

Análise da Aplicabilidade de Indicadores de Circularidade em uma Empresa de Reciclagem de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE)

Izabela Ferro Bertani (UFSCar)

Mariane Guerra Martins (UFSCar)

Cristina Belli (Sinctronics)

Tiago Barreto Rocha (ACV Brasil)

Virginia Aparecida da Silva Moris (UFSCar)



Atualmente a economia circular, que visa agregar valor adicional aos produtos através do reuso e reciclagem, vem se difundindo amplamente com o objetivo de reduzir a extração de matéria prima virgem dentre outros. Para mensurar os avanços rumo à uma economia circular, são utilizados diversos indicadores de circularidade apontados na literatura. Dessa forma, o presente artigo tem como objetivo mensurar a circularidade de dois medidores de energia elétrica. O medidor convencional (A), produzido com policarbonato (PC) virgem, e o medidor inteligente (B), onde 90% do PC utilizado é proveniente do processo de reciclagem de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE). No caso estudado provém da reciclagem do produto ao final de sua vida útil (medidor convencional (A)). A coleta dos dados foi realizada no SinctronicsTM (Centro de Inovação em Tecnologia Sustentável). Para avaliar a circularidade do processo de reciclagem dos REEE utilizou-se o indicador de circularidade Material Circularity Indicator (MCI) proposto por Ellen MacArthur Foundation, que visa mensurar quão circular é o fluxo de um determinado produto. Os resultados indicaram uma forte tendência à circularidade quando adicionada matéria prima reciclada na fabricação do medidor de energia elétrica inteligente (produto B), tornando-o uma opção atrativa para ser utilizada em substituição aos medidores convencionais.

Palavras-chave: Economia Circular, Indicadores de Circularidade, REEE.

1. Introdução

Podemos descrever a atual economia mundial como linear, onde materiais virgens são retirados da natureza, vão para a produção, são utilizados e, posteriormente, descartados. Além de gerar um alto nível de desperdício, vivemos em um mundo de recursos finitos e há indicações de que esse modelo está atingindo seus limites (EMF, 2019).

A média de geração de resíduos sólidos urbanos por brasileiro é de 1kg/dia, sendo que a maioria desses resíduos não possuem destinação correta e acabam indo para os chamados lixões. Porém, a redução no consumo ou o manejo adequado desses resíduos, seja para reuso ou reciclagem, é uma estratégia imprescindível para a conservação do meio ambiente (GOUVEIA, 2012).

A economia circular (EC) é um modelo econômico que busca desacoplar o desenvolvimento econômico da utilização de recursos finitos (EMF, 2019). Para Parajuly e Wenzel (2017), é uma alternativa ao modelo linear, pois representa linhas de produção e consumo mais sustentáveis. Em 2018 a economia global era 9,1%, porém, em 2020, essa taxa caiu para 8,6%. A lacuna de circularidade global está aumentando e essa tendência negativa pode ser explicada por três principais motivos: elevadas taxas de extração de matéria prima da natureza, estoques cada vez maiores e baixa utilização dos materiais ao fim da vida útil (CIRCLE ECONOMY, 2020).

Saidani et al. (2019) enfatizam a necessidade de utilizar métricas e ferramentas para quantificar os níveis da EC e que os indicadores de circularidade são adequados para tal. Segundo EMF (2019), os indicadores de circularidade são ferramentas que podem avaliar ou classificar empresas, além de fornecer as informações necessárias para acompanhar o progresso rumo a uma economia circular.

Uma gestão de recursos sustentável e eficiente é imprescindível para a aplicação da EC, sendo que um dos fluxos mais valiosos é o dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) (NOWAKOWSKI; MRÓWCZUNSKA, 2018), uma vez que contém metais preciosos em sua composição, como ouro, prata, platina e paládio (CARVALHO; XAVIER, 2014).

Segundo Callefi (2018), o crescente consumo de equipamentos eletroeletrônicos (EEE) aliado à redução de suas vidas úteis acarretaram em um aumento na geração de REEE. Esses produtos, descartados incorretamente, causam problemas ao meio ambiente e à saúde humana, uma vez que contém substâncias perigosas em sua composição, como chumbo, fósforo, mercúrio, cromo, cádmio e bário, sendo muito importante implementar legislação e políticas ambientais para prevenir esses danos (MATARAZZO et al., 2019).

A Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2020 instituiu a Política Nacional dos Resíduos Sólidos no Brasil, que visa a gestão integrada e o gerenciamento dos resíduos sólidos por meio da

destinação correta e logística reversa. Dentre seus objetivos, estão a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, incluindo os REEE.

Diante da importância de substituir processos lineares por circulares e realizar a destinação correta aos REEE, este estudo visa analisar o processo de reciclagem do policarbonato (PC) contido em medidores de energia elétrica em seu fim de vida e também definir um indicador de circularidade para que possamos mensurar a circularidade dos produtos e analisar os impactos nos resultados ao trocar matéria prima de fontes virgens por reciclada.

2. Metodologia

2.1. Metodologia da pesquisa

Para se ter uma visão geral sobre REEE e EC, a pesquisa iniciou-se com uma revisão na literatura utilizando como palavras-chave “economia circular”, “REEE” e “indicadores de circularidade”, também em inglês, nas bases de dados Periódicos CAPES e SciELO nos últimos 10 anos.

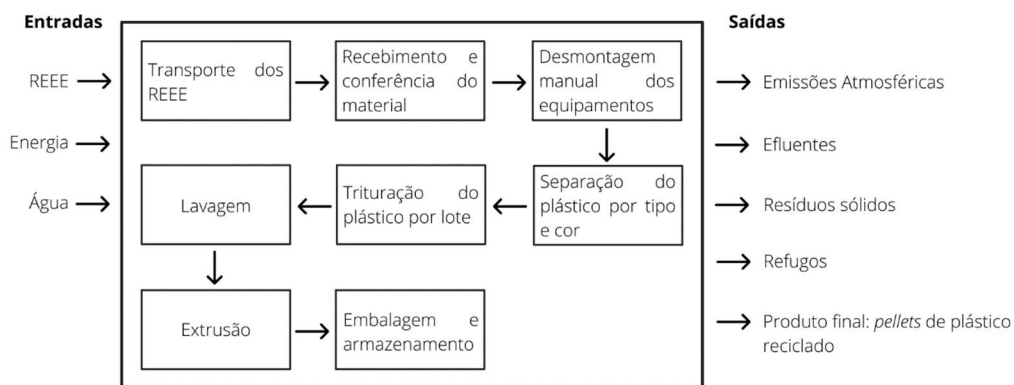
A pesquisa pode ser classificada como pesquisa bibliográfica, pois se baseia em artigos científicos, revistas e sites que já trataram sobre o assunto em questão (GIL, 2002), com abordagem quantitativa, uma vez que visa mensurar a circularidade dos medidores de energia (FONSECA, 2002).

O SintronicsTM, empresa onde foi realizado o estudo, é um centro de inovação em logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos, pioneiro no modelo de economia circular no Brasil, que busca transformar REEE em matéria prima para novos produtos, usando sua infraestrutura e tecnologias para extrair e reciclar os componentes plásticos.

No caso desse estudo, levou-se em consideração dois produtos (A e B): Produto A - medidor convencional, onde utiliza 100% PC virgem; e Produto B - chamado de medidor inteligente (90% PC reciclado e 10% PC virgem, onde o PC reciclado é proveniente do processo de reciclagem do medidor convencional).

O processo de reciclagem estudado é apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Processo de reciclagem de REEE



Fonte: Elaboração própria (2022)

O processo produtivo inicia-se com o transporte do REEE, que é coletado em todo o Brasil por uma empresa terceirizada. Quando chega, o material passa por conferência, em seguida vai para a desmontagem manual e separação dos plásticos por tipo (HIPS puro, ABS puro e outros como: PP, PS, PC, ABS com fibra de vidro, ABS com retardante de chama, ABS com policarbonato e retardante de chama) e cor.

Feito isso, os lotes de plástico separados são enviados a moinhos para fazer a trituração, posteriormente passam pela lavagem e seguem para a extrusora, equipamento responsável pela fusão do plástico e transformação em pellets. A última etapa é a embalagem e armazenamento desses pellets, que serão reinseridos na cadeia produtiva onde utilizam-se matéria prima reciclada. No caso do produto B, utiliza-se 90% de PC reciclado no processo descrito acima.

Para definirmos a métrica de circularidade a ser utilizada no presente artigo baseou-se no trabalho de Kristensen e Mosgaard (2020), onde os autores avaliam a EC em nível global, nacional, regional ou municipal, utiliza-se os indicadores classificados como macro; para simbiose industrial ou parques eco industriais são os indicadores classificados como meso; os indicadores de circularidade classificados como micro são utilizados para empresa e produto e, em especial nesse nível, há dificuldades de como medir e documentar os avanços rumo à EC. Assim, os autores analisaram 30 indicadores de circularidade de nível micro, categorizando-os em: reciclagem, remanufatura, reuso, eficiência de recursos, desmontagem, extensão de vida, gerenciamento de resíduos, gerenciamento de fim de vida e multidimensional.

2.2. Material estudado

Para realizar o estudo, utilizou-se o material Policarbonato (PC) presente nos medidores de energia convencional (A) e inteligente (B), onde o segundo vem como uma alternativa de substituição ao primeiro ao final de sua vida útil.

O medidor convencional pesa 0,9kg e tem 0,13kg de PC transparente/branco, enquanto que o inteligente pesa 1kg e tem 0,5kg de PC transparente/branco em sua composição. As figuras 2, 3, 4 e 5 mostram as peças de PC utilizadas no estudo.

Figura 2 - PC contido no medidor convencional



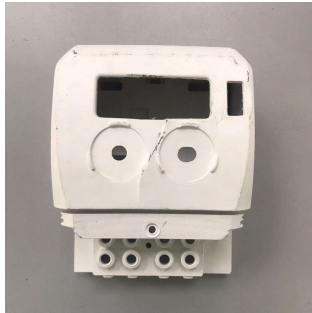
Fonte: Elaboração própria (2022)

Figura 3 - Proteção do medidor convencional



Fonte: Elaboração própria (2022)

Figura 4 - PC contido no medidor inteligente



Fonte: Elaboração própria (2022)

Figura 5 - Medidores inteligentes



Fonte: Elaboração própria (2022)

3. Resultados e discussões

Com o objetivo de analisar medidores de energia em seu fim de vida, considerou-se apenas os indicadores que se encaixam nas categorias de reciclagem e gerenciamento de resíduos que, dentre os 30 que foram avaliados no trabalho de Kristensen e Mosgaard (2020), são apenas 2: o Material Circularity Indicator (EMF, 2019) e o Sustainability Indicators in Circular Economy (SICE) (Mesa et. al, 2018). Enquanto que o SICE se aplica para famílias de produtos, o MCI é para produtos únicos, justificando, portanto, a sua escolha para a utilização no presente artigo. Para quantificar a circularidade dos dois produtos (A e B), aplicou-se o indicador de circularidade MCI com o objetivo de analisar a viabilidade da substituição de um medidor feito 100% de matéria prima virgem para um onde 90% de sua matéria prima é de origem reciclada. Após selecionado o indicador MCI (EMF, 2019), iniciou-se a análise e tratamento dos dados, bem como os cálculos para cada produto. Por fim, foi feita uma comparação entre os resultados obtidos na aplicação do indicador para os dois medidores de energia. Os dados utilizados para realizar os cálculos do MCI foram coletados no SINCRTONICS™.

3.1. Descrição do cálculo do MCI (*Material Circularity Indicator*)

Segundo a EMF (2019), o MCI tem foco na restauração dos fluxos de materiais no produto e baseia-se nos princípios a seguir:

- a) Fornecimento de materiais biológicos de fontes sustentadas;
- b) Uso de matéria prima de fontes reusadas ou recicladas;
- c) Manter o produto em uso por mais tempo;
- d) Reutilização ou reciclagem de materiais ao fim da fase de uso;
- e) Uso mais intensivo dos produtos;
- f) Garantir que os materiais biológicos permaneçam não contaminados e biologicamente acessíveis.

O MCI de um produto mede quão circular é seu fluxo, levando em consideração sua utilização em comparação à média de um produto semelhante disponível no mercado. O indicador é construído a partir de três características do produto: a quantidade de matéria prima virgem (V) usada na fabricação, a quantidade de resíduos irre recuperáveis (W) associado ao produto e o fator de utilidade (X), que leva em conta a duração e a intensidade do uso. A tabela 1 mostra os parâmetros usados no cálculo do MCI e suas respectivas definições.

Tabela 1 - Parâmetros para o cálculo do MCI e suas definições

Parâmetros	Definição
M	Massa de PC no medidor de energia
Fr	Fração da massa de matéria prima do produto que vem de fontes recicladas
Fu	Fração da massa de matéria prima do produto que vem de fontes reutilizadas
Fs	Fração da massa de matéria prima biológica do produto da Produção Sustentada (para ciclos biológicos)
V	Fração da massa do produto que não são de fontes recicladas, reusadas ou material biológico da Produção Sustentada
Cc	Fração da massa do produto que será coletada para compostagem ao fim da fase de uso
Ce	Fração da massa do produto que será coletada para recuperação de energia
Cr	Fração da massa do produto que será coletada para reciclagem
Cu	Fração da massa do produto que será coletada para reutilização dos componentes
Ec	Eficiência do processo de reciclagem usado na fração do produto que será reciclada

E_e	Eficiência do processo de recuperação de energia para a fração de materiais biológicos do produto que satisfaçam os requisitos de inclusão
E_f	Eficiência do processo de reciclagem usado para produzir matéria prima reciclada para o produto
B_c	Teor de carbono de um material biológico
W	Massa de resíduos irrecuperáveis associada a um produto
W_0	Massa de resíduos irrecuperáveis
W_c	Massa de resíduos irrecuperáveis gerados no processo de reciclagem de partes do produto
W_f	Massa de resíduos irrecuperáveis gerada ao produzir matéria-prima reciclada para o produto
LFI	Índice de linearidade
X	Utilidade do produto
$F(X)$	Fator de utilidade construído em função da utilidade X do produto
L	Vida útil média real do produto
L_{av}	Vida útil média de um produto do mesmo tipo
U	Número médio real de unidades funcionais obtidas durante a fase de uso do produto
U_{av}	Número médio de unidades funcionais obtidas durante a fase de uso de um produto do mesmo tipo
MCI_p	Indicador de circularidade do material usado no produto

Fonte: Adaptação de ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (2019)

3.1.1. Cálculo de Matéria-Prima Virgem (V)

Para calcular a quantidade de matéria-prima (MP) virgem que é usada no produto, considera-se a fração de MP derivada de fontes recicladas (Fr), fontes reutilizadas (Fu) e de materiais biológicos oriundos de produtos sustentáveis (Fs). Assim, o cálculo de MP virgem é dado por:

$$V = M \cdot (1 - Fr - Fu - Fs)$$

3.1.2. Cálculo de Resíduos Irrecuperáveis (W0)

Em seguida, calcula-se a quantidade de resíduos irrecuperáveis (W_0) associada ao produto. Sendo Cr a fração de massa que será coletada para reciclagem ao fim da fase de uso, Cu a fração de massa que será reutilizada, Cc a fração de massa que irá para a compostagem (produtos biológicos) e Ce a fração de massa que será usada para recuperação de energia, tem-se:

$$W_0 = M \cdot (1 - Cr - Cu - Cc - Ce)$$

Sendo Ec a eficiência do processo de reciclagem da fração de massa que será reciclada no fim da fase de uso do produto, a quantidade de resíduos gerada nesse processo (Wc) é dada por:

$$Wc = M \cdot (1 - Ec) \cdot Cr$$

Haverá também resíduos gerados para produzir qualquer conteúdo reciclado usado como matéria-prima (Wf), onde Ef é a eficiência do processo de reciclagem usado para produzir a matéria-prima reciclada:

$$Wf = M \cdot \frac{(1 - Ef) \cdot Fr}{Ef}$$

Referindo-se ao mesmo processo de reciclagem, assume-se que $Ec = Ef$. Porém a metodologia não requer um ciclo fechado, permitindo que Ec seja diferente de Ef . Ao calcular a quantidade total de resíduos irrecuperáveis (W), considera-se a massa de resíduos irrecuperáveis gerados no processo de reciclagem de partes do produto, dada por Wc , e a massa de resíduos irrecuperáveis gerada ao produzir matéria-prima reciclada para o produto, dada por Wf . Para evitar que o resíduo da reciclagem seja adicionado duas vezes, usa-se a abordagem 50:50, onde Wc e Wf são somados e divididos por 2, resultando na quantidade de resíduos gerados pela reciclagem associada a este produto.

$$\frac{Wf + Wc}{2}$$

Essa abordagem distribui a geração de resíduos igualmente entre o produto que a matéria-prima reciclada veio e o produto que utilizará o material coletado e reciclado. Logo, a quantidade total de resíduos irrecuperáveis (W) é dada por:

$$W = W0 + \frac{Wf + Wc}{2}$$

3.1.3. Cálculo do Índice de Fluxo Linear (LFI)

O LFI mede a proporção do material que flui linearmente, ou seja, provém de matéria prima virgem e acaba como resíduo irrecuperável, que é calculado da seguinte maneira:

$$LFI = \frac{V + W}{2M + \frac{Wf - Wc}{2}}$$

O LFI assume valor entre 0 e 1, onde 0 é um fluxo totalmente circular e 1 totalmente linear.

3.1.4. Cálculo da Utilidade do Produto (X)

O utilitário X leva em consideração dois componentes: o de comprimento da fase de vida útil do produto, L , e o de intensidade de uso (unidades funcionais), U .

$$X = \frac{L}{Lav} \cdot \frac{U}{Uav}$$

L_{av} é o tempo médio de vida útil de um produto similar disponível no mercado e U_{av} é a quantidade de unidades funcionais (utilidades) de um produto similar disponível no mercado. Aumentar a vida útil do produto (L) enquanto que a média do mercado (L_{av}) permanece a mesma resulta em um aumento do utilitário.

3.1.5. Cálculo do Indicador de Circularidade do Material (MCI)

O MCI considera o LFI e um Fator $F(X)$, que é construído como uma função F da utilidade X .

$$MCI^*p = 1 - LFI \cdot F(X)$$

Esse resultado pode ser negativo para produtos muito lineares (~ 1) ou quando o produto tem menos utilidades comparando a similares do mercado. Para evitar, define-se o MCI como:

$$MCIp = (0, MCI^*p)$$

Conforme a equação do MCI, o fator de utilidade $F(X)$ afeta apenas o LFI, ou seja, a parte linear do material. A equação do LFI garante que quanto maior a participação de fluxos restaurativos no produto, menor a influência da sua utilidade. Logo, o $MCIp$ assume valor igual a 1 quando o V e W são 0 (resultando em $LFI = 0$), sem importar o utilitário.

A função F é construída para que melhorias na utilidade do produto (por exemplo, maior tempo de vida útil ou inclusão de funcionalidades ao produto, para que ele desempenhe novas funções e satisfaça mais necessidades do cliente) afete o MCI da mesma forma que a reutilização de componentes, que levam a uma redução de MP virgem, e os resíduos irrecuperáveis impactam. A função F deve assumir a forma a/X , com a sendo uma constante. Assumir $a=0,9$ garante que o MCI seja, por convenção, de 0,1 para um fluxo totalmente linear ($LFI = 1$). Portanto:

$$F(X) = \frac{0,9}{X}$$

3.2. Dados dos produtos

O estudo visa mensurar os impactos na circularidade do medidor inteligente por conter matéria prima reciclada em sua composição, o que não ocorre no convencional. Futuramente, a empresa deseja que o máximo possível do plástico contido no medidor convencional seja reciclado e entre como matéria prima para o inteligente. A Tabela 2 apresenta os parâmetros de entrada para realizar os cálculos dos dois medidores que foram coletados na empresa.

Tabela 2 - Dados de entrada para o cálculo do MCI

Parâmetros	Medidor convencional	Medidor novo
M (kg)	0,13	0,5
Fr (%)	0	0,9
Fu (%)	0	0
Fs (%)	0	0

Cc (%)	0	0
Ce (%)	0	0
Cr (%)	1	1
Cu (%)	0	0
Ec (%)	0,98	0,98
Ee (%)	-	-
Ef (%)	0,98	0,98
Bc (%)	-	-
L (anos)	20	20
Lav (anos)	20	20
U (qtd)	1	1
Uav (qtd)	1	1

Fonte: Elaboração própria (2022)

- A massa de PC do medidor convencional é 0,13kg e do inteligente é 0,5kg;
- Como no medidor convencional toda sua matéria prima é virgem, seu $Fr = 0$. Já o inteligente tem 90% de sua matéria prima vindo de reciclagem, resultando em $Fr = 0,9$;
- Nenhum dos medidores utiliza matéria prima de fontes reutilizadas, logo, $Fu = 0$;
- Assim como também não usam matéria prima biológica, sendo $Fs = 0$;
- Ao fim de suas vidas úteis, não há coleta de resíduos para a compostagem, logo $Cc = 0$;
- Assim como não coletam os resíduos para recuperação de energia, resultado em $Ce = 0$;
- Todo o PC presente nos medidores é coletado para a reciclagem ao fim da fase de uso, obtendo $Cr = 1$;
- Como não há resíduos coletados para a reutilização em nenhum dos casos, $Cu = 0$.
- O processo de reciclagem do PC é 98% eficiente, logo, $Ec = 0,98$ para ambos;
- Como não se utilizam materiais biológicos nesses produtos, Ee não se aplica;
- Como os medidores são reciclados para entrarem como matéria prima em novos produtos, o processo de reciclagem é o mesmo, com eficiência $Ef = 0,98$;
- Bc também não se aplica aos produtos por não possuírem matéria prima biológica;
- A vida útil média real dos dois medidores, L , é de 20 anos, assim como um produto similar do mercado também tem vida útil média, Lav , igual a 20 anos;
- O número médio real de unidades funcionais dos medidores, U , e produtos similares do mercado, Uav , são iguais a 1, pois possuem apenas a função de proteção do medidor de energia.

3.3. Cálculo do MCI dos medidores de energia

3.3.1. Medidor convencional (A)

- Cálculo de matéria prima virgem (V):

$$V = 0,13. (1 - 0 - 0 - 0) = 0,13$$

Toda a matéria prima para produzir o medidor convencional provém de fontes virgens.

- Cálculo de Resíduos Irrecuperáveis ($W0$):

$$W0 = 0,13. (1 - 1 - 0 - 0 - 0) = 0$$

Como todo o PC presente no produto é destinado à reciclagem após o fim de sua vida útil, não há resíduos irrecuperáveis gerados nessa fase.

$$Wc = 0,13. (1 - 0,98). 1 = 0,0026$$

O processo de reciclagem, que possui 98% de eficiência, irá gerar 0,0026kg de resíduos irrecuperáveis ao reciclar o medidor convencional, resultando em 0,1274kg de massa para entrar como matéria prima para o medidor inteligente.

$$Wf = 0,13. \frac{(1 - 0,98). 0}{0,98} = 0$$

Como Wf visa medir a quantidade de massa de resíduos irrecuperáveis gerada ao produzir matéria-prima reciclada para o produto e nesse medidor só se utiliza matéria prima virgem, o resultado é igual a 0.

$$\frac{0 + 0,0026}{2} = 0,0013$$

Para evitar que o resíduo da reciclagem seja adicionado duas vezes, soma-se Wc e Wf e divide por 2.

$$W = 0 + 0,0013 = 0,0013$$

Portanto, a quantidade total de resíduos irrecuperáveis associada ao medidor convencional é igual a 0,0013kg, equivalente a 1% da massa total.

- Cálculo do índice de fluxo linear (LFI):

$$LFI = \frac{0,13 + 0,0013}{2.0,13 + \frac{0 - 0,0026}{2}} = \frac{0,1313}{0,26 - 0,0013} = \frac{0,1313}{0,2587} = 0,50753$$

Com um resultado mediano entre 1 e 0, a proporção do material que flui linearmente é significativa.

- Cálculo do utilitário (X):

$$X = \frac{20}{20} \cdot \frac{1}{1} = 1$$

Esse medidor tem sua vida útil estimada em 20 anos, assim como no mercado também se encontra similares com duração de 20 anos. Quanto às unidades funcionais, tanto a do produto

quanto a de um similar no mercado são iguais a um, possuindo como única funcionalidade a proteção do relógio de energia.

$$F(X) = \frac{0,9}{1} = 0,9$$

Logo, o fator de utilidade resulta em 0,9.

- Cálculo do MCI:

$$MCI * p = 1 - 0,50753 \cdot 0,9 = 0,54321$$

Com um MCI igual a 0,54321, tem-se um fluxo 54,32% circular para o medidor convencional.

3.3.2. Medidor inteligente (B)

- Cálculo de matéria prima virgem (V):

$$V = 0,5 \cdot (1 - 0,9 - 0 - 0) = 0,05$$

Ou seja, apenas 0,05kg de massa do medidor inteligente provém de matéria prima virgem extraída da natureza.

- Cálculo de Resíduos Irrecuperáveis ($W0$):

$$W0 = 0,5 \cdot (1 - 1 - 0 - 0 - 0) = 0$$

Não há resíduos gerados ao fim da fase de vida útil do medidor inteligente pois todo o PC contido nele é destinado à reciclagem.

$$Wc = 0,5 \cdot (1 - 0,98) \cdot 1 = 0,01$$

O medidor inteligente também possui 100% de sua massa destinada a um processo de reciclagem 98% eficiente, resultando em 0,01kg de resíduos irrecuperáveis nesse processo.

$$Wf = 0,5 \cdot \frac{(1 - 0,98) \cdot 0,9}{0,98} = 0,00918$$

90% da matéria prima do medidor inteligente vem da reciclagem do antigo. Esse processo acaba gerando resíduos irrecuperáveis, igual a 0,00918kg.

$$\frac{0,009183 + 0,01}{2} = 0,00959$$

Evitando usar duas vezes os resíduos da reciclagem, soma-se Wf e Wc e divide por 2.

$$W = 0 + 0,009591 = 0,00959$$

A quantidade de resíduos irrecuperáveis associada ao novo medidor é igual a 0,00959kg, representando 1,91% de sua massa total.

- Cálculo do índice de fluxo linear (LFI):

$$LFI = \frac{0,05 + 0,009591}{2 \cdot 0,5 + \frac{0,009183 - 0,01}{2}} = \frac{0,059591}{1 - 0,0004085} = \frac{0,059591}{0,999591} = 0,05961$$

Sendo bem mais próximo de 0 do que 1, a proporção do material que flui linearmente é muito baixa.

- Cálculo do utilitário (X):

$$X = \frac{20}{20} \cdot \frac{1}{1} = 1$$

O medidor inteligente também possui duração de 20 anos, como os produtos similares do mercado. Quanto às unidades funcionais, mantém-se 1.

$$F(X) = \frac{0,9}{1} = 0,9$$

Resultando em um fator de utilidade igual a 0,9.

- Cálculo do MCI:

$$MCI * p = 1 - 0,059615 \cdot 0,9 = 0,94634$$

Finalizando com um MCI de 0,94634, o medidor inteligente tem um fluxo consideravelmente circular (94,63%).

3.4. Comparação entre os MCIs

Segundo EMF (2019), um produto que é fabricado apenas com matéria prima virgem e é destinado a aterro sanitário após sua vida útil, pode ser considerado totalmente linear, enquanto que um produto que não contém matéria prima virgem e é completamente destinado para reciclagem (com processo 100% eficiente) ou reuso, pode ser considerado um produto totalmente circular. Em processos reais, os produtos ficam dentro do intervalo de 0 a 1, onde 0 representa um fluxo totalmente linear e 1, um fluxo totalmente circular.

A tabela abaixo mostra os resultados obtidos para os dois medidores de energia estudados:

Tabela 3 - Comparativo entre os cenários

	Medidor convencional	Medidor inteligente
LFI	0,50753	0,05961
MCI	0,54321	0,94634

Fonte: Elaboração própria (2022)

Os resultados obtidos indicaram uma forte tendência à circularidade quando se utiliza matéria prima reciclada na entrada do processo produtivo do medidor inteligente, cujo MCI foi de aproximadamente 0,95. Tal resultado traz pontos positivos para tomadores de decisão em relação ao uso de matéria prima de fontes recicladas.

Além disso, como o processo de reciclagem estudado apresenta alta eficiência, com perdas mínimas de 2%, esse resultado fortalece ainda mais a importância do uso de matéria prima reciclável considerando a exaustão de recursos futuramente.

Em relação ao LFI, que mede a proporção do material que flui linearmente, o produto A, medidor convencional, apresenta um resultado moderado porque, por mais que seja totalmente coletado para reciclagem ao final de sua vida útil, conta com 100% de matéria prima virgem.

Já o produto B, medidor inteligente, apresenta seu valor muito próximo de 0 porque é 100% coletado para reciclagem e 90% de sua matéria prima é de origem reciclada, indicando que a fração do produto que flui linearmente é baixa.

4. Considerações finais

Os princípios da economia circular estão se difundindo cada vez mais, pois se trata de uma alternativa ao modelo linear de produção, responsável por altos níveis de geração de resíduos e totalmente dependente da extração de matéria prima da natureza.

O SinctronicsTM é uma empresa que visa, cada vez mais, fechar o ciclo realizando a reciclagem dos componentes plásticos proveniente dos REEE coletados em todo o Brasil, pioneira na aplicação dos princípios da economia circular no mercado de eletroeletrônicos em todo o Brasil. Utilizar os indicadores de circularidade como ferramenta para mensurar a transição de uma economia linear para circular é algo novo, ainda em crescimento. O MCI visa analisar o desempenho de um produto no contexto da economia circular, medindo quão restaurador e regenerativo os fluxos dos materiais que compõe o produto são.

Para os produtos A e B estudados, que contam com 100% da massa de PC dos produtos sendo coletadas para reciclagem ao fim de suas vidas úteis e processos de reciclagem eficientes, a alteração na fonte de matéria prima do medidor inteligente, deixando de utilizar apenas matéria prima virgem para acrescentar 90% de material reciclado, resulta em um aumento expressivo no MCI, tornando-o mais atrativo, o que poderá auxiliar na tomada de decisão em optar pela troca dos medidores convencionais pelo inteligente em todo o Brasil.

5. Agradecimentos

As autoras agradecem todo o apoio recebido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) para a realização da pesquisa, sem o qual os resultados não poderiam ter sido obtidos com a mesma excelência e disponibilidade.

REFERÊNCIAS

- CALLEFI, M. H. B. M.; BARBOSA, W. P. **Gestão de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos em Maringá/PR**. GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas, Bauru, ano 13, nº 2, abr-jun/2018, p. 112-131.
- CARVALHO, T. C.; XAVIER, L. H. **Gestão de resíduos eletroeletrônicos: uma abordagem prática para a sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 240 p.
- CIRCLE ECONOMY. **The Circularity Gap Report 2020. When circularity goes from bad to worse: the power of countries to change de game**. Acesso em: 23 de maio de 2020.
- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Circularity Indicators - An Approach to Measuring Circularity - Methodology**. 2019. Disponível em: <<http://www.ellenmacarthurfoundation.org/circularity-indicators/>>. Acesso em: 27 de março de 2020.
- FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- GOUVEIA, N. **Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social**. Ciênc. saúde coletiva [online]. 2012, vol.17, n.6, pp.1503-1510. ISSN 1413-8123.
- KRISTENSEN, H. S.; MOSGAARD, M. A. **A review of micro level indicators for a circular economy – moving away from the three dimensions of sustainability?** Journal of Cleaner Production, v. 243, n. 118531, 2020.
- MATARAZZO, A. et al. **Mass Balance as Green Economic and Sustainable Management in WEEE Sector**. Energy Procedia, Athens, v. 157, p. 1377-1384, 2019.
- NOWAKOWSKI, P.; MRÓWCZUNSKA, B. **Towards sustainable WEEE collection and transportation methods in circular economy - Comparative study for rural and urban settlements**. Resources, Conservation and Recycling, v. 135, p. 93-107, 2018.
- PARAJULY, K.; WENZEL, H. **Potential for circular economy in household WEEE management**. Journal of Cleaner Production, v. 151, p. 272-285, May 2017.
- SAIDANI, M. et al. **A taxonomy of circular economy indicators**. Journal of Cleaner Production, v. 207, p. 542-559, 2019.