

Ecodesign de um Novo Religador Trifásico – smART RCe

Tema: Qualidade de Energia

Autores: Frederico Alves Jahnert, Ixone Urruela Amirola, Lincoln Batista, Felipe Franchi Pires

Co-Autores: Evilasio Augusto Lira, Luiz Fabiano Serapio Ferreira, Jon Salgado Camello

Empresa: Artech

Resumo

Os religadores desempenham um papel essencial para a qualidade da distribuição de energia, assegurando a disponibilidade e estabilidade da rede elétrica em todo Brasil. O uso premissas do Ecodesign em conjunto com a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) do religador possibilita identificar formas de redução nos impactos ambientais na sua aplicação. Este trabalho apresenta a concepção de um novo religador trifásico de interrupção a vácuo utilizando Ecodesign, o smART RCe. Ferramentas de simulação foram utilizadas para análises estruturais, eletroestáticas e magnetoestáticas otimizando o uso de material e garantindo durabilidade de acordo com a IEC 62271-111. Considerando o ACV do religador e sua cadeia de suprimentos, sendo esta majoritariamente nacional, a pegada de carbono foi calculada de acordo com a norma EN 15804+A2 utilizando fatores de emissão do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima e o software MOBIUS. O resultado foi uma redução efetiva de 22% na pegada de carbono em comparação com o projeto inicial sem o uso desta metodologia, demonstrando a viabilidade do Ecodesign como ferramenta de decisão para diminuição do impacto ambiental para equipamentos primários na rede.

1. Introdução

O Ecodesign é um conceito que integra aspectos de projeto com objetivo de criar soluções sustentáveis para todo o ciclo de vida de um bem ou serviço (Karlsson e Luttrupp, 2006). A metodologia possui o potencial de auxiliar na diminuição das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para mitigar os impactos das mudanças climáticas, além de promover o avanço em diversos dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável estabelecidos pelas Nações Unidas (Schäfer e Löwer, 2020). A Análise do Ciclo de Vida (*Life Cycle Analysis*, LCA) é utilizada para calcular os possíveis impactos ambientais de um bem de forma qualitativa ou quantitativa geradas durante todas as etapas de seu ciclo de uso, desde a extração das matérias-primas ("cradle") até sua disposição final ("grave").

No setor de distribuição de energia, há uma previsão de aumento estimado de 3,5% ao ano na demanda de energia nacional, provinda de um crescimento populacional e o acréscimo de uso de energia per capita pela população por conta do desenvolvimento tecnológico (EPE, 2025). As novas fontes de geração de energia renováveis associado à transição energética influenciam na qualidade da energia da rede, que necessita ser garantida através de equipamentos primários. As novas fontes de geração aumentam as flutuações de

frequência e tensão devido à sua inerente natureza intermitente e introduz harmônicas pelos inversores e dispositivos elétricos utilizados (Liang, 2017).

Os religadores trifásicos fazem parte da rede de distribuição de energia elétrica brasileira estando presente do norte ao sul do país. A qualidade da energia elétrica entregue aos consumidores, juntamente com a frequência e a duração de interrupções indesejadas, tem sido alvo de crescente fiscalização, incentivando aprimoramentos nas redes de distribuição. A função “Self-healing” permite aos religadores o monitoramento da rede e o isolamento autônomo da região de falha na rede de distribuição. Essa função tem alta importância para as distribuidoras de energia pois impactam diretamente os indicadores de qualidade do fornecimento de energia: DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) (ANEEL, 2021). Além disso, o religador é um componente chave para composição da rede elétrica inteligente (“Smart Grid”) devido à integração de um módulo de comunicação que permite constante monitoramento de índices de qualidade da rede. Estes, quando posicionados em regiões críticas, fornecem informações importantes para a distribuidora, como: a segmentação das regiões de maior ou menor consumo, as que apresentam maior variação de consumo, entre outros indicadores.

Figura 1 - Novo religador smART RCe baseado em Ecodesign.



O religador é um dispositivo eletromecânico que envolve sistemas multifísicos, incluindo fenômenos mecânicos, eletromagnéticos, acústicos, vibratórios e térmicos. Uma forma de avaliar modificações e otimizações para cumprir com os fatores levantados pelo LCA é através de ferramentas de simulação computacional como a Análise de Elementos Finitos (AEF) ou *Finite Element Analysis* (FEA), em inglês. O FEA possibilita testar rapidamente cenários de carregamentos mecânicos, elétricos e térmicos, assim como prever o comportamento do dispositivo durante sua vida útil. O uso da técnica em conjunto com métodos de otimização, por exemplo, permite a concepção de componentes para exercer certa função com maior eficiência e/ou menor pegada de carbono.

Outra forma de aumentar a eficiência de um produto é através da segmentação da sua aplicação para uma função específica. Neste trabalho é apresentado um novo religador para o uso em redes até 15kV, onde seu impacto ambiental é avaliado através de uma Análise de Ciclo de Vida (ACV), de acordo com as normas ISO 14040 e ISO 14044. A Pegada de Carbono (PC) é calculada com base no Potencial de Aquecimento Global (PAG) de 100 anos fornecido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima, ou, em inglês, *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Considerando as 5 etapas de vida do equipamento, o método obteve um resulta de redução na pegada de carbono de 22%.

2. Desenvolvimento

Neste capítulo, apresenta-se os métodos e resultados das simulações numéricas empregadas neste trabalho abrangendo análises estruturais, eletrostáticas e magnetostáticas para otimização e avaliação do desempenho de componentes críticos do religador através do software ANSYS. Com base nos resultados obtidos, são realizadas iterações nos componentes do religador, otimizando aspectos como o uso de materiais, geometria e desempenho funcional. Após a descrição destes resultados, é apresentado a metodologia de cálculo da pegada de carbono evidenciando as 5 fases do ACV e seus impactos. Por último, os experimentos da norma IEC 62271-111 realizados em laboratório certificado são discutidos comparando-os com os resultados obtidos por simulação.

2.1 Análises de componentes por FEA

Para garantir uma vida útil prolongada do religador, conforme estabelecido pela Norma IEC 62271-111 (2019), é imprescindível a realização de testes de durabilidade, levando em consideração os ciclos de abertura e fechamento do equipamento. A análise de fadiga por simulação prevê o dano incremental que ocorre em cada componente ao longo de sucessivos ciclos de operação, até o fim da vida útil do dispositivo. A análise possibilita o monitoramento do movimento do mecanismo garantindo que as direções de contato e alinhamento se mantenham constantes durante as operações. Folgas mecânicas provenientes do desgaste nos componentes móveis podem resultar em perdas de desempenho ou falhas prematuras, afetando o contato dos polos dentro da ampola a vácuo. Isso, por sua vez, pode comprometer a eficiência do mecanismo de interrupção.

Portanto, um estudo abrangente de confiabilidade deve considerar não apenas os aspectos mecânicos, mas também os efeitos das condições de operação, como a vibração, as forças eletromagnéticas e as variações térmicas. A combinação de análises de fadiga, confiabilidade e testes de durabilidade assegura que o religador seja capaz de operar de maneira eficaz ao longo de toda sua vida útil. Conforme demonstrado na Figura 2, foram realizados diferentes tipos de simulação da estrutura mecânica: para o eixo do mecanismo de movimentação, para a estrutura externa do religador e para os reforços internos.

Figura 2 - Análise estrutural do religador para otimização de uso de componentes.

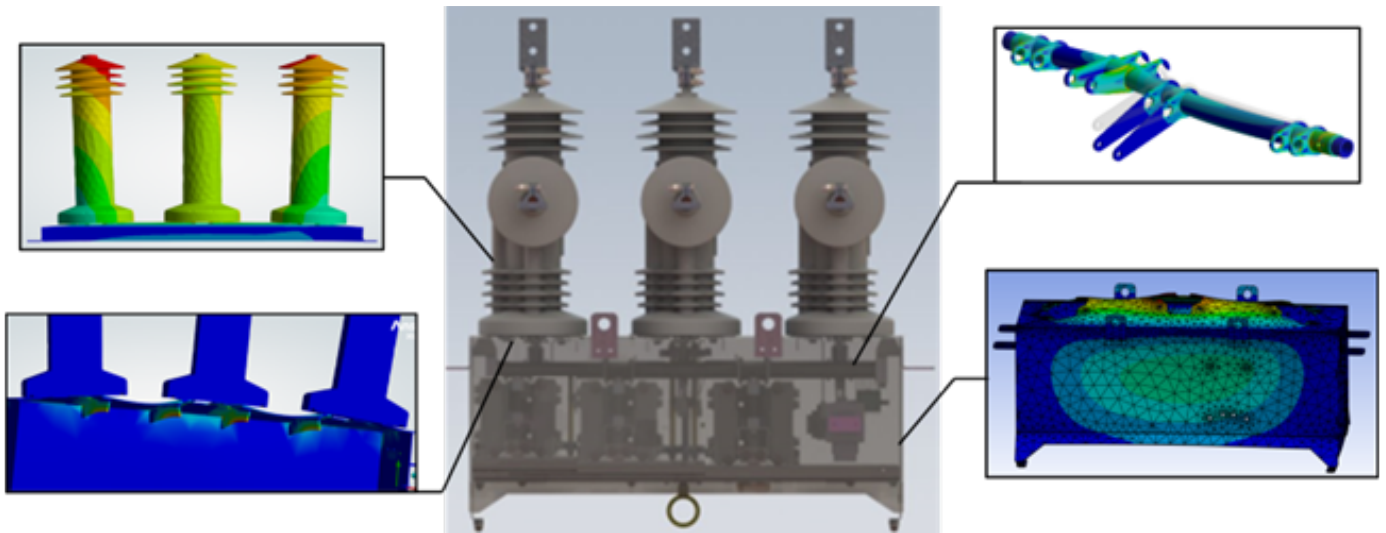
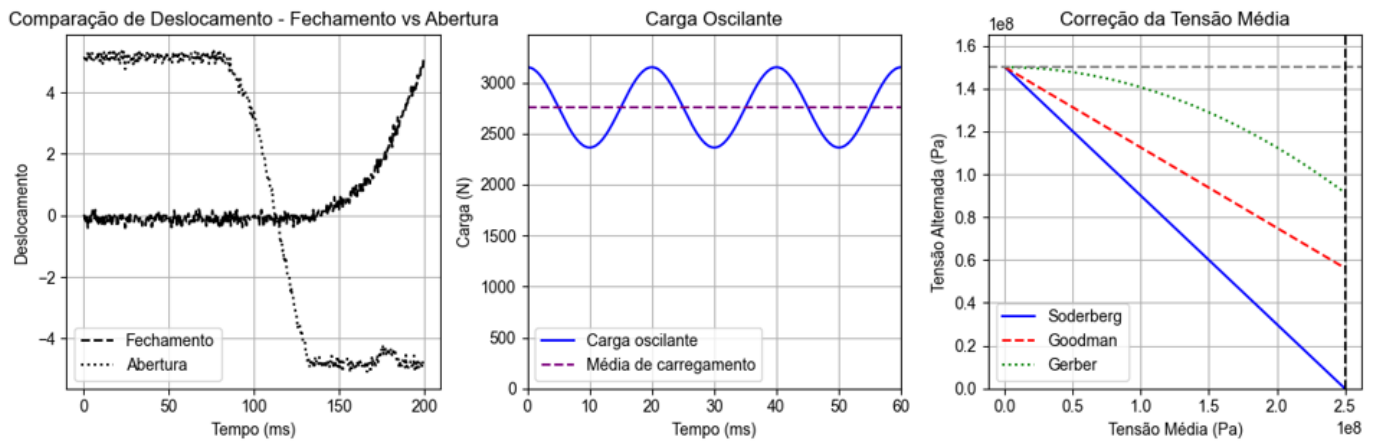


Figura 3 – Análise de durabilidade do equipamento.



No processo de avaliação, cenários de mecanismos com número de componentes reduzidos foram analisados visando diminuição no impacto gerado pelo transporte e fabricação de componentes individuais, resultando na utilização de 32% menos componentes e uma redução de peso do equipamento de 23% em comparação com o conceito inicial. Ainda assim, seguindo a equação de Gerber e a Lei de Miner, conforme descritas abaixo, o resultado da simulação do mecanismo principal apresentou uma durabilidade superior a 50 000 ciclos.

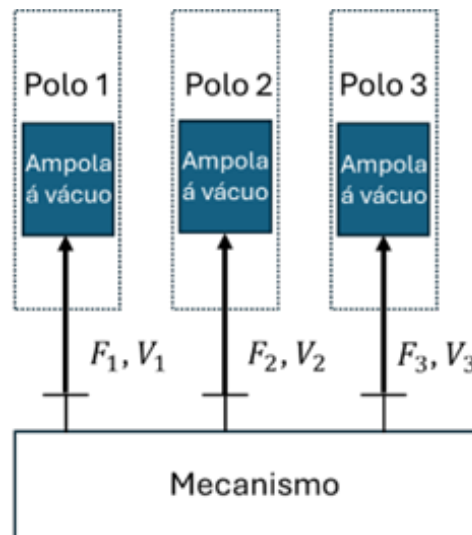
$$\sigma_m \sigma_e + \sigma_a \sigma_N = 1$$

$$\sum_{k=1}^l \frac{n_k}{N_k} = \text{Dano cumulativo}$$

onde σ_m é a tensão média e σ_a é a tensão alternada exercida sobre o mecanismo, enquanto σ_e define a tensão de escoamento do material e σ_N define a resistência para vida infinita. Para a Lei de Miner, n define o número de ciclos para o k -ésimo nível de tensão e N é o número de ciclos até a falha para aquele nível de tensão.

Análises magnetoestáticas foram realizadas no atuador para simular as forças de atração eletromagnéticas durante o curso de movimento mecânico do religador. Estas forças são utilizadas para prever as velocidades de fechamento e abertura do sistema eletromecânico validados em conjunto com resultados de experimentos físicos. A curva de força por deslocamento do atuador garante que este mantenha o contato do interruptor a vácuo constante durante seu funcionamento na posição “fechada”, enquanto a curva força por velocidade garante que a aceleração do mecanismo é suficiente para interromper um curto-circuito de até 12,5 kA. Ao analisar a saturação dos materiais devido ao campo magnético gerado, é possível redimensionar as peças do atuador ou selecionar o material apropriado, visando obter o design mais eficiente.

Figura 4 - Ilustração do mecanismo de fechamento e abertura do religador.



Conforme descrito na Figura 4, as forças necessárias F_1 , F_2 e F_3 devem proporcionar velocidades de abertura ou fechamento (V_1 , V_2 e V_3) suficientes para que não ocorra uma solda no contato de cada ampola, ou falta de sincronismo entre fases (Slade, 2007). Esses parâmetros são avaliados através do FEA criando um mapa de variáveis que serve para identificar otimizar o uso de material e manufatura do componente. Simulações no ANSYS Maxwell são realizadas no mecanismo atuador considerando uma simetria no eixo de atuação (z), simplificando o modelo para duas dimensões (2D), reduzindo o tempo computacional. As seguintes equações do campo magnetostaticas são resolvidas para cálculo da força de pegado

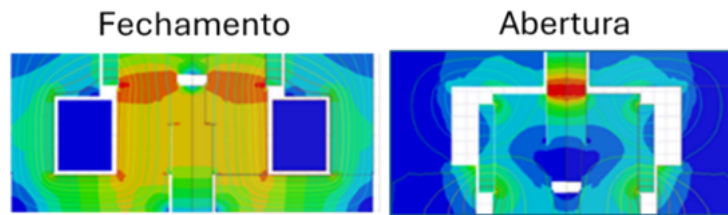
$$\nabla \times H = J, \nabla \cdot B = 0, H = \frac{B}{\mu_0 \mu_r}$$

baseando-se no princípio do trabalho virtual a força induzida, F , é calculada como

$$F = \frac{\partial W_m}{\partial z}, \text{ onde } W_m = \int_V \frac{1}{2} B \cdot H dV$$

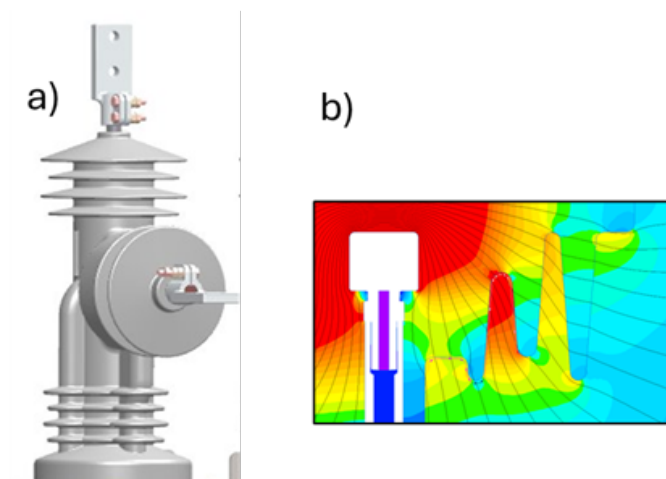
onde W_m é a energia magnética, H é o campo magnético, B a densidade de fluxo magnético, J a densidade de corrente elétrica, μ_r é a permeabilidade relativa do material e μ_0 é a permeabilidade do vácuo (ANSYS, 2012). Figura 5 mostra o resultado de um dos experimentos de avaliação do atuador durante o ciclo de fechamento e abertura do religador.

Figura 5 - Resultado da simulação para fechamento e abertura do atuador demonstrando o campo eletromagnético.



Além da seleção de material e geometria do atuador, a simulação numérica do atuador permite a redução de material e de componentes que servem para movimento mecânico, como molas e amortecedores. Os polos têm a função de isolar os componentes ativos que realizam a interrupção da corrente elétrica no sistema. A análise eletroestática aplicada ao polo permite testar a suportabilidade aos efeitos de tensão aplicada a frequência industrial e Nivel Basico de Impulso (NBI), e dessa forma é possível otimizar o consumo de material. Para essa análise em específico, o equipamento destinado a aplicação em sistemas de 15kV deve suportar 50kV de tensão aplicada à frequência industrial e 110kV de NBI, conforme a IEC 62271-111. Figura 6 demonstra os resultados obtidos da análise para um dos 3 polos do equipamento.

Figura 6 - a) Ilustração do polo e b) corte 2D do campo na interface polo e ar.

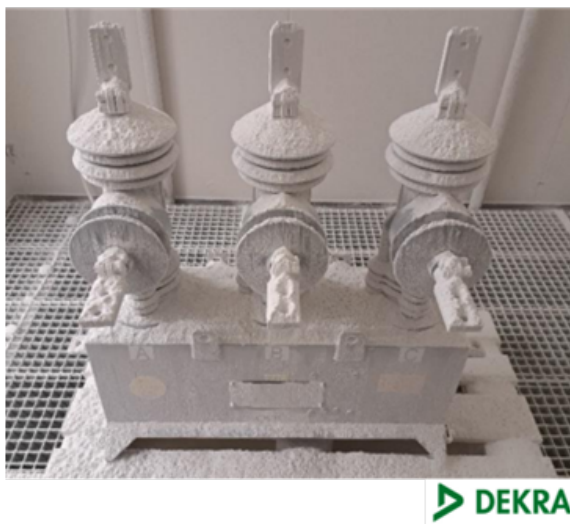


As análises realizadas para otimização geométricas resultaram em uma redução de 30% de volume do polo em comparação com o modelo inicial. Apesar dessa redução, tanto nos resultados numéricos quanto nos resultados experimentais o polo suportou uma tensão aplicada superior ao exigido em norma.

2.2 Experimentos físicos

Os testes de tipo para este equipamento têm como objetivo avaliar sua durabilidade em vista da agressividade do meio externo e tempo exposto ao ambiente de aplicação. A validação das mudanças propostas por simulação é realizada através de experimentos que excedem a norma IEC 62271-111 por laboratórios acreditados. O equipamento obteve certificação do KEMA *Laboratory*, na qual uma unidade foi submetida e aprovada em todos os testes exigidos pela norma incluindo: ensaios de interrupção, ensaios de curto-circuito, ensaios dielétricos, resistência elétrica, incremento de temperatura, suportabilidade a correntes de curto período e de pico, grau de proteção IP, compatibilidade eletromagnética, testes de controle, emissão de raios X, descargas parciais, ensaio de durabilidade de 10.000 ciclos E outros.

Figura 7 ilustra alguma das etapas dos experimentos de certificação.

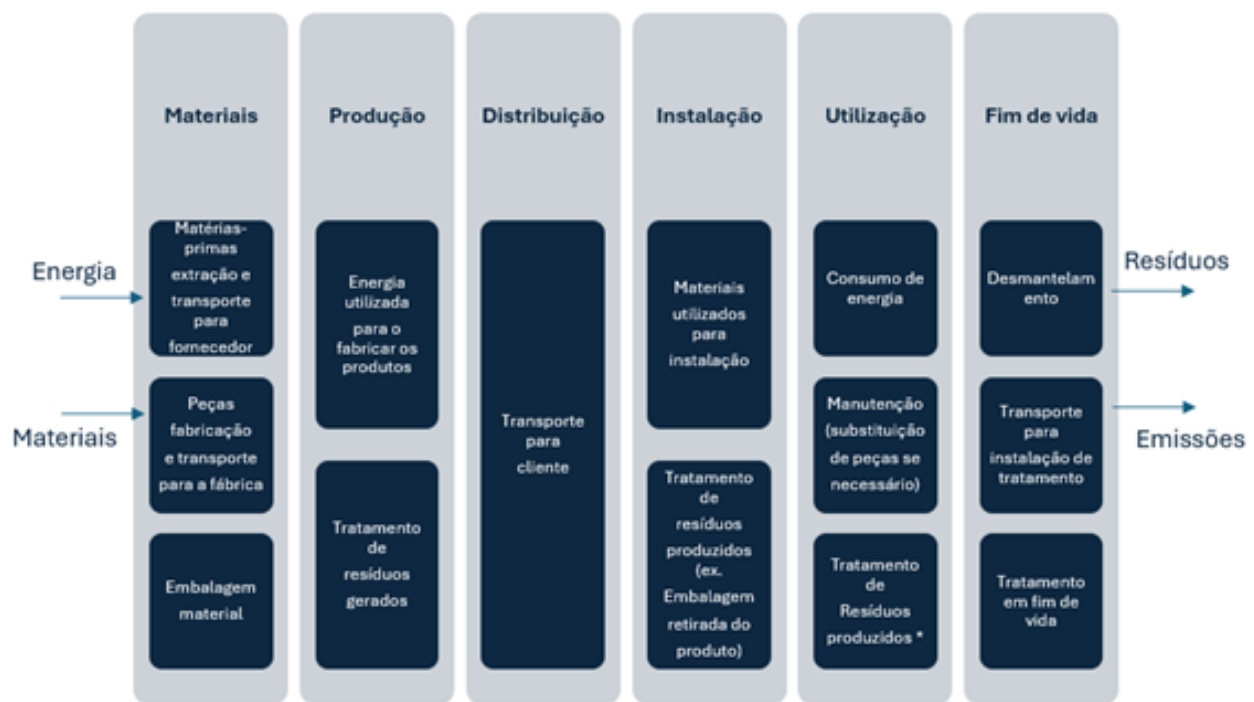


2.3 Cálculo da Ciclo de Vida do Produto

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) ou, em inglês, *Life Cycle Assessment* (LCA) foi realizada seguindo as metodologias ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006. As regras que governam o cálculo para cada categoria de produto, chamado de Regras de Categoria de Produto (RCP), foram baseadas no PEP-PCR–ed4-EN-2021 09 06 – “Product Category Rules for Electrical, Electronic and HVAC-R Products” e para as regras específicas de produto foi utilizado a PSR-005-ed2-2016 – “Electrical switchgear and control gear solutions” (PEP ecopassport, 2021; PEP ecopassport, 2016). Ambos os documentos foram publicados pelo Programa PEP *Ecopassport*, uma iniciativa internacional que define a formação do Perfil Ambiental do Produto, ou, em inglês, *Product environmental Profile* (PEP). Este perfil relaciona o impacto ambiental com os dados obtidos através do LCA. De acordo com as disposições do RCP, foi considerado um Vida Útil Resultante (VUR) de 15 anos para uma unidade funcional. Esta VUP não representa a vida útil do equipamento, mas sim um horizonte temporal de referência para a avaliação. O método de avaliação utilizado é o EN 15804 Method e foi utilizada a base de dados Ecoinvent 3.9. Conforme descrito na Figura 8, o impacto ambiental foi avaliado considerando os seguintes fatores:

1. **Materiais e logística de embalagem:** Avaliação dos materiais utilizados na confecção das embalagens e do modal logístico empregado para transporte.
2. **Fabricação:** Análise do consumo energético e dos resíduos gerados durante o processo produtivo.
3. **Distribuição:** Consideração do transporte do produto até o cliente, com uma distância padrão de 1.000 km por modal rodoviário.
4. **Instalação:** Identificação das etapas de armazenamento e do transporte das embalagens até seu local de descarte.
5. **Fim de vida:** Avaliação da taxa de reciclagem dos materiais constituintes do produto e da distância percorrida para o transporte desses materiais até os pontos de reciclagem.

Figura 8 - Diagrama indicando as fases do ACV.



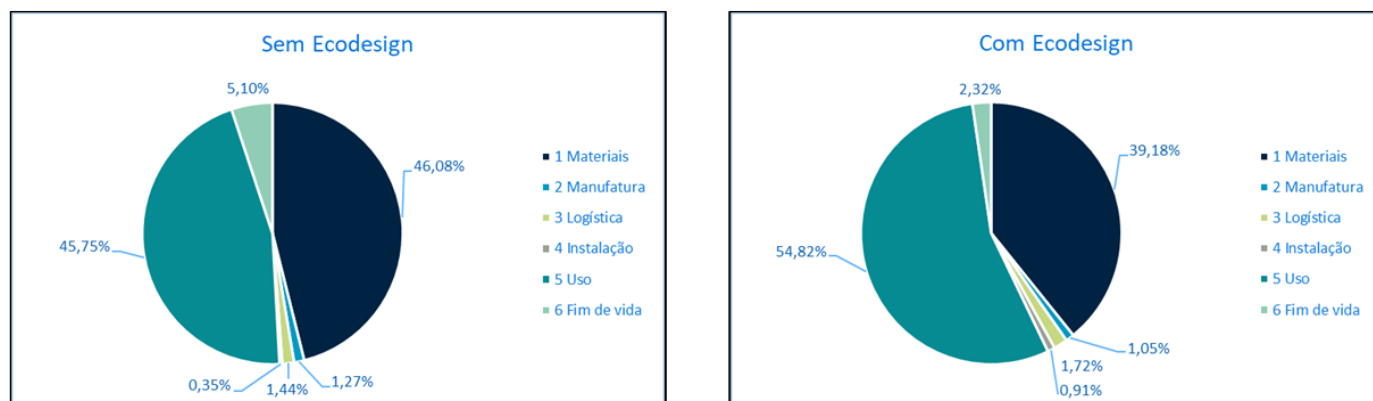
O detalhamento dessas etapas permite identificar os principais impactos ambientais ao longo do ciclo de vida do produto e possibilita a implementação de estratégias para sua mitigação. Por razões de segredo industrial, não é mencionado as características específicas dos componentes, assim como os valores específicos de impacto ambiental de cada material. As conclusões são apresentadas em valores relativos. A pegada de carbono é calculada seguindo os seguintes passos:

- Realização de um levantamento da ACL dos componentes baseados em dados internos de fabricação e processo de manufatura.
- Para cada atividade e material, é assignado um fator de emissão da base de dados Ecoinvent 3.9
- Os processos, compostos por um número de atividades, são assignado um peso devido ao fator de emissão.
- Uma soma dos fatores é realizada para calcular o impacto total de cada unidade de equipamento
- Os resultados são calculadores através da ferramenta MOBIUS e pós-processados

Uma redução substancial no consumo de matéria-prima é obtida devido as melhorias encontradas por FEA e pela segmentação da aplicação do religador para 15 kV, resultando em uma diminuição de 30% no uso de resina e uma redução de 23% no peso total do equipamento, sendo o aço o material com maior impacto nesta redução. A dimensão do equipamento, reduzida em 20%, também influencia positivamente no impacto ambiental. Com isso, segue os resultados de redução de impacto ambiental:

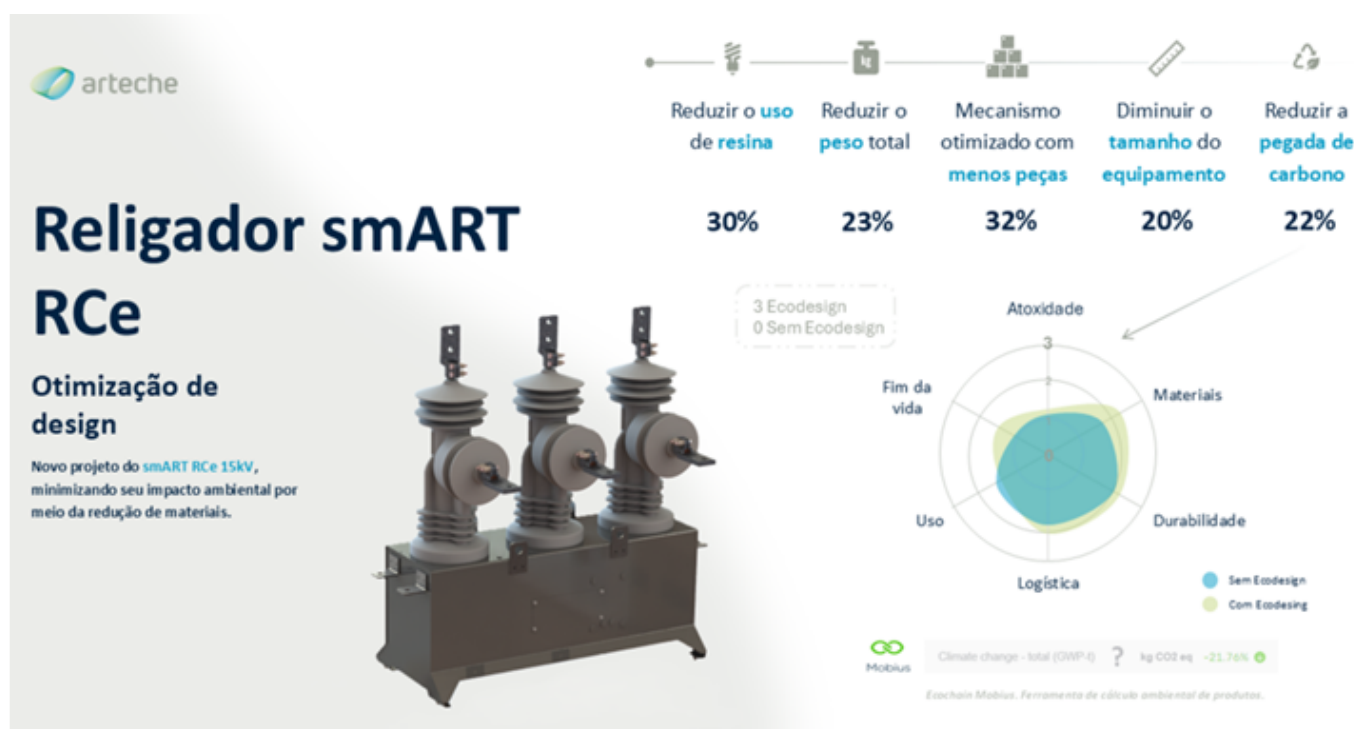
- Redução geral de todos os impactos ambientais considerados, conforme o RCP.
- Redução de 22% no impacto da Pegada de Carbono [kg CO2 eq]
- Redução de 35% no impacto da Toxicidade Humana Não Cancerígena [CTUh]
- Redução de 21% no impacto da Toxicidade Carcinogênica Humana [CTUh]
- Redução de 26% no impacto da Oxidação Fotoquímica [kg NMVOC eq]
- Redução de 22% no impacto das Emissões de Partículas [%]

Figura 9- Diagrama comparativo de impacto do Ecodesign para cada fase de ciclo de vida.



Ao finalizar o ACV, um gráfico teia de aranha pode ser criado para comparar o nível de Ecodesign de antes e depois do processo de melhoria. Na Figura 10, a área do gráfico em azul representa os indicadores sem ecodesign enquanto em verde descreve estes indicadores com ecodesign.

Figura 10- Resumo do desempenho ambiental da nova solução.



3. Conclusão

Os religadores são equipamentos cruciais para a garantia de qualidade de energia na rede de distribuição. No presente estudo é demonstrado o processo de desenvolvimento do novo religador smART RCe para redes de 15kV baseado em diretivas de Ecodesign apresentando uma redução na pegada de carbono de 22%. Para alcançar este objetivo, as análises por simulação (FEA) possibilitam uma redução de 22% na pegada de carbono do equipamento e, ainda assim, assegura a vida útil do religador conforme exigências de durabilidade estabelecidas pela norma IEC 62271-111.

A avaliação do impacto ambiental durante ciclo de vida do religador foi utilizado para direcionar as melhorias para obter resultados mais eficientes. A redução de peso e otimização de componentes contribuem significativamente para a redução na pegada de carbono. A metodologia adotada neste trabalho, ao incorporar a otimização do uso de materiais e a análise de impacto ambiental, demonstra a viabilidade do Ecodesign como uma estratégia eficaz no desenvolvimento de soluções sustentáveis no setor. Para trabalhos futuros, novas propostas de melhorias nas 3 fases mais impactantes do ciclo de vida (materiais, logística e uso) estão sob estudo.

4. Referências bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 948, de 11 de maio de 2021**. Estabelece as condições gerais para a prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica no Brasil. Brasília: ANEEL, 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2025-2029**. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-305/topico-730/Apresentacao_PLAN%202025-2029_final.pdf. Acesso em: 20 jan. 2025.

DIN EN 15804/A2:2018-04. **Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products**. AENOR, 2018.

EUROPEAN COMMISSION. **Ecodesign: what's happening?** Disponível em: https://proyectaryproducir.com.ar/public_html/Seminarios_Posgrado/Material_de_referencia/Ecodesign%20-%20What's%20happening.pdf. Acesso em: 20 jan. 2025.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 15804: Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products**. Brussels: CEN, 2012.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 62271-111: High-voltage switchgear and controlgear – Part 111: Automatic circuit reclosers and sectionalizers for alternating current systems up to 38 kV**. Geneva: IEC, 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040:2006 – Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and framework**. ISO TC 207/SC 5, revisado em 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14044:2006 – Environmental management - Life Cycle Assessment – Requirements and guidelines**. ISO TC 207/SC 5, revisado em 2022.

LIANG, X. **Emerging Power Quality Challenges Due to Integration of Renewable Energy Sources**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 53, n. 2, p. 855-866, mar./abr. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2626253>.

PEP ECOPASSPORT®. **PEP-PCR–ed4-EN-2021 09 06. Product Category Rules for Electrical, Electronic and HVAC-R Products**. Paris: PEP ECO Association, 2021.

PEP ECOPASSPORT®. **PSR-005-ed2-2016. Product Specific Rules for Electrical switchgear and control gear solutions**. Paris: PEP ECO Association, 2016.

SCHÄFER, M.; LÖWER, M. **Ecodesign—A review of reviews**. Sustainability, v. 13, n. 1, p. 315, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13010315>. Acesso em: 20 jan. 2025.

SILVA, G. R. **A importância do design sustentável**. Estudos em Design, v. 24, n. 1, p. 99-110, 2016. Disponível em: <https://www.eed.emnuvens.com.br/design/article/viewFile/127/124>. Acesso em: 20 jan. 2025.

SLADE, P. G. **The vacuum interrupter: theory, design, and application**. New York: CRC Press, 2007.
ANSYS, Inc. **Chapter 22: Maxwell 2D Technical Notes**. In: **Maxwell ANSYS Online Help**. Canonsburg, PA, USA, 2012.