

UM MODELO *FUZZY*-QFD PARA PRIORIZAÇÃO DE AÇÕES DE GESTÃO DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

A FUZZY-QFD MODEL TO DEAL WITH ORDERING OF INITIATIVES IN E-WASTE MANAGEMENT

Francisco Rodrigues Lima Junior* E-mail: frjunior@utfpr.edu.br

Letícia Franciele de Faria Ferreira** E-mail: leticiaf_siac@hotmail.com

Ana Paula Duarte Seleglim** E-mail: anapauladuarte.seleglim@gmail.com

Luiz Cesar Ribeiro Carpinetti*** E-mail: carpinet@sc.usp.br

*Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, PR

**Centro Universitário da Fundação Educacional Guaxupé, Guaxupé, MG

***Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, SP

Resumo: Na literatura acadêmica há diversos modelos de decisão multicritério de apoio à gestão de resíduos sólidos. Contudo, não são encontrados estudos que foquem na priorização de ações de gestão de resíduos sólidos com o apoio de tais técnicas. Esse estudo propõe um modelo baseado no método *fuzzy*-QFD (*Quality Function Deployment*) para a priorização de ações de gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE). A implementação computacional foi feita usando *MS Excel*. O modelo foi aplicado em um centro universitário para definir a sequência de implantação de um conjunto de ações de gestão de REEE. Os resultados indicam que primeiramente a instituição deve substituir as pilhas comuns por recarregáveis. Em seguida, deve-se destinar os resíduos de pilhas aos fabricantes originais, instalar postos internos de recolhimento das mesmas, desenvolver políticas visuais de combate a desperdícios e adotar critérios ambientais no ato da compra de computadores. O modelo proposto pode ser aplicado em problemas de seleção ou de priorização de ações de gestão de resíduos que envolvam decisão em grupo sob incerteza.

Palavras-chave: Gestão de resíduos eletroeletrônicos. *Fuzzy*-QFD. Decisão multicritério.

Abstract: Several multicriteria decision making models for solid waste management can be found in the literature. However, there are no studies on ordering of initiatives for solid waste management actions using such techniques. This study proposes a model based on the *fuzzy*-QFD (*Quality Function Deployment*) method for prioritization of initiatives in e-waste management. The computational implementation was done using *MS Excel*. A pilot application case was carry out in a Higher Education Institution aiming to define a sequence for implementation of initiatives in e-waste management. The results indicate that firstly common batteries should be replaced by rechargeable ones. After that, it is necessary to send waste of lamps to the original manufacturers, to create some e-waste collection points, promote waste minimizing and adopt some environmental criteria when buying computers. The proposed model can be applied to selection or ordering of waste management initiatives that involve group decision making under uncertainty.

Keywords: E-waste management. *Fuzzy*-QFD. Multicriteria decision making.

1 INTRODUÇÃO

O gerenciamento de resíduos sólidos se refere ao conjunto de ações exercidas direta ou indiretamente nas etapas de coleta, segregação, transporte, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos (BRASIL, 2010). A gestão de resíduos sólidos no contexto das instituições de ensino superior (IES) é um assunto discutido por vários estudos (TAUCHEN; BRANDLI, 2006; JORGE et al., 2015; SAMMALISTO; SUNDSTRÖM; HOLM, 2015). As IES possuem vários motivadores para implantar práticas ambientais em sua gestão, tais como servir de exemplo no cumprimento da legislação (BRASIL, 2008; BRASIL, 2010), promover a conscientização quanto ao consumo racional de recursos naturais e desenvolver novos modelos de gestão e tratamento de resíduos (TAUCHEN; BRANDLI, 2006).

No Brasil, diversas IES possuem programas de gestão ambiental implementados. A Universidade do Vale do Rio dos Sinos desenvolveu um sistema de gestão ambiental exemplar e recebeu certificação ISO 14001 em 2004 (TAUCHEN; BRANDLI, 2006). A Faculdade de Medicina e o Hospital das Clínicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” iniciaram suas atividades de gestão de resíduos em 1994, quando criaram o Programa de Reciclagem de Papel (UNESP, 2017). A Universidade Federal de São Carlos desenvolveu iniciativas como o Projeto Canecas, o encontro anual da Semana do Meio Ambiente e Sustentabilidade e o Grupo Ambiental Ipê Amarelo (UFSCAR, 2017). Outras iniciativas são a implantação do Núcleo de Processamento de Resíduos na Universidade Federal de Santa Catarina e a criação de um Sistema de Gestão Ambiental na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (TAUCHEN; BRANDLI, 2006).

Enquanto algumas IES possuem programas de destaque nessa área, há outras que encontram dificuldades para armazenar e destinar adequadamente os resíduos produzidos (TAUCHEN; BRANDLI, 2006). Segundo Jorge et al. (2015), os principais obstáculos enfrentados pelas IES para alcançar o sucesso em suas iniciativas de sustentabilidade frequentemente se referem à falta de suporte da gestão interna, de envolvimento e treinamento dos funcionários em sustentabilidade, resistência à mudança, ausência de recursos financeiros, de informação atualizada,

de comunicação sobre sustentabilidade, de indicadores de desempenho, entre outros.

Na literatura acadêmica podem ser encontradas várias aplicações de técnicas de tomada de decisão relacionadas à gestão de resíduos sólidos, incluindo a escolha de um local adequado para instalação de aterros (EISELT; MARIANOV, 2015), avaliação de métodos de tratamento de resíduos (NIXON et al., 2013; YAP; NIXON, 2015), priorização dos materiais a serem recuperados (WANG; GAUSTAD, 2012), avaliação de programas de reciclagem (WIBOWO; DENG, 2015) e avaliação de modelos de gestão de resíduos (MILUTINOVIC et al., 2014). Contudo, nas buscas realizadas em bases de periódicos nacionais e internacionais, não foram encontrados estudos que foquem na priorização de ações de gerenciamento de resíduos sólidos com o apoio de técnicas de tomada de decisão. Além disso, existe uma carência de estudos que proponham soluções baseadas nessas técnicas para os problemas de gestão enfrentados pelas IES.

Uma técnica de apoio à decisão multicritério que vem sendo cada vez mais utilizada na literatura (JUAN et al., 2009; LIMA JUNIOR; CARPINETTI, 2016) é denominada *fuzzy-QFD* (*Quality Function Deployment*). Esse método é capaz de apoiar decisões nas quais não há dados numéricos exatos para avaliar o desempenho das alternativas e por isso são utilizadas informações em formato linguístico, fornecidas por um ou mais tomadores de decisão. Além de apoiar a decisão em grupo, outras características relevantes do *fuzzy-QFD* se referem à simplicidade dos cálculos e à capacidade de considerar uma quantidade não limitada de critérios e alternativas (JUAN et al., 2009; LIMA JUNIOR; CARPINETTI, 2016). Uma vez que não são encontradas aplicações deste método no contexto de gestão de REEE, este estudo se propõe a investigar: “como o método *fuzzy-QFD* pode ser usado apoiar decisões relacionadas ao planejamento da coleta e da destinação final de REEE?”. A partir desse questionamento, este estudo constrói seu objetivo: desenvolver e aplicar um modelo multicritério de tomada de decisão, baseado no método *fuzzy-QFD*, para definir a prioridade de implantação de ações de gerenciamento de REEE em um centro universitário.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Gestão de REEE

Os REEE são materiais produzidos pelo descarte de eletrodomésticos, computadores, componentes periféricos, dentre outros produtos eletrônicos. São um dos tipos de resíduo cuja produção mais cresce anualmente, com taxa anual de crescimento entre 3 e 5% (AFROZ et al., 2013). Entre 2003 e 2010, a produção anual de computadores cresceu 337%, indo de 3,2 milhões para 14 milhões de unidades anuais (OLIVEIRA; MARINS; MUNIZ JÚNIOR, 2016). Estima-se que a produção *per capita* de REEE no Brasil em 2008 era de 3,8 kg, subindo para 7 kg em 2014 (SOUZA et al., 2016).

Os REEE requerem um gerenciamento diferenciado devido à potencialidade de causar problemas socioambientais. Conforme mostra o Quadro 1, muitas substâncias contidas em equipamentos eletroeletrônicos podem causar problemas graves à saúde humana.

Quadro 1 - Substâncias presentes em REEE e possíveis danos à saúde

Substância	Possíveis danos à saúde
Mercúrio	Danos ao cérebro e fígado.
Cádmio	Envenenamento, problemas nos ossos, rins e pulmões.
Berílio	Câncer no pulmão.
Retardantes de chamas	Problemas hormonais, no sistema nervoso e reprodutivo.
Chumbo	Causa danos ao sistema nervoso e sanguíneo.
Bário	Edema celular, fraqueza muscular e danos ao coração, fígado e braço.
PVC	Se inalado, pode causar problemas respiratórios

Fonte: Ferreira e Ferreira (2008)

Diante da gravidade desse problema, a reciclagem de REEE surge como uma alternativa que permite diminuir o uso de recursos virgens nos processos de manufatura e contribuir para a redução da poluição ambiental. Um dos motivadores econômicos da reciclagem de REEE é a alta presença de mais de 60 diferentes metais, incluindo cobre, ouro, prata, paládio, alumínio e ferro, encontrados principalmente em placas de circuito impresso (KUMAR et al., 2017). Ikhlayel (2017) utilizou a metodologia avaliação do ciclo de vida (*Life Cycle Assessment*, LCA) para verificar os benefícios e impactos de algumas alternativas de destinação de REEE. A partir dos resultados obtidos, esse autor recomenda a adoção de sistemas

integrados de gestão de REEE, combinando a reciclagem de materiais diversos, a incineração do plástico e materiais perigosos e o uso de aterros sanitários para as partes restantes.

Segundo Afroz et al. (2013), a maioria dos países desenvolvidos estão gerenciando de forma bem sucedida os REEE por meio da formulação de estratégias efetivas, do desenvolvimento de estruturas de reciclagem e da adoção do princípio de responsabilidade estendida do produtor. Em 2003, a União Europeia aprovou duas diretrizes a serem seguidas pelos estados membros. A *Directive 2002/95/EC* impõe restrições ao uso de substâncias perigosas em equipamentos eletroeletrônicos. Já a *Directive 2002/96/EC* é uma norma direcionada à redução, reutilização e reciclagem dos respectivos resíduos, que torna os produtores financeiramente responsáveis pelo produto quando estes se transformam em resíduos (SILVA; PIMENTA; CAMPUS, 2013).

No Japão, em 2001, foi sancionada a lei *Japan's Home Appliance Recycling Law*, atestando que os consumidores são obrigados a pagar uma taxa de reciclagem para o descarte de eletrodomésticos (KUMAR et al., 2017). Embora os EUA ainda não possuam uma legislação federal específica para a gestão de REEE, a Agência de Proteção Ambiental iniciou um plano de ação chamado *National Electronics Action Plan*, que dispõe sobre a gestão de resíduos de computadores, televisores e telefones celulares (AFROZ et al., 2013).

No Brasil, o surgimento de leis e resoluções que tratam da gestão de REEE é relativamente recente. Em 1999, o Conselho Nacional do Meio Ambiente aprovou a Resolução nº 257/99, que determina que após o esgotamento energético das pilhas, estas deverão ser entregues pelos usuários aos estabelecimentos que as comercializam ou à rede de assistência técnica autorizada, para encaminhamento aos fabricantes ou importadores, visando à adoção de procedimentos de reutilização, reciclagem, tratamento ou disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 1999a). Entretanto, tal resolução não dispõe sobre alguns tipos de pilhas. Devido a isso, foi aprovada a edição de uma resolução complementar, de nº 293/99, que inclui pilhas miniatura e botão (BRASIL, 1999b). Em 2008, essas resoluções foram substituídas pela Resolução nº 401, que estabelece os limites máximos de chumbo, cádmio e mercúrio para pilhas e baterias e os critérios e padrões para o seu gerenciamento ambientalmente adequado (BRASIL, 2008; SILVA; PIMENTA; CAMPUS, 2013).

Em 2010, foi aprovada a Lei nº 12.305, que trata da Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil (PNRS). O objetivo desta lei é atuar na geração, redução, reutilização e tratamento de resíduos sólidos, assim como na destinação final ambientalmente adequada dos rejeitos. Essa lei notabiliza que o poluidor é obrigado, independentemente de haver culpa, a ressarcir ou compensar os danos causados ao meio ambiente e a terceiros afetados por exercício de sua atividade. Também estabelece que os fabricantes, importadores e distribuidores de lâmpadas, pilhas e eletroeletrônicos, dentre outros produtos, são obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa que propiciem o retorno dos produtos após o uso pelo consumidor, de forma independente do serviço público de limpeza urbana (BRASIL, 2010).

Em 2013, o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior publicou um estudo intitulado “Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos”. Dentre várias constatações, esse estudo apontou que: a alta informalidade da coleta e da logística de REEE faz com que o suprimento de matéria-prima para as empresas de reciclagem seja instável; há uma baixa eficiência na segregação e tratamento de materiais nobres em comparação com tecnologias existentes em outros países; alguns REEE gerados no Brasil são exportados para receberem o devido tratamento; falta capital para as empresas de reciclagem investirem em tecnologias de ponta. As iniciativas de gestão de REEE existentes contribuem para a minimização do problema, mas não conseguem atingir uma esfera nacional (ABDI, 2013). Desse modo, o descarte desses resíduos em aterros ainda costuma ser utilizado no Brasil.

2.2 Modelos de Decisão de apoio à Gestão De Resíduos Sólidos

A gestão de resíduos sólidos envolve uma série de problemas de tomada de decisão que requerem a avaliação de múltiplas alternativas considerando múltiplos critérios. Na maioria deles, o objetivo é construir um *ranking* global de alternativas com base na pontuação alcançada por cada alternativa em cada critério, considerando também os diferentes pesos dos critérios. Em um estudo de revisão sobre aplicações de métodos multicritério em problemas de decisão relacionados à gestão de resíduos sólidos, Soltani et al. (2015) identificaram 68 publicações, sendo que a maioria aborda o problema de seleção de localização de instalações ou

aterros. Apenas 26 estudos utilizam técnicas que dão suporte à decisão em grupo. Outra constatação é que o AHP (*Analytic Hierarchy Process*) é o método mais utilizado, sendo adotado por metade dos estudos (SOUZA et al., 2016).

O Quadro 2 apresenta uma lista de estudos que propõem modelos multicritério de apoio à gestão de resíduos. Alguns exemplos de situações de decisão nesse contexto consistem na escolha de um local adequado para instalação de aterro sanitário (EISELT; MARIANOV, 2015), na avaliação dos métodos de tratamento de resíduos disponíveis (NIXON et al., 2013; YAP; NIXON, 2015), priorização de materiais a serem recuperados (WANG; GAUSTAD, 2012), avaliação do desempenho de programas de reciclagem (WIBOWO; DENG, 2015) e avaliação de modelos de gestão de resíduos (MILUTINOVIC et al., 2014). Entre as técnicas utilizadas, incluem-se métodos de programação matemática (ZHANG; HUANG, 2014; EISELT; MARIANOV, 2015), métodos multicritério tradicionais, como AHP (MILUTINOVIC et al., 2014; YAP; NIXON, 2015) e ANP (NIXON et al., 2013), e métodos híbridos baseados na teoria dos conjuntos *fuzzy*, como *fuzzy* AHP e *fuzzy* TOPSIS (PRAKASH; BARUA, 2015).

Quadro 2 – Modelos multicritério de apoio à gestão de resíduos sólidos

Autor(es)	Técnica(s)	Escopo
Dursun, Karsak e Karadayi (2011)	Abordagem hierárquica combinada com <i>integral fuzzy</i>	Avaliação de alternativas de tratamento para resíduos hospitalares
Eiselt e Marianov (2015)	Programação matemática	Definição de um local para instalar um aterro municipal
Guerrero-Baena, Gomez-Limon e Fruet (2015)	ANP	Seleção de alternativas de sistema de gestão ambiental
Kim et al. (2013)	<i>Fuzzy-TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)</i>	Priorização dos locais para o uso de águas residuais tratadas
Milutinovic et al. (2014)	AHP	Avaliação da sustentabilidade de modelos de gestão de resíduos
Nixon et al. (2013)	ANP (<i>Analytical Network Process</i>)	Avaliação das opções de recuperação de energia dos resíduos sólidos de um aterro
Prakash e Barua (2015)	<i>Fuzzy-AHP</i> e <i>fuzzy-TOPSIS</i>	Identificação e ranqueamento de soluções de logística reversa na indústria eletrônica
Souza et al. (2016)	Composição de preferências probabilísticas	Avaliação de alternativas de sistema de gestão de REEE
Wibowo e Deng (2015)	Operações entre números <i>fuzzy</i> intuicionistas	Avaliação do desempenho de programas de reciclagem de REEE
Yap e Nixon (2015)	AHP	Análise das opções de recuperação de energia dos resíduos sólidos de um aterro
Zhang e Huang (2014)	Programação inteira <i>fuzzy</i>	Planejamento da gestão de resíduos sólidos considerando gases de efeito estufa
Wang e Gaustad (2012)	Análise multicritério baseada em soma ponderada	Priorização de materiais a serem recuperados de resíduos de placas de circuito impresso

Fonte: Autores

Enquanto as técnicas comparativas e os métodos baseados em lógica *fuzzy* são adequados para problemas de decisão sob incerteza, que envolvem aspectos qualitativos e medidas imprecisas, as técnicas baseadas em valores *crisp* (WANG; GAUSTAD, 2012; EISELT; MARIANOV, 2015) são inapropriadas para a modelagem de tais problemas. Contudo, as técnicas comparativas AHP (MILUTINOVIC et al., 2014; YAP; NIXON, 2015), ANP (NIXON et al., 2013) e *fuzzy*-AHP (PRAKASH; BARUA, 2015) podem inverter o resultado do ranqueamento sempre que novos critérios ou alternativas são incluídos ou excluídos. Além disso, o uso dessas técnicas limita a quantidade de alternativas e critérios que podem ser avaliados simultaneamente por requerer a comparação par a par entre os elementos avaliados. Outro problema que afeta a técnica *fuzzy*-AHP é a ocorrência de valores nulos para o peso dos critérios e pontuação das alternativas (LIMA JUNIOR; OSIRO; CARPINETTI, 2014), o que prejudica os resultados obtidos.

Embora o *fuzzy*-QFD seja uma técnica simples e que não apresenta as limitações do AHP e do *fuzzy*-AHP, não foram encontradas aplicações do *fuzzy*-QFD em problemas relacionados à gestão de resíduos sólidos. Para possibilitar um melhor entendimento desse método, a subseção a seguir apresenta algumas definições fundamentais sobre a teoria dos conjuntos *fuzzy*.

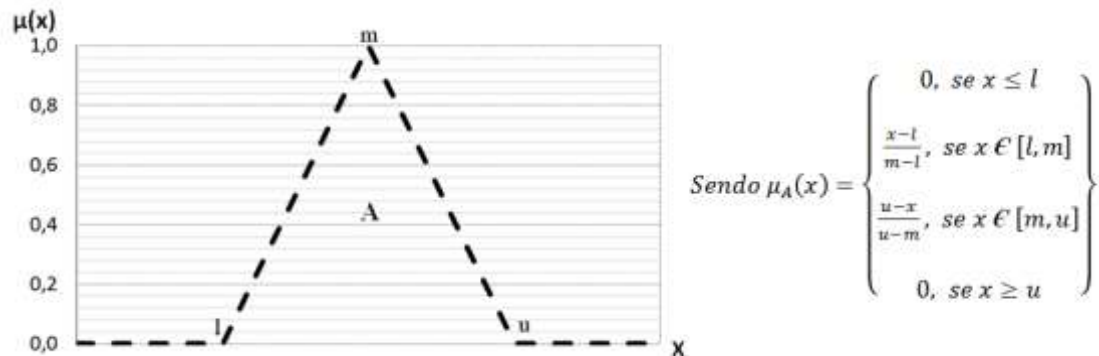
2.3 Teoria dos Conjuntos *Fuzzy*

A teoria dos conjuntos *fuzzy* (*Fuzzy Set Theory* - FST) vem sendo aplicada na modelagem de sistemas com variáveis qualitativas, propriedades subjetivas e/ou valores imprecisos. No método *fuzzy*-QFD, as pontuações das alternativas e o peso dos critérios são representados por variáveis linguísticas. O uso de variáveis linguísticas requer a definição de um conjunto de termos linguísticos para mensurar seus valores de forma adequada (JUAN et al., 2009). Por exemplo, o valor da variável linguística “tempo necessário para implantação” pode ser medido por meio dos termos linguísticos “pouco”, “mediano” e “muito”.

Termos linguísticos são comumente representados por números *fuzzy* triangulares, trapezoidais ou sigmoidais. O formato de um número *fuzzy*, definida por meio do comportamento de sua função de pertinência $\mu(x)$, permite a quantificação da imprecisão associada a uma informação. Conforme a Figura 1, um número *fuzzy* triangular pode ser escrito na forma (l, m, u) , em que m denota um valor *crisp* formal

para o conjunto *fuzzy*, l é o limite inferior e u é o limite superior (LIMA JUNIOR; CARPINETTI, 2016).

Figura 1 - Número *fuzzy* triangular



Fonte: Lima Junior e Carpinetti (2016)

Operações algébricas com dois números triangulares \tilde{A} e \tilde{B} podem ser feitas usando a Equação 1 para soma, Equação 2 para subtração, Equação 3 para multiplicação e Equação 4 para divisão (LIMA JUNIOR; CARPINETTI, 2016).

$$\tilde{A} + \tilde{B} = [l_A, m_A, u_A] + [l_B, m_B, u_B] = [l_A + l_B, m_A + m_B, u_A + u_B] \quad (1)$$

$$\tilde{A} - \tilde{B} = [l_A, m_A, u_A] - [l_B, m_B, u_B] = [l_A - l_B, m_A - m_B, u_A - u_B] \quad (2)$$

$$\tilde{A} * \tilde{B} = [l_A, m_A, u_A] * [l_B, m_B, u_B] = [l_A * l_B, m_A * m_B, u_A * u_B] \quad (3)$$

$$\tilde{A} / \tilde{B} = [l_A, m_A, u_A] / [l_B, m_B, u_B] = \left[\frac{l_A}{u_B}, \frac{m_A}{m_B}, \frac{u_A}{l_B} \right] \quad (4)$$

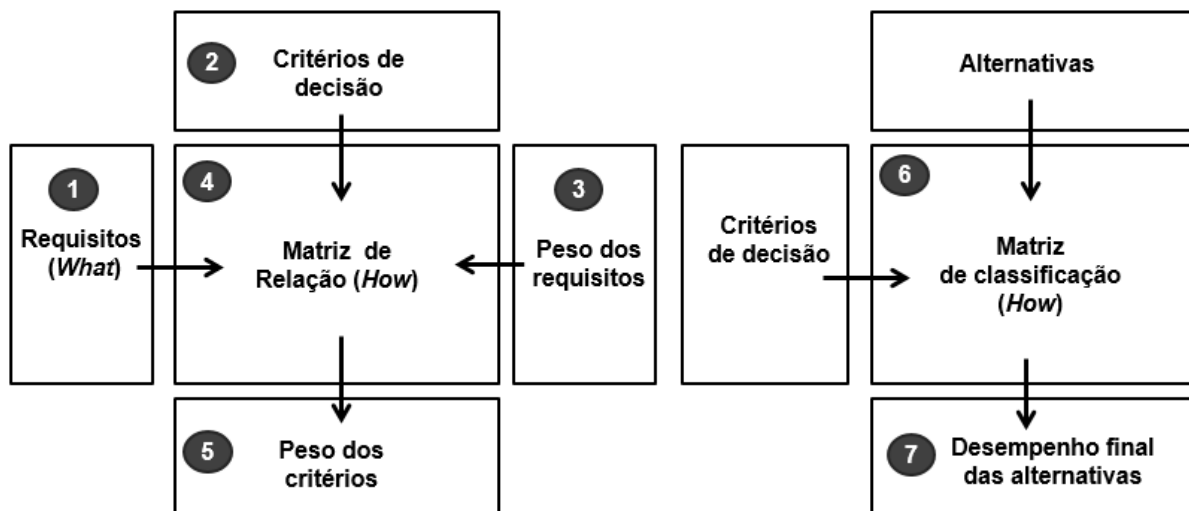
2.4 O Método *Fuzzy*-QFD

O método *fuzzy*-QFD combina operações algébricas *fuzzy* com as matrizes de priorização (“*what*”) e de relacionamento (“*how*”) que compõem a técnica QFD. Há diferentes versões do método *fuzzy*-QFD. Fung et al. (1999) e Temponi (1999) propõem o uso de inferência *fuzzy* para avaliar o relacionamento entre elementos das matrizes “*what*” e “*how*”. Wang (1999) desenvolveu uma abordagem de classificação *fuzzy* para priorizar os elementos da matriz “*how*”. Juan et al. (2009) utilizam números *fuzzy* triangulares e operações algébricas *fuzzy* para ponderar os elementos das matrizes “*what*” e “*how*”. Dursun e Karsak (2013) empregam média

ponderada *fuzzy* para calcular os limites superior e inferior dos pesos dos critérios e das pontuações das alternativas.

A versão do método *fuzzy*-QFD utilizada no presente estudo é uma adaptação da abordagem proposta por Juan et al. (2009). Conforme mostra a Figura 2, a abordagem originalmente proposta por Juan et al. (2009) é subdividida em 7 etapas. A etapa 1 está voltada para a identificação dos requisitos do cliente. Na etapa 2, é feito um levantamento de critérios com base na literatura relacionada e/ou em entrevistas com especialistas. A etapa 3 foca na ponderação de requisitos usando uma matriz “*what*” com base nos julgamentos linguísticos fornecidos por *d* especialistas ($d = 1, \dots, t$). Cada requisito é identificado por seu índice *i*, sendo $i = 1, \dots, n$.

Figura 2 – Etapas do método *fuzzy*-QFD



Fonte: Juan et al. (2009)

A Equação 5 é usada para agregar as opiniões dos especialistas (\tilde{z}_i^d) em relação ao peso de cada requisito. O resultado dessa operação é desfuzificado pela Equação 6 e normalizado usando a Equação 7.

$$\tilde{x}_i = \sum_{d=1}^t (\tilde{z}_i^d) / t \quad (5)$$

$$x_i = (l_i + 2 * m_i + u_i) / 4 \quad (6)$$

$$w_i = x_i / \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

Na etapa 4, usando uma matriz “*how*”, os especialistas avaliam a intensidade

do relacionamento entre os requisitos do cliente e os critérios j selecionados na etapa 2 ($j = 1, \dots, m$). Na Etapa 5, os julgamentos fornecidos pelos tomadores de decisão (\tilde{r}_{ij}^d) são agregados utilizando a Equação 8. Os valores agregados resultantes (\tilde{r}_{ij}) são usados para calcular o peso de cada critério (\tilde{p}_j) por meio da Equação 9, que realiza uma operação de soma ponderada ao longo de cada coluna da matriz "how". Em seguida, deve-se desfuzificar os pesos usando a Equação 10 e normalizar os resultados conforme a Equação 11.

$$\tilde{r}_{ij} = \frac{\sum_{d=1}^t (\tilde{r}_{ij}^d)}{t} \quad (8)$$

$$\tilde{p}_j = \sum_{i=1}^n w_i \times \tilde{r}_{ij} \quad (9)$$

$$p_j = (l_j + 2 \times m_j + u_j) / 4 \quad (10)$$

$$pn_j = p_j / \sum_{j=1}^m p_j \quad (11)$$

Na etapa 6, os especialistas devem definir um conjunto de alternativas e avaliar a pontuação destas em relação aos critérios usando uma matriz "how". Finalmente, na etapa 7, é feito o cálculo do desempenho global das alternativas e o ranqueamento em ordem decrescente. Os cálculos usados nesta etapa são análogos aqueles usados na etapa 5: agregação de julgamentos, soma dos produtos de cada coluna, desfuzificação e normalização.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Conforme a classificação proposta por Bertrand e Fransoo (2002), este estudo consiste em uma pesquisa quantitativa descritiva baseada em modelagem e simulação. Nesse tipo de pesquisa, são usados modelos quantitativos baseados em um conjunto de variáveis inter-relacionadas, que representam um domínio de problema específico, para investigar a realidade do problema modelado. Sobre as etapas, a pesquisa está organizada como segue:

i. Pesquisa bibliográfica: envolveu a análise de artigos, livros e outros materiais sobre gestão de REEE, lógica *fuzzy* e *fuzzy-QFD*. Esta etapa forneceu embasamento teórico para a condução da pesquisa de campo e também para a etapa de modelagem e simulação computacional;

ii. Pesquisa de campo: foi feita em um centro universitário localizado em Minas Gerais. A coleta de dados foi realizada em duas etapas. Na primeira delas, a fim de traçar um diagnóstico da situação da gestão de REEE no campus visando à proposição de ações de melhoria, foi desenvolvido um questionário composto por nove questões dissertativas, apresentado no Apêndice A. As questões são voltadas para a identificação das práticas de gestão de resíduos existentes, volume de resíduos descartados, motivos do descarte, procedimentos adotados para o descarte e destinação final dos resíduos. Foram entrevistados seis funcionários: um pró reitor administrativo, um professor da área ambiental, um gerente de TI, um responsável pela manutenção predial, um responsável pelo almoxarifado e um electricista. Também foram realizadas visitas *in loco* visando conhecer de perto as práticas vigentes de gerenciamento de REEE. Com base nas informações obtidas por meio da revisão bibliográfica, da aplicação do questionário e das visitas *in loco*, foram propostas nove ações de gestão de REEE no *campus*. Na segunda etapa de coleta de dados, realizaram-se duas reuniões com três funcionários da IES, os quais atuaram como tomadores de decisão na aplicação do modelo fuzzy-QFD. Os objetivos dessas reuniões foram a validação das ações propostas, escolha dos critérios a serem usados na avaliação das ações e avaliação do peso dos critérios e da pontuação das ações propostas. Para avaliar o peso dos critérios e as pontuações das ações, foi utilizado o questionário apresentado no Apêndice B;

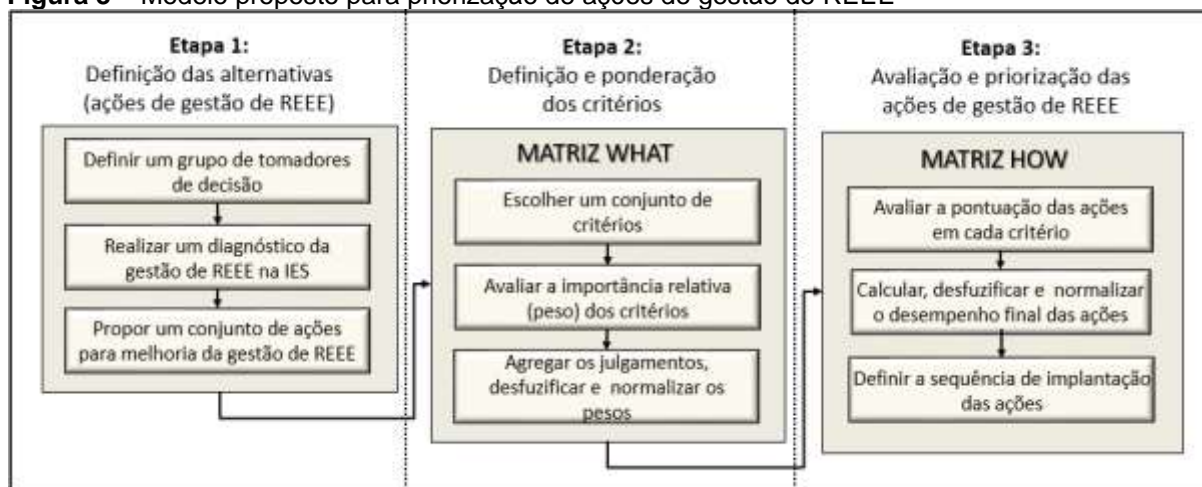
iii. Modelagem e simulação: um modelo computacional baseado no método *fuzzy-QFD* foi desenvolvido usando o *MS Excel*. As escalas linguísticas e os universos de discurso das variáveis foram definidos com base em Juan et al. (2009) e Lima Junior e Carpinetti (2016). Os julgamentos linguísticos a respeito do peso dos critérios e das pontuações das alternativas, obtidos dos decisores na segunda etapa da coleta de dados usando o questionário do Apêndice B, foram inseridos no modelo computacional para definir uma ordem de prioridade para as ações propostas. Os resultados são detalhados a seguir.

4 MODELO FUZZY-QFD PARA PRIORIZAÇÃO DE AÇÕES DE GESTÃO DE REEE

O modelo proposto para apoiar a priorização de ações de gestão de REEE é baseado no *fuzzy-QFD* e mostrado na Figura 3. As operações *fuzzy* realizadas nas

matrizes “*what*” e “*how*” são baseadas na abordagem *fuzzy*-QFD proposta por Juan et al. (2009). Utilizou-se uma matriz “*what*” na etapa de ponderação dos critérios (Equações 5 a 7) e uma matriz “*how*” na etapa de avaliação das alternativas (Equações 8 a 11). Diferentemente da abordagem proposta por Juan et al. (2009), a fim de simplificar o processo de tomada de decisão e torná-lo mais ágil e compreensível, no modelo proposto a escolha e ponderação de critérios é feita de forma direta e não é baseada em um conjunto de requisitos.

Figura 3 – Modelo proposto para priorização de ações de gestão de REEE



Fonte: Autores

Na etapa 1, o objetivo principal é definir um conjunto de ações visando à melhoria da gestão de REEE na organização. Primeiramente, selecionam-se alguns *stakeholders* relacionados à gestão de resíduos sólidos na organização, que atuarão como tomadores de decisão. Na sequência, deve-se realizar um diagnóstico da situação atual da gestão de REEE a fim de identificar problemas e oportunidades de melhoria. Isso pode ser feito por meio de entrevistas a funcionários, análise documental e observações *in loco*. A partir dos resultados desse diagnóstico, definem-se um conjunto de ações de gestão visando à adequação e melhoria das práticas vigentes para coleta e destinação de REEE. Para isso, as legislações vigentes deverão ser consultadas. A IES também pode se basear em soluções desenvolvidas por outras organizações e buscar programas fundamentados na responsabilidade estendida pelo produtor.

Na etapa 2, cabe aos tomadores de decisão definir os critérios de priorização das alternativas que melhor correspondem às necessidades da organização, o que poderá ser feito por meio de *brainstorming* e/ou da literatura acadêmica. Um analista

de suporte deve definir duas escalas linguísticas, sendo uma delas para estimar o peso dos critérios na etapa 2, e a outra para quantificar a pontuação das ações a serem priorizadas na etapa 3. Após isso, coleta-se os julgamentos dos decisores em relação aos pesos dos critérios. Na matriz “*what*”, usando a Equação 5, deve-se agregar os julgamentos coletados. Em seguida, esses valores são desfuzificados pela Equação 6 e normalizados por meio da Equação 7.

Na etapa 3, a pontuação das ações em cada critério é estimada pelos decisores usando julgamentos linguísticos. Na matriz “*how*”, deve-se agregar esses julgamentos utilizando a Equação 8. A Equação 9 pondera a pontuação das alternativas usando os valores dos pesos resultantes da etapa 2. Posteriormente, deve-se desfuzificar os resultados usando a Equação 10 e normalizá-los aplicando a Equação 11. Os valores do desempenho global das alternativas, fornecidos pela Equação 11, devem ser ordenados decrescentemente. Quanto maior o valor, maior será a prioridade de implantação da ação. Para ilustrar a aplicação do modelo, um caso real é apresentado a seguir.

5 APLICAÇÃO DO MODELO EM UMA IES

O centro universitário analisado possui aproximadamente 2.500 alunos e 330 funcionários. Atualmente oferece 20 cursos de graduação, cursos de pós-graduação e de extensão. Alguns cursos da instituição, como engenharia de produção, química, biologia e direito, possuem uma interface direta com a área de gestão ambiental.

5.1 Definição das alternativas

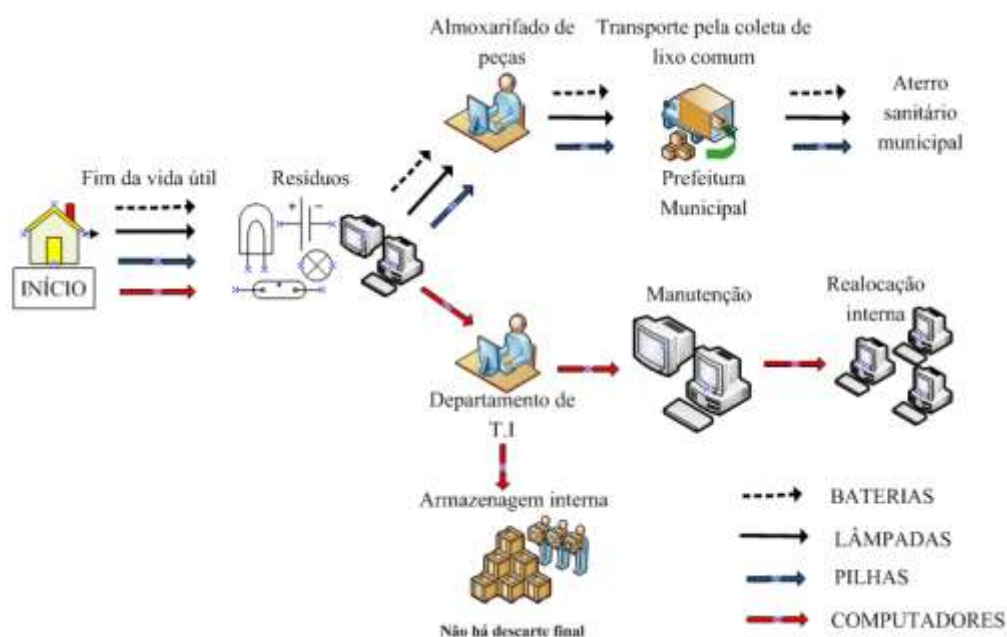
Seguindo os procedimentos do modelo proposto na Figura 3, na etapa 1, a aplicação do *fuzzy*-QFD foi iniciada com a formação de um grupo de decisores que são funcionários da IES analisada. Esse grupo foi composto por três funcionários envolvidos com a área de gestão ambiental, sendo um professor do curso de Engenharia de Produção (DM_1), uma professora de Engenharia Química (DM_2) e um funcionário da área administrativa e financeira (DM_3). Na sequência, foi feito um diagnóstico da situação atual da gestão de REEE na IES, conforme descrito na seção 3.

A partir das informações levantadas por meio do questionário e de observações *in loco* apresentado no Apêndice A, verificou-se que a instituição

atualmente não possui um plano de gestão de resíduos sólidos. Devido à inexistência de políticas de gerenciamento, os funcionários não são treinados suficientemente nem cobrados em relação a tais práticas. Os únicos treinamentos oferecidos são as palestras sobre gestão ambiental realizadas na instituição e o treinamento anual realizado pela Comissão Interna de Prevenção de Acidentes.

O volume mensal de REEE descartados varia segundo vários fatores, tais como reformas estruturais, recessos escolares e eventos. São descartadas em média 12 pilhas por mês. Os procedimentos de descarte são comuns para as pilhas e lâmpadas. A Figura 4 sintetiza as etapas de descarte dos resíduos analisados. O próprio usuário ou o responsável pela manutenção predial realiza o envio das mesmas ao almoxarifado, para posteriormente serem encaminhadas ao descarte final, que é realizado pela prefeitura municipal em um aterro sanitário.

Figura 4 - Procedimentos de destinação dos REEE



Fonte: Autores

Em relação aos resíduos de computadores, até o momento a IES não apresenta nenhuma política para o descarte. Os equipamentos descartados são substituídos e armazenados em um almoxarifado. Por causa disso, acumulou-se ao longo do tempo um grande volume de equipamentos. A fim de prolongar o tempo de vida útil, os microcomputadores, *mouses*, teclados e monitores passam por processos de manutenção preventiva e corretiva quando necessário. É de responsabilidade da equipe de TI a realização da substituição dos equipamentos e o

envio daqueles antigos ao local de armazenagem. Há casos em que alguns desses equipamentos ou peças são reutilizados, sendo realocados internamente para outros setores. Além disso, alguns equipamentos são reutilizados em projetos sociais. Os demais equipamentos ficam armazenados internamente por tempo indeterminado.

Diante do cenário exposto, um conjunto de ações foram propostas pelos autores a fim de contornar os problemas apresentados, as quais são descritas no Quadro 3. Essas ações foram propostas com base em informações coletadas durante a pesquisa bibliográfica sobre gestão de REEE, na Resolução nº 401/2008, na Lei nº 12.305 e na identificação de práticas de gestão de REEE já solidificadas em outras IES e de programas de logística reversa dos fabricantes dos produtos usados pela instituição. Também foi feito um levantamento das empresas geograficamente próximas à IES que realizam a reciclagem dos tipos de resíduos analisados neste estudo. As ações propostas tendem a ajudar na conscientização das pessoas que frequentam a IES e a melhorar as etapas de coleta e destinação final dos REEE.

No caso das pilhas, a situação é simples de se resolver, pois todos os fabricantes que fornecem para a instituição (Elgin, Rayovac e Eveready) já se responsabilizam pela destinação pós-consumo dos seus produtos. Os dois postos mais próximos à instituição estão localizados nas cidades de Mogi Guaçu-SP e Mogi Mirim. Quanto à destinação dos computadores, sugere-se que a IES os encaminhe aos fabricantes. A maioria dos computadores da instituição são da marca *Dell*, empresa que realiza o gerenciamento pós-consumo de seus produtos. A *Dell* oferece métodos ecológicos de descarte de equipamentos obsoletos, incluindo teclado, *mouse*, monitor e impressora. A empresa realiza a coleta a domicílio sem cobrar qualquer taxa. Também se propõe que, durante a aquisição de novos equipamentos, a instituição adote critérios ambientais, exigindo produtos de marcas que possuam sistemas de logística reversa pós-consumo e que utilizem materiais reciclados ou recicláveis.

Em relação às lâmpadas, nenhum dos fabricantes (Osram, GE e Philips) possui um sistema para coleta dos produtos após o final da vida útil. Embora tais fabricantes tenham assinado recentemente um acordo Setorial para Logística Reversa de Lâmpadas, conforme previsto na Política Nacional de Resíduos Sólidos, se comprometendo a criar um sistema de recolhimento e destinação final independente dos sistemas públicos de limpeza urbana, os três fabricantes citados

ainda não possuem sistemas definidos e justificam isso ao afirmar que estão dentro do prazo de adaptação à legislação. Diante disso, a alternativa mais viável aos resíduos das lâmpadas da IES é a reciclagem pela empresa Led Reciclagem Tecnológica, pois esta é a opção mais fisicamente próxima da IES. Essa empresa emite um certificado de responsabilidade ambiental, se responsabilizando pelo material coletado.

Quadro 3 – Ações propostas

Ações	Benefícios
A₁ : Instalar postos internos de recolhimento de pilhas	Facilita a posterior destinação ao fabricante.
A₂ : Substituir as pilhas comuns por recarregáveis	Minimização dos resíduos gerados e consequentemente dos impactos ambientais.
A₃ : Destinar os resíduos de pilhas aos fabricantes originais	Redução de contaminações ao evitar que estes sejam depositados em aterros.
A₄ : Destinar os resíduos de computadores aos fabricantes originais	Redução de impactos ambientais ao evitar que estes resíduos sejam depositados em aterros e minimização de problemas de saúde causados pela destinação incorreta Redução do acúmulo de equipamentos e liberação de espaço físico.
A₅ : Adotar critérios ambientais no ato da compra de computadores	Estímulo à reciclagem. Redução dos resíduos perigosos gerados pela IES. Possibilidade de destinação final pelos fabricantes.
A₆ : Destinar os resíduos de lâmpadas para uma empresa de reciclagem	Minimização dos impactos ambientais e danos à saúde.
A₇ : Promover palestras de capacitação para funcionários e alunos sobre gerenciamento de resíduos	Maior conscientização dos acadêmicos quanto às questões ambientais. Desenvolvimento de conhecimento e práticas de gerenciamento de resíduos.
A₈ : Desenvolvimento de políticas visuais de combate aos desperdícios através de murais e <i>banners</i>	Promoção da conscientização de todos que frequentam a instituição.
A₉ : Promover encontros com gestores atuantes na área ambiental de outras IES	Obtenção de conhecimento sobre projetos já implantados e que trouxeram sucesso em outras universidades. Criação de oportunidades para parcerias em projetos conjuntos, <i>benchmarking</i> e estímulo à obtenção de certificação ambiental.

Fonte: Autores

Ao final da etapa 1, os três tomadores de decisão foram reunidos para discutir os resultados do diagnóstico realizado e a viabilidade das ações propostas. Todos concordaram com a necessidade de implantação das nove ações. Uma vez que não é possível implantar todas simultaneamente devido à limitação de recursos, é necessário definir um sequenciamento de implantação que esteja alinhado aos recursos financeiros, humanos e técnicos disponíveis na IES. Para isso, aplicou-se o

método *fuzzy*-QFD.

5.2 Definição e ponderação dos critérios de decisão

Com o suporte de um dos autores, os tomadores de decisão escolheram os critérios relevantes para definir uma ordem de prioridade das ações de acordo com a realidade da IES. Esses critérios não são normativos e o objetivo destes não é avaliar a efetividade ambiental das ações propostas, já que todas serão implantadas independente do seu desempenho. Conforme detalha o Quadro 4, os critérios escolhidos focaram no custo, tempo e outros recursos requeridos para implantação. Todos os critérios foram modelados de modo que caso uma alternativa apresente uma pontuação alta em um critério, isso afetará negativamente o desempenho final da alternativa, atribuindo-se uma prioridade baixa. Analogamente, uma pontuação baixa nos critérios afetará positivamente o desempenho final.

Quadro 4 – Descrição dos critérios adotados

Critério	Descrição
Custo de implantação (C ₁)	Estimativa dos custos diretos e indiretos decorrentes da implantação de uma ação
Tempo de implantação (C ₂)	Estimativa do tempo necessário para a implantação de uma ação
Dificuldade técnica (C ₃)	Nível de dificuldade de implantar uma determinada ação devido aos conhecimentos, tecnologias e soluções requeridos
Possibilidade de aguardar a implantação sem causar impactos negativos (C ₄)	Urgência de implantação de uma ação com base no nível de impacto ambiental e social decorrente da não implantação imediata
Necessidade de recursos humanos internos (C ₅)	Quantidade de pessoas da instituição e carga de trabalho requeridas para a implantação de uma ação
Necessidade de recursos humanos externos (C ₆)	Quantidade de recursos humanos externos requeridos

Fonte: Autores

Os decisores avaliaram o peso de cada critério usando os termos linguísticos da escala apresentada na Tabela 1 e na Figura 5. Essa escala foi criada com base em Juan et al. (2009) e Lima Junior e Carpinetti (2016). A Tabela 2 apresenta os julgamentos dos decisores quanto ao peso dos critérios dispostos na matriz “*what*”. Tais julgamentos foram convertidos em números *fuzzy* com base na Tabela 1. A matriz “*what*” representada na Tabela 3 apresenta os resultados da Etapa 2 do modelo da Figura 3, destacando os resultados da agregação de julgamentos (\tilde{x}_i)

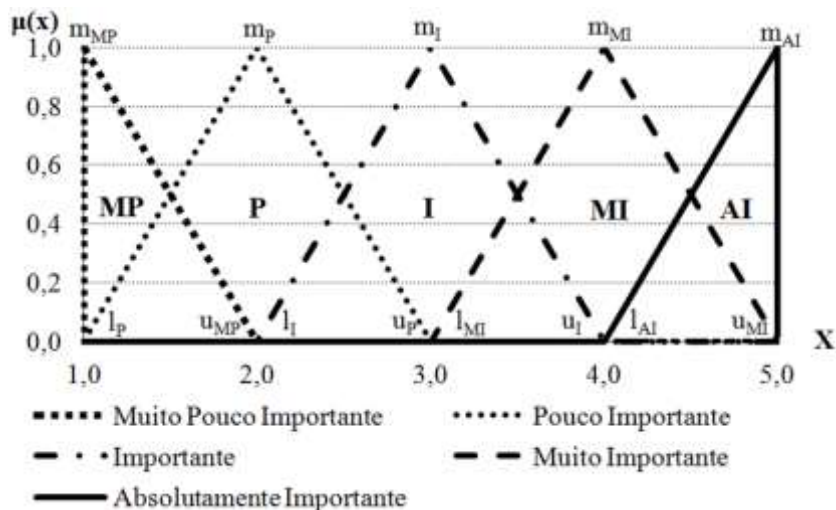
feita por meio da Equação 5, da desfuzificação (x_i) realizada pela Equação 6 e da normalização dos pesos dos critérios (w_i) usando a Equação 7.

Tabela 1 – Escala para avaliação dos pesos

Termos linguísticos	Números <i>fuzzy</i> triangulares		
	l	m	u
Muito pouco importante (MP)	1,00	1,00	2,00
Pouco importante (PI)	1,00	2,00	3,00
Importante (I)	2,00	3,00	4,00
Muito importante (MI)	3,00	4,00	5,00
Absolutamente importante (AI)	4,00	5,00	5,00

Fonte: Autores

Figura 5 – Representação da escala de avaliação dos pesos



Fonte: Autores

Tabela 2 – Julgamentos sobre o peso dos critérios

	DM ₁	DM ₂	DM ₃
C ₁	AI	I	AI
C ₂	I	MI	MI
C ₃	MI	MI	MI
C ₄	MI	AI	MI
C ₅	I	MI	I
C ₆	AI	AI	MI

Fonte: Autores

Tabela 3 - Cálculo dos pesos dos critérios

	DM ₁	DM ₂	DM ₃	\tilde{x}_i	x_i	w_i
C ₁	(4,00, 5,00, 5,00)	(2,00, 3,00, 4,00)	(4,00, 5,00, 5,00)	(3,33, 4,33, 4,67)	4,17	0,17
C ₂	(2,00, 3,00, 4,00)	(3,00, 4,00, 5,00)	(3,00, 4,00, 5,00)	(2,67, 3,67, 4,67)	3,67	0,15
C ₃	(3,00, 4,00, 5,00)	(3,00, 4,00, 5,00)	(3,00, 4,00, 5,00)	(3,00, 4,00, 5,00)	4,00	0,17
C ₄	(3,00, 4,00, 5,00)	(4,00, 5,00, 5,00)	(3,00, 4,00, 5,00)	(3,33, 4,33, 5,00)	4,25	0,18
C ₅	(2,00, 3,00, 4,00)	(3,00, 4,00, 5,00)	(2,00, 3,00, 4,00)	(2,33, 3,33, 4,33)	3,33	0,14
C ₆	(4,00, 5,00, 5,00)	(4,00, 5,00, 5,00)	(3,00, 4,00, 5,00)	(3,67, 4,67, 5,00)	4,50	0,19

Fonte: Autores

5.3 Avaliação e priorização das alternativas

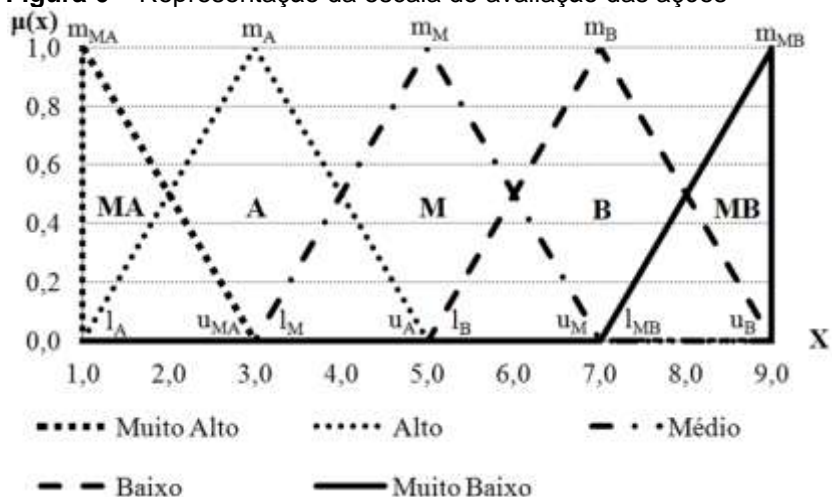
A Tabela 4 e a Figura 6 apresentam a escala criada com base em Juan et al. (2009) e Lima Junior e Carpinetti (2016) para avaliar as alternativas. Seguindo a etapa 3 do modelo proposto na Figura 3, a Tabela 5 apresenta os julgamentos linguísticos coletados dos decisores em relação às pontuações das ações em cada critério. Na matriz de relacionamento (matriz “how”) mostrada na Tabela 6, estão dispostos os valores de julgamento agregados usando a Equação 8. Com esses valores e os pesos dos critérios, calculados na etapa anterior, obteve-se o desempenho final (\tilde{p}_j) de cada alternativa por meio da Equação 9. Os valores do desempenho final desfuzificado (p_j) e do desempenho final normalizado (pn_j) foram calculados usando as Equações 10 e 11, respectivamente. Os valores resultantes destas operações também são mostrados na Tabela 6. Por último, a partir da ordenação decrescente dos valores de pn_j , os quais representam o nível de prioridade de cada uma das ações, foi construído o *ranking* mostrado na Tabela 7.

Tabela 4 – Escala para avaliação das ações

Termos	Números fuzzy		
	l	m	u
Muito Alto (MA)	1,00	1,00	3,00
Alto (A)	1,00	3,00	5,00
Médio (M)	3,00	5,00	7,00
Baixo (B)	5,00	7,00	9,00
Muito Baixo (MB)	7,00	9,00	9,00

Fonte: Autores

Figura 6 – Representação da escala de avaliação das ações



Fonte: Autores

Tabela 5 – Julgamentos linguísticos quanto às ações propostas

		A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉
DM₁	C ₁	B	M	MB	A	B	A	B	B	M
	C ₂	B	MB	B	M	M	B	B	B	M
	C ₃	MB	MB	B	M	B	B	B	B	B
	C ₄	B	B	M	MB	MB	MB	M	M	A
	C ₅	M	MB	B	A	B	B	A	M	M
	C ₆	MB	MB	MB	MB	MB	B	A	B	A
DM₂	C ₁	B	M	B	MA	A	MA	B	B	M
	C ₂	M	B	MB	M	M	B	B	B	M
	C ₃	B	B	B	A	MA	B	B	MB	M
	C ₄	MB	B	MB	MB	B	MB	MB	B	B
	C ₅	B	B	B	A	M	B	B	B	A
	C ₆	MB	MB	MB	M	MB	B	B	MB	MA
DM₃	C ₁	M	MB	MB	MA	MB	A	B	MB	M
	C ₂	MB	MB	MB	A	MB	B	B	B	B
	C ₃	MB	MB	M	A	B	M	MB	MB	M
	C ₄	B	M	M	B	MA	MB	M	A	A
	C ₅	B	MB	B	M	MB	B	A	A	A
	C ₆	MB	MB	MB	B	B	M	A	B	MA

Fonte: Autores

Tabela 6 – Cálculo da pontuação das ações

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	w _j
C ₁	(4,33, 6,33, 8,33)	(4,33, 6,33, 7,67)	(6,33, 8,33, 9,00)	(1,00, 1,67, 3,67)	(4,33, 6,33, 7,67)	(1,00, 2,33, 4,33)	(4,33, 6,33, 8,33)	(5,67, 7,67, 9,00)	(3,00, 5,00, 7,00)	0,17
C ₂	(5,00, 7,00, 8,33)	(6,33, 8,33, 9,00)	(6,33, 8,33, 9,00)	(2,33, 4,33, 6,33)	(4,33, 6,33, 7,67)	(5,00, 7,00, 9,00)	(5,00, 7,00, 9,00)	(5,00, 7,00, 9,00)	(3,67, 5,67, 7,67)	0,15
C ₃	(6,33, 8,33, 9,00)	(6,33, 8,33, 9,00)	(4,33, 6,33, 8,33)	(1,67, 3,67, 5,67)	(3,67, 5,00, 7,00)	(4,33, 6,33, 8,33)	(5,67, 7,67, 9,00)	(6,33, 8,33, 9,00)	(3,67, 5,67, 7,67)	0,17
C ₄	(5,67, 7,67, 9,00)	(4,33, 6,33, 8,33)	(4,33, 6,33, 7,67)	(6,33, 8,33, 9,00)	(4,33, 5,67, 7,00)	(7,00, 9,00, 9,00)	(4,33, 6,33, 7,67)	(3,00, 5,00, 7,00)	(2,33, 4,33, 6,33)	0,18
C ₅	(4,33, 6,33, 8,33)	(6,33, 8,33, 9,00)	(5,00, 7,00, 9,00)	(1,67, 3,67, 5,67)	(5,00, 7,00, 8,33)	(5,00, 7,00, 9,00)	(2,33, 4,33, 6,33)	(3,00, 5,00, 7,00)	(2,33, 4,33, 6,33)	0,14
C ₆	(7,00, 9,00, 9,00)	(7,00, 9,00, 9,00)	(7,00, 9,00, 9,00)	(5,00, 7,00, 8,33)	(6,33, 8,33, 9,00)	(4,33, 6,33, 8,33)	(2,33, 4,33, 6,33)	(5,67, 7,67, 9,00)	(1,00, 1,67, 3,67)	0,19
\tilde{P}_j	(5,51, 7,51, 8,69)	(5,75, 7,75, 8,65)	(5,58, 7,58, 8,65)	(3,11, 4,88, 6,51)	(4,69, 6,46, 7,78)	(4,42, 6,31, 7,95)	(4,00, 6,00, 7,77)	(4,83, 6,83, 8,37)	(2,63, 4,38, 6,38)	
P _j	7,30	7,48	7,35	4,84	6,35	6,25	5,95	6,71	4,44	
p _{ij}	0,129	0,132	0,130	0,085	0,112	0,110	0,105	0,118	0,078	

Fonte: Autores

Tabela 7 - Ranking

Nível de prioridade	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°
Ação	A ₂	A ₃	A ₁	A ₈	A ₅	A ₆	A ₇	A ₄	A ₉
p _{ij}	0,132	0,130	0,129	0,118	0,112	0,110	0,105	0,085	0,078

Fonte: Autores

A partir da aplicação do *fuzzy-QFD*, concluiu-se que primeiramente a instituição deve substituir as pilhas comuns por recarregáveis (A₂) para minimizar a quantidade de resíduos gerados. Em seguida, deve-se destinar os resíduos de pilhas aos fabricantes originais (A₃) e instalar postos internos de recolhimento de pilhas (A₁). Após resolver o problema das pilhas, deve-se focar no desenvolvimento de políticas visuais de combate a desperdícios (A₈) e adotar critérios ambientais na compra de computadores (A₅). Na sequência, destinar os resíduos de lâmpadas para uma empresa de reciclagem da região (A₆).

Posteriormente, a instituição deve promover palestras sobre gerenciamento de resíduos (A₇), apresentando à comunidade acadêmica os resultados alcançados por meio das ações implantadas. Por último, a instituição deve destinar os resíduos de computadores aos fabricantes originais (A₄). Esta foi postergada devido à dificuldade técnica de encontrar receptores aos computadores que não são da marca *Dell*. Apesar disso, como os resíduos desses equipamentos não estão sendo descartados, a falta de prioridade da ação A₄ não implicará em danos ambientais. Após resolver o problema do gerenciamento dos REEE, a instituição estará pronta para trocar experiências com outras instituições e promover encontros com gestores atuantes na área ambiental de outras IES (A₉).

6 CONCLUSÃO

Este estudo propôs e aplicou um modelo *fuzzy-QFD* para definir a ordem de prioridade de implantação das ações de gestão de REEE propostas para um centro universitário. O modelo é de fácil entendimento e pode ser implementado por usuários não especialistas utilizando *softwares* de planilhas eletrônicas. A aplicação do modelo *fuzzy-QFD* atribuiu maior prioridade às ações de REEE mais simples, baratas e de rápida implantação. Isso permitirá à instituição participante da pesquisa obter melhorias em curto prazo e ter mais tempo para planejar as ações mais complexas. A implantação das ações propostas possibilitará à IES alcançar os benefícios descritos no Quadro 3 e adequar suas práticas de gestão de REEE à Resolução nº 401/2008 e à Lei nº 12.305 (PNRS).

Por fornecer suporte à tomada de decisão em grupo, o *fuzzy-QFD* permitiu incorporar diferentes pontos de vista ao processo decisório. Além disso, o uso de

juílgamentos em formato linguístico representados por números *fuzzy* possibilitou quantificar as estimativas aproximadas dadas pelos tomadores de decisão. Outro benefício é a capacidade de utilizar uma quantidade não limitada de critérios e de alternativas, o que não seria permitido ao utilizar técnicas comparativas como AHP (MILUTINOVIC et al., 2014; YAP; NIXON, 2015), ANP (NIXON et al., 2013; GUERRERO-BAENA; GOMEZ-LIMON; FRUET, 2015), *fuzzy-AHP* (PRAKASH; BARUA, 2015) e *fuzzy-ANP*. Diferentemente de métodos como o TOPSIS, AHP e *fuzzy-AHP*, quando novos critérios ou alternativas são inseridos, o *fuzzy-QFD* não apresenta o problema de inversão de resultados do *ranking*. Quando comparado com a abordagem *fuzzy-QFD* usada por Fung et al. (1999) e Temponi (1999), o modelo proposto é mais fácil e rápido de ser parametrizado por não requerer o ajuste de dezenas de regras de inferência. Em relação à abordagem utilizada por Juan et al. (2009) e Lima Junior e Carpinetti (2016), o uso do modelo proposto torna a coleta de juílgamentos e a aplicação mais rápidas por não requerer obrigatoriamente a ponderação dos critérios de decisão a partir de requisitos.

Uma limitação desta pesquisa é ter se restringido a analisar somente aos REEE da IES analisada. Estudos futuros podem analisar a situação dos resíduos químicos, biológicos e outros tipos de resíduos sólidos gerados pela instituição, bem como propor ações de melhoria e aplicar o modelo proposto para a priorização de implantação destas. O modelo *fuzzy-QFD* também pode ser usado para a escolha das ações de gestão a serem implantadas. Nessas aplicações, os decisores envolvidos no problema devem escolher critérios mensuráveis, mesmo que de forma qualitativa e aproximada, que sejam adequados ao cenário em questão. Pesquisas futuras também podem aplicar o método *fuzzy-QFD* na seleção de palestrantes em eventos científicos sobre gestão ambiental, na avaliação de alternativas de receptores de resíduos, na avaliação de alternativas durante a compra de novos computadores e em outros problemas da área de gestão de resíduos que envolvam a seleção ou ordenação de alternativas com base em múltiplos critérios.

REFERÊNCIAS

ABDI. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. **Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos**: Análise de Viabilidade Técnica e Econômica. Brasília: Inventta Consultoria Ltda. 2013.

AFROZ, R.; MASUD, M.M.; AKHTAR, R.; DUASA, J. Survey and analysis of public knowledge, awareness and willingness to pay in Kuala Lumpur, Malaysia - a case study on household WEEE management. **Journal of Cleaner Production**, v.52, p.185-193, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.004>

BERTRAND, J.W.M.; FRANSOO, J. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations and Production Management**, v.22, p.241-264, 2002. DOI:<https://doi.org/10.1108/01443570210414338>

BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos - Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, 2010.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 257, de 30 de junho de 1999. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, 1999a.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 293, de 30 de junho de 1999. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, 1999b.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 401, de 4 de novembro de 2008. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, 2008.

DURSUN, M.; KARSAK, E.; KARADAYI, M.A. Assessment of health-care waste treatment alternatives using fuzzy multi-criteria decision making approaches. **Resources, Conservation and Recycling**, v.57, p.98–107, 2011. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.09.012>

DURSUN, M.; KARSAK, E.E. A QFD-based fuzzy MCDM approach for supplier selection. **Applied Mathematical Modelling**, v.37, p.5864-5875, 2013. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.11.014>

EISELT, H.A.; MARIANOV, V. Location modeling for municipal solid waste facilities. **Computers & Operations Research**, v.62, p.305–315, 2015. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.05.003>

FERREIRA, J.M.B.; FERREIRA, C.A.A. Sociedade da Informação e o Desafio da Sucata Eletrônica. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**, v.3, p.157-170, 2008.

FUNG, R.Y.K.; LAW, D.S.T.; IP, W.H. Design targets determination for inter-dependent product attributes in QFD using fuzzy inference. **Integrated Manufacturing Systems**, v.10, p.376-384, 1999. DOI:<https://doi.org/10.1108/09576069910293040>

GUERRERO-BAENA, M.D.; GOMEZ-LIMON, J.A.; FRUET, J.V. A multicriteria method for environmental management system selection: an intellectual capital approach. **Journal of Cleaner Production**, v.105, p.428-437, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.079>

IKHLAYEL, M. Environmental impacts and benefits of state-of-the-art technologies for E-waste management. **Waste Management**, 2017. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.038>

JUAN, Y.K.; PERNG, Y.P.; CASTRO-LACOUTURE, D.; LU, K.S. Housing refurbishment contractors selection based on a hybrid fuzzy-QFD approach. **Automation in Construction**, v.18, p.139-144, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.06.001>

KIM, Y.; CHUNG, E.; JUN, S.; KIM, S.U. Prioritizing the best sites for treated wastewater instream use in an urban watershed using fuzzy TOPSIS. **Resources, Conservation and Recycling**, v.73, p.23-32, 2013. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.12.009>

KUMAR, S.; RAWAT, S. Future e-Waste: Standardisation for Reliable Assessment. **Government Information Quarterly**, 2017. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.giq.2015.11.006>

LIMA JUNIOR, F.R.; CARPINETTI, L.C.R. A multicriteria approach based on Fuzzy QFD for choosing criteria for supplier selection. **Computers and Industrial Engineering**, v.110, p.269-285, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.09.014>

LIMA JUNIOR, F.R.; OSIRO, L.; CARPINETTI, L.C.R. A comparison between Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS methods to supplier selection. *Applied Soft Computing*, v. 21, p.194-209, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.03.014>

MILUTINOVIC, B.; STEFANOVIC, G.; DASSISTI, M. MARKOVIC, D.; VUCKOVIC, G. Multi-criteria analysis as a tool for sustainability assessment of a waste management model. **Energy**, v.74, p.190-201, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.056>

NIXON, J.D.; DEY, P.K.; GHOSH, S.K.; DAVIES, P.A. Evaluation of options for energy recovery from municipal solid waste in India using the hierarchical analytical network process. **Energy**, v.59, p.215-223, 2013. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.052>

OLIVERA, U.R.; MARINS, F.A.S.; MUNIZ JUNIOR; J. Logística reversa e identificação de produtos: revisão teórica para indústria eletroeletrônica. **Produção Online**, v.16, n.2, p.633-677, 2016. DOI:<http://dx.doi.org/10.14488/1676-1901.v16i2.2049>

PRAKASH, C.; BARUA, M.K. Integration of AHP-TOPSIS method for prioritizing the solutions of reverse logistics adoption to overcome its barriers under fuzzy environment. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 37, p.599-615, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.03.001>

SAMMALISTO, K.; SUNDSTRÖM, A., HOLM, T. Implementation of sustainability in universities as perceived by faculty and staff - a model from a Swedish university. **Journal of Cleaner Production**, v.106, p.45-54, 2016. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.015>

SILVA, L.A.A.; PIMENTA; H.C.D.; CAMPOS; L.M.S. Logística reversa dos resíduos eletrônicos do setor de informática: realidade, perspectivas e desafios na cidade do Natal-RN. **Produção Online**, v.13, n. 2, p. 544-576, 2013. DOI:<http://dx.doi.org/10.14488/1676-1901.v13i2.1133>

SOUZA, R.G.; CLÍMACO, J.C.N.; SANT'ANNA, A.P.; ROCHA, T.B.; VALLE, R.A.B.; QUELHAS, O.L.G. Sustainability assessment and prioritisation of e-waste management options in Brazil. **Waste Management**, v.57, p.46-56, 2016. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.034>

TAUCHEN, J.; BRANDLI, L. L. A gestão ambiental em instituições de ensino superior: modelo para implantação em campus universitário. **Gestão & Produção**, v.13, p.503-515, 2006. DOI:<http://dx.doi.org/10.1590/S0104-530X2006000300012>

TEMPONI, C.; YEN, J.; TIAO, W.A. House of quality: A fuzzy logic-based requirements analysis. **European Journal of Operational Research**, v.117, p.340-354, 1999. DOI:[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00275-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00275-6)

UFSCAR. **Universidade Federal De São Carlos**. Grupo Ambiental Ipê Amarelo. Disponível em: <<http://www.deaea.ufscar.br/projetos-de-extensao-1/projeto-canecas>>. Acesso em: 08 de Julho de 2017.

UNESP. **Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”**. Programa de Reciclagem de Papel. Disponível em: <<http://www.fca.unesp.br/Home/Extensao/ProjetoColetaSeletiva52/cartilha-smasp.pdf>>. Acesso em: 08 de Julho de 2017.

WANG, J. Fuzzy outranking approach to prioritize design requirements in quality function deployment. **International Journal of Production Research**, v.37, p.899-916, 1999. DOI:<https://doi.org/10.1080/002075499191599>

WANG, X.; GAUSTAD, G. Prioritizing material recovery for end-of-life printed circuit boards. **Waste Management**, v.32, p.1903-1913, 2012. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.05.005>

WIBOWO, S.; DENG, H. Multi-criteria group decision making for evaluating the performance of e-waste recycling programs under uncertainty. **Waste Management**, v.40, p.127–135, 2015. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.02.035>

YAP, H.Y; NIXON, J.D. A multi-criteria analysis of options for energy recovery from municipal solid waste in India and the UK. **Waste Management**, v.46, p.265-277, 2015. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.002>

ZHANG, X.; HUANG, G. Municipal solid waste management planning considering greenhouse gas emission trading under fuzzy environment. **Journal of Environmental Management**, v.135, p.11-18, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.01.014>



Artigo recebido em 30/07/2017 e aceito para publicação em 01/12/2017

DOI: <http://dx.doi.org/10.14488/1676-1901.v18i2.2958>

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO USADO NO DIAGNÓSTICO

1. A IES possui um Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos?
2. Os funcionários da IES são treinados e cobrados quanto aos procedimentos contidos no Plano? Caso a resposta seja NÃO, os funcionários já receberam ao menos algum tipo de palestra, curso ou treinamento sobre a importância e funcionamento do gerenciamento de resíduos?
3. Quais são os programas ou ações de conscientização sobre gerenciamento de resíduos existentes na IES?
4. Se possível, estime o volume dos resíduos descartados em relação a lâmpadas, pilhas e computadores.
5. Quais os principais motivos do descarte de cada um dos tipos de resíduo?
6. Quais os procedimentos utilizados para realização do descarte? A IES separa os resíduos antes de descartá-los?
7. Qual a destinação final de cada um dos tipos de resíduo?
8. No caso dos computadores, os mesmos passam por processos de manutenção? Quem são os responsáveis?
9. Apresente sugestões para melhorar o gerenciamento de REEE na instituição.

APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO USADO NA AVALIAÇÃO DOS CRITÉRIOS E DAS ALTERNATIVAS

Nome do entrevistado:						
AVALIAÇÃO DO PESO DOS CRITÉRIOS						
Para avaliar o nível de importância de cada um dos critérios de decisão, escolha uma das seguintes opções e preencha a linha nomeada “Pesos*”: Muito pouco importante (MP) Pouco importante (PI) Importante (I) Muito importante (MI) Absolutamente importante (AI)						
Descrição dos critérios						
C₁ : Custo de implantação (estimativa dos custos diretos e indiretos decorrentes da implantação de uma ação)						
C₂ : Tempo de implantação (estimativa do tempo necessário para a implantação de uma ação)						
C₃ : Dificuldade técnica (nível de dificuldade de implantar uma determinada ação devido aos conhecimentos, tecnologias e soluções requeridos)						
C₄ : Possibilidade de aguardar a implantação sem causar impactos negativos (urgência de implantação de uma ação com base no nível de impacto ambiental e social decorrente da não implantação imediata)						
C₅ : Necessidade de recursos humanos internos (quantidade de pessoas da instituição e carga de trabalho requeridas para a implantação de uma ação)						
C₆ : Necessidade de recursos humanos externos (quantidade de recursos humanos externos requeridos)						
	C₁	C₂	C₃	C₄	C₅	C₆
Pesos*						
AVALIAÇÃO DA PONTUAÇÃO DAS ALTERNATIVAS						
Para avaliar a pontuação das alternativas em cada critério, escolha uma das seguintes opções ao preencher cada uma das células abaixo: Muito Alto (MA) Alto (A) Médio (M) Baixo (B) Muito Baixo (MB) Absolutamente importante (AI)						
Descrição das Alternativas						
A₁ : Instalar postos internos de recolhimento de pilhas						
A₂ : Substituir as pilhas comuns por recarregáveis						
A₃ : Destinar os resíduos de pilhas aos fabricantes originais						
A₄ : Destinar os resíduos de computadores aos fabricantes originais						
A₅ : Adotar critérios ambientais no ato da compra de computadores						
A₆ : Destinar os resíduos de lâmpadas para uma empresa de reciclagem						
A₇ : Promover palestras de capacitação para funcionários e alunos sobre gerenciamento de resíduos						
A₈ : Desenvolvimento de políticas visuais de combate aos desperdícios						
A₉ : Promover encontros com gestores atuantes na área ambiental de outras IES						
	C₁	C₂	C₃	C₄	C₅	C₆

A1						
A2						
A3						
A4						
A5						
A6						
A7						
A8						
A9						