

ACEMAX LTDA

Março 2025

CONTROLE EFICIENTE E PRECISO DE ENERGIA NA AERAÇÃO

REDUÇÃO DA PEGADA DE CARBONO E ECONOMIA DE CUSTOS

ATRAVÉS DO CONTROLE DO PROCESSO DEPENDENTE DA

CARGA

BINDER GROUP®



Transcrição do trabalho apresentado na Singapore Water Week por:
Mr. Heiko Hermann, depto de Pesquisa e desenvolvimento na BINDER Group®

Eng. Celso Rossini

1 APRESENTAÇÃO

Precise and energy efficient aeration control – reduction of carbon footprint and cost saving using load-depending process control

H. Hermann*, K. Becker**, R. Binder***

* Department of Research and Development, Binder GmbH, Buchbrunnenweg
18, 89081 Ulm, DEU (E-mail: heiko.hermann@bindergroup.info)

** Department of Research and Development, Binder GmbH, Buchbrunnenweg
18, 89081 Ulm, DEU (E-mail: kristina.becker@bindergroup.info)

*** Managing Director, Binder GmbH, Buchbrunnenweg
18, 89081 Ulm, DEU (E-mail: robert.binder@bindergroup.info)

Abstract

In a wastewater treatment plant, aeration process is the largest energy consumer, greatest energy saving opportunities arise in this area. A load-dependent DO-control in combination with a sliding pressure control can be achieved with an intelligent advanced aeration controller only, to ensure that this can be done without endangering the biological process. Years of field studies and installations have shown that even minimal reductions in pressure and oxygen save enormous amounts of air and thus energy. Besides, less chemicals must be used due to improved denitrification. This leads to high savings in OPEX, an improved energy efficiency of operation and reduced CO₂ emissions.

Keywords

air flow meter, ammonia-based control, carbon footprint reduction, control valve, cost savings, energy savings, load depending, process control, variable header pressure.

2 RESUMO

Em uma estação de tratamento de águas residuárias, o processo de aeração é o maior consumidor de energia, sendo que as maiores oportunidades de economia de energia surgem nessa área. Um controle de OD dependente da carga, em combinação com um controle de pressão variável, pode ser alcançado apenas com um controlador de aeração inteligente e avançado, garantindo que isso possa ser feito sem comprometer o processo biológico.

Anos de estudos de campo e instalações mostraram que mesmo reduções mínimas na pressão e no oxigênio economizam enormes quantidades de ar e, conseqüentemente, energia. Além disso, menos produtos químicos precisam ser utilizados devido à melhoria na desnitrificação. Isso leva a grandes economias em OPEX, uma melhoria na eficiência energética da operação e redução das emissões de CO₂.

Palavras-chave:

medidor de vazão de ar, controle baseado em amônia, redução da pegada de carbono, válvula de controle, economia de custos, economia de energia, dependente da carga, controle de processo, pressão variável do header

3 INTRODUÇÃO

A redução dos custos de energia e da pegada de carbono está se tornando cada vez mais importante em todo o mundo. Em diversos países, limites de CO₂ são definidos e penalidades são impostas para aqueles que os ultrapassam. Os preços da eletricidade estão subindo constantemente e, além disso, subsídios governamentais são concedidos somente se as medidas implementadas estiverem relacionadas à economia ambiental ou energética. Com 20% do consumo total de energia de um município, uma estação de tratamento de esgoto é uma das maiores consumidoras de energia e, portanto, recebe muita atenção pública. Com aproximadamente dois terços, o processo de aeração tem a maior demanda de energia de uma estação de tratamento de esgoto e, portanto, apresenta o maior potencial de redução do consumo de energia. Portanto, o foco da otimização deve ser colocado nessa área. [1] A concentração de OD medida acima de zero mg/l é um excesso em relação às necessidades biológicas. No entanto, é necessária para as bactérias nitrificantes e, conseqüentemente, essencial para uma nitrificação estável.

A redução do consumo de energia e da pegada de carbono pode ser alcançada facilmente com equipamentos adequados, funções de processo e um controle de oxigênio dependente da carga. Este artigo centra-se na experiência e nos estudos de campo dessas otimizações relacionadas com o controle de oxigênio à base de amônio dependente da carga, controle de pressão deslizante do header e componentes de controle de oxigênio associados.

4 MÉTODOS

Para obter o melhor desempenho de controle e, ao mesmo tempo, ser eficiente em termos energéticos, o foco deve estar na alta qualidade e precisão de controle de todos os componentes mostrados na figura 1.1. Isso inclui sopradores (1) que fornecem fluxo de ar suficiente - nem muito pouco nem muito - para os tanques, medidores de vazão (2) que medem o fluxo de ar com alta precisão, válvulas (3) que ajustam com precisão o fluxo de ar necessário têm uma perda de pressão no header muito baixa, difusores (4) com altas taxas SOTE, sensores (5) que fornecem sinais precisos e confiáveis e um controlador de aeração (6) que usa um algoritmo de controle avançado e flexível. Mesmo que cada componente individual seja importante, o sistema deve ser considerado como um todo. Se apenas um componente atender a todos os requisitos, mas todos os outros componentes forem inadequados, uma operação com alta eficiência energética não poderá ser alcançada. Afinal, “uma corrente é tão forte quanto seu elo mais fraco”.

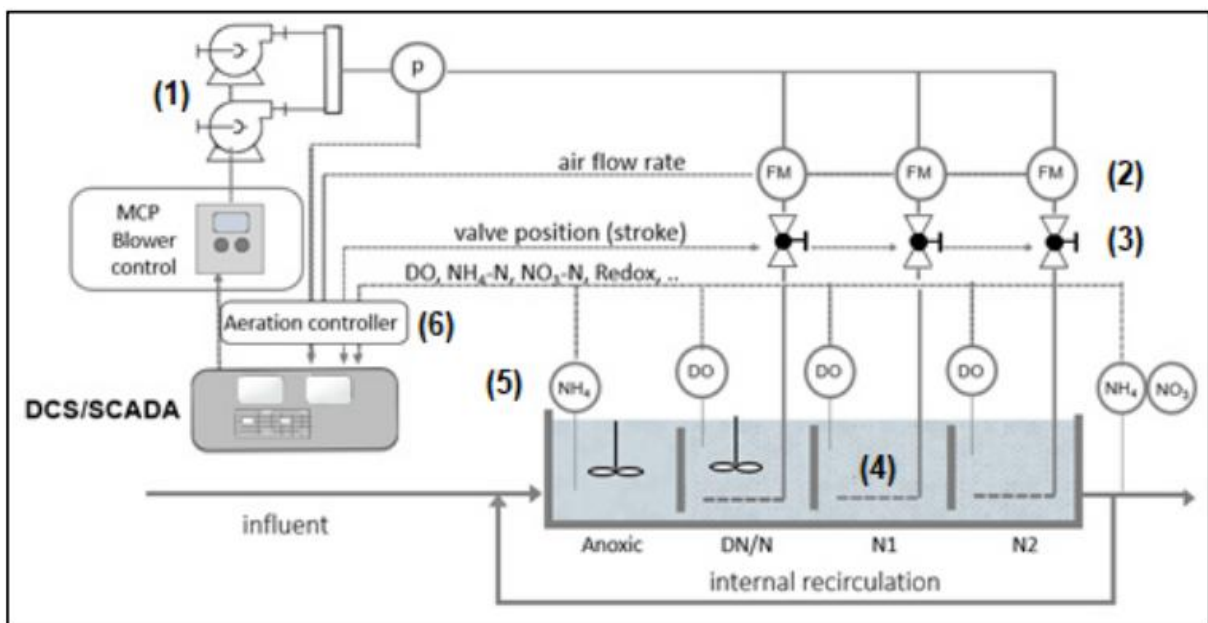


Figura 1.1 Componentes típicos de um sistema de aeração

Uma vez garantida a precisão do sistema, os seguintes métodos dependentes da carga podem ser usados para otimização de energia e pegada de CO₂: um controlador de aeração preciso, controle de oxigênio baseado em amônia e um ajuste automático da pressão do header baseado na válvula mais aberta (MOV) e na válvula mais importante (MIV). Além da otimização de energia, a segurança do processo e do equipamento deve ser garantida em todos os momentos.

Controlador de aeração preciso com IA

A base para um sistema de controle de aeração com eficiência energética é um controlador de aeração preciso. Um controlador PI ou PID padrão pode ser usado adequadamente em sistemas estáticos. No entanto, como não é flexível e não consegue compensar suficientemente bem os fatores perturbadores da planta, não é adequado para sistemas dinâmicos como o processo de aeração, que está sujeito a mudanças de carga e, conseqüentemente, requer um ajuste dinâmico. [2] Portanto, utiliza-se um controlador PID avançado modificado e aprimorado com um fator de amplificação P de autoaprendizagem e um fator de amplificação I multiestágio. Em cada etapa de controle, o fator de amplificação P de autoaprendizagem é calculado e ajustado automaticamente com base no desvio de controle restante das últimas etapas de controle. O fator de amplificação I é calculado a partir do desvio temporal do passado próximo e distante, melhorando assim o comportamento dinâmico. [4]

Além disso, para melhorar o desempenho geral do controle, outros parâmetros do processo, como temperatura da água, salinidade, curso e pressão do header, são considerados para amplificar ou amortecer o resultado do controle e ajustá-los automaticamente à situação de carga atual. [2, 4, 5]

Dessa forma, o controle o resultado será estável e independente tanto em situações de baixa quanto de alta carga. Ajustes sazonais ou relacionados ao clima não serão mais necessários. Além disso, os parâmetros de segurança são levados em consideração para que a segurança do processo biológico e do equipamento seja garantida em todos os momentos. [4, 5]

O controlador é configurado e funciona independentemente para cada tanque ou zona de controle. Os resultados do controle são obtidos a partir das seguintes três etapas: Primeiro, o fluxo de ar necessário é calculado com base no fluxo de ar real. Em seguida, determina-se se as válvulas devem ser abertas ou fechadas.

Finalmente, o curso da válvula é ajustado à situação de carga e à demanda atuais. [2, 5]

A Figura 1.2 ilustra o uso de um controlador de aeração inteligente. As leituras de OD tornam-se mais estáveis e o desvio padrão diminui. Portanto, o DO-SET pode ser reduzido sem aumentar o risco do processo. Devido à menor recirculação de oxigênio dissolvido para os tanques de desnitrificação, o processo de desnitrificação melhora e a concentração total de nitrogênio no efluente diminui.

Como resultado, podem ser obtidas economias de energia de até 15%. [2,5

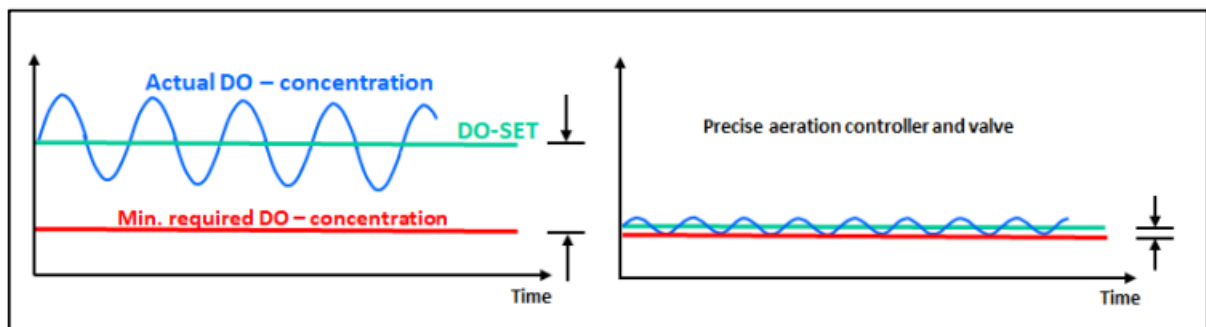


Figura 1.2 Economia de oxigênio dissolvido (OD) através de um controlador de aeração preciso em combinação com uma válvula de precisão

Método dependente da carga: Controle de OD baseado em amônia

Como já descrito por Maureen D. Neville em seus estudos, existem mudanças de carga diárias, semanais, sazonais e dependentes do clima em uma estação de tratamento de esgoto. Esses eventos precisam ser compensados por um controlador de aeração. Essas mudanças de carga podem ser facilmente identificadas monitorando a carga de amônio (concentração de $\text{NH}_4\text{-N}$ * vazão de água de entrada) e usadas para operação com um ponto de ajuste de OD flutuante. [6] Se o $\text{NH}_4\text{-N}$ aumentar, a carga também aumenta. Consequentemente, o ponto de ajuste de OD aplicado deve ser suficientemente alto para garantir a nitrificação. Especialmente durante a noite, quando o $\text{NH}_4\text{-N}$ diminui bastante em comparação com a carga diária, o ponto de ajuste de OD pode ser reduzido significativamente. Essa adaptação do ponto de ajuste de oxigênio resulta em uma redução de energia da planta.

Controladores de aeração sem algoritmos dependentes da carga devem compensar as mudanças de carga com um ponto de ajuste de oxigênio estático alto. Reservatórios de oxigênio para eventos imprevisíveis (por exemplo, chuvas fortes) também devem ser considerados. Por outro lado, isso significa que, em comparação com um cálculo de ponto de ajuste de oxigênio dependente da carga com $\text{NH}_4\text{-N}$, há um maior consumo de energia pelo fluxo de ar e uma maior pegada de carbono.

A Figura 1.3 ilustra o imenso potencial de economia de ar em % que pode ser alcançado reduzindo o ponto de ajuste de oxigênio. Pode-se observar que a simples redução do valor alvo de 3 mg/l para 1 mg/l (que representa uma situação normal de carga baixa e alta durante o dia) resulta em uma economia de 30% na aeração. Isso está diretamente relacionado à economia de energia e à redução da pegada de carbono da estação de tratamento de águas residuais.

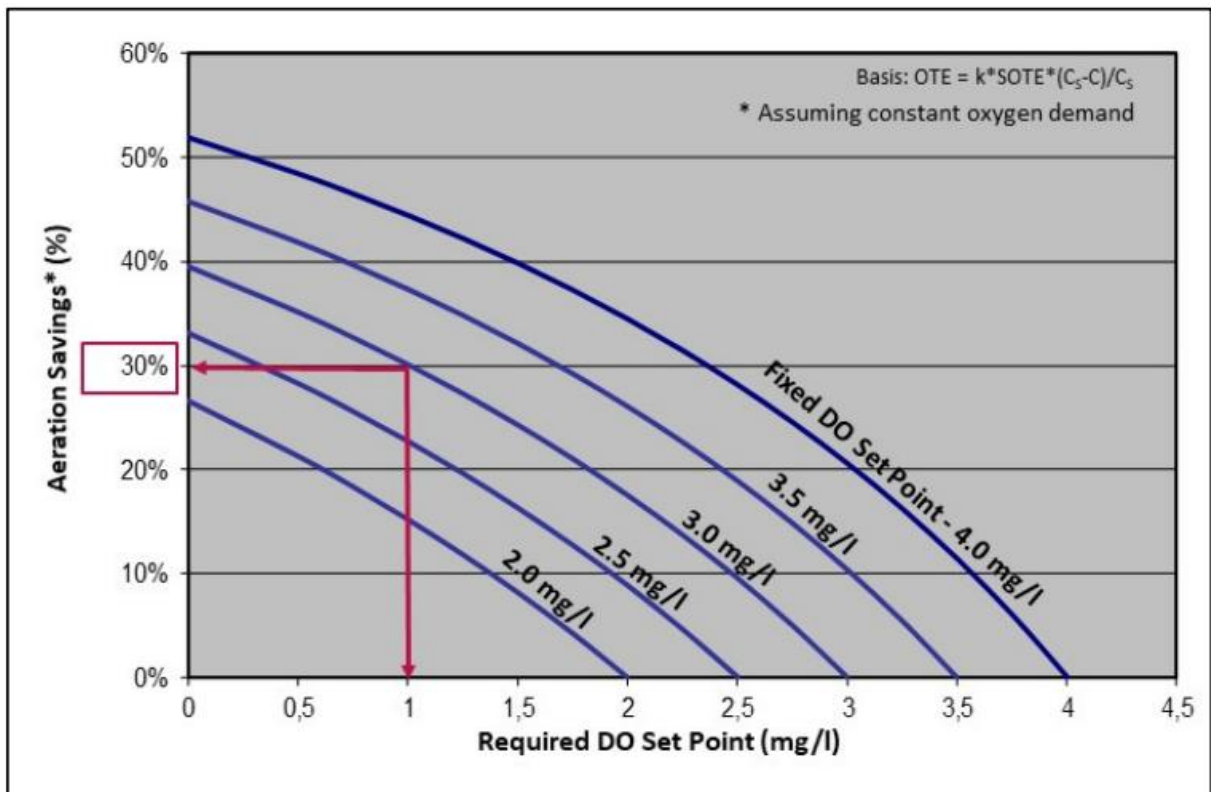


Figure 1.3 Economia de fluxo de ar através da redução da concentração de OD.

Para aproveitar esse potencial de economia de energia, o ponto de ajuste de oxigênio precisa ser calculado com base no NH_4-N , dependendo da situação da carga. Isso significa que, se o NH_4-N aumentar (carga aumenta), o ponto de ajuste de oxigênio também aumenta. Da mesma forma, se o NH_4-N diminuir (por exemplo, carga diminui durante a noite), o ponto de ajuste de oxigênio também diminui. Essa adaptação do ponto de ajuste de oxigênio resulta em uma redução significativa do consumo de energia da planta.

Para implementar essa função, é necessário um controlador de aeração avançado e flexível. Também é importante implementar cenários de segurança adicionais (por exemplo, em caso de falha de comunicação com o sistema de controle ou valores implausíveis dos sensores, etc.) para o processo biológico.

Método dependente da carga: Controle deslizante de pressão no header (MOV e MIV)

Muitas estações de tratamento de águas residuais utilizam controle de pressão constante, onde a pressão é definida em um nível alto constante que é suficiente para processar a situação de carga máxima esperada sob as piores condições de nível de água, queda de pressão baseada na vazão de ar na tubulação e queda de pressão do difusor. No entanto, na maioria das vezes, a situação de carga está abaixo da situação de carga máxima esperada, para a qual é necessária uma pressão do header muito menor. O excesso de pressão deve ser compensado pelas válvulas, o que se manifesta na forma de uma queda de pressão. Essa perda de pressão representa um consumo adicional de energia desnecessário. [7]

A perda de pressão pode ser reduzida usando um controle deslizante de pressão do header. [7] A pressão do header é ajustada automaticamente à situação de carga atual, calculando a pressão mínima requerida. Os diferentes requisitos de pressão das zonas de controle individuais são realizados ajustando o curso. Como a pressão ajustada no header geralmente é significativamente menor do que a pressão constante usada anteriormente, a perda de pressão nas válvulas é reduzida, economizando, tipicamente, de 8 a 10% de energia do soprador.

Os ajustes de pressão geralmente são realizados pelo princípio da "válvula mais aberta" (MOV), no qual o controlador ajusta a pressão dependendo da válvula com o maior curso. [7] Para melhorar o desempenho do controle de DO com maior segurança do processo, o sistema comum da MOV é complementado pelo sistema da "válvula mais importante" (MIV). [5] Este método não apenas analisa as posições de curso de todas as válvulas, mas também leva em consideração a diferença entre DO-SET e DO-ACT de todas as zonas, para evitar a subaeração. Isso significa que quanto maior a diferença de DO, maior o aumento da pressão. Este sistema aprimorado oferece maior segurança do processo, reduzindo ainda mais a pressão necessária no header e, portanto, reduzindo ainda mais o consumo de energia em comparação com o método de pressão constante. [3]

A Figura 1.4 ilustra a economia entre o controle de pressão constante no header (esquerda) e o controle deslizante de pressão no header (direita). A cor de fundo verde representa a redução de pressão e, ao mesmo tempo, a redução de energia e custo em contraste com o controle de pressão constante no header.

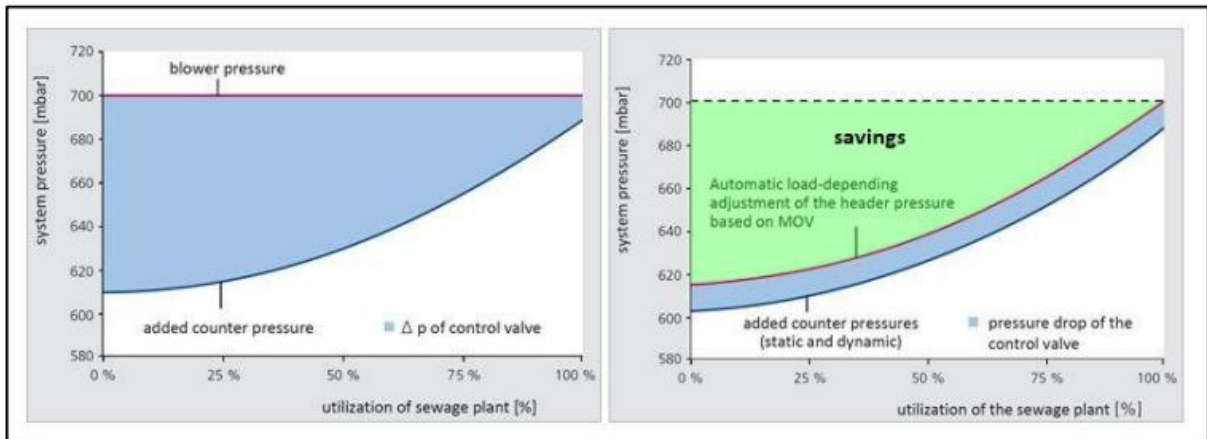


Figura 1.4 Pressão dinâmica (lado esquerdo) e economia de pressão devido à pressão deslizante no header em vez da pressão constante no header (lado direito).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As figuras a seguir mostram os resultados de instalações reais em estações de tratamento de águas residuárias em todo o mundo. A Figura 1.5 descreve os resultados de uma planta de desnitrificação a montante com 3 zonas em sequência. Em cada zona, o DO-SET foi ajustado com base no $\text{NH}_4\text{-N}$ real. Devido ao menor DO e à melhor distribuição de carga equalizada para as zonas, há uma redução significativamente maior nas vazões de ar, mesmo que o DO-SET tenha sido reduzido de 0,9 para 0,7 mg/l. Nesse caso, uma redução de energia calculada de 2,5% é alcançada.

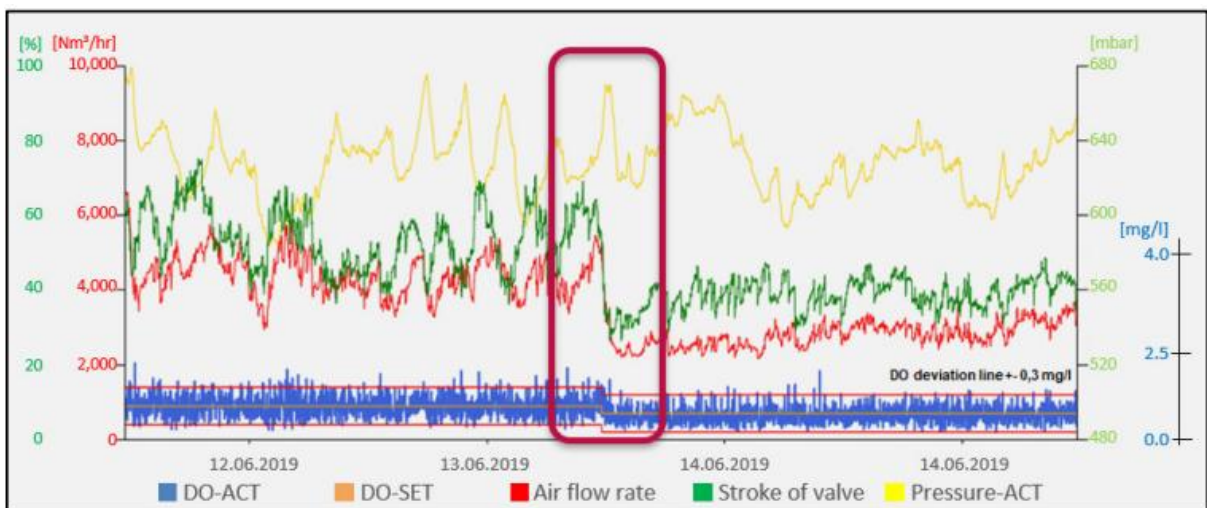


Figura 1.5 Economia no fluxo de ar devido redução do OD e à melhoria da distribuição da carga

No entanto, para níveis baixos de oxigênio, a formação de bactérias filamentosas em relação à temperatura da água deve ser levada em consideração. Isso pode ser otimizado por um ajuste adicional de oxigênio dependente da temperatura.

Na figura 1.6, é apresentado um diagrama semanal com controle baseado em amônia. Isso mostra o rápido ajuste da concentração de OD às novas necessidades devido à IA. Além disso, pode-se observar a rapidez com que os impactos da carga são eliminados. No final da semana, houve um evento de chuva forte. Ajustando o DO-SET dependendo do $\text{NH}_4\text{-N}$, uma rápida eliminação da carga foi alcançada. O DO-SET médio mudou de 0,6 mg/l para 2,4 mg/l. Comparado a um controle de DO-SET constante, isso resulta em uma economia de aeração de 30%.

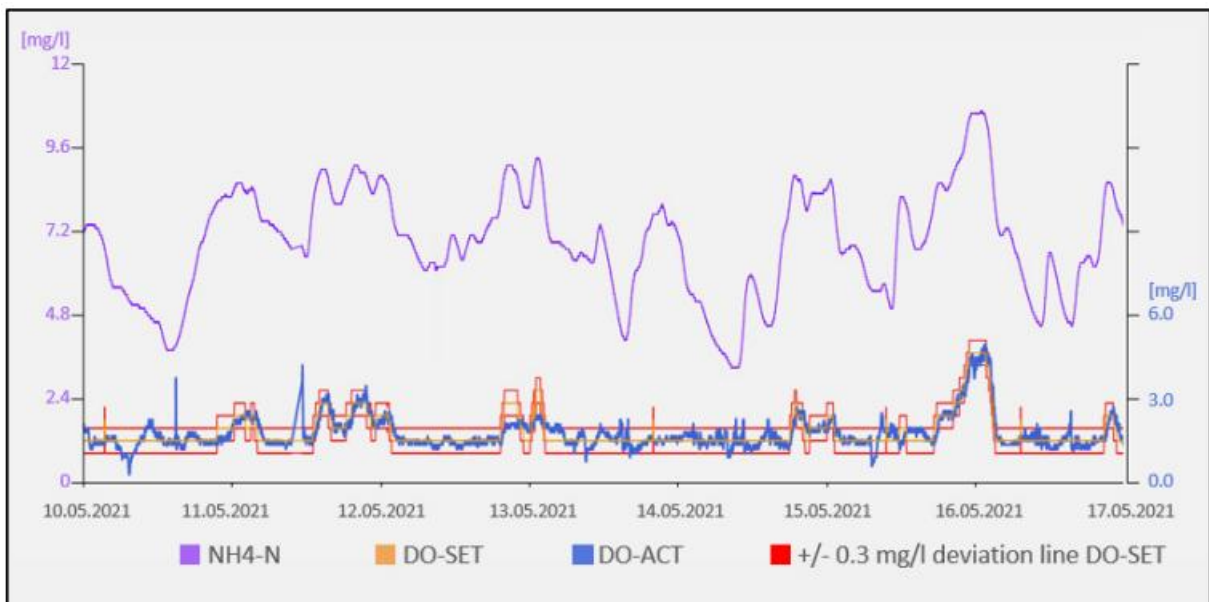


Figura 1.6 Diagrama semanal, controle de OD baseado em amônia

Na figura 1.7, é apresentado um gráfico semanal com controle deslizante de pressão do header. Nesta planta, o controle de pressão constante do header foi alterado para um controle deslizante de pressão do header. Em vez de operar permanentemente com 680 mbar, a pressão deslizante do header passou a variar entre 590 e 670 mbar. Isso resultou em uma economia de energia direta de 9,2%.

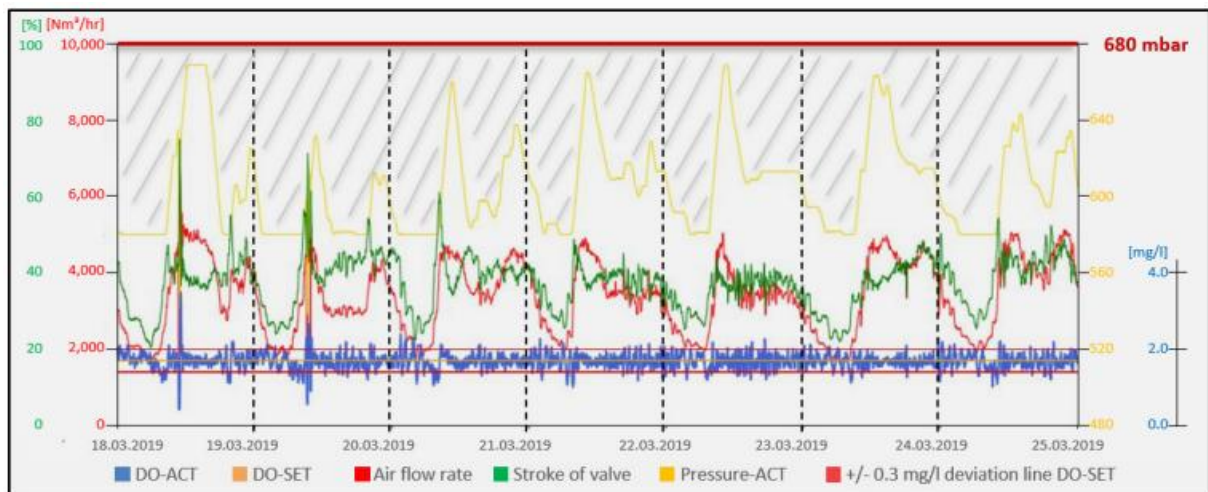


Figura 1.7 Economia de energia devido à pressão deslizando no header

A Figura 1.8 mostra a resposta do controlador de aeração à base de amônia a um evento de chuva forte.

O algoritmo ajusta automaticamente o DO-SET à medida que a amônia aumenta.

Em combinação com o controle de pressão deslizando do header, a amônia é, portanto, eliminada rapidamente.

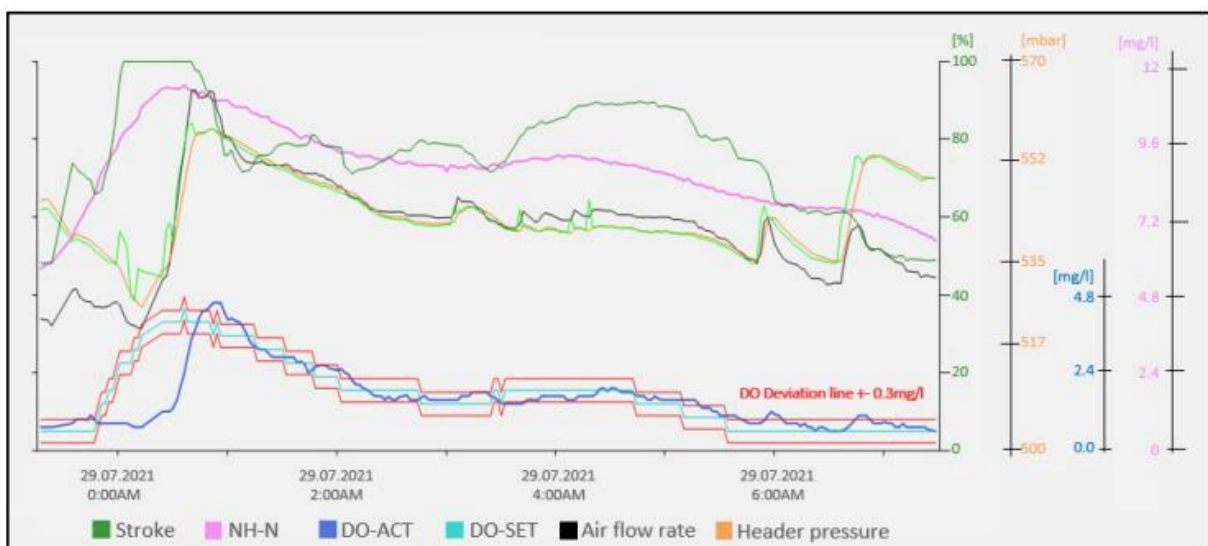


Figura 1.8 Evento de chuva intensa, reação do controle de OD à base de amônia em combinação com o controle de pressão deslizando no header.

A Tabela 1.1 apresenta os resultados de um estudo de caso de dois anos em uma terceira estação de tratamento que utilizou apenas métodos dependentes da carga, como aeração à base de amônia e controle deslizante de pressão do header. Nesses dois anos, em comparação com a operação anterior com um controlador PI padrão, foram alcançadas economias diretas de energia de até **19%** e economias de produtos químicos de até **22%**. Devido à aeração dependente da carga, houve as seguintes melhorias:

- Durante o dia, melhor nitrificação – levando à redução de NH₄-N
- Durante a noite, sem aeração excessiva – levando à redução de NO₃ devido ao aumento da desnitrificação
- Devido ao menor NO₃, menos fontes externas de carbono precisam ser alimentadas, os custos com produtos químicos foram reduzidos
- A DBO e a DQO no efluente puderam ser reduzidas

Tabela 1.1 Resultados do estudo de caso de campo de uma estação de tratamento de água com duas linhas, duas zonas e entrada de água de 35.000 m³/d ao longo de dois anos usando métodos dependentes da carga.

A cada ano, a economia em produtos químicos e consumo de energia resultou nas seguintes reduções de custos:

- Economia em produtos químicos:	US\$ 76.430
- Economia em eletricidade:	US\$ 145.956
- Economia total de custos:	US\$ 222.395

Com um ciclo de vida esperado de 20 anos, isso resulta em uma economia de aproximadamente **US\$ 4,4 milhões**.

CONCLUSÕES

Todos os pontos a seguir foram comprovados na prática em diversos estudos de caso, confirmando os valores esperados.

Utilizando um controlador de aeração inteligente e funções de controle dependentes da carga, a qualidade do efluente pode ser melhorada e equalizada, por um lado, e o consumo de energia e de produtos químicos pode ser reduzido sem riscos para o equipamento ou para o processo, por outro.

O controlador de aeração preciso com fator P de autoaprendizagem e fator I multiestágio permite um ajuste automático do controle de aeração dependente da carga. Ao levar em consideração outros parâmetros do processo, como salinidade ou temperatura da água, obtém-se um resultado de controle estável. As alterações de carga podem ser identificadas com base no NH₄-N. O controle de OD baseado em amônia permite uma operação mais precisa, dependente da carga e baseada na demanda real. Isso permite que o ponto de ajuste de oxigênio seja reduzido, o que resulta diretamente em economia de energia e redução da pegada de CO₂.

Uma maior economia de energia é possível com o uso de um controle de pressão deslizante no cabeçote. Ao ajustar automaticamente a pressão do header com base na situação de carga atual da planta, a pressão do header é reduzida ao mínimo necessário. Ao complementar a válvula de controle de oxigênio (MOV) com a válvula de controle de pressão (MIV), a pressão é adaptada com ainda mais precisão às necessidades reais das zonas aeradas. Isso não só leva a uma maior redução do consumo de energia, mas também a um aumento na segurança do processo e dos equipamentos.

REFERENCIAS

1. Ministerium für Umwelt und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. (2015) Leitfaden Energieeffizienz auf Kläranlagen, 2-3.
2. Hermann, H. and Charatjan, M. (2020) Sustainable and efficient aeration control – improved quality and energy savings with next generation of self-learning AI process controller.
3. Hermann, H. and Bickendorff, M. (2020) Demand-driven air supply – It’s a system.
4. Charatjan, M., Hermann, H. and Dumke, B. (2019) Energy savings and improved process control by change of air supply system to a common header system and a smart advanced PID-controller for air distribution.
5. Charatjan, M., Binder, R. and Cakir, C. (2019) Experiences with an improved PIDcontroller for nitrogen removal. European Waste Water Management Conference.
6. Neville, M.D. (2018) Design and operation of advanced aeration control systems. In Proc. of NEWEA 2018 Annual Conference & Exhibit, Session 10, 21-24, January 2018.
7. Arbeitsblatt DWA A-268 (2016): Automatisierung von einstufigen Belebungsanlagen. DWA-Regelwerk. / Worksheet DWA A-268 (2016): Automization of single-stage activated sludge plants. DWA-Guideline. ISBN 978-3-88721-363-3