

O tratamento de água para consumo humano face à qualidade da água de origem

Autoria:

Maria João Rosa

Paula Vieira

José Menaia



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL



INSTITUTO REGULADOR DE ÁGUAS E RESÍDUOS

O tratamento de água para consumo humano face à qualidade da água de origem

Autoria:

Maria João Rosa

Paula Vieira

José Menaia



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL



INSTITUTO REGULADOR DE ÁGUAS E RESÍDUOS

FICHA TÉCNICA

TÍTULO:

O tratamento de água para consumo humano face à qualidade da água de origem

AUTORIA:

Maria João Rosa

Paula Vieira

José Menaia

COLABORAÇÃO:

Instituto Regulador de Águas e Resíduos (IRAR): financiou a edição e participou na estruturação do manual e na revisão do seu conteúdo.

COMISSÃO DE APRECIÇÃO DO IRAR:

Jaime Melo Baptista, João Almeida, Edgar Carvalho, Luís Simas, Sílvia Guerreiro, Maria João Moinante, Maria José Franco.

EDIÇÃO:

Instituto Regulador de Águas e Resíduos

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

IMPRESSÃO:

Europress, Lda.

DATA:

Setembro de 2009

ISBN:

978-989-95392-7-3

DEPÓSITO LEGAL:

267953/07

PREFÁCIO DO IRAR

O sector de abastecimento público de água para consumo humano em Portugal tem revelado uma evolução assinalável, sustentada no facto de que em 1993 apenas cerca de 50% da água era controlada e tinha boa qualidade e em 2008 este indicador é de quase 97%.

Apesar de os números falarem por si, é de salientar que esta evolução tem sido conseguida num quadro crescente de rigor, quer no que diz respeito ao cumprimento dos normativos legais nacional e comunitário, quer no que se refere à fiabilidade analítica dos resultados, não sendo despiciente referir também que estes resultados são obtidos por um sector caracterizado por um elevado número de entidades gestoras (superior a 400), que apresentam estádios de desenvolvimento tecnológico muito distintos.

Assim, apesar de globalmente o País já apresentar água de boa qualidade, ainda existem lacunas, nomeadamente ao nível da operação técnica que importa suprir.

Neste sentido, o IRAR tem procurado dotar o sector com as ferramentas necessárias para as entidades gestoras servirem a população com um elevado nível de serviço e a custos sustentáveis, quer para a entidade gestora, quer para os cidadãos.

Nesta filosofia, insere-se a série de Guias Técnicos do IRAR, da qual este documento faz parte.

Com este guia pretende-se que, de uma forma tão simples quanto possível, mas sem descurar o rigor técnico e científico, disponibilizar aos técnicos das entidades gestoras dos sistemas públicos de abastecimento de água, que diariamente operam as estações de tratamento, um documento de fácil consulta que reúna a forma de tratar/eliminar os contaminantes da água.

Consideramos ainda que o facto deste guia ter sido elaborado no contexto da realidade portuguesa, confere-lhe um valor acrescentado face à quantidade imensa de bibliografia internacional existente sobre tratamento de águas.

Estamos convictos que o esforço desenvolvido pelos autores, com a colaboração de alguns elementos do IRAR, terá o devido reconhecimento se constatarmos que o presente guia constitui um documento de trabalho diário de todos aqueles que têm a nobre missão de produzir uma água com qualidade para consumo humano, na salvaguarda da sustentabilidade ambiental e da protecção da saúde humana.

Jaime Melo Baptista (Presidente do Conselho Directivo do IRAR)

Dulce Álvaro Pássaro (Vogal do Conselho Directivo do IRAR)

João Simão Pires (Vogal do Conselho Directivo do IRAR)

PREFÁCIO DO LNEC

Há cerca de uma década que, no âmbito dos seus Programas Quadrienais de Investigação Programada (PIP), o LNEC tem vindo a desenvolver actividade estratégica de I&D sobre os processos que controlam a qualidade e a segurança da água, da captação à torneira do consumidor, contribuindo para o avanço científico e tecnológico da indústria da água em Portugal.

Esta actividade de I&D, desenvolvida essencialmente no seio do Laboratório de Engenharia Sanitária (LABES) do Núcleo de Engenharia Sanitária do Departamento de Hidráulica e Ambiente, à escala laboratorial e piloto, e concretizada, na sua maior parte, conjuntamente com entidades gestoras no quadro de projectos nacionais e internacionais, tem permitido actualizar conhecimento científico e desenvolver e consolidar competências específicas.

O presente guia, que se pretendeu de índole eminentemente prática e de utilização alargada, constitui um repositório das capacidades típicas das ETA portuguesas, bem como das tecnologias convencionais e emergentes que permitem solucionar as principais limitações no respeitante à eliminação de contaminantes biológicos e químicos, legislados e emergentes.

Por opção deliberada, este documento não aborda de forma exaustiva e aprofundada a fundamentação científica da eliminação destes contaminantes e da formação de subprodutos indesejáveis do tratamento, uma vez que tal se viria a traduzir numa obra extensa e de consulta complexa.

Num ambiente de excelente colaboração e sinergia com a equipe do IRAR foi possível convergir para um documento que se afigura poder constituir uma ferramenta de trabalho, destinada essencialmente a propiciar orientação prática no dia a dia da operação e da avaliação da segurança oferecida por uma ETA, e na adequação da resposta a novas situações.

Carlos Matias Ramos (Presidente do LNEC)

Rafaela de Saldanha Matos (Directora do Departamento de Hidráulica e Ambiente do LNEC)

ÍNDICE GERAL

	pág.
1 NOTA INTRODUTÓRIA.....	1
2 CARACTERIZAÇÃO DAS ETA PORTUGUESAS.....	3
3 CLASSIFICAÇÃO DOS CONTAMINANTES EM FUNÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS QUE CONTROLAM A SUA REMOÇÃO/ELIMINAÇÃO NAS ETA.....	9
4 CAPACIDADE E LIMITAÇÕES DAS ETA NACIONAIS PARA CONTROLO DAS VÁRIAS CLASSES DE CONTAMINANTES....	31
5 TRATAMENTO COMPLEMENTAR OU ALTERNATIVO.....	45
6 CONTINGÊNCIAS.....	53
7 NOTAS FINAIS	59
BIBLIOGRAFIA.....	61

ÍNDICES DETALHADOS

ÍNDICE DE TEXTO	pág.
1 NOTA INTRODUTÓRIA.....	1
2 CARACTERIZAÇÃO DAS ETA PORTUGUESAS.....	3
3 CLASSIFICAÇÃO DOS CONTAMINANTES EM FUNÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS QUE CONTROLAM A SUA REMOÇÃO/ELIMINAÇÃO NAS ETA.....	9
3.1 Introdução.....	9
3.2 Contaminantes biológicos.....	10
3.3 Contaminantes orgânicos.....	15
3.4 Contaminantes inorgânicos.....	25
4 CAPACIDADE E LIMITAÇÕES DAS ETA NACIONAIS PARA CONTROLO DAS VÁRIAS CLASSES DE CONTAMINANTES....	31
4.1 Eficiência nominal de tratamento <i>versus</i> eficiência real.....	31
4.2 Controlo de contaminantes biológicos.....	33
4.3 Remoção de contaminantes orgânicos: NOM e microcontaminantes.....	34
4.4 Remoção de contaminantes inorgânicos.....	39
5. TRATAMENTO COMPLEMENTAR OU ALTERNATIVO.....	45
5.1 Controlo de contaminantes biológicos.....	46
5.2 Controlo de NOM e microcontaminantes orgânicos.....	47
5.3 Controlo de contaminantes inorgânicos.....	50
6 CONTINGÊNCIAS.....	53
7 NOTAS FINAIS.....	59
BIBLIOGRAFIA.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS	pág.
Figura 1 – Esquema-tipo de tratamento de água de origem superficial em Portugal (a cinzento mais escuro representam-se as UOP mais frequentes).....	3
Figura 2 – Esquema-tipo de tratamento de água de origem subterrânea em Portugal (a cinzento mais escuro representam-se as UOP mais frequentes).....	3

ÍNDICE DE QUADROS	pág.
Quadro 1 – Tipos de reagentes e de órgãos usados nas ETA portuguesas	5
Quadro 2 – Classes de ETA para águas superficiais.....	7
Quadro 3 – Classes de ETA para águas subterrâneas.....	7
Quadro 4 – Contaminantes biológicos.....	11
Quadro 5 – Matéria orgânica natural da água	17
Quadro 6 – Microcontaminantes orgânicos solúveis em água.....	19
Quadro 7 – Contaminantes inorgânicos	26
Quadro 8 – Capacidade nominal das ETA nacionais para remoção/inactivação de contaminantes biológicos	33
Quadro 9 – Capacidade nominal das ETA nacionais para remoção de matéria orgânica natural.....	35
Quadro 10 – Eficiências mínimas de remoção de COT em ETA convencionais que tratam água de origem superficial (USEPA, 1999a)	35
Quadro 11 – Capacidade nominal das ETA nacionais para remoção de microcontaminantes orgânicos solúveis em água.....	37
Quadro 12 – Capacidade nominal das ETA nacionais para remoção de contaminantes inorgânicos.....	41
Quadro 13 – Capacidade nominal de tratamentos complementares ou alternativos para controlo de contaminantes biológicos	46
Quadro 14 – Capacidade nominal de tratamentos complementares ou alternativos para controlo de contaminantes orgânicos (NOM e microcontaminantes orgânicos solúveis em água)	48
Quadro 15 – Tratamento complementar ou alternativo para controlo de contaminantes inorgânicos	50
Quadro 16 – Doses mínimas de oxidante necessárias para controlo de ferro e manganês (AWWA, 1999)	54
Quadro 17 – Níveis de alerta propostos pela OMS (Chorus e Bartram, 1999).....	56

ABREVIATURAS

Utilizaram-se as abreviaturas em Português adoptadas pela legislação nacional ou utilizadas sistematicamente em outros documentos oficiais, e sempre que se considerou tratar-se de abreviaturas de uso generalizado (*e.g.*, OMS para Organização Mundial de Saúde). Nos restantes casos (*e.g.*, abreviaturas de tecnologias de tratamento e de contaminantes), adoptaram-se as abreviaturas anglo-saxónicas, de utilização generalizada na literatura de referência e no léxico técnico-científico nacional.

AOC	<i>Assimilable organic carbon</i> (carbono orgânico assimilável, medida do potencial de uma água para sustentar o crescimento microbiano) ($\mu\text{gC/L}$ em equivalentes de acetato)
BAC	<i>Biologically active carbon</i> (carvão activado granulado com actividade biológica)
BTEX	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e m-Xileno
C/F	<i>Coagulation/flocculation</i> (coagulação/floculação)
COD	Carbono orgânico dissolvido (mgC/L)
COT	Carbono orgânico total (mgC/L)
CT	Dose de oxidante (concentração x tempo de contacto) ($\text{mg/L}\cdot\text{min}$)
DAF	<i>Dissolved air flotation</i> (flutuação, vulgo flotação, por ar dissolvido)
ED	<i>Electrodialysis</i> (electrodialise)
ETA	Estação de tratamento de água para consumo humano
GAC	<i>Granular activated carbon</i> (carvão activado granulado)
HAA	<i>Haloacetic acids</i> (ácidos haloacéticos)
HAN	<i>Haloacetonitriles</i> (haloacetónitros)
HB	Hidrófobo
HL	Hidrófilo
INSAAR	Inventário Nacional de Sistemas de Abastecimento de Água e de Águas Residuais
IX	<i>Ion exchange</i> (permuta iónica)
MC-LR	Microcistina-LR
MF	<i>Microfiltration</i> (microfiltração)
MIB	<i>2-methylisoborneol</i> (2-metilisoborneol)
neg	Negativo
neu	Neutro

NF	<i>Nanofiltration</i> (nanofiltração)
NOM	<i>Natural organic matter</i> (matéria orgânica natural)
OBP	<i>Oxidation by-products</i> (subprodutos da oxidação)
OMS	<i>Organização Mundial de Saúde</i>
PAC	<i>Powdered activated carbon</i> (carvão activado em pó)
PM	<i>Peso molecular</i>
pos	<i>Positiva</i>
RO	<i>Reverse osmosis</i> (osmose inversa)
SF	<i>Slow filtration</i> (filtração lenta)
SUVA	<i>Specific UV_{254nm} absorbance</i> (absorvência específica a 254 nm, indicador da natureza da NOM, calculado através da razão UV_{254nm}/COD) (L/(mgC.m))
THM	<i>Trihalometanos</i>
UF	<i>Ultrafiltration</i> (ultrafiltração)
UOP	<i>Unit operation/process</i> (operação/processo unitário de tratamento de água)
USEPA	<i>US Environmental Protection Agency</i> (Agência Americana de Protecção do Ambiente)
UV	<i>UV radiation</i> (radiação ultravioleta)
UV_{254nm}	<i>UV_{254nm} absorbance</i> (absorvência no ultravioleta a 254 nm, indicador do teor em matéria húmica)
VOC	<i>Volatile organic compounds</i> (compostos orgânicos voláteis)

1 NOTA INTRODUTÓRIA

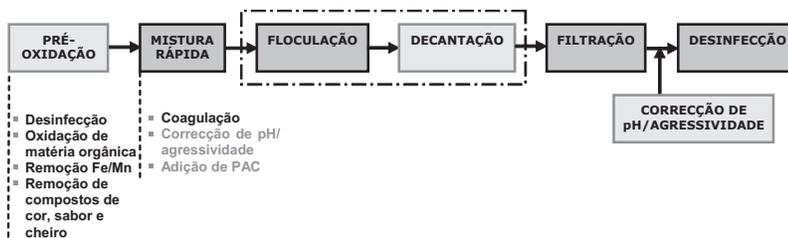
O presente Guia tem como objectivo sistematizar as capacidades e limitações das estações de tratamento de água (ETA) existentes em Portugal no controlo de contaminantes que possam ocorrer nas origens de água destinadas à produção de água para consumo humano.

Em primeiro lugar, são identificados os esquemas de tratamento existentes nas ETA portuguesas em função do tipo de origem (subterrânea ou superficial) (capítulo 2) e os contaminantes são classificados em função das características físico-químicas que controlam a sua remoção/eliminação nas diferentes operações e processos unitários (UOP) que constituem as ETA (capítulo 3). A seguir (capítulo 4), analisam-se as capacidades e limitações dos vários esquemas-tipo de ETA para controlo das várias classes de contaminantes e apresentam-se as possibilidades de optimização das condições de operação das UOP. O capítulo 5 é dedicado a processos complementares necessários ao controlo de contaminantes em ETA convencionais. Finalmente, no capítulo 6 ressaltam-se contingências a esta abordagem, designadamente as associadas a alterações muito rápidas de qualidade da água e respectiva monitorização.

2 CARACTERIZAÇÃO DAS ETA PORTUGUESAS

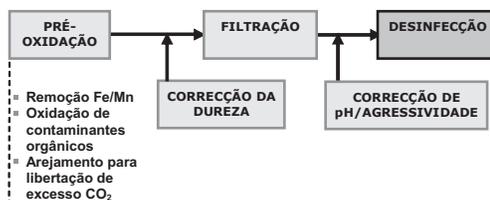
A caracterização da situação nacional das ETA feita por Vieira *et al.* (2007) (baseada no Inventário Nacional de Sistemas de Abastecimento de Água e de Águas Residuais (INSAAR) e em informação cedida pelo Instituto Regulador de Águas e Resíduos e pela Águas de Portugal, S.G.P.S., S.A.) permitiu identificar as sequências de tratamento existentes em função da origem da água, superficial ou subterrânea.

Os múltiplos esquemas de tratamento identificados podem ser interpretados como variantes das sequências ditas convencionais. Assim, foram identificados os esquemas-tipo do tratamento das fases líquidas das ETA que processam água de origem superficial e água de origem subterrânea (Figura 1 e Figura 2, respectivamente).



Fonte: Extraída de Vieira *et al.* (2007).

Figura 1 – Esquema-tipo de tratamento de água de origem superficial em Portugal (a cinzento mais escuro representam-se as UOP mais frequentes).



Fonte: Extraída de Vieira *et al.* (2007).

Figura 2 – Esquema-tipo de tratamento de água de origem subterrânea em Portugal (a cinzento mais escuro representam-se as UOP mais frequentes).

Cada esquema-tipo apresenta algumas variantes, uma vez que as ETA podem não ter instaladas todas as UOP indicadas.

No caso das águas superficiais, a pré-oxidação pode destinar-se à desinfecção primária da água, à oxidação de matéria orgânica, à remoção de ferro e manganês ou de compostos de cor, sabor e cheiro e pode, também, não existir. Na mistura rápida, além da coagulação, pode, eventualmente, ser feita uma correcção de pH e/ou agressividade, normalmente aqui contemplada para aumentar a eficiência de remoção de turvação. A mistura rápida pode também ser usada para adição de carvão activado em pó (PAC) para adsorção de NOM e microcontaminantes orgânicos. A própria pré-oxidação pode ter lugar na mistura rápida, se não forem necessários reactores fechados. A decantação pode não existir nalguns casos de captação de água com baixo teor em sólidos suspensos e matéria coloidal (*e.g.*, água captada em rios), ou seja, quando existe filtração directa. A floculação e a decantação podem não existir como duas UOP individuais e sequenciais, uma vez que podem ocorrer no mesmo órgão (*e.g.*, decantadores de manto de lamas). A existência de uma correcção de pH e/ou agressividade antes da desinfecção final é também uma variante opcional em função da qualidade da água.

No que respeita às ETA que tratam águas subterrâneas, apenas em algumas existe a necessidade de uma oxidação inicial para remoção de ferro e manganês ou de contaminantes orgânicos (*e.g.*, pesticidas). Esta pré-oxidação pode também ter como um objectivo o arejamento para libertação do CO_2 em excesso. Também a filtração, a correcção da dureza e a correcção de pH/agressividade (através da percolação em leitos de brita calcária ou pela adição de cal ou cal/CO_2) são variantes que podem estar ausentes neste tipo de ETA. Quando existe, a correcção da dureza (amaciamento) da água é habitualmente feita pelo processo convencional de precipitação química, floculação e decantação.

O Quadro 1 sistematiza a informação relativa aos tipos de reagentes e de órgãos utilizados nas UOP que constituem as sequências de tratamento atrás referidas, relevante para controlo dos contaminantes eventualmente presentes nas origens de água.

Em termos de tratamento da fase sólida, a informação disponível é mais escassa, ainda assim, identificaram-se as UOP expectáveis, predominando o espessamento e a desidratação das lamas. O tratamento de lamas e a gestão de sobrenadantes e escorrências a este associada é relevante para o controlo de contaminantes, uma vez que estes podem ser concentrados nas lamas, mas, principalmente, porque podem ser recirculados para a linha de

tratamento de água (fase líquida) através dos sobrenadantes e escurrências.

Quadro 1 – Tipos de reagentes e de órgãos usados nas ETA portuguesas.

Tipo de tratamento	Reagente/órgão	Tipo de origem		
		Subterrânea	Superficial	Mistura
Pré-oxidação	cloro gasoso	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	dióxido de cloro		<input checked="" type="checkbox"/>	
	hipoclorito de sódio	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	ozono		<input checked="" type="checkbox"/>	
	permanganato de potássio		<input checked="" type="checkbox"/>	
Coagulação/floculação	carvão activado (i)		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	sais de ferro	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	hidróxido de cálcio	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	polielectrólito	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	sais de alumínio	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Correcção da dureza	ácido sulfúrico			
	carbonato de sódio		<input checked="" type="checkbox"/>	
	dióxido de carbono			
	hidróxido de cálcio	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	hidróxido de sódio			
Correcção da agressividade	ácido sulfúrico			
	carbonato de sódio	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	dióxido de carbono		<input checked="" type="checkbox"/>	
	hidróxido de cálcio	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	hidróxido de sódio		<input checked="" type="checkbox"/>	
Correcção do pH	ácido sulfúrico		<input checked="" type="checkbox"/>	
	carbonato de sódio	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	dióxido de carbono	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	hidróxido de cálcio	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	hidróxido de sódio	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Remoção de ferro e manganês	arejamento	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	oxidação química	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Decantação	decantador convencional	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	decantador de manto de lamas		<input checked="" type="checkbox"/>	
	decantador lamelar		<input checked="" type="checkbox"/>	

(i) Em ETA convencionais o carvão activado em pó (PAC) pode ser adicionado na mistura rápida para adsorção de contaminantes.

Tipo de tratamento	Reagente/órgão	Tipo de origem		
		Subterrânea	Superficial	Mistura
Filtração	filtro rápido de areia	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	filtro lento de areia	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	filtro rápido de dupla camada (areia+antracite)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	filtro lento de dupla camada (areia+antracite)	<input checked="" type="checkbox"/>		
	filtro rápido de dupla camada (areia+carvão activado)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	filtro rápido de carvão activado		<input checked="" type="checkbox"/>	
Desinfecção	cloro gasoso	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	dióxido de cloro	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	hipoclorito de sódio	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	ozono		<input checked="" type="checkbox"/>	
	radiação UV	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

Fonte: Adaptado de Vieira *et al.* (2007).

Para a análise das capacidades e limitações das ETA no controlo de contaminantes eventualmente presentes na água bruta, definem-se, no âmbito do presente documento, nove classes de ETA, sendo seis destas associadas a origens de água superficial (Quadro 2) e três associadas a origens de águas subterrâneas (Quadro 3).

A classe *I_{sup}* corresponde à sequência convencional de tratamento e é composta por pré-oxidação, coagulação, floculação, decantação, filtração, ajuste de pH/agressividade e desinfecção final, por esta ordem.

A subclasse *I.1_{sup}* é um caso particular da *I_{sup}*, referindo-se aos casos em que na pré-oxidação é utilizado ozono. A subclasse *I.2_{sup}* refere-se aos restantes casos em que na pré-oxidação são utilizados todos os outros oxidantes atrás identificados (hipoclorito de sódio, cloro gasoso e dióxido de cloro).

Quadro 2 – Classes de ETA para águas superficiais.

Classe	Sequência de tratamento
I.1_sup	Pré-oxidação (ozono) → Coagulação → Floculação → Decantação → Filtração → Ajuste pH (i) → Desinfecção
I.2_sup	Pré-oxidação (outros oxidantes) → Coagulação → Floculação → Decantação → Filtração → Ajuste pH (i) → Desinfecção
II_sup	Coagulação → Floculação → Decantação → Filtração → Desinfecção
III.1_sup	Pré-oxidação (ozono) → Coagulação → Floculação → Filtração → Desinfecção
III.2_sup	Pré-oxidação (outros oxidantes) → Coagulação → Floculação → Filtração → Desinfecção
IV_sup	Coagulação → Floculação → Filtração → Desinfecção

(i) Ajuste de pH ou de agressividade.

Quadro 3 – Classes de ETA para águas subterrâneas.

Classe	Sequência de tratamento
I_sub	Pré-oxidação → Amaciamento → Filtração → Ajuste pH* → Desinfecção
II_sub	Pré-oxidação → Filtração → Ajuste pH* → Desinfecção
III_sub	Desinfecção (ii)

(i) Ajuste de pH ou de agressividade.

(ii) Poderá ser precedida por um ajuste de pH ou de agressividade.

A classe *II_sup* corresponde à sequência de tratamento convencional sem pré-oxidação, *i.e.*, composta por coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção final, por esta ordem.

A classe *III_sup* corresponde à sequência de pré-oxidação e filtração directa, *i.e.*, inclui pré-oxidação, coagulação, floculação, filtração e desinfecção final, nesta ordem. Também neste caso, há que distinguir as ETA que usam ozono das que utilizam os outros oxidantes – definem-se, portanto as subclasses *III.1_sup* (com ozono) e *III.2_sup* (com outros oxidantes).

A classe *IV_sup* consiste na sequência de tratamento convencional com filtração directa e sem pré-oxidação, *i.e.*, inclui coagulação, floculação, filtração e desinfecção final, por esta ordem.

A classe *I_sub* corresponde à sequência completa para águas de origem subterrânea (Figura 2) – pré-oxidação; remoção de dureza (amaciamento) por precipitação química, floculação, decantação; filtração; ajuste de pH e desinfecção.

A classe *II_sub* é uma simplificação da anterior sem a remoção de dureza.

A classe *III_sub* consiste na desinfecção, que pode ser precedida por um ajuste de pH ou de agressividade.

As classes *I_sup*, *II_sup* e *I_sub* podem contemplar a adição de PAC na mistura rápida.

3 CLASSIFICAÇÃO DOS CONTAMINANTES EM FUNÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS QUE CONTROLAM A SUA REMOÇÃO/ELIMINAÇÃO NAS ETA

3.1 Introdução

Identificam-se neste capítulo os contaminantes que podem ser causa de preocupação em ETA convencionais. Neste âmbito, o termo contaminantes engloba:

- contaminantes contemplados na legislação portuguesa;
- contaminantes ambientais que só recentemente começaram a ser alvo de estudos científicos intensivos em termos de ocorrência nas origens de água para consumo humano, efeitos na saúde e remoção nas ETA, e que ainda não se encontram legislados apesar de, para alguns, já existirem valores-guia, por exemplo, da Organização Mundial de Saúde (OMS) ou da Agência Americana de Protecção Ambiental (USEPA). Muitos destes contaminantes só começaram agora a ser estudados, pelo facto de apenas recentemente terem sido produzidos e introduzidos no ambiente, ou de as técnicas analíticas anteriormente utilizadas não estarem suficientemente desenvolvidas para os detectarem.

Não são aqui considerados os contaminantes emergentes para os quais não existem ainda dados de toxicologia nem de comportamento nos sistemas de tratamento de água, e que não estão incluídos em programas de monitorização nem são regulados.

Dos contaminantes listados, os mais críticos para esta análise são os contaminantes ambientais que, estando ou não legislados, não são satisfatoriamente removidos por processos convencionais de tratamento de água. Os contaminantes mais críticos podem ser biológicos (*e.g.*, *Cryptosporidium parvum*, *Giardia lamblia*, cianobactérias, vírus) (secção 3.2), químicos orgânicos (*e.g.*, matéria orgânica natural, trihalometanos, ácidos haloacéticos, cianotoxinas, pesticidas, desreguladores endócrinos, produtos farmacêuticos e de higiene pessoal) (secção 3.3), ou inorgânicos (*e.g.*, nitrato, brometo/bromato, arsénio e outros metais) (secção 3.4).

A turvação da água é conferida por material em suspensão ou coloidal (*i.e.*, de pequena dimensão e com carga superficial – normalmente negativa – e, portanto, não sedimentável), de natureza biológica (*e.g.*, microalgas, bactérias, cianobactérias), química orgânica (matéria orgânica natural) ou inorgânica (*e.g.*, argilas).

A salinidade, condutividade e alcalinidade da água são parâmetros que quantificam uma multiplicidade de substâncias (predominantemente inorgânicas) solúveis em água e com carga positiva ou negativa.

Por esse motivo, a turvação, salinidade, condutividade e alcalinidade não são tratadas neste capítulo, mas antes as substâncias que as conferem. Estes parâmetros globais são tratados no capítulo 6. Neste capítulo aborda-se ainda a problemática associada aos parâmetros de qualidade da água susceptíveis de grandes variações em períodos de tempo muito curtos, decorrentes de eventos climáticos, como chuvas intensas, estratificação das massas de água, forte e longa insolação (*e.g.*, turvação, ferro, manganês, florescências de cianobactérias). As questões associadas a alterações significativas da qualidade da água devidas a uma sobreexploração do recurso (*e.g.*, condutividade, salinidade) serão também analisadas no capítulo 6.

Nas secções 3.2 a 3.4, os contaminantes são classificados em termos das características físico-químicas determinantes da sua remoção/eliminação/degradação e/ou transformação (*e.g.*, em subprodutos indesejáveis da oxidação/desinfecção química) nas ETA. O preenchimento dos quadros foi feito de forma a salientar as características mais relevantes para o tratamento, não pretendendo ser exaustivo.

3.2 Contaminantes biológicos

Como contaminantes biológicos foram considerados protozoários (oocistos e cistos), bactérias (formas vegetativas, endosporos e cianobactérias), helmintas (ovos) e vírus (virões). Estes são classificados no Quadro 4 de acordo com as características que condicionam:

- i) a sua remoção por UOP físico-químicas – se são sedimentáveis, flutuáveis, partículas finas (de pequenas dimensões, mas que se podem reter em filtros), o seu tamanho e se têm comportamento coloidal;
- ii) a sua eliminação/inactivação por oxidação – se são resistentes à oxidação química;
- iii) a sua capacidade de produção e libertação para a água de outros contaminantes (metabólitos dissolvidos) que podem ter (*e.g.*, toxinas) ou não efeitos negativos na saúde.

Como se observa no Quadro 4, os contaminantes biológicos têm muitas características comuns, mas de importância diferente. Na generalidade, os contaminantes biológicos apresentam comportamento coloidal (que advém da carga superficial negativa). Os protozoários e bactérias são partículas finas, de baixa massa específica, enquanto os vírus têm dimensões macromoleculares.

Quadro 4 – Contaminantes biológicos.

Contaminante	Características que condicionam a sua remoção no tratamento						
	Em suspensão?			Tamanho (µm)	Comportamento coloidal? (i)	Resistente à oxidação química?	Pode produzir metabólitos dissolvidos?
	Sedimentável?	Flutuável?	Partículas finas?				
<i>Cryptosporidium parvum</i> (oocistos)	(ii)	(ii)	+	4-6	+	++ (iii)	-
<i>Giardia lamblia</i> (cistos)	(ii)	(ii)	+	8-13	+	+ (iii)	-
<i>Clostridium perfringens</i> (endosporos)	(ii)	(ii)	+	0.25	+	++ (iii)	- (iv)
Ovos de helmintas	++		12-90 diâmetro 25-150 comprim.			++ (iii)	-
Células de heterotróficos (colónias a 22°C e 37°C)	(ii)	(ii)	+	0.2-30	+	-	-
Bactérias coliformes, <i>E. coli</i>	(ii)	(ii)	+	0.5-2	+	-	-
Enterococos	(ii)	(ii)	+	0.8-1.2	+	-	-
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	(ii)	(ii)	+	0.5-3	+	-	-
<i>Salmonellas</i>	(ii)	(ii)	+	0.2-2	+	-	-
Cianobactérias (exemplos de géneros mais frequentes)	(v)		(vi)				(vii)
<i>Anabaena</i>	(v)	++	Filamentos		+	(viii)	+
<i>Anabaenopsis</i>	(v)	++	Filamentos		+	(viii)	+
<i>Aphanizomenon</i>	(v)	++	Filamentos		+	(viii)	+
<i>Cylindrospermopsis</i>	(v)	++	Filamentos		+	(viii)	+
<i>Microcystis</i>	(v)	++	Cél. (3-10 µm) ou colónias		+	(viii)	+
<i>Nodularia</i>	(v)	++	Filamentos		+	(viii)	+

Contaminante	Características que condicionam a sua remoção no tratamento						
	Em suspensão?			Tamanho (µm)	Comportamento coloidal? (i)	Resistente à oxidação química?	Pode produzir metabólitos dissolvidos?
	Sedimentável?	Flutuável?	Partículas finas?				
Cianobactérias (exemplos) (cont.)							
<i>Nostoc</i>	(v)	++	Filamentos	+	(viii)	+	
<i>Oscillatoria</i>	(v)	++	Filamentos	+	(viii)	+	
<i>Planktothrix</i>	(v)	++	Filamentos	+	(viii)	+	
Enterovírus			Dimensão macromolecular	+	(ix)	-	

Fontes: WHO (2004), Base de dados Cyanosite (accedida em Julho de 2007).

+	O contaminante possui essa característica.
++	Essa característica é muito importante para a remoção desse contaminante.
-	O contaminante não possui essa característica.
	A característica não é relevante em termos de tratamento.

- (i) O comportamento coloidal é comum à generalidade dos contaminantes biológicos e advém, sobretudo, da carga superficial negativa que os microrganismos possuem. Em termos de tratamento de água, é mais relevante para microrganismos isolados e pequenos agregados celulares do que para grandes agregados coloniais ou filamentosos.
- (ii) Pela sua baixa massa específica, microrganismos isolados, de pequenas dimensões e comportamento coloidal, após coagulação/floculação, apresentam maior capacidade de flutuação do que de sedimentação.
- (iii) Dada a sua grande resistência à oxidação química, a eficiência de inactivação de ovos de helmintas, endosporos de *C. perfringens* e oocistos de *C. parvum*, é regra geral insatisfatória nas condições habitualmente usadas em ETA. Os cistos de *G. lamblia* podem ser inactivados por ozono ou dióxido de cloro com uma eficiência aceitável. No entanto, tal depende das condições a que ocorre a desinfecção, nomeadamente da concentração e tempo de contacto do oxidante, e de características da matriz da água (e.g., turvação).
- (iv) As formas vegetativas de *C. perfringens* produzem toxinas.
- (v) Em regra, as cianobactérias apresentam maior capacidade de flutuação do que de sedimentação, associada à sua morfologia (e.g., filamentos) e à presença de vacúolos gasosos. No entanto, esta característica depende do género, da espécie, da idade celular e das condições a que as culturas estão expostas.

- (vi) As cianobactérias podem apresentar-se nas seguintes morfologias: células individuais ou pares de células (mais abundantes em culturas laboratoriais, *e.g.*, de *Microcystis aeruginosa*, células individuais têm 3-10 μm), ou em agregados celulares (mais abundantes em culturas ambientais) – coloniais ou filamentosos – e possuem tamanho muito variável, em função do género, espécie, idade celular e condições ambientais.
- (vii) As cianobactérias produzem metabolitos que conferem cor, sabor e cheiro à água e, nalguns casos, dependendo do género e das condições ambientais, podem também produzir cianotoxinas. Para a maioria das cianobactérias e cianotoxinas, células intactas contêm endotoxinas, que são libertadas para a água quando ocorre lise celular por envelhecimento ou *stress* mecânico e/ou químico.
- (viii) Não são resistentes à oxidação; contudo, a oxidação das cianobactérias promove a libertação das endotoxinas para a água a tratar, as quais poderão ou não ser eficientemente oxidadas.
- (ix) Resistentes ao cloro, não ao ozono e dióxido de cloro em doses adequadas.

Em relação às bactérias (incluindo as cianobactérias), o facto de se apresentarem como células isoladas, na forma de agregados celulares ou de filamentos, e o possuírem ou não vacúolos gasosos, são factores determinantes da importância relativa do seu comportamento coloidal e da capacidade de sedimentação ou de flutuação no tratamento. As bactérias que se apresentam na forma de endosporos (*e.g.*, *C. perfringens*) são relativamente resistentes à oxidação química.

Conforme se discute no capítulo 4, em termos de tratamento convencional da água, o comportamento coloidal de um contaminante assume maior importância para menores estruturas celulares do que para agregados celulares de maiores dimensões. Ou seja, a remoção de pequenas partículas de comportamento coloidal por uma operação de separação sólido-líquido (sedimentação, flutuação – vulgarmente designada flotação, no léxico técnico-científico nacional – ou filtração) só é eficiente se for precedida de uma coagulação (que promove a destabilização das partículas) e floculação (que promove o crescimento dos flocos e aumenta o seu tamanho e/ou densidade). No caso de grandes agregados celulares, a coagulação/floculação aumenta normalmente a eficiência da sedimentação ou flutuação, mas pode não ser imprescindível para o controlo da concentração deste contaminante na água.

Do Quadro 4 depreende-se que:

- i) os microrganismos resistentes à oxidação química só podem ser controlados em ETA convencionais optimizando a pré-oxidação com ozono (à excepção dos oo-

cistos de *C. parvum*, doses elevadas de ozono podem ser eficientes) e as etapas de coagulação, floculação, sedimentação (opcional) e filtração (conforme analisado no capítulo 4); no entanto, a flotação é mais eficiente do que a sedimentação na remoção destas formas biológicas (mantendo o pré-tratamento por coagulação/floculação e a afinação por filtração, mas com vantagens para a C/F e a filtração, capítulo 5); a tecnologia de membranas (desde a microfiltração à osmose inversa) ou a oxidação com radiação ultravioleta (nas condições adequadas) são as barreiras mais seguras (aspectos analisados no capítulo 5);

- ii) os ovos de helmintas devem ser controlados por sedimentação e afinados por filtração;
- iii) os microrganismos não resistentes à oxidação química são controlados preferencialmente por desinfecção química (pré-oxidação e/ou desinfecção final), embora a clarificação (coagulação/floculação/sedimentação e filtração) também apresente alguma eficiência de remoção;
- iv) as cianobactérias devem ser controladas em ETA convencionais usando dosagens baixas de pré-oxidante (que evitam a lise celular e facilitam a coagulação/floculação), uma etapa eficiente de coagulação/floculação/sedimentação e uma gestão cuidadosa dos ciclos de filtração, das lamas e da recirculação (para a linha de tratamento de água) de águas residuais do tratamento de lamas (conforme analisado no capítulo 4); no entanto, a flotação é mais eficiente do que a sedimentação na remoção de cianobactérias (mantendo o pré-tratamento por coagulação/floculação e a afinação por filtração, mas com vantagens para a C/F e a filtração, capítulo 5) e a tecnologia de membranas (desde a MF à RO) constitui a barreira mais segura (aspectos analisados no capítulo 5);
- v) os vírus só podem ser controlados em ETA convencionais otimizando as etapas de pré-oxidação com ozono ou dióxido de cloro (conforme analisado no capítulo 4); no entanto, a sua remoção/inativação é mais segura usando a tecnologia de membranas (desde a ultrafiltração (UF) à RO) ou a oxidação com radiação UV (nas condições adequadas) (capítulo 5).

3.3 Contaminantes orgânicos

Pela sua diferente especificidade, são tratados separadamente dois conjuntos de contaminantes orgânicos – matéria orgânica natural (NOM) (Quadro 5) e microcontaminantes orgânicos solúveis em água (Quadro 6).

Os últimos são classificados no Quadro 6 segundo as características que condicionam:

- i) a sua remoção por UOP físico-químicas – se se volatilizam a partir da água, se são hidrófobos ou hidrófilos; a sua carga na gama de pH típica da água (6-9) e o seu peso molecular;
- ii) a sua eliminação/transformação por processos químicos – resistência à oxidação química.

Neste caso, não se inclui no quadro a capacidade de formação de subprodutos da oxidação química, uma vez que, em regra, todos os microcontaminantes orgânicos são precursores de subprodutos da oxidação química (OBP), porque quando expostos a oxidação química não são mineralizados a CO_2 . A importância da formação de OBP depende da toxicidade dos subprodutos formados, que é função do composto de partida e das condições de oxidação.

A matéria orgânica natural requer uma abordagem diferente, uma vez que é uma mistura complexa de substâncias de características muito diversas, desde partículas a compostos solúveis em água.

Além disso, ao contrário dos microcontaminantes solúveis em água, a NOM existe sempre na água (embora em maior ou menor concentração e com natureza diferente) e apresenta-se numa gama de concentrações (mg/L) muito superior à dos microcontaminantes (pelo menos, uma ordem de grandeza acima dos subprodutos de que é precursora e, habitualmente, para os contaminantes naturais ou sintéticos, mais do que três ordens de grandeza ($< \mu\text{g/L}$)).

A NOM da água de origem é principalmente constituída por compostos que, por serem pouco biodegradáveis (*e.g.*, ácidos húmicos), persistem na água das albufeiras e rios, onde a sua concentração varia em função do tipo de meio envolvente que lhe dá origem (*e.g.*, coberto vegetal) e das condições existentes para o seu transporte (*e.g.*, lixiviação por água das chuvas).

A importância da NOM para a qualidade da água para consumo humano decorre, sobretudo, do facto de esta incluir na sua composição os precursores de OBPs indesejáveis. Os OBPs compreendem centenas de compostos orgânicos halogenados (*e.g.*, trihalometanos e ácidos haloacéticos) ou não (*e.g.*, benzeno) de elevada toxicidade para o Homem.

A NOM não é totalmente removida nas ETA. Além disso, no tratamento e durante a adução e distribuição, da acção dos oxidantes químicos resulta a transformação de moléculas da NOM em compostos de menor peso molecular (*e.g.*, ácidos carboxílicos, aldeídos) quantificáveis como carbono orgânico assimilável (AOC), e que sustentam a proliferação microbiana nas redes de distribuição, sobretudo na forma de biofilmes.

Assim, em termos da qualidade da água, o interesse em caracterizar o teor em NOM encontra-se fundamentalmente associado a dois aspectos – ao potencial da água para formar OBPs e à estabilidade microbiológica da água (expressa pela concentração de AOC). Todavia, no essencial, estes aspectos não dependem tanto da concentração total da NOM (COT, carbono orgânico total), mas mais da concentração da fracção solúvel (COD, carbono orgânico dissolvido) e da sua natureza (SUVA).

Assim, no Quadro 5, a NOM é caracterizada em termos dos parâmetros COT, COD, UV_{254nm} (absorvência no ultravioleta, a 254 nm, de amostras filtradas através de filtro 0,45 μm ; indicador da NOM mais aromática, hidrófoba e de maior peso molecular) e SUVA (absorvência específica no ultravioleta, a 254 nm, da fracção dissolvida da NOM; $SUVA = UV_{254}/COD$).

Estes parâmetros são classificados no Quadro 5 segundo as características que condicionam:

- i) a sua remoção por operações físicas – se os seus constituintes são partículas e, nesse caso, se são sedimentáveis ou flutuáveis, se têm pequenas dimensões (mas que podem ser retidas em filtros);
- ii) a sua remoção por UOP físico-químicas – o seu comportamento coloidal; a relevância da fracção dissolvida; o carácter hidrófobo ou hidrófilo; a carga média na gama de pH típica da água (6-9), se são de elevado ou baixo peso molecular;
- iii) a sua eliminação/transformação por processos químicos – resistência à oxidação química e potencial de formação de subprodutos da oxidação/desinfecção química.

Os óleos e as gorduras têm um tratamento individualizado porque não se encontram dissolvidos (estão emulsionados), além de, usualmente, não serem microcontaminantes (*i.e.*, estão na gama mg/L). As principais características que condicionam a sua remoção/eliminação em ETA são a sua flutuabilidade (e não sedimentabilidade) e se se apresentam em gotas de grandes dimensões ou em microgotas, *i.e.*, se estão pouco ou muito emulsionados. Conforme se discute na secção 5.2, quanto mais emulsionados se encontrarem, mais difícil é a sua separação da água, sendo removidos mais eficazmente por flotação.

Quadro 5 – Matéria orgânica natural da água.

Contaminante	Características que condicionam a sua remoção no tratamento								
	Em suspensão?			Comportamento coloidal?	Dissolvido?	Hidrofobo ou hidrófilo?	Carga a pH 6-9	Resistente à oxidação química?	Precursor de OBP?
	Sedimentável?	Flutuável?	Partículas finas?						
COT < 2 mgC/L ≥ 2 mgC/L			+	+	+	HB,HL	neg	+ (i)	(ii) - +
COD < 2 mgC/L ≥ 2 mgC/L	-	-	-	+	+	HB,HL	neg	+ (i)	(iii) - +
UV _{254nm} (iv)	-	-	-	+	+ (iv)	HB (iv)	neg	-	++
SUVA (v) ≤ 2 L/(m.mgC)]2-3[L/(m.mgC) [4-5] L/(m.mgC) > 5 L/(m.mgC)	-	-	-	+	+ (v) <PM >PM	(v) HL HL HB HB	neg	-	(vi) - + ++ ++

Fontes: Edzwald e Van Benschoten (1990), USEPA (1999a).

+	O contaminante possui essa característica.
++	Essa característica é muito importante para a remoção desse contaminante.
-	O contaminante não possui essa característica.
	A característica não é relevante em termos de tratamento.

OBP: Subprodutos da oxidação (nesta secção só se analisam os OBP orgânicos, os inorgânicos (*e.g.*, bromato, clorito e clorato) são analisados em 3.4); neg: negativa; HB: hidrófobo; HL: hidrófilo; PM: peso molecular.

- (i) COT e COD são parâmetros resistentes à oxidação química, na medida em que os compostos que os constituem sofrem transformações, mas a sua oxidação completa (*i.e.*, a mineralização de carbono orgânico a CO₂) não é, habitualmente, significativa.
- (ii) A USEPA (1999a) utiliza o valor-guia de 2 mgC/L para COT na água bruta, sendo o potencial de formação de OBP na cloração baixo se os valores forem inferiores.
- (iii) Por analogia com (ii), uma vez que COD ≤ COT.
- (iv) A absorvência no ultravioleta, a 254 nm, de amostras filtradas (através de filtro 0,45 μm) (UV_{254nm}) indica a concentração da NOM mais aromática, hidrófoba e de maior peso molecular a que, habitualmente, corresponde um maior potencial de formação de OBP indesejáveis.
- (v) Edzwald e Van Benschoten (1990) propuseram uma classificação da natureza da NOM dissolvida na água baseada no parâmetro SUVA: *i*) para valores de SUVA de 4-5 L/(m.mgC), o COD da água é composto maioritariamente por substâncias húmicas, é relativamente hidrófobo, aromático e de peso molecular elevado; *ii*) para valores de SUVA inferiores a 3 L/(m.mgC), o COD da água é composto maioritariamente por material não húmico, relativamente hidrófilo, menos aromático e de menor peso molecular.
- (vi) A USEPA (1999a) utiliza o valor-guia de 2 L/(m.mgC) para SUVA na água bruta, sendo o potencial de formação de OBP na cloração baixo se os valores forem inferiores.

Do Quadro 5 infere-se que:

- i) a NOM pode ser parcialmente removida em ETA convencional por coagulação com sobredosagem de coagulante, a pH 5-6 (*enhanced coagulation*), em particular a fracção particulada e a fracção solúvel mais hidrófoba, de maior peso molecular (de maior UV_{254nm}) (conforme se discute no capítulo 4);
- ii) os constituintes da NOM que absorvem no UV_{254nm} podem ainda ser convertidos, por oxidação química, em compostos mais simples, hidrófilos, biodegradáveis (constituintes do AOC); deve-se evitar a aplicação de cloro e hipoclorito a águas com COT superior a 2 mgC/L, para evitar a formação de OBP indesejáveis (trihalometanos e ácidos haloacéticos) – nestas águas, o ozono (se o brometo não exceder 0,1 mg/L) e o dióxido de cloro são alternativas mais adequadas;
- iii) a fracção mais hidrófila de menor UV_{254nm} e menor SUVA tem, na generalidade, menor potencial de formação de OBP indesejáveis, designadamente de trihalometanos (USEPA, 1999a; Galapate *et al.*, 2001; Liang e Singer,

2003), mas está associada a menor estabilidade da água na rede de distribuição e é mais difícil de coagular – é, assim, importante controlar a extensão da oxidação, em função da qualidade da água de origem; por exemplo, o ozono tem vantagens na coagulação/floculação para águas de baixo teor em COD, *i.e.*, em que a carência de coagulante é estabelecida pelas partículas inorgânicas e a NOM a elas associada, sendo desvantajoso em águas com teor em COD moderado a elevado (Becker e O’Melia, 2000) [em qualquer caso, não se deve exceder 0,7 mgO₃/mg COT (Edwards *et al.*, 1993)];

- iv) a NOM é eficientemente controlada por sistemas de carvão activado – preferencialmente por adsorção da fracção mais hidrófoba, de maior peso molecular (sistemas PAC em dosagens elevadas (capítulo 4) ou sistemas de carvão activado granulado (GAC) (capítulo 5), ou por biodegradação dos constituintes do AOC (sistemas BAC, *i.e.*, sistemas GAC com actividade biológica, capítulo 5) –, por sistemas de membranas (nanofiltração (NF) ou RO) ou por sistemas híbridos [carvão activado/ultrafiltração (PAC/UF)] (capítulo 5).

Quadro 6 – Microcontaminantes orgânicos solúveis em água.

Contaminante	Características que condicionam a sua remoção no tratamento (i)				
	Volátil a partir da água? (ii)	Hidrófobo ou hidrófilo? (iii)	Carga a pH 6-9 (iv)	PM (g/mol)	Resistente à oxidação química?
AOC (v)	+/-	HL,HB	pos,neg,neu	< 250	(v)
Acrilamida		HL		71	
Cianotoxinas					(vi)
Microcistinas		HB	neu-neg (vii)	900-1100	- (viii)
Nodularina		HB	neu-neg (vii)	824	-
Cilindrospermopsina		HL	neu	415	-
Saxitoxinas		HL	neu-pos	256-491	+/-
Anatoxina-a		HL	pos	165	+/-

Contaminante	Características que condicionam a sua remoção no tratamento (i)				
	Volátil a partir da água? (ii)	Hidrófobo ou hidrófilo? (iii)	Carga a pH 6-9 (iv)	PM (g/mol)	Resistente à oxidação química?
Compostos de sabor e cheiro					(ix)
Geosmina		HB		182	-
MIB (2-metilisoborneol)		HB		168	-
Compostos orgânicos voláteis					
1,1-Dicloroetano	++	HB,HL		99	
1,2-Dicloroetano	++	HB,HL		99	
1,1-Dicloroetano	++	HB,HL		97	
Cloreto de vinilo	++	HB,HL		63	
BTEX					
Benzeno	++	HB		78	-
Tolueno	++	HB		92	
Etilbenzeno	++	HB		106	
m-xileno	++	HB		106	
Desreguladores endócrinos, produtos farmacêuticos e de cuidado pessoal (ex.)					
Carbamazepina		HB		236	-
Bisfenol A		HB		228	-
E2: 17b-estradiol		HB		272	-
E1: estrona		HB		270	-
Progesterona		HB		314	+
Testosterona		HB		288	+
EE2: 17b-etinilestradiol		HB		296	-
Cis-androesterona		HB		290	
HHCb		HB		258	-
AHTN		HB		258	
Benzofenona		HB		182	
Epicloridrina	+	HB,HL		93	
Fenol e clorofenóis (exemplos)					
Fenol		HB,HL	neu	94	-
Clorofenóis		HB,HL		129	

Contaminante	Características que condicionam a sua remoção no tratamento (i)				
	Volátil a partir da água? (ii)	Hidrófobo ou hidrófilo? (iii)	Carga a pH 6-9 (iv)	PM (g/mol)	Resistente à oxidação química?
Diclorofenóis		HB	neu-neg	163	
Triclorofenóis		HB	neu-neg	197	
Tetraclorofenóis		HB		232	
Pentaclorofenol		HB	neg	266	
Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (exemplos)					
Benzo[b]fluoranteno		HB		252	-
Benzo[k]fluoranteno		HB		252	-
Benzo(a)pireno		HB		252	
Benzo[g,h,i]perileno		HB		276	+
Indeno[1,2,3-cd]pireno		HB		276	
Pesticidas (exemplos) (x)					
2,4-D		HB	neg	221	
Alacloro		HB		270	+
Aldrina		HB		365	+
Amitrol		HL	neu	84	
Atrazina		HB	neu	216	+
Bentazona		HB	neu	240	
Carbofurão		HB		221	+
Captana		HB		301	
Cimoxanil		HB,HL	pos	198	
Clordano		HB		410	+
Clorotolurão		HB		213	
Diazinão		HB	neu	304	
Dialdrina	+	HB		381	+
Desetilatrazina		HB,HL	neu	188	
Desetilsimazina		HB,HL	neu	174	
Dimetoato		HB,HL		229	
Diurão		HB		233	
EPTC	+	HB		189	

Contaminante	Características que condicionam a sua remoção no tratamento (i)				
	Volátil a partir da água? (ii)	Hidrófobo ou hidrófilo? (iii)	Carga a pH 6-9 (iv)	PM (g/mol)	Resistente à oxidação química?
Glufosinato de amónio		HL		198	
Heptacloro	+	HB		373	+
Heptacloro epóxido		HB		389	+
Linurão		HB		249	+
Mancozebe		HB,HL		266	
MCPA		HB	neg	201	
Metalaxil		HB,HL		279	
Metolacloro		HB		284	
Metidatião		HB		302	
Pesticidas (exemplos) (cont.)					
Metribuzina		HB,HL	neu	214	-
Molinato		HB		187	
Paraquato		HL		257	
Pendimetalina		HB		281	
Pirimetanil		HB	neu	199	
Propanil		HB		218	
Propinebe		HB,HL		357	
Simazina		HB,HL	neu	202	+
Tebuconazol		HB		308	
Terbutilazina		HB	neu	230	
Tirame		HB,HL		240	
Subprodutos da oxidação (exemplos)					
Trihalometanos					
Bromofórmio	+	HB		253	
Clorofórmio	+	HB,HL		119	
Dibromoclorometano	+	HB,HL		244	
Bromodiclometano	+	HB,HL		164	
Ácidos haloacéticos					
Ácido cloroacético		HB,HL	neg	95	
Ácido dicloroacético		HB,HL	neg	129	

Contaminante	Características que condicionam a sua remoção no tratamento (i)				
	Volátil a partir da água? (ii)	Hidrófobo ou hidrófilo? (iii)	Carga a pH 6-9 (iv)	PM (g/mol)	Resistente à oxidação química?
Ácido tricloroacético		HB,HL	neg	163	
Ácido bromocloroacético		HB,HL	neg	179	
Ácido bromoacético		HB,HL	neg	139	
Ácido dibromoacético		HB,HL	neg	218	
Haloacetônitrilos					
Bromocloroacetônitrilo				154	
Bromodicloroacetônitrilo				190	
Dibromoacetônitrilo		HB,HL		199	
Dicloroacetônitrilo		HB,HL		110	
Tricloroacetônitrilo		HB,HL		144	

Fontes: Bases de dados Cyanosite, PHYSPROP, FOOTPRINT, TOXNET e ChemIDplus (accedidas em Julho de 2007); Thomas (1990), Carmichael (1997), USEPA (1999b), Carson e Masten (2000), Newcombe e Nicholson (2002), Newcombe e Nicholson (2004), Westerhoff *et al.* (2005), Rodriguez *et al.* (2007).

+	O contaminante possui essa característica.
++	Essa característica é muito importante para a remoção desse contaminante.
-	O contaminante não possui essa característica.
□	Não há informação disponível.

HB: hidrófobo; HL: hidrófilo; neg: negativa; pos: positiva; neu: neutra; HHCB:1,3,4,6,7,8-hexahidro-4,6,6,7,8,8-hexametilciclopenta- γ -2-benzopirano; AHTN: 6-acetil-1,1,2,4,4,7-hexametil tetralina; 2,4-D: ácido diclorofenoxiacético; EPTC: etilpropiltiocarbamato; MCPA: ácido 4-cloro-2-metilfenoxiacético.

- (i) A capacidade de formação de OBP não é contemplada porque é partilhada por todos os microcontaminantes orgânicos (a oxidação química não é, em regra, completa, a CO₂); a importância da formação de OBP depende da toxicidade dos subprodutos formados, que é função do composto de partida e das condições de oxidação.
- (ii) Utilizou-se o critério proposto por Thomas (1990) de que a transferência para a atmosfera por volatilização de compostos dissolvidos na água é significativa quando estes têm uma constante de Henry igual ou maior que 10⁻⁵ atm.m³.mol⁻¹ (a 25°C e 1 atm.)
- (iii) Foram considerados hidrófobos os compostos com log k_{ow} acima de 2 e hidrófilos com log k_{ow} abaixo de 1 (k_{ow} = coeficiente de partição octanol/água a 25°C).

- (iv) Carga superficial global estimada com base nos valores de pKa.
- (v) O AOC é uma mistura de compostos orgânicos de baixo peso molecular e facilmente biodegradáveis (*e.g.*, ácidos carboxílicos, aldeídos, álcoois) em proporção variável; são eles próprios subprodutos da oxidação química.
- (vi) A análise apresentada diz respeito às toxinas dissolvidas na água; contudo, a oxidação das cianobactérias promove a libertação das endotoxinas para a água a tratar, as quais poderão ou não ser eficientemente oxidadas. Em geral, as cianotoxinas são oxidáveis (restantes microcistinas > microcistina-LA > cilindrospermopsina > saxitoxinas e anatoxina-a) pelos oxidantes habitualmente usados nas ETA (em regra, ozono > cloro > permanganato; dióxido de cloro e monocloramina não são eficazes), embora requeiram doses e valores de pH ajustados para o efeito; a composição da água (*e.g.*, NOM, alcalinidade, pH) também afecta o desempenho da oxidação.
- (vii) A carga global das microcistinas e nodularina varia com o pH (é positiva a pH muito ácido, e passa a neutra e depois a negativa com o aumento de pH), e depende da variante de microcistina: a maioria das variantes tem carga negativa a pH 6-9, a microcistina-RR tem carga neutra a negativa.
- (viii) A variante de microcistina-LA é a mais difícil de oxidar.
- (ix) São oxidáveis pelos oxidantes habitualmente usados nas ETA (o mais eficiente é o ozono), embora requeiram doses ajustadas para o efeito, em função do oxidante e da composição da água.
- (x) Foram seleccionados por estarem legislados, integrarem as listas do IRAR e/ou representarem gamas extremas de características (*e.g.*, PM).

Do Quadro 6 depreende-se que a estratégia de controlo dos microcontaminantes orgânicos solúveis em água envolve:

- i) em ETA convencionais, a optimização da oxidação química e/ou a adição de PAC (capítulo 4), devendo ter-se em atenção que as matrizes orgânica e inorgânica da água afectam muito o desempenho destes processos;
- ii) no caso de microcontaminantes voláteis, a remoção por arejamento e/ou adsorção em carvão activado;
- iii) em muitas situações, especialmente para microcontaminantes orgânicos resistentes à oxidação química e/ou mais hidrófilos e de menor peso molecular, é necessário recorrer a tecnologias não convencionais, como sistemas GAC/BAC, tecnologias de membranas (NF, RO) ou sistemas híbridos (PAC/UF) (capítulo 5); neste caso, o peso molecular (*i.e.*, o tamanho) e a carga são factores determinantes na selecção do adsorvente e da membrana mais adequados.

3.4 Contaminantes inorgânicos

No Quadro 7 caracterizam-se os contaminantes inorgânicos em termos das propriedades que condicionam a sua remoção por UOP físico-químicas – a carga do ião, o estado de oxidação do elemento, se formam precipitados e, em caso afirmativo, quais os seus compostos mais insolúveis e respectivo valor de pH de solubilidade mínima (a 25°C). Discriminam-se as propriedades das espécies com diferentes estados de oxidação e identificam-se os OBP indesejáveis e os seus precursores.

Do Quadro 7 decorre que a estratégia de controlo de metais e outros contaminantes inorgânicos, em geral, envolve:

- i) em ETA convencionais, a sua remoção por precipitação química, floculação (para os precipitados adquirirem sedimentabilidade) e decantação, podendo eventualmente ser necessário ajustar o estado de oxidação (optimização da pré-oxidação e/ou redução química por adição de um agente redutor na mistura rápida) e/ou o pH (ao valor de solubilidade mínima); podem também ser efectuados polimentos por co-precipitação com sais de alumínio ou ferro e/ou por filtração (capítulo 4);
- ii) em alternativa, a sua remoção por permuta iónica (IX) ou tecnologias de membranas [electrodialise (ED) ou RO] (capítulo 5).

Quadro 7 – Contaminantes inorgânicos.

Contaminante	Características que condicionam a sua remoção no tratamento			
	Íons predominantes	Estado de oxidação	Forma precipitado?	Compostos de menor solubilidade em água (pH de solubilidade mínima) (i) (ii)
Alumínio	Al ³⁺ (pH baixo) Al(OH) ₂ ⁺ , ... Al ₁₃ O ₄ (OH) ₂₄ ⁷⁺ (iii) Al(OH) ₄ ⁻ (pH elevado)	+3	S	Al(OH) ₃ (~ 6.3) (a pH elevado, ressolubiliza-se como Al(OH) ₄ ⁻)
Amónio/ amoníaco	NH ₄ ⁺ (pH≤7) NH ₄ ⁺ >NH ₃ (7<pH≤9) NH ₄ ⁺ <NH ₃ (9<pH<12) NH ₃ (pH≥12)	-3	N (iv)	n.a.
Antimónio	(v)	(v)	(v)	(v)
Arsénio (+3)	AsO ₃ ³⁻ , AsO ₂ ⁻	+3	(vi)	n.a.
Arsénio (+5)	AsO ₄ ³⁻	+5	S	As ₂ S ₅ (6-7) FeAsO ₄ < Mg ₃ (AsO ₄) ₂ < Ca ₃ (AsO ₄) ₂ (vii)
Bário	Ba ²⁺	+2	S	BaSO ₄ < BaCO ₃ (vii)
Bromato (viii)	BrO ₃ ⁻	+5	N	n.a.
Brometo (ix)	Br ⁻	-1	S	CuBr < PbBr ₂
Cádmio	Cd ²⁺	+2	S	Cd(OH) ₂ (10-11) (vii)
Cálcio	Ca ²⁺	+2	S	CaCO ₃ (9-10)
Chumbo (v)	Pb ²⁺	+2	S	PbS (7,5-8,5) < PbCO ₃ (9- -9,5) < Pb(OH) ₂ (9,5) (vii)
Cianeto	CN ⁻	-1	(iv)	n.a.
Clorato (x)	ClO ₃ ⁻	+5	N	n.a.
Cloreto	Cl ⁻	-1	(xi)	n.a.
Clorito (x)	ClO ₂ ⁻	+3	N	n.a.
Cobalto (+2)	Co ²⁺	+2	S	Co(OH) ₂
Cobalto (+3)	Co ³⁺	+3	S	Co(OH) ₃

Contaminante	Características que condicionam a sua remoção no tratamento			
	Íons predominantes	Estado de oxidação	Forma precipitado?	Compostos de menor solubilidade em água (pH de solubilidade mínima) (i) (ii)
Cobre (+1)	Cu ⁺	+1	S	Cu ₂ S (8,5) < CuI < CuBr
Cobre (+2)	Cu ²⁺	+2	S	CuS < CuO (9-10) (vii)
Crômio (+3) (xii)	Cr ³⁺	+3	S	Cr(OH) ₃ (8-10)
Crômio (+6) (xii)	CrO ₄ ²⁻	+6	N	n.a.
Ferro (+2)	Fe ²⁺	+2	S (vi)	Fe(OH) ₂
Ferro (+3)	Fe ³⁺ (pH baixo) Fe(OH) ²⁺ , ... (iii) Fe(OH) ₄ ⁻ (pH elevado)	+3	S	Fe(OH) ₃ (7-8) (a pH elevado, rressolubiliza-se como Fe(OH) ₄ ⁻)
Fluoreto	F ⁻	-1	S	CaF ₂ < MgF ₂
Fosfato	PO ₄ ³⁻	+5	S	Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ (OH) ₂ (10) FePO ₄ (5) < AlPO ₄ (6)
Magnésio	Mg ²⁺	+2	S	Mg(OH) ₂ (10-11)
Manganês (+2)	Mn ²⁺	+2	(vi)	MnS < Mn(OH) ₂ < MnCO ₃ (> 9,4)
Manganês (+4)	Mn ⁴⁺	+4	S (vi)	MnO ₂
Manganês (+7)	MnO ₄ ⁻	+7	N	n.a.
Mercúrio (+1)	Hg ⁺	+1	S	Hg ₂ Br ₂ < Hg ₂ Cl ₂
Mercúrio (+2)	Hg ²⁺	+2	S	HgS
Níquel	Ni ²⁺	+2	S	Ni ₃ (PO ₄) ₂ < NiS < Ni(OH) ₂ (10-11) < NiCO ₃ (vii)
Nitrato	NO ₃ ⁻	+5	N	n.a.
Nitrito	NO ₂ ⁻	+3	N	n.a.
Potássio	K ⁺	+1	N	n.a.
Prata	Ag ⁺	+1	S	Ag ₂ S < Ag ₃ PO ₄ < AgBr < Ag ₂ CO ₃ < AgCl (vii)
Rádio (226, 228)	n.a.	n.a.	N	n.a.
Selênio (+4)	Se ⁴⁺	+4	S	SeS ₂ (6-7)

Contaminante	Características que condicionam a sua remoção no tratamento			
	Íons predominantes	Estado de oxidação	Forma precipitado?	Compostos de menor solubilidade em água (pH de solubilidade mínima) (i) (ii)
Selênio (+6)	Se ⁺⁶	+6	N	n.a.
Sódio	Na ⁺	+1	N	n.a.
Sulfato	SO ₄ ²⁻	+6	S	BaSO ₄ < PbSO ₄
Sulfito	SO ₃ ²⁻	+4	N	n.a.
Sulfureto	S ²⁻	-2	S	CaS (xiii)
Urânio	n.a.	n.a.	N	n.a.
Zinco	Zn ²⁺	+2	S	Zn(OH) ₂ (9) (vii)

Fontes: Lide (1990), AWWA (1999), Eckenfelder (2000); WHO (2006).

S	O contaminante possui essa característica.
N	O contaminante não possui essa característica.
n.a.	Não aplicável.

- (i) Entre parêntesis, indica-se o pH de solubilidade mínima do composto apresentado; usualmente, as solubilidades são menores a pH elevado.
- (ii) Usualmente, a co-precipitação com ferro e alumínio reduz de forma significativa os residuais, em especial se for seguida de filtração.
- (iii) Espécies coagulantes, mononucleares e polinucleares.
- (iv) Agente complexante.
- (v) Contaminante, em geral, proveniente de corrosão das redes, *i.e.*, não está presente nas origens em concentrações significativas; não é, portanto, em regra, controlado no tratamento, mas na rede de distribuição.
- (vi) O contaminante é previamente oxidado (*e.g.*, As³⁺ é oxidado a As⁵⁺, Fe²⁺ a Fe³⁺, Mn²⁺ a Mn⁴⁺) antes da precipitação.
- (vii) Os arsenatos metálicos (*e.g.*, de cobre, bário, cádmio, chumbo, cobre, zinco, níquel, prata) são, ainda, menos solúveis em água do que os apresentados no quadro; no entanto, os cátions não existem em quantidade suficiente na água de origem, nem são habitualmente adicionados no tratamento da água.
- (viii) OBP da ozonização a pH ≥ 8,7 de águas com concentrações em brometo superiores a 0,1 mg/L.
- (ix) Precursor da formação do OBP bromato (nota h).

- (x) OBP da oxidação com dióxido de cloro; a pH excessivamente ácido predomina o clorato, a pH elevado e temperatura elevada co-existem o clorito e o clorato. Também podem ocorrer durante a produção e armazenamento de soluções de hipoclorito.
- (xi) Apenas os cloretos de mercúrio e de prata são muito insolúveis, mas, por razões óbvias, não são precipitados utilizáveis no tratamento de água.
- (xii) O contaminante é previamente reduzido (em meio muito ácido) de Cr^{6+} a Cr^{3+} antes da precipitação (em meio alcalino).
- (xiii) Todos os sulfuretos são muito insolúveis; indicam-se, apenas, os sulfuretos dos cátions mais habitualmente adicionados no tratamento.

4 CAPACIDADE E LIMITAÇÕES DAS ETA NACIONAIS PARA CONTROLO DAS VÁRIAS CLASSES DE CONTAMINANTES

4.1 Eficiência nominal de tratamento *versus* eficiência real

O Quadro 8, o Quadro 9, o Quadro 11 e o Quadro 12 sistematizam as capacidades e limitações dos diferentes esquemas-tipo de ETA (identificados na capítulo 2), para controlo dos contaminantes biológicos, orgânicos e inorgânicos, tal como são caracterizados na capítulo 3. Esta sistematização foi feita com base na eficiência nominal dos diferentes reagentes e/ou equipamentos disponíveis em cada esquema-tipo para remover ou inactivar os contaminantes em jogo, de acordo com valores publicados relativos a estudos à escala laboratorial, piloto ou real. Portanto, e embora a generalidade dos valores adoptados sejam usados como referência pela OMS e/ou pela USEPA, os Quadros expressam o que pode ser na teoria esperado e não obrigatoriamente o que, na prática, é a eficiência real de cada esquema de tratamento. Assim, a interpretação dos referidos quadros é meramente indicativa e serve, sobretudo, como base comparativa para avaliação do desempenho relativo atribuível a cada esquema-tipo.

Como antes se referiu, são múltiplos e inconstantes os factores que podem afectar as eficiências dos tratamentos físico-químicos e/ou biológicos. Destes factores, pela sua importância, salientam-se:

- i) a matriz orgânica da água – a concentração (COT, COD) e natureza (SUVA) da matéria orgânica natural afecta a remoção de outros contaminantes, *e.g.*, consome oxidante, compete pelo adsorvente, colmata membranas;
- ii) a matriz inorgânica da água – o pH condiciona as reacções de oxidação, de precipitação, as interacções adsorbato-adsorvente e o desempenho das tecnologias de membranas; a alcalinidade confere capacidade de resistência à variação do pH da água e, portanto, afecta as reacções anteriores bem como a coagulação; a força iónica da água enfraquece as interacções electrostáticas (sejam atractivas ou repulsivas), *e.g.*, entre adsorbato-adsorvente, entre soluto-membrana;

- iii) as condições de operação das várias UOP (*e.g.*, tipo e concentração de agente oxidante, precipitante, coagulante, redutor, floculante e adsorvente; tempo de contacto entre o reagente/adsorvente e o contaminante-alvo; intensidade da mistura; temperatura);
- iv) a própria concentração do contaminante a remover (normalmente, a eficiência de remoção aumenta com a concentração afluente à UOP, até se atingir um patamar) (Campinas *et al.*, 2003a).

A eficiência real de cada esquema de tratamento para remoção/inactivação dos diferentes contaminantes num determinado período de tempo só pode ser avaliada, portanto, com base na monitorização adequada de cada contaminante antes e após tratamento.

A desinfecção final não pode ser considerada uma barreira eficaz para todos os microcontaminantes, particularmente quando é feita com cloro, como acontece na generalidade das ETA nacionais. O cloro é usado na desinfecção final nas doses necessárias para desinfectar a água e estas doses são geralmente minimizadas de modo a prevenir uma produção excessiva de subprodutos indesejáveis. Portanto, considerou-se no Quadro 11 que a oxidação da generalidade dos microcontaminantes orgânicos na desinfecção final não é significativa.

A existência de UV na desinfecção final, bem como de filtros GAC na filtração, não foi considerada neste capítulo, mas antes no capítulo 5 (tratamento complementar ou alternativo), uma vez que (conforme mostra o Quadro 1) são tecnologias pouco usadas em Portugal.

Também as potencialidades da filtração lenta (SF) são analisadas individualmente no capítulo 5, pela sua elevada especificidade face à filtração rápida, considerada nos esquemas-tipo das ETA convencionais.

Salienta-se, por último, que a informação resumida no Quadro 8, no Quadro 9, no Quadro 11 e no Quadro 12 reflecte a importância capital da existência de barreiras múltiplas para cada contaminante, sendo esta a estratégia determinante de uma maior segurança no seu controlo.

4.2 Controlo de contaminantes biológicos

No Quadro 8 apresentam-se as capacidades nominais de remoção/inativação de contaminantes biológicos esperadas para os esquemas de tratamento identificados no capítulo 2, em função das características destes contaminantes, que foram apresentadas e discutidas em 3.2. Note-se que estas capacidades podem ser optimizadas recorrendo à *enhanced coagulation*. Esta pode permitir uma eficiência de remoção da generalidade dos agentes biológicos até 2 log (99%).

Quadro 8 – Capacidade nominal das ETA nacionais para remoção/inativação de contaminantes biológicos.

Contaminante	Sequência de tratamento								
	I.1 _{sup}	I.2 _{sup}	II _{sup}	III.1 _{sup}	III.2 _{sup}	IV _{sup}	I _{sub}	II _{sub}	III _{sub}
<i>Cryptosporidium parvum</i> (oocistos) (i)	-/+	-	-	-/+	-	-	-	-	-
<i>Giardia lamblia</i> (cistos)	+	-	-	+	-	-	-	-	-
Ovos de helmintas (ii)	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	-/+	-
Células de heterotróficos (colónias a 22°C e 37°C)	++	++	+	++	++	+	++	++	+
Coliformes	++	++	+	++	++	+	++	++	+
Enterococos	++	+	+	++	+	+	+	+	+
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	++	++	+	++	++	+	++	++	+
<i>Salmonellas</i>	++	++	+	++	++	+	++	++	+
Cianobactérias (iii)	+	+	+	+/-	+/-	+/-	+(iv)	-/(iv)	-(iv)
Enterovírus (v)	+	-/+	-	+	-/+	-	-/+	-/+	-

Fontes: Burg e Borgsteede (1987), AWWA (1999), USEPA (1999b), Velásquez *et al.* (2004), Campinas *et al.* (2003b), WHO (2004), Hall *et al.* (2005), WHO (2006), Rosa *et al.* (2007).

-	O esquema de tratamento não permite controlar o contaminante.
-/+	O esquema de tratamento tem algumas potencialidades (que dependem da existência de condições específicas para controlo do contaminante), mas muitas limitações.
+/-	O esquema de tratamento tem algumas potencialidades, mas também algumas limitações no controlo do contaminante.
+	O esquema de tratamento permite controlar o contaminante (desde que asseguradas as devidas condições de operação).
++	O esquema de tratamento permite controlar o contaminante (desde que asseguradas as devidas condições de operação) melhor do que o esquema classificado com "+" (barreiras múltiplas ou UOP mais eficientes).

- (i) Os oocistos de *C. parvum* podem ser satisfatoriamente removidos/inactivados apenas quando a coagulação/floculação/decantação estão para tal optimizadas e quando as doses de ozono se encontram devidamente ajustadas.

tadas ($CT \geq 10$ mg/L.min; este é um valor apenas indicativo, pois, devido à discrepância dos resultados publicados, não há consenso quanto à dose necessária).

- (ii) Devido à sua notável resistência aos oxidantes químicos, a eliminação dos ovos de helmintas dá-se sobretudo na coagulação/floculação/decantação e filtração.
- (iii) Como referido em 3.2, as cianobactérias devem ser controladas em ETA convencionais usando doses baixas de pré-oxidante (que evitam a lise celular mas facilitam a coagulação/floculação), uma etapa eficiente de coagulação/floculação/decantação e uma gestão cuidada dos ciclos de filtração, das lamas e da recirculação para a linha de tratamento de água de águas residuais do tratamento de lamas, especialmente da desidratação (Campinas *et al.*, 2003b; Hall *et al.*, 2005; Rosa *et al.*, 2007). Células isoladas ou pares de células de *M. aeruginosa* são mais difíceis de remover do que cianobactérias coloniais ou filamentosas (Ribau Teixeira e Rosa, 2006d; Ribau Teixeira e Rosa, 2007). As cianotoxinas extracelulares são contempladas no Quadro 11.
- (iv) As cianobactérias não existem naturalmente em águas subterrâneas, apenas se estas forem influenciadas por águas superficiais.
- (v) Agentes biológicos resistentes ao cloro, pelo que, para a sua eliminação, é necessária pré-oxidação com ozono ou dióxido de cloro a doses adequadas.

4.3 Remoção de contaminantes orgânicos: NOM e microcontaminantes

Quanto à remoção de matéria orgânica (Quadro 9), decorre de 3.3 que as ETA convencionais têm capacidade para remover parcialmente a NOM por *enhanced coagulation*, sendo maior a remoção da fracção particulada, dos constituintes hidrófobos e de maior peso molecular da fracção solúvel. O Quadro 10, que apresenta as eficiências mínimas de remoção de COT em ETA convencionais que tratam água de origem superficial, mostra precisamente que essa remoção é apenas parcial e que diminui com a alcalinidade da água bruta e aumenta com a própria concentração afluyente de COT.

Quadro 9 – Capacidade nominal das ETA nacionais para remoção de matéria orgânica natural.

Contaminante	Sequência de tratamento								
	I.1_sup	I.2_sup	II_sup	III.1_sup	III.2_sup	IV_sup	I_sub	II_sub	III_sub
COT (i) < 2 mgC/L	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	(ii)	(ii)	(ii)
≥ 2 mgC/L	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-			
COD (i) < 2 mgC/L	-	-	-	-	-	-	(ii)	(ii)	(ii)
≥ 2 mgC/L	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+			
UV _{254nm} (i)	+	+	+/-	+	+	+/-	+ (ii)	+ (ii)	+ (ii)
SUVA (i) (iii) ≤ 2 L/(m.mgC)	-	-	-	-	-	-	(ii)	(ii)	(ii)
]2-3[L/(m.mgC)	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+	-/+			
≥ 4 L/(m.mgC)	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-			

Fontes: AWWA (1999), USEPA (1999a), USEPA (1999b), WHO (2006), Rosa *et al.* (2007).

-	O esquema de tratamento não permite controlar o contaminante.
-/+	O esquema de tratamento tem algumas potencialidades (que dependem da existência de condições específicas para controlo do contaminante), mas muitas limitações.
+/-	O esquema de tratamento tem algumas potencialidades, mas também, algumas limitações no controlo do contaminante.
+	O esquema de tratamento permite controlar o contaminante (desde que asseguradas as devidas condições de operação).
++	O esquema de tratamento permite controlar o contaminante (desde que asseguradas as devidas condições de operação) melhor do que o esquema classificado com “+” (barreiras múltiplas ou UOP mais eficientes).

- (i) A *enhanced coagulation* é muito mais eficiente na remoção de NOM do que a coagulação habitual (*i.e.*, otimizada para controlo de turvação).
- (ii) As águas subterrâneas têm teores muito baixos de NOM (baixos COT, COD, UV_{254nm} e SUVA).
- (iii) Usualmente, a eficiência de remoção de SUVA é intermédia entre a eficiência de remoção de UV_{254nm} e a de COD.

Quadro 10 – Eficiências mínimas de remoção de COT em ETA convencionais que tratam água de origem superficial (USEPA, 1999a).

COT da água bruta (mg C/L)	Alcalinidade da água bruta (mg/L CaCO ₃)		
	0 a 60	60 a 120	> 120
2,0-4,0	35%	25%	15%
4,0-8,0	45%	35%	25%
> 8,0	50%	40%	30%

No caso das sequências de tratamento que possuem pré-oxidação, é possível converter os constituintes da NOM que absorvem no UV_{254nm} em compostos mais simples. No entanto, a sequência *I.2_sup* com cloro ou hipoclorito como pré-oxidante deve ser evitada em águas com COT superior a 2 mgC/L (para evitar a formação de OBP indesejáveis), sendo a sequência *I.1_sup* (se o brometo for inferior a 0,1 mg/L) ou a *I.2_sup* com dióxido de cloro mais adequadas.

Como já referido, a fracção mais hidrófila, de menor UV_{254nm} e menor SUVA tem, na generalidade, menor potencial de formação de OBP indesejáveis, designadamente trihalometanos (THM), mas está associada a menor estabilidade da água e é mais difícil de coagular, sendo, assim, importante controlar a extensão da oxidação, em função da qualidade da água de origem. Por exemplo, o ozono tem vantagens na coagulação/floculação para águas de maior turvação e menor teor de NOM húmica, sendo desvantajoso em águas muito ricas em NOM húmica e com baixo teor de partículas coloidais.

Uma vez que as ETA que possuem as sequências *I.1_sup* e *I.2_sup* podem utilizar PAC, têm a possibilidade adicional (princípio das barreiras múltiplas) de controlar a NOM (sobretudo a fracção mais hidrófoba e de maior peso molecular) por adsorção, se adicionarem doses elevadas daquele reagente.

As águas subterrâneas apresentam teores muito baixos de NOM, pelo que, nesta discussão, se salientaram as sequências de tratamento aplicadas a águas superficiais.

No caso dos microcontaminantes orgânicos solúveis em água (Quadro 11), decorre de 3.3 que as ETA convencionais têm capacidade para remover este tipo de contaminantes somente se a pré-oxidação química estiver optimizada e/ou se for adicionado PAC (*I_sup*, *II_sup* e *I_sub*). Se os compostos forem voláteis, a sua remoção pode ser satisfatoriamente conseguida através de arejamento e/ou da adsorção em carvão activado. Compostos orgânicos resistentes à oxidação química e/ou mais hidrófilos e de menor peso molecular já não são removidos eficazmente nos processos convencionais mesmo optimizados e há que recorrer a tecnologias não convencionais (capítulo 5).

Quadro 11 – Capacidade nominal das ETA nacionais para remoção de microcontaminantes orgânicos solúveis em água.

Contaminante	Sequência de tratamento								
	I.1_sup	I.2_sup	II_sup	III.1_sup	III.2_sup	IV_sup	I_sub	II_sub	III_sub
AOC	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Acrilamida (i)	-	-	-	-	-	-	n.a.	n.a.	n.a.
Cianotoxinas (ii)									
Microcistinas, nodularina, cilindrospermopsina	+/-	-/+	-/+	+/-	-/+	-	-/+ (iii)	-/+ (iii)	- (iii)
Saxitoxinas, anatoxina-a	-/+	-	-	-/+	-	-	- (iii)	- (iii)	- (iii)
Compostos de sabor e cheiro (geosmina, MIB)	+	+/-	-/+	+/-	-/+	-	+/- (iii)	-/+ (iii)	- (iii)
Compostos orgânicos voláteis (iv)									
BTEX	++	++	+	+	+	+/-	++	-/+	-
Restantes VOC (Quadro 6)	+	+	+	+/-	+/-	+/-	+	-	-
Desreguladores endócrinos, produtos farmacêuticos e de cuidado pessoal									
Compostos HB, não resistentes à oxidação química (Quadro 6) (v)	+/-	+/-	-/+	-/+	-/+	-	+/-	-/+	-
Compostos HB, resistentes à oxidação química (Quadro 6) (vi)	-/+	-/+	-/+	-	-	-	-/+	-	-
Epicloridrina (i)	-	-	-	-	-	-	n.a.	n.a.	n.a.
Fenol e clorofenóis									
Fenol (v)	+/-	+/-	-/+	-/+	-/+	-	+/-	-/+	-
Fenóis clorados (Quadro 6) (vi)	-/+	-/+	-/+	-	-	-	-/+	-	-
Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos									
Benzofluorantenos [b] e [k] (v)	+/-	+/-	-/+	-/+	-/+	-	+/-	-/+	-
Benzo[g,h,i]perileno, Indeno[1,2,3-cd]pireno (vi)	-/+	-/+	-/+	-	-	-	-/+	-	-
Pesticidas									
Pesticidas não resistentes à oxidação química; HB; neu-neg (Quadro 6) (v)	+/-	+/-	-/+	-/+	-/+	-	+/-	-/+	-
Pesticidas resistentes à oxidação química; HB; neu-neg (Quadro 6) (vi)	-/+	-/+	-/+	-	-	-	-/+	-	-

Contaminante	Sequência de tratamento								
	I.1_sup	I.2_sup	II_sup	III.1_sup	III.2_sup	IV_sup	I_sub	II_sub	III_sub
Pesticidas resistentes à oxidação química; HB,HL ou HL; neu (Quadro 6) (vii)	-/+	-/+	-/+	-	-	-	-/+	-	-
Subprodutos da oxidação (pré-oxidação e desinfecção final) (viii)									
THM, HAA, HAN (Quadro 6) (vi)	-/+	-/+	-/+	-	-	-	-/+	-	-

Fontes: AWWA (1999), USEPA (1999b), Newcombe e Nicholson (2002), Campinas *et al.* (2003b); Newcombe e Nicholson (2004), Hall *et al.* (2005), Westerhoff *et al.* (2005), WHO (2006), Rodriguez *et al.* (2007), Rosa *et al.* (2007).

-	O esquema de tratamento não permite controlar o contaminante ou não há caracterização disponível (Quadro 6) do contaminante que permita avaliar a sua remoção.
-/+	O esquema de tratamento tem algumas potencialidades (que dependem da existência de condições específicas para controlo do contaminante), mas muitas limitações.
+/-	O esquema de tratamento tem algumas potencialidades, mas também algumas limitações no controlo do contaminante.
+	O esquema de tratamento permite controlar o contaminante (desde que asseguradas as devidas condições de operação).
++	O esquema de tratamento permite controlar o contaminante (desde que asseguradas as devidas condições de operação) melhor do que o esquema classificado com "+" (barreiras múltiplas ou UOP mais eficientes).

HB: hidrófobos; HL: hidrófilos; neg: negativos; neu: neutros; MIB: 2-metilisborneol; VOC: compostos orgânicos voláteis; THM: trihalometanos; HAA: ácidos haloacéticos; HAN: haloacetnitrilos; n.a.: não aplicável.

- (i) Impureza dos floculantes adicionados; a sua concentração é controlada pela pureza do reagente comercial.
- (ii) A análise apresentada diz respeito às toxinas dissolvidas na água. Contudo, a oxidação das cianobactérias promove a libertação das endotoxinas para a água a tratar, as quais poderão ou não ser eficientemente oxidadas. Em geral, as cianotoxinas são oxidáveis (restantes microcistinas > microcistina-LA > cilindrospermopsina > saxitoxinas e anatoxina-a) pelos oxidantes habitualmente usados nas ETA (em regra, ozono > cloro > permanganato; dióxido de cloro e monocloramina não são eficazes). No entanto, e além do desempenho da oxidação ser afectado pelo pH, alcalinidade e NOM da água, as doses (concentração x tempo) necessárias de oxidante são muito superiores às usuais e daí considerar-se que a desinfecção final não controla eficazmente as toxinas. O mesmo se passa com o PAC – as doses necessárias seriam demasiado elevadas (*e.g.*, > 20 mg/L para microcistinas). Os carvões comerciais têm, na generalidade, capacidades de adsorção muito limitadas de cianotoxinas hidrófilas e com carga positiva (*e.g.*, saxitoxinas e anatoxina-a).
- (iii) As cianotoxinas, a geosmina e o MIB não existem naturalmente em águas subterrâneas, apenas são detectados se forem influenciadas por águas superficiais.

- (iv) Estes compostos são controláveis por arejamento ou desorção gasosa, por adsorção em PAC ou, no caso do benzeno, por oxidação química. No quadro, considerou-se que na mistura rápida podem existir condições para volatilização – o que não é necessariamente válido para todas as ETA (depende do nível de agitação e da transferência água/ar).
- (v) Contaminantes controláveis por pré-oxidação e/ou por adição de PAC (fenol menos que os restantes pelo seu carácter HB/HL e menor peso molecular), desde que as condições de operação estejam optimizadas para este objectivo. Para ambos os processos, há forte competição com NOM e efeito do pH e alcalinidade da água.
- (vi) Contaminantes controláveis por adição de PAC (THM, HAA e HAN menos que os restantes pelo seu carácter HB/HL e, em geral, menor peso molecular), desde que as condições de operação estejam optimizadas para este objectivo.
- (vii) Dos tratamentos previstos no quadro, apenas a adição de PAC pode ter alguma eficiência que, mesmo assim, é normalmente baixa, dada a hidrofília, baixo peso molecular e/ou carga positiva (igual à carga habitual do carvão) do contaminante-alvo.
- (viii) Os OBP formam-se inevitavelmente na oxidação com cloro (mais na pré-cloragem do que na cloragem para desinfecção final se a NOM houver sido, parcialmente, removida na ETA), menos na oxidação com ozono (não significativo em águas com baixo teor de brometo) e não são formados quando se aplica dióxido de cloro ou permanganato de potássio. Em águas subterrâneas, uma vez que as concentrações de NOM são inferiores às de águas superficiais, também são inferiores as concentrações de OBP formados. Quando formados na desinfecção final, não se aplica a análise de remoção no tratamento.

4.4 Remoção de contaminantes inorgânicos

No caso dos contaminantes inorgânicos (Quadro 12), decorre de 3.4 que o método convencional de remoção de compostos inorgânicos é a precipitação química, floculação e decantação, podendo eventualmente ser necessário ajustar o estado de oxidação (optimização da pré-oxidação e/ou redução química por adição de um agente redutor na mistura rápida) e/ou o pH (ao valor de solubilidade mínima). Para tal, deve identificar-se o composto de menor solubilidade do elemento, respectivo estado de oxidação do elemento e pH de solubilidade mínima do composto. A precipitação é, assim, conseguida por adição do sal com contra-íon necessário, não podendo existir complexantes na água (*e.g.*, CN^- e NH_3^+) que, caso existam, devem ser removidos previamente à precipitação química. Por norma, para os metais, a escala de insolubilidade é a seguinte: sulfuretos > hidróxidos > carbonatos. Usualmente, as solubilidades são inferiores a pH mais elevado.

Para se obterem residuais mais baixos, pode ser efectuada a co-precipitação com sais de Al^{3+} ou Fe^{3+} (os metais adsorvem aos flocos de $\text{Al}(\text{OH})_3$ ou $\text{Fe}(\text{OH})_3$) e subsequente filtração.

Também para se obterem residuais baixos, usam-se os sais de carbamato para *enhanced precipitation* mas, uma vez que são dispendiosos, o seu uso restringe-se a situações em que é necessário um polimento posterior à precipitação convencional.

Em ETA que só possuem decantação após a precipitação química obtêm-se, em geral, residuais de 1-2 mg/L, mas, se existir também uma filtração, conseguem-se valores inferiores a 0,5 mg/L (Eckenfelder, 2000).

As estações que fazem filtração directa também têm capacidade para retenção de precipitados, mas há que ter em atenção a eventual ocorrência da sobrecarga de sólidos nos filtros e o risco acrescido de “breakthrough” (libertação brusca de elevada quantidade de material retido no filtro).

Uma alternativa para controlo do manganês que pode existir numa ETA convencional é a filtração sobre óxido de manganês, *i.e.*, *manganese greensand filtration* – a camada de MnO_2 dos filtros catalisa a oxidação de Mn (II) a Mn (IV) e adsorve o MnO_2 formado (Rosa *et al.*, 2007).

Em qualquer tipo de precipitação, deve ser tida em consideração a competição dos catiões da água (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+) pelo agente precipitante.

Alguns contaminantes inorgânicos podem ser controlados por redução química (*e.g.*, clorito a cloreto, bromato a brometo) utilizando sais ferrosos ou carvão activado, enquanto outros (*e.g.*, azoto amoniacal e nitrito) são controláveis por oxidação química.

Considerou-se no Quadro 12 que o esquema-tipo *II_sub* não permite a adição de agente precipitante. Esta limitação pode, eventualmente, ultrapassar-se se essa adição puder ser feita na câmara de pré-oxidação e se não houver necessidade de oxidação ou redução do metal previamente à sua precipitação.

Quadro 12 – Capacidade nominal das ETA nacionais para remoção de contaminantes inorgânicos.

Contaminante	Sequência de tratamento								
	I.1_sup	I.2_sup	II_sup	III.1_sup	III.2_sup	IV_sup	I_sub	II_sub	III_sub
Alumínio (i)	++	++	++	+	+	+	++	-	-
Amônio/amoniaco	(ii)	(ii)	(ii)	(ii)	(ii)	(ii)	(ii)	(ii)	(ii)
Antimônio (iii)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Arsénio (+3)	++	++	-	+	+	-	++	-	-
Arsénio (+5)	++	++	++	+	+	+	++	-	-
Bário	++	++	++	+	+	+	++	-	-
Boro (iv)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bromato	(v)	n.a.	n.a.	(v)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Brometo	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cádmio	++	++	++	+	+	+	++	-	-
Cálcio	++	++	++	+	+	+	++	-	-
Chumbo (vi)	++	++	++	+	+	+	++	-	-
Cianeto	(vii)	(vii)	(vii)	(vii)	(vii)	(vii)	(vii)	(vii)	(vii)
Clorato (viii)	n.a.	-	n.a.	n.a.	-	n.a.	-	-	n.a.
Cloreto	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Clorito (ix)	n.a.	+	n.a.	n.a.	+/-	n.a.	+	-	n.a.
Cobalto (+2) (x)	++	++	+	+	+	+/-	++	-	-
Cobalto (+3) (x)	++	++	++	+	+	+	++	-	-
Cobre (+1) (xi)	++	++	+	+	+	+/-	++	-	-
Cobre (+2) (xi)	++	++	++	+	+	+	++	-	-
Crómio (+3)	++	++	++	+	+	+	++	-	-
Crómio (+6)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ferro (+2) (xii)	++	++	+	+	+	+/-	++	+	-
Ferro (+3) (xii)	++	++	++	+	+	+	++	+	-
Fluoreto (xiii)	++	++	++	+	+	+	++	-	-
Fosfato	++	++	++	+	+	+	++	-	-
Magnésio	++	++	++	+	+	+	++	-	-
Manganês (+2) (xiv)	++ (xv)	++	-/+	+(xv)	+	-/+	++	+	-
Manganês (+4) (xiv)	++ (xv)	++	++	+(xv)	+	+	++	+	-
Manganês (+7)	(xv)	n.a.	n.a.	(xv)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Mercúrio (+1)	++	++	++	+	+	+	++	-	-

Contaminante	Seqüência de tratamento								
	I.1_sup	I.2_sup	II_sup	III.1_sup	III.2_sup	IV_sup	I_sub	II_sub	III_sub
Mercúrio (+2)	++	++	++	+	+	+	++	-	-
Níquel (xvi)	++	++	++	+	+	+	++	-	-
Nitrato	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nitrito	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Potássio	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Prata	++	++	++	+	+	+	++	-	-
Rádio (226, 228)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Selénio (+4)	++	++	++	+	+	+	++	-	-
Selénio (+6)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sódio	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sulfato	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sulfito	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sulfureto	++	++	++	+	+	+	++	-	-
Urânio	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zinco (xvii)	++	++	++	+	+	+	++	-	-

Fontes: AWWA (1999), Eckenfelder (2000), WHO (2006)

-	O esquema de tratamento não permite controlar o contaminante.
-/+	O esquema de tratamento tem algumas potencialidades, mas estas dependem da existência de condições específicas para controlo do contaminante.
+/-	O esquema de tratamento tem algumas potencialidades, mas também, algumas limitações no controlo do contaminante.
+	O esquema de tratamento permite controlar o contaminante (desde que asseguradas as devidas condições de operação).
++	O esquema de tratamento permite controlar o contaminante (desde que asseguradas as devidas condições de operação) melhor do que o esquema classificado com "+" (barreiras múltiplas ou UOP mais eficientes).

n.a: não aplicável (e.g., quando o contaminante não ocorre em águas de origem, não é formado na ETA, ou é formado na desinfecção final).

- (i) A valores de pH elevados, os residuais podem ser maiores uma vez que se formam espécies solúveis (no caso do alumínio, $Al(OH)_4^-$; no caso do ferro, $Fe(OH)_4^-$).
- (ii) Agente complexante; a cloragem ao ponto crítico (AWWA, 1999) é uma forma usual de o remover.
- (iii) Os processos convencionais de tratamento não removem antimónio. Contudo, este contaminante não está presente, usualmente, nas origens de água em concentrações significativas, sendo proveniente dos materiais metálicos da rede de distribuição. Assim, não é, em geral, controlado pelo tratamento, mas na rede.

- (iv) Os processos convencionais de tratamento não removem boro. As tecnologias de permuta iônica e osmose inversa permitem obter remoções significativas (capítulo 5) mas podem revelar-se dispendiosas, pelo que a mistura com águas de baixas concentrações de boro pode ser a única solução economicamente viável.
- (v) A formação de bromato é, por norma, significativa quando se aplica ozono a águas com teores em brometo superiores a 0,1 mg/L. A minimização da concentração de bromato na água tratada é conseguida pela minimização da sua formação durante o tratamento através da diminuição da dose de ozono (reduzindo a carência de ozono por remoção de NOM), da realização da ozonização a $\text{pH} < 8,7$ (neste caso, a qualidade da água pode ser comprometida devido à formação de compostos organobromados), da utilização de outro oxidante (*e.g.*, cloro para águas com baixo teor em NOM ou dióxido de cloro em caso contrário), ou da adição de amónio (IRAR, 2005).
- (vi) Embora tenha origem principalmente na rede de distribuição, quando existe na água de origem, pode ser removido por precipitação química com sulfureto de sódio, carbonato de cálcio ou cal.
- (vii) Agente complexante; o esquema de tratamento remove-o somente se for feita uma cloração alcalina ($\text{pH} 8,4$) com doses elevadas do oxidante.
- (viii) Uma vez que não existe nenhum processo viável de remoção do clorato da água, o controlo deste contaminante é feito através da minimização da sua formação durante a pré-oxidação ou desinfecção final com dióxido de cloro, ou durante a produção e armazenamento de soluções de hipoclorito.
- (ix) Caso o clorito resulte da desinfecção final com dióxido de cloro, o controlo da sua concentração é feito através da minimização da sua formação durante essa desinfecção. Caso seja formado na oxidação inicial com dióxido de cloro (ou adicionado como impureza do hipoclorito), pode ser removido através da redução a cloreto com sais ferrosos (a $\text{pH} 5-7$, adicionados na mistura rápida, ou com PAC (doses elevadas, $\text{pH} 5,5-6,5$, por redução e adsorção).
- (x) Removido por precipitação química com cal ou soda cáustica, precipitando o hidróxido; o hidróxido de Co(III) é mais insolúvel do que o de Co(II) , pelo que a existência de uma oxidação prévia à precipitação origina menores residuais.
- (xi) Quando removido por precipitação química com sulfuretos, a existência de oxidação prévia à precipitação origina menores residuais, uma vez que o sulfureto de Cu(II) é mais insolúvel que o de Cu(I) .
- (xii) Removido por precipitação química com cal ou soda cáustica ou por reacção com hidróxidos da água, precipitando o hidróxido; o hidróxido de Fe(III) é mais insolúvel do que o de Fe(II) , pelo que a existência de oxidação prévia origina menor residual; o Fe(II) é muito facilmente oxidado a Fe(III) (*e.g.*, por arejamento a $\text{pH} 7,5$), desde que não complexado com NOM (fácil oxidação em águas subterrâneas, necessidade de maior tempo de reacção e/ou de oxidantes mais fortes em águas superficiais).
- (xiii) A precipitação de fluoreto de cálcio na presença de magnésio origina menores residuais [por adsorção aos flocos de Mg(OH)_2].

- (xiv) Não requer adição de agente precipitante, apenas de oxidante. A oxidação de Mn(II) a Mn(IV) é relativamente lenta a $\text{pH} < 9$, o que justifica a necessidade de serem usados oxidantes mais fortes (MnO_4^- ou ozono), ou de se proceder à adição de uma base antes da filtração. Se se permitir que os filtros sejam cobertos por MnO_2 , o Mn(II) adsorve à camada de MnO_2 , podendo ser oxidado no filtro com cloro ou permanganato (*manganese greensand filtration*).
- (xv) A sobredosagem de ozono ($> 0,88 \text{ mg O}_3/\text{mg Mn}$, $\text{pH} \sim 8$) produz água de cor rosa devido ao MnO_4^- ; este contaminante deve ser controlado através da minimização da sua formação durante a ozonização.
- (xvi) Removido por precipitação de $\text{Ni}(\text{OH})_2$ (com cal, hidróxido de sódio ou hidróxidos da água), ou por precipitação com carbonatos (NiCO_3) ou com fosfatos [$\text{Ni}_3(\text{PO}_4)_2$].
- (xvii) Removido por precipitação de $\text{Zn}(\text{OH})_2$ (com cal, hidróxido de sódio ou hidróxidos da água); caso se use a cal em águas com elevados teores em sulfato, precipita também CaSO_4 .

5 TRATAMENTO COMPLEMENTAR OU ALTERNATIVO

Neste capítulo apresentam-se as potencialidades de operações e processos unitários complementares ou alternativos para controlo dos contaminantes biológicos, orgânicos e inorgânicos analisados no capítulo 3 (Quadro 13, Quadro 14 e Quadro 15, respectivamente).

No presente contexto, esta informação é especialmente relevante para os contaminantes para os quais os esquemas de tratamento do capítulo 4 não dão resposta satisfatória (*e.g.*, microrganismos resistentes à oxidação química, NOM e muitos microcontaminantes solúveis em água) (Quadro 13, Quadro 14 e Quadro 15).

As ressalvas entre eficiência nominal e eficiência real apresentadas em 4.1 (tratamento convencional) aplicam-se também ao tratamento complementar ou alternativo.

Informação detalhada sobre as operações e os processos unitários analisados pode ser obtida a partir de literatura da especialidade (*e.g.*, AWWA, 1999; Eckenfelder, 2000; Ribau Teixeira e Rosa, 2003; Rosa *et al.*, 2007).

Nos quadros deste capítulo, os filtros GAC e BAC são tratados em conjunto, uma vez que os filtros GAC são, na prática, BAC, *i.e.*, possuem actividade biológica, embora não tenham sido projectados ou sejam operados como tal. A colonização é especialmente importante quando a água a tratar contém AOC, *i.e.*, quando o GAC é precedido de uma ozonização primária ou, mais eficientemente, de uma ozonização secundária (*i.e.*, após a clarificação), porque neste caso é possível dosear ozono a água já clarificada e com menor carência de oxidante.

À semelhança do verificado nas ETA convencionais, qualquer que seja a tecnologia complementar e/ou alternativa usada (com excepção da que envolve a destruição dos contaminantes por oxidação ou biodegradação), são sempre produzidos resíduos (sólidos, como carvão e resinas não regeneráveis; líquidos como os concentrados de flotação e dos sistemas de membranas) ricos nos contaminantes removidos aos quais deve, portanto, ser dado o devido tratamento e destino final.

5.1 Controlo de contaminantes biológicos

O controlo de cistos e oocistos de protozoários, ovos de helmintas e cianobactérias é muito mais eficiente por flotação por ar dissolvido (DAF) do que por sedimentação (mantendo o pré-tratamento por coagulação/floculação e a afinação por filtração, mas com vantagens para ambos) (WHO, 2004; Ribau Teixeira e Rosa, 2006d; Ribau Teixeira e Rosa, 2007). Contudo, a tecnologia de membranas (desde a microfiltração à osmose inversa) constitui a barreira mais segura para a remoção deste tipo de contaminantes e vírus (AWWA, 1999; Ribau Teixeira e Rosa, 2003; WHO, 2004).

Também a utilização da radiação ultravioleta nas condições (*e.g.*, baixa turvação) e doses adequadas pode constituir uma barreira eficaz para agentes biológicos resistentes à oxidação genérica, com excepção dos ovos de helmintas e adenovírus (WHO, 2004a).

Embora com desempenhos variáveis em função do seu projecto, operação e características da água, a filtração lenta em areia pode constituir uma boa barreira contra a generalidade dos contaminantes biológicos, com excepção de vírus (para os quais apresenta eficiências insatisfatórias) (WHO, 2004a).

Quadro 13 – Capacidade nominal de tratamentos complementares ou alternativos para controlo de contaminantes biológicos.

Contaminante	Tipo de tratamento					
	C/F+DAF	GAC/BAC	MF	UF,NF,RO	UV	SF
Protozoários (cistos, oocistos)	+/-	+/-	+	+	+	+
Bactérias (forma vegetativa)	-	-	+	+	+	+
Bactérias (endosporos)	-	-	+	+	+	+
Ovos de helmintas	+/-	+/-	+	+	-	+
Cianobactérias	+	+/-	+	+	(i)	+
Enterovírus	-	+/-	+/-	+	+	+/-

Fontes: AWWA (1999), USEPA (1999b), WHO (2004), Hall *et al.* (2005), Ribau Teixeira e Rosa (2006c), Rosa *et al.* (2007).

-	A UOP não permite controlar o contaminante.
+/-	A UOP tem potencialidades, mas também algumas limitações no controlo do contaminante.
+	A UOP permite controlar o contaminante (desde que asseguradas as devidas condições de operação).

C/F+DAF: Flotação por ar dissolvido, precedida de coagulação/floculação; GAC: carvão activado granulado; BAC: carvão activado granulado com actividade biológica; MF: microfiltração; NF: nanofiltração; RO: osmose inversa; SF: filtração lenta.

- (i) A radiação UV não se deve usar no controlo de cianobactérias, porque se pretende remover e não inactivar células, evitando a rotura destas e a consequente libertação de cianotoxinas para a água.

5.2 Controlo de NOM e microcontaminantes orgânicos

Uma vez que, como já referido, a NOM é controlável por sistemas de carvão activado, um tratamento complementar usado nas ETA são os sistemas GAC (*e.g.*, por adaptação de filtros de areia já existentes ou por instalação de novos filtros GAC ou de dupla camada, uma das quais é GAC), nos quais a NOM é adsorvida (sobretudo a fracção mais hidrófoba). Estes sistemas GAC são inevitavelmente colonizados e, ao fim de algum tempo em operação, transformam-se em sistemas BAC que também remove NOM por biodegradação dos constituintes do AOC. Os sistemas GAC/BAC são, portanto, na generalidade, mais eficientes do que PAC e sem a desvantagem da elevada produção de lamas. Os sistemas de membranas (NF ou RO) ou os sistemas híbridos (PAC/UF) são tecnologias alternativas para controlo eficaz de NOM (Quadro 14).

À semelhança da *enhanced coagulation*/floculação/decantação, também a DAF precedida de *enhanced coagulation*/floculação permite controlar parcialmente a NOM, sobretudo a fracção particulada e os constituintes mais hidrófobos e de maior peso molecular.

Em relação aos microcontaminantes orgânicos solúveis em água, nos casos em que os processos de tratamento convencionais não são capazes de os controlar, em especial os resistentes à oxidação química e/ou mais hidrófilos e de menor peso molecular, é necessário recorrer a tecnologias não convencionais, como sistemas GAC/BAC, tecnologias de membranas (NF, RO), ou sistemas híbridos (PAC/UF) (Quadro 14). Neste caso, o peso molecular (*i.e.*, o tamanho) e a carga são factores determinantes na selecção do adsorvente e da membrana mais adequados.

A radiação UV e a filtração lenta (que pode ser operada como biofiltração) também permitem controlar NOM e microcontaminantes orgânicos solúveis em água.

A remoção de óleos e gorduras é preferencialmente realizada com recurso à flotação. As macrogotas de óleo são separáveis da água por flotação natural ou flotação por dispersão de ar. As microemulsões de óleo (que, regra geral, contêm também pequenas partículas) requerem, habitualmente, flotação por ar dissolvido, precedida por coagulação/floculação, ou por micro ou ultrafiltração.

Quadro 14 – Capacidade nominal de tratamentos complementares ou alternativos para controlo de contaminantes orgânicos (NOM e microcontaminantes orgânicos solúveis em água).

Contaminante	Tipo de tratamento								
	C/F+ DAF	GAC/ BAC	MF	UF	NF (i)	RO	PAC/ UF	UV	SF
NOM	+/-	+	+/-	+/-	+	+	+	+/-	+/-
AOC	-	+	-	-	+/-	+	-/+	+/-	+
Acrilamida	-	-	-	-	-/+	+	-		-
Cianotoxinas									
Microcistinas, nodularina, cilindrospermopsina	+ (ii)	+	-	-	+	+	+		+/-
Saxitoxinas, anatoxina-a	+ (ii)	+/-	-	-	+	+	+/-		+/-
Compostos de sabor e cheiro (geosmina, MIB)	-/+	+	-	-	+	+	+		
Compostos orgânicos voláteis									
BTEX	+ (iii)	+	-	-	-/+	+	+/-		+/-
Restantes VOC (Quadro 6)	+ (iii)	+	-	-	-/+	+	+/-		-
Desreguladores endócrinos, produtos farmacêuticos e de cuidado pessoal									
Compostos HB, não resistentes à oxidação química (Quadro 6)	-/+	+/-	-	-	+	+	+		+/-
Compostos HB, resistentes à oxidação química (Quadro 6)	-/+	+	-	-	+	+	+		-
Epicloridrina	-/+		-	-	-/+	+	-		-
Fenol e clorofenóis									
Fenol	-	+	-	-	+/-	+	+/-	+	+/-
Fenóis clorados (Quadro 6)	-/+	+	-	-	+	+	+	+	-
Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos									
Benzo[fluor]antenos [b] e [k]	-/+	+	-	-	+	+	+		-
Benzo[g,h,i]perileno, Indeno[1,2,3-cd]pireno	-/+	+	-	-	+	+	+		-

Contaminante	Tipo de tratamento								
	C/F+ DAF	GAC/ BAC	MF	UF	NF (i)	RO	PAC/ UF	UV	SF
Pesticidas									
Pesticidas não resistentes à oxidação química; HB; neu-neg (Quadro 6)	-/+	+	-	-	+	+	+		-
Pesticidas resistentes à oxidação química; HB; neu-neg (Quadro 6)	-/+	+	-	-	+	+	+		-
Pesticidas resistentes à oxidação química; HB,HL ou HL; neu (Quadro 6)	-	+/-	-	-	+	+	+		-
Subprodutos da oxidação									
THM	-/+	+	-	-	+/-	+	+		-
HAA e HAN	-	+	-	-	+/-	+	+		-

Fontes: AWWA (1999), USEPA (1999a), Newcombe e Nicholson (2002), Newcombe e Nicholson (2004), Hall *et al.* (2005), WHO (2006), Rosa *et al.* (2007), Ribau Teixeira e Rosa (2006a, b, c, d, 2007).

-	A UOP não permite controlar o contaminante.
-/+	A UOP tem poucas potencialidades e muitas limitações no controlo do contaminante.
+/-	A UOP tem potencialidades, mas também algumas limitações no controlo do contaminante.
+	A UOP permite controlar o contaminante (desde que asseguradas as devidas condições de operação).
	Não há informação disponível.

C/F+DAF: Flotação por ar dissolvido precedida de (*enhanced*) coagulação/floculação; GAC: carvão activado granulado; BAC: carvão activado granulado com actividade biológica; MF: microfiltração; UF: ultrafiltração; NF: nanofiltração; RO: osmose inversa; SF: filtração lenta; PAC/UF: processo híbrido de ultrafiltração com adição de carvão activado em pó; THM: trihalometanos; HAA: ácidos haloacéticos; HAN: haloacetoneitrilos.

- (i) Neste trabalho, para efeitos de distinção dos desempenhos da nanofiltração e da osmose inversa, considerou-se que o limite de exclusão molecular das membranas de NF é de *ca.* 200 g/mol (embora existam membranas comerciais de NF mais apertadas, *e.g.*, 150 g/mol).
- (ii) Se forem removidas como endotoxinas, *i.e.*, enquanto estão no interior das células das cianobactérias. As toxinas extracelulares não são removidas apreciavelmente (-/+).
- (iii) Existem condições para volatilização na C/F+DAF.

5.3 Controlo de contaminantes inorgânicos

O tratamento complementar para contaminantes inorgânicos (Quadro 15) consiste na sua remoção por tecnologias de membranas (NF, RO ou ED), permuta iónica, sistemas GAC/BAC ou usando outros adsorventes, *e.g.*, alumina activada. A nanofiltração controla de forma eficaz iões multivalentes, radionuclídeos e parcialmente os iões monovalentes. Os sistemas de membranas não apresentam os efeitos negativos de competição entre contaminantes a remover encontrados noutras tecnologias. No entanto, têm em comum com os sistemas de permuta iónica a desvantagem de aumentarem a agressividade da água, tanto mais quanto menor for a dureza final da água (membranas e IX), ou maior for o teor em cloreto (IX aniónica). Os filtros de carvão activado (GAC/BAC) apresentam potencialidades para metais e radionuclídeos (desempenho muito dependente do volume de água tratada e da composição da água – pH, matéria orgânica e outros iões incluindo os da dureza, além do tipo e granulometria do carvão usado). Os filtros GAC/BAC podem ainda controlar outros contaminantes inorgânicos por adsorção (*e.g.*, amoníaco) e/ou por redução química (*e.g.*, clorito a cloreto, bromato a brometo). A adsorção a alumina activada é também usualmente eficaz na remoção de selénio, fluoreto e arsénio, apresentando também capacidades para outros metais.

Quadro 15 – Tratamento complementar ou alternativo para controlo de contaminantes inorgânicos.

Contaminante	Tipo de tratamento					
	NF	RO	ED	IX	GAC/BAC	Adsorção a alumina activada
Alumínio	+	+	+	+	+/-	
Amónio/amoníaco			+	(i) (ii)	+	
Antimónio		+	+			
Arsénio (+3)	+	+	+	+	+/-	+
Arsénio (+5)	+	+	+	+	+/-	+
Bário	+	+	+	+		
Bromato	+	+	+		+/-	
Brometo	+/-	+	+	+		
Cádmio	+	+	+	+	+/-	+/-
Cálcio	+	+	+	+		
Cianeto	+/-	+	+			
Chumbo	+	+	+		+/-	

Contaminante	Tipo de tratamento					Adsorção a alumina activada
	NF	RO	ED	IX	GAC/BAC	
Clorato	+	+	+			
Cloreto	+/-	+	+			
Clorito	+	+	+		+ (iii)	
Cobalto	+	+	+	+		
Cobre (+1)	+/-	+	+	+	+/-	+/-
Cobre (+2)	+	+	+	+	+/-	+/-
Crómio (+3)	+	+	+	+	+/-	
Crómio (+6)	+	+	+	+	+/-	+/-
Ferro (+2)	+	+	+	+	+/-	
Ferro (+3)	+	+	+	+	+/-	
Fluoreto	+/-	+	+	+	+/-	+
Fosfato	+	+	+	+		
Magnésio	+	+	+	+		
Manganês	+	+	+	+		
Mercúrio	+/-	+	+	+/-	+/-	
Níquel (+1)	+	+	+	+/-	+/-	+/-
Níquel (+2)	+	+	+	+	+/-	
Nitrato	+	+	+	+		
Nitrito	+	+	+	+		
Potássio	+/-	+	+	+		
Prata	+/-	+	+	+	+/-	
Rádio	+	+	+	+	+	
Selénio (+4)	+	+	+	+		+
Selénio (+6)	+	+	+	+		+
Sódio	+/-	+	+	+		
Sulfato	+	+	+	+		
Sulfito	+	+	+	+		
Sulfureto	+	+	+	+		
Urânio	+	+	+	+	+	
Zinco	+	+	+	+	+/-	+/-

Fontes: AWWA (1990), AWWA (1999), Eckenfelder (2000), Marhaba (2000), STUK (2000), Dianati-Tilaki e Ramazan Ali (2003), Huang *et al.* (2004), Kanokkantung e Jiradecha (2005), WHO (2006), Genç-Fuhrman *et al.* (2007), Rosa *et al.* (2007).

+/-	A UOP permite controlar parcialmente o contaminante (desde que asseguradas as devidas condições de operação).
+	A UOP permite controlar o contaminante (desde que asseguradas as devidas condições de operação).
	Não há informação disponível.

DAF: Flotação por ar dissolvido; GAC: carvão activado granulado; BAC: carvão activado granulado com actividade biológica; NF: nanofiltração; RO: osmose inversa; ED: electrodiálise; IX: permuta iónica.

- (i) Quando na forma protonada (NH_4^+).
- (ii) O ião amónio, NH_4^+ , é removido por IX com clinoptilolite; regeneração com cal (pH 12), sendo o NH_3 formado removido por desorção gasosa.
- (iii) Se o afluente tiver cloro livre, em contacto com carvão activado forma-se clorato, pelo que se devem usar tempos de contacto curtos e evitar usar água afluente clorada.

6 CONTINGÊNCIAS

Mesmo na ausência de eventos agudos de poluição, alguns parâmetros podem variar rápida e, por vezes, imprevisivelmente, tendo as ETA que apresentar capacidade de resposta para conseguirem controlar os contaminantes nessas condições.

Os eventos climáticos como chuvas intensas, destratificação das massas de água, forte e longa insolação são causadores de grandes variações de concentração dos parâmetros turvação, ferro, manganês e cianobactérias. A sobreexploração dos aquíferos costeiros pode igualmente originar alterações significativas da qualidade da água (*e.g.*, condutividade, salinidade) que, neste caso, já não ocorrem em períodos de tempo tão curtos, fazendo-se sentir os seus efeitos durante mais tempo.

Para a detecção atempada de variações bruscas de turvação é essencial a existência de monitorização contínua deste parâmetro (com equipamento instalado em linha na água bruta).

Na ocorrência de variações significativas de turvação afluente à ETA, é necessário proceder à realização de testes laboratoriais de coagulação/floculação/decantação (testes “jar”) para ajuste e optimização das doses de coagulantes e floculantes às novas características da água a tratar. Os coagulantes polinucleares (policloreto de alumínio e/ou ferro) apresentam maior facilidade de adaptação a variações de turvação, além de serem menos sensíveis a variações de temperatura e não baixarem o pH da água (o que evita eventuais necessidades de remineralização da água para a tornar não agressiva).

Usualmente, se a turvação afluente aumenta, também aumenta a eficiência da sua remoção no tratamento, mas há que ter em atenção que o residual pode, também, sofrer um aumento (Campinas *et al.*, 2003a).

A alcalinidade da água é um factor que determina a facilidade de remoção da turvação. Em águas com elevada turvação e baixa alcalinidade, é mais fácil remover turvação (mecanismos de adsorção/neutralização) do que em águas com baixa turvação e elevada alcalinidade (mecanismos de *sweep coagulation*), ou com elevada turvação e elevada alcalinidade. A situação na qual as eficiências de remoção são menores corresponde a águas com turvação e alcalinidade baixas (AWWA, 1999).

Desde que as condições de operação sejam optimizadas, todas as ETA com tratamento convencional por coagulação/floculação/

decantação/filtração podem controlar eficazmente eventos de aumento brusco de turvação da água bruta. Porém, ETA que possuem filtração não precedida de sedimentação têm grandes limitações neste tipo de controlo, respondendo apenas eficazmente a baixas turvações afluentes.

Após chuvas intensas ou nas épocas do ano em que há destratificação das massas de água, deve ser efectuada uma monitorização mais frequente dos parâmetros ferro e manganês para detecção de aumentos significativos das suas concentrações.

Também neste caso é necessária uma rápida resposta das ETA, verificando-se que as estações que possuem pré-oxidação seguida de coagulação/floculação/decantação e filtração têm, geralmente, capacidade para controlar eficazmente eventos de aumento brusco daqueles contaminantes.

No caso do ferro, pode ser utilizado qualquer oxidante químico para este controlo, desde que sejam adicionadas as doses mínimas necessárias para oxidar estequiometricamente o metal (Quadro 16).

No caso do manganês, a reacção de oxidação é mais lenta, sendo necessário proporcionar na ETA um tempo de reacção adequado antes da remoção do precipitado de MnO_2 . Devem ser utilizados oxidantes mais fortes (*e.g.*, ozono, permanganato). As doses a aplicar são indicadas no Quadro 16. É preciso evitar sobredosagens, especialmente de ozono, porque seriam responsáveis pela oxidação do manganês a permanganato, que confere cor rosa à água. Conforme referido anteriormente, a filtração sobre óxido de manganês (*manganese greensand filtration*) é também eficaz para o controlo do manganês.

Quadro 16 – Doses mínimas de oxidante necessárias para controlo de ferro e manganês (AWWA, 1999).

Dose mínima de oxidante para controlo de Fe e Mn	Cloro	Dióxido de cloro	Ozono	Oxigénio	Permanganato de potássio
Fe (II) (mg/mgFe)	0,62	1,21	0,43	0,14	0,94
Mn (II) (mg/mgMn)	0,77	2,45	0,88	0,29	1,92

A condutividade e a salinidade não são controladas em ETA convencionais, principalmente porque estes parâmetros estão associados a iões monovalentes (*e.g.*, Na^+ , K^+ , Cl^-), cujos sais são, em geral, muito solúveis e difíceis de precipitar. Como tal, quando os

teores destes contaminantes se tornam elevados nas origens de água (devido, por exemplo, à sobreexploração de aquíferos costeiros), é necessário recorrer a tecnologias de permuta iônica (com ciclo H⁺) ou a tecnologias de membrana (electrodialise, osmose inversa, ou nanofiltração quando as remoções parciais são suficientes – capítulo 5). Finalmente, é de referir os problemas de formação de bromato que podem surgir em ETA com ozonização, uma vez que a intrusão salina (responsável por valores elevados de condutividade/salinidade) está, regra geral, associada a elevadas concentrações de brometo.

A possibilidade da ocorrência de cianotoxinas na água bruta – como consequência do crescimento exacerbado (florescência) de cianobactérias (vulgarmente designadas por microalgas azuis-verdes) em corpos de água superficiais utilizados para captação de água para consumo humano –, é um sério problema com que muitas ETA se defrontam. O problema associado à eventual libertação para a água das cianotoxinas intracelulares é agravado pelas limitações dos processos convencionais na remoção eficaz das cianotoxinas dissolvidas na água.

Além da necessidade de eliminar as cianotoxinas da água, há que ter em conta que a presença de cianobactérias na água bruta pode influenciar o desempenho da ETA, onde podem ocorrer:

- Perturbações na coagulação e decantação, provocadas por alterações do pH da água, devido à actividade metabólica, e à capacidade de flutuação de muitas cianobactérias;
- Colmatação acelerada dos filtros;
- Perturbação das condições de oxidação/desinfecção;
- Incremento da formação de subprodutos da oxidação;
- Aumento dos teores de NOM e AOC na água tratada.

Assim, e dada a rapidez com que frequentemente as florescências se desenvolvem, é imperativo que as ETA em questão disponham de sistemas de alerta e de barreiras à passagem das cianotoxinas para os sistemas de distribuição.

A OMS (Chorus e Bartram, 1999) sugere a implementação de um Programa de Vigilância com três níveis de alerta (Quadro 17), baseados nos resultados da monitorização do número de células e da concentração de microcistina-LR (MC-LR) na água bruta, a que devem corresponder outros tantos níveis de resposta definidos em função da capacidade das ETA para eliminar cianotoxinas.

Quadro 17 – Níveis de alerta propostos pela OMS
(Chorus e Bartram, 1999).

Alerta		Monitorização	Cianobactérias (cel./mL)	Clorofila-a (µg/L)	MC-LR (µg/L)
Nível	Vigilância	semanal	1 a 2.000	< 1	-
	1	> semanal	< 100.000	< 50	< 1
	2	frequente	> 100.000	> 50	> 1

A detecção de um número relativamente baixo de células na água bruta (nível de vigilância) indicia a possibilidade de se estar no início do desenvolvimento de florescências. Se o número de células encontrado corresponde ao nível 1, a frequência de monitorização deve ser aumentada, de modo a que se possam detectar mudanças rápidas na massa de cianobactérias. A entrada no nível 2 requer uma resposta adequada da ETA que garanta a remoção eficaz das cianotoxinas da água (e.g., tratamento com carvão activado). Na ausência desta capacidade, há que implementar um plano de contingência, que poderá passar pela mudança da captação ou, na ausência desta possibilidade, deverá ser avaliada a necessidade da implementação de um plano de emergência, que, em última instância, poderá implicar a interrupção do fornecimento de água.

Nas ETA, a eliminação das células de cianobactérias ocorre, sobretudo, na coagulação/floculação/decantação. Contudo, tanto nesta etapa, como nas restantes operações/processos utilizadas para remover material em suspensão (e.g., filtração ou flotação por ar dissolvido em alternativa à decantação), a eficiência de remoção de células é variável devido a grandes diferenças de tamanho, forma e composição das diferentes espécies, bem como das condições de operação dos sistemas de tratamento e das características físico-químicas da água – em particular, temperatura, pH, força iónica e teor em NOM –, que afectam a eficiência da coagulação, *i.e.*, da destabilização das cianobactérias.

A pré-oxidação, geralmente utilizada de forma a facilitar a coagulação da NOM, pode também incrementar a remoção de células cianobacterianas presentes. Não devem ser utilizadas sobredosagens de oxidante de forma a evitar a libertação das cianotoxinas para a água em tratamento. Embora o ozono ou o cloro possam degradar algumas cianotoxinas (e.g., microcistinas), tal não ocorre de modo a garantir uma eliminação satisfatória das cianotoxinas nas doses mais elevadas normalmente utilizadas. Por esta razão, sempre que existam cianobactérias na água bruta, devem ser

usadas baixas concentrações ou um oxidante mais fraco, e é desaconselhada a pré-oxidação com doses elevadas de oxidante, excepto se a jusante existir uma barreira para a remoção eficaz de cianotoxinas (*e.g.*, carvão activado).

Mesmo quando as ETA são eficazes na remoção de células de cianobactérias, deve garantir-se a eliminação de toxinas extracelulares, presentes na água bruta ou libertadas pelas células para a água durante o tratamento.

Dos processos disponíveis, a adsorção em carvão activado, a nanofiltração e o processo PAC/UF são os processos mais eficazes para a remoção de cianotoxinas da água.

O carvão activado pode ser utilizado na forma de pó (PAC) ou granulado (filtração em GAC/BAC). Em qualquer dos casos, e para além das condições de operação (*e.g.*, tipo e dose de PAC, taxa de filtração em GAC/BAC), a eficácia de remoção é influenciada pela concentração e tipo de cianotoxina (*e.g.*, regra geral a eficiência de remoção da anatoxina-a é menor que a das microcistinas), das propriedades do carvão (*e.g.*, granulometria, porosidade, carga superficial) e da composição da água (*e.g.*, teor em NOM, pH, dureza).

Como se depreende do Quadro 15, a nanofiltração é a barreira mais segura à passagem de cianotoxinas, uma vez que, quando adequadamente operada, não é influenciada pelas características da água.

7 NOTAS FINAIS

O presente Guia Técnico constitui uma sistematização geral dos principais aspectos relacionados com as capacidades e limitações das ETA portuguesas no controlo de contaminantes que possam ocorrer nas origens de água destinadas à produção de água para consumo humano. Mesmo assim, ficaram evidenciadas a multiplicidade, complexidade e variabilidade dos problemas associados ao tratamento de água para consumo humano, cuja solução se encontra, em muitos casos, ainda condicionada por limitações do actual estado do conhecimento sobre as características e os comportamentos de muitos contaminantes.

As limitações das diferentes tecnologias para responder a cada um e à globalidade destes problemas tornam imperativa a existência de barreiras múltiplas à passagem de contaminantes para a rede pública, particularmente dos que podem pôr em perigo a vida ou a saúde do consumidor. A implementação de planos de segurança da água, tal como é proposto pela OMS (WHO, 2006), responde a este imperativo e constitui uma metodologia cuja aplicação adequada garante o efectivo controlo da qualidade da água, da captação à torneira do consumidor.

BIBLIOGRAFIA

AWWA (1990). *Water quality and treatment Water Quality and Treatment – A handbook of community water supplies*. 4.^a ed. McGraw-Hill. New York.

AWWA (1999). *Water Quality and Treatment – A handbook of community water supplies*. 5.^a Ed. McGraw-Hill. New York.

BECKER, W. C. e O'MELIA, C. R. (2000). *Ozone: its effect on coagulation and filtration*. Proc. of 1st World Water Congress of the International Water Association.

BURG, W. P. e BORGSTEEDE, F. H. (1987). *Effects of various disinfectants on the development and survival possibilities of the pre-parasitic stages of *Ostertagia ostertagi*, *Cooperia oncophora* and *Ascaris suum**. Tijdschr Diergeneeskd, 1,112(13), p. 769-78.

CAMPINAS, M., LUCAS, H. e ROSA, M. J. (2003a). *Análise das eficiências de tratamento na ETA de Alcantarilha*. Recursos Hídricos, 24(2), p. 21-31.

CAMPINAS, M., RIBAU TEIXEIRA, M., LUCAS, H. e ROSA, M. J. (2003b). *Previsão da capacidade de remoção de cianobactérias e cianotoxinas na ETA de Alcantarilha*. Tecnologia da Água. Edição I, p. 60-66, Maio.

CARMICHAEL, W. W. (1997). *The cyanotoxins*. Advances in Botanical Research, 27, p. 211-256.

CARSON, B. e MASTEN, S. (2000). *Cylindrospermopsin. Review of toxicological literature*. Integrated Laboratory Systems, National Institute of Environmental Health Sciences, December.

CHORUS, I. e BARTRAM, J. (1999). *Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management*. WHO.

DIANATI, T. e RAMAZAN, A. (2003). *Study on the removal of Cadmium from water environment by adsorption on GAC, BAC and Biofilter*. Diffuse Pollution Conference, Dublin.

ECKENFELDER, W. W. (2000). *Industrial water pollution control*. 3.^a ed. McGraw-Hill. Boston.

EDWARDS, M., BOLLER, M. e BENJAMIN, M. (1993). *Effect of pre-ozonation on removal of organic matter during water treatment plant operations*. *Water Science and Technology*, 27 (11), p. 37-45.

EDZWALD, J. K. e Van BENSCHOTEN J. B. (1990). *Aluminum coagulation of natural organic matter. In Chemical Water and Wastewater Treatment*. H.H. Hahn and R. Klute (eds.). Springer-Verlag, Berlin, p. 341-359.

GALAPATE, R. P., ALOYSIUS, U. B. e OKADA, M. (2001). *Transformation of dissolved organic carbon matter during ozonation: effects on trihalomethane formation potential. Water Research*, 35 (9), p. 2201-2206.

GENÇ-FUHRMAN, H., MIKKELSEN, P. S. e LEDIN, A. (2007). *Simultaneous removal of As, Cd, Cr, Cu, Ni and Zn from storm-water: experimental comparison of 11 different sorbents. Water Research*, 41 (3), p. 591-602.

HALL, T., SCHMIDT, W., CODD, G. A., VON GUNTEN, U., KAAS, H., ACERO, J., HEIJMAN, B., MERILUOTO, J., ROSA, M. J., MENAIA, J. e MANCKIEWICZ, J. (2005). *Best practice guidance for management of cyanotoxins in water supplies. TOXIC EVK12002-00107 – Research supported by the European Commission under the Fifth Framework Programme and contributing to the implementation of the Key Action Sustainable Management and Quality of Water*.

HUANG, W., CHEN, C. Y. e PENG, M. Y. (2004). *Adsorption/ reduction of bromate from drinking water using GAC: effects on carbon characteristics and long-term pilot study. Water SA*, 30, p. 369-375.

IRAR (2005). *Recomendação IRAR n.º 07/2005 – Controlo dos bromatos na água para consumo humano*. Instituto Regulador de Águas e Resíduos.

KANOKKANTAPONG, V. e JIRADECHA, C. (2005). *Enhancing aluminium and iron adsorption on the modified granular activated carbon by permanganate ion. Thai Environmental Engineering Journal*, 19 (1), p. 29-39.

LIANG, L. e SINGER, P.C. (2003). *Factors influencing the formation and relative distribution of haloacetic acids and trihalomethanes in drinking water. Environmental Science & Technolony*, 37, p. 2920-2928.

LIDE, D. R. (1990). *Handbook of Chemistry and Physics*. CRC press, 71.^a ed. (8.16-8.23).

MARHABA, T. (2000). *Examining bromate ion removal by GAC through RSSCT and pilot scale columns. Environmental Engineering and Policy*, 2, p. 59-64.

NEWCOMBE, G. e NICHOLSON, B. (2002). *Treatment options for the saxitoxin class of cyanotoxins. Proc. of the 2nd IWA World Water Congress.*

NEWCOMBE, G. e NICHOLSON, B. (2004). *Water treatment options for dissolved cyanotoxins. Journal of Water Supply: Research and Technology – Aqua*, 53, p. 227-239.

RIBAU TEIXEIRA M. e ROSA, M. J. (2003). *Ultrafiltração no tratamento de águas para consumo humano: fundamentos e aplicações. Recursos Hídricos*, 24 (2), p. 7-20.

RIBAU TEIXEIRA, M. e ROSA, M. J. (2006a). *The impact of the water background inorganic matrix on the natural organic matter removal by nanofiltration. J. Membrane Sci.*, 279, p. 513-520.

RIBAU TEIXEIRA, M. e ROSA, M. J. (2006b). *Neurotoxic and hepatotoxic cyanotoxins removal by nanofiltration, Water Research*, 40, p. 2837-2846.

RIBAU TEIXEIRA e M., ROSA, M. J. (2006c). *Integration of dissolved gas flotation and nanofiltration for M. aeruginosa and associated microcystins removal, Water Research*, 40, p. 3612-3620.

RIBAU TEIXEIRA, M., ROSA, M. J. (2006d). *Comparing dissolved air flotation and conventional sedimentation to remove cyanobacterial cells of Microcystis aeruginosa. Part I: Key operating conditions. Separation and Purification Technology*, 52, p. 84-94.

RIBAU TEIXEIRA, M. e ROSA, M. J. (2007). *Comparing dissolved air flotation and conventional sedimentation to remove cyanobacterial cells of Microcystis aeruginosa. Part II: The effect of water background organics. Separation and Purification Technology*, 53, p. 126-134.

RODRIGUEZ, E., ONSTAD, G., KULL, T., METCALF, J., ACERO, J. e von GUNTEN, U. (2007). *Oxidative elimination of cyanotoxins: comparison of ozone, chlorine, chlorine dioxide and permanganate. Water Research*, 41, p. 3381-3393.

ROSA, M. J., CAMPINAS, M., SOARES, S. e CECÍLIO, T. (2007). *Alterações tecnológicas a implementar na linha de tratamento para cumprimento da nova legislação relativa à qualidade de água para consumo humano. Tecnologia da Água*, Edição II, 49, p. 18-31.

STUK (2000). *Treatment techniques for removing natural radionuclides from drinking water. STUK–Radiation and Nuclear Safety Authority. Helsinki.*

THOMAS, R. G. (1990). *Volatilization from water*. In *Handbook of Chemical Property Estimation Methods: Environmental Behavior of Organic Compounds*, W. J. Lyman, W. F. Reehl, and D. H. Rosenblatt (Eds.). The American Chemical Society, Washington, DC.

USEPA (1999a). *Enhanced coagulation and enhanced precipitative softening guidance manual*. Environmental Protection Agency – Office of Water, EPA 815-R-99-012, Maio.

USEPA (1999b). *Alternative disinfectants and oxidants guidance manual*. Environmental Protection Agency – Office of Water, EPA 815-R-99-014, Abril.

VELÁSQUEZ, M. T., MARTÍNEZ, J., MONJE-RAMÍREZ, I. e ROJAS-VALENCIA, M. N. (2004). *Destruction of helminth (Ascaris suum) eggs by ozone*. *Ozone Science and Engineering*, 26(4), p. 359-366.

VEIRA, P., ROSA, M. J. e ALEGRE, H. (2007). *Estações de tratamento de água para consumo humano em Portugal*. ITH 44. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa.

WESTERHOFF, P., YOON, Y., SNYDER, S., WERT, E. (2005). Fate of endocrine-disruptor, pharmaceutical, and personal care product chemicals during simulated drinking water treatment processes. *Environmental Science and Technology*, 39, p. 6649-6663.

WHO (2004). *Water Treatment and Pathogen Control*. M. W. LeChevallier and K.K. Au (Eds.). World Health Organization. Geneva.

WHO (2006). *Guidelines for drinking-water quality, First addendum to third edition, Volume 1, Recommendations*. World Health Organization. Geneva.

Sítios de Internet

Base de dados ChemIDplus da US National Library of Medicine: <http://sis.nlm.nih.gov/chemical.html>, acedida em Junho de 2009.

Base de dados Cyanosite (The toxic cyanobacteria homepage): <http://www-cyanosite.bio.purdue.edu/cyanotox/cyanotox.html>, acedida em Julho de 2009.

Base de dados FOOTPRINT da University of Hertfordshire: <http://www.herts.ac.uk/aeru/footprint/en/>, acedida em Julho de 2009.

Base de dados PHYSPROP da Syracuse Research Corporation: <http://www.syrres.com/esc/physdemo.htm>, acedida em Julho de 2009.

Base de dados TOXNET da US National Library of Medicine: <http://www.toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/htmlgen?HSDB>, acedida em Julho de 2009.

O tratamento de água para consumo humano face à qualidade da água de origem

O conhecimento das capacidades e limitações das estações de tratamento de água (ETA) é fundamental para garantir a boa qualidade da água para consumo humano e a protecção da saúde pública.

Neste sentido, o IRAR e o LNEC resolveram publicar o presente Guia Técnico sobre o tratamento da água para consumo humano face à qualidade da água de origem, que tem como objectivo sistematizar as capacidades e limitações das ETA existentes em Portugal no controlo de contaminantes que possam ocorrer nas origens de água destinadas à produção de água para consumo humano.



INSTITUTO REGULADOR DE ÁGUAS E RESÍDUOS

Centro Empresarial Torres de Lisboa
Rua Tomás da Fonseca, Torre G, 8.º andar - 1600-209 LISBOA