

ÁREA TEMÁTICA: RECICLAGEM

CARACTERIZAÇÃO DE LÂMPADAS LED PARA A RECICLAGEM

Marcelo Pilotto Cenci¹ (marcelo.cenci@hotmail.com), Bárbara Cristina de Freitas de Mello¹ (barbara_cfmello@hotmail.com), Lucas Margarezzi Schmidt¹ (mschmidt.lucas@gmail.com), Hugo Marcelo Veit¹ (hugo.veit@ufrgs.br)

1 Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

RESUMO

A maior eficiência, design variável e inteligente e outras vantagens fizeram com que as lâmpadas LED conquistassem definitivamente o mercado, gerando um fluxo considerável de um novo resíduo sólido eletroeletrônico para ser gerenciado. Para iniciar esforços para a reciclagem, é necessário conhecer esse novo resíduo, caracterizando seus materiais e determinando fluxos mássicos. Através de análises de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) para polímeros e de Fluorescência de Raio-X (FRX) para elementos metálicos, os materiais que compõem as lâmpadas são identificados e determinadas suas frações mássicas para diversos cenários com diferentes tipos de lâmpadas. Os polímeros policarbonato, poliéster e poliamida e o metal alumínio são os componentes mais comuns, correspondendo a respectivamente 48,13%, 5,08%, 1,77% e 23,04% da massa de lâmpadas LED.

Palavras-chave: lâmpadas LED; reciclagem de materiais.

LED LAMPS CHARACTERIZATION FOR THE RECYCLING

ABSTRACT

A higher efficiency, smart and variable design and other advantages, led the LED lamps to conquer definitively the market, generating a substantial new flow of an electronic solid waste to be managed. To start efforts for the recycling of this new residue, it is necessary to know it, characterizing its materials and determining mass flows. Applying Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) for the polymers and X-Ray Fluorescence (XRF) for the metallic elements, the materials that constitute the LED lamps are identified and their mass flow determined for some scenarios with different types of lamps. The polymers polycarbonate, polyester and polyamide, and the metal aluminum are the most common components, corresponding to 48,13%, 5,08%, 1,77% and 23,04% of the LED lamps mass, respectively.

Keywords: LED lamps; materials recycling.

1. INTRODUÇÃO

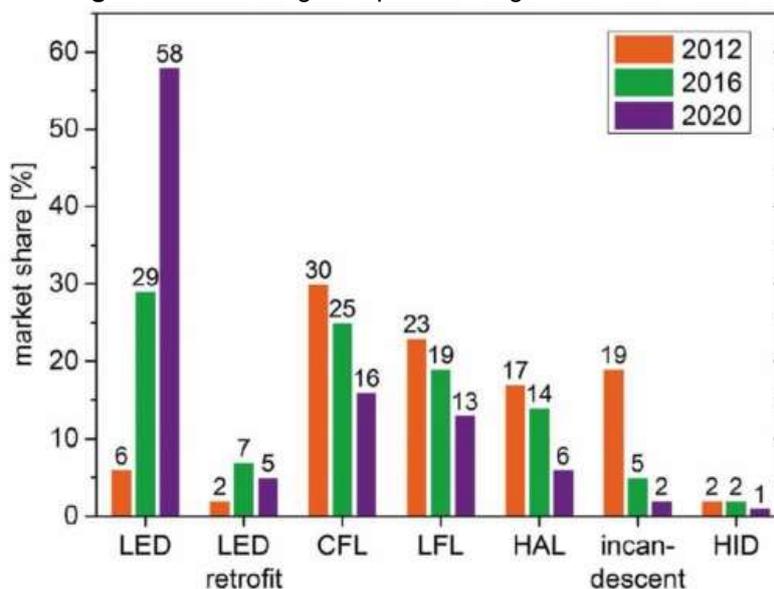
A denominada sociedade global da informação está crescendo em grande velocidade. Ela é caracterizada por um número crescente de usuários de dispositivos eletroeletrônicos, guiados pela inovação, eficiência dos equipamentos e pelo avanço econômico e social. Equipamentos eletroeletrônicos ocupam um espaço fundamental nas atividades cotidianas, e o crescimento da demanda, acompanhado pelas altas taxas de substituição destes, implicam uma geração substancial de resíduos eletroeletrônicos.

A grande geração desses resíduos já impõe desafios ao seu correto gerenciamento, tanto em níveis locais quanto em nível global. Em 2014, a geração global de resíduos eletroeletrônicos foi estimada em 41,8 milhões de toneladas (Mt), equivalente à 5,8 quilogramas por habitante (kg/hab.) (BALDE et al., 2014). Em estudo equivalente realizado em 2017, foi estimada a geração de 44,7 Mt de resíduos eletroeletrônicos, sendo equivalente a produção de 6,1 kg/hab. (BALDE et al., 2017). Nota-se então uma tendência ao aumento da geração, em 2021 é esperado um aumento para 52,2 Mt, com geração de 6,8 kg/hab. (BALDE et al., 2017).

Na última década, um novo produto eletrônico vem ganhando espaço no mercado. Lâmpadas LED estão continuamente substituindo as fontes convencionais de luz. Funcionalidades como cores

personalizadas, liberdade para variados designs e uma maior eficiência econômica fizeram com que a lâmpada LED penetrasse e conquistasse o mercado de iluminação geral. Muitos países e regiões estão implementando legislações para substituir lâmpadas incandescentes e promover o uso de lâmpadas LED (UNEP, 2017). Com essa expansão de mercado, os LEDs vão contribuir com um grande fluxo de resíduos eletroeletrônicos (FANG et al., 2018; ZHAN et al., 2015), levantando a questão de como esse complexo resíduo será tratado no final de seu ciclo de vida. Na figura 1, é demonstrado o avanço da lâmpada LED no mercado, em comparação com outras fontes de luz.

Figura 1. Mercado global por tecnologia de fonte de luz



Fonte: (GASSMANN et al., 2016).

Atualmente, muitas diretrizes globais apontam para a necessidade de maior efetividade no gerenciamento de resíduos eletroeletrônicos, focando geralmente na coleta e no incentivo à reutilização e reciclagem desses resíduos. De acordo com Balde et.al (2017), 67 países possuem legislação ambiental para resíduos eletroeletrônicos, cobrindo cerca de 66% da população mundial. De fato, no Brasil, os resíduos eletroeletrônicos têm responsabilidade compartilhada e há previsão de logística reversa para coleta e destinação, como determinado pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010). Portanto, em consonância com as diretrizes mais atuais nesse assunto, que indicam a minimização da geração de resíduos sólidos e a eficiência mássica e energética, deve-se estudar alternativas de destinação final para as lâmpadas LED inservíveis.

Atualmente no Brasil, as lâmpadas LED são dispostas em aterro sanitário ou acumuladas sem destinação definida, configurando um passivo ambiental. Essas lâmpadas podem ser recolocadas na cadeia produtiva, através da reciclagem dos seus materiais, minimizando a geração de resíduos e os impactos ambientais, além de potencializar ganhos econômicos para a sociedade. Para tanto, iniciando esforços para desenvolver metodologias de reciclagem para a lâmpada LED, são necessários estudos de caracterização dos materiais desse resíduo.

2. OBJETIVO

O objetivo geral desse trabalho é realizar uma caracterização simplificada dos materiais que compõem as lâmpadas LED, determinando fluxos mássicos para os principais materiais e elementos constituintes. Há também o objetivo de avaliar diferentes marcas e estilos de lâmpadas LED, para resultar em dados mais compatíveis com a realidade variável de um processo de reciclagem.

3. METODOLOGIA

O desenvolvimento desse trabalho é realizado através da caracterização dos materiais de 6 marcas de lâmpadas LED, sendo 3 marcas de lâmpadas tubulares e 3 marcas de lâmpadas de bulbo. As marcas são selecionadas de acordo com a disponibilidade no mercado, e foram denominadas T1, T2, T3, B4, B5 e B6. Na tabela 1 abaixo estão as características de cada marca, ressaltando que são idênticas dentro da mesma marca. Todas as lâmpadas estudadas foram fabricadas no período 2016-2018.

Tabela 1. Características das marcas estudadas

	T1	T2	T3	B4	B5	B6
Tipo	Tubular	Tubular	Tubular	Bulbo	Bulbo	Bulbo
Potência (W)	16	20	18	9	4.5	4.8
Temperatura da Cor (K)	6500	4000	6000	6500	6500	6500

A primeira etapa do trabalho é a separação manual e aferição da massa das partes componentes de 10 lâmpadas de cada marca, verificando a média e desvio padrão de cada marca. Para a aferição da massa é utilizada uma balança de precisão marca Marte, modelo AY 220.

Inicialmente, as lâmpadas são separadas em carcaças poliméricas, carcaças metálicas, placas de circuito impresso (PCI), componentes das PCI (transformadores, capacitores e outros) e módulo de LED (superfície onde os LED são posicionados). Os principais componentes poliméricos são determinados através de Análise de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), em equipamento da marca Perkin Elmer, modelo Spectrum 1000. As partes metálicas determinadas por Fluorescência de Raio-X (FRX), em equipamento portátil marca Thermo Fisher Scientific, modelo Niton XL3t. Para preparação das amostras, quando necessário, utiliza-se o moinho de facas marca Retsch, modelo SM 300.

Após a separação e aferição das massas, são realizadas as caracterizações dos materiais. Para a fração polimérica da carcaça, a análise FTIR é realizada em uma amostra por componente e por marca. A fração metálica homogênea da carcaça tem seu metal constituinte determinado por FRX. As placas de circuito impresso e os módulos de LED, por serem materiais heterogêneos, compostos por mistura de frações metálicas e poliméricas, devem passar por processo de moagem para sua homogeneização, para posteriormente determinar sua fração de elementos metálicos por FRX. Para isso, 3 amostras de PCIs e módulos de LED de cada marca são moídas em fração menor que 1mm para determinar a concentração de metais. A concentração de cada amostra, em porcentagem, é definida pela média de 5 análises de FRX, e os dados de concentração posteriormente convertidos para massa. Elementos metálicos com concentração menor que 1% são desconsiderados. Adicionalmente, os elementos chumbo (Pb), prata (Ag) e ouro (Au) são considerados em todas as análises, pela sua relevância ambiental e econômica.

Após a determinação dos polímeros e elementos metálicos, é realizado o processamento dos dados para a definição de seus fluxos mássicos, diferenciando por marca e em cenários mistos para um processo de reciclagem simulado.

Os componentes das PCIs não são analisados pois podem conter substâncias tóxicas, especialmente as presentes nos capacitores eletrolíticos, que potencialmente contaminem os equipamentos utilizados e configurem risco à manipulação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As lâmpadas estudadas apresentam design e componentes com funções semelhantes. Os resultados alcançados são apresentados através de uma caracterização com balanço de massas por marca, e posteriormente a definição de fluxos mássicos em cenários com misturas de lâmpadas.

4.1 Marca T1

As lâmpadas da marca T1 são lâmpadas tubulares com carcaça quase exclusivamente polimérica em policarbonato, exceto os pinos metálicos para contato elétrico, que são constituídos por alumínio (Al) com um fino revestimento de níquel (Ni). Na figura 3 estão os espectros FTIR das partes poliméricas das lâmpadas tubulares (T1, T2 e T3) em que todos polímeros são definidos igualmente como policarbonato (PC). Internamente, as lâmpadas possuem uma PCI em cada extremidade e o módulo de LED em formato de tira com base polimérica e contatos metálicos. Nas tabelas 2 e 3 estão os resultados das pesagens e caracterizações.

Figura 3. Espectro FTIR do policarbonato para as partes poliméricas das lâmpadas tubulares

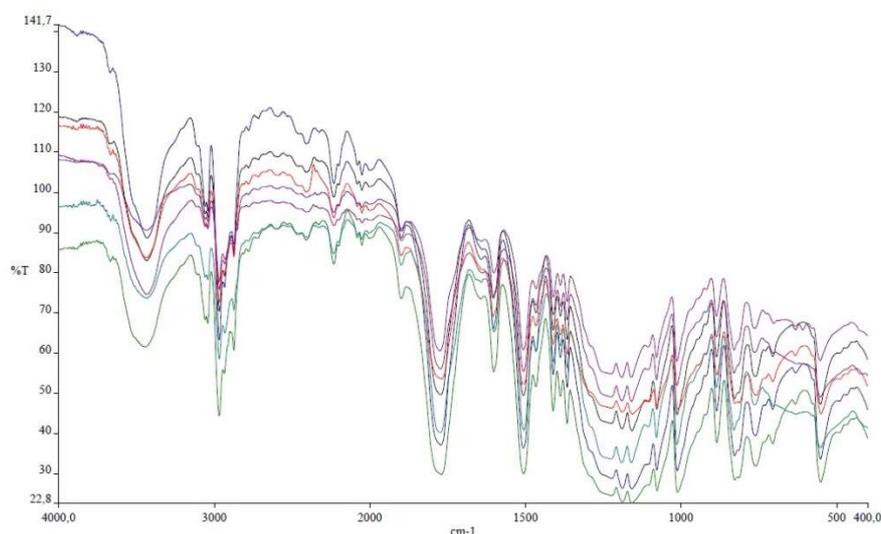


Tabela 2. Verificação da massa dos componentes da marca T1

	Carcaça Polimérica	Carcaça Metálica	PCI	Módulo LED	Componentes PCI	Massa Total
Material Constituinte	PC	Al	-	-	-	-
Massa Média (g)	98,26	1,19	5,33	33,20	17,27	155,26
Desvio Padrão (g)	3,12	0,06	0,10	0,21	0,30	3,28

Tabela 3. Composição da PCI e do módulo LED da marca T1

	PCI								
	Não Metálicos	Al	Cu	Sn	Ti	Zn	Pb	Au	Ag
Concentração Média (%)	84,35	-	5,99	4,25	2,28	1,51	0,280	0,146	0,107
Desvio Padrão (%)	1,72	-	1,04	0,64	0,34	0,23	0,024	0,003	0,010

	MÓDULO LED								
	Não Metálicos	Al	Cu	Sn	Ti	Zn	Pb	Au	Ag
Concentração Média (%)	82,96	3,63	4,61	-	5,80	-	-	0,201	-
Desvio Padrão (%)	1,43	0,17	0,28	-	0,64	-	-	0,003	-

4.2 Marca T2

O diferencial da carcaça da marca T2 é a presença de uma tira metálica na metade superior da lâmpada, feita de alumínio, acima da carcaça polimérica de policarbonato. Internamente, a marca T2 possui uma PCI e um módulo LED em tira também com base polimérica. Nas tabelas 4 e 5 estão os resultados da análise dessa marca.

Tabela 4. Verificação da massa dos componentes da marca T2

	Carcaça Polimérica	Carcaça Metálica	PCI	Módulo LED	Componentes PCI	Massa Total
Material Constituinte	PC	Al	-	-	-	-
Massa Média (g)	68,04	97,65	2,23	23,28	7,45	198,65
Desvio Padrão (g)	0,29	3,10	0,06	0,27	0,19	3,04

Tabela 5. Composição da PCI e do módulo LED da marca T2

	PCI								
	Não Metálicos	Al	Cu	Sn	Ti	Zn	Pb	Au	Ag
Concentração Média (%)	82,80	-	7,01	7,83	0,28	0,21	0,407	0,120	0,163
Desvio Padrão (%)	3,43	-	1,53	1,84	0,04	0,05	0,057	0,010	0,007

	MÓDULO LED								
	Não Metálicos	Al	Cu	Sn	Ti	Zn	Pb	Au	Ag
Concentração Média (%)	87,21	4,97	2,45	-	0,68	-	-	0,187	-
Desvio Padrão (%)	0,31	0,15	0,71	-	0,13	-	-	0,002	-

4.3 Marca T3

A marca T3 tem estrutura externa semelhante à T1, quase totalmente polimérica em policarbonato, exceto os pinos de contato elétrico de alumínio revestidos com níquel. Internamente, o módulo LED possui base de alumínio e não polimérica, com uma PCI. Os resultados podem ser vistos nas tabelas 6 e 7 abaixo.

Tabela 6. Verificação da massa dos componentes da marca T3

	Carcaça Polimérica	Carcaça Metálica	PCI	Módulo LED	Componentes PCI	Massa Total
Material Constituinte	PC	Al	-	-	-	-
Massa Média (g)	110,60	0,79	2,44	24,85	6,95	145,63
Desvio Padrão (g)	2,44	0,04	0,06	0,13	0,32	2,56

Tabela 7. Composição da PCI e do módulo LED da marca T3

	PCI								
	Não Metálicos	Al	Cu	Sn	Ti	Zn	Pb	Au	Ag
Concentração Média (%)	81,96	-	8,98	2,77	0,38	0,192	4,096	0,088	0,151
Desvio Padrão (%)	2,34	-	1,35	0,45	0,02	0,005	0,432	0,005	0,010

	MÓDULO LED								
	Não Metálicos	Al	Cu	Sn	Ti	Zn	Pb	Au	Ag
Concentração Média (%)	42,26	52,12	2,64	-	1,85	-	-	-	-
Desvio Padrão (%)	2,41	2,44	0,58	-	0,64	-	-	-	-

4.4 Marca B4

A marca B4 é a primeira lâmpada de bulbo analisada. Todas lâmpadas de bulbo analisadas possuem bulbo polimérico em policarbonato, como pode ser visualizado no espectro FTIR da figura 4. A carcaça externa polimérica é de material poliéster (PE) para as marcas B4 e B5 e de poliamida (PA) para a marca B6, como pode ser visualizado no espectro FTIR da figura 5. Essa marca possui carcaça externa em polímero, com metal apenas no soquete e no pino de contato elétrico, ambos compostos por alumínio com revestimento de níquel. Internamente, a lâmpada possui uma PCI e um módulo LED com base de alumínio. Os dados da marca B4 estão nas tabelas 8 e 9.

Figura 4. Espectro FTIR de policarbonato dos bulbos das marcas B4, B5 e B6

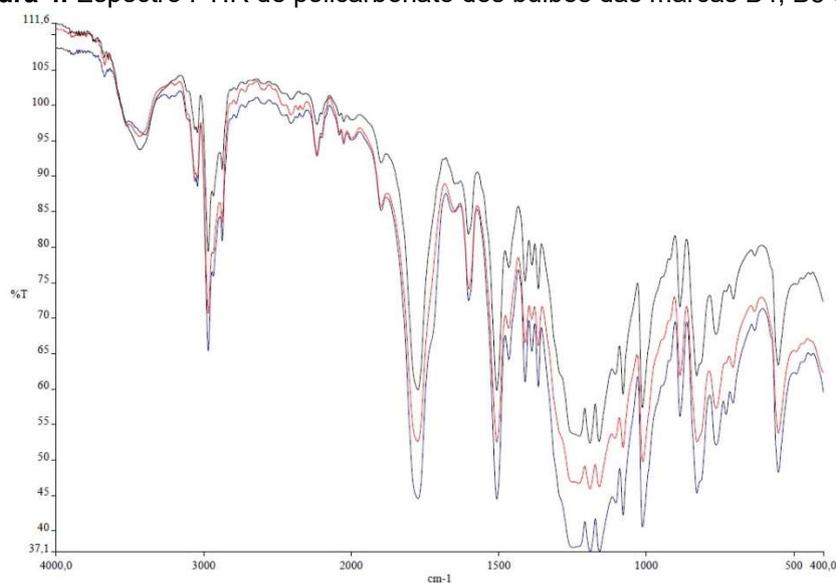


Figura 5. Espectro FTIR de poliamida (em vermelho) e poliéster para a carcaças das lâmpadas de bulbo

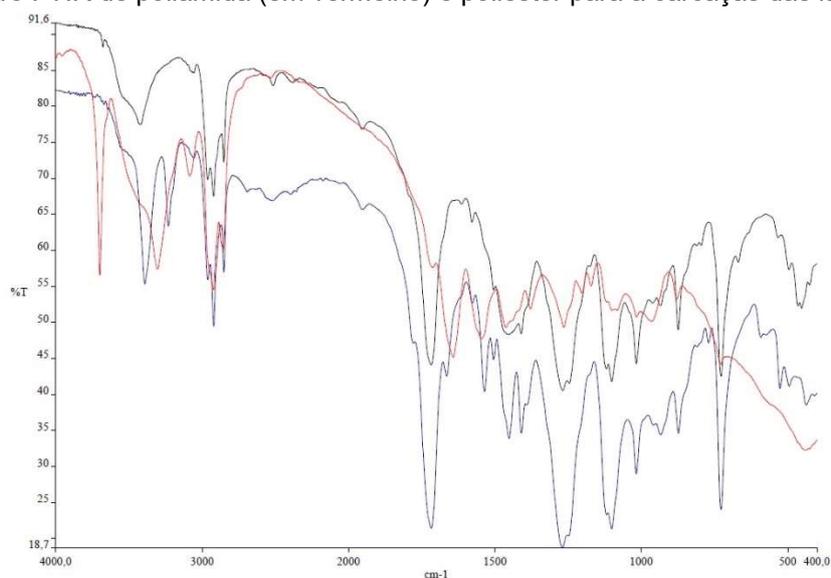


Tabela 8. Verificação da massa dos componentes da marca B4

	Carcaça Polimérica	Carcaça Polimérica (Bulbo)	Carcaça Metálica	PCI	Módulo LED	Componentes PCI	Massa Total
Material Constituinte	PE	PC	Al	-	-	-	-
Massa (g)	19,21	9,98	11,99	2,46	7,04	7,33	58,00
Desvio Padrão (g)	0,36	0,09	0,12	0,04	0,14	0,09	0,23

Tabela 9. Composição da PCI e do módulo LED da marca B4

	PCI								
	Não Metálicos	Al	Cu	Sn	Ti	Zn	Pb	Au	Ag
Concentração Média (%)	86,12	-	4,08	4,31	2,64	0,155	0,383	0,177	0,144
Desvio Padrão (%)	3,40	-	1,73	1,07	0,21	0,002	0,136	0,024	0,015
	MÓDULO LED								
	Não Metálicos	Al	Cu	Sn	Ti	Zn	Pb	Au	Ag
Concentração Média (%)	44,21	49,40	3,06	0,31	1,31	-	-	-	-
Desvio Padrão (%)	3,13	2,13	0,98	0,12	0,27	-	-	-	-

4.5 Marca B5

A marca B5 apresenta carcaça externa e interna semelhante à marca B4, porém o pino de contato elétrico é constituído apenas de níquel. Internamente, visualiza-se uma alteração significativa no design das lâmpadas, a PCI e o módulo LED estão unidos na mesma superfície, configurando apenas um componente. Os dados da marca B5 estão nas tabelas 10 e 11.

Tabela 10. Verificação da massa dos componentes da marca B5

	Carcaça Polimérica	Carcaça Polimérica (Bulbo)	Carcaça Metálica (Al)	Carcaça Metálica (Ni)	PCI e Módulo LED	Componentes PCI	Massa Total
Material Constituinte	PE	PC	Al	Ni	-	-	-
Massa (g)	12,70	7,55	11,16	0,63	2,31	5,12	39,47
Desvio Padrão (g)	0,61	0,08	1,59	0,03	0,02	0,06	1,89

Tabela 11. Composição da PCI e do módulo LED da marca B5

	PCI e MÓDULO LED								
	Não Metálicos	Al	Cu	Sn	Ti	Zn	Pb	Au	Ag
Concentração Média (%)	64,01	25,95	3,36	1,53	1,97	-	0,053	0,056	-
Desvio Padrão (%)	2,40	1,95	0,70	0,10	0,47	-	0,021	0,002	-

4.6 Marca B6

A carcaça polimérica externa da marca B6 é composta de poliamida. Essa marca não possui carcaça metálica interna, assim o único material metálico da carcaça é o soquete de alumínio, com pino de níquel. Internamente, possui uma PCI e um módulo LED com base de alumínio, separados. A caracterização é apresentada nas tabelas 12 e 13.

Tabela 12. Verificação da massa dos componentes da marca B6

	Carcaça Polimérica	Carcaça Polimérica (Bulbo)	Carcaça Metálica	Carcaça Metálica (Pino)	PCI	Módulo LED	Componentes PCI	Massa Total
Material Constituinte	PA	PC	Al	Ni	-	-	-	-
Massa (g)	11,14	7,93	0,77	0,69	1,65	3,58	5,43	31,19
Desvio Padrão (g)	0,14	0,06	0,03	0,03	0,02	0,06	0,16	0,23

Tabela 13. Composição da PCI e do módulo LED da marca B6

	PCI									
	Não Metálicos	Al	Cu	Sn	Ti	Zn	Pb	Au	Ag	
Concentração Média (%)	85,02	-	5,46	8,27	0,26	0,138	0,445	-	-	0,136
Desvio Padrão (%)	3,64	-	1,56	1,71	0,07	0,010	0,053	-	-	0,002
	MÓDULO LED									
	Não Metálicos	Al	Cu	Sn	Ti	Zn	Pb	Au	Ag	
Concentração Média (%)	44,95	49,32	2,04	1,13	1,19	-	-	-	-	-
Desvio Padrão (%)	2,09	3,16	0,40	0,91	0,17	-	-	-	-	-

4.7 Definição de Cenários de Fluxos Mássicos para a Reciclagem

Considerando um processo real de reciclagem, há a recepção de grande variedade de lâmpadas, misturadas entre si. Os primeiros dois cenários propostos analisam um fluxo exclusivo de lâmpadas tubulares e outro fluxo exclusivo de lâmpadas de bulbo. Uma mistura da mesma quantidade de lâmpadas de cada marca é fixada para a definição desses fluxos. As proporções de cada material nesses dois fluxos estão nas tabelas 14 e 15.

Tabela 14. Fluxo de lâmpadas tubulares

	PC	Al	Ni	Cu	Sn	Ti	Zn	Pb	Au	Ag
Fração Mássica (%)	55,43	23,01	-	0,69	0,09	0,54	0,02	0,02	0,025	0,003
Desvio Padrão (%)	3,51	2,17	-	0,03	0,01	0,02	0,001	0,002	0,001	0,0002

As lâmpadas tubulares possuem uma fração majoritária de policarbonato, que está presente na carcaça. A fração metálica também possui valor relevante em razão do elemento alumínio, porém apenas a marca T2 apresentou parte da carcaça em metal. Assim, em cenários onde não há lâmpadas com carcaça metálica, a fração metálica deve diminuir consideravelmente. Para lâmpadas LED tubulares, não foram encontrados estudos para comparação e complementação dos dados.

Tabela 15. Fluxo de lâmpadas de bulbo

	PC	PA	PE	Al	Ni	Cu	Sn	Ti	Zn	Pb	Au	Ag
Fração Mássica (%)	19,79	8,66	24,8	23,15	1,03	0,43	0,26	0,19	0,005	0,014	0,004	0,004
Desvio Padrão (%)	0,54	0,33	2,26	4,63	0,14	0,03	0,02	0,01	0,0002	0,001	0,0002	0,0002

As lâmpadas de bulbo, assim como as tubulares, apresentam predomínio de polímeros na sua composição. O principal metal encontrado também é o alumínio, por constituir uma carcaça interna com função principal de dissipar calor.

Gassmann et al. (2016) e Scholand e Dillon (2012) verificaram os materiais constituintes de lâmpadas LED de bulbo, onde o alumínio foi encontrado como material majoritário, com 42,3% e 38,3% da massa, respectivamente. Nesses dois estudos, a fração mássica de polímeros é de 21,3% e 6,2%, respectivamente. Observa-se, através desses dois estudos comparativos, que a fração metálica encontrada do presente trabalho é substancialmente menor, e que a fração polimérica é maior.

Considerando os anos das verificações desses estudos, de 2016 e de 2012, pode-se inferir que há uma tendência a diminuição da fração metálica e aumento da fração polimérica das lâmpadas LED de bulbo. Em estudo no ano de 2018, Santos et al. (2018) apresenta resultados confirmando a tendência a maior fração mássica de polímeros em lâmpadas LED de bulbo, variando entre 58,9% e 62,4%.

O cenário seguinte, considera uma mistura de lâmpadas tubulares e de bulbo, com a premissa do mesmo número de lâmpadas para cada uma das seis marcas. Esse cenário está na tabela 16.

Tabela 16. Fluxo de lâmpadas tubulares e de bulbos misturadas em mesmo número

	PC	PA	PE	Al	Ni	Cu	Sn	Ti	Zn	Pb	Au	Ag
Fração Mássica (%)	48,13	1,77	5,08	23,04	0,21	0,64	0,13	0,47	0,015	0,023	0,021	0,003
Desvio Padrão (%)	2,9	0,07	0,46	2,67	0,03	0,03	0,01	0,02	0,001	0,002	0,001	0,0002

Através da tabela 16, os materiais policarbonato e alumínio se destacam como os principais constituintes de lâmpadas LED. As frações metálicas e poliméricas majoritárias das lâmpadas LED, considerando o cenário de mistura entre lâmpadas tubulares e de bulbo, somam aproximadamente 79,53% da massa, configurando grande potencial para reciclagem.

De acordo com Gassmann et al. (2016), as lâmpadas fluorescentes ainda possuem maior fração reciclável, pois possuem entre 80% e 90% de massa em vidro, e metais e plásticos compõem entre 7% e 14%. Porém, lâmpadas LED tem maior potencial de lucro através da reciclagem pois possuem materiais mais valiosos que as lâmpadas fluorescentes.

Outro possível cenário real é a separação manual das partes poliméricas e metálicas das carcaças das lâmpadas, formando fluxos majoritários de policarbonato, poliéster, poliamida e alumínio. Nesse cenário há um fluxo secundário de PCIs e módulos LED, onde é possível concentrar alguns metais que podem ser de interesse econômico, como o cobre e o ouro. A tabela 17 apresenta um cenário de mistura somente de PCIs e módulos LED das lâmpadas tubulares e de bulbo, com mesmo número de lâmpadas para cada uma das seis marcas.

Tabela 17. Fluxo exclusivo de mistura entre PCIs e módulos LED

	Al	Cu	Sn	Ti	Zn	Pb	Au	Ag
Fração Mássica (%)	19,52	3,7	0,75	2,7	0,09	0,13	0,12	0,02
Desvio Padrão (%)	1,81	0,2	0,07	0,11	0,01	0,01	0,004	0,001

Além dos metais de interesse econômico, identifica-se também a presença de chumbo em todas PCIs analisadas, com destaque para a marca T3, em que há fração de 4,1% de chumbo na sua PCI. A presença de chumbo pode indicar um potencial risco ambiental para descartes inapropriados de lâmpadas LED. As diretrizes mundiais mais atuais no assunto demandam a ausência de chumbo em soldas e em materiais eletroeletrônicos, como a diretiva 2011/65 da União Européia (PARLAMENTO EUROPEU, 2011).

5. CONCLUSÃO

Em um processo de reciclagem de lâmpadas de LED, os principais materiais resultantes, em massa, são polímeros de policarbonato, poliéster e poliamida, e alumínio. Esses materiais fazem parte da carcaça das lâmpadas em componentes homogêneos, podendo ser retirados manualmente, sem processamento complexo.

Os materiais complexos e heterogêneos que compõem a lâmpada de LED são as PCI e os módulos LED, possuindo frações diversificadas de metais, que exigem um processamento mais avançado para serem retirados. Nesse caso, se destacam o alumínio, o cobre, o estanho e o titânio, como pode ser visualizado na tabela 17.

O ouro e a prata estão presentes em grande parte das PCIs e módulos LED analisados. Apesar das pequenas quantidades desses metais, eles podem se tornar interessantes em um processo de reciclagem por seu valor de mercado.

Destaca-se também a presença de chumbo nas PCIs, de modo a ressaltar a importância da reutilização e reciclagem para não haver descartes inadequados desse resíduo que possui potencial tóxico para o ambiente. De fato, o trabalho demonstra que as lâmpadas LED possuem grandes frações mássicas de materiais de interesse para a reciclagem, podendo ser uma opção para o gerenciamento desses resíduos e também revertendo ganhos econômicos e ambientais para a sociedade;

REFERÊNCIAS

BALDE, C. P. et al. **The Global E-Waste Monitor-2014.** United Nations University, IAS – SCYCLE. Bonn, Germany. Disponível em: <<http://i.unu.edu/media/unu.edu/news/52624/UNU-1stGlobal-E-Waste-Monitor-2014-small.pdf>>.

BALDE, C. P. et al. **The global e-waste monitor -2017** United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA). Bonn/Geneva/Vienna. Disponível em: <<https://www.itu.int/en/ITU-D/Climate-Change/Pages/Global-E-waste-Monitor-2017.aspx>>.

BRASIL. Lei Nº 12.305 de 2010. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo**, Brasília, 2010.

FANG, Sheng et al. Evaluation on end-of-life LEDs by understanding the criticality and recyclability for metals recycling. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 182, p. 624–633, 2018.

GASSMANN, Andrea et al. LED Lamps Recycling Technology for a Circular Economy. **LED Professional Review**, [s. l.], p. 74, 2016. Disponível em: <<https://www.led-professional.com/resources-1/articles/led-lamps-recycling-technology-for-a-circular-economy>>

PARLAMENTO EUROPEU. Directiva 2011/65/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 8 de Junho de 2011 relativa à restrição do uso de determinadas substâncias perigosas em equipamentos eléctricos e electrónicos. **Jornal Oficial da União Europeia**, 2011. p. 88–110.

SANTOS, Emanuele Caroline Araujo; et al. Desmontagem e Caracterização de Lâmpadas LED para Recuperação de Materiais. In: **Anais do 9º Fórum Internacional de Resíduos Sólidos**. Porto Alegre, 2018. Disponível em: <<http://www.institutoventuri.org.br/ojs/index.php/firs/article/view/842/655>>

SCHOLAND, Michael J; DILLON, Heather E. **Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products**. U.S. Department of Energy, , 2012.

UNEP. **Efficient Lighting Global Policy Map**. 2017. Disponível em: <learning.enlighten-initiative.org/GlobalPolicyMap.aspx>.

ZHAN, Lu et al. Novel recycle technology for recovering rare metals (Ga, In) from waste light-emitting diodes. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 299, p. 388–394, 2015.