



ANÁLISE DE CICLO DE VIDA (ACV) DE REATORES FOTOQUÍMICOS UVV E UVC COMBINADOS PARA TRATAMENTO DE EFLUENTE DE LAVANDERIA HOSPITALAR

Rômulo de Oliveira Schwaickhardt

Químico Industrial, Mestre em Tecnologia Ambiental – Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC.
romulocpf@yahoo.com.br

Sabine Pommerehn

Bióloga – Universidade de Santa Cruz do Sul-UNISC. email: sabinep@mx2.unisc.br

Júlia Fernanda Radtke

Acadêmica do Curso de Química Industrial – Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC.
jfernanda@mx2.unisc.br

William Ribeiro

Acadêmico do Curso de Biologia – Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC. e-mail:
ribwillian@hotmail.com

Ênio Leandro Machado⁽¹⁾

Químico Industrial, Doutor em Engenharia – Universidade de Santa Cruz do Sul-UNISC

Endereço⁽¹⁾: Universidade de Santa Cruz do Sul, Mestrado em Tecnologia Ambiental, Avenida
Independência, 2293. Bairro Universitário. Santa Cruz do Sul - RS - CEP: 96815-900 - Brasil - Tel: (51)
3717-7545 - e-mail: enio@unisc.br

Resumo: Processos fotoquímicos da combinação de reator emerso (com lâmpada UVV) e imerso (lâmpada UVC) foram aplicados para a avaliação da redução dos poluentes de efluente da etapa de enxágue de lavanderia hospitalar. Para verificação da sustentabilidade ambiental dos processos agregou-se aplicação de Análise de Ciclo de Vida (ACV) nas diferentes configurações pesquisadas. A caracterização dos efluentes da lavanderia hospitalar foi feita através dos parâmetros: DQO, DBO₅, NTK, P_{total}, pH e turbidez. A ACV foi feita considerando a definição do consumo de energia, reagentes e eficiência da redução da carga poluente, aplicando as etapas de Caracterização e Normalização com método Recipe (H) através do software SimaPro 7.3.3. O processo de ozonização (geração principal do reator emerso UVV) foi o que apresentou melhores resultados na relação kWh/DQO removida, assim como o processo UVC, sendo os de menores impactos ambientais para os parâmetros de Caracterização e Normalização da ACV. A Normalização revelou maiores intensidades de impactos ambientais para a toxicidade humana, a ecotoxicidade das águas de superfície e para a eutrofização. Também foi determinado que o uso de energia elétrica de média tensão foi à causa da maioria dos 14 impactos ambientais avaliados, bem como, para o efluente foi associada principalmente a eutrofização.

Palavras-chave: Efluente hospitalar; fotorreatores UVV e UVC; Análise de Ciclo de Vida e Sustentabilidade.



LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) OF PHOTOCHEMICAL REACTORS UVV AND UVC COMBINED FOR TREATMENT OF HOSPITAL LAUNDRY WASTEWATER

Abstract: Photochemical Processes combination emerged reactor (with VUV light) and immersed (UVC lamp) were applied to evaluate the reduction in the wastewater pollutants hospital laundry rinse step. To check the environmental sustainability of processes added application of Life Cycle Analysis (LCA) in the different search settings. The characterization of the hospital laundry effluent was made through the parameters: COD, BOD₅, TKN, Ptotal, pH and turbidity. LCA has been done considering the definition of energy consumption, reagents and reducing the pollution load efficiency by applying the steps of Characterization and Normalization with method Recipe (H) through SimaPro 7.3.3 software. The ozonation process (main generation emerged reactor UVV) showed the best results in relation kWh / COD removed, as well as the UV process, and the lower environmental impacts for the parameters of Characterization and Standardization of ACV. Standardization revealed higher intensities of environmental impacts on human toxicity, ecotoxicity of surface water and to eutrophication. It was also determined that the use of electricity medium voltage was the cause of most of the 14 environmental impacts evaluated, as well as for the effluent was mainly associated to eutrophication.

Keywords: Hospital wastewater; Photochemical reactors VUV and UVC; Life Cycle Analysis and Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

Várias são as razões para pesquisar o tratamento de efluentes hospitalares, especialmente aqueles provenientes da lavanderia. A referência de ecotoxicidade, fitotoxicidade, genotoxicidade e a presença de compostos refratários justificam a necessidade de estudos para processos de tratamento de efluentes ditos avançados, com ênfase em métodos de oxidação ou destes combinados com processos separadores de fases e de biodegradação.

Quanto à referência dos impactos ambientais é importante ressaltar que os efluentes hospitalares são fontes capazes de aumentar a toxicidade dos efluentes urbanos de 5 a 15 vezes a mais, quando são descartados sem o devido tratamento (BOILLLOT et al., 2008). A estimativa de consumo de água em um hospital é de 400 a 1200 litros/leito/dia e na contribuição da lavanderia há o peso de quase 40% do total da vazão diária de efluentes gerados (LUTTERBECK, 2010).

Segundo Gautam et al., (2007), efluentes hospitalares são perigosos tanto para o equilíbrio ecológico quanto para a saúde pública. Podem ser encontrados poluentes patogênicos, radioativos, resíduos químicos, infecciosos e medicamentos, que se não tratados, podem levar a surtos de doenças transmissíveis como às epidemias de diarreia, à contaminação da água, e a poluição radioativa.

Estudos mostraram também que a presença de antibióticos como fluoroquinolonas no efluente hospitalar podem ser responsáveis pelo seu potencial genotóxico, este potencial pode ser tanto mutagênico como carcinogênico para bactérias, podendo torná-las mais resistentes a antibióticos (BROWN et al., 2006).

Os componentes orgânicos presentes nos efluentes hospitalares podem apresentar impactos ao serem descartados diretamente no meio ambiente, pois os fármacos residuais presentes são utilizados



para exercerem atividade biológica. A concentração dos fármacos residuais no ambiente aquático varia na faixa de $\mu\text{g L}^{-1}$ a ng L^{-1} , sendo que estas concentrações necessitam de métodos de análises extremamente sensíveis (PAIVA et al., 2011; KÖHLER et al., 2012).

Entre os setores do hospital estudado, esta pesquisa foi desenvolvida com os efluentes gerados no setor de lavanderia, onde uma das etapas mais críticas de limpeza das roupas pode ser considerada a etapa de enxágue das compressas. Segundo Albrecht (2007), a nocividade ambiental dos efluentes da lavanderia hospitalar é uma das mais acentuadas entre os diversos setores devido à presença dos poluentes em maior concentração e dos produtos químicos inseridos.

Como forma de tratamento, inicialmente se verificou a capacidade de algumas configurações de processos oxidativos avançados, buscando minimizar os impactos que os efluentes geram, pois este tipo de tratamento tem poder de degradação, assim como potencial para aumentar a biodegradabilidade dos efluentes (CHONG e JIN, 2012).

No entanto, os avanços de pesquisas com o tratamento dos efluentes hospitalares mostram a necessidade de continuar investigações que apliquem processos com coeficiente de maior sustentabilidade ambiental/eficiência de remoção da carga poluente. As pesquisas anteriormente realizadas, especialmente por Lutterbeck, 2010, Kern et al., 2013 e Kern et al., 2015, apresentam definições de condições para detoxificação, porém usando o sistema de ozonização com efeito Corona e sem a aplicação da ACV.

A geração de ozônio pode ser por três processos diferentes: geração por descarga elétrica com alta voltagem, tanto com correntes de oxigênio ou ar através dos eletrodos; geração em solução aquosa no sítio anódico e via radiação UV (CHRISTENSEN et al., 2013).

Buscando desenvolver um processo de tratamento para os efluentes hospitalares oriundos da lavanderia, com maior eficiência inicialmente avaliada por parâmetros gerais de carga poluente, e com menor impacto ambiental, este trabalho utilizou uma nova combinação de reatores avaliando impactos ambientais referentes às diferentes configurações do sistema.

2. METODOLOGIA

2.1. Caracterizações Analíticas

A coleta dos efluentes foi executada semanalmente na lavanderia de um hospital localizado na região do vale do Rio Pardo. Este produz em média 150m^3 de efluentes diariamente, sendo que 35% do total são de responsabilidade do setor de lavanderia. Para realizar os processos de tratamento foi coletada a água de descarte do primeiro enxágue das compressas, etapa em que não há a adição de produtos químicos para limpeza, somente a adição de água e agitação mecânica.

O efluente coletado foi levado imediatamente ao laboratório onde foram realizadas as análises físico-químicas e biológicas e iniciado o processo de tratamento.

As análises físico-químicas, químicas e biológicas realizadas foram: DQO, DBO_5 , ecotoxicidade aguda; NTK, N-NH_3 , P_{total} , segundo o *Standard Methods for Water and Wastewater* (2012). A espectrometria de varredura no UV-Vis foi realizada utilizando um espectrofotômetro da marca Genesys entre os comprimentos de onda de 190nm e 700nm.

2.2. Ensaios de Tratamento dos Efluentes

Os ensaios de tratamento foram realizados a partir da recirculação da amostra durante 180 minutos entre dois reatores sendo um horizontal e outro vertical com capacidade para 1,25 L de amostra (Figura 1).

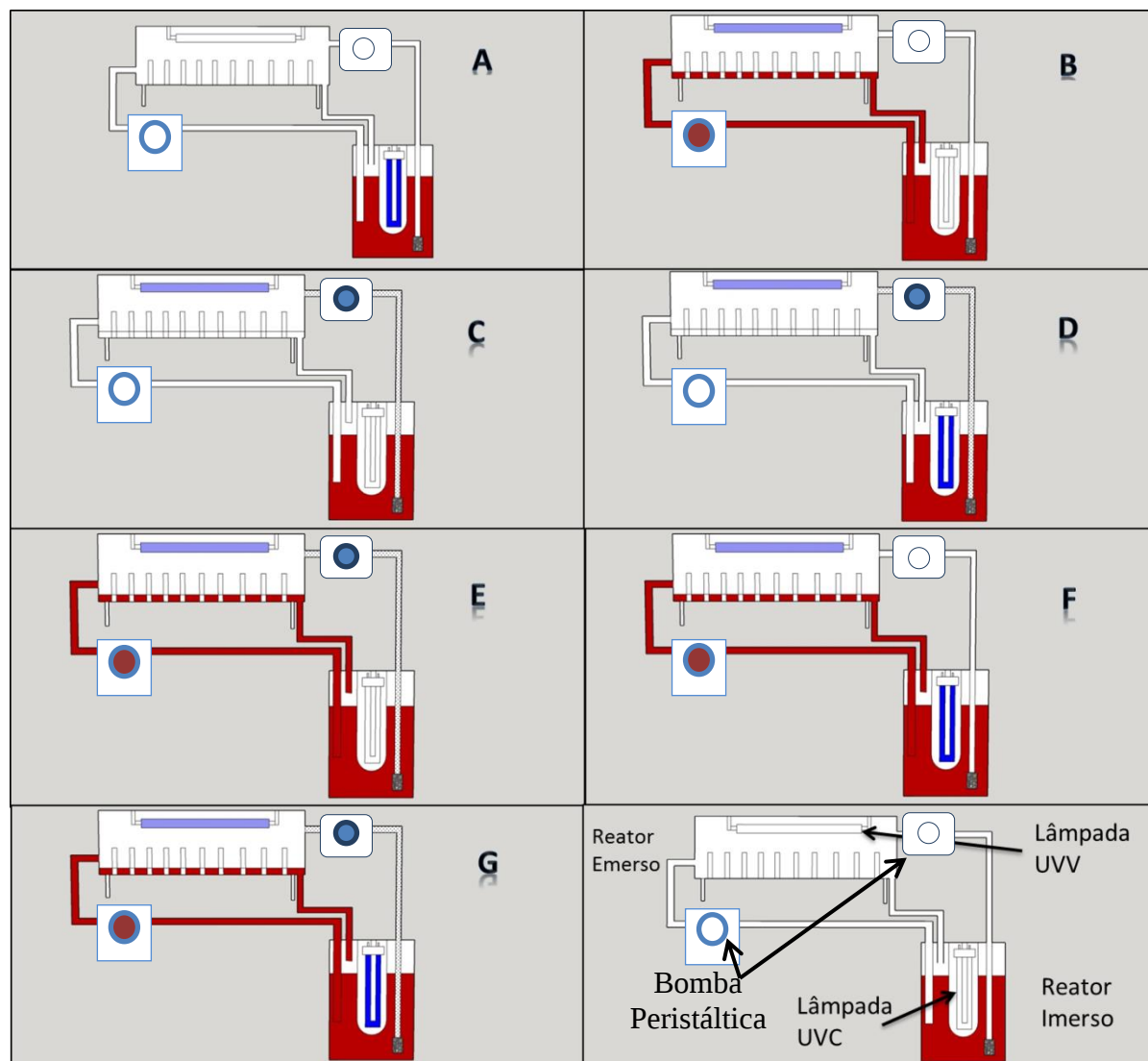


Figura 1: Reator emerso (horizontal) e imerso (vertical) e bombas peristálticas utilizados nos tratamentos do efluente da lavanderia hospitalar. Configurações dos testes executados, A – UVC; B – UVV; C – O₃; D – UVC/O₃; E – UVV/O₃; F – UVV/UVC; G – UVV/UVC/O₃.

O reator horizontal foi confeccionado em acrílico com acoplamento de lâmpada UV-Vácuo ($\lambda=185\text{nm}$) de 14 W de potência para a geração de ozônio e degradação da amostra. Chicanas foram colocadas no interior para aumentar o tempo de retenção hidráulica da amostra, uma entrada e saída para o gás e uma entrada e saída de líquidos.

O reator vertical foi feito em formato cilíndrico com parede de vidro e tampa em polietileno, tendo tubo de quartzo no centro para proteção da lâmpada UVC ($\lambda=254\text{nm}$) de 11 W. A inserção de ar foi feita para o reator horizontal a partir de uma pedra porosa, o reator ainda contou com uma saída de gás, uma entrada e uma saída de líquidos.

Como forma de avaliação foram executados 7 diferentes testes a partir da configuração inicial dos reatores, buscando identificar se o melhor processo seria a utilização de todos os processos combinados.

2.3. Análise do Ciclo de Vida e Prognóstico Ambiental dos Processos de Tratamento

A definição do escopo para o ACV foi a partir dos dados inventariados para os processos de tratamento dos efluentes da lavanderia hospitalar referentes à Figura 2.

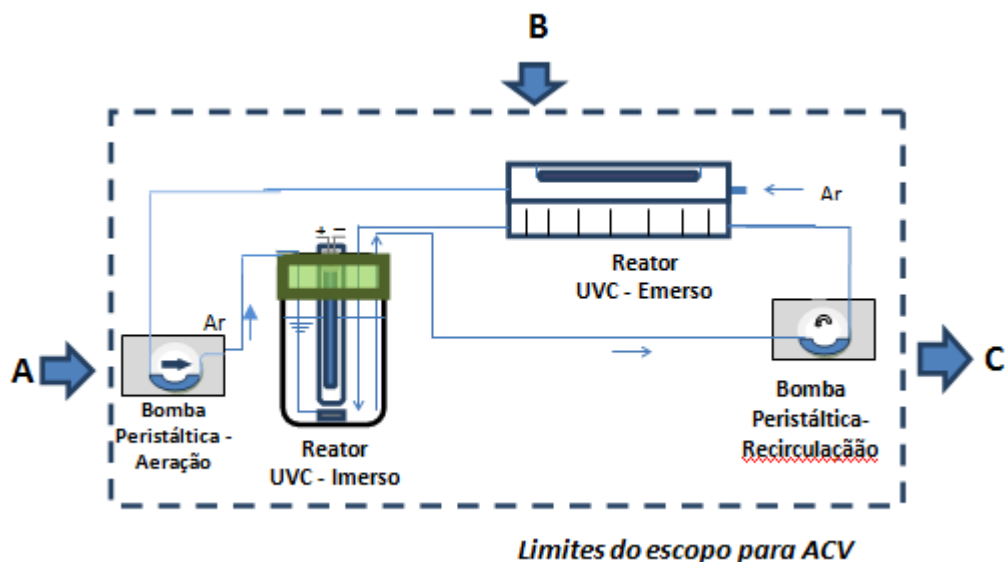


Figura 2: Representação simplificada dos sistemas resultantes das combinações UVV e UVC. **A** = Afluente; **B** = Recursos (energia e produtos químicos) e **C** = Efluente tratado.

A proposta metodológica desenvolvida para definição do escopo nos POAs estudados considerou a avaliação dos seguintes itens: equipamentos, o consumo de energia elétrica e produtos químicos.

O inventário dos parâmetros de carga poluente dos efluentes gerados foi associado com as análises de caracterização da DQO, DBO₅, Fósforo Total e NTK. A energia elétrica consumida foi inventariada a partir das especificações dos equipamentos.

Os valores diretos foram ajustados para a quantidade equivalente de 1 m³ de efluente tratado como tempo de tratamento de 3 horas (Unidade Funcional).

A aplicação do software *SimaPro 7.3.3* foi feita para os estudos de ACV levando em conta a aplicação do método *ReCiPe* (H). A quantidade de equivalência para o balanço material e energético considerou 1 m³ de efluentes líquidos gerados como o Fluxo de Referência dos para parâmetros de carga kg DQO m⁻³; kg DBO₅ m⁻³; kg NTK m⁻³ e kg P total m⁻³. Procedimentos de Caracterização e Normalização foram aplicados na escala *Midpoint*.

Foram considerados os mesmos procedimentos de Muñoz (2003) para seleção dos parâmetros de análise: extração dos recursos bióticos e abióticos; uso do solo; aquecimento global; depleção do ozônio estratosférico; emissão de material particulado; toxicidade humana; ecotoxicidade de água de superfície; criação de oxidantes fotoquímicos; acidificação; eutrofização e recursos abióticos. Visando melhorar a compreensão e aplicações da ACV foram consideradas a *ISO 14040* (Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura) e a *ISO 14044* (Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e Orientação), ambas de 2009.



3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização do efluente da lavanderia hospitalar

Em comparação com outros trabalhos apresentados na literatura (ALBRECHT, 2007; KERN et al., 2013; LUTTERBECK, 2010) o efluente oriundo da lavanderia demonstrou algumas diferenças nos fatores de carga. Valores de DQO e DBO₅ ficaram acima dos valores apresentados em outras pesquisas, enquanto que NTK ficou abaixo e a turbidez praticamente manteve os mesmos valores (Tabela 1). Somente UVV/UVC/O₃ detoxificou. A partir destes dados foram encaminhadas as avaliações cujos resultados podem ser verificados na Tabela 2.

Tabela 1: Caracterização do efluente do enxágue das compressas.

Parâmetros	Efluente bruto	Limites Resoluções Conesma/RS 128 e 129 /06	Limite Vazão m ³ d ⁻¹
DQO (mg L ⁻¹)	6364	360	20≤Q<100
DBO ₅ (mg L ⁻¹)	2040	150	20≤Q<100
N-NH ₃ (mg L ⁻¹)	4,2	20	Q<100
NTK (mg L ⁻¹)	12,88	20	Q<100
pH	7,11	7,0	-
Turbidez (NTU)	165	-	-
Condutividade (μScm ⁻¹)	703	-	-
Fósforo total (mg L ⁻¹)	4,8	4	Q<100
Ecotoxicidade Aguda (EC ₅₀ %)	6,7	100	Q>10.000

Tabela 2: Dados de caracterização dos afluentes e efluentes estudados para consideração de cargas poluentes.

Amostras ↳ Parâmetros ↓ (mg L ⁻¹)	Bruto	O ₃	UVV	UVC	UVC + UVV	UVV/O ₃	UVC/O ₃	UVV/UVC/O ₃
DQO	4232	1448,3	2048,3	2181,7	2415	2065	2265	2398,3
DBO ₅	1380	1200	1440	1560	1020	1200	1200	600
N-NH ₃	4,2	1,96	2,52	2,52	2,52	4,2	4,2	4,2
NTK	12,8	11,76	11,76	11,76	10,08	11,76	12,88	11,76
Fósforo Total	4,8	4,6	4,2	4,6	4,7	5,6	6,5	5,0
Ecotoxicidade Aguda (EC ₅₀ %)	6,7	12,5	37,5	74	11	18	70	100

Os dados da Tabela 2 são referência para o estudo de impacto via ACV, sendo priorizados para o compartimento de emissões para as águas e considerações de valores na unidade funcional.



3.2. Análise de Ciclo de Vida (ACV) dos Processos Estudados

Os dados do *INVENTÁRIO* 1 são referentes aos valores diretos e indiretos do sistema estudado, apresentados em duas etapas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3: Inventários diretos das etapas de operação dos processos de tratamento de efluentes da lavanderia hospitalar estudados.

Processos	Valores de Consumo de Energia das Quantidades Equivalentes por Processo	
<u>Especificações Unitárias de Consumo de Energia para a Unidade de Bancada</u> <u>Energia (W)</u>	<u>Configuração 1 -</u> Unidade de Bancada somente extrapolada. <u>Energia Total por</u> <u>Processo (kW)</u>	<u>Configuração 2 -</u> Perspectiva da Unidade Piloto. <u>Energia (kW)</u>
Processo UVV – Reator Emerso*	153,6	33,6 kW – Lâmpada UVV 0,624 kW – Bomba Centrífuga de Recirculação Total =34,224
14W – Lâmpada UVV		
50 W – Bomba de Recirculação		
Processo UVC – Reator Imerso**		
11W – UVC	146,4	26,4 kW – Lâmpada UVC 0,624 kW – Bomba Centrífuga de Recirculação Total =27,024
50 W – Bomba de recirculação		
Processo UVV/UVC***		
50 W – Bomba de recirculação	180	60 kW – Lâmpadas UVV/UVC 0,624 kW – Bomba Centrífuga de Recirculação Total =60,624
25 W das Lâmpadas UVV e UVC		
Processo O₃****		
11 W – Lâmpada UVV	146,4	26,4 kW – Lâmpada UVV 1,2 kW – Compressor radial Total =27,6
50 W – Bomba de aeração		
Processo UVV/O₃*****		
11 W - Lâmpada de’ Vapor de Mercúrio	266,4	26,4 kW – Lâmpada UVV 1,824 kW – Bomba Centrífuga de Recirculação e Compressor radial Total =28,224
50 W – Bomba de recirculação		
50 W - Bomba de aeração		
Processo UVC/O₃*****		
25 W das Lâmpadas UVV e UVC	180,0	60 kW – Lâmpadas UVV/UVC 1,2 kW – Compressor radial Total =61,2
50 W – Bomba de aeração		
Processo UVV/UVC/O₃		
25 W das Lâmpadas UVV e UVC	300	60 kW – Lâmpadas UVV/UVC 1,824 kW – Bomba Centrífuga de Recirculação e Compressor radial Total =61,8
50 W da Bomba de recirculação		
50 W da Bomba de aeração		
Produtos Químicos		
Todos os Processos aplicaram		
H ₂ SO ₄ 45% v/v		0,8 L
NaOH 50% m/v		0,2 L

Os dados da Tabela 3 também devem considerar as seguintes especificações: Quantidades equivalentes para 1m^3 em 3 horas de tratamento com duas configurações de escalas: *Bancada somente extrapolada e Piloto. Densidades de consumo de energia (W L^{-1} – Reatores com Volume total de 1,25 L): *51,2 W L^{-1} ; **48,8 W L^{-1} ; ***60 W L^{-1} ; ****64,8 W L^{-1} ; *****88,8 W L^{-1} ; ***** 60 W L^{-1} ; *****100 W L^{-1} . Dados adicionais da unidade de bancada: Vazão da bomba peristáltica para recirculação de efluente= 3,31 L h^{-1} ; Vazão de ar com uso da bomba peristáltica para aeração= 1,05 L min^{-1} .*

O INVENTÁRIO 2 apresentado na Tabela 4 resgatou os dados localizáveis no banco de dados dos Simapro 7.3.3.

Tabela 4: INVENTÁRIO 2 – Dados de adequação ao software SimaPro 7.3.3 (1m^3 em 3 horas de tratamento).

Processos	Valores das Quantidades Equivalentes por Processo na Configuração 2			
Especificações Unitárias de Consumo	Energia (kW)			
	Eletricidade de Média Voltagem, BR, grau BR U			
Processo UVV – Reator Emerso	34,2			
Processo UVC – Reator Imerso	27,0			
Processo UVV/UVC	60,6			
Processo O_3	27,6			
Processo UVV/ O_3	28,2			
Processo UVC/ O_3	61,2			
Processo UVV/UVC/ O_3	61,8			
Produtos Químicos	Valores			
Banco de Dados Ecoinvent -Simapro				
Ácido sulfúrico, RER U	1,47 kg			
Hidróxido de sódio, 50% em água, célula da membrana, planta industrial, RER U	0,1 kg			
Efluente	Parâmetros de Carga Poluente (kg m^{-3})			
	DQO	DBO ₅	NTK	P _{Total}
Bruto	4,23	1,38	0,0128	0,0048
O_3	1,48	1,2	0,011	0,0046
UVV	2,04	1,4	0,011	0,0042
UVC	2,18	1,56	0,011	0,0046
UVC/UVV	2,41	1,02	0,011	0,0047
UVV/ O_3	2,06	1,2	0,011	0,0056
UVC/ O_3	2,26	1,2	0,012	0,0065
UVV/UVC/ O_3	2,49	0,6	0,011	0,005

O estudo constante para a ACV deve considerar continuidade como em sistemas de gestão ambiental, SGA, ou seja, agregar mais valores por ampliação das análises e de criação de novos bancos de dados que os softwares de ACV já permitem. Porém, criar novos bancos de dados muitas vezes esbarram em obter informações com fornecedores, especialmente de produtos importados.

Os dados observados na Tabela anterior mostraram valores de consumo de energia bem superiores se comparados aos ensaios de fotodegradação combinados com H_2O_2 realizado por Köhler et al., (2012). Os pesquisadores trabalharam com faixas de consumo de energia de 4 a 10 kWh m^{-3} , considerando o fluxo contínuo no sistema de tratamento, sem adicionar portanto, o consumo de energia para o bombeamento de efluentes.

Os valores de NTK foram usados no banco de dados do *SimaPro*. Os valores de nitrito e nitrato devem merecer atenção para estudos futuros, para não serem desconsiderados para o *INVENTÁRIO 2* e para possibilitar o uso de nitrogênio total disponível no banco de dados do *software*.

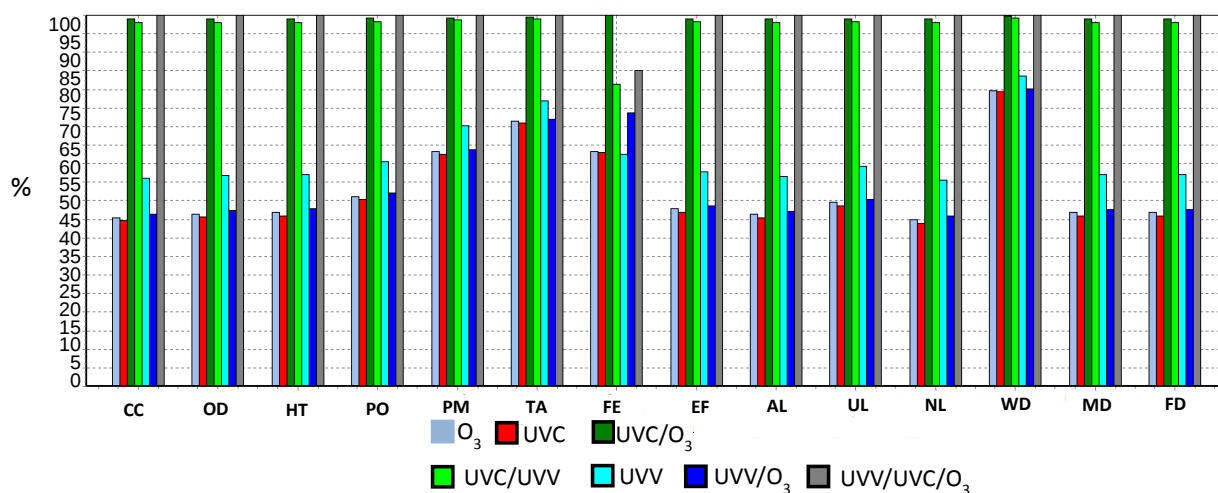


Figura 3: CC – Mudanças Climáticas; OD – Depleção da Camada de Ozônio, HT - Ttoxicidade Humana, PO - Formação de Oxidantes Fotoquímicos, PM - Material Particulado; TA - Acidificação Terrestre, FE - Eutrofização de Água Doce; EF - Ecotoxicidade de Água Doce; AL - Ocupação de Terras Agrícolas; UL - Ocupação do Solo Urbano; NL - Transformação da Terra Natural, WD – Depleção de Água; MD - Depleção de Metal; FD - Depleção

Os dados de ACV *Midpoint* podem ser observados nas sequências das Figuras de 3 e 4, ressaltando-se os dados de Caracterização e Normalização.

A Caracterização da Figura 3 demonstra os efeitos de impactos dos 14 itens de danos ambientais diretos relacionados pelo método ReCiPe (H) revelando que os processos O₃, UVC apresentaram as menores relações de danos ambientais para cada um dos itens. Isto já está também associado com o menor consumo de energia revelado no *INVENTÁRIO 2*.

Os mecanismos de geração e das reações do ozônio sob as radiações de $\lambda = 185 \text{ nm}$ e 254 nm associam que o efeito adicional da radiação UVV ocorre para geração de O₃ no reator emerso, sendo que para o reator imerso a degradação de O₃ dissolvido pode ser o mecanismo prioritário.

Voronov, (2008) considerou que somente vazões de ar maiores do que $0,1 \text{ m}^3 \text{ seg}^{-1}$ são capazes de permitir que a destruição fotoquímica do ozônio não ocorra com o λ de 254 nm . Desta forma para o mecanismo UVC/O₃ o efeito de decomposição do ozônio gera O(¹D), sendo que o oxigênio singlete reage com o N₂ do ar para formação dos óxidos de nitrogênio e adicionalmente com a água para formação do radical hidroxila. Neste caso, o mecanismo coadjuvante (gerador exclusivo de HO[•]) não ocorreria, o que explicaria as piores condições na Configuração 2 (apresentadas na Tabela 4) para os processos UVV/UVC, UVC/O₃ e UVV/UVC/O₃ em termos de kWh/kgDQO removida.

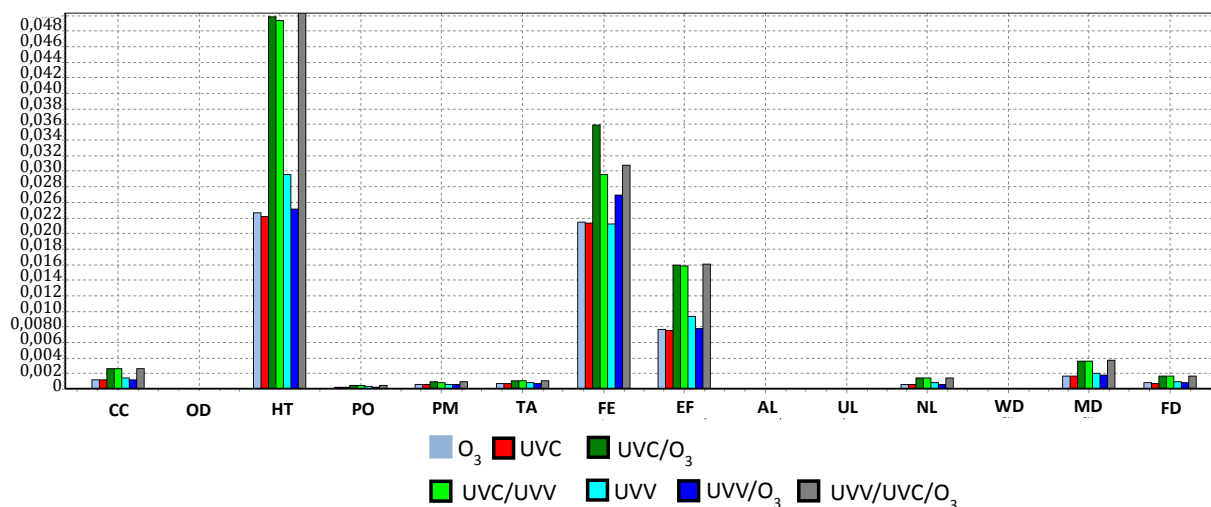


Figura 4: CC – Mudanças Climáticas; OD – Depleção da Camada de Ozônio, HT - Toxicidade Humana, PO - Formação de Oxidantes Fotoquímicos, PM - Material Particulado; TA - Acidificação Terrestre, FE – Eutrofização de Água Doce; EF - Ecotoxicidade de Água Doce; AL - Ocupação de Terras Agrícolas; UL - Ocupação do Solo Urbano; NL - Transformação da Terra Natural, MD - Depleção de Metal; FD - Depleção Fóssil

Todos os três processos de menor consumo de energia são os de menor impacto, especialmente na Configuração 2. No entanto, a ozonização apresenta o melhor desempenho na relação energia consumida/DQO removida. Estes dados são semelhantes às tendências obtidas por Köhler et al., (2012), onde sistemas de UVC baixa pressão, UVC, UVB e UVA média pressão foram aplicados associando o MBR como um pré-tratamento separador de fases.

A etapa de Caracterização do ACV demonstra aspectos importantes dos parâmetros mais significativos de impactos ambientais dos sistemas fotoquímicos aplicados em cada parâmetro. As mudanças climáticas, a toxicidade humana, as depleções de metal e de fósseis são as mais representativas dos impactos ambientais *no comparativo de cada parâmetro*, sendo que especialmente a toxicidade humana é que diretamente pode estar associada ao uso de energia elétrica (embora no Brasil aproximadamente 51% é da matriz hidroelétrica). Mas a matriz energética brasileira usa as termoeletricas também, com potenciais riscos de emissões atmosféricas que associam substâncias com potencial de toxicidade.

Quanto às características da Normalização, são ainda mais ressaltados os impactos mais intensos na comparação entre todos os 14 impactos, com destaque novamente para a toxicidade humana e para a eutrofização (ação de carga do NTK e P total) conjuntamente com a ecotoxicidade de água doce. Ainda que os parâmetros eutrofizantes estejam em acordo com a resolução Consema/RS 128/06, estes parâmetros contribuem intensivamente no método ReCiPe (H).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados obtidos nas análises físico-químicas, química e biológicas o teste de O₃ apresentou as melhores taxas de redução de DQO, porém os produtos gerados são extremamente tóxicos fazendo com que a toxicidade do efluente tratado fique próxima do efluente bruto.



A ecotoxicidade aguda caracterizada diretamente com o uso da *Daphnia magna* demonstrou que o efluente estudado foi extremamente tóxico, sendo que estes dados são ausentes para a ACV em função da carência de análise quantitativa de poluentes prioritários identificados com CG-EM. Já a ordem decrescente dos três melhores métodos de detoxificação foram para os métodos UVV/UVC/O₃, UVC e UVC/O₃.

O INVENTÁRIO 1 dos processos estudados revelou as maiores demandas associadas ao uso de energia para suprir às bombas de recirculação/aeração. O processo O₃ apresentou a menor relação *kWh/kg DQO*, demonstrando a melhor eficiência nas Configurações 1 e 2. Neste item, os três melhores processos foram O₃, UVV e UVC na Configuração 1, sendo o pior o processo UVV/UVC/O₃ e, na Configuração 2, O₃, UVC e UVV/O₃ são os mais eficientes no tratamento, onde novamente UVV/UVC/O₃ foi o pior processo.

Quanto a ordem dos resultados de ACV os três melhores resultados foram para os processos UVC, O₃ e UVV/O₃, incluindo os dados de Caracterização e Normalização.

Nos métodos de ACV citados anteriormente, os impactos principais foram a toxicidade humana, eutrofização e ecotoxicidade de água doce, mudanças climáticas e uso de recursos não renováveis. Quanto à eutrofização de água doce, a carga de NTK e fósforo total dos efluentes foi a que pode estar associada com estes parâmetros, mesmo que dentro do tolerável pela resolução 128/06.

Medidas de P+L para aplicações dos POAs estudados devem priorizar a reorganização da configuração dos fotorreatores com os sistemas combinados UVV e UVC aplicando *Pitot-Venturi* para a transferência gás-líquido e aprimoramento da unidade UVC com sistema fotoeletroquímico com sítio anódico inerte. Isto envolverá construir protótipo em reator tubular único, centralizando os reatores.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pela FAPERGS, UNISC e CNPq para bolsas de iniciação científica e em especial ao CNPq pelos projetos 481620 / 2013-3, 307257/2015-0 e 406200/2015-7.

5. REFERÊNCIAS

BOILLOT, C.; BAZIM, C.; TISSOT-GUERRAZ, F.; DROQUET, J.; PERRAUD, M.; CETRE J. C.; TREPO, D.; PERRODIN, Y. Daily physicochemical, microbiological and ecotoxicological fluctuations of a hospital effluent according to technical and care activities. **Science of Total Environment**. n. 403. p. 113-129. 2008.

LUTTERBECK, C. A. **Eficiência da detoxificação de efluentes de lavanderia hospitalar através do uso de métodos eletroquímicos**. 115 p., Santa Cruz do Sul, RS, Brasil, 2010. Dissertação de (Mestrado)-Universidade de Santa Cruz do Sul.

GAUTAM, A. K.; KUMAR, S.; SABUMON P.C.; Preliminary study of physico-chemical treatment options for hospital wastewater. **Journal of Environmental Management**. n. 83. p. 298-306. 2007.

BROWN, K. D.; KULIS, J.; THOMSON, B.; CHAPMAN, T. H.; MAWHINNEY, D. B. *Occurrence of antibiotics in hospital, residential, and dairy effluent, municipal wastewater, and the Rio Grande in New Mexico*. **Science of the total Environment**. n. 366. p. 772-783. 2006.

PAIVA, F.V.; SOUZA, N.C.; VAN HAANDEL, A.C. Identificação de compostos orgânicos e farmacêuticos em esgoto hospitalar utilizando cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massa. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 16. n.1. p. 37-44. 2011.

KÖHLER, C.; VENDITTI, S.; IGOS, E.; KLEPISZEWSKI, K.; BENETTO, E.; CORNELISSEN, A. Elimination of pharmaceutical residues in biologically pre-treated hospital wastewater using advanced



UV irradiation technology: A comparative assessment. **Journal of Hazardous Materials**. n. 239-240. p. 70-77. 2012.

CHONG, M. N.; JIN B. Photocatalytic treatment of high concentration carbamazepine in synthetic hospital wastewater. **J Hazard Mater.** Jan 15;199-200:135-42. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.10.067,2012

KERN, D. I.; SCHWAICKHARDT, R.O.; MOHR, G.; LOBO, E. A.; KIST, L. T.; MACHADO, Ê. L. Toxicity and genotoxicity of hospital laundry wastewaters treated with photocatalytic ozonation. **Science of the Total Environment**. v. 433. p. 566-572. 2013.

KERN, D. I.; SCHWAICKHARDT, R. O.; LUTTERBECK C. A.; KIST, L. T.; ALCAYAGA, E. A.; MACHADO, Ê. L. Ecotoxicological and Genotoxic Assessment of Hospital Laundry Wastewaters. **Archives of environmental contamination and toxicology**. 2015.

CHRISTENSEN, P. A.; YONAR, T.; ZAKARIA K. The Electrochemical Generation of Ozone: A Review. **Ozone: Science & Engineering**, n. 35. p. 149–167. 2013.

APHA/AWWA, **Standard Methods for the Examination of water and wastewater**. 22th edition, Washington. 2012.

MUÑOZ I. **Life cycle assessment as a tool for green chemistry: Application to kraft pulp industrial wastewater Treatment by different advanced oxidation processes**. 124 f. Dissertação (Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals) – Universitat Autònoma de Barcelona. Barcelona. 2003

NBR ISO 14040 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, 2009.

NBR ISO 14044 - Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, 2009.

ALBRECHT, Carolina. **Impactos ambientais de efluentes da lavanderia hospitalar e tratamento com fotooxidação catalítica**. 62 p., 2007. Dissertação de (Mestrado)-Universidade de Santa Cruz do Sul.

VORONOV, A. New Generation of Low Pressure Mercury Lamps for Producing Ozone. **Ozone: Science and Engineering**. V. 30. p. 395–397. 2008.

BRASIL, **Resolução do CONSEMA Nº 128/2006**. Secretaria da Saúde e Meio Ambiente/RS.

BRASIL, **Resolução do CONSEMA Nº 129/2006**. Secretaria da Saúde e Meio Ambiente/RS.



10º Simpósio
Internacional de
Qualidade Ambiental

Regulamentação Ambiental,
Desenvolvimento e Inovação

19 a 21 de outubro de 2016
Prédio 41 | PUCRS | Porto Alegre/RS



REALIZAÇÃO



CORREALIZAÇÃO



INFORMAÇÕES

abes-rs@abes-rs.org.br
51 3212.1375