# VALIDAÇÃO DE EQUIPAMENTO ESPECTROFOTOMÉTRICO ANALÍTICO PARA AVALIAÇÃO DE COR DA ÁGUA EM FLUXO

**Ana Maria Munaretto Durigon** [(1)]
Química (FURG) e Engenheira Química (FURG), Mestre em Química Tecnológica e Ambiental (FURG), Supervisora do Setor de Química da empresa Augen Engenharia S.A.
**Camila Gonzales Cruz** [(2)]
Engenheira Bioquímica (FURG), Mestre e Doutora em Engenharia e Ciência de Alimentos (FURG), Analista de Pesquisa e Desenvolvimento do Setor de Química da empresa Augen Engenharia S.A.
**Cezar Augusto da Rosa** [(3)]
Engenheiro Químico (FURG), Doutor em Engenharia Química (UFSCar), Pós-doutorado em Engenharia (MIT), CTO e Co-founder da empresa Augen Engenharia S.A.
**Fabricio Butierres Santana** [(4)]
Engenheiro Químico (FURG), Mestre em Engenharia Química (UFSC) e Doutor em Engenharia Química (UFSC), CEO e Co-founder da empresa Augen Engenharia S.A.

**Endereço[(1)]:** Avenida Itália, Km 8, Augen Engenharia S.A. Prédio ITEC – Rio Grande – Rio Grande do Sul - CEP: 96203-900 - Brasil - Tel: +5553999197900 - e-mail: ana.d@augenengenharia.com.

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e validação de um Analisador de espectrofotométrico de Cor para medição da cor da água, um dos parâmetros cruciais para avaliar a qualidade da água para consumo humano. O equipamento utiliza um colorímetro contendo LED de 455 nm e sensor a 180° e foi calibrado com base no método espectrofotométrico *Standard Methods* 2120 C. O Analisador de Cor inclui um sistema de controle e aplicativo para facilitar o uso pelo operador. Em relação a validação do método, a curva analítica demonstrou excelente linearidade na faixa de 0-50 uC (coeficiente de correlação de 0,99), além de apresentar alta sensibilidade para medição de cor de amostras de água tratada e bruta. A precisão foi confirmada com um desvio padrão relativo de 4%, dentro dos padrões exigidos pelo Inmetro. A exatidão foi verificada com recuperações entre 93,2% e 104,4%, validando a metodologia. O equipamento demonstrou ser uma ferramenta precisa e confiável para o monitoramento contínuo da qualidade da água, essencial para estações de tratamento e indústrias. Este desenvolvimento contribui diretamente para a segurança hídrica e o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especificamente o ODS 6.

**PALAVRAS-CHAVE:** Analisador de Cor, Análise Espectrofotométrica, Qualidade da Água.

## INTRODUÇÃO

A água quimicamente pura é ausente de cor, mas a presença de substâncias dissolvidas ou em suspensão acaba por alterar a cor da água, dependendo da quantidade e qualidade das impurezas. Águas coloridas podem indicar a presença de substâncias indesejadas, como matéria orgânica, metais pesados, produtos químicos industriais ou resíduos agrícolas, além de apresentarem um aspecto desagradável podendo ser rejeitadas pela população. Alterações na cor da água podem sinalizar poluição ou contaminação, logo a remoção da cor tem por finalidade tornar a água adequada para aplicações gerais ou industriais (WHO, 2004).

O termo cor é usado para significar a cor verdadeira, que é aquela devida unicamente às substâncias em solução, enquanto a cor aparente inclui tanto a cor das substâncias em solução quanto a devida à matéria em suspensão. Para determinar a cor verdadeira de uma água que não seja bastante límpida, é necessário remover antes a matéria em suspensão (turbidez). Uma vez removida a turbidez, o residual que se determina é a cor verdadeira, devido à presença de partículas coloidais carregadas negativamente, característica que pode ser removida da água por coagulação e floculação (BAIRD et al., 2017).

Não há uma correspondência direta entre a concentração das substâncias corantes e a cor resultante, por isso, a cor de uma amostra é determinada comparando-se com uma escala arbitrária de cor. A unidade de cor é definida como a cor produzida ao se dissolver 1,0 mg de cloroplatinato de potássio e 0,5 mg de cloreto de cobalto em 1 L de água (escala Pt-Co), também conhecida por Unidade Hazen (uH) ou "Cor APHA/Hazen/Pt-Co" (BAIRD et al., 2017).

A cor de um corpo d'água pode ser um indicativo da qualidade da água ou de mudanças ambientais. O monitoramento da cor da água é um parâmetro importante para vários processos de corpos d'água (LIU et al.,

2024). A cor da água é afetada por diferentes variáveis, incluindo matéria orgânica dissolvida colorida, material particulado em suspensão e pigmentos (como clorofila-a). A cor da água de fontes naturais é frequentemente uma combinação de azul, verde, amarelo, laranja e vermelho (WANG et al., 2021) e pode ser resultante da variação de uma série de mudanças ambientais, incluindo fatores climáticos e antrópicos (como o uso da terra na bacia hidrográfica).

As atividades antropogênicas podem influenciar a topografia, a permeabilidade e o uso do solo das bacias hidrográficas a montante, resultando no transporte de sólidos em suspensão, nutrientes e outros poluentes para corpos d'água receptores. Além disso, a cor da água também pode ser afetada pela variabilidade climática tanto em escalas de tempo curtas, através de condições climáticas locais como precipitação e temperatura, quanto em escalas de tempo mais longas por padrões climáticos regionais e globais (BUGNOT et al., 2018).

Um exemplo dessa interação entre fatores antropogênicos e climáticos ocorreu em maio de 2024, quando o Rio Grande do Sul enfrentou sua maior catástrofe ambiental registrada. Entre 27 de abril e 2 de maio, chuvas torrenciais causaram enchentes devastadoras. Vários municípios receberam entre 500 e 700 mm de precipitação, equivalente a um terço da média anual do estado. As inundações impactaram milhões de pessoas, resultando em 169 mortes confirmadas e deixando milhares de desabrigados e desalojados. Além disso, a qualidade da água disponível para consumo foi comprometida, pois a turbidez e a cor dos recursos hídricos aumentaram drasticamente, afetando a potabilidade da água e elevando o risco de doenças transmitidas pela água (BIERNATH et al., 2024).

Dessa forma, é imprescindível o desenvolvimento de sistemas de controle e gestão para análise dos parâmetros da água que não dependam totalmente do operador e consigam analisar e transmitir em tempo real esses importantes parâmetros da qualidade da água, como a turbidez e cor. Nesse sentido, empresas que buscam inovação, como a Augen Engenharia, que desenvolve tecnologias para automatizar análises, otimizar dosagens e transformar os dados coletados em informação durante o processo de tratamento da água (AUGEN, 2024), visam o desenvolvimento de equipamentos de medição contínua de Cor, uma vez que a analisadores de processo deste parâmetro são dificilmente encontrados no mercado. Isso se deve ao fato dessa análise requerer alta sensibilidade e não ser suscetível a variações provenientes de diferentes matrizes, o que acaba dificultando a medição desse parâmetro.

Logo, o Analisador de Cor Augen surge como alternativa promissora para solucionar esse problema de Estações de Tratamento de Água e indústrias. Sendo assim, o presente trabalho visa o desenvolvimento de um equipamento e a validação de um método de análise colorimétrica de cor aparente em fluxo contínuo, visando a conformidade do mesmo com os procedimentos contidos no *Standard Methods* e as diretrizes do Inmetro. Esse desenvolvimento é crucial para garantir o monitoramento em tempo real da qualidade da água, permitindo uma detecção rápida e precisa de alterações que possam indicar contaminação ou outras anomalias. Com este equipamento, espera-se aprimorar significativamente os processos de tratamento de água, assegurar a conformidade com padrões de qualidade e órgãos regulamentadores, além de contribuir diretamente para os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), principalmente com o ODS 6, Água Potável e Saneamento.

## OBJETIVO

O presente trabalho visa o desenvolvimento de um equipamento e a validação de um método de análise colorimétrica de cor aparente em fluxo contínuo, visando a conformidade do mesmo com os procedimentos contidos no *Standard Methods* e as diretrizes do Inmetro.

## METODOLOGIA UTILIZADA

### Desenvolvimento do Analisador de Cor

O método empregado para medição de Cor segue o procedimento espectrofotométrico estabelecido pelo *Standard Methods* 2120 C, adaptado com diodo emissor de luz (LED) de 455 nm. Este método é baseado na determinação de Cor por meio da comparação da intensidade de luz absorvida pela amostra de interesse sob condições definidas, com a intensidade de luz absorvida por uma solução de referência padrão nas mesmas condições (BAIRD et al., 2017).

Desenvolvido para controle de qualidade de água, o Analisador Colorimétrico de Cor, atua por meio da operação conjunta de colorímetro contendo LED de 455 nm, cubeta retangular (50x30 mm) e válvula solenoide elétrica para entrada e saída da água. A entrada e saída de amostra se dá por meio de mangueiras de borracha (4x6 mm) acopladas na cubeta e válvula que controla a entrada e saída de água. O equipamento utiliza inteligência computacional que permite análise, controle e gestão da medição da amostra de água. Para

realização do procedimento de medição da Cor o equipamento conta com o LED de 455 nm e receptores posicionados a 180° em relação ao emissor.

### Validação da Metodologia

O método foi validado seguindo as orientações sobre validação de métodos analíticos de Junho de 2020, da Coordenação Geral de Acreditação, do Inmetro (INMETRO, 2020).

### Linearidade

A linearidade do método foi avaliada por meio da construção da curva de calibração. Os testes utilizados para validar o equipamento e sua metodologia foram realizados a partir da coleta de dados de absorbância. A curva de calibração de cor foi construída a partir da leitura de soluções de 0 – 50 Uc, utilizando padrão de platina-cobalto 500 uC (Qhemis High purity, Hexis científica, São Paulo, Brasil).

A fim de comprovação da confiabilidade do equipamento e método desenvolvido, utilizou-se como comparação e referência um espectrofotômetro de bancada da marca HACH (DR3900, Hexis, Brasil).

#### Precisão

O ensaio de precisão foi realizado a fim de obter a estimativa da dispersão de resultados entre ensaios independentes, repetidos de um mesmo padrão. Para determinar a repetitividade foram realizadas vinte e cinco réplicas independentes. Para as respostas foram calculadas a média, o desvio padrão e o desvio padrão relativo dos resultados obtidos.

#### Exatidão

A exatidão é a concordância entre a média dos resultados de um ensaio e o valor aceito como verdadeiro. A determinação da exatidão foi realizada utilizando material de referência certificado (MRC). Foram realizadas 6 réplicas do padrão, em 3 níveis de concentração, compreendendo o intervalo de linearidade do procedimento. A partir dos resultados obtidos, foram calculadas as concentrações médias, os desvios-padrão e as recuperações das amostras em cada nível de concentração.

#### Aplicação

A aplicabilidade do método foi avaliada a fim de quantificar a cor na presença de diferentes amostras de água. Foram realizados experimentos para avaliação da seletividade envolvendo ensaios com padrões ou materiais de referência e amostras com e sem a presença de cor.

Além disso, foi avaliada a faixa de trabalho da metodologia, a qual avaliou a menor concentração e a maior concentração de cor na amostra para o qual se demonstrou que o procedimento analítico tem um nível aceitável de linearidade, precisão e exatidão.

## RESULTADOS OBTIDOS

### Desenvolvimento do Analisador de Cor

O analisador de Cor (Figura 1) foi desenvolvido para medir a cor da água em fluxo contínuo, fornecendo dados em tempo real que são essenciais para o monitoramento e controle da qualidade da água. Este equipamento foi projetado para ser utilizado em estações de tratamento de água, indústrias e sistemas de abastecimento, onde a manutenção da qualidade da água é de extrema importância.

O funcionamento do equipamento é controlado através da interface de um aplicativo previamente instalado no tablet que acompanha o equipamento Augen (Figura 2). Ao iniciar uma análise, a válvula seletora é ativada, permitindo que a amostra na cubeta seja drenada para limpeza; em seguida, a válvula fecha e a cubeta é preenchida novamente até transbordar pelo ladrão, garantindo um fluxo contínuo. Durante esse processo, a cor da amostra é medida e o resultado é rapidamente transmitido ao aplicativo como uma concentração de cor. O usuário pode ajustar a frequência dessas medições conforme necessário.

**Figura 1 - Analisador Colorimétrico de Cor**




**Figura 2 – *Interface* do aplicativo para uso do Analisador de Cor.**

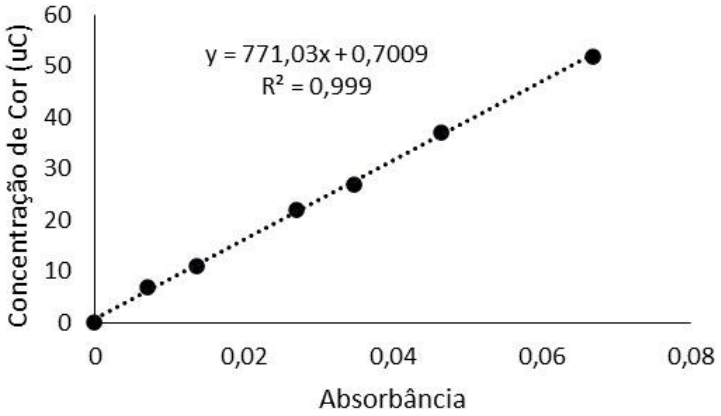



O histórico de análises, a partir do momento em que o equipamento é ativado, é registrado em um *dashboard*, que também é fornecido pela empresa junto ao equipamento analítico. Esse recurso permite o monitoramento remoto do processo, além de facilitar a geração de relatórios e a avaliação de outras variáveis integradas ao sistema.

### Validação do método de medição de Cor

Primeiramente, uma curva de calibração foi obtida, relacionando as absorbâncias dos padrões contendo de 0 a 50 uC e encontra-se demonstrada na Figura 3.

**Figura 3 – Curva de calibração do Analisador de Cor.**




Após a calibração do equipamento, foi realizado ensaio de precisão do método, onde o desvio padrão relativo apresentado foi de 4% (Tabela 1).

**Tabela 1 – Ensaio de Precisão do método desenvolvido para medição de Cor.**

| Parâmetro | Respostas |
|---|---|
| Média (uC) | 7,67 |
| Desvio Padrão | 0,30 |
| Desvio Padrão Relativo (%) | 4,0 |

Além disso, a exatidão do método foi avaliada, apresentando resultados variando de 93,2 a 104,4% para a recuperação (Tabela 2).

**Tabela 2 – Ensaio de Exatidão do método desenvolvido para medição de Cor.**

| Padrão (uC) | Média de Concentração (uC) | Recuperação (%) |
|---|---|---|
| 10 | 9,9 ± 0,6 | 99,1 |
| 20 | 20,8 ± 0,4 | 103,8 |
| 30 | 28,6 ± 0,4 | 95,3 |
| 40 | 37,3 ± 0,2 | 93,2 |
| 50 | 52,2 ± 0,4 | 104,4 |

Após os testes preliminares e validação da metodologia, iniciaram-se os testes de medição de cor em fluxo contínuo por um período de aproximadamente 24 horas, utilizando amostras de água tratada. Além do aplicativo, foi desenvolvido um sistema de controle onde foi possível observar as análises realizadas pelo equipamento ao longo do tempo, com a frequência analítica escolhida pelo usuário (Figura 4).

**Figura 4 – Visualização do sistema de controle do Analisador de Cor Augen mostrando 3 análises / h de uma água tratada ao longo de 24 h.**




## ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A curva analítica construída para o Analisador de Cor demonstrou excelente linearidade na faixa linear de 0-50 uC com coeficiente de correlação de 0,99. Isto indica a validade do método, pois obedece a uma correlação linear nos intervalos de concentração avaliados. A curva de calibração obtida pelo método dos mínimos quadrados pode ser expressa pela equação y = 771,3 x + 0,7009.

A precisão do método (Tabela 1) foi avaliada através da repetibilidade das análises envolvendo várias medições realizadas no mesmo dia, nas mesmas condições e pelo mesmo analista. Os resultados de precisão mostram que o método pode ser validado com desvio padrão relativo de 4%, mostrando a confiabilidade do dos resultados, visto que está dentro do nível de aceitação do Inmetro que deve ser inferior a 7,3% para amostras com concentração de 1 e 10 ppm.

A exatidão do método (Tabela 2) foi determinada por meio da obtenção da porcentagem de recuperação média avaliada em cinco níveis de concentrações em triplicata. O grau de recuperação variou entre 93,2 à 104,4%, o que está dentro das especificações esperadas para as faixas de concentrações testadas e matrizes complexas (80-110% para amostras com concentração de 1 a 10 ppm e 90-107% para concentrações de 10 a 100 ppm).

A partir do sistema de controle demonstrado na Figura 4, os resultados obtidos para uma amostra de 3,5 uC foram monitorados durante um período de 24 horas. A partir dos dados, pode-se concluir que as medições realizadas apresentaram DPR de aproximadamente 4%, o que se encontra em conformidade, tanto em relação a regulamentação do Inmetro quanto em relação ao equipamento utilizado para comparação, o espectrofotômetro de bancada, que apresentou DPR de 5%.

Em resumo, os resultados obtidos indicam que o Analisador de Cor é um instrumento preciso, exato e confiável para a medição da cor em diferentes tipos de amostras de água, apresentando um desempenho consistente e dentro dos parâmetros aceitos pelos padrões regulamentares. Este método pode ser considerado validado para uso em análises de rotina em laboratórios de controle de qualidade de água.

## CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

O desenvolvimento do Analisador de Cor para a medição contínua da cor da água apresentou resultados promissores. A precisão do método foi confirmada por um desvio padrão relativo de 4%, significativamente dentro do limite de aceitação do Inmetro (inferior a 7,3%). A comparação com o espectrofotômetro de bancada demonstrou coerência entre os métodos, reforçando a confiabilidade do Analisador de Cor. A exatidão do método, com recuperações variando entre 93,2% e 104,4%, também atende aos critérios esperados para matrizes complexas. Portanto, o Analisador de Cor é uma ferramenta eficaz para o monitoramento contínuo da qualidade da água, proporcionando dados em tempo real que são essenciais para a detecção de contaminações. Este equipamento não só aprimora os processos de tratamento de água, mas também assegura a conformidade com padrões regulatórios. Além de contribuir para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 6, que visa garantir água potável e saneamento para todos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AUGEN. *Augen Engenharia e Inovação*. Disponível em https://augenengenharia.com/. Acesso em 01/06/2024.

2. BAIRD, R. B.; EATON, A. D.; RICE, E. *Standard methods for the examination of water and wastewater* American Public Health Association, n. 23 rd, 2017.

3. BIERNATH, A. COSTA, SOUZA, C. Gráficos que mostram dimensão da tragédia das chuvas no Rio Grande do Sul. BBC. Disponível em https://www.bbc.com/portuguese/articles/c72p96eqkvxo. Acesso em: 07/05/2024.

4. BUGNOT, A. B., LYONS, M. B., SCANES, P., CLARK, G. F., FYFE, S. K., LEWIS, A., JOHNSTON, E. L. *A novel framework for the use of remote sensing for monitoring catchments at continental scales.* Journal of environmental management, v. 217, p. 939-950, 2018.

5. INMETRO. *Instituto Nacional de Metrologia. Orientação sobre Validação de Métodos Analíticos, Revisão 08*. 2020. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/Sidoq/Arquivos/Cgcre/DOQ/DOQ-Cgcre-8_08.pdf>. Acesso em: 30/05/2024.

6. LIU, S., KIM, S., GLAMORE, W., TAMBURIC, B., JOHNSON, F. *Remote sensing of water colour in small southeastern Australian waterbodies*. Journal of Environmental Management, v. 352, p. 120096, 2024.

7. WANG, S., LI, J., ZHANG, W., CAO, C., ZHANG, F., SHEN, Q., ZHANG, B. *A dataset of remote-sensed Forel-Ule Index for global inland waters during 2000–2018.* Scientific Data, v. 8, p. 26, 2021.

8. WORLD HEALTH ORGANIZATION. (2004). Guidelines for Drinking-water Quality (3rd ed.). Geneva: WHO.