



REMOÇÃO DE CIANOBACTÉRIAS E OUTROS COMPOSTOS POR MEIO DE UMA INSTALAÇÃO PILOTO DE DUPLA FILTRAÇÃO

José Roberto Lins da Silva ^{*1}; Sérgio Carlos Bernardo Queiroz ²; Angela Di Bernardo Dantas ³;
Luiz Di Bernardo ³; César Ricardo Palomino Condo ⁴ & Maria Aparecida Faustino Pires ⁵

Resumo - O abastecimento de água na cidade de Palmas-TO vem passando por sérios problemas de ordem quantitativa desde 2005. Em razão disto, uma solução bastante viável seria a construção de uma nova estação de tratamento aduzida pela água do reservatório da usina hidrelétrica Lajeado. Por outro lado, florações de cianobactérias são recorrentes e o controle mais efetivo seria necessário ao processo de tratamento desta água. Diante deste cenário, o presente estudo buscou avaliar a remoção de cianobactérias, cianotoxinas, turbidez, matéria orgânica, biomassa algal e produtos secundários da desinfecção por meio de uma instalação piloto de dupla filtração, composta por colunas de pré-filtro ascendente em areia grossa e filtro rápido descendente em areia, precedidos ou não de oxidante e adsorvente de natureza carbonácea. Os resultados mostraram que a variação da composição físico-química, microbiológica e toxicológica nas águas de estudo influenciou no rendimento dos processos testados. A grande vantagem desta variação foi reconhecer que a dupla filtração conseguiu garantir excelentes resultados na qualidade da água final. Presente em todos os ensaios, *Planktothrix isothrix* apresentou-se como uma espécie de fácil remoção nesse sistema. Não houve formação significativa de produtos secundários da desinfecção e concentrações de cianotoxinas.

Palavras-chave: cianobactérias, cianotoxinas, dupla filtração.

REMOVAL OF CYANOBACTERIA AND OTHER COMPOUNDS USING DOUBLE FILTRATION

Abstract - The water supply in Palmas city (Tocantins State - Brazil) has faced severe quantitative problems since 2005. In this context, the most effective solution would be to build a new station for treating the water abstracted from the Lajeado Reservoir. On the other hand, cyanobacterial blooms are recurrent, which requires a more effective water treatment. In this scenario, the present study sought to evaluate the removal of cyanobacterial cell, cyanotoxin, turbidity, organic matter, algal biomass and chlorination by-products formation, through the use of a double filtration pilot plant, made up of upward pre-filter columns on coarse sand and rapid downward filter on sand, preceded or not by oxidant and carbonaceous adsorbent. The results showed that the variation of physical-chemical, microbiological and toxicological composition in the study on water influenced the performance of the tested processes. The great advantage of this change was to recognize that the double filtration managed to secure excellent results in quality of the final water. Present in all tests, *Planktothrix isothrix* introduced himself as specie of easy removal in this system. There was no significant formation of disinfection by-products and cyanotoxins concentrations.

Keywords: cyanobacteria, cyanotoxins, double filtration

¹ Biólogo, Doutor em Tecnologia Nuclear (Ipen/USP), Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS); Especialista em Desenvolvimento Operacional (Odebrecht Ambiental | Saneatins), jlins@usp.br; ² Engenheiro Ambiental, Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS); ³ Engenheiro(a) Civil, Doutor(a) em Hidráulica e Saneamento (EESC/USP); ⁴ Engenheiro Civil, Mestrando em Engenharia Ambiental (UFT); ⁵ Química, Doutora em Tecnologia Nuclear (Ipen/USP).

INTRODUÇÃO

O abastecimento de água na cidade de Palmas, capital do Estado do Tocantins, vem passando por transtornos de ordem quantitativa há uma década. As gradativas reduções nas vazões de seus mananciais e o aumento da demanda por água tratada contribuem para a escassez deste bem, principalmente, durante o período de estiagem. Uma solução bastante viável para reparar este problema seria a construção de uma nova estação de tratamento aduzida pela água do reservatório da Usina Hidroelétrica Luis Eduardo Magalhães, conhecida como UHE Lajeado. Por outro lado, a qualidade da água vem sendo comprometida desde a sua formação por recorrentes florações de cianobactérias, o que exigiria um controle mais incisivo em razão da capacidade de alguns gêneros liberarem toxinas, colmatarem filtros, alterarem parâmetros organolépticos e aumentarem a carga orgânica afluyente à estação. Segundo Di Bernardo et al., (2010), a tecnologia mais adequada para a remoção destes microrganismos e seus metabólitos seria a dupla filtração. Há uma série de vantagens no uso desta tecnologia em relação ao tratamento por ciclo completo, como por exemplo, o uso de águas que apresentam baixa qualidade; águas que apresentam elevadas densidades de algas, cor verdadeira, turbidez, organismos patogênicos, variações bruscas nos parâmetros de qualidade, dentre outros (Pádua, 2006).

No presente trabalho, foram realizados ensaios de tratamento de água em uma instalação piloto de dupla filtração, composta por colunas de pré-filtro ascendente em areia grossa e filtro rápido descendente em areia, precedidos ou não de oxidante e adsorvente de natureza carbonácea. O estudo buscou avaliar a remoção de células de cianobactérias e cianotoxinas, turbidez, matéria orgânica, biomassa algal e produtos secundários da desinfecção.

A INSTALAÇÃO PILOTO DE DUPLA FILTRAÇÃO

A instalação piloto de dupla filtração (IPDF) foi montada nas dependências da estação de tratamento de água 6 (ETA 6), em Palmas - TO, e foi composta por: (1) sistema de reservação de água bruta e recalque; (2) Câmara de nível constante – CNC; (3) Câmara de mistura rápida; (4) Coluna de pré-oxidação (PreOx); (5) Coluna de adsorção com carvão ativado em pó – CAP; (6) Filtro ascendente em areia grossa – FAAG; (7) Coluna de interoxidação (InterOx); (8) Filtro rápido de areia descendente – FRD; (9) Coluna de carvão ativado granular – FCAG; (10) Reservatório de água filtrada e lavagem dos filtros; (11) tanques para dosagem de produtos químicos e (12) bomba de água de lavagem (ver figura 1).

A taxa de filtração adotada para o FAAG e FRD foi de $180 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. Em todos os ensaios foi utilizado o cloreto de polialumínio – PAC como coagulante e a duração da carreira de filtração foi fixada em 24 horas. O FAAG foi composto por uma camada suporte de areia grossa, com granulometria variando entre 6,4 e 25,4 mm, e altura total de 60 cm. Em complementação, foi adicionada uma camada de 160 cm de areia com grão de 1,00 a 2,4 mm. Já no FRD, a granulometria variou de 0,30 a 1,41 mm, e altura total de 70 cm. O FCAG foi composto por 65 cm de CAG.

Para o estudo, águas enriquecidas de cianobactérias (AE) foram preparadas pela adição de, aproximadamente, $200.000 \text{ cél. mL}^{-1}$, com o objetivo de serem testadas em cinco configurações, sendo a primeira composta pela dupla filtração (FAAG + FRD = DF) e seguida de FCAG; a segunda, por CAP antecedendo a DF; a terceira, por pré-oxidação (PreOx) antecedendo a DF e pós-tratamento com FCAG; a quarta, constituída por PreOx seguida de CAP e posterior DF e a quinta configuração que foi composta por InterOx entre os filtros e posterior adsorção por FCAG (tabela 1).

Para avaliação das etapas durante os ensaios, foram realizadas análises de cianobactérias (CIANO) turbidez (TBZ), pH, clorofila *a* (Cl-a), cianotoxinas e carbono orgânico total (COT), além da caracterização físico-química, bacteriológica e hidrobiológica das AE (figura 2).

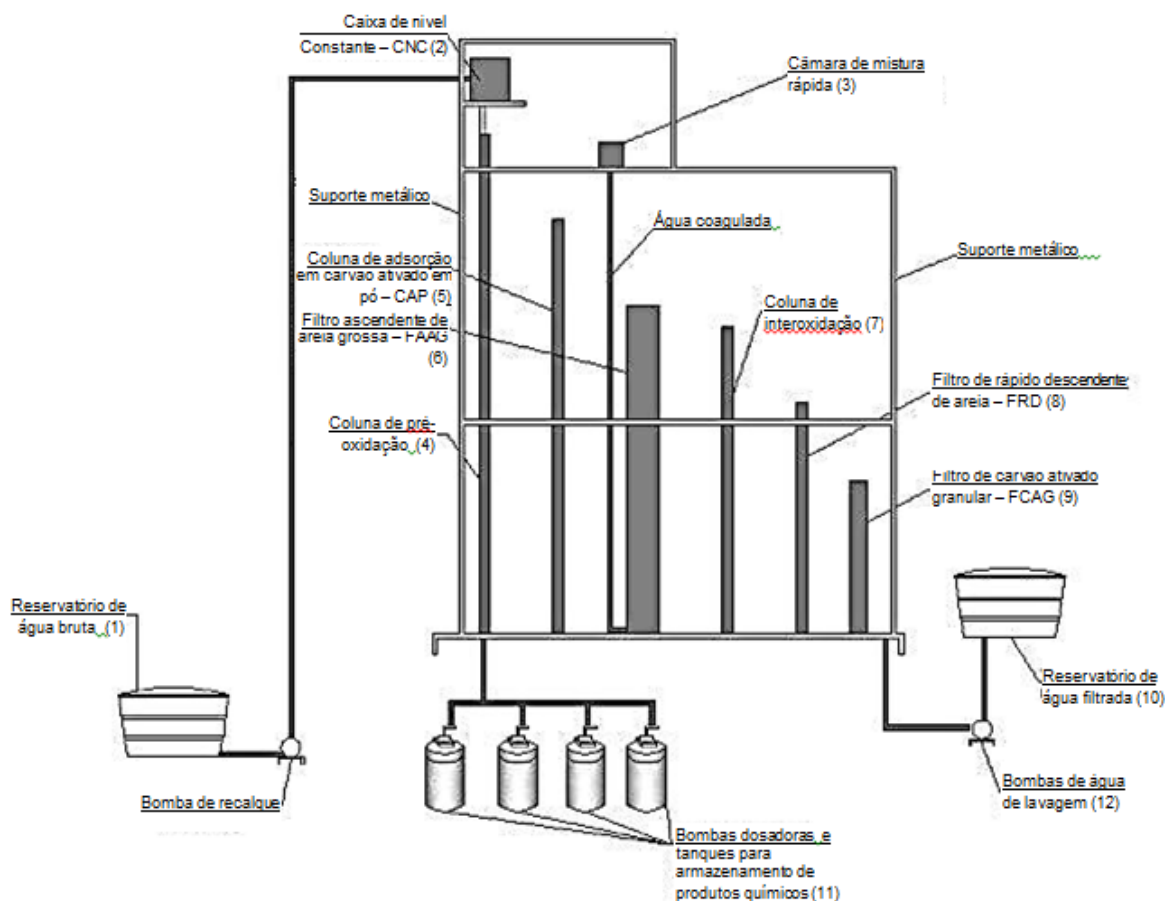


Figura 1. Configuração da instalação piloto de dupla filtração para o estudo.

Tabela 1. Descritivo dos ensaios.

Identificação do ensaio	Identificação das fases utilizadas para cada estudo						
	PRE	CAP	COA	FAAG	INTER	FRD	FCAG
Ensaio I	-	-	X	X	-	X	X
Ensaio II	-	X	X	X	-	X	-
Ensaio III	X	-	X	X	-	X	X
Ensaio IV	X	X	X	X	-	X	-
Ensaio V	-		X	X	X	X	X

Legenda: PRE – coluna de pré-oxidação; CAP – coluna de adsorção por carvão ativado em pó; COA – coluna com água coagulada; FAAG – coluna/filtro ascendente em areia grossa; INTER – coluna de oxidação; FRD – coluna/filtro rápido descendente em areia; FCAG – coluna/filtro em carvão ativado granular.

ATIVIDADES PRÉ-OPERACIONAIS NA IPDF

Antes de iniciar os ensaios, foram realizados testes em filtros de laboratório de areia (FLA) com água coagulada na própria IPDF. O FLA foi posicionado abaixo do ponto de amostragem de água coagulada e operado com taxa de filtração da ordem de 60 a 100 m³.m⁻².d⁻¹. As coletas de

amostras de água filtrada foram realizadas a cada 20 minutos. As condições de dosagem foram replicadas na piloto após a determinação da dosagem de coagulante e pH de coagulação evidenciada em jarreste. A dosagem de coagulante e o respectivo pH de coagulação foram considerados satisfatórios se, após cerca de 20 minutos de filtração, a turbidez apresentar-se menor que 0,50 uT no efluente do FLA. Nos ensaios onde ocorreu a pré-oxidação e adsorção (aplicação de 40 mg.L⁻¹ de CAP), houve um controle do residual de cloro na saída da coluna de pré-oxidação, onde era mantido um residual de 0,1 mg.L⁻¹. Somente após ser constatada a condição desejável a água era encaminhada ao FAAG, sendo então iniciado o ensaio.

A ÁGUA DE ESTUDO (AE)

A água de estudo foi preparada a partir da mistura de 10 m³ de água coletada no reservatório da UHE Lajeado, no ponto (S 10°17.304' W 48°19.968'), com inóculos de cianobactérias coletados na lagoa de estabilização da ETE de Porto Nacional – TO. Para garantir uma maior uniformidade, a AE foi recirculada.

REALIZAÇÃO DE ANÁLISES DA QUALIDADE DA ÁGUA

As análises de cilindrospermopsina e saxitoxina (STX) dos ensaios I e II foram realizadas no Laboratório de Ecofisiologia Carlos Chagas (UFRJ). As análises de carbono orgânico foram realizadas no Laboratório de Análises Química e Ambiental (CQMA/IPEN/CNEN-SP). Foram realizadas também análises dos produtos secundários da desinfecção (PSD): clorofórmio, bromodiclorometano, dibromoclorometano, bromofórmio, trihalometanos totais e os ácidos cloroacético, bromoacético, dicloroacético, tricloroacético, bromocloroacético, bromodicloroacético, dibromoacético, clorodibromoacético, tribromoacético, haloacéticos totais no Laboratório Bioagri Ambiental, em Piracicaba – SP. As análises de alcalinidade total (mg.L⁻¹ CaCO₃), alumínio dissolvido (mg.L⁻¹), cianobactérias (cél.mL⁻¹), cloreto (mg.L⁻¹), clorofila *a* (µg.L⁻¹), condutividade (µS.cm⁻¹), cor aparente (uH), cor verdadeira (uH), DBO-5 (mg.L⁻¹), dureza total (mg.L⁻¹ CaCO₃), *Escherichia coli* (NMP.100L⁻¹), ferro dissolvido (mg.L⁻¹), fósforo solúvel (mg.L⁻¹ PO₄³⁻), fósforo total (mg.L⁻¹), N-amoniaco (N-NH₃), nitrogênio total (mg.L⁻¹), N-nitrato (mg.L⁻¹ N-NO₃⁻), N-nitrito (mg.L⁻¹ N-NO₂⁻), manganês total (mg.L⁻¹), oxigênio dissolvido (mg.L⁻¹), pH, temperatura na coleta (°C) e turbidez (uT), foram realizadas nos Laboratórios de Águas e Efluentes da empresa Odebrecht Ambiental | Saneatins, em Palmas – TO. Todas as análises obedeceram APHA (2012) ou método validado.

PARÂMETROS DE CONTROLE E EFICIÊNCIA

Os parâmetros de controle de qualidade da água e frequência de monitoramento dos ensaios estão disponíveis na tabela 2. As siglas utilizadas nos ensaios foram: AB: água bruta; a-AB: água bruta afluente à IPDF; e-PreOx: água efluente da coluna de pré-oxidação; e-CAP: água efluente da coluna de carvão ativado em pó; coagulada: água em processo de coagulação; e-FAAG: água efluente do filtro ascendente em areia grossa; e-InterOx: água efluente da coluna de interoxidação; e-FRD: água efluente do filtro rápido descendente em areia; e-FCAG: água efluente do filtro de carvão ativado granular; e-FRD 24 h: efluente do FRD coletado após 12 horas do início do ensaio e oxidado com 5 mg de cloro e encerrada reação com desclorante após 24 horas; e-FCAG 24 h: efluente do FCAG coletado após 12 horas do início do ensaio e oxidado com 5 mg de cloro à 25 °C e encerrada a reação com desclorante após 24 horas.

TABELA 2. Parâmetros de controle de qualidade da água e frequência de monitoramento dos ensaios dos processos na IPDF

Ensaio\matriz	AB	a-AB	e-PreOx	e-CAP	Coagulada	e-FAAG	e-InterOx	e-FRD	e-FCAG	e-FRD 24 h	e-FCAG 24 h
I									turbidez (a cada trinta minutos); COT, cianobactérias e clorofila a (a cada seis horas) e cianotoxinas (única amostra após doze horas)	PSD	PSD
II	alcalinidade; alumínio dissolvido; COT; COD; cloreto; condutividade; cor verdadeira e aparente; dureza total; ferro dissolvido; fósforo total; fósforo solúvel; nitrogênio total; nitrogênio amoniacal; N-nitrato; N-nitrito; manganês total; pH; turbidez; <i>Escherichia coli</i> ; cianobactérias; DBO-5; oxigênio dissolvido; temperatura da água e cianotoxinas (30 minutos antes de iniciar o ensaio)	turbidez e pH (a cada trinta minutos); COT cianobactérias; clorofila a (a cada seis horas); cianotoxinas (única amostra após doze horas)		COT e cianobactérias; (a cada seis horas)					-		-
III			cloro residual (a cada 30 minutos); cianobactérias, clorofila a, COT (a cada seis horas); cianotoxinas (única amostra após doze horas)		pH (a cada 30 minutos)	turbidez (a cada trinta minutos); COT, cianobactérias e clorofila a (a cada seis horas)		turbidez (a cada trinta minutos); COT, cianobactérias e clorofila a (a cada seis horas); e cianotoxinas (única amostra após doze horas) e PSD	turbidez (a cada trinta minutos); COT, cianobactérias e clorofila a (a cada seis horas) e PSD	-	cianotoxinas (única amostra após doze horas) e PSD
IV				clorofila a, cianobactérias; (a cada seis horas); e cianotoxinas (única amostra após doze horas) e PSD					-	cianotoxinas (única amostra após doze horas) e PSD	-
V						cloro residual (a cada 30 minutos); cianobactérias, clorofila a, COT (a cada seis horas); cianotoxinas (única amostra após doze horas)			turbidez (a cada trinta minutos); COT, cianobactérias e clorofila a (a cada seis horas) cianotoxinas (única amostra após doze horas) e PSD	-	cianotoxinas (única amostra após doze horas)

RESUMO DOS RESULTADOS

Água de Estudo

Na figura 2 é apresentada a qualidade das águas de estudo. De maneira geral, é possível verificar composições dissimilares por meio das variações acima de 50 % nos resultados de alcalinidade total, alumínio dissolvido, cianobactérias, carbono orgânico total e dissolvido, cor aparente, *Escherichia coli*, fósforo solúvel, manganês total, nitrogênio amoniacal e total. A cianobactéria *Planktothrix isoethrix* predominou massivamente em todos os estudos em razão da mesma dominar a fitoflórula do efluente da ETE.

Variáveis (unidade)/Ensaio	I	II	III	IV	V	coeficiente de variação (% Cv)
Data da realização	24/11/2012	24/02/2013	22/03/2013	31/08/2013	15/04/2013	
alcalinidade (mg.L ⁻¹ CaCO ₃)	255	90	26	127	25	104
alumínio dissolvido (mg.L ⁻¹)	0,018	0,16	0,058	0,019	0,019	108
cianobactérias (cél.LmL ⁻¹)	183545	402556	367821	166590	194017	66
cloro (mg.L ⁻¹)	< 10	< 10	< 10	19,5	< 10	-
clorofila a (µg.L ⁻¹)	35,98	35,99	80,85	122,4	85,44	45
COD (mg.L ⁻¹)	4,8	4,1	-	-	11,9	65
condutividade (µS.cm ⁻¹)	83,4	43,1	78,7	159,6	75,9	44
cor aparente (uH)	32	209	197	114	131	61
cor verdadeira (uH)	24	11	26	20	17	27
COT (mg.L ⁻¹)	8,1	6,4	16,25	-	13,7	54
DBO-5 (mg.L ⁻¹)	2,68	4,6	3,68	4,1	3,9	17
dureza total (mg.L ⁻¹ CaCO ₃)	22,6	13	24	19	25	21
<i>Escherichia coli</i> (NMP.100 mL ⁻¹)	28,5	410,6	2419,6	1413,6	4884	108
ferro dissolvido (mg.L ⁻¹)	0,06	0,03	< 0,03	0,16	0,22	-
fósforo solúvel (mg.L ⁻¹ PO ₄ ³⁻)	0,35	0,1	0,59	1,98	0,2	115
fósforo total (mg.L ⁻¹)	1,12	2,36	1,63	2,89	1,62	41
manganês total (mg.L ⁻¹)	-	-	0,014	0,032	0,038	72
N-Amônia (N-NH ₃)	1,2	0,05	0,6	0,5	0,56	110
nitrogênio total (mg.L ⁻¹)	3,3	1,04	1,85	1,59	1,4	69
N-Nitrato (mg.L ⁻¹ N-NO ₃ ⁻)	< 0,8	< 0,8	< 0,8	0,9	0,4	-
N-Nitrito (mg.L ⁻¹ N-NO ₂ ⁻)	0,01	< 0,005	0,013	0,047	< 0,005	-
oxigênio dissolvido (mg.L ⁻¹)	6,7	6,9	8,4	11,8	5,8	32
pH	7,94	9,22	9,43	8,31	8,88	8
temperatura na coleta (°C)	27,4	26,9	27,6	27,7	27,2	2
turbidez (uT)	5,36	28,9	6,14	13,6	9,5	66

Figura 2. Caracterização da água de estudo

Ensaio de bancada

As condições ótimas de coagulação determinadas em bancada no ensaio I foram: 30 mg.L⁻¹ de PAC e pH inicial de 7,40 na água coagulada; ensaio II: 37 mg.L⁻¹ de PAC e pH inicial de 7,98 na água coagulada; no ensaio III: 45 mg.L⁻¹ de PAC e pH inicial de 8,78 na água coagulada; ensaio IV: 45 mg.L⁻¹ de PAC e pH inicial de 7,82 na água coagulada; ensaio V: 37 mg.L⁻¹ de PAC e pH inicial de 7,50 na água coagulada. Para os ensaios que utilizaram pré e intercloração, as dosagens de cloro foram

ajustadas na IPDF de modo que o residual de cloro na saída das colunas resultassem em no máximo 0,1 mg.L⁻¹.

Ensaio I

De acordo com a média dos resultados, 96,9 % do efluente do FRD apresentaram turbidez abaixo de 0,5 uT. Sobre a eficiência da piloto na remoção de matéria orgânica e biomassa algal, o sistema mostrou-se capaz de remover, em média, 67,4 % de COT na saída do FCAG e 92,8 % de clorofila *a* e 4,17 log de células de cianobactérias na saída do FRD.

AB ► COA ► FAAG ► FRD ► FCAG (data: 24/11/2012 início: 19:40 h)									
hora	a-AB					e-FAAG			
	CIANO	COT	Cl-a	pH	*TBZ	CIANO	COT	Cl-a	TBZ
0 h	183.545	8,10	35,98	7,94	5,36	-	-	-	-
6 h	284.482	11,50	27,85	7,70	-	197	8,60	2,10	0,39
12 h	60.434	11,10	28,97	7,55	-	1	6,40	2,27	0,34
18 h	264.656	3,60	19,43	7,55	-	106	2,40	2,51	0,31
24 h	78.122	4,50	27,66	7,56	-	172	8,50	0,44	0,25
mínimo	60.434	3,60	19,43	7,54	5,36	1	2,40	0,44	0,25
média	174.248	7,80	27,98	7,66	5,36	119	6,50	1,83	0,4
máximo	284.482	11,50	35,98	7,87	5,36	197	8,60	2,51	0,84
desvio padrão	103.205	3,64	5,88	0,09	-	88	2,9	0,94	0,13
(% Cv)	59	47	21	1	-	74	45	51	34
hora	e-FRD				e-FCAG				
	CIANO	COT	Cl-a	*TBZ	CIANO	COT	Cl-a	TBZ	
0 h	-	-	-	-	-	-	-	-	
6h	8	8,28	2,27	0,35	1	5,94	1,60	0,36	
12h	41	1,45	2,72	0,32	1	2,40	1,36	0,28	
18h	1	1,48	1,83	0,3	1	0,90	1,39	0,30	
24h	59	1,00	1,15	0,24	53	0,90	0,92	0,25	
mínimo	1	1,00	1,15	0,24	1	0,90	0,92	0,24	
média	27	3,05	1,99	0,36	14	2,54	1,32	0,35	
máximo	59	8,28	2,72	0,59	53	5,94	1,60	0,72	
desvio padrão	27	3,49	0,67	0,08	26	2,38	0,29	0,1	
(% Cv)	101	114	33	23	186	94	22	29	

Figura 3. Resultados do ensaio I

Ensaio II

No ensaio II, 100 % dos resultados de turbidez apresentaram-se abaixo de 0,5 uT na saída do FRD. Em relação à remoção de matéria orgânica e biomassa algal, o sistema conseguiu remover no efluente final, em média, 84,6 % de COT, 98,5 % de clorofila *a* e 3,76 log de células de cianobactérias.

AB ► COA ► CAP ► FAAG ► FRD (data: 24/02/2013 início: 20:30 h)								
hora	a-AB					e-CAP		
	CIANO	COT	Cl-a	pH	TBZ	CIANO	COT	
0 h	402.556	6,40	35,99	9,22	28,90	-	-	
6h	422.688	5,70	55,03	8,84	12,40	402.124	7,60	
12h	390.700	6,60	53,87	8,65	10,30	405.210	8,30	
18h	418.689	7,70	44,94	9,70	10,50	435.240	7,40	
24h	446.526	7,09	37,91	9,61	8,65	496.791	8,00	
mínimo	390.700	5,70	35,99	8,65	8,65	402.124	7,40	
média	416.232	6,70	45,55	9,20	14,15	434.841	7,83	
máximo	446.526	7,70	55,03	9,70	28,90	496.791	8,30	
desvio padrão	21.239	0,75	8,79	0,46	8,35	43.918	0,40	
(% Cv)	5	11	19	5	59	10	5	
hora	e-FAAG				e-FRD			
	CIANO	COT	Cl-a	TBZ	CIANO	COT	Cl-a	TBZ
0 h	-	-	-	-	-	-	-	-
6h	176	0,90	0,92	0,20	62	1,40	0,24	0,20
12h	85	1,09	0,24	0,16	77	0,90	0,92	0,20
18h	135	1,41	2,51	0,36	59	1,02	0,68	0,31
24h	190	0,65	0,95	0,21	101	0,79	0,88	0,20
mínimo	85	0,65	0,24	0,16	59	0,79	0,24	0,20
média	147	1,01	1,15	0,23	75	1,03	0,68	0,23
máximo	190	1,41	2,51	0,36	101	1,40	0,92	0,31
desvio padrão	47	0,32	0,96	0,09	19	0,27	0,31	0,06
(% Cv)	32	32	84	38	26	26	46	24

Figura 4. Resultados do ensaio II

Ensaio III

De acordo com os resultados do ensaio III, 97,4 % da turbidez apresentaram-se abaixo de 0,5 uT na saída do FRD. Em relação à remoção de matéria orgânica e biomassa algal, o sistema conseguiu remover, em média, 94,7 % de COT na saída do FCAG e 99,1 % de clorofila *a* na saída do FRD. A remoção de células de cianobactérias foi de 3,82 log no efluente final.

AB ► COA ► PRÉ ► FAAG ► FRD ► FCAG (data: 22/03/2013 início: 18:00 h)								
hora	a-AB					e-PreOx		
	CIANO	COT	Cl-a	pH	TBZ	CIANO	COT	
0 h	367.821	16,30	80,85	9,43	6,14	-	-	
6h	301.485	15,10	77,93	8,40	7,43	263.458	16,30	
12h	392.449	16,10	93,84	8,03	7,00	201.443	15,20	
18h	207.155	17,40	124,37	9,05	7,01	284.173	13,40	
24h	363.283	16,30	135,12	9,74	7,31	227.683	16,50	
mínimo	207.155	15,10	77,93	7,35	6,14	201.443	13,40	
média	326.439	16,20	102,42	8,81	7,16	244.189	15,40	
máximo	392.449	17,40	135,12	9,76	7,83	284.173	16,50	
desvio padrão	74.630	0,83	25,93	0,76	0,43	36.832	1,41	
(% Cv)	23	5	25	9	6	15	9	
hora	e-FAAG				e-FRD			
	CIANO	COT	Cl-a	TBZ	CIANO	COT	Cl-a	TBZ
0 h	-	-	-	-	-	-	-	-
6h	17	3,09	0,59	0,11	20	2,00	0,30	0,14
12h	199	5,30	0,85	0,09	77	1,80	0,26	0,08
18h	105	5,60	3,36	0,17	96	2,54	0,82	0,12
24h	149	5,86	2,55	0,35	31	2,50	2,48	0,27
mínimo	17	3,09	0,59	0,09	20	1,80	0,26	0,07
média	118	4,96	1,84	0,21	56	2,21	0,96	0,18
máximo	199	5,86	3,36	0,55	96	2,54	2,48	0,64
desvio padrão	77	1,27	1,33	0,14	36	0,37	1,04	0,12
(% Cv)	66	26	73	65	65	17	108	66
hora	e-FCAG							
	CIANO	COT	Cl-a	TBZ				
0 h	-	-	-	-				
6h	9	0,40	0,10	0,09				
12h	40	1,10	1,00	0,09				
18h	85	0,80	2,55	0,09				
24h	37	1,10	1,95	0,27				
mínimo	9	0,40	0,10	0,07				
média	43	0,85	1,40	0,14				
máximo	85	1,10	2,55	0,4				
desvio padrão	31	0,33	1,08	0,08				
(% Cv)	74	39	77	58				

Figura 5. Resultados do ensaio III

Ensaio IV

No ensaio IV, 100 % dos resultados de turbidez apresentaram-se abaixo de 0,5 uT na saída do FRD. Em relação à remoção de matéria orgânica e biomassa algal, o sistema conseguiu remover, em média, 86,4 % de COT e 97,3 % de clorofila *a* na saída do FRD, enquanto que a remoção final de células de cianobactérias foi de 4,36 log.

AB ► COA ► PRÉ ► CAP ► FAAG ► FRD (data: 31/08/2013 início: 19:00 h)							
hora	a-AB					e-PreOx	
	CIANO	COT	Cl-a	pH	TBZ	CIANO	COT
0 h	166.590	-	122,4	8,31	13,6	-	-
6h	140.402	15,1	159,4	7,96	10,6	135.432	16,3
12h	202.122	16,1	291,03	8	8,76	196.380	15,2
18h	212.126	17,4	303,28	8,43	9,49	195.145	13,4
24h	172.529	16,3	282,44	8,36	10,7	166.428	16,5
mínimo	140.402	15,1	122,4	7,58	5,58	135.432	13,4
média	178.754	16,2	231,71	8,07	8,07	173.346	15,4
máximo	212.126	17,4	303,28	8,5	11,6	196.380	16,5
desvio padrão	28.798	0,96	84,25	0,24	1,53	28.816	1,41
(% Cv)	23	5	25	3	19	17	9
hora	e-CAP		e-FAAG				
	CIANO	Cl-a	CIANO	COT	Cl-a	TBZ	
0 h	-	-	-	-	-	-	
6h	129.712	152,17	21	3,09	3,78	0,32	
12h	188.525	241,98	80	5,3	6,09	0,37	
18h	189.062	284,27	102	5,6	13,65	0,18	
24h	164.718	290,25	88	5,86	3,66	0,15	
mínimo	129.712	152,17	21	3,09	3,66	0,15	
média	168.004	242,17	73	4,96	6,79	1,11	
máximo	189.062	290,25	102	5,86	13,65	5,4	
desvio padrão	27.938	63,73	36	1,27	4,7	1,64	
(% Cv)	17	26	49	26	69	148	
hora	e-FRD						
	CIANO	COT	Cl-a	TBZ			
0 h	-	-	-	-			
6h	0	2	1,99	0,2			
12h	8	1,8	8,53	0,24			
18h	44	2,54	13,08	0,16			
24h	11	2,5	1,12	0,12			
mínimo	0	1,8	1,12	0,11			
média	16	2,21	6,18	0,2			
máximo	44	2,54	13,08	0,42			
desvio padrão	19	0,37	5,67	0,08			
(% Cv)	123	17	92	39			

Figura 6. Resultados do ensaio IV

Ensaio V

De acordo com os resultados do ensaio V, 100 % da turbidez apresentaram-se abaixo de 0,5 uT no efluente final. O sistema também conseguiu remover, em média, 46,4 % de COT na saída do FCAG e 98,4 % de clorofila *a* na saída do FRD. O percentual de remoção de matéria orgânica em todas as unidades filtrantes foi bastante baixo. A razão para isto, muito provavelmente, poderia estar na alta percentagem de carbono orgânico dissolvido (COD) na água bruta afluente (86,9 %). Outra hipótese seria a competição entre o cloro e o COD pelos sítios adsorptivos do CAG, assim como a possibilidade da composição da água bruta afluente a coluna de carvão não ter

afinidade com as características do CAG. A remoção de células de cianobactérias foi de 3,76 log no efluente final.

AB ► COA ► FAAG ► INTER ► FRD ► FCAG (data: 15/04/2013 início: 20:30 h)									
hora	a-AB					e-FAAG			
	CIANO	COT	Cl-a	pH	TBZ	CIANO	COT	Cl-a	TBZ
0 h	194.017	13,70	85,44	8,88	9,50	-	-	-	-
6h	222.387	12,40	84,27	7,69	7,11	146	8,50	0,44	0,16
12h	256.659	12,40	58,8	7,78	7,20	20	7,10	7,79	0,33
18h	238.380	13,30	79,68	7,96	6,27	73	7,90	0,92	0,26
24h	249.813	13,60	93,72	7,93	5,83	182	8,10	3,81	0,15
mínimo	194.017	12,40	58,8	7,42	5,83	20	7,10	0,44	0,13
média	232.251	13,10	80,38	7,89	7,00	105	7,90	3,24	0,22
máximo	256.659	13,70	93,72	8,88	9,50	182	8,50	7,79	0,47
desvio padrão	25.004	0,64	13,09	0,2	0,92	73	0,59	3,38	0,07
(% Cv)	11	5	16	2	13	69	7	104	31
hora	e-InterOx				e-FRD				
	CIANO	COT	Cl-a		CIANO	COT	Cl-a	TBZ	
0 h	-	-	-	-	-	-	-	-	
6h	181	8,40	0,44	43	8,88	0,24	0,15		
12h	14	7,80	5,61	14	7,83	1,47	0,23		
18h	44	7,90	1,80	61	10,1	2,04	0,16		
24h	44	8,30	1,80	83	8,10	1,36	0,14		
mínimo	14	7,80	0,44	14	7,83	0,24	0,12		
média	71	8,10	2,41	50	8,73	1,28	0,17		
máximo	181	8,40	5,61	83	10,1	2,04	0,25		
desvio padrão	75	0,29	2,22	29	1,02	0,75	0,03		
(% Cv)	106	4	92	58	12	59	20		
hora	e-FCAG								
	CIANO	COT	Cl-a	TBZ					
0 h	-	-	-	-					
6h	41	7,27	0,47	0,17					
12h	13	7,03	0,74	0,18					
18h	8	7,10	0,74	0,16					
24h	29	6,63	0,68	0,14					
mínimo	8	6,63	0,47	0,11					
média	23	7,01	0,66	0,15					
máximo	41	7,27	0,74	0,27					
desvio padrão	15	0,27	0,13	0,04					
(% Cv)	66	4	19	24					

Figura 7. Resultados do ensaio V

Remoção de cianotoxinas

Sobre a presença de cianotoxinas, foi possível verificar baixa concentração na AE durante os ensaios na piloto, sendo 0,378 µg/L de microcistinas, no ensaio II, a concentração máxima registrada em todo o estudo. Na água efluente dos ensaios, a maioria dos resultados apresentou-se abaixo do limite de quantificação do método. No ensaio I, o FCAG removeu apenas 39,4 %. Segundo Lambert et al., (1996) o uso CAG é muito eficiente para a remoção de em média 80 % de microcistina LR (leucina-arginina), desde que a água não possua excesso de matéria orgânica dissolvida. Neste ensaio, a presença de COD foi de 49,3 %, e isso provavelmente tenha comprometido a eficiência do CAG, em razão da competição pelos sítios adsorptivos do carvão.

Formação de produtos secundários da desinfecção

Não houve formação significativa de PSD nas águas testadas. As máximas concentrações

de ácidos haloacéticos totais e trihalometanos totais foram 0,069 e 0,047 µg/L, evidenciadas, respectivamente, no efluente final do ensaio IV, e 0,036 e 0,012 µg/L, respectivamente, no efluente final do ensaio V. A pré-oxidação com cloro no ensaio IV e interoxidação no ensaio V, colaboraram para esta formação. Segundo Singer (1994), A formação de PSD em águas oxidadas com cloro está condicionada ao pH, ao tempo de contato, à temperatura, à natureza e concentração da matéria orgânica natural, à dosagem de cloro aplicada e o seu residual.

Conclusões

Sobre a eficiência da dupla filtração na remoção de turbidez, biomassa algal e matéria orgânica, foi possível verificar que a variação da qualidade das águas de estudo influenciou efetivamente no rendimento dos processos testados. A grande vantagem desta variação foi reconhecer que a dupla filtração conseguiu garantir excelentes resultados, principalmente na remoção de cianobactérias e turbidez. Presente em todos os ensaios, *Planktothrix isoethrix* apresentou-se como uma espécie de fácil remoção diante desta tecnologia. Sobre a presença de cianotoxinas e produtos secundários da desinfecção, não houve produção e formação significativa nas águas testadas. A eficiência do carvão ativado precisa ser melhor avaliada em novos estudos.

Referências bibliográficas

- APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22th ed. 2012.
- DI BERNARDO, L.; MINILLO A.; DANTAS, A.D.B. *Florações de Algas e de Cianobactérias: Suas Influências na Qualidade da Água e nas Tecnologias de Tratamento*. Ed. LDiBe, v. 1. 513 p. 2010.
- LAMBERT, T. W.; HOLMES, C. F. B. e HRUDEY, S. E., 1996. Adsorption of microcystin-LR by activated carbon and removal in full scale water treatment. *Water Res.*, 30 (6): 1411-1422
- PÁDUA, V.L. (Org.): *Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e microcontaminantes por médio de técnicas de tratamento de água para consumo humano*. PROSAB 4, 2006.
- SINGER, P.C. Control of disinfection by-products in drinking water. *Journal of Environmental Engineering*, v.120, n.4, p.727-744, 1994.