



SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL PARA POUPANÇA DE ÁGUA E ENERGIA ATRAVÉS DA REUTILIZAÇÃO DA ÁGUA DE PURGA DA TORRE DE ARREFECIMENTO

Autores: J. Aumatell Colom* , D. Gutiérrez Estepa, P. Infante Romero, J.I. Ramos Grande, Agustín Pérez, J. C. Benjumea Reyes, O. Villanueva Chapa, S. Coma Calafell, N. Adroer Martori, E. Cortada Cluet, M. C. Royo Reverter

ADQUIMICA S.A.

Resumo:

O estudo avalia os ganhos de desempenho, as poupanças de água e energia, as reduções de custos de funcionamento e as reduções de emissões de CO₂ resultantes da utilização de um anti-incrustante biodegradável e sem fósforo especificamente concebido e de um produto de limpeza que não contém EDTA ou fósforo na sua formulação numa instalação de osmose inversa real que trata a água de descarga da torre de arrefecimento para reutilização.

Antes da intervenção da ADQUIMICA, a instalação de osmose inversa estava afetada por uma forte incrustação de biofilme e as membranas tinham de ser limpas frequentemente, causando uma diminuição drástica do desempenho. Além disso, a instalação estava a funcionar com uma taxa de conversão inferior à projectada, devido ao elevado poder de incrustação da água e à utilização de um agente anti-incrustante não específico e de largo espectro formulado com fósforo orgânico.

O tratamento com um anti-incrustante específico e biodegradável, formulado a partir de uma mistura sinérgica de ingredientes activos isentos de fósforo, e a utilização de um produto de limpeza amigo do ambiente resultaram numa gestão sustentável da instalação de osmose inversa, com um aumento da utilização de água reutilizada, poupanças no consumo de água e uma redução da descarga. Foram conseguidas poupanças de energia e as emissões de CO foram reduzidas₂. Os custos associados à substituição da membrana, ao tempo de paragem da fábrica para limpeza e ao consumo de produtos químicos também foram reduzidos.



1 INTRODUÇÃO

A escassez de água resultante do crescimento da população constitui uma ameaça para o crescimento económico, a segurança da água e a saúde dos ecossistemas. A indústria consome grandes quantidades de água e produz quantidades significativas de águas residuais. Se estas águas residuais não forem adequadamente tratadas, a sua descarga conduz à poluição do ambiente, afetando negativamente os ecossistemas aquáticos e a saúde pública. A crescente exploração dos recursos hídricos devido ao aumento da procura, os problemas decorrentes das alterações climáticas, como as secas, a poluição dos ambientes aquáticos, a regulamentação mais rigorosa e o aumento dos preços da água fazem da reutilização da água uma necessidade crescente para garantir a quantidade e a qualidade da água. A reutilização da água minimiza o volume e o risco ambiental das águas residuais descarregadas e reduz também a pressão exercida sobre os ecossistemas pela captação de água.

Em muitas instalações industriais, como na indústria química, nas centrais elétricas ou na indústria petrolífera, os sistemas de arrefecimento são responsáveis por uma grande parte do consumo de água. Nas torres de arrefecimento, é fornecida a água que se perde por evaporação, arrastamento e purga. A reutilização da água de purga é uma fonte alternativa de água que pode ser utilizada para alimentar as torres de arrefecimento ou as caldeiras. As propriedades da água de purga dependem da qualidade da água de alimentação da torre de arrefecimento; do número de ciclos de concentração que aumentam a salinidade e as espécies incrustantes na água; do grau de contaminação microbiológica; e dos produtos químicos doseados para o tratamento anti-incrustante, anti-corrosão e biocida da torre (Ahmed *et al.*, 2020). A osmose inversa é uma das tecnologias mais utilizadas na reutilização das descargas das torres de arrefecimento, porque é eficaz na gama de salinidade das descargas e porque se consegue uma elevada taxa de recuperação com uma elevada qualidade da água tratada. É necessário conceber um pré-tratamento de osmose inversa adequado, dependendo da qualidade da água de purga. Quando a água permeada da osmose inversa é reutilizada para alimentar as torres de arrefecimento, é misturada com a água de alimentação, obtendo-se uma redução do consumo, uma melhoria da qualidade da água de alimentação, o funcionamento da torre com um maior número de ciclos de concentração e uma redução da descarga.

Para além do custo energético do funcionamento das instalações de osmose inversa, o custo de substituição das membranas é também significativo. A substituição da membrana depende do tempo de vida útil das membranas. As membranas são substituídas quando o desempenho desejado não é alcançado, ou seja, não produzem um fluxo de permeado suficiente ou a rejeição de sais é reduzida, resultando numa água com elevada condutividade. Existem dois tipos de fatores que reduzem o desempenho das membranas e, por conseguinte, reduzem a sua vida útil, conduzindo a um aumento do consumo de energia, dos custos de funcionamento e do impacto ambiental. Por um lado, há os fatores inerentes à membrana e à instalação, que são o envelhecimento da membrana e a configuração da instalação. Quando uma membrana é instalada, o seu desempenho diminui progressivamente devido à temperatura, à pressão, ao tempo de funcionamento e à compactação. Por outro lado, existem fatores que podem ser minimizados, prolongando a vida útil da membrana, que são os efeitos da incrustação, a frequência e eficácia da limpeza química da membrana. A incrustação da membrana é um problema persistente em todos os sistemas de osmose inversa. A perda de desempenho da membrana é causada principalmente por quatro tipos de incrustações: incrustações metálicas, causadas pela precipitação de sais inorgânicos de baixa solubilidade e óxidos/hidróxidos metálicos na rejeição; adsorção de matéria orgânica; formação de biofilme na superfície da membrana devido à atividade de microrganismos; e entupimento da superfície da membrana devido à deposição de material coloidal e particulado (Weinrich *et al.*, 2013 e Goh *et al.*, 2018). A fim de maximizar a recuperação dos sistemas de osmose inversa, evitar a incrustação e obter a máxima reutilização das descargas do sistema de arrefecimento, é necessário conceber um tratamento adequado e adaptado a cada instalação.

O objetivo deste estudo é avaliar o aumento do desempenho, a poupança de água e de energia, a redução dos custos de funcionamento e a redução das emissões de CO₂ resultantes da utilização



de um anti- incrustante biodegradável sem fósforo especificamente concebido e de um produto de limpeza que não contém EDTA ou fósforo na sua formulação numa instalação de osmose inversa real que trata a água de descarga da torre de arrefecimento para reutilização.

2 ESTUDO DE CASO DE UMA INSTALAÇÃO DE OSMOSE INVERSA QUE TRATA A ÁGUA DE PURGA DA TORRE DE ARREFECIMENTO PARA REUTILIZAÇÃO

2.1 Descrição da fábrica antes da intervenção da ADIQUIMICA

A Figura 1 mostra o diagrama de fluxo do processo para a reutilização da descarga da torre de arrefecimento da instalação do estudo de caso atual.

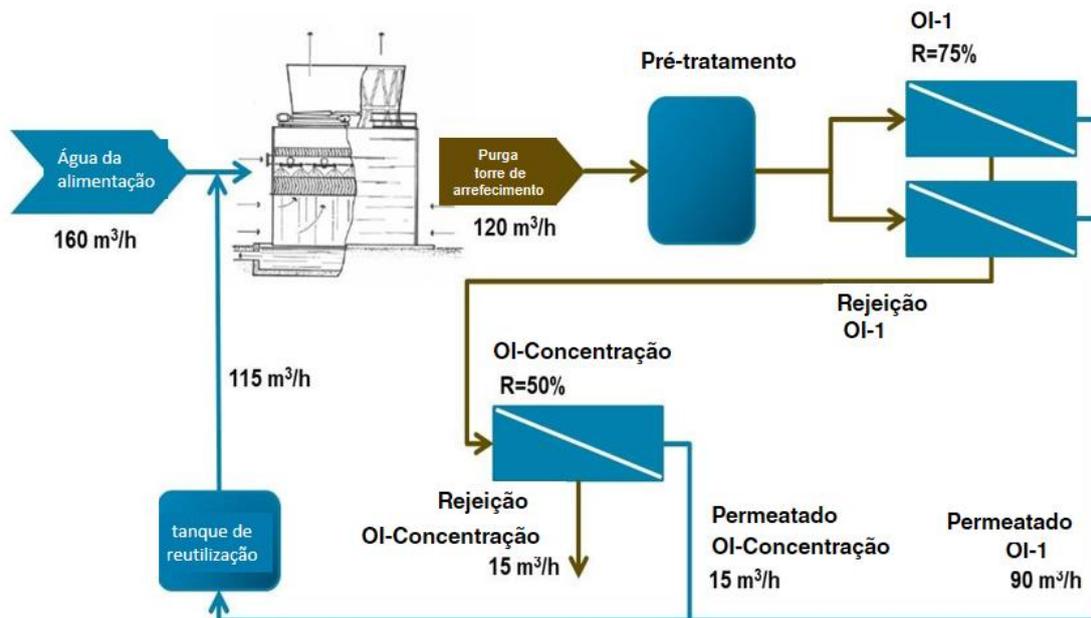


Figura 1. Diagrama de fluxo do processo de reutilização da descarga da torre de arrefecimento.

Devido ao processo de concentração que ocorre nas torres de arrefecimento, a purga contém uma elevada concentração de sais. O caudal de purga de 120 m³ /h é tratado para reutilização por duas linhas iguais de osmose inversa com pré-tratamento. Cada linha de osmose inversa é constituída por duas fases, funcionando com uma conversão de 75%. É obtido um caudal total de permeado de 90 m³ /h, que é reutilizado para alimentar as torres de arrefecimento.

O caudal de rejeição de 30 m³/h das linhas de osmose inversa que tratam as purgas alimenta uma osmose inversa para a recuperação dos rejeitados, esta recuperação por sua vez permite aumentar o caudal que é utilizado como entrada nas torres de refrigeração. Esta água tem uma elevada concentração de sais de incrustação. Devido ao processo de concentração de salinidade que ocorre no interior das membranas de osmose inversa, existe a possibilidade de compostos inorgânicos insolúveis ultrapassarem o limite de solubilidade e precipitarem na superfície das membranas. A rejeição é onde existe o maior perigo de precipitação, devido à elevada concentração de componentes salinos insolúveis. O fluxo de permeado da unidade de recuperação de rejeitados é também reutilizado para alimentar as torres de arrefecimento. A unidade de recuperação de rejeitados por osmose inversa é constituída por duas fases com uma configuração de três tubos de pressão na primeira fase e dois tubos na segunda fase. Cada tubo contém 6 membranas 8040 HYDRANAUTICS ESPA2-LD.



Antes da intervenção da ADIQUIMICA, para evitar a formação de incrustações nas membranas de osmose inversa, foi efetuado um tratamento convencional com a dosagem de um anti incrustante não específico de largo espectro formulado à base de fósforo orgânico. O desempenho da osmose inversa para a recuperação de rejeitados foi limitado pelo elevado potencial de incrustação do sulfato de cálcio nos rejeitados. A formação de incrustações de sulfato de cálcio ocorre quando as espécies iônicas individuais de sulfato e cálcio atingem uma concentração que excede os limites de solubilidade. A sobressaturação do sulfato de cálcio resulta na formação de incrustações. O sulfato de cálcio é um sal cristalino que precipita sob a forma de agulhas, formando rosetas ou estrelas muito estáveis, que geram incrustações muito difíceis de remover. A solubilidade do sulfato de cálcio em função da temperatura é semelhante à do carbonato de cálcio, ou seja, a solubilidade diminui com o aumento da temperatura. No entanto, enquanto a precipitação de carbonato de cálcio pode ser minimizada através da diminuição do pH com a dosagem de ácido, a solubilidade do sulfato de cálcio tem muito pouca dependência do pH. Por conseguinte, a precipitação de sulfato de cálcio não pode ser evitada através da redução do pH de alimentação e, conseqüentemente, a incrustação não pode ser removida através da utilização de agentes de limpeza ácidos. A incrustação de sulfato de cálcio leva a uma diminuição do caudal de permeado, a um aumento da pressão de alimentação, a um aumento do Delta P e a um aumento da passagem de sais. Este efeito é mais importante nas membranas localizadas nas últimas posições da instalação.

A percentagem de recuperação inicialmente projetada de rejeitados por osmose inversa foi de 65%. No entanto, devido ao elevado potencial de incrustação de sulfato de cálcio da água do concentrado, o anti incrustante geral que foi doseado não foi eficaz na prevenção da sua precipitação. A fim de proteger as membranas contra a incrustação de sulfato de cálcio, a conversão foi reduzida para 50%. Ao funcionar com uma conversão inferior à projetada, os potenciais de incrustação do sulfato de cálcio e de outras espécies insolúveis foram reduzidos. O poder de incrustação da água a 50% de conversão estava dentro dos limites de eficácia do anti incrustante geral de largo espectro de aplicabilidade. No entanto, o caudal de permeado projetado para ser reutilizado foi reduzido para 15 m³ /h. Por conseguinte, a reutilização total das descargas da torre de arrefecimento foi de 87,5%, o que corresponde à soma do caudal de permeado das duas linhas de osmose inversa que tratam as descargas (90 m³ /h) e do caudal de permeado da osmose inversa de recuperação de rejeitados (15 m³ /h). A rejeição total do sistema de reutilização foi de 15 m³ /h.³

Desta forma, a unidade de recuperação de rejeitados apresentava sintomas de incrustação grave, o que exigia uma limpeza química frequente. A figura 2 mostra a evolução do caudal de permeado normalizado. Os parâmetros normalizados são os melhores indicadores de incrustação da membrana. A normalização dos dados de funcionamento foi efetuada de acordo com a norma *ASTM D 4516 Standard Practice for Standardizing Reverse Osmosis Performance Data* (American Society for Testing Materials, 2010). O desempenho de uma instalação de osmose inversa é influenciado pela composição da água de alimentação, pressão de alimentação, temperatura e conversão. A alteração de qualquer uma destas variáveis implica uma variação na produtividade e na qualidade da água permeada. A normalização permite distinguir se a perda de rendimento é devida à alteração destas variáveis ou se é devida a incrustações. O caudal de permeado normalizado é calculado a partir do caudal de permeado da instalação corrigido das variáveis de composição, temperatura e pressão no momento da leitura da medição do caudal, e comparado com um valor de referência. Por conseguinte, uma perda de desempenho nos parâmetros normalizados é atribuída apenas a processos de incrustação.

Os dados normalizados indicam que, durante o período estudado, o caudal de permeado normalizado diminuiu progressivamente em 46%, passando de 14 para 7,5 m³ /h. Foram efetuadas sete limpezas químicas durante o período de um ano. A elevada frequência das limpezas e os protocolos de limpeza aplicados foram ineficazes e não conseguiram restabelecer o caudal de permeado normalizado.



Figura 2. Caudal de permeado normalizado do OR de recuperação de rejeitados. Caudal de projeto afunorar com 50% de conversão e frequência de limpeza química.

3 AÇÕES DE MELHORIA PARA AUMENTAR O DESEMPENHO DA INSTALAÇÃO DE OSMOSE INVERSA PARA A RECUPERAÇÃO DE REJEITADOS

A fim de aumentar o desempenho da recuperação de rejeitados por osmose inversa, a ADIQUIMICA estabeleceu duas ações de melhoria:

1. Aumentar a conversão das instalações e minimizar o volume de rejeitados através da dosagem de um anti incrustante específico para inibir a precipitação de sulfato de cálcio, formulado a partir de uma mistura sinérgica de ingredientes ativos biodegradáveis e isentos de fósforo.
2. Implementar um protocolo de limpeza eficaz para restaurar o desempenho da membrana e estabelecer um programa preventivo para minimizar a incrustação e a frequência da limpeza.

3.1 Estratégia para aumentar a conversão da osmose inversa de recuperação de rejeitados

3.1.1 *Agente anti incrustante biodegradável, isento de fósforo, especificamente para inibir a formação de incrustações de sulfato de cálcio*

Com o objetivo de aumentar a conversão da recuperação de rejeitados por osmose inversa para o valor projetado de 65%, o anti incrustante específico ADIC RO-64 AdicGreen foi desenvolvido com uma elevada eficiência para inibir a formação de incrustações de sulfato de cálcio em sistemas de membranas. É também eficaz contra a formação de outras incrustações inorgânicas, tais como carbonato de cálcio, sulfato de bário, sulfato de estrôncio, fluoreto de cálcio e fosfato de cálcio, bem como inibe a formação de depósitos de ferro, alumínio, sílica e manganês.

Os anti incrustantes que contêm fósforo na sua formulação são amplamente utilizados para o controlo de incrustações em sistemas de osmose inversa. No entanto, a sua baixa biodegradabilidade e o teor de fósforo estão entre as razões de preocupação quanto ao impacto ambiental da descarga destes compostos. Quando os anti incrustantes contendo fósforo são descarregados, podem atuar como uma fonte de nutrientes para



algas e bactérias e podem causar eutrofização (Fritzmann *et al*, 2007). Conseqüentemente, os regulamentos ambientais e os requisitos de qualidade para a qualidade de rejeição das instalações de osmose inversa estão a tornar-se cada vez mais restritivos no que diz respeito à descarga de produtos químicos utilizados no tratamento da água. Neste contexto, o anti incrustante desenvolvido é formulado a partir de uma mistura sinérgica de ingredientes ativos que não contém fósforo na sua composição. Além disso, é um produto biodegradável de acordo com o método padrão para a avaliação da biodegradabilidade OCDE 302 B (OCDE, 1992). Os testes de biodegradabilidade determinam a suscetibilidade do anti incrustante à degradação microbiana em condições ambientais, de modo a que a sua segurança possa ser estabelecida quando vertido. Nos ensaios experimentais, o processo de biodegradação é monitorizado através da determinação da CQO (carência química de oxigénio) de diferentes misturas contendo o anti incrustante desenvolvido, nutrientes e lamas ativas durante um período de 28 dias.

3.1.2 Software para a conceção de tratamentos anti incrustantes, modelação dos equilíbrios iónicos da água e previsão dos potenciais de incrustação

Para conceber um tratamento anti incrustante ótimo que funcione com uma taxa de conversão de 65%, é essencial, por um lado, modelar com precisão a composição e o comportamento da água no interior das membranas e prever a formação de incrustações com grande exatidão. Por outro lado, é também essencial dispor de um modelo de dosagem anti incrustante. A aplicação ADICRO é um software desenvolvido integralmente pela ADIQUIMICA (Adroer *et al.*, 2001), que há mais de 30 anos cumpre estes objetivos, proporcionando conhecimento e tratamento eficaz das instalações de osmose inversa com uma minimização dos custos de exploração e do impacto ambiental. Trata-se de um programa em constante aperfeiçoamento e inovação, baseado nos conhecimentos adquiridos em ensaios laboratoriais e em instalações piloto, na experiência adquirida em instalações reais e na bibliografia científica mais recente. O software ADICRO permite determinar com grande precisão os potenciais de incrustação e calcular a dosagem mínima de anti-incrustante para garantir a proteção completa das membranas.

3.1.3 Conceção do tratamento anti incrustante do sistema de recuperação de rejeitados por osmose inversa

O objetivo do estudo era determinar a dosagem ótima do anti incrustante específico para operar na conversão projetada de 65% sem perigo de incrustação de sulfato de cálcio. Foi efetuado um estudo de simulação utilizando o software ADICRO com base na composição da água de alimentação da estação de recuperação de rejeitados por osmose inversa, com uma elevada concentração de sulfato (3368 mg/L SO_4) e de cálcio (1316 mg/L Ca). A Tabela 1 mostra a composição da água de alimentação e da água de rejeito operando a 65% de conversão.

O software ADICRO foi utilizado para calcular o poder de incrustação da água de rejeição a 65% de conversão e a dosagem ótima do anti incrustante específico para evitar a incrustação. O software ADICRO calcula os potenciais de incrustação, que permitem determinar o risco de incrustação nos rejeitados. O potencial de incrustação é expresso como a percentagem do limite máximo admissível para as diferentes taxas de supersaturação e de incrustação. Um potencial de incrustação superior a 100% significa que o índice de supersaturação correspondente é superior ao limite máximo admissível para este índice e que o composto insolúvel pode precipitar. Os resultados da simulação indicaram que os potenciais de entupimento sem tratamento anti incrustante de carbonato de cálcio, sulfato de cálcio, fluoreto de cálcio, fosfato de cálcio, sulfato de estrôncio, ferro e sílica excederam o valor de 100%, indicando que havia um risco de entupimento da membrana por estes compostos. Com a dosagem do anti incrustante específico, os potenciais de incrustação destes compostos insolúveis diminuíram para valores inferiores a 100%.



Tabela 1. Composição da água de alimentação da osmose inversa de recuperação de rejeitados e da água concentrado a 65% de conversão

Parâmetro	Abastecimento de água	Rejeitar água (Conversão=65%) simulado (software ADICRO)
pH	7.50	7.78
Cálcio	1316 mg/L Ca	3730 mg/L Ca
Magnésio	353 mg/L Mg	1001 mg/L Mg
Sódio	1185 mg/L Na	3361 mg/L Na
Potássio	95 mg/L K	269 mg/L K
Estrôncio	10,2 mg/L Sr	28,9 mg/L Sr
Ferro	0,12 mg/L Fe	0,33 mg/L Fe
Alumínio	0,04 mg/L Al	0,12 mg/L Al
Sulfato	3368 mg/L SO ₄	9546 mg/L SO ₄
Cloreto	2563 mg/L Cl	7264 mg/L Cl
Fluoreto	0,39 mg/L F	2,52 mg/L F
Bicarbonato	255,2 mg/L HCO ₃	583,9 mg/L HCO ₃
Carbonatos	3,3 mg/L CO ₃	21,9 mg/L CO ₃
CO ₂	13,3 mg/L H ₂ CO ₃	13,3 mg/L H ₂ CO ₃
Nitrato	103 mg/L NO ₃	292 mg/L NO ₃
Sílica	45 mg/L SiO ₂	128 mg/L SiO ₂
Fosfato	0,17 mg/L PO ₄	0,49 mg/L PO ₄
Força iônica	0.173	0.436

A figura 3 mostra os resultados simulados da redução dos potenciais de incrustação da água de rejeição com o doseamento do anti incrustante específico. Conclui-se que, com o doseamento do anti incrustante específico e funcionando à conversão de projeto de 65%, o sistema está perfeitamente protegido contra a formação de incrustações e de carepa, incluindo o sulfato de cálcio.

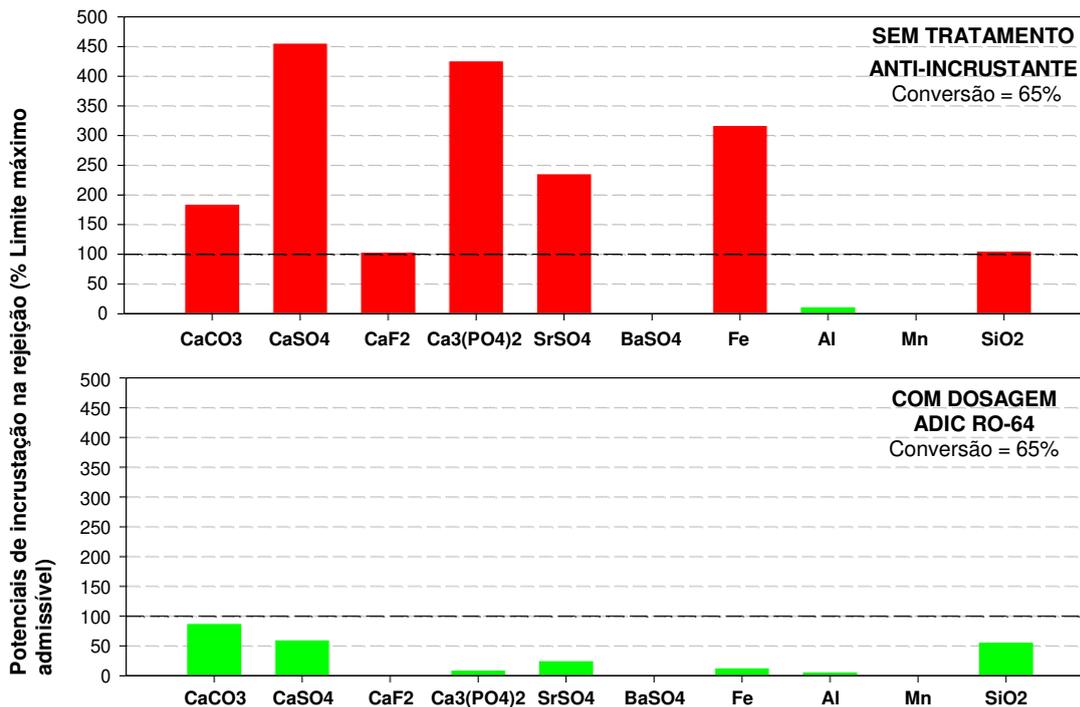


Figura 3. Potenciais de incrustação na rejeição para cada espécie insolúvel sem tratamento com anti-incrustante e com dosagem do anti incrustante específico operando a 65% de conversão.

3.2 Estratégia para o controlo e prevenção de incrustações nas membranas de osmose inversa

3.2.1 Caracterização da incrustação da membrana

A unidade de recuperação de rejeitados apresentava sintomas de incrustações graves, que exigiam uma limpeza química frequente. Para caracterizar a incrustação que afetava as membranas, foi realizada uma autópsia de um elemento HYDRANAUTICS ESPA2-LD da primeira posição da primeira fase da unidade de recuperação de rejeitados.

Os resultados da autópsia indicaram que a superfície da membrana estava contaminada por uma camada abundante de depósito (Figura 4) correspondendo maioritariamente a biofilme (Vrouwenvelder *et al.*, 2010e Matin *et al.*, 2011).



Figura 4: Aspeto da superfície da membrana e do espaçador de plástico para rejeição da alimentação fortemente contaminados com biofilme.



3.2.2 Protocolo de limpeza eficaz e programa preventivo para controlo de incrustações

O grande número de limpezas químicas que tinham sido efetuadas antes da intervenção da ADIQUIMICA não foi eficaz. Por este motivo, após a determinação da composição e do mecanismo de incrustação das membranas por autópsia, foram efetuados testes de limpeza numa instalação piloto de osmose inversa utilizando amostras da membrana autopsiada. O objetivo dos testes de limpeza era conceber o protocolo de limpeza mais eficaz para a remoção do biofilme, tendo em conta critérios ambientais e económicos.

3.2.2.1 Produto de limpeza amigo do ambiente, isento de fósforo e EDTA

Tanto os produtos de limpeza como os protocolos de limpeza desempenham um papel fundamental na recuperação do desempenho da membrana. Os protocolos de limpeza padrão que utilizam produtos químicos genéricos são frequentemente ineficazes e não eliminam as incrustações. Se os produtos de limpeza não forem adequados, a eficácia desejada pode não ser alcançada ou a membrana pode ser danificada. A utilização de produtos de limpeza formulados garante uma elevada eficácia e compatibilidade com as membranas, prolongando a sua vida útil. Os produtos de limpeza formulados são uma mistura de ingredientes que atuam em sinergia. Estes produtos incluem ingredientes ativos que removem incrustações específicas.

Os produtos de limpeza que contêm ácido etilenodiaminotetracético (EDTA) e fósforo na sua formulação são amplamente utilizados para a limpeza de membranas de osmose inversa. No entanto, a sua biodegradabilidade e o teor de fósforo são algumas das razões para a crescente preocupação com o impacto ambiental da descarga destes compostos. O facto de o EDTA não ser biodegradável significa que se encontra em quantidades consideráveis na água, com graves consequências ambientais. As descargas de produtos que contêm fósforo podem levar à eutrofização, uma vez que são uma fonte de nutrientes para algas e bactérias.

As limpezas químicas foram efetuadas com o produto de limpeza líquido inovador e amigo do ambiente ADICLEAN 202 AdicGreen. Trata-se de um produto de limpeza líquido de pH alcalino, que não contém EDTA ou fósforo na sua formulação. É um produto altamente formulado que contém ingredientes ativos amigos do ambiente que substituem os ingredientes ativos não biodegradáveis que contribuem para a eutrofização. É altamente eficaz na remoção de biofilme e incrustações de alumino-silicato (argila). É eficaz em doses baixas e é economicamente viável. A sua utilização reduz os custos operacionais e minimiza o impacto ambiental da eliminação.

3.2.2.2 Otimização do protocolo de limpeza química para remoção de biofilme

Os resultados dos testes de limpeza indicaram que o protocolo de limpeza mais eficaz para remover o biofilme e restaurar o desempenho da membrana consiste nos seguintes passos:

1. Sanificação com a utilização do biocida não oxidante compatível com as membranas de osmose inversa ADICLEAN 128.
2. Limpeza com um produto alcalino ADICLEAN 202 AdicGreen formulado com a capacidade de penetrar, alcançar e remover completamente as camadas internas do biofilme. O produto de limpeza também é eficaz na remoção de alumino-silicatos.

O protocolo de limpeza foi concebido de acordo com as recomendações do fabricante da membrana relativamente à pressão, caudal, pH e temperatura da solução de limpeza.

3.2.2.3 Programa de manutenção para o controlo do biofilme

Foi recomendada a aplicação de um programa de manutenção para controlo do biofilme com um biocida não oxidante compatível com as membranas RO. Isto minimizou e controlou o crescimento microbiológico na superfície das membranas de osmose inversa.



4 RESULTADOS DAS AÇÕES DE MELHORIA

4.1 Aumento do desempenho

Em julho de 2022, a solução integral proposta pela ADIQUÍMICA foi aplicada na planta de osmose reversa para a recuperação de rejeitos, que consistiu nas seguintes ações de melhoria:

1. Foi aplicado o protocolo de limpeza química que combina o biocida não-oxidante ADICLEAN 128 e o produto de limpeza ecológico ADICLEAN 202 AdicGreen.
2. A dosagem do anti incrustante biodegradável ADIC RO-64 AdicGreen, isento de fósforo, foi iniciada com uma elevada eficiência na inibição da formação de incrustações de sulfato de cálcio, o que aumentou a conversão da instalação para o valor projetado de 65%.
3. Foi aplicado o programa de manutenção para o controlo do biofilme.

A figura 5 mostra a evolução do caudal de permeado normalizado antes e depois da aplicação das ações de melhoramento. Aplicando o protocolo de limpeza proposto, o desempenho da membrana foi restaurado para os seus valores de projeto. A dosagem do anti incrustante específico para o sulfato de cálcio permitiu aumentar a conversão da instalação para o valor de projeto de 65%, com um caudal de permeado normalizado médio de 19,5 m³ /h. O caudal de permeado normalizado aumentou 30% em relação ao caudal de projeto anterior, quando funcionava a 50% de conversão. A dosagem de anti incrustante específico e o programa de manutenção para o controlo do biofilme mantiveram o caudal de permeado estável no valor máximo de projeto, sem sintomas de formação de incrustações ou de incrustações de biofilme. A instalação funcionou durante 6 meses sem paragens para limpeza química, prolongando a vida útil das membranas.



Figura 5. Evolução do caudal de permeado normalizado após a implementação das ações de melhoria.

4.2 Poupança de água e energia, redução de custos e contribuição para a sustentabilidade

A elevada eficiência do anti incrustante e do produto de limpeza líquido sustentáveis para ambiente, bem como o tratamento de manutenção adequado, melhoraram o desempenho da instalação através do aumento da conversão e evitaram a incrustação da membrana. Este aumento de desempenho levou a um aumento do caudal de permeado, operando com pressões de alimentação mais baixas, reduzindo assim os custos de

energia e a pegada de carbono. Foram determinadas as poupanças de energia e as reduções de



emissões de CO₂ obtidas com a implementação das ações de melhoria. O consumo específico de energia, que corresponde ao consumo de energia por m³ de água permeada expresso em kWh/m³ (Li, 2013), e as emissões de CO₂ (Ministério da Transição Ecológica, 2022) foram calculados nos seguintes cenários: (a) antes da intervenção da ADIQUIMICA e (b) após a implementação das ações de melhoria. A Tabela 3 corresponde ao cálculo do consumo específico de energia e das emissões de CO₂ nas condições de funcionamento de cada cenário.

Os resultados indicam que, em julho de 2022, antes da intervenção da ADIQUIMICA, devido à incrustação maciça que afetava as membranas, estava a funcionar a uma pressão de alimentação de 18,8 bar, correspondente ao limite máximo da bomba. Esta pressão elevada traduzia-se num elevado consumo de energia. Apesar de funcionar à pressão máxima, o caudal de permeado produzido foi de 8,9 m³ /h com uma taxa de conversão de 31%. Estes valores são significativamente inferiores às condições iniciais de projeto de 15 m³ /h de produção a 50% de conversão. O consumo específico de energia necessário foi de 2,12 KWh/m³

Com a implementação das ações de melhoria, o desempenho da central aumentou. Em janeiro de 2023, o caudal de permeado aumentou para 19,4 m³ /h, operando a 65% de conversão. O consumo específico de energia nestas condições era de 0,76 KWh/m³. Assim, o caudal foi aumentado em 118% e o consumo específico de energia foi reduzido em 64% em comparação com as condições de funcionamento com as membranas afectadas por incrustações maciças. Estes resultados conduzem a uma poupança anual de energia de 6141 €, assumindo um custo de eletricidade de 0,17 €/KW. A redução anual das emissões de CO₂ foi de 17,7 Tn, o que corresponde a uma redução de 35%.

Tabela 3. Energia específica e emissões de CO₂ antes e depois da implementação das ações de melhoria na fábrica de recuperação de rejeitados.

Data	julho de 2022 (Antes da intervenção da ADIQUIMICA)	janeiro de 2023 (Após a implementação das ações de melhoria ADIQUIMICA)
Caudal de permeado	8,9 m ³ /h	19,4 m ³ /h
Caudal de alimentação	29,2 m ³ /h	29,8 m ³ /h
Conversão	31 %	65 %
Pressão de alimentação	18,8 bar	14,4 bar
Consumo específico de energia por m ³ de permeado	2,12 KWh/m ³	0,76 KWh/m ³
Consumo de energia	18,9 KWh	14,7 KWh
Consumo anual de energia	165284 KWh/ano	129157 KWh/ano
Custo anual da eletricidade	28098 €	21957 €
Emissões de CO ₂	51,2 Tn/ano	33,5 Tn/ano

As ações de melhoria conduziram também a uma gestão sustentável, aumentando a utilização de água reutilizada como entrada para as torres de arrefecimento. O consumo de água foi reduzido e a descarga foi reduzida, com as consequentes poupanças económicas. São utilizados produtos químicos biodegradáveis e amigos do ambiente que minimizam o impacto da sua descarga. A minimização dos problemas de incrustação levou a uma redução dos custos associados às



paragens das instalações para limpeza química, ao consumo de produtos químicos e à substituição das membranas devido ao seu aumento da vida útil.

5 CONCLUSÕES

Um dos principais fatores que limitam o funcionamento das instalações de osmose inversa é a qualidade da água. A conceção de um tratamento sustentável e específico para as instalações de osmose inversa que tratam a água de purga da torre de arrefecimento para reutilização conduz a uma redução do consumo de água de alimentação da torre de arrefecimento e à minimização da água de descarga, com as consequentes poupanças económicas e benefícios ambientais.

O desempenho da osmose inversa foi aumentado através da aplicação de um tratamento personalizado que incluiu a limpeza química das membranas utilizando um produto de limpeza ecológico que não contém EDTA ou fósforo na sua formulação; a dosagem de um anti-incrustante biodegradável, isento de fósforo, com elevada eficiência na inibição da formação de incrustações de sulfato de cálcio; e a aplicação de um programa de manutenção para controlo do biofilme. Estas ações de melhoria foram conseguidas:

- Eliminar as incrustações maciças que afetam as membranas e restaurar o seu desempenho para os valores de projeto.
- Aumentar o desempenho da instalação, aumentando a conversão para o valor de projeto, evitando a formação de incrustações.
- Reduzir o consumo de energia e os custos ao funcionar com uma pressão de alimentação mais baixa.
- Reduzir a pegada de carbono através da redução das emissões de CO₂.
- Aumentar o fluxo de água recuperada para reutilização e reduzir a descarga.
- Manter as membranas limpas e sem paragens de fábrica para limpeza química, reduzindo os custos associados às paragens e ao consumo de químicos.
- Prolongar a vida útil das membranas, reduzindo os custos associados à substituição das membranas.
- Utilizar produtos químicos biodegradáveis e amigos do ambiente que minimizem o impacto da sua descarga no ambiente.

6 BIBLIOGRAFIA

Adroer, M., Bodas, J., Coma, J., 2001. Programa de cálculo de tratamento para instalações de osmose inversa. *Water Technology* 215, 58-74.

Ahmed, J., Jamal, J., Shujaatullah, M., 2020. Recuperação da água de descarga da torre de resfriamento por osmose reversa (RO): revisão dos parâmetros da água que afetam a incrustação da membrana e os esquemas de pré-tratamento. *Dessalinização e Tratamento de Água* 189, 9-17.

Sociedade Americana de Ensaios e Materiais (ASTM), 2015. Método de ensaio normalizado para o índice de incrustação modificado (MFI-0,45), designação ASTM D8002-15E1, Livro Anual das Normas ASTM, Volume 11.02.

Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., Melin, T., 2007. State-of-the-art of reverse osmosis desalination (Estado da arte da dessalinização por osmose inversa). *Desalination* 216, 1-76.

Goh, P.S., Lau, W.J., Othman, M.H.D., Ismail, A.F., 2018. Incrustação de membrana na dessalinização e suas estratégias de mitigação. *Dessalinização* 425, 130-155.

Li M., 2013. Uma análise unificada baseada em modelos e otimização do consumo específico de energia em BWRO e SWRO. *Ind. Eng. Chem. Res.* 52, 17241-17248.

Matin, A., Khan, Z., Zaidi, S.M.J., Boyce, M.C., 2011. Biofouling em membranas de osmose inversa para dessalinização da água do mar: fenómenos e prevenção. *Desalination* 281, 1-16.

Ministério da Transição Ecológica, 2022. Guia para o cálculo da pegada de carbono e para a elaboração do plano de melhoria de uma organização. TIPO: 280-14-241-8

OCDE, 1992. Diretrizes da OCDE para o ensaio de produtos químicos 302B. Teste Zahn-Wellens/EMPA.



Weinrich, L., Haas, C.N., LeChevallier, M.W., 2013. Avanços recentes na medição e modelação da incrustação da membrana de osmose inversa na dessalinização da água do mar: uma revisão. *Journal of Water Reuse and Desalination* 3(2), 85-101.

Vrouwenvelder, J.S., Picioreanu, C., Kruithof, J.C., Van Loosdrecht, M.C.M., 2010. Biofouling in spiral wound membrane systems: three-dimensional CFD model based evaluation of experimental data. *Journal of Membrane Science* 346, 71-85.