

Produção de solução clorada em reator eletrolítico com vistas à desinfecção de água para abastecimento

O desequilíbrio na gestão de recursos destinados ao saneamento básico no Brasil tem influência direta sobre o tratamento e distribuição de água para a população, o que incentiva a busca pelo desenvolvimento de tecnologias que tornem tais processos mais acessíveis. A eletrólise surge como alternativa que prevê a geração in loco de agentes passíveis de serem utilizados na etapa de desinfecção de água para abastecimento público descentralizado. O uso de desinfecção por eletrólise em comunidades não abastecidas por redes de distribuição de água é uma solução conveniente para a problemática. O objetivo do presente estudo se deu por avaliar o uso de eletrólise de salmoura para produção de solução clorada concentrada, por meio do desenvolvimento de um reator eletrolítico de fluxo contínuo, em escala de bancada com eletrodos de aço inoxidável. A partir de um planejamento fatorial, variou-se a corrente elétrica, tempo de contato e concentração de NaCl na salmoura pré eletrólise, sob diferentes níveis. Cada arranjo gerou uma solução clorada específica. Foram realizadas estimativas do potencial de tratamento de cada solução gerada, e, com auxílio do método AHP de apoio à decisão, foi possível concluir que a dosagem de 30 g/L de NaCl, tempo de contato de 33 minutos e corrente elétrica aplicada de 5 Ampère, correspondeu à melhor condição de operação. Assim, o sistema de desinfecção proposto pode ser indicado para aplicação em escala real de desinfecção de água de consumo para populações descentralizadas.

Palavras-chave: Eletrólise; Tratamento de água; Abastecimento descentralizado.

Water disinfection for human purposes by means of chlorinated solution production in electrolytic reactor

The inequality in the management of resources for basic sanitation in Brazil has a direct influence on the treatment and distribution of water to the population, which encourages the search for development of technologies that make these processes more accessible. Electrolysis appears as an alternative that provides the on-site generation of agents that can be used in the stage of water disinfection for decentralized public supply. The use of electrolysis disinfection in communities not supplied by water distribution networks is a convenient solution to the problem. The aim of the present study was to evaluate the use of salt-water electrolysis for the production of a concentrated chlorinated solution, through the development of a bench scale continuous flow electrolytic reactor with stainless steel electrodes. From a factorial design, the electric current, contact time and NaCl concentration in the pre-electrolysis salt water were varied under different levels. Each arrangement generated a specific chlorinated solution. Assessment of the treatment potential of each solution generated were performed, and, with the aid of the AHP method of decision support, it was possible to conclude that the dosage of 30 g/L of NaCl, contact time of 33 minutes and applied electric current of 5 Ampère, corresponded to the best operating condition. Thus, the proposed disinfection system can be indicated for full-scale application of drinking water disinfection for decentralized populations.


Keywords: Electrolysis; Water treatment; Decentralized supply.

Topic: **Engenharia Sanitária**


Received: **03/08/2021**


Approved: **26/08/2021**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Leonardo Roggen e Silva 
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2171417353161899>
<http://orcid.org/0000-0002-3560-6913>
leonardo.roggen@usp.br

Bruno Segalla Pizzolatti 
Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/5026793745274166>
<http://orcid.org/0000-0002-2765-7040>
brunosegalla@me.com

Marcus Soares 
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/0892156896085348>
<http://orcid.org/0000-0002-0857-707X>
marcus.soares@ufsm.br

Marcelle Martins 
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/0337165856639161>
<http://orcid.org/0000-0003-4623-2993>
martins.marcelle@outlook.com

Samuel Lunardi 
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/1395693478357350>
<http://orcid.org/0000-0001-7451-095X>
samuelchinilunardi@gmail.com



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.008.0020

Referencing this:

SILVA, L. R.; PIZZOLATTI, B. S.; SOARES, M. B. D.; MARTINS, M.; LUNARDI, S.. Produção de solução clorada em reator eletrolítico com vistas à desinfecção de água para abastecimento. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.8, p.210-221, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.008.0020>

INTRODUÇÃO

Cerca de 1,8 bilhões de pessoas não têm acesso direto à água potável com condições mínimas para consumo humano, ou seja, uma água livre de contaminantes e organismos patogênicos (UNICEF et al., 2015). De acordo com Wegelin et al. (1994), a falta de acesso aos serviços de saneamento tem maior ocorrência em zonas rurais, pequenos municípios, e nas zonas periféricas de grandes metrópoles.

Dentre as etapas do processo de tratamento, cabe destaque a desinfecção, tendo o cloro como produto mais usual. O agente desinfetante penetra nas células dos microrganismos, através da associação à parede celular, reagindo com suas enzimas e destruindo-as. Sem a ação essencial das enzimas no processo metabólico, estes microrganismos são inativados (JORDÃO et al., 1995). No Brasil, o uso de cloro em águas de abastecimento é regulamentado pelo Ministério da Saúde através da Portaria nº 888 de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021).

Produtos à base de cloro estão disponíveis de forma líquida, sólida e gasosa, sendo este último o mais utilizado em Estações de Tratamento de Água (ETAs). Quando promovido o seu contato com a água, ocorre um processo rápido de hidrólise, formando ácido clorídrico e ácido hipocloroso. Este último é o agente mais ativo na desinfecção. Quando dissociado, o ácido hipocloroso acarreta na geração de íons hidrogênio e íons hipoclorito. A soma de suas concentrações resulta no cloro residual livre. Este, por sua vez, é essencial para promover a continuidade da desinfecção ao longo das redes de abastecimento, de modo que a água seja entregue ao consumidor final com garantia de potabilidade (RICHTER et al., 1991).

Dentre as tecnologias de desinfecção da água, a eletrólise se apresenta como um processo de oxirredução que decompõe ou sintetiza substâncias através da passagem de corrente elétrica. O uso da eletrólise na etapa de desinfecção apresenta grandes vantagens, uma vez que tal tecnologia possibilita a geração *in loco* de agentes desinfetantes utilizados no tratamento de água para abastecimento público.

Conforme Martins (2012), o uso de desinfecção por eletrólise em comunidades não abastecidas por redes de distribuição de água se torna uma solução oportuna, havendo baixo custo e facilidade de manutenção e operação. Regiões de comunidades isoladas são constituídas por pessoas de baixa renda, as quais não possuem acesso ao saneamento, uma vez que existe limitação de políticas públicas. Nesse cenário, ocorre a ausência de valorização da população vulnerável através da alocação de investimentos.

Assim, o objetivo da pesquisa se baseia em avaliar o uso de eletrólise de salmoura para a produção de solução clorada concentrada através de um reator eletrolítico de fluxo contínuo. A intenção de pesquisa preza pela aplicabilidade do método em comunidades isoladas, desprovidas de abastecimento público, tendo em vista a grande relevância da interação entre inovação tecnológica e inclusão social. Este aspecto é exprimido no desenvolvimento de projetos eficientes, de baixo custo e que prezem pelo desenvolvimento sustentável.

METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados na Universidade Federal de Santa Maria – campus Frederico

Westphalen (RS). A primeira etapa se baseou na concepção e montagem do reator eletrolítico sob diferentes configurações de operação. A definição do método ideal ocorreu por método multicritério de apoio a decisão, a partir de estimativas de vazão de tratamento para cada um dos arranjos propostos.

Reator eletrolítico

O reator eletrolítico foi projetado e construído em escala de bancada. Utilizou-se estrutura de vidro retangular com capacidade volumétrica de aproximadamente 1 L (831,25 mL), prevendo sua operação em fluxo contínuo. O volume do reator (V) foi definido a partir da vazão máxima ($Q_{\text{máx}}$) definida em 100 mL/min, perfazendo tempo mínimo de residência (T_{min}) da solução no interior do reator de aproximadamente 8 minutos, considerando a adaptação ao atendimento da situação experimental mais crítica, definida pelo planejamento fatorial.

Na Fig. 1 são apresentados os aspectos estruturais do reator, com ajuste de dimensões internas de 20 cm x 10 cm x 5 cm. As paredes componentes do reator são compostas de vidro, com espessura de 7 mm, unidos por cola de silicone específica para ambientes imersos em água. O reator eletrolítico possui chicanas formadas por pares de eletrodos com espaçamento 5 cm entre cada conjunto, de modo a conferir maior tendência de fluxo, reduzir a probabilidade de ocorrência de curtos circuitos e garantir o tempo de residência estabelecido.

As chicanas são compostas por eletrodos monopolares de aço inoxidável AISI 304L (Irestal Group), compostos por liga metálica de Ferro (Fe), Cromo (Cr) e Níquel (Ni). Este apresenta boa ductilidade, fácil corte e boa resistência à corrosão (SENATORE et al., 2006). Totalizam-se 6 eletrodos aplicados no reator com dimensões de 7,5 cm X 5,0 cm x 0,5 cm, havendo 3 pólos positivos e 3 pólos negativos no sistema. A distância adotada entre os polos é de 0,5 cm, sendo a mais adequada para produção de hipoclorito a partir de eletrólise da solução (RONCO et al., 2007).

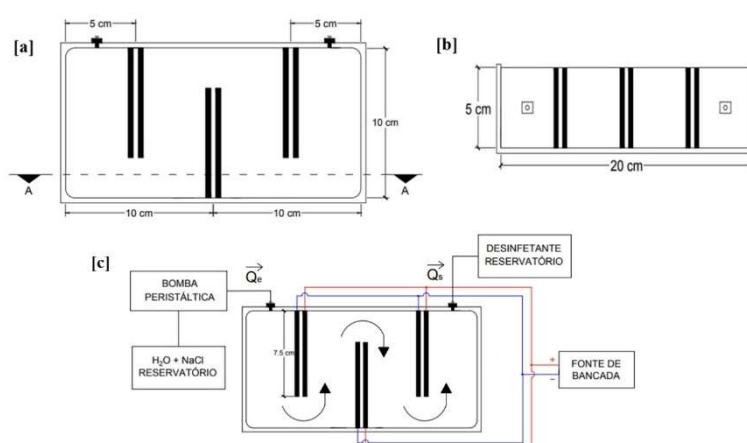


Fig. 1: Vista em planta do reator eletrolítico de bancada [a]; vista em corte A-A [b]; e esquema de funcionamento do sistema [c], onde são representados os polos positivos (em vermelho) e negativos (em azul).

Nas ligações foram utilizados cabos flexíveis de cobre ($\varnothing=2,5$ mm), sendo as conexões elétricas efetuadas com conectores de garra. A eletrificação foi realizada por fonte de alimentação digital (Minipa, MPS-3005^a), equipada com potenciômetros de ajuste de alta precisão, havendo tensão de saída variável de

0 a 30 Volts e corrente elétrica de 0,0 a 5,0 Ampères. A diferença de potencial fixada para o experimento correspondeu a 12 V. O monitoramento da corrente elétrica durante o procedimento experimental foi realizado por meio de multímetro (HYX DT 830D), sendo executado em intervalos de 5 minutos durante a operação do reator.

As concentrações de NaCl na solução de H₂O+NaCl foram determinadas por planejamento fatorial. O procedimento de preparo das soluções ocorreu em laboratório, através de mistura e agitação de água deionizada e NaCl durante 20 segundos. A utilização de água deionizada está atribuída a neutralização do pH, mesmo após a adição de NaCl, bem como a não incidência de cor aparente, turbidez e cloro livre. A solução foi armazenada em um reservatório (5 L) previamente preparado.

A adequação prévia do reservatório se baseou no preenchimento por solução de detergente (10%) por 24 horas, seguido de enxague com água destilada em três repetições. Por fim, o mesmo foi preenchido por uma solução de ácido nítrico (10%), também mantida por 24 horas, seguida de cinco repetições de enxague com água ultrapura e secagem a temperatura ambiente (SILVA et al., 2016; PARRON et al., 2011). O procedimento de preparo e lavagem também foi executado no reservatório de solução clorada acoplado à saída do reator eletrolítico, como medida de segurança para a integridade das amostras (ANA et al., 2011).

A sucção da solução contida no reservatório inicial foi executada via bomba peristáltica analógica (Ismatec, modelo Ecoline VC-MS/CA8-6), com recalque direcionado a entrada do reator eletrolítico. A vazão de entrada no reator eletrolítico variou de acordo com tempo de residência pré-estabelecido, sendo que maiores vazões propiciavam menores tempos de residência, havendo operação de vazão entre 25 e 100 mL/min. Ao final de cada tempo de contato estabelecido, houve coleta de amostra de 50 mL da solução clorada, realizando-se análise de parâmetros de controle físico-químicos.

O processo eletrolítico teve sua eficiência avaliada por meio de análises de parâmetros físico-químicos de qualidade da solução antes e após a reação eletrolítica, realizadas em triplicata, sendo considerados os valores médios amostrais. Foram realizadas análises de pH, temperatura, condutividade elétrica (HACH HQ40D); cor aparente (HACH DR900) e turbidez (HACH 2100Q) conforme APHA et al. (2005); além de análise de cloro livre (método titulométrico DPD).

Delineamento experimental

O estudo avaliou a concentração de cloro (Cl₂) na solução após a reação eletrolítica, em diferentes configurações do reator pré-determinadas, conforme variações da concentração de NaCl, tempo de eletrólise e corrente elétrica aplicada. A Tabela 1 apresenta os parâmetros operacionais do reator eletrolítico.

Tabela 1: Fatores e níveis utilizados no planejamento experimental.

Fatores	Níveis	
	(-)	(+)
NaCl (g.L ⁻¹)	5	30
Tempo (min)	10	40
Corrente Elétrica (A)	1,5	5,0

Utilizou-se o planejamento fatorial (*software* Statística®) como procedimento de determinação dos

arranjos, que gerou um total de oito. Este método é aplicado para duas ou mais variáveis independentes (fatores), promovendo a combinação do total de variáveis em todos os níveis, considerando o máximo de interações possíveis entre as variáveis (RODRIGUES et al., 2014). Os experimentos foram realizados em triplicata, totalizando 24 ensaios. Cada arranjo foi definido a partir de três variáveis, conforme diferentes níveis aplicados na Tabela 1, estabelecendo o planejamento fatorial e as definições de configurações operacionais em cada arranjo, conforme Tabela 2.

Tabela 2: Configurações operacionais em cada arranjo.

Arranjo	Cloreto de Sódio (g/L)	Tempo de contato (min.)	Corrente elétrica (A)	Vazão (mL/min)
1	5	8	1,5	100
2	30	8	1,5	100
3	5	33	1,5	25
4	30	33	1,5	25
5	5	8	5,0	100
6	30	8	5,0	100
7	5	33	5,0	25
8	30	33	5,0	25

Estimativas de vazão de tratamento

A partir da concentração de cloro (Cl_2) gerada e da dosagem de solução (NaCl) demandada para cada arranjo, obteve-se a estimativa o volume potencial de água a ser tratada em função do tempo. Por se tratar de um sistema de fluxo contínuo, a dosagem de solução clorada adicionada à água a ser tratada teve alternância baseada da vazão de entrada no reator.

Com vistas a aplicação na desinfecção de águas de abastecimento de regiões descentralizadas, geralmente provenientes de poços artesianos, definiu-se 2,5 mg/L como concentração de cloro na água final de abastecimento. Tal definição parte do pressuposto de que esta concentração seria capaz de inativar microrganismos e prover concentração residual de desinfetante na água tratada, conforme estabelecido pelo Ministério da Saúde, através da Portaria nº 888/2021 (BRASIL, 2021). As estimativas de dosagem da solução calculadas para todos os arranjos, foram obtidas através das Equações 1 e 2.

$$Q_s = \frac{Q_t \cdot (Dd)}{C_c} \quad (Eq. 1)$$

$$Q_{ab} = Q_t - Q_s \quad (Eq. 2)$$

Onde: Q_s = Vazão de solução injetada na linha de tratamento (mL/s); Dd = Dosagem alvo (mg/mL); C_c = Concentração da solução produto do reator (mg/s); Q_t = Vazão total de água tratada (mL/s).

Condição operacional ideal

Visando definir a melhor condição operacional do sistema, fez-se o uso do método da Análise Hierárquica (AHP). Este define a tomada de decisão por multicritérios baseadas na determinação de níveis hierárquicos para cada uma das variáveis envolvidas no problema (BORNIA et al., 2001; PIZZOLATTI, 2007). Através da mescla de critérios qualitativos e quantitativos, a decisão foi tomada a partir da elaboração de uma matriz quadrada, onde são estabelecidos critérios que influenciam na mesma (TREVIZANO et al., 2005). A Tabela 3 mostra os valores numéricos e os critérios analisados.

Tabela 3: Escala de importância da matriz.

Escala numérica	Escala verbal
1	Ambos os elementos são de igual importância
3	Moderada importância de um elemento sobre o outro
5	Forte importância de um elemento sobre o outro
7	Importância muito forte de um elemento sobre o outro
9	Extrema importância de um elemento sobre o outro
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre as opiniões adjacentes

Fonte: Adaptado de Roche et al. (2004).

Conforme as diretrizes de aplicação do AHP, efetuou-se a estruturação da matriz (alocação de critérios em linhas e variáveis em colunas). Após a normalização da matriz, executou-se o confronto entre as variáveis e o valor de relevância obtido pela matriz de critérios. Aplicando este procedimento a cada variável, tem-se que a soma de todos os critérios multiplicados pela relevância estabelece a indicação da melhor decisão a ser tomada (PIZZOLATTI, 2007). Os critérios escolhidos foram em ordem de relevância: relação dosagem de cloro e vazão de tratamento, custo de instalação, custo de operação, tempo, corrente elétrica, e concentração de NaCl.

Utilizou-se o *software* SciDAVIS para a expressão dos resultados e, para a geração das matrizes para o método de apoio a decisão, além da geração da matriz do planejamento fatorial, fez-se uso do *software* Statistica®.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Demanda de dosagem por vazão

Para cada arranjo realizou-se o procedimento de preparo da solução (H₂O deionizada + NaCl) e análise prévia das características físico-químicas antes da passagem pelo reator (Tabela 4). Na solução de entrada é garantida ausência de aspectos relacionados a cor aparente, turbidez e concentração de cloro livre; havendo pH igual à 7 em todas as amostras.

Tabela 4: Aspectos físico-químicos de qualidade da solução salina aplicada e água tratada no sistema.

Arranjo	Temperatura (°C)		Condutividade elétrica (µS/cm)		pH	Cor aparente (uH)	Turbidez (uT)	Cloro livre (mg/L)
	E	S	E	S				
1	19,53	42,53	8.273,50	12.096,00	8,5	42,33	14,67	91,67
2	21,20	47,83	51.445,60	78.861,73	9,8	43,00	41,33	550,00
3	18,80	79,10	8.342,60	13.373,27	6,1	50,67	61,00	346,67
4	19,60	82,23	51.834,10	117.352,63	7,4	45,00	57,67	996,67
5	22,00	62,67	8.392,30	15.348,40	8,6	28,67	34,67	161,67
6	23,93	60,77	52.920,60	92.364,33	9,2	27,33	70,33	956,67
7	20,60	74,93	8.582,60	17.798,80	7,4	43,67	43,00	2.100,00
8	24,23	85,57	52.801,30	82.661,30	7,1	52,33	74,67	12.016,67

Legenda: (E) = Solução de entrada no sistema; (S) = Água tratada de saída do sistema. Valores médios das amostras (n=3).

As pequenas variações de temperatura observadas antes do processo de eletrólise se devem à realização do experimento em dias alternados. As variações observadas de condutividade elétrica se relacionam com o fato de que altas concentrações de sais tendem a contribuir com o transporte de íons e cargas elétricas, além de elevar concentrações de hidróxidos metálicos, o que propicia a formação de eletrólitos ideais para corrente elétrica (CRESPILHO et al., 2004; POLPRASERT et al., 2005).

Antes do processo eletrolítico, a menor condutividade elétrica aferida nos arranjos 1, 3, 5 e 7, está vinculada às menores concentrações de NaCl nas amostras (5mg/L). No restante dos arranjos (2, 4, 6 e 8), havendo concentração aplicada de 30 g/L da solução de NaCl, é observada maior condutividade elétrica. Em destaque, o arranjo 6 (52.920,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$) demonstrou grande proximidade a condutividade elétrica da água do mar (PIRATOBA et al., 2017).

Após a etapa de eletrização do sistema, as características físico-químicas da solução produzida (Tabela 4) aponta incidência de cloro (Cl_2), o que demonstra que a proposta do reator eletrolítico atingiu o objetivo estabelecido. O nível mínimo dos fatores, conforme arranjo 1 (5 g/L de NaCl; 8 min.; 1,5 A), possibilitou a menor geração média de Cl_2 (91 mg/L). Os níveis máximos dos fatores, expressos no arranjo 8 (30 g/L de NaCl; 33 min.; 5 A), possibilitou a maior geração média de Cl_2 (12.016,67 mg/L).

Os pH médios das soluções cloradas nos diferentes arranjos sofreram variações que não demonstraram relação com as concentrações de NaCl utilizadas. Por outro lado, as concentrações podem ser influenciadas pelo pH. O cloro livre presente nas soluções geradas é constituído por ácido hipocloroso (HOCl) e íon hipoclorito (OCl^-). O ácido hipocloroso tem um maior potencial desinfetante que o íon hipoclorito de sódio, sendo que a presença varia conforme o pH (LUCCA, 2006; JORDÃO et al., 2011).

Nos arranjos 1, 2, 5 e 6, com tempo de contato de 8 minutos, demonstraram-se condições de pH (>8,5) que corroboram com maior presença de íon hipoclorito. No tempo de contato de 33 minutos, os arranjos 3, 4, 7 e 8 (pH <7,5) expressaram maior concentração de ácido hipocloroso (FUNASA, 2014). Este, por sua vez, apresenta neutralidade elétrica e, quando em contato com a parede celular dos microrganismos patogênicos (negativamente carregada), existe acesso ao interior da célula com maior facilidade (NUVOLARI, 2003; SCHMIDT, 2011; SANTOS, 2014).

Os arranjos 4 e 6 apresentaram geração de cloro semelhante, no entanto, em virtude do pH, o potencial de desinfecção dos arranjos se difere em meio a distintas proporções de íon hipoclorito (OCl^-) e ácido hipocloroso (HOCl). A amostra gerada pelo arranjo 4 possui o pH mais próximo à neutralidade (pH = 7,4) quando comparada ao arranjo 6 (pH = 9,2), sendo que neste é possível pressupor menor eficiência de desinfecção por ácido hipocloroso (FUNASA, 2014). É importante observar que as condições de pH observadas, bem como a geração de íon hipoclorito e ácido hipocloroso, dependem diretamente da natureza da água a ser tratada.

O arranjo 6 (30 g/L de NaCl; 8 min.; 5 A) apresentou a menor média de cor aparente dentre as amostras cloradas (27,33 uH), enquanto a maior média evidenciou-se no arranjo 8, de maiores níveis aplicados (30 g/L de NaCl; 33 min.; 5 A), correspondendo a 52,33 uH. Em relação à turbidez, o arranjo 1 (5 g/L de NaCl; 8 min.; 1,5 A), detendo os menores níveis fixados, apresentou a menor média (14,7 uT). A maior média de turbidez, assim como cor aparente, correspondeu ao arranjo 8 (30 g/L de NaCl; 33 min.; 5 A), igual a 75 uT.

O aumento de cor aparente e turbidez após o processo de eletrólise ocorreu em todos os ensaios. Esse cenário pode se relacionar às reações de oxirredução ocorrentes nos eletrodos, que em virtude de sua composição (aço inoxidável), pode causar a dissociação de partículas sólidas e dissolvidas durante o processo

de eletrólise.

Conforme os dados de temperatura aferidos na solução clorada, é evidenciado o aumento de acordo com o tempo de contato estabelecido para a operação do arranjo. Os ensaios com menor tempo de contato (8 minutos), apresentaram temperaturas mais baixas da solução clorada em comparação aos ensaios com maior duração (33 minutos).

O aumento excessivo da temperatura da água pode ocasionar a elevação da geração de cloro, seguido de posterior decaimento, devido a evaporação do cloro gás antes solubilizado (RONCO et al., 2007; JIANU et al., 2015). Reatores eletrolíticos capazes de operar sob temperatura constante se tornam interessantes no processo de produção de cloro, uma vez que a produção de cloratos está diretamente relacionada ao aumento de temperatura da salmoura (PONZANO, 2007).

Maiores correntes elétricas aplicadas aos eletrodos, culminaram em uma maior geração de cloro (Cl_2). Ainda, quanto maior a concentração de NaCl aplicada, maior a concentração de cloro (Cl_2) na amostra clorada.

Para efeito de cálculo da estimativa de vazão de tratamento (Tabela 5), utilizou-se a concentração média de cloro de cada arranjo. Os resultados apontam a pior potencialidade de tratamento correspondente ao arranjo 1 (5 g/L de NaCl; 8 min.; 1,5 A), o qual necessitaria de uma vazão de dosagem na saída do reator de 27,26 mL/s para permitir o tratamento de 972,74 mL/s. O arranjo que necessita de menor solução clorada para maior tratabilidade, correspondeu ao arranjo 8 (30 g/L de NaCl; 33 min.; 5 A), que também possui a menor relação vazão de solução/vazão de água bruta, além de possuir maior formação de ácido hipocloroso na composição do cloro residual livre, devido ao pH da solução gerada (7,1), conforme demonstrado na Tabela 4.

Tabela 5: Avaliação de potencial de tratamento em linha.

Arranjo	Solução clorada (Cl_2)		Vazão da solução (Q_s)	Vazão de água bruta (Q_{ab})	Q_s/Q_{ab}
	mg/L	mg/mL	mL/s	mL/s	
1	91,70	0,09	27,26	972,74	0,0280
2	550	0,55	4,55	995,45	0,0046
3	346,70	0,35	7,21	992,79	0,0073
4	996,70	1,00	2,51	997,49	0,0025
5	161,70	0,16	15,46	984,54	0,0157
6	956,70	0,96	2,61	997,39	0,0026
7	2.100	2,1	1,19	998,81	0,0012
8	12.016,70	12,02	0,21	999,79	0,0002

A relação entre a vazão de dosagem (Q_s) e a quantidade de água bruta tratada (Q_{ab}) em um determinado tempo, tem sua relevância baseada na salinidade contida na solução clorada. Quanto maior a vazão de dosagem em linha, maior a probabilidade de ocorrência de uma água tratada, porém salobra, com maior turbidez e cor. Quanto maior a concentração de cloro presente na solução eletrolítica, conforme diluição da solução em 2,5 mg/L (Cl_2), maior o potencial de tratamento em linha. Ou seja, quanto menor o volume de solução necessária para que ocorra o alcance da concentração de cloração desejada, maior a eficiência do método.

Critérios de avaliação

Com base nas informações de operação das diferentes configurações propostas dentre os arranjos, fez-se uso do método de apoio à tomada de decisão AHP para a seleção da melhor configuração. Os critérios escolhidos de forma subjetiva para avaliação são demonstrados (Tabela 6), sendo a relação vazão de solução/vazão de água bruta como o critério de maior importância e a concentração de NaCl a de menor importância.

Tabela 6: Critérios adotados para avaliação do reator eletrolítico.

Arranjo	Qs/Qab	Instalação	Operação	Tempo (min)	Corrente (A)	NaCl (g/L)
1	0,0280	muito baixo	muito baixo	10	1,5	5
2	0,0046	baixo	muito baixo	10	1,5	30
3	0,0073	alto	alto	40	1,5	5
4	0,0025	muito alto	alto	40	1,5	30
5	0,0157	muito baixo	baixo	10	5,0	5
6	0,0026	baixo	baixo	10	5,0	30
7	0,0012	alto	muito alto	40	5,0	5
8	0,0002	muito alto	muito alto	40	5,0	30

Legenda: Qs = Vazão da solução; Qab = Vazão de água bruta.

A relação Qs/Qab tem sua importância firmada na proposta de uso da água para abastecimento descentralizado, não tendo a intenção de proporcionar uma água salobra para consumo. Custos com instalação e operação foram definidos de forma subjetiva, pensando em aplicação da tecnologia desenvolvida em escala real. Os custos de instalação são influenciados pela exigência de dispêndio de espaço físico, em função do volume do reator, equipamentos acessórios e volume de água a ser tratada. Já os custos de operação são influenciados pelo consumo de energia elétrica, manutenção e compra de NaCl.

O tempo de contato tem sua importância baseada na possibilidade de definir a vazão aplicada no tratamento. O critério de corrente elétrica é influenciado pelos custos vinculados ao consumo de energia elétrica, havendo fontes alternativas de abastecimento energético que podem ser implantadas. A concentração de NaCl é o critério de menor importância por ser de fácil aquisição e baixo custo.

Após a definição dos critérios, foram atribuídas as relevâncias para cada critério par a par, sendo gerada a matriz de comparação/julgamento com relação ao critério Qs/Qab (Tabela 7). Os pesos foram distribuídos com base na escala de importância conforme adaptação de Roche et al. (2004).

Tabela 7: Matriz de decisão de importância da relação Vazão da solução/vazão de água bruta (Qs/Qab).

Arranjo	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1	1	1	1/3	1/7
2	1	1	1	1	1	1	1/3	1/7
3	1	1	1	1	1	1	1/3	1/7
4	1	1	1	1	1	1	1/3	1/7
5	1	1	1	1	1	1	1/3	1/7
6	1	1	1	1	1	1	1/3	1/7
7	3	3	3	3	3	3	1	1/5
8	7	7	7	7	7	7	5	1

O procedimento de montagem da matriz e ponderação foi realizado para todos os seis critérios definidos. Mesmo que o processo de ponderação seja subjetivo e não obrigatório para aplicação da metodologia de apoio a decisão, delimitar a importância de cada critério em função dos arranjos propostos

facilitou o processo de construção da matriz quadrada dos critérios (Tabela 8).

Tabela 8: Matriz quadrada 6x6 dos critérios.

Critério	Tempo	Corrente	Qs/Qab	Instalação	Operação	NaCl	A.V.	A.V.N.
Tempo	1	2	1/5	1/3	1/2	3	0,76	8,99%
Corrente	1/2	1	1/7	1/5	1/3	2	0,46	5,41%
Qs/Qab	5	7	1	2	3	9	3,52	41,34%
Instalação	3	5	1/2	1	2	7	2,17	25,54%
Operação	2	3	1/3	1/2	1	5	1,31	15,37%
NaCl	1/3	1/2	1/9	1/7	1/5	1	0,28	3,34%
Σ	12	19	2	4	7	27	9	100,00%

Legenda: Qs = Vazão da solução; Qab = Vazão de água bruta; (A.V.) = auto vetor; (A.V.N.) = auto vetor normalizado.

A matriz confirma a ordem de importância dos critérios anteriormente definidos, sendo a relação Qs/Qab representante de 41,34% da importância dos critérios, seguida por gastos de instalação (25,54%), custos de operação (15,37%), tempo de eletrólise (8,99%), intensidade de corrente elétrica (5,41%) e o critério de menor importância, concentração de NaCl (3,34%). Para obtenção das porcentagens calculou-se o auto vetor normalizado de cada critério, obtido por meio da razão entre o auto vetor de cada critério e o somatório de todos os autovetores. O auto vetor de cada critério é a média geométrica de cada linha da Tabela 8.

Outros dados foram calculados durante a construção da matriz de critérios com o intuito de verificar a coerência matemática no julgamento proposto. O autovalor é obtido a partir do produto matricial do somatório dos critérios em relação aos autovetores normalizados, o qual correspondeu a 6,06 para a matriz 6x6. O índice de coerência do julgamento foi calculado conforme demonstrado a partir da Eq. 3.

$$IC = \frac{\text{autovalor} - n}{n - 1} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$IC = \frac{6,06 - 6}{6 - 1} = 0,0123 \quad (\text{Eq. 4})$$

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$RC = \frac{0,0123}{1,24} = 0,0099 \text{ ou } 0,99\% \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde: IC = Índice de coerência do julgamento dos critérios; n = Número de critérios; RC = Razão de coerência; IR = Índice randômico para matrizes 6x6 igual a 1,24 (SAATY, 1984).

Assim, apenas 1% de incoerência foi detectado para os julgamentos dos critérios, sendo que razões de incoerência de até 20% são aceitáveis (SAATY, 1984). Logo, todos os dados foram harmonizados e normalizados para que fossem confrontados com a relevância de cada critério, resultando na matriz resposta (Tabela 9).

Tabela 9: Matriz resposta com dados normalizados.

Arranjo	Tempo	Corrente	Qs/Qab	Instalação	Operação	NaCl	Vetor de decisão
Vetor	8,99%	5,41%	41,34%	25,54%	15,37%	3,34%	100,00%
1	20%	19%	1%	24%	24%	21%	14%
2	20%	19%	3%	12%	24%	4%	11%
3	5%	19%	2%	8%	8%	21%	6%
4	5%	19%	6%	6%	8%	4%	7%
5	20%	6%	1%	24%	12%	21%	11%
6	20%	6%	5%	12%	12%	4%	9%

7	5%	6%	12%	8%	6%	21%	9%
8	5%	6%	71%	6%	6%	4%	33%

Legenda: Qs = Vazão da solução; Qab = Vazão de água bruta.

De acordo com a escala de importância e julgamento de cada critério, o oitavo arranjo (30 g/L de NaCl; 33 min.; 5 A) torna-se a melhor alternativa, ou seja, a melhor configuração de operação do sistema com reator eletrolítico, havendo 33% de decisão na escolha. Salienta-se que com a mudança de critérios e importância, o resultado pode variar.

CONCLUSÕES

O reator eletrolítico desenvolvido se mostrou satisfatório para a produção de uma solução clorada. Os parâmetros operacionais de corrente elétrica, tempo de contato e concentração de NaCl, bem como as dimensões do reator utilizado, possibilitaram um melhor conhecimento acerca da dinâmica decorrente no processo de eletrólise de salmoura na geração de solução clorada. Frente as variações de concentração de NaCl na solução de entrada, corrente elétrica aplicada e tempo de contato, pode-se perceber que o aumento de tais variáveis é diretamente proporcional ao aumento da geração de cloro na solução desinfetante.

A configuração do sistema caracterizada pela aplicação de 30 g/L de NaCl na salmoura inicial, 5 A de corrente elétrica e tempo de contato de 33 minutos, correspondeu a configuração de operação que apresentou melhor relação vazão de solução/vazão de água bruta. A partir do método de apoio à decisão AHP e o julgamento de importância de cada critério definido, esta foi a melhor configuração operacional utilizada para a geração de uma solução desinfetante, com 33 % de decisão na escolha.

O reator eletrolítico desenvolvido pode ser indicado como um bom sistema de desinfecção, sendo subsídio para estudos futuros e também aplicações em escala real. De forma ampliada, o sistema também permite a utilização de água salobra e/ou água do mar pré-tratada para a produção de solução clorada. Assim, concretiza-se a possibilidade de uma etapa de tratamento eficiente para a desinfecção de água de forma descentralizada.

REFERÊNCIAS

ANA; CETESB. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras:** água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidas. Brasília: Athalaia, 2011.

APHA; AWWA; WEF. American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation. **Standard methods for the examination of water and wastewater.** 21 ed. Washington: APHA, 2005.

BORNIA, A. C.; WERNKE, R.. A contabilidade gerencial e os métodos multicriteriais. **Revista Contabilidade & Finanças,** São Paulo, v.12, n.25, p.60-71, 2001. DOI: <http://doi.org/10.1590/S1519-70772001000100004>

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria n.888, de 04 de maio de 2021.** Controle e Vigilância da Qualidade da água Para Consumo Humano e Seu Padrão de Potabilidade. Brasília:

MS, 2021.

CRESPILO, F. N., REZENDE, M. O. O.. **Eletroflotação:** Princípios e Aplicações. São Paulo: RIMA, 2004.

FUNASA. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de cloração de água em pequenas comunidades utilizando o clorador simplificado desenvolvido pela Funasa.** Brasília: Ministério da Saúde, 2014.

JIANU, O.; ROSEN, M.; NATERER, G. F.; WANG, Z. Two-phase bubble flow and convective mass transfer in water splitting processes. **International Journal of Hydrogen Energy,** v.40, n.11, p.4047-4055, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.074>

JORDÃO, E.; PESSOA, C.. **Tratamento de esgotos domésticos.** 6 ed. Rio de Janeiro: ABES, 2011.

JORDÃO, E.; ARRUDA, C.. **Tratamento de esgotos domésticos, concepções clássicas de tratamento de esgotos**. 2 ed. São Paulo: CETESB, 1995.

LUCCA, L.. **Controle de qualidade do Hipoclorito de Sódio no Processo de Produção**. Monografia (Bacharelado em Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

MARTINS, W. B.. Produção de cloro por eletrólise para desinfecção de água em locais atingidos por desastres naturais ou não servidos por sistemas de água potável. In: FEIRA DE INICIAÇÃO À INOVAÇÃO E AO DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO, 21. **Anais**. Porto Alegre: UFRGS, 2012.

NUVOLARI, A.. **Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reúso agrícola**. São Paulo: Blucher, 2003.

PARRON, L. M.; MUNIS, D. H. F.; PEREIRA, C. M.. **Amostragens para Análise Físico-Química**. Manual de Procedimentos de Amostragem e Análise Físico-Química de Água. Colombo: Embrapa Florestas, 2011.

PIRATOBA, A. R. A.; RIBEIRO, H. M. C.; MORALES, G. P.; GONÇALVES, W. G.. Caracterização de parâmetros de qualidade da água na área portuária de Barcarena, PA, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v.12, n.3, p.435-456, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1910>

PIZZOLATTI, B. S.. **Avaliação dos métodos de desinfecção: cloração e radiação ultravioleta, com a finalidade de aproveitamento da água de chuva em escala residencial**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

PONZANO, G. P.. Sodium Hypochlorite: History, Properties, Electrochemical Production. **Contributions to Nephrology**, n.154, p.7-23, 2007. DOI: <http://doi.org/10.1159/000096810>

POLPRASERT, C.; SHARMA, K.; KOOTTATEP, T. An integrated electro-chemical and natural treatment system for industrial water pollution control. **Water Science and Technology**, v.52, n.12, p.1-8, 2005. DOI: <http://doi.org/10.2166/wst.2005.0414>

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETO, J. M.. **Tratamento de água. Tecnologia Atualizada**. São Paulo: Blucher, 1991.

ROCHE, H.; VEJO, C.. **Análisis multicriterio en la toma de decisiones**. Métodos Cuantitativos aplicados a la administración. Análisis multicriterio AHP. Material apoyo, 2004.

RODRIGUES, M. I.; LEMMA, A. F.. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. 2 ed. Campinas: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2014.

RONCO, C.; MISHKIN, G. J.. **Disinfection by sodium hypochlorite: Dialysis applications: Contributions to Nephrology**. Basel: S. Karger, 2007.

SAATY, T. L.. **Decider face à la complexité, "Une approche analytique multicritère d'aide à la décision"**. Paris, 1984.

SANTOS, C. D.. **Avaliação da eficiência da desinfecção mediante uso de cloro gás na ETE Insular – Florianópolis, SC**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

SENATORE, M.; FINZETTO, L.; PEREA, E.. Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v.60, n.1, p.175-181, 2006. DOI: <http://doi.org/10.1590/S0370-44672007000100027>

SCHMIDT, C. G.. **Desenvolvimento de filtros de carvão ativado para remoção de cloro de água potável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SILVA, P. R. B.; MAKARA, C. N.; MUNARO, A. P.; SCHNITZLER, D. C.; WASTOWSKI, A. D.; POLETO, C.. Comparison of the analytical performance of EDXRF and FAAS techniques in the determination of metal species concentrations using protocol 3050B (USEPA). **International Journal River Basin Management**, v.14, n.4, p.401-406, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1080/15715124.2016.1203792>

TREVIZANO, W. A.; FREITAS, A. L. P.. Emprego do Método da Análise Hierárquica (AHP) na seleção de Processadores. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 25. **Anais**. Porto Alegre: PUCRS, 2005.

UNICEF; WHO. Fundo de Emergência Internacional das Nações Unidas para a Infância; World Health Organization. **Progress on Sanitation and Drinking Water: 2015 Update and MDG Assessment**. Switzerland: WHO Press, 2015.

WEGELIN, M.; CANONICA, S.; MECHSNER, K.; FLEISHMANN, T.; PESARO, F.; METZLER, A.. Solar Water Disinfection: Scope on Process and Analysis of Radiation Experiments. **Aqua**, v.43, n.3, p.154-169, 1994.

A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detém os direitos materiais desta publicação. Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas sob coordenação da Sustenere Publishing, da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.