

ARTIGO ORIGINAL

Análise do desempenho e ciclo de vida de isoladores do sistema de distribuição de energia em ambientes de elevada agressividade

Análisis de desempeño y ciclo de vida de aisladores de sistemas de distribución de energía em ambiente de alta agresividad

Performance analysis and life-cycle assessment of energy distribution system insulators in aggressive environments

Érico Shooji Oliveira de Andrade Tanobe^{1,2}

Guilherme Cunha da Silva¹

Mariana D'Orey Gaivão Portella Bragança¹

Kleber Franke Portella^{1*}

Gilberto Teixeira Carrera³

¹ Instituto Lactec, Curitiba, PR, Brasil

² Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, PR, Brasil

³ Equatorial Energia, Brasília, DF, Brasil

* portella@lactec.org.br

Resumo

Neste estudo, foi avaliado o sistema de distribuição de energia frente ao desempenho em durabilidade de materiais e seus aspectos ambientais, com relação às análises do ciclo de vida (ACV) de isoladores elétricos de diferentes tecnologias, avaliando ensaios de desempenho individual e os principais impactos gerados sob a perspectiva “de berço ao portão”. Inicialmente, para o estudo de desempenho, foram considerados nove isoladores distintos, os quais foram submetidos aos ensaios de névoas limpa (48 h) e salina (360 h), com medidas de hidrofobicidade e de corrente de fuga, além da aplicação de poluentes artificiais. Após a realização dos testes, foram selecionados quatro destes isoladores com os melhores desempenhos, para então realizar os estudos de ACV por meio do software SimaPro 8.3. Pelos resultados de desempenho pode-se inferir que os isoladores que possuíam revestimentos de silicone e obtiveram os menores valores de corrente de fuga durante os ensaios de névoa limpa e salina, indicaram melhores atuações em ambientes agressivos. Já, por intermédio da ACV foram verificados os impactos ambientais dos isoladores de características equivalentes, uma vez que três desses possuíam a porcelana como material principal constituinte. O isolador híbrido de núcleo de resina com fibra de vidro revestido com silicone indicou os menores impactos ambientais devido à sua baixa quantidade de massa em relação aos outros, porém não foi possível verificar a qualidade dos dados implementados nos ICVs.

Palavras-chave: Isoladores. Redes de distribuição de energia. Estudo de desempenho. Análise do ciclo de vida. Impactos ambientais.

Resumen

En este estudio, fue evaluado el sistema de distribución de energía ante el desempeño en la durabilidad de materiales y sus aspectos ambientales, con

Recebido: 03 maio 2019

Aceito: 08 abril 2020

Publicado: 16 abril 2020

Copyright: © 2019 Tanobe et al. Este artigo é publicado em acesso aberto e distribuído sob os termos da [Licença Creative Commons Atribuição](#) (CC BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos, desde que creditados os autores e a fonte original.

Financiamento: CELPA/CEMAR (Projeto n. 00371-0023/2016); Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (bolsa PIBITI, bolsa DT processo n. 302672/2016-8).

Editora:



relación a los análisis de ciclo de vida (ACV) de aisladores eléctricos de diferentes tecnologías, evaluando ensayos de desempeño individual y los principales impactos generados bajo la perspectiva "de la cuna a la puerta". Inicialmente, para el estudio de desempeño, fueron considerados nueve aisladores distintos, los cuales fueron sometidos a ensayos de niebla limpia (48 h) y salina (360 h) con medidas de hidrofobicidad y de corriente de fuga, además de la aplicación de contaminantes artificiales. Después de la realización de las pruebas, fueron seleccionados cuatro de estos aisladores con los mejores desempeños, para entonces realizar los estudios de ACV por medio del software SimaPro 8.3. Por los resultados de desempeño se puede inferir que los aisladores que poseían revestimientos de silicona y obtuvieron los menores valores de corriente de fuga durante los ensayos de niebla limpia y salina, indicaron mejores actuaciones en ambientes agresivos. Ya, por intermedio de la ACV fueron verificados los impactos ambientales de los aisladores de características equivalentes, una vez que tres de estos poseían porcelana como material principal constituyente. El aislador híbrido de núcleo de resina con fibra de vidrio revestido con silicona indicó los menores impactos ambientales debido a su baja cantidad de masa con relación a los demás, sin embargo, no fue posible verificar la cantidad de datos implementados en los ICV's. Palabras-clave: Aisladores. Sistema de distribución de energía. Estudio de desempeño. Análisis de ciclo de vida. Impactos ambientales.

Abstract

In this study, the energy distribution system was evaluated against the durability of materials and its environmental aspects, in relation to the life-cycle assessment (LCA) of electrical insulators of different technologies, analyzing individual performance tests and the main impacts generated from the perspective of "cradle to gate". Initially for the performance study, nine different insulators were tested, which were tested for clean (48 hours) and salt spray chamber (360 hours), with hydrophobicity and leakage current measurements, as well as the application of pollutants artificial limbs. After the tests were carried out, four of these insulators with the best performances were selected to perform ACV studies using the SimaPro 8.3 software. From the performance results was inferred that the insulators that had silicone coatings and obtained the lowest values of leakage current during the clean and salt spray chamber tests, indicated better performances in aggressive environments. Already, through the ACV, the environmental impacts of insulators with equivalent characteristics were verified, since three of them had porcelain as the main constituent material. The hybrid insulator with resin core and glass fiber silicone coated indicated the lowest environmental impacts due to its low amount of mass compared to the others, but it was not possible to verify the quality of the data implemented in the ICVs.

Keywords: Insulators. Energy distribution system. Performance analysis. Life-cycle assessment. Environmental impacts.

1. INTRODUÇÃO

O sistema de distribuição de energia aéreo, subsector de energia elétrica, destaca-se pela utilização de isoladores elétricos, objeto de estudo desta pesquisa, que têm por finalidade a sustentação de condutores e massas energizadas sem permitir que se estabeleça corrente elétrica através de si (Bezerra 2014).

Estes isoladores, por sua vez, provocam impactos ao meio ambiente, em razão de seu processo produtivo, das matérias primas que consomem e principalmente por sua disposição final, pois sua decomposição é lenta e demorada em virtude de seus materiais constituintes (Chehebe 1997; Campos 2009).

Dentre os setores contribuintes das emissões brutas estimadas de CO₂ equivalentes, dados do Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC, 2017), em 2015, constataram que cerca de 30% dessas emissões foram resultantes do setor energético. Nesse contexto, uma das metodologias utilizadas neste estudo com o propósito de avaliar produtos e seus impactos ao meio ambiente, foi a avaliação de ciclo de vida, “*life cycle-assessment*” (ACV).

Na literatura científica, estudos de desempenho de materiais concomitante à utilização de ACV são escassos, logo, trabalhos que relacionam ambos especificamente para isoladores elétricos do sistema de distribuição de energia no Brasil são praticamente inexistentes. Em contrapartida, o interesse em estudos de ACV têm aumentado nas últimas décadas, pois essa ferramenta permite aprimorar o processo produtivo de empresas e organizações e ainda, agregar valor ambientalmente sustentável aos seus produtos, como é o caso do marketing verde (Souza 2014).

Com relação a estudos de ACV de componentes elétricos e processos associados, podem-se destacar, por exemplo, as pesquisas de Yokote (2003), Souza (2014), Carvalho e Delgado (2017), Carvalho *et al.* (2019), dentre outros. O estudo de Yokote (2003) propõe, considerando trinta e três empresas de concessão de energia, um inventário de ciclo de vida para o sistema de distribuição de energia, em que parte desse foi utilizado neste trabalho, assim como o estudo de Souza (2014). Neste inventário, são compiladas bases de dados que fornecem informações a respeito da obtenção de matéria prima, produção e disposição de materiais utilizados no sistema de distribuição de energia.

Já as pesquisas de Carvalho e Delgado (2017) e Carvalho *et al.* (2019) relacionaram os impactos associados à pegada de carbono da produção da eletricidade solar fotovoltaica e sua potencialidade de aplicação como solução alternativa possível para redução de impactos ambientais. Essa aplicação objetiva outras formas de geração de energia, já que a produção energética no Brasil corresponde a 62% por fonte das hidrelétricas e como mencionado anteriormente, apresenta impactos significativos nas emissões estimadas de CO₂ equivalente (Agência Nacional de Energia Elétrica 2019; Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações 2018).

A sustentabilidade de um projeto na área energética depende da avaliação de recursos que esse utiliza, além do planejamento de logística e avaliação dos potenciais impactos ambientais. Portanto, este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de tecnologias e materiais empregados na fabricação de nove modelos distintos de isoladores elétricos, submetidos a ensaios de desempenhos individuais, para então, selecionar quatro dentre os melhores resultados para elaborar estudos de avaliação do ciclo de vida (ACV), quantificando os principais impactos ambientais gerados sob a perspectiva “do berço ao portão”, isto é, desde a extração de matéria-prima ao fim de sua produção.

2. METODOLOGIA

2.1 Estudo de desempenho dos isoladores

Nove tipos de isoladores com diferentes tecnologias de fabricação e tipo de material de sua constituição foram avaliados em 3 arranjos experimentais, conforme apresentados na Tabela 1, sendo: um isolador de pino convencional (1), um isolador de pino de polietileno com saias abrigadas (2) e um isolador de pino com saias alternadas (3), todos os três possuindo como material base o polietileno de alta densidade (HDPE). Ainda, tem-se um isolador de pino de porcelana (4), um isolador pilar de porcelana (5) e um isolador pilar porcelana revestido com borracha de silicone (6), um isolador híbrido com núcleo de resina com fibra de vidro e revestimento de silicone (7), um isolador híbrido com núcleo de porcelana e revestimento de silicone (8) e um isolador híbrido com saias abrigadas com núcleo de porcelana e revestimento de silicone (9). Os experimentos realizados foram separados em ensaios de névoas limpa (48 h) e salina (360 h), com medidas de hidrofobicidade e medidas de corrente de fuga.

Tabela 1. Isoladores de redes de distribuição avaliados em termos de desempenho elétrico.

	Isolador	Classe de tensão (kV)	Distância de escoamento (mm)
Arranjo experimental 1 – análises de hidrofobicidade e de correntes de fuga	1 - Pino polimérico (HDPE)	15	400
	2 - Pino polimérico (HDPE)	15	540
	3 - Pino polimérico (HDPE)	15	415
Arranjo experimental 2 – análises de hidrofobicidade e de correntes de fuga	4 - Pino porcelana	25	318
	5 - Pilar porcelana	15	300
	6 - Pilar porcelana com revestimento de borracha de silicone (RTV)	15	300
Arranjo experimental 3 – análises de hidrofobicidade e de correntes de fuga	7 - Isolador Híbrido com núcleo de resina com fibra de vidro e revestimento de silicone (HTV)	15	318
	8 - Isolador Híbrido com núcleo de porcelana e revestimento de silicone (HTV)	15	300
	9 - Isolador Híbrido com saias abrigadas com núcleo de porcelana e revestimento de silicone (HTV)	15	300

2.3. Corrente de fuga

O procedimento de ensaio foi desenvolvido, tendo como base o método da névoa salina da norma NBR 15122 (Associação Brasileira de Normas Técnicas 2013). A solução do banho foi preparada pela adição de 35 kg/m^3 de cloreto de sódio. A condutividade da névoa nesta condição foi de 53 mS/cm . A tensão aplicada no ensaio foi de 14 kV fase-terra. As medições de corrente de fuga foram realizadas em janelas de tempo de cinco minutos, em que o valor RMS instantâneo da corrente de fuga no instante da medição foi armazenado, assim como o seu valor máximo atingido nestes cinco minutos. Os arranjos experimentais dos testes estão apresentados na Figura 1.

Figura 1. Arranjo experimental do ensaio de névoa salina em isoladores para a medida da corrente de fuga, fase-terra, sendo: em a) foto ilustrativa da cabine de aspersão da névoa salina; e, em b) o arranjo elétrico e de suporte dos isoladores, em linha viva, em seu interior.



Os equipamentos utilizados no teste foram:

- a) uma câmara de névoa salina, montada no Lactec (Figura 3);
- b) um termohigrômetro, Instrutherm, modelo HTR-170;
- c) um multímetro digital; e
- d) um condutímetro digital, Digimed, modelo DM-32.

A câmara de névoa salina foi selada contra umidade e à prova de corrosão e possui um volume interno total de 10 m^3 . A névoa foi pulverizada de forma indireta (aspersão por ar comprimido), com gotículas de tamanhos entre $5 \text{ }\mu\text{m}$ a $10 \text{ }\mu\text{m}$. O sistema de proteção do ensaio foi ajustado para 1 A (eficaz).

Os parâmetros utilizados no ensaio foram: uma tensão aplicada de 14 kV fase-terra; um fluxo do líquido contaminante de 4 L/h ; a condutividade do líquido contaminante (água com NaCl) de 2

mS/cm; e, um tempo de duração da exposição de 188 h. Antes do teste, as amostras foram limpas com água deionizada para a remoção de substâncias que pudessem vir a interferir nos resultados.

2.4. Avaliação da capacidade de recuperação da hidrofobicidade

O processo de recuperação da hidrofobicidade de materiais está normalmente relacionado à capacidade das moléculas com baixo peso molecular atuarem como uma camada de proteção, recobrando a superfície danificada do isolador, ou recobrando a camada de poluição eventualmente depositada na superfície (Hillborg, Gedde 1998; Wang, Yoshimura 1999; Seog-Hyeon, Cherney, Hackam 1991). O procedimento adotado nesta avaliação seguiu os seguintes critérios:

- a) após a medição da hidrofobicidade do isolador novo, este foi limpo e seco. Foi aplicada uma camada de poluente industrial e realizada nova avaliação da hidrofobicidade, considerada como sendo a medida no instante inicial ($t = 0$ h). O poluente industrial utilizado foi o caulim (Kaolin K7375, da empresa Sigma-Aldrich). Este composto contribuiu para a supressão da hidrofobicidade, permitindo a avaliação da recuperação desta característica nos materiais isolantes;
- b) a medição da hidrofobicidade foi então repetida a cada 24 h durante dois dias ($t = 24$ h e $t = 48$ h) a fim de avaliar a capacidade de recuperação dos diferentes materiais;
- c) um novo teste foi realizado sobre os nove isoladores de distribuição com o poluente industrial terra diatomácea. Este poluente foi adquirido da empresa Sigma-Aldrich, sendo constituído essencialmente de sílica hidratada, na forma de pó e na cor branca.

2.5 Avaliação de ciclo de vida

Para a obtenção dos resultados relacionados aos estudos de ACV, seguiu-se as recomendações das normas NBR ISO 14040 (Associação Brasileira de Normas Técnicas 2014a) e NBR ISO 14044 (Associação Brasileira de Normas Técnicas 2014b). Nesta, foram incluídas as fases listadas na Quadro 1.

O escopo da ACV baseou-se em isoladores elétricos utilizados no sistema de distribuição de energia, utilizados em ambientes de elevada agressividade. A unidade funcional avaliada compreendeu a produção dos isoladores que apresentaram os melhores desempenhos obtidos nos ensaios de desempenho de hidrofobicidade com medidas de corrente de fuga e a capacidade de recuperação da hidrofobicidade. A fronteira de avaliação limitou-se na composição dos materiais utilizados em suas respectivas produções, ou seja, sob o aspecto “do berço ao portão”.

Estes isoladores foram: um isolador pilar porcelana (6), um isolador híbrido com núcleo de resina com fibra de vidro (7), um isolador híbrido com núcleo de porcelana e revestimento de silicone

(8) e um isolador híbrido com saias abrigadas com núcleo de porcelana (9), todos apresentando revestimento de silicone.

Quadro 1. Fases da ACV aplicadas na análise dos isoladores de redes de distribuição de energia, adaptadas de Barbosa et al. (2008) apud ABNT NBR 14040 (2001).

Fases	Definições
Definição de objetivo e escopo	Análise da aplicação pretendida, as razões para conduzir o estudo e o público-alvo.
	Análise da função e unidade funcional, fronteiras do sistema, requisitos da qualidade dos dados, comparações entre sistemas, considerações sobre análise crítica.
Análise de Inventário	Coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e as saídas pertinentes a um sistema de produto e o impacto do ciclo de vida.
Avaliação de Impacto	Avaliação da significância de impactos ambientais potenciais, usando os resultados da análise de inventário.
Interpretação dos resultados	Constatações da análise do inventário e da avaliação de impacto.

Para o desenvolvimento do inventário ACV, foram compilados os materiais constituintes, bem como a forma de produção dos isoladores de acordo estudos da literatura existente (Yokote 2003; Gomes, Moraes 2017; Joshi et al. 2004; Taborianski, Prado 2012) e de dados experimentais no *software* SimaPro versão 8.3. Os métodos escolhidos de comparação foram o ReCiPe EndPoint (H) V1.13/ Europe ReCiPe H/A, utilizando a biblioteca Ecoinvent 3 – allocation, default – unit, e o IPCC 2013 GWPa 100a disponíveis na própria ferramenta (Intergovernmental Panel on Climate Change 2019; Huijbregts 2016).

Tais métodos foram utilizados com o objetivo de avaliar os isoladores elétricos ambientalmente em categorias globais diversas e comuns aos estudos de ACV realizados na literatura científica. O método ReCiPe consiste em pontuar a gravidade relativa de categorias de impactos ambientais em escopos globais, permitindo avaliar diversos impactos, como exemplo: mudanças climáticas, depleção da camada de ozônio e consumo de recursos. Já o potencial de aquecimento global (GWP) é a medida de quanto um gás de efeito estufa se retém na atmosfera até um período específico, em relação ao dióxido de carbono, quantificado pelo método do IPCC GWP (Intergovernmental Panel on Climate Change 2019).

Estes isoladores apresentaram quanto aos materiais constituintes e composições mássicas, as características apresentadas na Tabela 2. Ressalva-se, mais uma vez, que todos os isoladores avaliados para o estudo de ACV continham revestimento de silicone, quantificados em 100 g para cada modelo. Ainda, de acordo com os estudos da literatura utilizados neste estudo, foram quantificadas as emissões apresentadas na Tabela 3 e Tabela 4 para a fibra de vidro e porcelana, respectivamente.

Tabela 2. Principal composição mássica de cada isolador e quantidades aplicadas ao modelo.

Modelo de isolador	Principal composição material	Quantidade (kg)
Isolador 6	Porcelana	3,3
Isolador 7	Fibra de vidro	1,85
Isolador 8	Porcelana	3,4
Isolador 9	Porcelana	4

Tabela 3. Quantificação das emissões compiladas ao inventário de ciclo de vida da fibra de vidro.

Inventário da Fibra de vidro		
Emissões para o ar	Quantidade	Unidade
Oxidos de nitrogênio	2,93	g
Monóxido de carbono	0,8	g
Dióxido de carbono	2,04	g
Particulados	1,04	g
Oxidos de enxofre	8,79	g

Tabela 4. Quantificação das emissões compiladas ao inventário de ciclo de vida da porcelana.

Inventário da Fibra de vidro		
Emissões para o ar	Quantidade	Unidade
Oxido de nitrogênio	0,85	g
Monóxido de carbono	0,13	g
Dióxido de carbono	0,255	kg
Particulados	1,205	g
Oxido de enxofre	0,03	g
Dioxido de enxofre	0,26	g
Fluoreto	0,11	g

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos resultados obtidos das medidas de hidrofobicidade e de acordo com a classificação de molhabilidade dos materiais, observou-se que:

- a) os revestimentos com cobertura de silicone tipo RTV (“*rubber-room temperature vulcanized*”) além de promoverem à porcelana uma superfície hidrofóbica, apresentaram boa capacidade de recuperação de hidrofobicidade, reduzindo a necessidade de sua limpeza, diminuindo assim, os custos operacionais relativos a esta atividade;

- b) os isoladores híbridos apresentaram elevada hidrofobicidade inicial, assim como o isolador de porcelana recoberto com borracha de silicone, seguido dos isoladores polietileno de alta densidade (HDPE);
- c) os isoladores de porcelana apresentaram baixa hidrofobicidade inicial, sendo esta uma das características da maior parte dos isoladores cerâmicos;
- d) ambos os poluentes (caulim e a terra diatomácea) tiveram o efeito inicial de supressão da hidrofobicidade nos isoladores;
- e) a capacidade de recuperação da hidrofobicidade mostrou-se mais rápida no isolador com revestimento de RTV-SIR quando comparada a dos isoladores com revestimento HTV-SIR (“*high temperature vulcanized*”);
- f) pode ser notado que o polietileno foi um material que não possui a propriedade da recuperação da hidrofobicidade.

Os resultados das medidas de corrente de fuga dos ensaios de névoa limpa (48 h) e de névoa salina (360 h) realizadas nos isoladores que apresentaram os menores valores, estão apresentados na Figura 2.

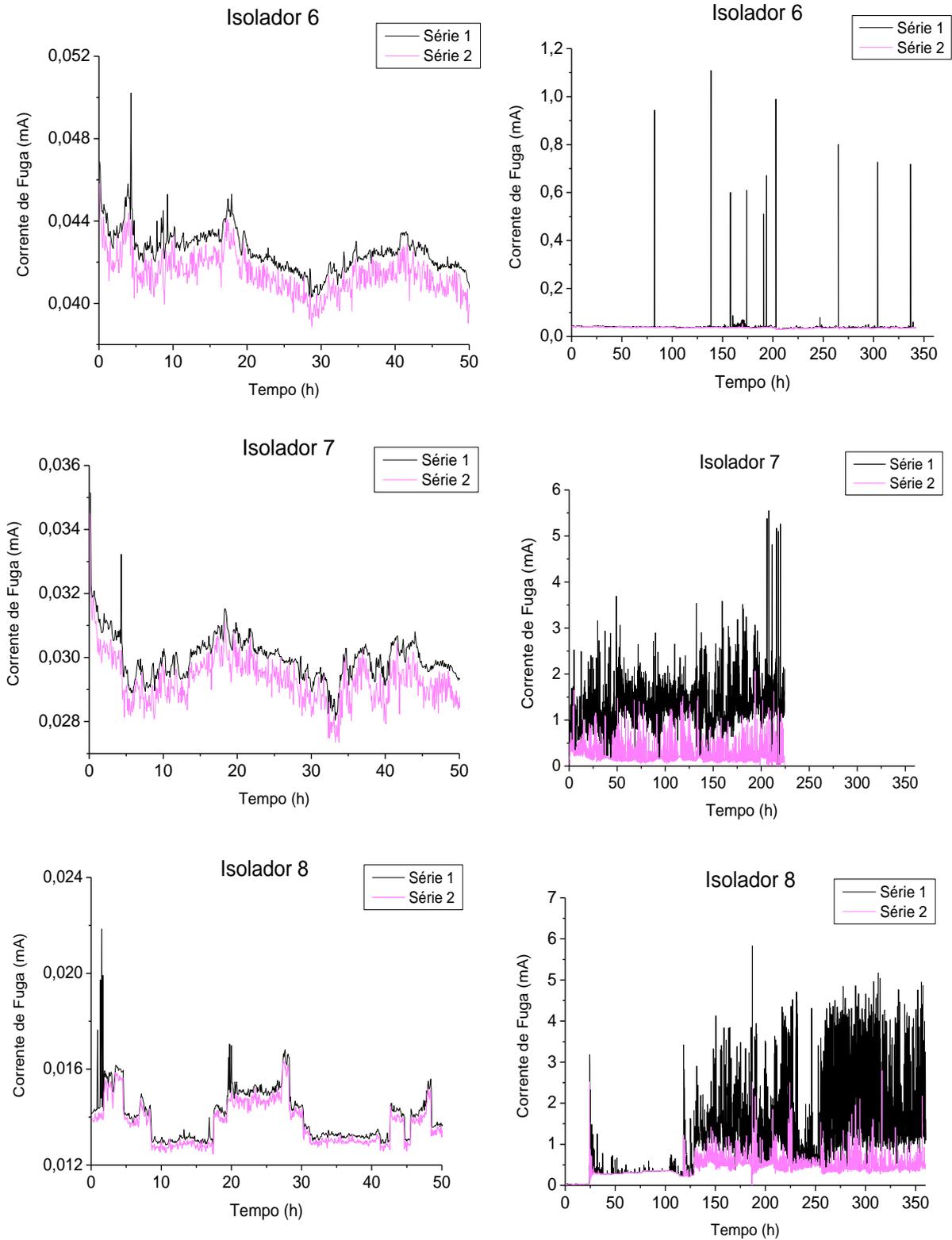
Das medidas de corrente de fuga nos isoladores (6, 7 e 9), quando submetidos à névoa limpa (48 h), observaram-se valores entre 30 e 50 μA . Já, para o isolador 8 (pilar híbrido com núcleo de porcelana) a corrente de fuga resultante foi de 15 μA .

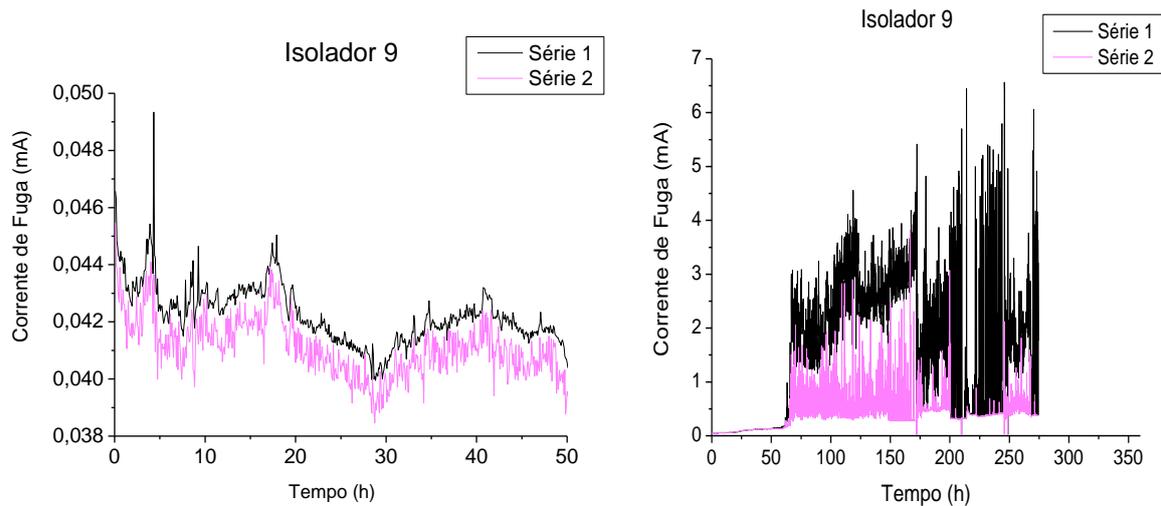
Durante o período de névoa salina (360 h) o isolador 9 (pilar híbrido com saias abrigadas) manteve uma corrente de fuga menor do que 50 μA até 60 h de ensaio. Infere-se que este fato seja devido ao perfil do isolador, mostrando que as saias abrigadas têm um efeito positivo quando em operação em um ambiente de elevada agressividade ambiental. A partir deste ponto a corrente de fuga subiu para faixa de 3 mA, apresentando alguns picos próximos de 6,5 mA.

O isolador 6 (pilar porcelana com revestimento de borracha de silicone) manteve, na maior parte do ensaio, a corrente de fuga em valores próximos de 50 μA , apresentando ocorrência de alguns picos próximos a 1 mA. Já o isolador 7 (pilar híbrido) apresentou uma corrente de fuga na faixa de 2 a 3 mA na maior parte do ensaio, com ocorrência de picos de 5 mA.

Portanto, a partir desses resultados, os isoladores que obtiveram os melhores desempenhos em medidas de corrente de fuga e avaliação da propriedade de hidrofobicidade foram: o isolador 6, isolador 7, isolador 8 e isolador 9.

Figura 2. Medidas de corrente de fuga em alguns dos isoladores testados em ensaios de névoa limpa (à esquerda) e névoa salina (à direita).





Avaliação de impactos ambientais. As avaliações dos impactos ambientais dos isoladores estão apresentadas nas Figuras 3 e 4, sendo classificadas de acordo com as recomendações normatizadas. O resultado do produto que conteve o maior impacto ambiental registrado é quantificado em 100% e os demais são comparados em relação a esse.

Figura 3. Avaliação de danos (saúde humana, ecossistema e uso de recursos).

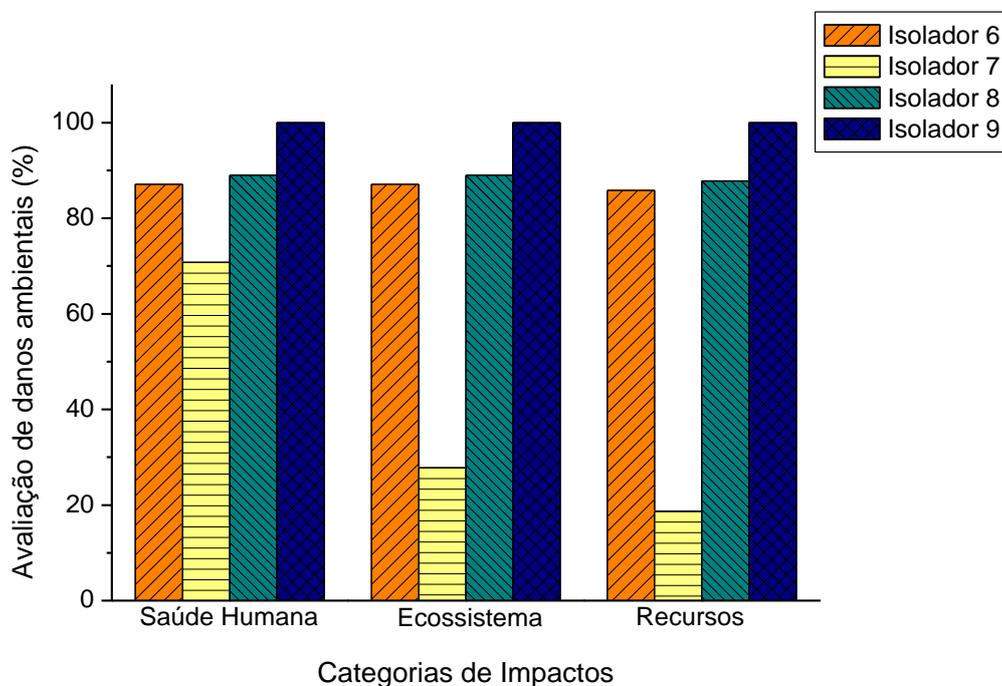
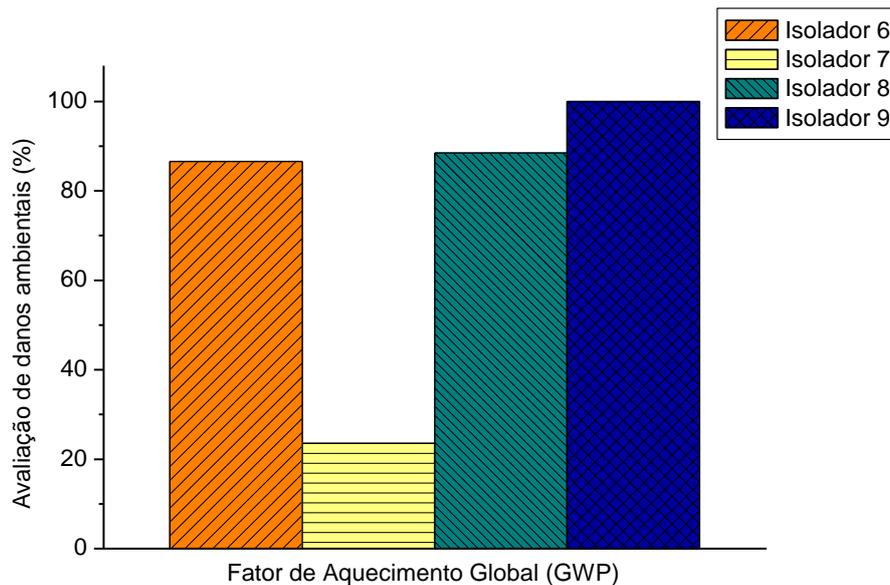


Figura 4. Avaliação de danos (Fator de aquecimento global).

Dos resultados da ACV dos isoladores, verificou-se que o isolador 7 (Isolador híbrido com núcleo de resina com fibra de vidro e revestimento de silicone) apresentou os melhores desempenhos em relação aos impactos ambientais em todas as categorias avaliadas pelo método ReCiPe: saúde humana, ecossistema e recursos. Já pelo método do IPCC GWP 2013 100a, foi verificado um resultado semelhante, no qual o isolador 7 apresentou as menores emissões de CO₂ eq contribuintes do aquecimento global.

Os demais isoladores, por apresentarem a porcelana como material principal constituinte, tiveram aspectos semelhantes e entre eles, os melhores desempenhos, em sequência, foram: isolador 6, isolador 8 e isolador 9 para ambos os métodos avaliados. Devido ao inventário de ciclo de vida elaborado, os resultados de ambos os métodos avaliados apresentaram diferenças entre os isoladores principalmente pela composição mássica de cada modelo de isolador e pelas emissões quantificadas na produção da porcelana e da fibra de vidro na fase de inventário. Cabe destacar, porém, que nesse inventário, o resultado do isolador 7 pode ter sido consequente da inclusão de apenas a fibra de vidro como seu material constituinte, excluindo a resina pela falta de dados precisos.

Em função dos testes elétricos, pôde-se inferir que o isolador 6, mesmo não tendo sido o de melhor desempenho em ACV indicou ser uma das opções de uso, pois apresentou os menores impactos ambientais em relação aos demais que possuíam a porcelana como material constituinte e apresentou as menores correntes de fuga em ambiente de névoa salina.

4. CONCLUSÃO

O estudo permitiu concluir a importância de se estudar novos materiais com diferentes tecnologias para o sistema de distribuição energia sabendo da sua ampla demanda e utilização no mundo. Estudos de desempenho concomitantes à ACV ainda não são muito comuns, porém estão sendo estudados em diversas áreas, visando melhorar a qualidade de produtos nos meios em que se inserem, já que excessiva necessidade de disposição de recursos implica impactos ambientais por vezes irreversíveis e eventualmente gastos financeiros desnecessários.

Embora os isoladores avaliados pela ACV terem apresentado comportamento distintos nas categorias ambientais e nos testes elétricos, estes possuíram capacidade de durabilidade maior em relação aos outros analisados, conforme preconiza as distribuidoras de energia, além de uma maior estabilidade em ambientes agressivos, a partir dos resultados de corrente de fuga e medidas de hidrofobicidade em ambientes de névoa limpa e salina. Avaliando o inventário de ciclo de vida elaborado, conforme estudos da literatura, foi possível concluir também que a produção da porcelana resultou em impactos ambientais superiores em relação à produção da fibra de vidro.

De uma forma geral, observou-se pelas análises efetuadas que os isoladores de pilar de porcelana com revestimento de borracha de silicone (RTV) e híbrido apresentaram bons desempenhos elétricos em condições de maior agressividade ambiental e pequenos impacto ambiental e de danos, pelo que se pode inferir pela maior objetividade da ACV na classificação de produtos sustentáveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à infraestrutura e ao apoio em recursos humanos e financiamento à CELPA/CEMAR projeto P&D 00371-0023/2016, à ANEEL, ao LACTEC, ao CNPq PIBITI, CNPq bolsa DT, processo 302672/2016-8; e aos demais envolvidos no desenvolvimento do estudo.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2019. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Agência Nacional de Energia Elétrica: Setor elétrico brasileiro* [em linha]. 2019. [Acesso em 1 novembro 2019]. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013. *ABNT NBR 15122: 2013 Isoladores para linhas aéreas: Isoladores compostos tipo suspensão e tipo ancoragem, para sistemas em corrente alternada com tensões nominais acima de 1 000 V: Definições, métodos de ensaio e critério de aceitação*. Rio de Janeiro, RJ: ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014a. *ABNT NBR ISO 14040: 2009 Versão Corrigida: 2014: Gestão Ambiental: Avaliação do ciclo de vida: Princípios e Estrutura. Brasil*. Rio de Janeiro, RJ: ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014b. *ABNT NBR ISO 14044: 2009 Versão Corrigida: 2014: Gestão Ambiental: Avaliação do ciclo de vida: Requisitos e orientações*. Rio de Janeiro, RJ: ABNT.

- BEZERRA, D.C., 2014. *Revestimento de isoladores elétricos utilizando borracha de silicone/alumina trihidratada/nanosilica* [em linha]. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Campina Grande, PB: Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande. [Acesso em 9 abril 2020]. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/244>
- CAMPOS, M.A., 2009. *Estudo do reaproveitamento de isoladores elétricos de porcelana como agregados em argamassas e concretos* [em linha]. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Campinas, SP: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas. [Acesso em 9 abril 2020]. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/257861>
- CARVALHO, M. e DELGADO, D., 2017. Potential of photovoltaic solar energy to reduce the carbon footprint of the Brazilian electricity matrix. *LALCA - Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida* [em linha]. 18 julho 2017. vol. 1, no. 1, p. 64–85. [Acesso em 9 abril 2020]. DOI [10.18225/lalca.v1i1.3779](https://doi.org/10.18225/lalca.v1i1.3779). Disponível em: <http://revista.ibict.br/lalca/article/view/3779>
- CARVALHO, M., MENEZES, V.L., GOMES, K.C. e PINHEIRO, R., 2019. Carbon footprint associated with a mono-Si cell photovoltaic ceramic roof tile system. *Environmental Progress & Sustainable Energy* [em linha]. julho 2019. vol. 38, no. 4, p. 13120. [Acesso em 9 abril 2020]. DOI [10.1002/ep.13120](https://doi.org/10.1002/ep.13120). Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ep.13120>
- CHEHEBE, J.R.B., 1997. *Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000*. Rio de Janeiro, RJ: Qualitymark. ISBN 978-85-7303-169-0.
- GOMES, W.R.C. e MORAES, C.A.M., 2017. Análise ambiental comparativa da obtenção de fibra de vidro e de basalto. Em: *Anais do 71º Congresso Anual da ABM* [em linha]. Rio de Janeiro: Editora Blucher. setembro 2017. p. 806–814. [Acesso em 9 abril 2020]. Disponível em: <http://abmproceedings.com.br/ptbr/article/analise-ambiental-comparativa-da-obtencao-de-fibra-de-vidro-e-de-basalto>
- HILLBORG, H. e GEDDE, U.W., 1998. Hydrophobicity recovery of polydimethylsiloxane after exposure to corona discharges. *Polymer* [em linha]. 1 maio 1998. vol. 39, no. 10, p. 1991–1998. [Acesso em 9 abril 2020]. DOI [10.1016/S0032-3861\(97\)00484-9](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(97)00484-9). Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386197004849>
- HUIJBREGTS, M.A.J., 2016. Report I: Characterization: *ReCiPe 2016 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level* [em linha]. Bilthoven, The Netherlands: National Institute for Public Health and the Environment. [Acesso em 9 abril 2020]. Disponível em: <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2016-0104.pdf>
- INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2019. Global Warming Potential Values. *Intergovernmental Panel on Climate Change* [em linha]. 2019. [Acesso em 1 novembro 2019]. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/>
- JOSHI, S.V., DRZAL, L.T., MOHANTY, A.K. e ARORA, S., 2004. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [em linha]. 1 março 2004. vol. 35, no. 3, p. 371–376. [Acesso em 9 abril 2020]. DOI [10.1016/j.compositesa.2003.09.016](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.09.016). Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X03002951>
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES, 2018. P2L00001: *Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil* [em linha]. Brasília, DF: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. [Acesso em 1 novembro 2019]. Disponível em: <https://acervo.socioambiental.org/acervo/livros/estimativas-anuais-de-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-no-brasil-4a-ed-2017>
- SEOG-HYEON, K., CHERNEY, E.A. e HACKAM, R., 1991. Hydrophobic behavior of insulators coated with RTV silicone rubber. Em: *Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials* [em linha]. Tokyo, Japan: IEEE. julho 1991. p. 972–976 vol.2. [Acesso em 9 abril 2020]. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/172235>
- SOUZA, H.H. de S., 2014. *Avaliação do ciclo de vida e influência do tempo de vida útil dos postes de madeira e de concreto do sistema de distribuição de energia elétrica* [em linha]. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento). Salvador, BA: Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia. [Acesso em 9 abril 2020]. Disponível em: <http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/15356>

TABORIANSKI, V.M., SIMONI, R.A. e PRADO, R.T.A., 2008. Elaboração de inventário de consumo de energia no ciclo de vida dos materiais utilizados em fachadas de edifícios no Brasil. Em: *Anais do XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído* [em linha]. Fortaleza, CE: ANTAC. 2008. [Acesso em 9 abril 2020]. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001723288>

WANG, X. e YOSHIMURA, N., 1999. Fractal phenomena. Dependence of hydrophobicity on surface appearance and structural features of SIR insulators. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [em linha]. dezembro 1999. vol. 6, no. 6, p. 781–791. [Acesso em 9 abril 2020]. DOI [10.1109/94.822015](https://doi.org/10.1109/94.822015). Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/822015>

YOKOTE, A.Y., 2003. *Inventário de ciclo de vida da distribuição de energia elétrica no Brasil (2003)* [em linha]. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). São Paulo, SP: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. [Acesso em 9 abril 2020]. Disponível em: http://dedalus.usp.br/F/EHB2824RNL49VS6T34B1A6E6BQQR2VFU8J2T9TYQ5R1F3T44DF-30807?func=direct&doc%5Fnumber=001370915&pds_handle=GUEST