser calculadas através da seguinte equação:

$$\text{DOSAGEM} = \frac{F * V}{1000}$$

(Kg)

onde,

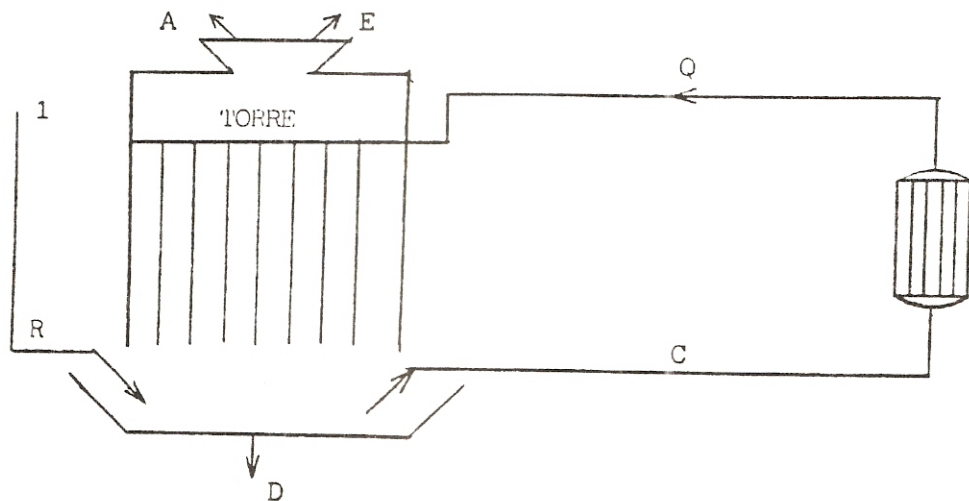
F = Concentração do produto recomendado, em ppm;
V = Volume estático do sistema, em m³.

5.4. SISTEMAS SEMIABERTOS

Como já esclarecemos no início deste capítulo, esses sistemas serão tratados com mais detalhes, em vista de sua complexidade e das variáveis envolvidas.

a) BALANÇOS MÁSSICOS

A partir do esquema genérico da figura 10, passaremos a descrever as equações de balanço para sistemas semiabertos de resfriamento.



(FIGURA 10)

*** TERMINOLOGIA**

- 1 – água de alimentação das torres;
- R – água de reposição;
- C – água de circulação fria;
- Q – água de circulação quente;
- D – perdas devidas às descargas;
- E – perdas por evaporação;
- A – perdas por arraste.

*** CÁLCULO DA VAZÃO**

$$E = \frac{T * Q}{550} \text{ onde,}$$

E – perdas por evaporação, em m³/h;

Q – vazão de recirculação, em m³/h;
T – gradiente de temperatura, em C°.

* CÁLCULO DE ARRASTE

$A = Z * Q$ onde,

A – perdas por arraste, em m³/h;
Q – vazão de recirculação, em m³/h;
Z – vazão média por arraste, como uma porcentagem de vazão de recirculação (adimensional)

Os valores de Z estão fornecidos na tabela seguinte, em função do tipo de equipamento considerado.

TIPO DE TORRE	VALOR DE Z (%)
Tiragem natural	0,5
Tiragem forçada	0,2
Tiragem induzida	0,2
Spray-pound	2,5
Condensador evaporativo	0,1

* CÁLCULOS DAS DESCARGAS

$P = \frac{E}{C_{\text{máx}} - 1} - A$, onde

P – perdas devidas às descargas, em m³/h;
E – perdas por evaporação, em m³/h;
A – perdas por arraste, em m³/h;
C_{máx} – ciclos máximos de concentração permissíveis.

* EQUAÇÃO GERAL DO BALANÇO

$R = E + A + P$, onde

R – quantidade da água de reposição, em m³/h;
E – perdas por evaporação, em m³/h;
A – perdas por arraste, em m³/h;
P – perdas devidas às descargas, em m³/h.

b) CÁLCULOS DAS DOSAGENS DOS PRODUTOS RECOMENDADOS

É fundamental importância um procedimento correto das dosagens posto que um excesso na adição de produto, levará a um consumo elevado, e quanto que uma dosagem abaixo da especificação, não resultará em proteção efetiva dos sistemas a serem tratados.

*** DOSAGEM CONTÍNUA DE REPOSIÇÃO**

$$D_{re} = F * (A + P) , \text{ onde}$$

D_{re} – dosagem de reposição, em kg;

F – concentração do produto recomendado, em ppm;

A – perdas por arraste, em m^3/h ;

P – perdas devidas às descargas, em m^3/h ;

RT – regime de trabalho do sistema, em horas.

*** DOSAGEM DE CHOQUE**

$$D_C = \frac{F * V}{1000} , \text{ onde}$$

D_C – dosagem de choque, em kg;

F – concentração do produto recomendado, em ppm;

V – volume estático do sistema, em m^3 .

*** TEMPO DE RETENÇÃO**

O tempo de retenção é definido como período, em horas, necessário para que a concentração do produto dosado caia à metade daquela inicial. É dado pela seguinte equação:

$$TR = \frac{0,693 * V}{A + P} , \text{ onde}$$

TR – tempo de retenção, em horas;

V – volume estático do sistema, em m^3 .

A – perdas por arraste, em m^3/h ;

P – perdas devidas às descargas, em m^3/h ;

CAPÍTULO VII – SISTEMAS DE GERAÇÃO DE VAPOR

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo sobre sistemas de geração de vapor, nosso objetivo é levar até os leitores, os conceitos fundamentais, os princípios operacionais e os métodos de controle empregados usualmente nesses sistemas.

O vapor é uma fonte de energia largamente utilizada nos processos industriais por oferecer baixos custos em relação a outras modalidades de energia. A importância de se controlar o processo visando uma maior eficiência dos equipamentos aliada a um consumo econômico de combustível, será ressaltada com ênfase nesta parte de nosso trabalho.

2. O FENÔMENO DA COMBUSTÃO

A inclusão do estudo da combustão neste capítulo se deve ao fato da importância deste fenômeno no estudo da geração de vapor. Descreveremos alguns conceitos primários que facilitarão a compreensão das reações de combustão.

a) COMBUSTÃO

A combustão é uma reação química envolvendo um elemento combustível e outro elemento comburente. Os combustíveis podem se encontrar sob a forma sólida, líquida e gasosa e o comburente utilizado é o oxigênio proveniente do ar atmosférico.

Para a ocorrência de uma reação de combustão, são necessários três fatores básicos, a saber:

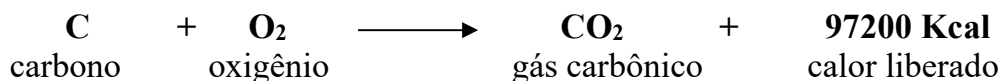
- i) presença de oxigênio na reação;
- j) presença do elemento combustível;
- k) geração de calor, a partir de uma fonte térmica, para dar início ao processo.

A ausência de um desses componentes não permitirá a ocorrência do fenômeno.

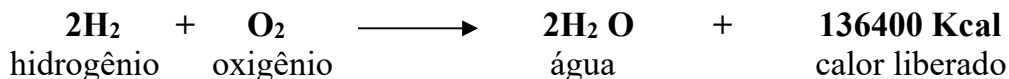
b) REAÇÕES TÍPICAS DE COMBUSTÃO

Ao reagir com o oxigênio, um elemento combustível sempre produzirá uma chama luminosa com liberação de calor. A quantidade de calor liberada é função das proporções das massas de combustível e comburente envolvidas nas reações. Como por exemplo, apresentamos algumas dessas reações:

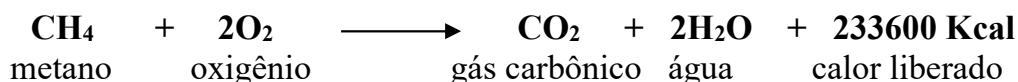
*** COMBUSTÃO DO CARBONO**



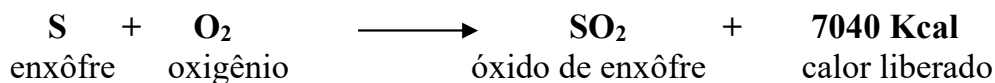
*** COMBUSTÃO DO HIDROGÊNIO**



*** COMBUSTÃO METANO**



*** COMBUSTÃO DO ENXÔFRE**

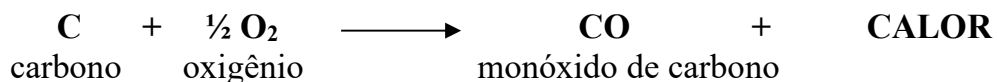


2.1. TIPOS DE REAÇÃO DE COMBUSTÃO

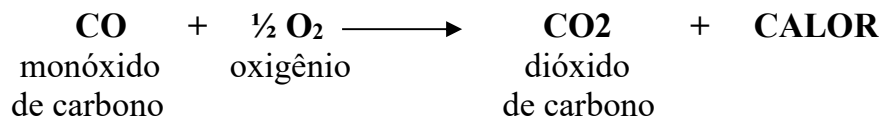
Já sabemos que toda reação de combustão libera calor, e que esta quantidade de calor é função da proporção, em massa ou volume, com que os elementos combinam. Com relação a essa proporção, as reações podem ser classificadas em:

a) REAÇÃO DE COMBUSTÃO INCOMPLETA

Ocorre quando a quantidade de oxigênio presente na reação, é insuficiente para a queima de todo o elemento combustível. A equação seguinte representa este tipo de reação:



A equação é dita incompleta porque o produto gerado, monóxido de carbono (CO), em quantidade suficiente de Oxigênio, ainda poderia reagir para a formação de gás carbônico, conforme a equação abaixo:



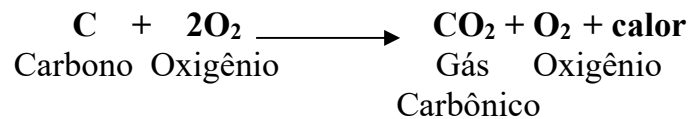
b) REAÇÃO DE COMBUSTÃO COMPLETA

Neste caso, que é o caso ideal, o oxigênio reage em proporções exatas e constante para queima de combustível disponível, conforme a equação abaixo representada:



c) COMBUSTÃO COM EXCESSO DE OXIGÊNIO

A combustão com excesso de oxigênio é um caso particular da combustão completa, caracterizando-se por uma quantidade de oxigênio além da necessária para reagir com o combustível. Podemos representá-lo do modo seguinte:



Constatamos a quantidade excessiva de oxigênio na reação, devido a liberação desse gás nos gases de combustão.

2.2 CONCLUSÃO

Podemos comprovar que uma reação completa é impraticável de ocorrer, a partir da premissa que, para que isso fosse efetivado, seria necessário uma combustão com oxigênio puro, o que se torna impossível na prática, havista que esse comburente é retirado a partir do ar atmosférico, que possui uma composição, em peso de 77% de Nitrogênio para 23% de Oxigênio. A presença de Nitrogênio dificulta a interação combustível-comburente, o que nos leva a concluir que, em processos industriais, a combustão sempre é levada a efeito, com excesso de ar.

O problema, então, se resume em sabermos qual a quantidade ótima de excesso de ar a ser introduzida para a queima de determinada quantidade de combustível, a fim de não ocorrer perdas de energia, o resultará em queda de rendimento do processo. Existem controles que podem ser efetuados com a instalação de aparelhos que analisam o percentual, em volume, de oxigênio e gás carbônico presentes nos gases de combustão, com o objetivo de serem efetuados os ajustes necessários.

Da mesma forma, uma reação incompleta, ou seja, aquela em que há insuficiência de Oxigênio para a Combustão, poderá causar problemas ao processo efetuado, posto que com menos quantidade de ar, teremos, evidentemente, menos oxigênio para queima, havendo necessidade de se induzir mais combustível, em virtude da diminuição da temperatura da fornalha, resultando em elevação nos custos de produção de vapor.

3. OS COMPONENTES DE UM SISTEMA GERADOR DE VAPOR

3.1. DESAERADORES

São equipamentos utilizados para elevar a temperatura da água como objetivo de eliminar os gases dissolvidos, principalmente oxigênio e gás carbônico, presentes na água de reposição da caldeira.

3.2. ECOMIZADORES

Possuem a função de aquecer a água de alimentação, através do calor dos gases de combustão. Está localizado, geralmente, entre a caldeira e a chaminé.

3.3. PRÉ-AQUECEDOR

É um trocador de calor de tubos retos ou na forma de alvéolos rotativos onde o ar utilizado na combustão é pré-aquecido pelos gases exauridos a temperatura abaixo de 300°C.

3.4. CHAMINÉS

São dutos verticais destinados a conduzir os gases mais frios das caldeiras para a atmosfera; dependendo da sua altura, a tiragem dos gases poderá ser natural ou forçada.

3.5. CALDEIRAS ELÉTRICAS

Classificam-se em:

- Caldeiras a resistência;
- Caldeiras a eletrodos;
- Caldeiras a eletrodos borrifados;
- Caldeiras a eletrodos submersos.

Estas caldeiras produzem apenas vapor saturado, com rendimento de 98%, trabalham com alta ou baixa voltagem e oferecem uma série de vantagens:

- Inexistência de subprodutos poluentes;
- Instalações compactas;
- Baixo custo de manutenção;
- Investimento inicial menor que as caldeiras a combustão;
- Melhoria da falta de potência e carga.

Desvantagem:

- Elevado custo da energia elétrica.

3.6. CALDEIRAS A COMBUSTÃO: DIVIDEM-SE EM FOGOTUBULARES E AGUATUBULARES

Caldeiras fogotubulares: neste tipo de caldeira a combustão processa-se no interior do tubo de fogo, de diâmetro elevado e os gases de combustão fluem pelos tubos de segunda e terceira passagem de diâmetro reduzido, até sua exaustão pelas chaminés. A água contida num cilindro termicamente isolado envolve o tubo de fogo e os tubos de gases, onde se processa a transferência de calor e conseqüentemente a vaporização.

Elas também são conhecidas como caldeiras cilíndricas, pois a água e o vapor estão contidos dentro de um só reservatório.

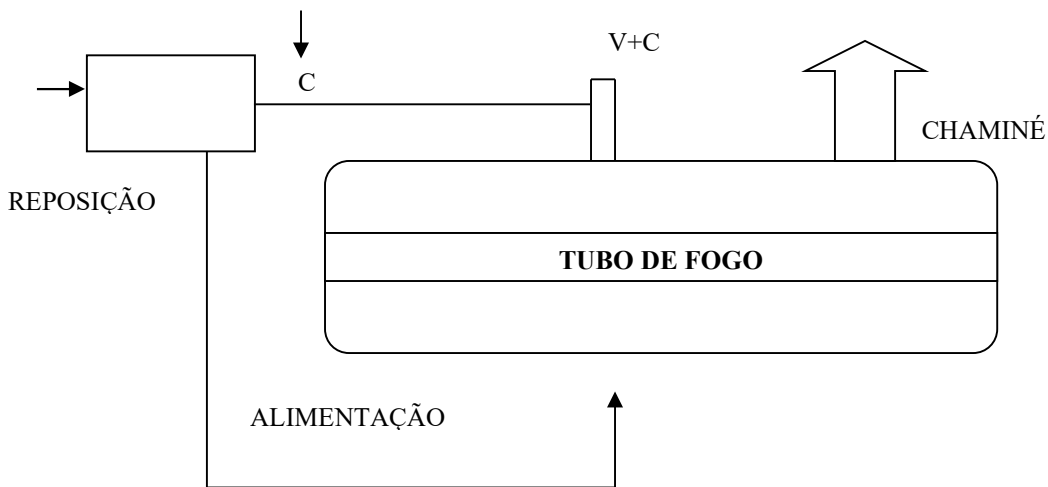
As caldeiras fogotubulares geram somente vapor saturado e tem capacidade de vaporização máxima de 30T/h e de pressão de trabalho limitada em torno de 20 kgt/cm².

Conforme o tipo de tubulação e tubos de gases usados, seja lisa ou corrugada, sua capacidade de produção de vapor, por m² de superfície de aquecimento, poderá variar, respectivamente, de 30 a 80 kg, com água de alimentação a 80°C.

Caldeiras aquatubulares: são constituídos de um tubulão superior chamada de tubulão de vapor e um ou mais tubulões inferiores denominados tubulões de lama interligando os tubulões tem-se tubulações dispostas na forma de feixes tubulares e paredes d'água. Entre os tubos do feixe tubular, ou entre estes e as paredes de água se encontra a fornalha, onde queima o combustível escolhido.

Em operação elas transformam a energia potencial dos combustíveis em energia calorífica, a qual é transformada em vapor.

4. EQUAÇÕES DE BALANÇO DE MASSA EM GERADORES DE VAPOR



$$E = S$$

$$A = R + C$$

$$A = V + D$$

EXEMPLO:

$$V = 1000 \text{ KG/h}$$

$$V = 1 \text{ t/H}$$

$$Dt \times A = Dt \times R + Dt \times C$$

$$20 \times 1 = 50 \times R + 0 \times C$$

$$R = \frac{20 \text{ g}}{50 \text{ g/m}^3} = 0,4 \quad C = 1 - 0,4 = 0,6$$

$$R = 40\% \quad C = 60\%$$

A = ALIMENTAÇÃO
R = REPOSIÇÃO
C = RETORNO DE CONDENSADO
V = PRODUÇÃO DE VAPOR
D = DESCARGAS (EXTRAÇÕES DE LAMA E SÓLIDOS DISSOLVIDOS)

Dureza Alimentação = Dureza vapor + Dureza descarga

$$Dt_a \times A = Dt_v \times V + Dt_d \times \text{Descarga}$$

$$Dt_a \times A = 0 + Dt_d \times D$$

$$D = \frac{Dt_v \times V}{Dt_a \times A}$$

$$D = \frac{20 \times 1}{300} = 0,066 \times A$$

$$D = 6,6\%$$

A descarga neste caso é 6,6 % do volume da água de alimentação.

Obs.: A dureza máxima no interior da caldeira para manter a eficiência no ciclo dos fosfatos (formador de lama não aderente) é de 300 ppm.

CONCLUSÕES:

- Para calcular a quantidade de descarga precisa da produção de vapor e da análise dos parâmetros na água de alimentação.

- Para determinar o tempo em segundos para purgar 1 metro cúbico (m³) precisa saber o diâmetro interno da válvula de extração e da pressão de trabalho da caldeira.

Exemplo: em uma caldeira que trabalha a pressão de 10kg/cm² e tem diâmetro de descarga igual a 2 polegadas, o tempo para purgar 1m³ é de 14 segundos.

Exemplo: Purga = 1T/h x 0,066 = 0,066 m³/h
1m³ – 14 segundos
0,066 – x = segundos por hora

Obs.: Dados básicos necessários para fazer o programa recomendado e conseqüentemente o orçamento para caldeira.

- Pressão, produção, regime operacional, retorno de condensado, diâmetro de descarga.

- Análise: reposição, alimentação e água de nível.

5. MÉTODOS DE CONTROLE EM SISTEMAS DE GERAÇÃO DE VAPOR

5.1. CONTROLE DE INCRUSTAÇÕES

Os sais de Dureza, principalmente o carbonato de cálcio, são as incrustações mais comuns e em maior proporção encontrada em caldeiras e seu controle pode ser das seguintes maneiras:

- Tratamento externo através de abrandamento por Cal ou por resinas sintéticas de troca iônica para remoção parcial ou total do cálcio e magnésio.

- Tratamento interno através da adição de produtos para evitar depósitos e incrustações:

- * ciclo dos fosfatos;
- * tratamento complexométrico;
- * tratamento dispersante.

5.2. CONTROLE DOS GASES

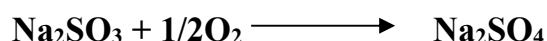
A presença de gases dissolvidos na água, tais como oxigênio, dióxido de carbono, gás sulfídrico, etc., contribuem por acelerar o processo corrosivo no sistema de geração de vapor, sua remoção se faz necessária.

a) CONTROLE DE OXIGÊNIO

Para remover o oxigênio nos sistemas de geração de vapor, utilizam-se procedimentos mecânicos ou químicos.

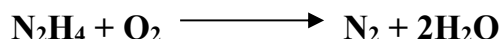
- Remoção mecânica: No caso de água para caldeiras, utilizam-se equipamentos onde os gases são estripados pelo vapor. Neste caso, o residual do oxigênio dissolvido é da ordem de 6 a 7 pph.

- Desaceleração química: A utilização de sulfito de sódio para remoção do oxigênio produz Sulfato de sódio.



- Com a finalidade de acelerar a reação do Sulfito de sódio com o oxigênio, utilizam-se catalizadores de reação, sendo os sais de cobalto os mais eficazes.

A remoção de oxigênio por Hidrato de Hidrazina é realizada preferencialmente, uma vez que não contribui para o aumento do teor sólidos dissolvidos. No entanto, deve-se observar os seguintes cuidados tratamentos com esses compostos.



- O sulfito de sódio não é recomendado em alta pressão, devido a sua degradação térmica, resultando em anidrido sulfuroso (SO_2) e gás sulfídrico (H_2S) produtos altamente corrosivos;
- A hidrazina sofre decomposição térmica, proporcional a sua concentração no meio, a partir de 200°C , tendo como produto a amônia que, em presença de oxigênio, pode atacar ligas de cobre.

b) CONTROLE DO GÁS CARBÔNICO

O controle da corrosão devida ao gás carbônico pode ser efetuado através de um tratamento externo adequado, desde o abrandamento com cal, até a desmineralização completa da água, através de resinas de troca iônica.

O emprego de aminas voláteis, como a morfolina e a ciclohexilamina, neutraliza o gás carbônico, formando bicarbonatos e aumentando o pH do condensado, mantendo a alcalinidade necessária para a inibição de corrosão no sistema.

c) CONTROLE DO Ph

O controle de pH deve ser bem avaliado, devido as conseqüências danosas que pode trazer aos sistemas. Um pH baixo torna a água agressiva, resultante do alto

teor de íons de hidrogênio presentes. A fim de se evitar este inconveniente, é utilizada a soda cáustica (NaOH) em escamas, cuja dosagem dependerá, principalmente, da pressão de trabalho do equipamento.

5.3. CONTROLE DE DEPÓSITOS

Os depósitos podem ser evitados a partir de um rígido controle da água de alimentação e um tratamento químico adequado, conforme discutido no capítulo III. A escolha de produtos adequados e em dosagens coerentes, inibem a formação de depósitos, proporcionando uma maior vida útil aos equipamentos e economias de combustível, tão necessária atualmente.

5.4. CONTROLE DO ARRASTE

Sabemos que no ciclo de uma caldeira, a água é aquecida até se transformar em vapor. Somos levados a pensar, então, que este vapor é constituído por moléculas de água pura. Na realidade, essas moléculas de água contem, partículas líquidas e gases (como o CO₂), que, com a elevação da pressão, propiciam o arraste de substâncias como os cloretos e a sílica. Para controle do arraste químico, a solução adotada é a adição de produtos antiespumantes em conjunto com um programa de descargas, visando a não deposição de lama sobre as superfícies dos equipamentos e tubulações da seção pós-caldeira.

6. SISTEMAS DE DESCARGA

A descarga é o mecanismo através do qual se elimina, periodicamente, as impurezas que se concentram na fase líquida da caldeira, com o objetivo de manter o nível máximo de sólidos dissolvidos, permissíveis nos sistemas considerados.

6.1 TIPOS DE DESCARGAS

As descargas efetuadas em sistemas geradores de vapor podem ser de nível ou de fundo:

a) DESCARGAS DE NÍVEL

Devem ser contidas, com a finalidade de limitar o teor de sólidos dissolvidos nas águas das caldeiras.

b) DESCARGAS DE FUNDO

Efetuada periodicamente, as descargas de fundo tem como objetivo a eliminação da lama concentrada na parte inferior da caldeira e parte dos sólidos dissolvidos. O tempo de duração das descargas pode ser calculado, aproximadamente, pela equação abaixo:

$$\omin� \text{ seg} = \frac{V}{C * 2,2658 * \emptyset (P - 1)}$$

Onde,

- $\omin�$ seg - Tempo de descarga, em segundos, a ser efetuada a cada hora;
- V – Produção de vapor, em Kg/h;
- C – N° de ciclos de concentração recomendados;
- \emptyset – Diâmetro interno do tubo de descarga, em polegadas;
- P – Pressão de trabalho, em Kgf/cm².

O tempo acima acumulado deverá ser acrescido de 20% a 40%, devido a contínua queda de pressão que ocorre ao se abrir a válvula de descarga. Com relação à duração, as descargas podem se classificadas em:

Descargas de curta duração (5 – 15 seg) – são as mais utilizadas e tendem a eliminar grande quantidade de lama para pouca quantidade de água concentrada.

Descargas de longa duração (15 – 60 seg) – eliminam grande quantidade de água concentrada e sais dissolvidos em relação à pouca quantidade de lama. Não são muito empregadas devido ao alto consumo de reposição exigida para realimentar a caldeira.

Na realidade, o recomendável é que uma descarga não ultrapasse 10 seg. Quando isto acontece, o ideal seria aumentar a freqüência de descargas, por hora, de modo que o tempo de cada um a delas, não ultrapasse esse limite de 10 segundos.

6.2. CONSEQUÊNCIAS DE DESCARGAS IRREGULARES

A não obediência a um sistema de descargas regulares em geradores de vapor, tende a causar uma concentração excessiva de sais dissolvidos na água, resultando inúmeros problemas, entre os quais:

- a) Formação de espuma com conseqüente arraste de partículas;
- b) Elevação do ponto de ebulição da água, ocasionando em maior consumo de combustível;
- c) Depósitos em linhas e equipamentos dos sistemas, acarretando perda da eficiência do processo.

7. ALIMENTAÇÃO DOS PRODUTOS QUÍMICOS RECOMENDADOS

7.1. INTRODUÇÃO

Os produtos químicos destinados ao tratamento interno de um sistema apresentam sua máxima eficiência quando introduzidos nos sistemas de modo correto e nas dosagens exata, mantendo-se, ainda, as dosagens residuais ideais. Além da utilização adequada dos equipamentos da alimentação de produtos químicos e dos controles analíticos, necessários para a regulação do mecanismo de alimentação, cabe ao operador, em última instância, o sucesso de um bom programa de tratamento.

7.2. PONTOS DE ALIMENTAÇÃO DOS PRODUTOS

A alimentação de produtos químicos para sistemas geradores de vapor, é geralmente feita de forma contínua, podendo ser manual ou automática, quando dispositivos especiais permitem corrigir a dosagem de alimentação em resposta a uma variável perturbada (pH, condutividade, etc.). Os produtos químicos utilizados geralmente são líquidos ou soluções preparadas a partir de substâncias em pó.

As bombas dosadoras de deslocamento positivo são os equipamentos mais indicados para a alimentação dos produtos corretivos, devido ao alto grau de confiabilidade e precisão das mesmas.

Dependendo dos tipos de produtos utilizados no tratamento e de suas compatibilidades pode-se alimentá-los no mesmo dosador e injetá-los no mesmo ponto do sistema, sem provocar danos dignos de nota na eficiência do tratamento efetuado.

Às vezes são necessários outros dosadores e outros pontos de aplicação dos produtos no sistema. Em seguida, orientamos o modo de aplicação mais indicado para os produtos recomendados em tratamento dos sistemas geradores de vapor:

- **FOSFATO** – Geralmente são alimentados diretamente no gerador de vapor. Fosfatos complexos, como polifosfatos, podem ser adicionados na caldeira ou na seção pré-caldeira, enquanto os ortofosfatos devem ser aplicados diretamente para se evitar uma reação antecipada ainda na linha de água de alimentação.
- **SEQUESTRANTES DE OXIGÊNIO** – Devem ser introduzidos no setor de armazenamento de um desaerador e, na ausência deste, no coletor de condensado. De qualquer forma, é imprescindível a alimentação do sequestrante de Oxigênio muito antes do gerador de vapor, para proporcionar um tempo suficiente para assegurar a completa reação dos produtos.
- **QUELANTES** – São introduzidos na linha de água de alimentação, ainda na seção pré-caldeira e livre de Oxigênio, pois este pode ocasionar a degradação

dos quelantes, Esses produtos nunca devem ser alimentados antes da entrada de trocadores de calor de cobre e/ou de suas ligas, devido a sua grande afinidade química por esses metais. Os quelantes não devem também ser alimentados diretamente ao tubulão da caldeira, devido a sua ação corrosiva, relevante a altas temperaturas e concentrações. Uma dosagem excessiva de quelantes na água da caldeira pode acarretar corrosão no metal desses equipamentos, pela formação de um complexo com filme protetor de óxido metálico da superfície. Conseqüentemente, além de uma alimentação criteriosa, deve-se controlar a concentração de quelante livre, bem como o teor de quelante total na água da caldeira.

- **DISPERSANTES, AMINAS NEUTRALIZANTES, ANTIESPUMANTES E ÁLCALIS** – Podem ser introduzidos no setor de armazenamento de um desaerador ou diretamente na linha de água de alimentação, ou ainda, no gerador de vapor.
- **AMINAS FÍLMICAS** – Conforme o tipo, podem ser alimentadas diretamente na seção pré-caldeira ou caldeira. Entretanto, é preferível sua alimentação diretamente no coletor de vapor.
- **CONDICIONADORES DE LAMA** – Devem ser alimentados no setor de armazenamento de um desaerador ou na linha de alimentação da água da caldeira.

8. PRÉ-LIMPEZA E PRÉ-TRATAMENTO DE CALDEIRAS

Durante a instalação de um sistema de geração de vapor novo é muito comum a presença de uma série de impurezas decorrentes da estocagem dos equipamentos ao ar livre e sujeitos a todas as interpéries possíveis. Durante a própria montagem, ocorrem ainda contaminações por óleos, graxas e produtos de corrosão. Muitas vezes, um sistema já instalado e em operação, se apresenta de tal maneira incrustado, que se torna praticamente anti-producente seu manuseio, e altos riscos são envolvidos em sua operação.

Para se evitar esses problemas, é conveniente realizar uma pré-limpeza e um pré-tratamento dos equipamentos destinados a geração de vapor quando do início da operação, ou quando, por circunstâncias adversas, o sistemas já esteja em operação.

8.1. MÉTODOS DE LIMPEZA

Podem-se utilizar métodos mecânicos e/ou químicos de limpeza de equipamentos. Os métodos mecânicos geralmente são de custo elevado e demorado. A lavagem química é requerida quando os tubos da caldeira se mostram com incrustações de espessura considerável, devido às condições inadequadas de operação do sistema por longos períodos ou quando não se utiliza tratamento químico específico. As lavagens químicas podem ser:

a) LAVAGEM COM ÁCIDO

Emprega, geralmente, ácidos inibidos, ácido sulfônico ou ácido clorídrico. Os inibidores de ácido, geralmente são constituídos de substâncias minerais ou orgânicas. O emprego desses inibidores, entretanto, não elimina definitivamente o risco de corrosão, pois somente reduz a velocidade e a amplitude do ataque.

É muito importante a eliminação completa dos resíduos após a lavagem antes do sistema entrar novamente em operação, a fim de se evitar o aparecimento de corrosões localizadas.

b) EBULIÇÃO ALCALINA

Muitas vezes, numa água de caldeira que contenha sílica, o emprego do ácido clorídrico inibido não surte o efeito desejado, num programa de limpeza ácida. A introdução, em dosagens controladas, de compostos alcalinos seguida de uma ebulição da água, auxilia na formação de silicatos solúveis, e que permite a eliminação da sílica em pequenas quantidades em crostas através das descargas aplicadas.

Em qualquer das etapas de uma lavagem química, é indispensável um estudo criterioso do tratamento a ser empregado e seu melhor modo de aplicação para satisfazer a todas as condições existentes.

A lavagem química deve ser utilizada como ótimo recurso. O ideal é a adoção de um tratamento químico sistemático que evite os problemas ocasionados pelas impurezas presentes na água.

9. PROTEÇÃO DE CALDEIRAS PARADAS

Geradores de vapor utilizados continuamente ficam mais expostos a problemas de depósitos. Numa caldeira parada, os sólidos em suspensão sedimentam e se depositam nas superfícies metálicas. Com o passar do tempo, estes elementos vão adquirindo rigidez e aumentando suas proporções até que, quando os geradores de vapor voltar a operar novamente, esses depósitos se cozinham devido ao aquecimento, formando crostas duras de difícil remoção.

Um ataque corrosivo em período de ociosidade acarreta perda de metal além de liberar produtos de corrosão da seção pré-caldeira durante as paradas para a manutenção, o que nas fases subseqüentes de operação e processo, podem gerar depósitos, superaquecimento e ataques corrosivos localizados nos tubos da caldeira.

Para se obter a manutenção preventiva mais eficiente, deve-se proceder os controles de corrosão durante as etapas de parada, partida e quando da operação do sistema.

9.1. DESATIVAÇÃO TEMPORÁRIA DAS CALDEIRAS

É indispensável eliminar a maior quantidade possível de lama uma caldeira que ser inativada por algum tempo. Deve-se, durante a operação de desativação, proceder às descargas de fundo freqüentes por alguns dias seguidas por dosagens crescentes de condicionadores de lama, para evitar deposição de sólidos em suspensão.

Após a drenagem da caldeira, deve-se lavar a mesma abundantemente com água e alta pressão.

9.2. TÉCNICAS DE PROTEÇÃO

O oxigênio, a água e o pH são os fatores que mais afetam a corrosão em caldeiras ociosas. Inúmeros métodos podem ser empregados na proteção desses sistemas, dependendo dos seguintes parâmetros:

- Tempo de parada;
- Grau de disponibilidade do equipamento.

a) INATIVAÇÃO A SECO DA CALDEIRA

Objetiva-se eliminar a água e reduzir a umidade relativa do ar a um valor conveniente.

b) INATIVAÇÃO POR NITROGÊNIO

Utiliza-se o Nitrogênio (gás inerte) para descolar o ar do gerador de vapor inibindo, desta forma, o fenômeno da corrosão.

c) INATIVAÇÃO A ÚMIDO

Enche-se a caldeira com água aquecida (água de alimentação desaerada ou condensado), adicionam-se inibidores de corrosão, à base de sulfitos ou hidrazina,

mantendo-se um teor residual do mesmo, que deve ser controlado periodicamente para se constatar eventuais infiltrações de oxigênio e proceder as correções necessárias. Concomitantemente, o pH da água deve ser mantido na faixa alcalina com o uso de soda cáustica, por exemplo, num teor suficiente para manter o pH em torno de 10 a 11,5.

Via de regra, a inativação a úmido é empregada em sistemas cujas paradas não excedam a um mês e que queiram disponibilidade imediata de operação. Por outro lado, a inativação a seco é mais utilizada em sistemas cujas paradas excedam a um mês.

10. INSPEÇÕES DE SEGURANÇA

Segundo o art. 188 da Lei 6.514, de 22 de novembro de 1977, regulamentada pelo Ministério do Trabalho, todas as caldeiras deverão ser submetidas a inspeções periódicas de segurança, através de profissionais ou empresas qualificadas, inscritas naquele órgão. As inspeções foram classificadas em:

a) INSPEÇÃO INICIAL

É a primeira inspeção efetuada no equipamento, antes do início da sua utilização operacional;

b) INSPEÇÃO PERIÓDICA

É aquele que toda caldeira deve ser submetida, periodicamente, com o objetivo de se avaliar as condições operacionais do equipamento, principalmente em relação à MTPA (Máxima Pressão de Trabalho Admissível).

c) INSPEÇÃO EXTRAORDINÁRIA

Será efetuada sempre que houver necessidade técnica fundamentada.

Como os sistemas de geração de vapor estão submetidos a temperaturas, pressões, muitas vezes, consideráveis, os riscos de acidentes devem sempre ser levados em conta. A adoção de medidas de segurança e conscientização da equipe responsável pela manutenção desses sistemas é um fator primordial para se evitar transtornos indesejáveis.

11. CONTROLES ANALÍTICOS

O controle adequado da água utilizada num sistema de vapor, é imprescindível para se evitar incidências de corrosão, incrustação e arraste. A análise química de água permite avaliar sua composição bruta, que aliada às características técnicas da caldeira, oferecem subsídios quanto a escolha dos processos físicos de purificação que se fazem necessários bem como o tratamento químico propriamente dito.

Além do mais, a análise de uma água deve ser feita regularmente, para se verificar eventuais alterações nas qualidades das mesmas, o que favorece os recursos necessários para as correções posteriores e controle das dosagens de produtos químicos recomendados. A periodicidade de uma análise muito com as condições de operação da caldeira e da natureza e gravidade dos problemas constatados.

11.1. PARÂMETROS USUAIS ANALISADOS

Coletadas as amostras das águas de diversos pontos do gerador de vapor, inúmeras determinações devem ser feitas, de modo a ter subsídios suficientes para as medidas corretivas que se fizerem necessárias.

As determinações mais corriqueiras constam de medidas de pH, dureza, alcalinidade, salinidade, teor de sílica, fosfatos, gases dissolvidos, teor de ferro, cloretos e de sólidos dissolvidos.

11.2. ANÁLISES DE CAMPO

Devido à simplicidade de execução, medidas de campo de pH, dureza, alcalinidade, cloretos e fosfatos não são suficientes para se avaliar o comportamento dos sistemas e proceder às correções iniciais das dosagens de produtos químicos que fizeram necessárias.

11.3. ANÁLISES DE LABORATÓRIO

No laboratório da empresa que presta serviços de tratamento, procede-se não só as análises feitas no campo, como também as determinações mais precisas e delicadas do teor de sílica, sólidos dissolvidos, cloretos, ferro, gases dissolvidos e outras características, conforme a necessidade.

a) TESTES USUAIS

Usualmente se coletam amostras de águas de vários pontos do gerador e leva-se ao laboratório para as análises pertinentes, sendo que determinadas características peculiares recebem mais destaque na análise, como indicado a seguir:

- **Água de alimentação**
 - a) pH
 - b) dureza (devido aos sais de cálcio e magnésio)
 - c) teor de oxigênio dissolvido
 - d) teor de ferro e cobre

- **Água da caldeira**
 - a) pH
 - b) dureza
 - c) fosfatos
 - d) alcalinidade
 - e) sílica
 - f) sulfitos ou hidrazinas
 - g) condutividade
 - h) cloreto

- **Água do condensado**
 - a) pH
 - b) dureza
 - c) condutividade
 - d) teor de ferro e cobre

BIBLIOGRAFIA

- (1) Dégremot, Memento technique de l'eau, 1992
- (2) Powell, Sheppard T, Acondicionamento de água para la industria – Editorial Limusa, México, 1979
- (3) Gentil, Vicente, Corrosão, 2º Edição Guanabara Dois, 1987
- (4) Pêra, Hildo, Geradores de vapor de água (Caldeira)
- (5) L. Germain, Tratamento de águas. Editora Polígono S.S. 1972
- (6) Santos Filhos, Davino Francisco, Tecnologia de tratamento de água, Almeida-Neves Editora Ltda, 1976
- (7) Argal Química S/A, Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento.