



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E AMBIENTE

ROBERT BELFORT MUNIZ

**ECONOMIA CIRCULAR APLICADA À GESTÃO DE ATIVOS NO SETOR DE
ENERGIA: EXTENSÃO DE VIDA ÚTIL E DESCARTE DE TRANSFORMADORES
DE POTÊNCIA**

São Luís

2024

ROBERT BELFORT MUNIZ

**ECONOMIA CIRCULAR APLICADA À GESTÃO DE ATIVOS NO SETOR DE
ENERGIA: EXTENSÃO DE VIDA ÚTIL E DESCARTE DE TRANSFORMADORES
DE POTÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente da Universidade Federal do Maranhão para a obtenção do título de Mestre em Energia e Ambiente.

Orientadora: Profa. Dra. Lucylea Gonçalves França

São Luís

2024

Muniz, Robert Belfort.

Economia circular aplicada à gestão de ativos no setor de energia: extensão de vida útil e descarte de transformadores de potência / Robert Belfort Muniz. - 2024.

113 f.

Orientador(a): Lucylea Gonçalves França.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Energia e Ambiente/ccet, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2024.

1. Economia Circular. 2. Gestão de Ativos. 3. Transformador de potência. I. França, Lucylea Gonçalves. II. Título.

ROBERT BELFORT MUNIZ

**ECONOMIA CIRCULAR APLICADA À GESTÃO DE ATIVOS NO SETOR DE
ENERGIA: EXTENSÃO DE VIDA ÚTIL E DESCARTE DE TRANSFORMADORES
DE POTÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente da Universidade Federal do Maranhão para a obtenção do título de Mestre em Energia e Ambiente.

Aprovada em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Lucylea Gonçalves França (Orientadora)

Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente (PPGEA/UFMA)

Prof. Dr. Shigeaki Leite de Lima

Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente (PPGEA/UFMA)

Prof. Dr. Ginalber Luiz de Oliveira Serra

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (DEE/IFMA)

AGRADECIMENTOS

À Deus, em primeiro lugar, pelo dom da vida e por ser a minha fortaleza nos momentos de dificuldade ao longo desta jornada.

Aos meus pais, Muniz e Lúcia e aos meus irmãos, Rúbia e Jaysson, pelo carinho e suporte.

À minha esposa Laiandre Dias e às minhas filhas Rebeca e Laís, que são os grandes amores da minha vida. Tudo por vocês e para vocês.

À minha avó Ila Belfort pelo seu amor e carinho e por sempre torcer pelo meu sucesso.

À minha orientadora, professora Lucylea França, vai um agradecimento mais que especial, pelas orientações e dicas, pelo incentivo e encorajamento nos momentos de adversidade e pela disponibilidade de tempo para ler e corrigir o texto.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente (PPGEA) pelos conhecimentos transmitidos e aos colegas de mestrado pelas horas de aulas compartilhadas e pelos momentos de troca de experiência ao longo desta jornada.

Aos professores Shigeaki (PPGEA/UFMA) e Ginalber (DEE/IFMA), que foram colegas da época da graduação em engenharia elétrica na UFMA, por aceitarem o convite para fazer parte da banca examinadora e por suas sugestões de melhoria ao trabalho.

De um modo geral, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a elaboração deste trabalho. Deixo aqui registrados os meus sinceros agradecimentos.

“Sem grande solidão, nenhum trabalho sério é possível”.

Pablo Picasso

RESUMO

A Economia Circular propõe a ruptura com o modelo econômico linear (extrair, transformar e descartar) visando ao desenvolvimento de materiais e produtos que possam circular de forma eficiente e serem realocados na cadeia produtiva sem perda de qualidade, além do reaproveitamento, recomposição em novos materiais, e extensão de vida útil, gerando assim maior consciência ambiental e eficiência tecnológica. Dentre os objetivos do desenvolvimento sustentável proposto pela ONU, o ODS 12 propõe como meta mundial que até 2030 as sociedades sejam resilientes, comprometidas, e responsáveis na produção, e no consumo, de materiais, bens e serviços, com maior responsabilidade ambiental. Essa proposição exige uma mudança de paradigma nos setores industriais, no combate à obsolescência programada, exigindo um novo modelo econômico no setor de energia, com o aproveitamento dos equipamentos e materiais, projetados para alcançar a circularidade no processo produtivo, de forma eficiente. A Gestão de Ativos é uma metodologia que busca a máxima geração de valores pelos ativos, fornecendo o suporte necessário para que a organização decida o período ótimo para a substituição dos ativos em final de vida útil. A dissertação propõe a análise do processo de gestão energética, com ênfase na análise e avaliação sobre as potencialidades de aplicação dos princípios de circularidade na continuidade operacional, e na vida útil dos transformadores de potência e seus impactos ambientais no setor energético brasileiro. O presente trabalho propõe a análise da aplicação dos principais princípios de Economia Circular na gestão do ciclo de vida dos transformadores de potência e pretende avaliar de que maneira o uso de novas ferramentas poderá impactar na extração, e utilização de recursos do meio ambiente, e de que maneira poderá diminuir na produção e na geração de resíduos sólidos mediante o reaproveitamento desses materiais.

Palavras-chave: Economia Circular. Gestão de Ativos. Transformador de potência.

ABSTRACT

The circular economy proposes a break with the linear economic model (extract, transform and discard) aiming at the development of materials and products that can circulate efficiently and be reallocated in the production chain without loss of quality, in addition to reuse, recomposition into new materials, and useful life extension, thus generating greater environmental awareness and technological efficiency. Among the sustainable development objectives proposed by the UN, SDG 12 proposes as a global goal that by 2030 societies are resilient, committed, and responsible in the production and consumption of materials, goods and services, with greater environmental responsibility. This proposition requires a paradigm shift in the industrial sectors, in the fight against planned obsolescence, demanding a new economic model in the energy sector, with the use of equipment and materials, designed to achieve circularity in the production process, in an efficient way. Asset management is a methodology that seeks to maximize the generation of value from assets, providing the necessary support for the organization to decide the optimal period for replacing assets at the end of their useful life. The dissertation proposes the analysis of the energy management process, with an emphasis on the analysis and evaluation of the potential for applying the principles of circularity in operational continuity, and in the useful life of power transformers and their environmental impacts in the Brazilian energy sector. This work proposes the analysis of the application of the main principles of circular economy in managing the life cycle of power transformers and aims to evaluate how the use of new tools may impact the extraction and use of resources from the environment, and how can the production and generation of solid waste be reduced through the reuse of these materials.

Keywords: Circular economy. Asset management. Power transformer.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Projeção global de geração de resíduos sólidos.
- Figura 2:** Mapa do Brasil contendo o percentual de municípios por estado com disposição final.
- Figura 3:** Ciclo biológico e ciclo técnico na Economia Circular.
- Figura 4:** Cadeia logística em circuito fechado.
- Figura 5:** Oferta interna de energia elétrica por fonte.
- Figura 6:** Produção de energia primária.
- Figura 7:** Autoprodução de energia elétrica até 2022.
- Figura 8:** Autoprodução de energia elétrica não injetada na rede até 2022.
- Figura 9:** Primeiro transformador de William Stanley.
- Figura 10:** Evolução dos transformadores de distribuição da General Electric, de 1886 a 1936.
- Figura 11:** Vista interna de um transformador de potência.
- Figura 12:** Conexões do comutador de um transformador de potência.
- Figura 13:** Espaçadores de madeira utilizados em transformadores.
- Figura 14:** Sistema de fixação e suporte da parte ativa de um transformador monofásico.
- Figura 15:** Núcleo de um transformador trifásico.
- Figura 16:** Vista da parte ativa de um transformador de potência trifásico.
- Figura 17:** Exemplo de bucha capacitiva do tipo óleo-ar.
- Figura 18:** Esquemático de buchas capacitivas para óleo-ar.
- Figura 19:** Vista do tanque de um transformador de potência de 230kV.
- Figura 20:** Sistemas de expansão com uso de conservador.
- Figura 21:** OLTC ABB tipo VUC com interruptor a vácuo.
- Figura 22:** Relação entre os principais termos na Gestão de Ativos.
- Figura 23:** Etapas do ciclo de vida de um transformador de potência.
- Figura 24:** Ciclo de operação e manutenção de um transformador de potência.
- Figura 25:** Curva teórica de degradação da condição de um transformador.
- Figura 26:** Taxa de falhas de buchas em função do tempo.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Sistemas de logística reversa cadastrados no SINIR+ até 2019.

Tabela 2: Vida do papel isolante sob condições variadas.

Tabela 3: Constantes para a estimativa de GPv.

Tabela 4: Massas de um transformador de potência 230/69kV – 100.000kVA.

Tabela 5: Emissões específicas de GEE para a produção de aço no Brasil.

Tabela 6: Emissões aproximadas de GEE para a manufatura do aço utilizado no tanque e núcleo de um transformador de potência 230/69kV – 100.000kVA.

Tabela 7: Principais insumos energéticos e efluentes da siderurgia.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABB	<i>Asea Brown Boveri</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGD	Análise de Gases Dissolvidos
ACL	Ambiente de Contratação Livre
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
APE	Autoprodução de energia
BEN	Balanço Energético Nacional
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CBM	<i>Condition Based Maintenance</i>
CDF	Certificado de Destinação Final
DETC	<i>De-Energized Tap Changer</i>
DT	<i>Design Thinking</i>
EC	Economia Circular
EMF	<i>Ellen MacArthur Foundation</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
FMECA	<i>Failure Mode, Effect and Critical Analysis</i>
GA	Gestão de Ativos
GEE	Gases de Efeito Estufa
GP	Grau de Polimerização
IRR	Índice Nacional de Recuperação de Resíduos
IAM	<i>Institute of Asset Management</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCC	<i>Life Cycle Cost</i>
MTR	Manifesto de Transporte de Resíduos
MCSE	Manual de Contabilidade do Setor Elétrico
MCPSE	Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

OIP	<i>Oil Impregnated Paper</i>
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
OMI	Óleo Mineral Isolante
OVI	Óleo Vegetal Isolante
OLTC	<i>On Load Tap Changer</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ONU	Organização das Nações Unidas
PV	Parcela Variável
PAR	Plano de Ampliação e Reforços
PGRS	Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos
PLANARES	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PCB	<i>Polychlorinated biphenyls</i>
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNLR	Programa Nacional de Logística Reversa
PPA	<i>Power Purchase Agreement</i>
RAP	Receita Anual Permitida
RCM	<i>Reliability-centred Maintenance</i>
RIP	<i>Resin Impregnated Paper</i>
RIS	<i>Resin Impregnated Synthetics</i>
SAMP	<i>Strategic Asset Management Plan</i>
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
SGA	Sistema de Gestão de Ativos
SINIR	Sistema Nacional de Informações Sobre Gestão dos Resíduos Sólidos
TBM	<i>Time Based Maintenance</i>
TBCM	<i>Time Based Condition Monitoring</i>
TCO	<i>Total Cost of Ownership</i>
TEP	Tonelada Equivalente de Petróleo
WEEE	<i>Waste Electrical and Electronic Equipment</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos	17
1.1.1 Objetivo geral	17
1.1.2 Objetivos específicos	17
1.2 Metodologia.....	18
1.3 Organização do trabalho	18
2 ECONOMIA CIRCULAR, LOGÍSTICA REVERSA E SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL.....	19
2.1 Design circular	24
2.2 Novos modelos de negócios	25
2.2.1 Produto como serviço.....	26
2.2.2 Compartilhamento.....	26
2.2.3 Matérias-primas circulares	27
2.2.4 Recuperação de recursos	27
2.2.5 Extensão de vida útil	28
2.2.6 Virtualização.....	28
2.3 Ciclo Reverso.....	29
2.4 Fatores viabilizadores e condições sistêmicas favoráveis à Economia Circular .	29
2.5 A logística reversa no contexto da Economia Circular	30
2.6 A Economia Circular no âmbito do setor de energia elétrica.....	36
3 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA.....	41
3.1 Breve histórico	41
3.2 Classificação dos transformadores de potência.....	43
3.3 Anatomia e fisiologia do transformador de potência	44
3.3.1 Parte ativa	45

3.3.1.1 Enrolamentos	45
3.3.1.2 Núcleo magnético	48
3.3.1.3 Isolamento sólido e líquido.....	49
3.3.2 Buchas	51
3.3.3 Tanque e sistema de resfriamento.....	54
3.3.3.1 Tanque	54
3.3.3.2 Sistema de resfriamento	56
3.3.3.3 Bombas de circulação	57
3.3.3.4 Válvulas.....	58
3.3.3.5 Sistema de expansão de óleo	58
3.3.4 Comutador	60
3.3.4.1 Comutador de derivações sem carga (DETC)	60
3.3.4.2 Comutador de derivações em carga (OLTC)	61
4 A METODOLOGIA DE GESTÃO DE ATIVOS APLICADA AO CICLO DE VIDA DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA.....	64
4.1 Considerações metodológicas sobre a Gestão de Ativos	64
4.2 A Gestão de Ativos para transformadores de potência.....	69
4.3 Mecanismos de envelhecimento dos transformadores de potência.....	77
4.4 Requisitos para a determinação do final da vida útil dos transformadores de potência	79
5 ECONOMIA CIRCULAR ASSOCIADA AOS PROCESSOS DE EXTENSÃO DE VIDA ÚTIL E DESCARTE DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA	86
5.1 Extensão da vida útil de transformadores de potência.....	86
5.1.1 Intervenções no óleo isolante.....	87
5.1.2 Secagem da parte ativa	89
5.1.3 Restauração do sistema de vedação	89
5.1.4 Substituição de componentes	90

5.1.5 Reforma do transformador	91
5.2 Substituição de transformadores de potência em final de vida útil.....	97
5.2.1 Substituição corretiva ou reativa (funcionar até a falha)	97
5.2.2 Substituição baseada no tempo	98
5.2.3 Substituição baseada na condição.....	98
5.3 Descarte de transformadores de potência em final de vida útil.....	98
5.3.1 Destinação de resíduos ferrosos.....	100
5.3.2 Destinação de resíduos de cobre.....	100
5.3.3 Destinação de resíduos de óleo mineral isolante	101
6 CONCLUSÃO	103
7 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	107
REFERÊNCIAS.....	108

1 INTRODUÇÃO

A eletricidade pode ser considerada uma das mais impactantes descobertas empreendidas pela humanidade. A revolução tecnológica pela qual o mundo passou nas últimas três décadas não seria possível, nem viável, sem as diversas aplicações que a energia elétrica proporciona. Nesse sentido, a energia elétrica se apresenta como um insumo básico indispensável ao desenvolvimento tecnológico, econômico e social de qualquer nação. Para tanto se faz necessário o provimento de uma adequada infraestrutura para a produção, transmissão e distribuição de energia elétrica.

O transformador de potência é uma máquina essencial ao sistema elétrico para viabilizar a transmissão da energia entre as usinas de geração e os consumidores finais. Toda a infraestrutura de transmissão de energia elétrica é baseada na conversão de níveis de tensão elétrica (em corrente alternada) que os transformadores de potência proporcionam. Portanto, é crucial para as empresas de energia manter estas máquinas em boas condições de funcionamento ao longo de seu ciclo de vida utilizando-se de técnicas adequadas de manutenção, pois são ativos de elevado custo de aquisição.

Nesse contexto a Gestão de Ativos surge como uma atividade corporativa organizada que visa à geração de valores pelos ativos, de tal sorte que orienta uma organização para examinar a necessidade e o rendimento dos ativos e seus sistemas em diferentes níveis. A Gestão de Ativos pode ser considerada uma metodologia de bases lineares em que o bem é concebido, projetado, fabricado, adquirido, utilizado e descartado (ABNT, 2014b).

A metodologia de Gestão de Ativos fornece o suporte para que as organizações ativo-intensivas, como aquelas que atuam no setor de energia, decidam o período ótimo para a substituição dos seus ativos em final de vida útil, ou até mesmo optem pela permanência dos equipamentos em serviço mediante a execução de reformas e melhorias que prolonguem o seu ciclo de vida.

Por outro lado, a Economia Circular é um modelo econômico que reconhece que os recursos naturais são finitos, e devem ser preservados como novas tecnologias e modelos de produção. Nesse modelo, a fabricação e o consumo são pensados de forma integrada e sustentável, dentro de uma cadeia de acontecimentos e ações, da indústria e do mercado de consumo, com o objetivo de

minimizar o desperdício e promover a reutilização e a reciclagem de materiais (BORSCHIVER; TAVARES, 2022).

Dessa forma, a Economia Circular busca criar um sistema mais eficiente e justo, que leve em conta as necessidades das gerações futuras, e promova a criação de empregos verdes e inovação tecnológica sustentável. Em contraste com o modelo linear, no qual se extrai, produz, consome e descarta, a Economia Circular propõe uma abordagem mais circular e regenerativa, em que os resíduos são transformados em recursos e a natureza é vista como um parceiro fundamental para o desenvolvimento sustentável (EMF, 2017); (BORSCHIVER; TAVARES, 2018).

A extensão de vida útil, como será visto, é um modelo de negócios circular que viabiliza a reutilização de matérias primas e componentes, resultando em maior valor agregado às empresas. Desta forma, insumos que seriam descartados poderão ser reaproveitados e reinseridos na cadeia produtiva, reduzindo a necessidade de extração e beneficiamento de recursos naturais. Isto, conseqüentemente, fomenta a sustentabilidade ambiental do negócio. Além disso, a logística reversa é outra prática circular que promove a sustentabilidade ambiental fazendo com que materiais e produtos retornem à cadeia produtiva (CNI, 2018).

No Brasil, a Lei 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), conceituou a logística reversa como “instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada”. Apesar de ter sido um avanço, a PNRS deixou diversas lacunas em relação à política de resíduos sólidos, sobretudo no sentido estender a compulsoriedade da logística reversa a outros setores geradores de resíduos sólidos perigosos, como é o caso do setor elétrico (AZEVEDO, 2015).

Não há um consenso na literatura técnica especializada acerca da vida útil média de um transformador de potência, que pode variar dependendo das condições de uso e da legislação do local de instalação. No Brasil, a vida útil de um transformador de potência foi estabelecida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) através do MCPSE (Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico) em 35 anos (ANEEL, 2015). Ocorre que ao longo do Sistema Elétrico

Brasileiro (SEB) existem atualmente milhares de transformadores que já atingiram ou estão em vias de atingir esse tempo em funcionamento.

Portanto, é premente que haja um debate nas esferas acadêmica, governamental e corporativa com vistas ao estabelecimento de uma política adequada de gestão dos resíduos sólidos que são gerados pelos transformadores de potência quando é determinado o seu final de vida útil. Este trabalho tem como objetivo contribuir para a reflexão e para a pesquisa relacionadas ao prolongamento da vida útil e descarte de transformadores de potência utilizados pelo setor de energia no Brasil.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Realizar um estudo sistemático e objetivo sobre os conceitos de Gestão de Ativos e de Economia Circular e aplicá-los ao ciclo de vida dos transformadores de potência com o objetivo de propor ações mitigadoras para a geração de resíduos sólidos no setor de energia no que diz respeito ao descarte de transformadores de potência em final de vida útil.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Apresentar, de forma ampla e sistematizada, o contexto histórico, conceitos, características, abrangência e limitações da Economia Circular;
- b) Investigar o panorama geral e as principais iniciativas da Economia Circular e logística reversa no Brasil com ênfase no setor elétrico;
- c) Apresentar os conceitos e as principais características da metodologia de Gestão de Ativos e sua aplicação na gestão do ciclo de vida do transformador de potência;
- d) Identificar as oportunidades de aplicação dos conceitos de Economia Circular no processo de Gestão de Ativos associado ao ciclo de vida técnica de transformadores de potência;
- e) Conhecer e Identificar os potenciais ganhos ambientais e financeiros com a adoção dos conceitos de Economia Circular dentro processo metodológico da Gestão de Ativos com relação à reforma do transformador de potência com extensão de vida útil;

- f) Avaliar quais conceitos de Gestão de Ativos e de Economia Circular, podem ser aplicados conjuntamente ao ciclo de vida dos transformadores de potência.

1.2 Metodologia

A pesquisa desenvolvida no presente trabalho tem como finalidade aprofundar os conceitos de Economia Circular e de Gestão de Ativos e aplicá-los conjuntamente com o objetivo de propor ações mitigadoras para a geração de resíduos sólidos no setor de energia, mais especificamente no que diz respeito à extensão de vida útil a ao descarte de transformadores de potência em final de vida útil. Para a consecução deste objetivo foi desenvolvido um estudo de caráter descritivo, utilizando abordagem de análise qualitativa e teórico-exploratória, através de revisão bibliográfica, pesquisas documentais, consultas jurídico-normativas e estudos de normas técnicas nacionais e estrangeiras. O controle e catalogação das referências bibliográficas foram realizados através do software *Mendeley Reference Manager*.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos, incluída esta introdução. O Capítulo 2 aborda a temática da Economia Circular, seus principais conceitos, métodos, as áreas de concentração das iniciativas circulares, a logística reversa e as iniciativas de Economia Circular no setor elétrico. Em seguida, o Capítulo 3 trata dos aspectos construtivos do transformador de potência. Já o Capítulo 4 apresenta os principais aspectos da metodologia de Gestão de Ativos e sua aplicação ao ciclo de vida do transformador de potência. No Capítulo 5 é feita uma abordagem teórica acerca da Economia Circular associada à gestão dos processos de descarte e extensão de vida útil de transformadores de potência. Finalmente, no Capítulo 6, encontram-se as conclusões, considerações finais e as propostas de trabalhos futuros.

2 ECONOMIA CIRCULAR, LOGÍSTICA REVERSA E SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL

A geração de resíduos é uma temática que vem progressivamente dominando a agenda de debates, tanto em nível governamental para implementação de políticas públicas mitigadoras, quanto na sociedade civil organizada, com vistas a viabilizar a sustentabilidade ecológica do planeta. O crescimento populacional, a escalada da escassez dos recursos naturais e a destinação incorreta dos resíduos exigem a adoção de padrões de produção e de consumo cada vez mais sustentáveis.

De acordo com o relatório *What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*, publicado pelo Banco Mundial em 2018, a gestão de resíduos sólidos é fundamental para o planejamento de cidades e comunidades sustentáveis, saudáveis e inclusivas para todos. Ainda segundo o relatório espera-se que até 2030 o mundo gere anualmente cerca de 2,59 bilhões de toneladas de resíduos; até 2050 a expectativa é que este valor alcance 3,40 bilhões de toneladas como pode ser visto na figura 1 (KAZA, 2018, p. 24). Esta perspectiva é extremamente preocupante do ponto de vista ambiental, principalmente quando as estatísticas demonstram que, globalmente, cerca de 33% dos resíduos sólidos ainda são descartados a céu aberto (KAZA, 2018, p. 34).

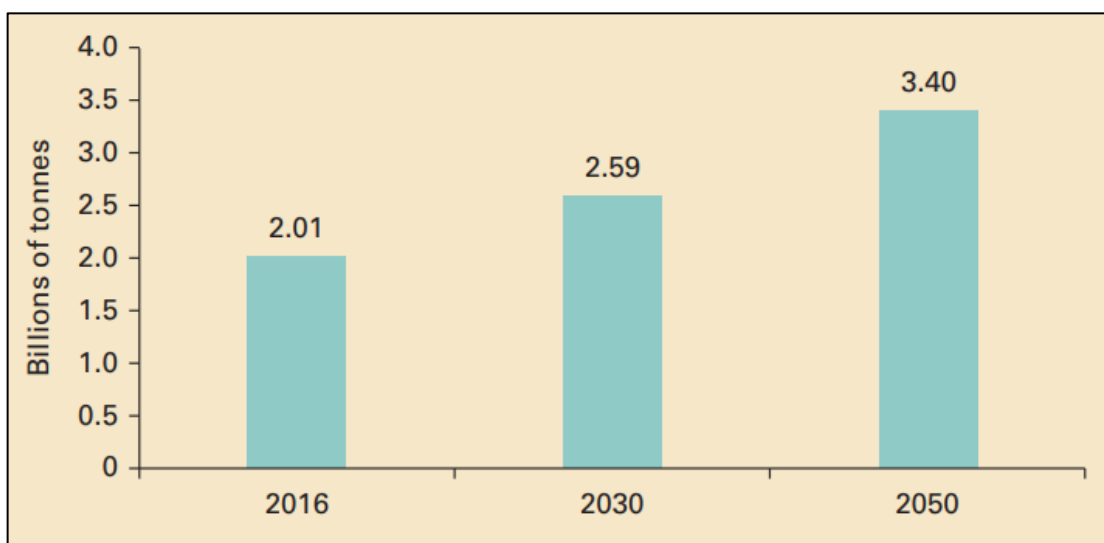


Figura 1: Projeção global de geração de resíduos sólidos (KAZA, 2018, p. 25).

Em âmbito nacional, de acordo com o Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos, ano de referência 2019, o Índice Nacional de Recuperação de Resíduos – IRR foi de ínfimos 1,67%¹. Este indicador é calculado da seguinte forma:

$$IRR = \frac{(reutilização + reciclagem + recuperação energética)}{geração\ de\ resíduos\ sólidos\ urbanos}$$

O citado relatório apresenta um mapa contendo o percentual de municípios por estado da federação com disposição final adequada de resíduos sólidos urbanos (figura 2). Avaliando-se o mapa percebe-se de forma cristalina que o desenvolvimento econômico está diretamente relacionado com a destinação adequada de resíduos sólidos. As regiões Sul e Sudeste brasileiras têm políticas de resíduos sólidos mais difundidas em seus municípios quando comparadas às regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste.

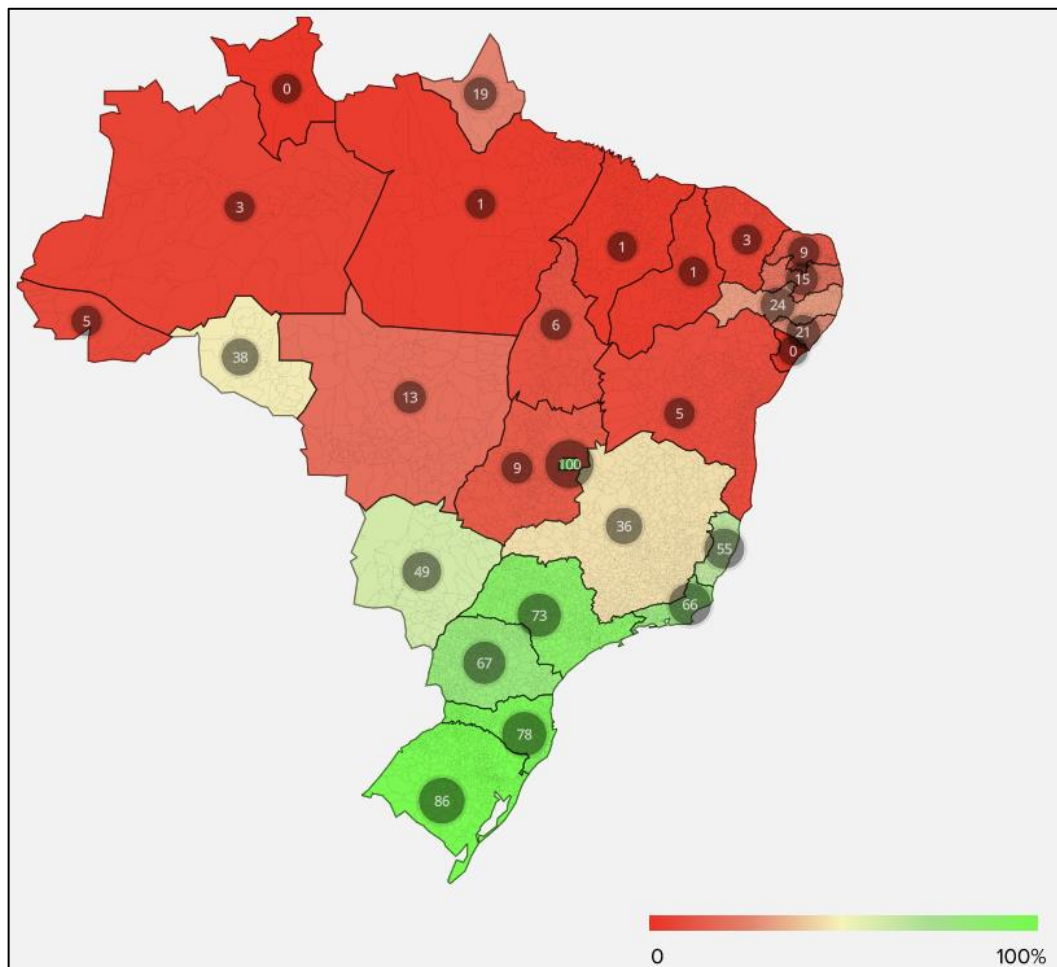


Figura 2: Mapa do Brasil contendo o percentual de municípios por estado com disposição final adequada de resíduos sólidos urbanos (fonte: SINIR / SNIS).

¹ Disponível em: <<https://sinir.gov.br/relatorios/nacional/>>. Acesso em: 30.12.2023.

Nesse contexto a Economia Circular exsurge como uma alternativa ao modelo econômico linear (extrair, transformar e descartar), utilizado atualmente pela grande maioria das corporações no sistema capitalista, sugerindo a implantação de um modelo no qual todos os tipos de materiais são desenvolvidos e manufaturados para circular de forma eficiente e serem realocados no ciclo produtivo sem perda de qualidade. Deste modo, a Economia Circular tem como principal objetivo dissociar o desenvolvimento econômico do consumo de recursos finitos.

No entanto, de acordo com o relatório *The circularity gap report 2023*, a economia global é atualmente apenas 7,2% circular. Em 2018 este indicador era de 9,1% (CIRCLE ECONOMY, 2023, p. 18). Estes números demonstram claramente a existência de oportunidades para a implementação da Economia Circular em diversos setores produtivos, o que pode proporcionar benefícios para a preservação de recursos naturais em nível global.

Por outro lado, o indicador também demonstra que o nível de circularidade do planeta está sendo pressionado pelo aumento da extração e uso de recursos naturais em detrimento da reutilização dos recursos já extraídos do meio ambiente. Com o implemento de uma Economia Circular pode-se satisfazer as necessidades das pessoas com apenas 70% dos materiais utilizados atualmente dentro dos limites seguros do planeta (CIRCLE ECONOMY, 2023).

Na seara da sustentabilidade ambiental, o modelo de Economia Circular consiste em uma estratégia que reduz o impacto negativo imposto ao meio ambiente, oferecendo uma alternativa ao modelo linear de negócios, em que todo o valor é agregado ao produto e atinge o ápice com o seu consumo. As origens da Economia Linear datam da Revolução Industrial quando houve um aumento da quantidade, da variedade e da velocidade da produção devido à mecanização e ao desenvolvimento de novos sistemas de produção.

No modelo de Economia Linear “os produtos de consumo são submetidos a um processo de fabricação, a uma rede de distribuição e varejo, ao uso dos consumidores, à coleta dos resíduos e, por fim, ao despejo em aterros sanitários ou esgotos, ou à incineração” (BORSCHIVER, 2022). Existe ainda, dentro da Economia Linear, o conceito de obsolescência programada, que consiste em produzir bens de consumo com tempo de vida útil mais curto que o necessário. Desta forma, esses produtos passam a ser substituídos rapidamente, estimulando o consumo acelerado e o mercado.

As principais escolas de pensamento relacionadas à Economia Circular surgiram na década de 1970, ganhando proeminência nos anos de 1990. Entretanto, a noção de circularidade tem importantes origens históricas e filosóficas, sendo que a ideia de retroalimentação e de ciclos em sistemas é antiga e surge em diversas escolas filosóficas. Pode-se dizer que a essência do que atualmente se entende como Economia Circular foi introduzida pelo químico Antoine Laurent Lavoisier que, em 1785, postulou a Lei da conservação das massas: “Na natureza nada se perde, nada se cria, tudo se transforma” (BORSCHIVER, 2022, p. 36).

Existem algumas escolas de pensamento e seus respectivos autores que influenciaram diretamente a formulação dos conceitos atuais da Economia Circular, dentre todas as mais significativas são (BORSCHIVER, 2022, p. 37):

- Design Regenerativo de John T. Lyle, 1970 - Todos os sistemas podem ser projetados de forma regenerativa (os processos se renovam ou regeneram as fontes de energia e materiais que consomem).
- Ecologia industrial de Roland Clift e Thomas E. Graedel, 2001 - É o estudo de fluxos de materiais e energia através de sistemas industriais em malha fechada, cujos resíduos servem como insumos, eliminando a noção de subprodutos indesejáveis.
- Biomimética de Janine Benyus, 2003 - Utiliza a natureza como modelo para criação de projetos e processos para a solução de problemas humanos.
- *Cradle to Cradle* de Michael Braungart e William McDonough, 2003 - Considera todos os materiais envolvidos nos processos industriais e comerciais como nutrientes técnicos e biológicos.

O debate acerca da Economia Circular ganhou notoriedade mais recentemente quando a Ellen MacArthur Foundation (EMF), uma organização sem fins lucrativos criada por uma velejadora britânica que emprestou seu nome à entidade, publicou uma série de estudos com o objetivo de contribuir para a solução de desafios globais, tais como as alterações climáticas e a perda de biodiversidade.

Desde a sua criação em 2012, a Fundação Ellen MacArthur tem buscado a disseminação da Economia Circular, tendo se tornado referência global no tema (BORSCHIVER; TAVARES, 2018, p. 4). A EMF fomenta o desenvolvimento de pesquisas originais baseadas em evidências sobre os benefícios de uma Economia Circular e incentiva diversos projetos e organizações que desenvolvem trabalhos com base nos princípios da Economia Circular.

Para a Fundação Ellen MacArthur "uma Economia Circular é restaurativa e regenerativa por princípio" (EMF, 2017, p. 9). Por restaurador, entende-se a recuperação dos recursos gastos em novos produtos e serviços; por regenerativo, a recuperação dos sistemas biológicos (BORSCHIVER, 2022, p. 37). Seu objetivo é "manter produtos, componentes e materiais em seu mais alto nível de utilidade e valor o tempo todo, distinguindo entre ciclos de materiais técnicos e biológicos" (EMF, 2015, p. 2).

Suzana Borschiver explica que (2022, p. 38)

O ciclo biológico compreende a gestão de fluxo de materiais renováveis e as atividades relativas ao uso de insumos biológicos para a obtenção de bioprodutos, de modo a regenerar os componentes da biosfera. Já o ciclo técnico corresponde à gestão dos estoques de materiais finitos e não consumidos por sistemas biológicos. Nessa rota, os produtos obtidos por via sintética podem ser compartilhados, reutilizados, remanufaturados ou reciclados, promovendo a restauração dos seus componentes e, por fim, o fechamento do ciclo produtivo, como pode ser alcançado nas cadeias produtivas de metais e plásticos.

O consumo se dá apenas nos ciclos biológicos, enquanto os ciclos técnicos recuperam e restauram produtos, componentes e materiais através de estratégias como reuso, reparo, remanufatura ou reciclagem (BORSCHIVER, 2022, p. 37). Deste modo, a Economia Circular visa, em última instância, à dissociação entre o desenvolvimento econômico e o consumo de recursos finitos. "Um dos objetivos da Economia Circular é aumentar a vida útil do produto, produzir bens com ciclos de vida longos e focar em serviços ao invés de produtos" (KOWSZYK, 2018, p. 8). A figura 3 ilustra os conceitos expostos.

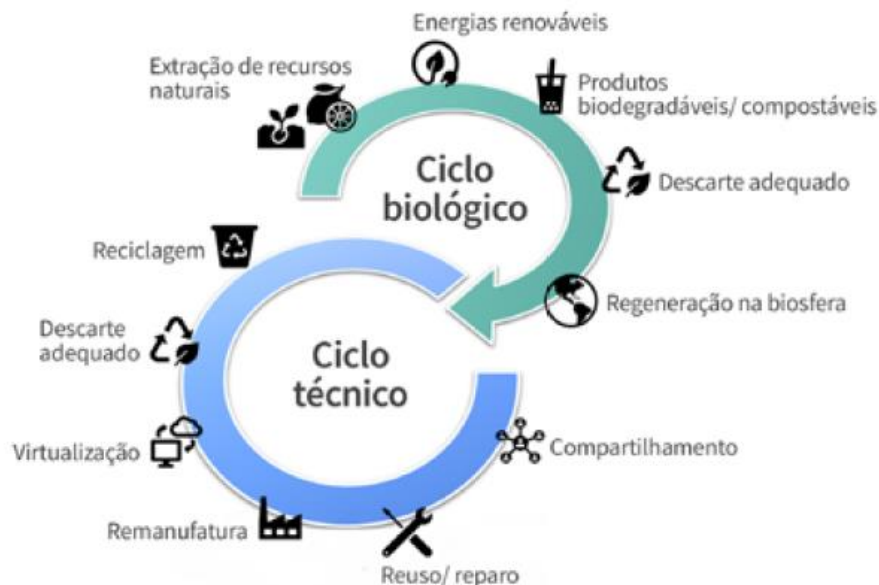


Figura 3: Ciclo biológico e ciclo técnico na Economia Circular (BORSCHIVER; 2022, p. 38).

Isto significa que a Economia Circular busca a otimização dos materiais, ampliando a vida útil dos produtos e ativos durante e após o seu uso, reduzindo o consumo de insumos e recursos não renováveis e optando pela utilização de recursos renováveis e de base biológica, estabelecendo, deste modo, a maior circulação de resíduos e subprodutos através da reutilização, seja na mesma cadeia produtiva ou para o reaproveitamento em outras indústrias (LUZ, 2017). A Economia Circular apoia-se em três princípios básicos (BORSCHIVER; TAVARES, 2022, p. 39):

- a) Preservar e aprimorar o capital natural controlando estoques finitos e equilibrando os fluxos de recursos renováveis: isso pode ser alcançado, por exemplo, com a entrega virtual de produtos e serviços, evitando o desperdício de recursos primários na fabricação dos materiais físicos.
- b) Otimizar o rendimento de recursos fazendo circular produtos, componentes e materiais no mais alto nível de utilidade o tempo todo, tanto no ciclo técnico quanto no biológico: isso significa projetar para a remanufatura, a renovação e a reciclagem, de modo que componentes e materiais técnicos continuem circulando e contribuindo para a economia.
- c) Estimular a efetividade do sistema, revelando e excluindo as externalidades negativas desde o início: esse princípio remete à necessidade de repensar o sistema produtivo desde o início e ao redesenho dos produtos, a fim de evitar a geração de resíduos e os problemas ambientais já conhecidos, como poluição, liberação de substâncias tóxicas, aquecimento global, entre outros.

De modo a classificar as ações de Economia Circular, a EMF estabeleceu quatro grandes áreas de concentração das iniciativas circulares: design circular, novos modelos de negócios, ciclo reverso, fatores viabilizadores e condições sistêmicas favoráveis (BORSCHIVER; TAVARES, 2018, p. 5).

2.1 Design circular

Também conhecido como Processo de Desenvolvimento de Produtos e Serviços, é o meio pelo qual são tomadas as principais decisões relacionadas ao ciclo de vida do produto/serviço. Para atingir este objetivo, as empresas devem compreender as necessidades e desejos da sociedade para traduzi-los não apenas em requisitos de produto, mas também em requisitos de serviço e outros valores agregados (CNI, 2018, p. 47).

A utilização de ferramentas como o *Design Thinking* (DT) pode ser interessante para a implementação de inovações baseadas em circularidade, pois o DT é focado principalmente nos valores humanos e estimula a empatia entre a equipe de projeto e as necessidades dos *stakeholders*. Isto permite gerar proposições inovadoras e com elevada capacidade de gerar impactos positivos nas cadeias circulares e nos modelos de negócio. Alguns requisitos e estratégias podem ajudar a atingir esses objetivos (CNI, 2018, p. 48):

- Projetos concebidos para promover maior durabilidade, robustez, facilidade de manutenção, múltiplos ciclos, modularidade, fácil desmontagem, utilização de materiais não tóxicos, utilização de materiais reciclados, sejam eles recicláveis ou renováveis, transformação de resíduos em insumos, extensão do ciclo de vida, entre outros;
- Design centrado no ser humano (*Human Centered Design*), que pode ser útil para envolver usuários e outras partes interessadas no processo de design;
- Biomimética, cujo objetivo é promover abordagens de design baseadas na inspiração e na aprendizagem com a natureza;
- Design Regenerativo, que visa projetar sistemas sem desperdícios, onde os resíduos de um processo são transformados em insumos para outros.

2.2 Novos modelos de negócios

Um modelo de negócios compreende as atividades executadas por uma organização que determinam como ela cria, captura e entrega valor. A transição para um modelo de negócios circular deve ser uma decisão estratégica da empresa que objetive implementar inovações visando a um menor consumo de materiais e a eliminação de resíduos na cadeia de valor (BORSCHIVER; TAVARES, 2022, p. 73).

O primeiro passo nesta direção consiste em analisar as oportunidades de inovação no modelo de negócio atual que possibilitem a criação de melhores processos, produtos e serviços com foco na circularidade e na sustentabilidade ambiental. Dentre os modelos de negócios que incluem elementos da Economia Circular, destacam-se os elencados a seguir (CNI, 2018, p. 35).

2.2.1 Produto como serviço

Nesse modelo de negócio a proposição de valor consiste em fornecer serviços através da utilização de produtos, por meio de contratos ou ofertas de soluções (CNI, 2018, p. 35). A empresa contratante terceriza as despesas de manutenção e de monitoramento de forma geral do produto ao contratar esse tipo de serviço da empresa fornecedora, tendo o objetivo de prolongar a vida útil e maximizar o desempenho do produto adquirido como serviço (BORSCHIVER; TAVARES, 2022, p. 78).

A durabilidade, a reutilização e o compartilhamento do produto são impulsionadores diretos de receitas e fomentadores da redução de custos neste modelo de negócios. Torna-se muito interessante para uma organização prolongar a vida útil de um bem físico e receber um produto no final de sua vida útil, através da logística reversa, para que possa oferecê-lo a outros clientes, e esse processo passa a ser um elemento intrínseco de seu negócio (CNI, 2018, p. 36).

2.2.2 Compartilhamento

Neste modelo de negócio a ideia central é melhorar a eficiência dos recursos já utilizados na fabricação de um produto ampliando a sua utilização (CNI, 2018, p. 37). “Também chamado de consumo colaborativo, possibilita o acesso ao produto sem que haja a necessidade de aquisição física ou troca monetária, tendo como uma finalidade a reutilização dos produtos” (BORSCHIVER; TAVARES, 2022, p. 78).

De acordo com a CNI (2018, p. 37) É possível identificar dois casos específicos de modelos de negócios enquadrados nesta categoria.

- a) Compartilhamento não monetizado: é aquele em que não há transação financeira e cuja existência depende da participação e generosidade dos membros de uma comunidade (cliente-a-cliente) para partilhar bens e serviços;
- b) Compartilhamento monetizado: é aquele em que algum tipo de acordo financeiro transacional é feito entre usuários ou organizações. Um caso típico deste modelo de negócios é o compartilhamento de veículos.

2.2.3 Matérias-primas circulares

São modelos de negócio que usam matérias-primas recicladas, recondiçionadas, regeneradas, remanufaturadas ou materiais não contaminados. A utilização destes insumos pode ocorrer tanto no ciclo biológico quanto no ciclo técnico, sendo que o processo é mais vantajoso quando são aplicados materiais puros, sem combinação com outros, o que contribui para sua reutilização (CNI, 2018, p. 39). O modelo de insumos circulares tem como objetivo aumentar a longevidade da cadeia de valor e reduzir a dependência de recursos finitos (BORSCHIVER; TAVARES, 2022, p. 79).

A utilização de insumos não tóxicos permite seu retorno seguro à biosfera no final de sua vida útil para se tornar um nutriente para a regeneração do meio ambiente no ciclo biológico. No ciclo técnico, a pureza dos insumos é fundamental para viabilizar a reciclagem e, conseqüentemente, a utilização de materiais reciclados. Além dos materiais, os componentes recuperados podem ser utilizados como insumos circulares de acordo com a capacidade da empresa de desmontar e recuperar esses ativos (CNI, 2018, p. 40).

2.2.4 Recuperação de recursos

Esse modelo de negócio tem como principal objetivo recuperar o valor e a função de produtos, componentes e materiais, incluindo atividades de ciclo reverso, como remanufatura e reciclagem em circuito fechado e aberto. A recuperação de recursos tem a vantagem de reduzir a demanda por capital natural, como água, terra e minerais, quando vistos como meios de produção, e o desperdício de componentes e materiais. Além disso, o uso em cascata de materiais e subprodutos recupera valor do que antes seria descartado (BORSCHIVER; TAVARES, 2022, p. 79).

Operacionalizar ciclos reversos e direcionar materiais e subprodutos para a próxima etapa de transformação e agregação de valor é muito importante para uma organização que almeja alcançar a sustentabilidade ambiental na sua cadeia de produção, pois este processo possibilita a recuperação de recursos no próprio ciclo produtivo ou em outros ciclos, prolongando a vida útil dos produtos ou transformando um produto em final de vida útil em outro com as mesmas características de um produto novo (CNI, 2018, p. 43).

2.2.5 Extensão de vida útil

A premissa deste modelo de negócio é aumentar a vida útil de um produto, resultando em maior valor no uso de recursos e componentes e maior valor entregue aos clientes e usuários por períodos mais longos. Desta forma, produtos ou seus componentes que antes seriam descartados, podem ter a sua vida útil prolongada através de processos de manutenção, reparo e melhoria, possibilitando sua utilização pelo maior tempo possível, reduzindo a necessidade de aplicação de capital natural e aumentando a sustentabilidade ambiental do negócio (BORSCHIVER; TAVARES, 2022, p. 80).

Além de recuperar o valor dos produtos, componentes e materiais, o prolongamento de vida útil gera receitas adicionais de serviços como manutenção, uma vez que os produtos permanecem à disposição dos usuários por períodos mais longos. Este modelo de negócio é adequado para a maioria das empresas de capital intensivo, como é o caso daquelas que operam na indústria de máquinas e equipamentos industriais (CNI, 2018, p. 45).

2.2.6 Virtualização

Na Economia Linear, os ativos físicos são a principal forma de gerar e entregar valor aos clientes. Entretanto, com o aumento da capacidade de processamento dos computadores, o advento da computação digital em nuvem e o aprimoramento das ferramentas de inteligência artificial, muitos serviços e atividades que tradicionalmente eram executados e entregues fisicamente, agora podem ser entregues de forma digital. A virtualização torna viável a uma empresa diminuir seus estoques, economizando espaço e evitando o deslocamento dos clientes até as lojas físicas (BORSCHIVER; TAVARES, 2022, p. 80).

Por meio da virtualização também é possível que a infraestrutura e os ativos físicos, em muitos casos, possam ser substituídos por serviços digitais e, conseqüentemente, o valor pode ser entregue aos usuários virtualmente. Este modelo de negócio oferece oportunidades de desmaterialização em relação aos produtos físicos, como a inexistência de uma loja física, reduzindo o uso de recursos naturais e promovendo ajustes às tendências atuais relacionadas ao mundo digital, aumentando assim o valor percebido pelos clientes (CNI, 2018, p. 46). Os exemplos

mais emblemáticos deste modelo de negócio são os serviços de *streaming* de músicas e filmes.

2.3 Ciclo Reverso

A cadeia de valor e os modelos de negócios circulares dependem de atividades operacionais reversas, cujas configurações e estratégias podem variar de acordo com o produto, localização do empreendimento e posição na cadeia produtiva. O ciclo reverso trata das ações que viabilizam estratégias de reuso, remanufatura, reparo/manutenção ou reciclagem no decorrer da cadeia de valor do produto. Isto significa que existem diversas formas de recuperar produtos com diferentes níveis de reutilização, tais como (CNI, 2018, p. 52):

- Remanufatura: destinada a recuperar produtos com a mesma qualidade e garantia de um produto novo;
- Recondicionamento: consiste em operações simples de reparação de um produto com o objetivo de adequá-lo a novas necessidades;
- Manutenção: atividades destinadas a prolongar a vida útil de um produto;
- Reciclagem: atividades destinadas a recuperar materiais.

Nas operações de ciclo reverso os produtos seguem um caminho oposto ao da fabricação e entrega ao mercado consumidor. Os ciclos reversos podem ser compostos por etapas de manutenção, logística reversa, desmontagem, reprocessamento, montagem e redistribuição (CNI, 2018, p. 52). Outra característica importante dos ciclos reversos é a possibilidade de combinação entre diferentes estratégias de acordo com os materiais e componentes dos produtos.

No caso de equipamentos eletrônicos, por exemplo, diferentes estratégias podem ser definidas com base na análise das características de qualidade do produto e de seus componentes. Desta forma, a remanufatura do equipamento pode ser associada com a manutenção ou recondicionamento de determinados componentes e descarte de peças inservíveis para reciclagem (CNI, 2018, p. 52).

2.4 Fatores viabilizadores e condições sistêmicas favoráveis à Economia Circular

Correspondem aos projetos colaborativos entre instituições educacionais, governos e/ou organizações (BORSCHIVER; TAVARES, 2018, p. 5). Com a adoção

de modelos de negócios circulares, a cadeia de valor das empresas passa a ser organizada em torno da lógica da Economia Circular. Nesse sentido, as políticas públicas têm um papel relevante no estímulo à inversão de ciclos e à inovação na concepção circular e nos modelos de negócio. Algumas possibilidades envolvem a redução da tributação sobre a utilização de recursos secundários, fontes renováveis, matérias-primas e mão-de-obra.

Outro fator viabilizador está relacionado aos padrões e normas de design que podem apoiar os esforços governamentais para promover práticas competitivas justas que beneficiem os produtos circulares. A maior disponibilidade e competitividade em termos de custos dos materiais de base circular neutraliza a vantagem comercial dos materiais de base linear. Com a remoção dessa barreira, os produtores conseguem inovar mais livremente com materiais circulares (HARTLEY; VAN SANTEN; KIRCHHERR, 2020, p. 3).

Em 2020, a França adotou uma Lei ambiciosa para moldar a transição de todo o sistema para uma Economia Circular. A denominada “Lei Antidesperdício” francesa incentiva as empresas de vários setores, os municípios e os cidadãos a eliminar os resíduos e a adotar práticas mais circulares. Dentre várias medidas, foi introduzida, de forma inédita, a proibição de destruição de mercadorias não vendidas (EMF, 2021, p. 3).

Além disso, para manter os produtos em seu valor mais alto por mais tempo e viabilizar a logística reversa, foi criado um índice de reparabilidade de produtos eletroeletrônicos, que define uma pontuação de um até dez que visa demonstrar o quão reparável é um produto. O índice é calculado com base na disponibilidade de peças de reposição, documentos técnicos e na facilidade de desmontagem do produto (EMF, 2021, p. 4).

2.5 A logística reversa no contexto da Economia Circular

A logística reversa pode ser compreendida como um novo modelo de logística empresarial que objetiva planejar, operar e controlar o fluxo de bens de pós-venda, garantindo o retorno dos produtos ou seus resíduos após o uso ao ciclo produtivo. Nesse modelo de negócio, o consumidor assume um papel ativo no ciclo de vida do produto, garantindo a separação adequada e recolhimento de materiais recicláveis, de forma a promover sua reinserção na cadeia produtiva (BORSCHIVER; TAVARES, 2022, p. 97).

A logística reversa pode ainda ser definida como “o processo de planejar, implementar e controlar o fluxo eficiente e econômico de matérias-primas, estoque em processo, produtos acabados e informações relacionadas, desde o ponto de consumo até o ponto de origem com a finalidade de recapturar valor ou descarte adequado”(GOVINDAN; SOLEIMANI; KANNAN, 2015, p. 2).

Uma cadeia de suprimento direta, na sua forma clássica, é uma combinação de processos para atender às solicitações dos clientes e inclui todas os agentes possíveis, como fornecedores, fabricantes, transportadores, armazéns, varejistas e os próprios clientes. A cadeia reversa deve incluir estes mesmos agentes, porém é percorrida no sentido inverso, ou seja, dos consumidores para os fornecedores ou fabricantes (GOVINDAN; SOLEIMANI; KANNAN, 2015, p. 2).

Se forem consideradas, simultaneamente, as cadeias de suprimento direta e reversa, o resultado constituirá uma cadeia de suprimento em circuito fechado (*Closed-Loop Supply Chain*). A figura 4 ilustra uma cadeia logística genérica em circuito fechado (GOVINDAN; SOLEIMANI; KANNAN, 2015, p. 2).

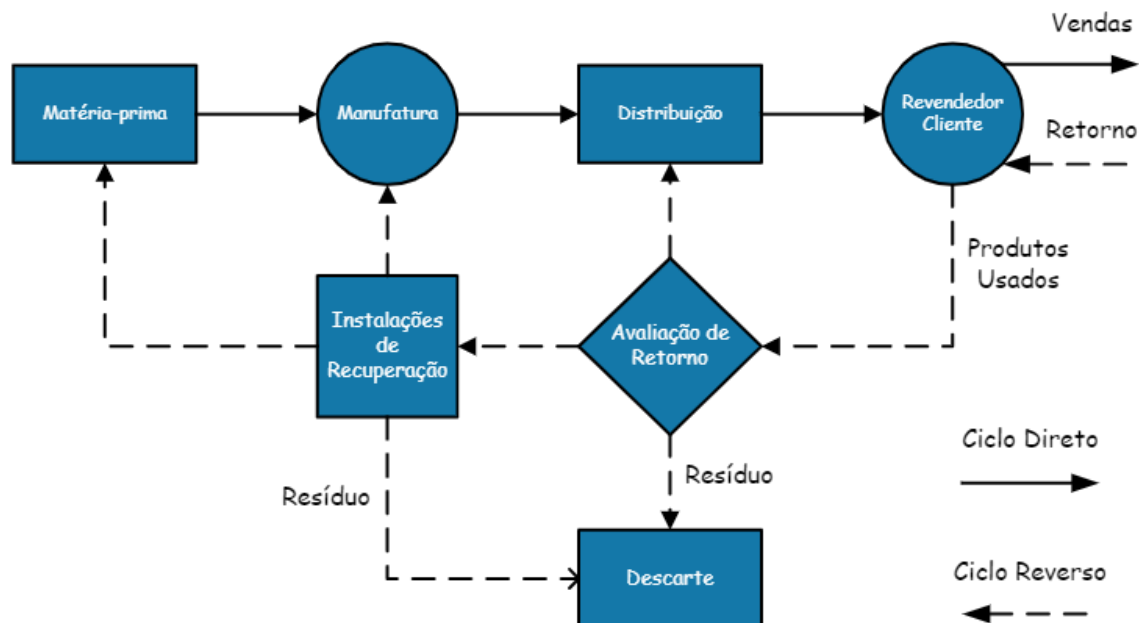


Figura 4: Cadeia logística em circuito fechado (GOVINDAN; SOLEIMANI; KANNAN, 2015, p. 2).

As legislações governamentais de alguns países têm obrigado os fabricantes a cuidar dos seus produtos em fim de vida. Na União Europeia, por exemplo, a diretiva relativa a resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (*Waste Electrical and Electronic Equipment - WEEE*), Diretiva 2002/96/CE, tornou-se Lei europeia em 2003, contendo os requisitos obrigatórios sobre recolhimento,

reciclagem e recuperação para todos os tipos de produtos elétricos, com uma taxa mínima de quatro quilogramas per capita da população por ano (GOVINDAN; SOLEIMANI; KANNAN, 2015, p. 1).

No Brasil, a logística reversa foi instituída por meio da Lei Federal nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Esta legislação conceituou a logística reversa como um “instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada” (artigo 3º, inciso XII da Lei 12.305/2010).

A PNRS estabeleceu a obrigatoriedade da logística reversa para os seguintes produtos: os agrotóxicos, seus resíduos e embalagens; as pilhas e baterias; os pneus; os óleos lubrificantes, seus resíduos e embalagens; as lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista; produtos eletroeletrônicos e seus componentes.

Para estas cadeias produtivas, os fabricantes, os importadores, os distribuidores e os comerciantes ficam responsáveis pela realização da logística reversa no limite da proporção dos produtos que colocarem no mercado interno, conforme metas progressivas, intermediárias e finais estabelecidas no instrumento que determinar a implementação da logística reversa (artigo 14º, § 1º do Decreto nº 10.936/2022).

O Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020, regulamenta logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes. O art. 4º estabelece que o objeto do Decreto é a estruturação, a implementação e a operacionalização de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico existentes no mercado interno.

Fica evidenciado que, neste sistema, a participação dos consumidores é fundamental, sendo destes a responsabilidade de (art. 31 do Decreto nº 10.240/20):

- a) Segregar e armazenar os produtos eletroeletrônicos separadamente das outras frações de resíduos sólidos, para a manutenção de sua integridade física e prevenção de riscos à saúde humana ou de danos ao meio ambiente;
- b) Remover, previamente ao descarte, as informações e os dados privados e os programas em que eles estejam armazenados nos produtos eletroeletrônicos,

discos rígidos, cartões de memória e estruturas semelhantes, quando existentes; e

- c) Descartar os produtos eletroeletrônicos de forma adequada e desligados, nos pontos de recebimento específicos do sistema de logística reversa, observados os procedimentos e as orientações relativas aos descartes constantes dos manuais dos produtos, do manual operacional básico ou dos demais meios de comunicação previstos.

Já os produtos eletroeletrônicos de uso corporativo e aqueles utilizados em processos produtivos estão sujeitos ao Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS), conforme previsto no art. 20 da Lei 12.305/2010 (PNRS). São obrigados a elaborar o PGRS os geradores de:

- i. Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico;
- ii. Resíduos industriais (os gerados nos processos produtivos e instalações industriais);
- iii. Resíduos de serviços de saúde;
- iv. Resíduos de mineração;
- v. Os estabelecimentos comerciais e de prestação de serviços que gerem resíduos perigosos ou que gerem resíduos que, mesmo caracterizados como não perigosos, por sua natureza, composição ou volume, não sejam equiparados aos resíduos domiciliares pelo poder público municipal;
- vi. As empresas de construção civil;
- vii. Resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- viii. Os responsáveis por atividades agrossilvopastoris.

Deve-se notar que, pela análise da legislação, não fica evidenciada qual tratativa deve ser dada aos ativos utilizados no sistema produtivo das empresas quando estes são caracterizados como inservíveis ou em final de vida útil. Evidentemente, esta deveria ser uma preocupação do poder público, além do que, seria interessante, por exemplo, a adoção de medidas fiscais incentivadoras à adoção da extensão de vida útil destes ativos, tais como isenção ou redução de impostos (renúncia fiscal).

A extensão do sistema de reversibilidade para outros produtos ficou prevista, de forma não obrigatória, mediante a realização de acordos setoriais ou

termos de compromisso (AZEVEDO, 2015, p. 5), cuja regulamentação está prevista no Decreto Federal nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022.

Desta forma, fica nítido que, na sua função de estabelecer as regras gerais, a Lei deveria ter disposto sobre a obrigatoriedade da demarcação da logística reversa para todos os tipos de resíduos gerados em quaisquer tipos de atividades econômicas, deixando para o regulamento a tarefa de estabelecer as minúcias procedimentais (FRANÇA; SOUZA; MUNIZ, 2022, p. 6). Muito embora tenha deixado diversas lacunas, o PNRS, sem dúvida, trouxe muitos avanços para a temática dos resíduos sólidos no Brasil.

O supracitado Decreto nº 10.936/2022, que regulamenta a Lei nº 12.305/2010, por exemplo, instituiu o Programa Nacional de Logística Reversa – PNLR, integrado ao Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos – SINIR e ao Plano Nacional de Resíduos Sólidos – PLANARES. O PNLR é instrumento de coordenação e de integração dos sistemas de logística reversa e tem como objetivos (artigo 12º, § 1º do Decreto nº 10.936/2022):

- I. Otimizar a implementação e a operacionalização da infraestrutura física e logística;
- II. Proporcionar ganhos de escala; e
- III. Possibilitar a sinergia entre os sistemas.

Um aspecto social relevante do PNLR é que as cooperativas e as associações de catadores de materiais recicláveis poderão integrar o sistema de logística reversa, desde que sejam legalmente constituídas, cadastradas e habilitadas. Porém, essa participação será formalizada por meio de instrumento legal firmado entre a cooperativa ou a associação e as empresas ou entidades gestoras para prestação dos serviços, na forma prevista na legislação (artigo 14º, § 3º do Decreto nº 10.936/2022).

Vale destacar que o PNLR instituiu o Manifesto de Transporte de Resíduos – MTR, documento autodeclaratório e válido no território nacional, emitido por meio do SINIR, para fins de fiscalização ambiental dos sistemas de logística reversa (artigo 15º, § 1º do Decreto nº 10.936/2022). Os geradores de resíduos sujeitos ao PGRS (Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos), transportadores, destinadores e armazenadores temporários devem cadastrar a movimentação dos

resíduos sólidos no sistema SINIR+ em módulo específico destinado ao registro das informações do MTR².

Além das informações sobre o transporte de resíduos, os responsáveis pelos sistemas de logística reversa integrarão e manterão atualizadas as seguintes informações, entre outras solicitadas pelo Ministério do Meio Ambiente: i) a localização de pontos de entrega voluntária; ii) os pontos de consolidação; e iii) os resultados obtidos, consideradas as metas estabelecidas (artigo 15º, § 2º do Decreto nº 10.936/2022).

O Sistema de Logística Reversa³ disponibilizado no âmbito do SINIR+ possibilita que fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes declarem estas informações, sendo a entidade gestora responsável pelo cadastramento e reporte dos respectivos CNPJ. A tabela 1 contém o resumo das informações sobre os sistemas de logística reversa implantados de acordo com o Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos de 2019⁴.

Tabela 1: Sistemas de logística reversa cadastrados no SINIR+ até 2019.

Sistema	Unidade	Resultado	Quantidade de PEVs	Quantidade de municípios atendidos	População atendida	Entidade Gestora/Responsável	Quantidade de empresas associadas
Baterias chumbo Ácido	t	275.250,00	49.919	4.456	-	Iber	166
Defensivos agrícolas, seus resíduos e embalagens	t	45.563,00	411	221	-	inPEV	112
Eletroeletrônicos e seus componentes	t	332,00	228	70	5.400.000	Green Eletron	59
Embalagens de aço	t	8.000,00	94	36	45.815.161	Prolata	52
Embalagens em geral	t	281.110,00	895	277	93.000.000	Coalizão	1.647
Embalagens plásticas de Óleo lubrificante	t	5.036,00	177	4.310	172.320.643	Instituto Jogue Limpo	45
Lâmpadas fluorescentes	t	644,16	1.930	429	170.219.171	Reciclus	91
Óleo lubrificante usado ou contaminado	litros	489.419.000,00	-	4.249	-	Instituto Jogue Limpo	-
Pilhas e Baterias	t	155,49	1.648	560	41.200.000	Green Eletron	27
Pneus inservíveis	t	419.220,21	1.149	1	142.058.285	Reciclanip	12

² Disponível em: <<https://sinir.gov.br/sistemas/mtr/>>. Acesso em: 30 dez. 2023.

³ Disponível em: <<https://sinir.gov.br/sistemas/logistica-reversa/>>. Acesso em: 30 dez. 2023.

⁴ Disponível em: <<https://sinir.gov.br/relatorios/nacional/>>. Acesso em: 30 dez. 2023.

Como pôde ser visto, a regulamentação da logística reversa no Brasil avançou significativamente. A criação de um sistema informatizado de controle da coleta de resíduos para reciclagem e do MTR no âmbito do PNLR foram marcos importantes para o ciclo reverso de produtos de alguns setores produtivos.

Entretanto, a legislação poderia ter sido ampliada para que a obrigatoriedade do ciclo reverso alcançasse outros setores econômicos, principalmente quando se verifica que apenas 19 estados possuem planos de gestão de resíduos sólidos cadastrados de acordo com a PNRS e que o índice nacional de recuperação de resíduos (IRR) é de apenas 1,67% conforme dados do Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos referente ao ano de 2019.

Sabe-se que, muito embora as empresas de grande porte venham demonstrando comprometimento com os aspectos de ESG em seus balanços, é atribuição precípua do Estado determinada pela Constituição Federal zelar para que todos tenham direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado preservando-o para as presentes e futuras gerações (art. 225 da CF).

2.6 A Economia Circular no âmbito do setor de energia elétrica

Conforme dados do Balanço Energético Nacional (BEN-2023), ano base de 2022, o Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica que participou com 61,9% da oferta interna de energia elétrica em 2022 (figura 5).

As fontes renováveis representaram 88% da oferta interna de eletricidade no Brasil, sendo resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável (EPE, 2023, p. 13). A geração elétrica a partir de fontes não renováveis representou 12,3% do total nacional, contra 22,6% em 2021 (EPE, 2023, p. 11).

Quanto à matriz energética brasileira o cenário é preocupante, pois verifica-se pelo BEN-2023 que a produção de energia primária é apenas 40,5% de fontes renováveis contra 59,5% de fontes não renováveis (figura 6), com destaque para o petróleo com uma produção aproximada de 156 milhões de toneladas, enquanto todas as fontes renováveis somadas produziram aproximadamente 143 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep) de energia (EPE, 2023, p. 18).

A autoprodução de energia (APE) agrega as mais diversas instalações industriais que produzem energia para consumo próprio, em grande parte utilizando

resíduos e rejeitos do próprio processo produtivo (*waste to energy*), a exemplo dos setores de papel e celulose, siderurgia, açúcar e álcool, química, entre outros. A autoprodução em 2022 participou com 18,6% do total de energia produzida, atingindo um montante de 126 TWh. Desse total, 73,7 TWh (58,5%) não foram injetados na rede, ou seja, produzidos e consumidos pela própria instalação geradora, sendo 40,4 TWh (54,8%) de fontes renováveis, ver figuras 7 e 8 (EPE, 2023, p. 114).

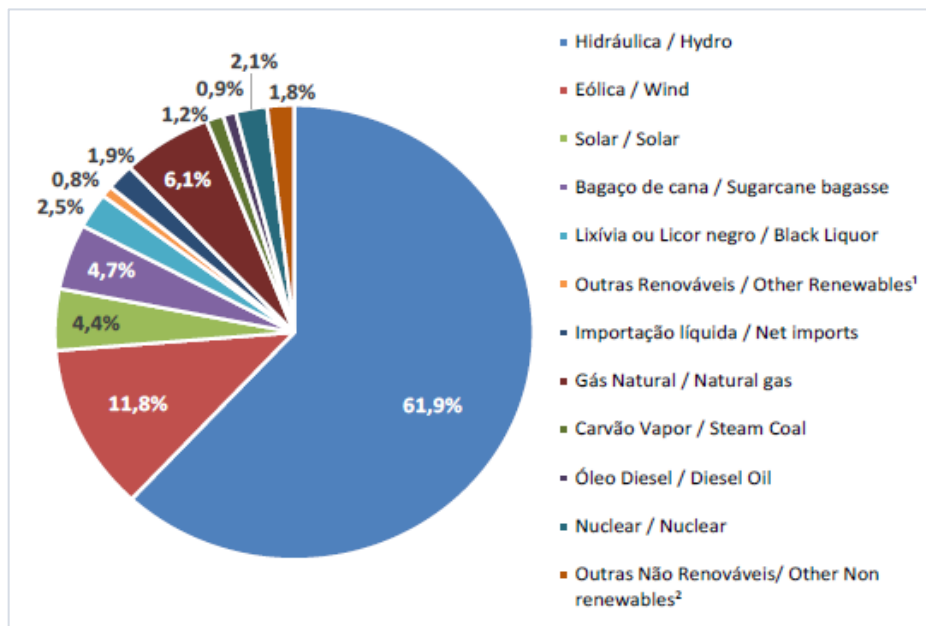


Figura 5: Oferta interna de energia elétrica por fonte (EPE, 2023, p. 12).

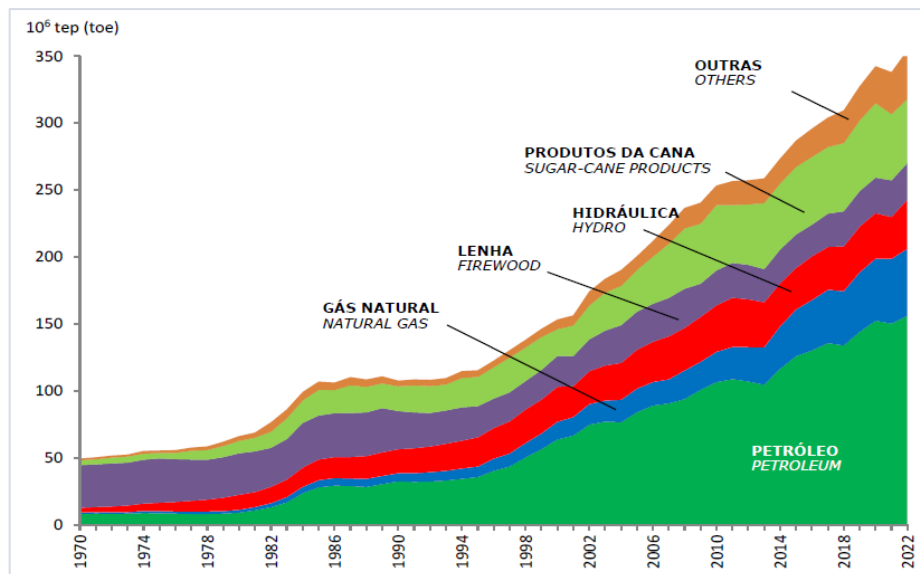


Figura 6: Produção de energia primária (EPE, 2023, p. 18).

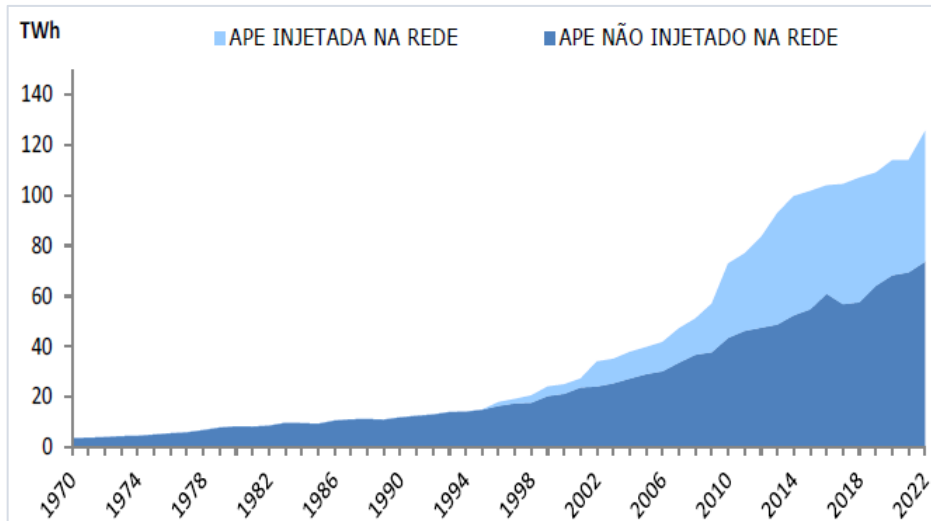


Figura 7: Autoprodução de energia elétrica até 2022 (EPE, 2023, p. 114).

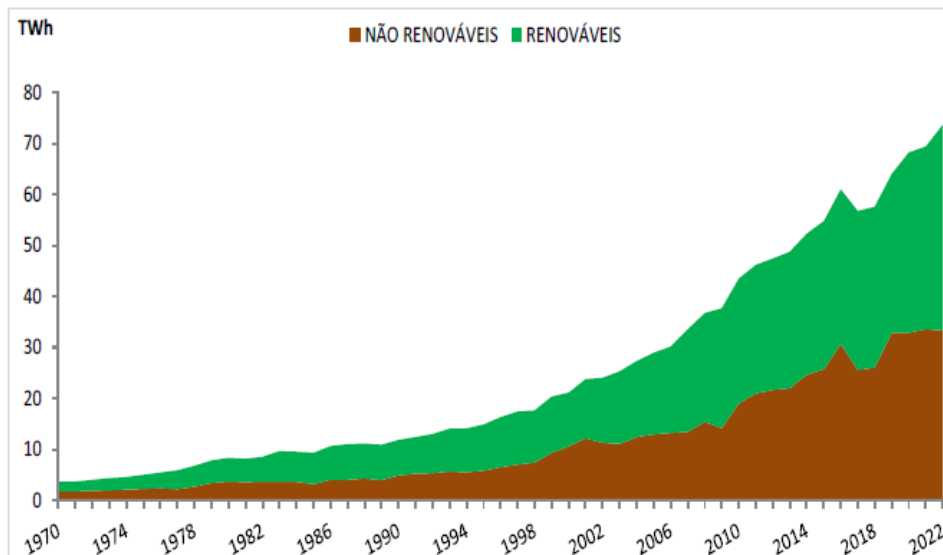


Figura 8: Autoprodução de energia elétrica não injetada na rede até 2022 (EPE, 2023, p. 114).

A autoprodução de energia elétrica a partir resíduos e rejeitos da produção é um caso clássico de aplicação da Economia Circular no setor de energia. Além de fomentar a sustentabilidade ambiental evitando que os resíduos sejam descartados no ambiente, os excedentes de energia gerados podem ser comercializados no mercado livre de energia elétrica, ou Ambiente de Contratação Livre (ACL), que é o ambiente em que os consumidores podem escolher livremente seus fornecedores de energia. Neste sentido, a autoprodução de energia pode ser um negócio economicamente e ambientalmente vantajoso.

A empresa UNIPAR, por exemplo, produtora de cloro e soda, que é intensiva em consumo de energia elétrica, entrou no mercado de autoprodução por meio de contratos de parcerias com as geradoras AES Brasil e Atlas Renewable

Energy. Com a primeira, a Unipar associou-se para a construção de dois parques eólicos, um na Bahia e outro no Rio Grande do Norte, e com a segunda, um parque solar em Minas Gerais⁵ (SANTOS, 2023). Esta modalidade de APE é denominada de PPA (*Power Purchase Agreement*), que nada mais é do que um contrato de negociação de energia de longo prazo envolvendo um produtor de energia renovável e um grande consumidor do mercado livre (BANCO VOTORANTIN, 2023).

Basicamente, existem dois tipos de PPA, os quais variam de acordo com o ponto de injeção da energia. O primeiro é o *onsite*, no qual a captação de energia é feita a partir de uma instalação nas dependências do cliente e que é conectada à sua rede. O segundo é o PPA *offsite*, no qual o contrato é associado a um parque eólico, instalação fotovoltaica ou qualquer outra forma de geração de energia renovável fisicamente separada da instalação consumidora (BANCO VOTORANTIN, 2023). Neste caso a energia gerada é injetada nas redes de distribuição e/ou de transmissão de energia elétrica, onde há a incidência de tarifas por uso da infraestrutura de transporte da energia. Outras empresas que adotam a modalidade *offsite* são a mineradora Anglo American, a petroquímica Braskem, a siderúrgica ArcelorMittal e a química Dow.

Outro exemplo de Economia Circular aplicada ao setor elétrico é o serviço de logística reversa disponibilizado pela empresa TDM Reverse, uma empresa pertencente ao conglomerado brasileiro TDM, que realiza a destinação de equipamentos elétricos em final de vida útil. A empresa executa a desmontagem do equipamento, segregação dos materiais, transporte e destinação final adequada dos resíduos de acordo com a legislação ambiental vigente, apresentando aos clientes um relatório com os Certificados de Destinação Final (CDF)⁶.

Já a WEG executa o conserto, reforma e repotenciação de transformadores de força, efetuando uma avaliação completa das condições de operação do transformador, incluindo riscos operacionais, capacidade de suportar sobrecargas e estimativa de vida útil residual. Normalmente, esse tipo de reparo reaproveita o tanque e o núcleo do transformador, que são fabricados utilizando materiais como ferro e silício. Além da redução de custos, esta ação proporciona: i) que estes recursos não sejam extraídos do meio ambiente; ii) a economia de energia

⁵ Disponível em: <<https://valor.globo.com/publicacoes/especiais/mercado-livre-de-energia/noticia/2023/07/24/grandes-consumidores-optam-pela-autoproducao.ghtml>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

⁶ Disponível em: <<https://tdmservicos.com/tdm-reverse/>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

com a manufatura da matéria-prima e a fabricação do tanque e do núcleo, fazendo com que estes materiais permaneçam na cadeia produtiva por mais tempo, que é uma premissa eminentemente circular.

A WEG tem como premissa o fato de que os transformadores mais antigos, quase sempre, permitem o reprojeto com aumento de potência, tendo como principal benefício o custo inferior em relação ao preço de um equipamento novo⁷. Nesses casos há ainda o ganho de energia que pode ser entregue pelo transformador para o atendimento do consumo.

Este tipo de atividade nem sempre é reconhecida pelas empresas e seus acionistas como uma forma de Economia Circular, nem tampouco, o aspecto ambiental é considerado para a tomada de decisão entre a reforma e a compra de um transformador novo. Entretanto, conforme será abordado no decorrer deste trabalho, a reforma de transformadores de potência pode ser agregada como geração de valor para a organização através de um viés de sustentabilidade ambiental a ser incluído nos relatórios de ESG (*Environmental, Social and Governance*) das empresas com foco nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, mais especificamente do objetivo 13 que trata das ações contra a mudança global do clima.

⁷ Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Servi%C3%A7os/Reforma-e-Repotencia%C3%A7%C3%A3o-de-Transformadores/Reforma-e-Repotencia%C3%A7%C3%A3o-de-Transformadores-/p/MKT_WTD_SERVICE>. Acesso em: 20 jan. 2024.

3 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

O transformador de potência é uma máquina de grande porte essencial para viabilizar o transporte da energia elétrica entre as plantas de geração e os consumidores finais. A energia elétrica é um instrumento estratégico para o desenvolvimento e a expansão de atividades comerciais, industriais e de serviços. E, por conseguinte, é um insumo indispensável para o crescimento e desenvolvimento econômico de qualquer nação.

De acordo com a norma ABNT 5356-1, o transformador de potência é um equipamento estático com dois ou mais enrolamentos que, por indução eletromagnética, transforma um sistema de tensão e corrente alternadas em outro sistema de tensão e corrente, de valores geralmente diferentes, mas à mesma frequência, com o objetivo de transmitir potência elétrica (ABNT, 2007, p. 3). Ou seja, um transformador consiste em dois sistemas de enrolamentos acoplados magneticamente e é utilizado como um conversor de tensão e corrente para energia elétrica (CIGRE, 2022, p. 40).

3.1 Breve histórico

O primeiro transformador da história foi desenvolvido no início do século XIX pelo cientista Michael Faraday que, através de um experimento prático em 1831, descobriu que enrolando duas bobinas separadas eletricamente entre si sobre um anel de ferro e submetendo uma delas a uma tensão em corrente contínua fornecida por uma bateria voltaica, era induzida uma tensão na outra bobina que poderia ser detectada pelo movimento da agulha de uma bússola. Porém, o fenômeno só era observado por um curto intervalo de tempo, quando se conectava ou se desconectava a bateria (DIAS; MARTINS, 2004).

Mediante o estudo deste fenômeno, Faraday percebeu que, para que a tensão induzida se tornasse constante, era necessário variar o fluxo magnético entre ambas as bobinas, ou seja, variar o campo magnético aplicado à primeira bobina. Com base neste experimento, Michael Faraday complementou a descoberta do eletromagnetismo feita por Orsted, demonstrando a existência de um fenômeno inverso (produção de efeitos elétricos pelo magnetismo) e pavimentou o caminho para o desenvolvimento do transformador elétrico (DIAS; MARTINS, 2004).

Por volta de 1876 iniciou-se a histórica disputa entre Thomas Edison e George Westinghouse Jr. pelos métodos de transmissão de energia em corrente contínua ou corrente alternada. Edison, em 1882, coloca em funcionamento um sistema de corrente contínua em Nova York. Westinghouse, em 1885, compra os direitos da patente para construção de transformadores de corrente alternada de Lucien Galard e de John Dixon Gibbs e incube William Stanley da missão de desenvolver o primeiro modelo comercial do transformador (figura 9) (BATTAGLIN; BARRETO, 2011).

O transformador possibilitava a elevação das tensões em corrente alternada, ao contrário da corrente contínua de Edison, diminuindo as perdas na transmissão de energia elétrica (PAULINO, 2011). Com o passar do tempo e a evolução da ciência dos materiais, o projeto do transformador foi sendo aperfeiçoado, os enrolamentos foram rearranjados para melhorar o seu desempenho, foi desenvolvido o uso do óleo como meio isolante e refrigerante, e as quantidades de ferro e cobre empregadas na construção do transformador foi reduzida tornando-o comercialmente viável (GUIMARÃES, 2010).

A figura 10 mostra a evolução do projeto de transformadores de distribuição fabricados pela General Electric entre 1886 e 1936.

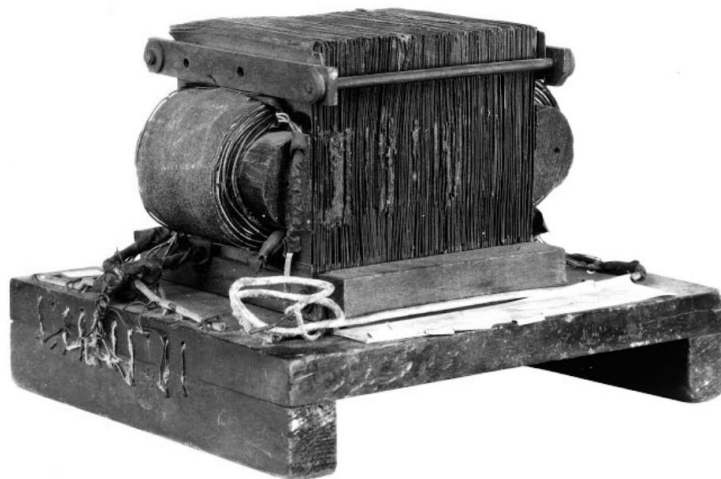


Figura 9: Primeiro transformador de William Stanley⁸.

⁸ Museu de Inovação e Ciência, Schenectady, NY (Disponível em: <https://artsandculture.google.com/asset/william-stanley-s-first-transformer-general-electric-company/7gFaZxHN2ieQ_g?hl=pt>. Acesso em: 25 mai. 2023.



Figura 10: Evolução dos transformadores de distribuição da General Electric, de 1886 a 1936⁹.

3.2 Classificação dos transformadores de potência

Existem na literatura diversos critérios para a classificação dos transformadores de potência. Os principais seguem listados abaixo (ALIANI; ROMERO, 2014, p. 595); (JORDÃO, 2002, p. 35):

- a) De acordo com a conexão elétrica entre primário e secundário: transformador ou autotransformador;
- b) De acordo com o número de fases: monofásico ou trifásico;
- c) De acordo com o número de enrolamentos: dois enrolamentos ou três enrolamentos;
- d) De acordo com o tipo de ligação dos enrolamentos: ligação em estrela (ligação Y), ligação em triângulo ou ligação delta (ligação D) ou ligação em ziguezague (ligação Z);
- e) De acordo com o arranjo núcleo-enrolamentos: núcleo envolvido (nuclear) ou núcleo envolvente (encouraçado);

⁹ Museu de Inovação e Ciência, Schenectady, NY (Disponível em: <https://artsandculture.google.com/asset/evolution-of-ge-transformers-from-1886-1936-general-electric-company/2gFfsHRx_RoXQQ?hl=pt>. Acesso em: 25 mai. 2023.

- f) De acordo com o meio de refrigeração: ar, óleo vegetal isolante (OVI), óleo mineral isolante (OMI) ou óleo de silicone;
- g) De acordo com o tipo de resfriamento: óleo natural-ar natural (ONAN), ar forçado-óleo natural (ONAF), ar forçado-óleo direcionado (ODAF), etc.;
- h) De acordo com a regulação de tensão: relação fixa, regulação variável em carga ou regulação variável sem carga;
- i) De acordo com a aplicação: transformadores de geração, transformadores de transmissão ou transformadores de distribuição.

3.3 Anatomia e fisiologia do transformador de potência

De acordo com a literatura especializada, o transformador de potência imerso em óleo isolante, em termos construtivos, pode ser dividido em quatro partes principais (CIGRE, 2022, p. 39); (TEIXEIRA, 2022, p. 34):

- Parte ativa, que executa a função principal do transformador e consiste em núcleo, enrolamentos e isolamento sólido e líquido;
- Buchas, que permitem a passagem da energia através do tanque para a parte ativa;
- Tanque, que contém a parte ativa e o óleo isolante; e sistema de refrigeração para gerenciamento de temperatura;
- Comutador, um dispositivo que tem a função de ajustar a tensão em um dos enrolamentos do transformador com a rede conectada.

Além dos componentes principais listados acima, um transformador de potência, normalmente, requer a utilização de alguns dispositivos de proteção, controle, supervisão e monitoramento. Esses acessórios podem ser instalados em gabinetes montados nas paredes do tanque do transformador ou separadamente.

Mais recentemente têm sido desenvolvida uma gama de dispositivos inteligentes que executam o monitoramento em tempo real de diversas grandezas (elétricas, mecânicas, químicas etc.) que auxiliam na gestão da manutenção e na avaliação do ciclo de vida do transformador.

A figura 11 ilustra as partes construtivas de um transformador de potência imerso em óleo isolante.

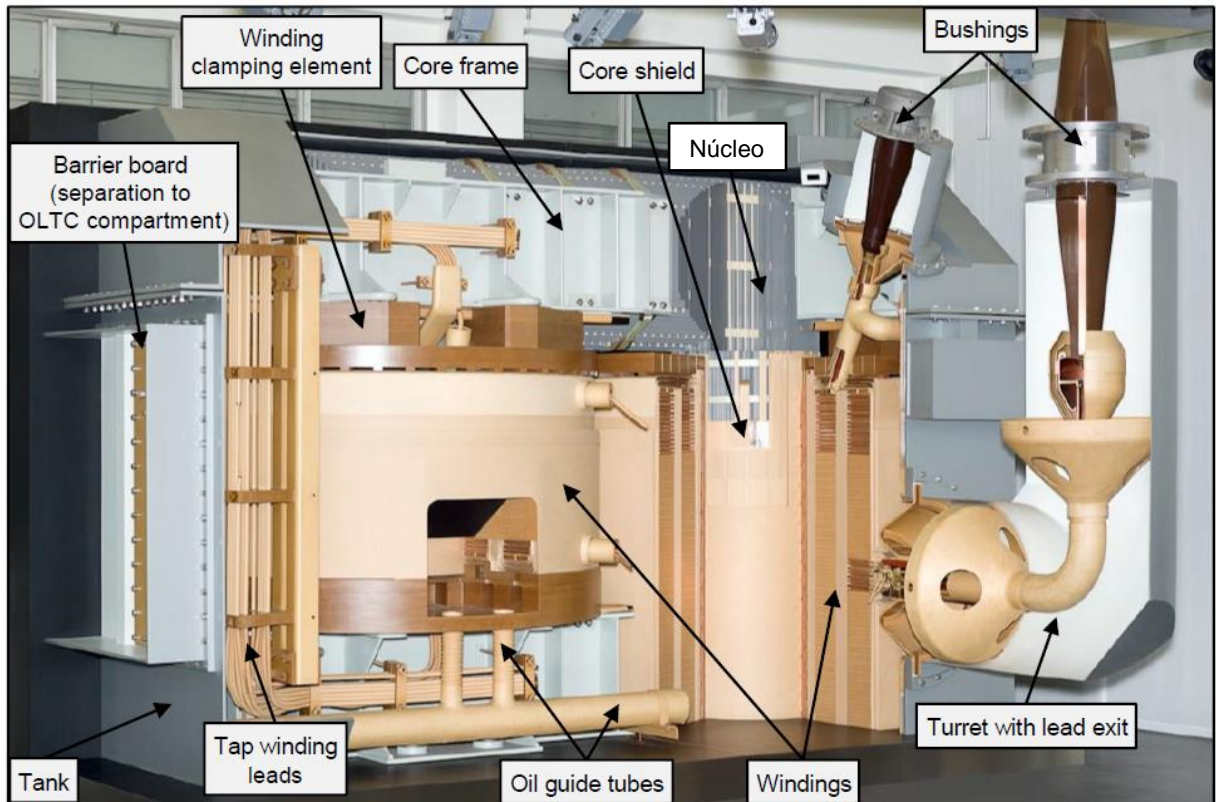


Figura 11: Vista interna de um transformador de potência (CIGRE, 2022, p. 39).

3.3.1 Parte ativa

A parte ativa de um transformador de potência consiste, basicamente, dos enrolamentos, do núcleo magnético e do isolamento sólido e líquido (ABB, 2004, p. 77), (CIGRE, 2022, p. 39). Além disso, a parte ativa pode conter outros elementos, tais como capacitores, indutores ou para-raios, que podem ser utilizados, dentre outras funções, para proteger os enrolamentos (CIGRE, 2022, p. 40).

3.3.1.1 Enrolamentos

Os enrolamentos de um transformador de potência são fabricados com materiais que possuem boa condutibilidade elétrica, tais como cobre ou alumínio, de modo a reduzir perdas térmicas por efeito Joule. A depender do valor nominal da corrente elétrica a ser transportada, os condutores podem ser sólidos, trançados ou paralelos. A forma do condutor dos enrolamentos é geralmente retangular para utilizar o espaço disponível de forma eficaz (ABB, 2004, p. 80). Para obter uma distribuição de corrente uniforme em condutores paralelos, o condutor transposto

contínuo (CTC) pode ser utilizado em grandes transformadores de potência (CIGRE, 2022, p. 40).

a) Conexões principais dos enrolamentos

A depender do tipo construtivo do enrolamento, podem ser necessárias conexões entre os diversos condutores das espiras. Comumente, estas conexões são feitas mediante um criterioso processo de crimpagem ou solda. Já as ligações entre o enrolamento de regulação e o comutador (figura 12) e entre os enrolamentos principais e as buchas, normalmente, são feitas por meio de conexões removíveis com terminais do tipo olhal e parafusos, com o objetivo de facilitar a desmontagem para manutenção ou transporte, bem como possibilitar uma eventual substituição destes componentes caso seja necessário (CIGRE, 2022, p. 41).



Figura 12: Conexões do comutador de um transformador de potência (Acervo do autor).

b) Espaçadores

Os espaçadores de condutores nos enrolamentos têm duas funções principais: a) aumentar a distância entre potenciais de alta tensão (finalidade de isolamento); e b) fornecer um canal de circulação de óleo para resfriamento. A separação pode ser feita na direção axial com tiras e na direção radial com espaçadores. Estes elementos de separação são tipicamente fabricados em madeira e em algumas aplicações especiais podem ser confeccionados em fibra de vidro

(CIGRE, 2022, p. 42). A figura 13 mostra alguns exemplos de espaçadores utilizados na fabricação de transformadores de potência.



Figura 13: Espaçadores de madeira utilizados em transformadores (CIGRE, 2022, p. 42).

c) Elementos de fixação e suporte

Os enrolamentos de um transformador de potência precisam ser montados ao redor do núcleo magnético. Devido às forças de Lorentz¹⁰ os enrolamentos acoplados magneticamente tendem a trabalhar um contra o outro. O enrolamento externo se expandirá enquanto o enrolamento interno será comprimido. Enrolamentos montados assimetricamente irão se deslocar axialmente (CIGRE, 2022, p. 42).

Desta forma, para evitar qualquer movimento dos condutores, os enrolamentos são prensados após a sua montagem por meio de vigas metálicas localizadas na parte superior e inferior da janela do núcleo como pode ser visto na figura 14. Os elementos de prensagem aplicados entre as bobinas e as vigas são normalmente feitos de papelão laminado ou madeira e, em casos especiais, de fibra de vidro (CIGRE, 2022, p. 43).

¹⁰ A Lei de Lorentz define que as forças eletromagnéticas nos enrolamentos dos transformadores são resultado da interação entre a corrente que circula por eles e o fluxo magnético de fuga nos quais estão imersos (MEDEIROS et al., 2021, p. 1).



Figura 14: Sistema de fixação e suporte da parte ativa de um transformador monofásico (Acervo do autor).

3.3.1.2 Núcleo magnético

O núcleo magnético de um transformador de potência trifásico é constituído por três colunas conectadas magneticamente no topo e na base por meio de jugos (vigas), onde o espaço disponível para os enrolamentos é chamado de janela (ver figura 15). As colunas e os jugos superior e inferior são construídos mediante o empilhamento de chapas de aço laminadas de pequena espessura (alguns décimos de milímetro) que são projetadas para obter baixas perdas e baixa corrente de magnetização. As chapas de aço precisam ser isoladas umas das outras para evitar a circulação de correntes parasitas, e são prensadas, coladas ou envolvida com bandagens reforçadas com fibra de vidro (ABB, 2004, p. 77); (CIGRE, 2022, p. 44).

Qualquer circulação de corrente entre elementos de pressão, tirantes, vigas etc. deve ser evitada, portanto estes elementos devem ser isolados uns dos outros, bem como isolados do próprio núcleo e aterrados em um único ponto. Desta forma será possível detectar eventuais ligações involuntárias à terra que podem dar origem a correntes circulantes indesejadas e aquecimento anormal do núcleo. Esse ponto único de aterramento, normalmente, é acessível externamente ao

transformador para fins de diagnóstico através de testes de isolamento (ABB, 2004, p. 79); (CIGRE, 2022, p. 44).



Figura 15: Núcleo de um transformador trifásico (CIGRE, 2022, p. 40).

3.3.1.3 Isolamento sólido e líquido

a) Isolamento principal dos enrolamentos

Os enrolamentos são dispostos como cilindros concêntricos ao redor do núcleo. Eles têm a mesma altura aproximada e uma distribuição uniforme de voltas. O isolamento entre enrolamentos e entre enrolamentos e núcleo é construído como um sistema de barreiras. A distância de isolamento entre dois componentes de potencial diferente (dois enrolamentos ou enrolamento e núcleo ou terra) é dividida em vários segmentos compostos por folhas de papelão prensadas instaladas de forma perpendicular à tensão de campo (ABB, 2004, p. 86).

b) Isolamento dos condutores dos enrolamentos

O isolamento elétrico entre as espiras dos enrolamentos do transformador é uma medida necessária, tendo em vista que o curto-circuito entre os condutores das bobinas pode ocasionar diversos problemas, dentre eles, alterações na relação de transformação e pontos quentes. Para condutores maciços o isolamento é composto de uma ou mais camadas de verniz. Em níveis de tensão mais elevados é

requerida aplicação de um isolamento adicional no condutor que, usualmente, é composto de papel isolante (CIGRE, 2022, p. 41). O material mais utilizado para este propósito é conhecido comercialmente como papel *kraft* (CIGRE, 2018, p. 6).

c) Isolamento líquido

O líquido isolante em um transformador de potência possui duas funções principais: i) resfriar e isolar os enrolamentos; e ii) resfriar o núcleo (CIGRE, 2022, p. 46). Outra função do óleo isolante é possibilitar a avaliação da parte ativa do transformador (ABB, 2004, p. 161) por meio da análise de gases dissolvidos (AGD). Os óleos minerais (naftênicos ou parafínicos) têm sido utilizados por décadas e normalmente são a referência com a qual todos os outros líquidos isolantes são comparados.

O óleo mineral oferece, na maioria dos casos, o melhor compromisso entre custo e propriedades técnicas, e a compatibilidade com outros materiais do transformador também é muito boa (ABB, 2004, p. 161). Contudo, a utilização do óleo mineral apresenta algumas desvantagens: i) baixo ponto de fulgor (alta inflamabilidade); ii) é produzido a partir do refino de petróleo, portanto de origem fóssil e de fonte não renovável; iii) é um produto químico tóxico e perigoso que pode causar severos danos ao meio ambiente em caso de vazamentos ou derramamentos (NOGUEIRA; CARVALHO; MAGANO, 2022, p. 1).

O uso de líquidos de éster em transformadores está se tornando mais comum como alternativa aos óleos minerais nas últimas décadas. Essa mudança foi atribuída à crescente consciência ambiental e ao avanço de novas opções em dielétricos líquidos resultantes de recursos naturais sustentáveis, renováveis e não poluentes. Os fluidos de éster apresentam algumas vantagens quando comparados ao óleo mineral. Além de sua característica biodegradável inerente, eles têm um ponto de fulgor mais alto, o que implica em baixa inflamabilidade. As principais desvantagens do uso dos fluidos de éster são a alta viscosidade e a elevada taxa de oxidação quando comparados com o óleo mineral (NOGUEIRA; CARVALHO; MAGANO, 2022, p. 3).

Na figura 16 pode-se observar a parte ativa de um transformador de potência pronta para montagem no tanque.

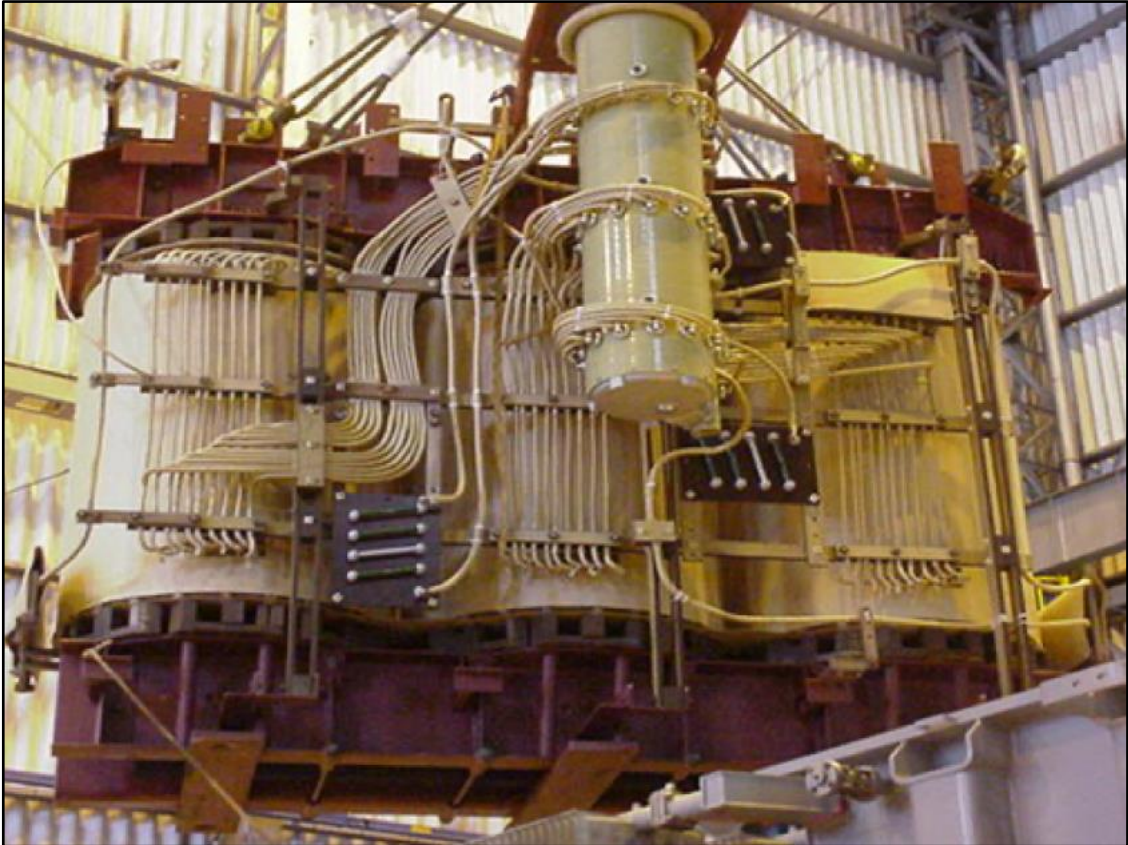


Figura 16: Vista da parte ativa de um transformador de potência trifásico¹¹.

3.3.2 Buchas

Uma bucha é um dispositivo através do qual a conexão entre os enrolamentos de um transformador de potência e os condutores de alta tensão externos é realizada (CIGRE, 2019a, p. 19). A bucha conduz corrente elétrica através de um condutor interno e propicia o isolamento entre este condutor e o tanque aterrado (CIGRE, 2022, p. 47). Dito de outro modo, a bucha é uma peça ou estrutura de material isolante, que assegura a passagem isolada de um condutor, através de uma parede não isolante (ABNT, 2014a, p. 2).

As buchas, como visto, são projetadas para serem instaladas na fronteira entre os meios isolantes internos e externos ao transformador. Externamente o meio isolante na maioria das vezes é o ar, mas também pode ser óleo em uma caixa de terminação de cabos ou SF6 em uma subestação do tipo blindada (ABB, 2004, p. 92). Internamente ao transformador de potência, o meio isolante mais comumente utilizado é o óleo, podendo eventualmente ser utilizado o gás SF6. Existem vários tipos de buchas destinadas a esses diferentes meios de isolamento interno e externo

¹¹ Disponível em: <<https://densitel.com.br/transformadores-de-forca/>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

ao transformador, os mais comuns são: óleo-ar, óleo-óleo e óleo-SF6 (CIGRE, 2019, p. 22). A figura 17 mostra um exemplo de bucha do tipo óleo-ar (óleo internamente e ar externamente).



Figura 17: Exemplo de bucha capacitiva do tipo óleo-ar (Acervo do autor).

A depender do nível de tensão, dois projetos principais de buchas são utilizados: não capacitivas e capacitivas. As buchas não capacitivas são bem simples em sua construção, consistindo em uma haste de material condutor, usualmente cobre, revestida por um invólucro isolante, que pode ser cerâmico (porcelana) ou de resina. Este tipo de bucha é utilizado em aplicações com tensões até 45kV e corrente até 10kA (ABB, 2004, p. 93).

Por outro lado, o projeto das buchas capacitivas é mais complexo. Para níveis de tensão mais altos é necessário introduzir um controle ativo da distribuição do campo elétrico entre o condutor central da bucha e o metal externo do flange de montagem no tanque, que está no potencial de terra (CIGRE, 2019a, p. 19). Este

controle pode ser realizado mediante uma distribuição de tensão capacitiva (ABB, 2004, p. 93).

O corpo capacitivo ou parte ativa da bucha é construído da seguinte forma: a haste ou tubo central é enrolado com folhas finas de papel isolante intercaladas por folhas de material condutor dispostos em várias camadas concêntricas (ABB, 2004, p. 93). O papel pode ser impregnado com óleo isolante ou com resina com o objetivo de melhorar sua característica dielétrica. Recentemente foi desenvolvida uma tecnologia de construção de buchas que substitui o papel isolante por material sintético (RIS) (CIGRE, 2019a, p. 26).

De acordo com a composição de sua parte ativa, as buchas capacitivas são divididas em três tipos de tecnologias (ver figura 18): i) papel impregnado com óleo (*oil impregnated paper* – OIP); ii) papel impregnado com resina (*resin impregnated paper* – RIP); e iii) sintéticos impregnados com resina (*resin impregnated synthetics* – RIS). Um tubo de suporte feito de porcelana ou fibra de vidro pode ser utilizado para melhorar a estabilidade mecânica do conjunto. Para aumentar a distância de escoamento¹² são utilizados isoladores de porcelana ou borracha de silicone no lado do ar. As buchas capacitivas são empregadas em projetos de transformadores com tensões acima de 36 kV (CIGRE, 2022, p. 47).

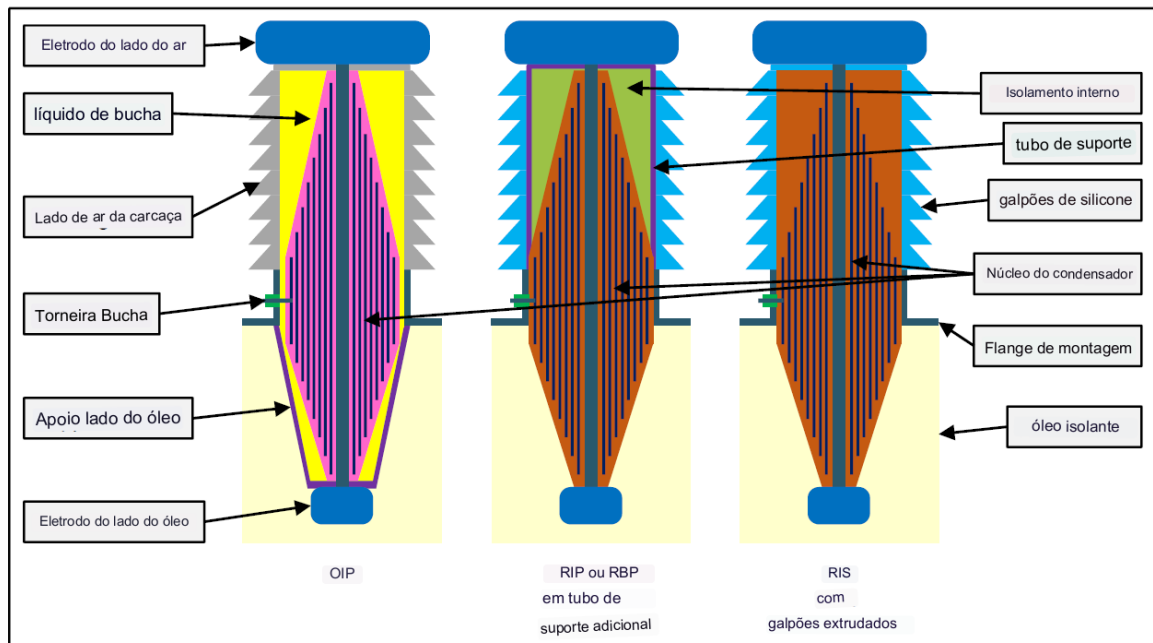


Figura 18: Esquemático de buchas capacitivas para óleo-ar (CIGRE, 2022, p. 48).

¹² Distância mais curta ou soma das distâncias mais curtas ao longo do contorno da superfície externa do invólucro isolante, entre as partes metálicas, entre as quais normalmente existe a tensão de funcionamento (ABNT, 2014a, p. 5).

Quanto ao tipo de conexão elétrica entre o enrolamento e o meio externo ao transformador, três tipos principais de projeto são utilizados em buchas capacitivas (CIGRE, 2022, p. 50): i) *Draw-lead*: o condutor (sólido ou flexível) é inserido através do tubo central da bucha até a parte superior e conectado à linha de alta tensão (o tubo central não transporta corrente de carga); ii) *Draw-rod*: uma haste de aço é inserida através do tubo central da bucha e aparafusada no ponto de conexão superior (o tubo central não transporta corrente de carga); e iii) *Bottom-connected*: neste tipo de conexão o corpo capacitivo da bucha é enrolado diretamente no condutor central sólido que transporta corrente de carga.

A fim de facilitar o diagnóstico da bucha em serviço, uma camada (geralmente a última ou a penúltima) do corpo capacitivo é acessível externamente por meio de um eletrodo comumente chamado de *tap* capacitivo. Este eletrodo também pode ser chamado de derivação de medição, derivação de teste ou derivação de fator de potência. O *tap* capacitivo permite a execução de medições *offline* de capacitância e fator de dissipação (ou fator de potência) das buchas, que são realizadas por ocasião das manutenções preventivas dos transformadores (CIGRE, 2022, p. 51). Mais recentemente o *tap* capacitivo tem sido utilizado para instalação de sistemas de monitoramento em tempo real do fator de dissipação e da capacitância das buchas.

3.3.3 Tanque e sistema de resfriamento

Os transformadores de potência necessitam de um sistema de contenção para o fluido isolante, bem como de um sistema de transporte do calor gerado pela parte ativa para o exterior. A função do sistema de refrigeração é essencial durante o ciclo de vida útil do transformador, pois o melhoramento da capacidade de resfriamento do transformador pode aumentar a vida útil do isolamento devido à redução das temperaturas de operação (CIGRE, 2022, p. 52). O presente tópico é dedicado ao estudo deste importante subsistema do transformador de potência.

3.3.3.1 Tanque

A principal função do tanque é prover a contenção do óleo isolante e servir de proteção física para a parte ativa (ver figura 19). O tanque também é

utilizado como estrutura de suporte para os acessórios, para os equipamentos de controle e proteção, e para os trocadores de calor (ABB, 2004, p. 90).



Figura 19: Vista do tanque de um transformador de potência de 230kV (Acervo do autor).

O tanque deve ser projetado para suportar a pressão atmosférica e, no mínimo, vácuo pleno e pressão especificados em projeto (ABNT, 2007, p. 32). Este requisito é necessário tendo em vista que, antes de ser preenchido com óleo, o transformador é evacuado para remover todo o ar que poderia comprometer a resistência dielétrica do isolamento interno. A performance da estanqueidade do tanque em sobrepresão externa e interna é verificada por meio de testes adequados em fábrica (ABB, 2004, p. 90).

A tampa pode ser aparafusada ou soldada à estrutura do tanque. A aplicação de solda tem a vantagem de evitar vazamentos de óleo isolante e reduz o custo de manutenção com a parada do transformador para a troca da gaxeta de vedação da tampa após o final de sua vida útil. Alguns projetistas, por sua vez, preferem um sistema de contenção de óleo do tipo campânula ou sino onde o tanque é soldado ou aparafusado na base de suporte (fundo do tanque). No entanto, este sistema é menos usual que o anterior.

3.3.3.2 Sistema de resfriamento

O sistema de resfriamento coleta o óleo quente no topo do tanque e retorna o óleo resfriado na parte inferior. O arranjo de resfriamento pode ser visto como dois circuitos de óleo com uma interação indireta, um circuito interno, que transfere a energia dissipada nas superfícies produtoras de calor (núcleo e enrolamentos) e outro externo, no qual o óleo transfere o calor para um meio de resfriamento secundário (ABB, 2004, p. 96).

Para transformadores de potência é possível projetar sistemas de resfriamento que sejam providos de circulação forçada de ar, circulação forçada de óleo ou circulação forçada de água como meios secundários de troca de calor. Nestes tipos de projetos são utilizados ventiladores e/ou bombas no circuito externo para movimentar o fluido refrigerante (ABB, 2004, p. 96).

Outro fator importante é que a circulação forçada dos meios refrigerantes possibilita o aumento da potência suprida pelo transformador sem que seja requerido um aumento de suas dimensões físicas, o que é altamente desejável. Além disso, ao aumentar o fluxo ou aumentar a capacidade de resfriamento, a vida útil do isolamento do transformador pode ser aumentada devido a temperaturas operacionais reduzidas (CIGRE, 2022, p. 52).

As normas técnicas fornecem definições claras dos diferentes tipos de resfriamento, juntamente com designações especiais. Os exemplos abaixo são retirados da norma IEC:

- ONAN - óleo natural - ar natural
- ONAF - óleo natural - ar forçado
- OFAN - óleo forçado - ar natural
- OFAF - óleo forçado - ar forçado
- OFWF - óleo forçado - água forçada

Existe ainda a possibilidade de o óleo ser direcionado para as superfícies produtoras de calor (parte ativa) pelas bombas de óleo por meio de dutos, este arranjo é denominado óleo dirigido (OD). Vale ressaltar que um determinado projeto de transformador pode conter uma combinação de diversos tipos de sistemas de resfriamento (ABB, 2004, p. 96). O sistema de resfriamento mais comumente adotado no Brasil utiliza a combinação ONAN/ONAF1/ONAF2, que contém dois estágios de circulação forçada de ar.

a) Trocadores de calor

A função do trocador de calor é transportar a energia térmica do enrolamento e do núcleo do transformador para o ambiente externo. Os mais comumente utilizados são os trocadores de calor do tipo líquido-ar (líquido na parte interna e ar na parte externa) com superfície ampliada para aumentar o calor transferível (CIGRE, 2022, p. 52).

Estes trocadores de calor são conhecidos tecnicamente como radiadores e são constituídos, basicamente, por uma determinada quantidade de aletas soldadas em dois dutos, um na parte superior e outro na parte inferior, que são conectados ao tanque do transformador através de válvulas borboleta (ABB, 2004, p. 96). O uso de válvulas permite que o radiador seja substituído sem a necessidade de remover o óleo do tanque do transformador, reduzindo, desta forma, o tempo de reparo.

Outro tipo de trocador de calor utilizado em transformadores de potência é o líquido/líquido, em que o resfriamento se dá mediante a circulação de um líquido no sistema externo com temperatura abaixo da observada no líquido do sistema interno. Neste tipo de sistema o mais usual é utilizar a circulação forçada de água para realizar a troca de calor, sendo possível a reutilização do calor residual para outros fins (aquecimento de edifícios, piscina etc.) (ABB, 2004, p. 98).

Há um inconveniente neste tipo de sistema relacionado à preservação de sua estanqueidade. Como são utilizados dois fluidos em sistemas de contenção diferentes, podem ocorrer vazamentos e contato físico indesejado entres estes fluidos, além da necessidade de troca de vedações por final de vida útil. A corrosão também é um tipo de problema a ser enfrentado neste tipo de resfriamento (ABB, 2004, p. 98)

3.3.3.3 Bombas de circulação

As bombas são utilizadas tanto para aumentar o fluxo do líquido isolante dentro do tanque do transformador, como também para direcionar o fluxo de óleo até as partes geradoras de calor (enrolamento e núcleo). As bombas não devem gerar partículas por abrasão ou bolhas de gás por cavitação nem utilizar velocidades muito altas para evitar cargas eletrostáticas. Em grandes transformadores, as bombas são

normalmente duplicadas e, portanto, válvulas de pressão e retenção são necessárias para evitar desvios hidráulicos (CIGRE, 2022, p. 52).

As bombas de óleo são modelos especiais, compactos e totalmente vedados, em que o motor está totalmente imerso no óleo do transformador (ABB, 2004, p. 98). O sistema de bombas normalmente é dotado de válvulas que permitem a sua isolação para manutenção ou substituição sem a necessidade de remoção do óleo transformador.

3.3.3.4 Válvulas

Dois tipos diferentes de válvulas são utilizados em transformadores de potência: válvulas de interface (do óleo para o ambiente) e válvulas de fluxo de óleo (fechamento e regulação). As válvulas de interface, tais como válvulas de drenagem e válvulas de amostragem, são utilizadas para levar o óleo a um ponto específico fora do tanque. Já as válvulas de fluxo têm a função de regular ou bloquear o fluxo de óleo entre o tanque principal e os radiadores, bombas e sistemas de expansão (CIGRE, 2022, p. 53).

Mais recentemente tem sido aplicadas válvulas do tipo esfera em projeto de transformadores, principalmente pela sua confiabilidade no bloqueio do fluxo e baixa incidência de vazamentos, em detrimento ao uso das válvulas do tipo “gaveta”, exceto para os radiadores, aos quais são utilizadas válvulas do tipo “borboleta”.

3.3.3.5 Sistema de expansão de óleo

Considerando que o transformador opera em diferentes temperaturas em função tanto do seu carregamento quanto do ambiente externo, a dilatação volumétrica do óleo isolante em função da temperatura deve ser considerada. Neste sentido, o transformador deve ser provido de um sistema que permita a livre expansão de volume do óleo isolante entre um limite mínimo e um limite máximo que sejam seguros para o seu funcionamento (CIGRE, 2022, p. 54).

Na temperatura mínima, as áreas de foco são a refrigeração (nível de óleo nos tubos do radiador) e o isolamento (nível de óleo nas buchas e na parte ativa). Na temperatura máxima, a contenção de fluidos (sobreprensão e derramamento) é a maior preocupação (CIGRE, 2022, p. 54). Com base no tamanho

do transformador e no tipo de líquido isolante, diferentes sistemas são usados para garantir a capacidade de expansão volumétrica (CIGRE, 2022, p. 54):

a) Sistema aberto

Neste sistema o tanque do transformador é preenchido parcialmente com o óleo isolante no qual a parte ativa fica imersa e um colchão de ar na parte superior do tanque é ligado diretamente ao exterior por meio de um dispositivo de secagem de ar. Este sistema é aplicado em transformadores pequenos de distribuição em que a umidade no óleo não seja um requisito importante (CIGRE, 2022, p. 54).

b) Colchão de gás

Neste sistema o tanque do transformador é preenchido parcialmente com o óleo isolante no qual a parte ativa fica imersa e é selado em relação ao meio exterior. Um colchão de gás inerte, normalmente nitrogênio puro, é aplicado na parte superior do tanque, sendo que a expansão do óleo ocorre mediante a compressão da camada gasosa. É recomendável que o sistema seja permanentemente pressurizado por um dispositivo de suprimento de gás para evitar o surgimento de bolhas e reduzir o risco de falhas dielétricas (CIGRE, 2022, p. 54).

c) Conservador ou tanque de expansão

Este é o sistema mais utilizado em transformadores de potência. O conservador é um tanque separado do tanque principal do transformador sendo conectado a ele através de uma tubulação na qual é instalado o relé buchholz (CIGRE, 2022, p. 55). Existem três tipos principais de sistema de expansão por meio de conservador: i) sistema livre em que o ar dentro do conservador fica em contato permanente com o óleo, porém o ar que ingressa no sistema é filtrado por um secador; ii) conservador com bolsa ou membrana, no qual há uma separação entre o ar e o óleo isolante dentro do conservador por meio de uma bolsa ou membrana de borracha; iii) sistema com colchão de gás, que consiste em um conservador com ou sem selagem (bolsa ou membrana) em que é utilizado um gás inerte (nitrogênio) pressurizado em substituição ao ar ambiente (ver figura 20) (CIGRE, 2022, p. 55).

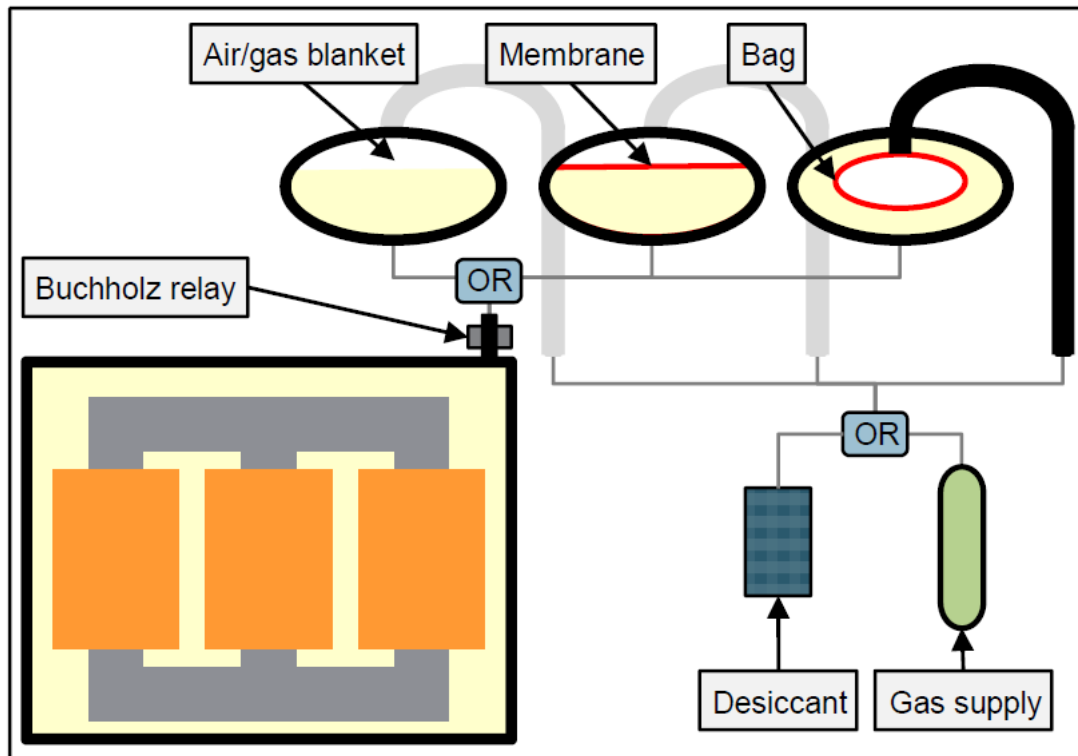


Figura 20: Sistemas de expansão com uso de conservador (CIGRE, 2022, p. 55).

3.3.4 Comutador

Os comutadores são dispositivos mecânicos que alteram as conexões de derivação dos enrolamentos do transformador. Esta operação pode ser realizada com o transformador em carga (*On Load Tap Changer - OLTC*) ou com o transformador desenergizado (*De-Energized Tap Changer - DETC* ou *Off Circuit Tap Changer - OCTC*). A alteração das conexões de derivação do enrolamento do transformador tem dois objetivos principais, a saber: i) regulação de tensão alterando a relação de transformação; e ii) controle do fluxo de potência alterando o ângulo de fase (*Phase Shifter*) (CIGRE, 2022, p. 57).

3.3.4.1 Comutador de derivações sem carga (DETC)

O comutador de derivações sem carga consiste, basicamente, em uma chave ajustável acessível externamente que é geralmente instalada no enrolamento de alta tensão do transformador e que usualmente possui cinco faixas de ajuste de relação de transformação. O DETC é projetado para ser operado somente com o transformador desenergizado (ABB, 2004, p. 99). Caso este dispositivo seja manobrado com o transformador em funcionamento, as bobinas poderão sofrer

danos, além do que o operador será submetido a um fator de risco de acidente. Por esta razão, o punho da chave do DETC é travado por meio de cadeado e há um dispositivo de proteção que desliga o transformador em caso de acionamento acidental.

3.3.4.2 Comutador de derivações em carga (OLTC)

Os comutadores de derivação em carga são mecanicamente mais complexos. A sua função é permitir o ajuste da relação de transformação sem a necessidade de desligar o transformador (CIGRE, 2022, p. 59). Esta tecnologia foi introduzida entre os anos de 1905 e 1910 devido à necessidade de se realizar a regulação de tensão das redes elétricas sem interrupção de fornecimento (ABB, 2004, p. 100).

O OLTC deve fornecer fluxo de corrente ininterrupto durante a operação de transição de uma derivação para a outra. O seu funcionamento pode ser compreendido através de duas etapas identificáveis. Uma etapa do processo consiste na interrupção da corrente de carga. Nesta fase, um dispositivo de comutação, denominado chave de carga (*diverter switch*) (ver figura 21b) transfere a corrente de carga de uma derivação do transformador para outra adjacente (ABB, 2004, p. 101).

Durante a transição, as duas derivações serão conectadas através de uma impedância de transição ajustada (resistor ou reator) para evitar um curto-circuito no enrolamento de regulação e irão compartilhar a corrente de carga. Na sequência, a ligação à derivação anterior será interrompida e a carga será transferida para a nova derivação (ABB, 2004, p. 101).

A comutação em carga pode ser realizada por contatos imersos em óleo isolante ou por interruptores a vácuo. A chave de carga é, usualmente, confinada em um tanque ou cilindro contendo óleo isolante que não deverá ser misturado ao óleo isolante do tanque principal do transformador. A principal razão para isso é que o óleo neste recipiente estará bastante contaminado por elementos químicos produzidos pelos arcos elétricos de elevada temperatura no decorrer das comutações de contatos (ABB, 2004, p. 101).

A tecnologia de interruptores à vácuo evita este inconveniente, já que a comutação não é realizada diretamente no óleo isolante. Porém, devido a outras

características do óleo que precisam de controle, como a rigidez dielétrica, neste caso a chave de carga também é mantida em um compartimento separado.

A outra etapa do processo de comutação é realizada pela chave seletora de derivações (*tap selector*) (ver figura 21a), que consiste em uma gaiola ou um cilindro isolante com uma série de contatos fixos aos quais são conectadas as derivações do enrolamento regulador do transformador. A chave seletora é composta por um conjunto de contatos fixos correspondente ao número de derivações de regulação e um par de contatos móveis (ABB, 2004, p. 101).

Os contatos móveis são acoplados mecanicamente a um eixo central através de dois braços que se movem passo a passo em movimento circular mantendo contato elétrico entre duas derivações adjacentes. Ambos os braços são conectados, por sua vez, aos terminais de entrada da chave de carga onde ocorrerá a comutação em carga. Um braço estará na posição da derivação atual e estará submetido a corrente de carga, o outro braço estará sem carga e livre para se mover até a próxima derivação. Os contatos da chave seletora nunca interrompem a corrente carga e podem ser colocados no próprio óleo do transformador (ABB, 2004, p. 101).

Pode ocorrer, ainda, que o projeto do transformador requeira a instalação de dispositivos de proteção contra sobretensão, tais como resistores não lineares (varistores) no sistema de comutação. Na maioria dos casos, o OLTC é controlado remotamente e acionado através de um motor elétrico que traciona todo o conjunto, alocado em um painel fixado no tanque do transformador, painel este que também abriga todo o circuito de controle do OLTC, inclusive os botões de acionamento local (ABB, 2004, p. 101).

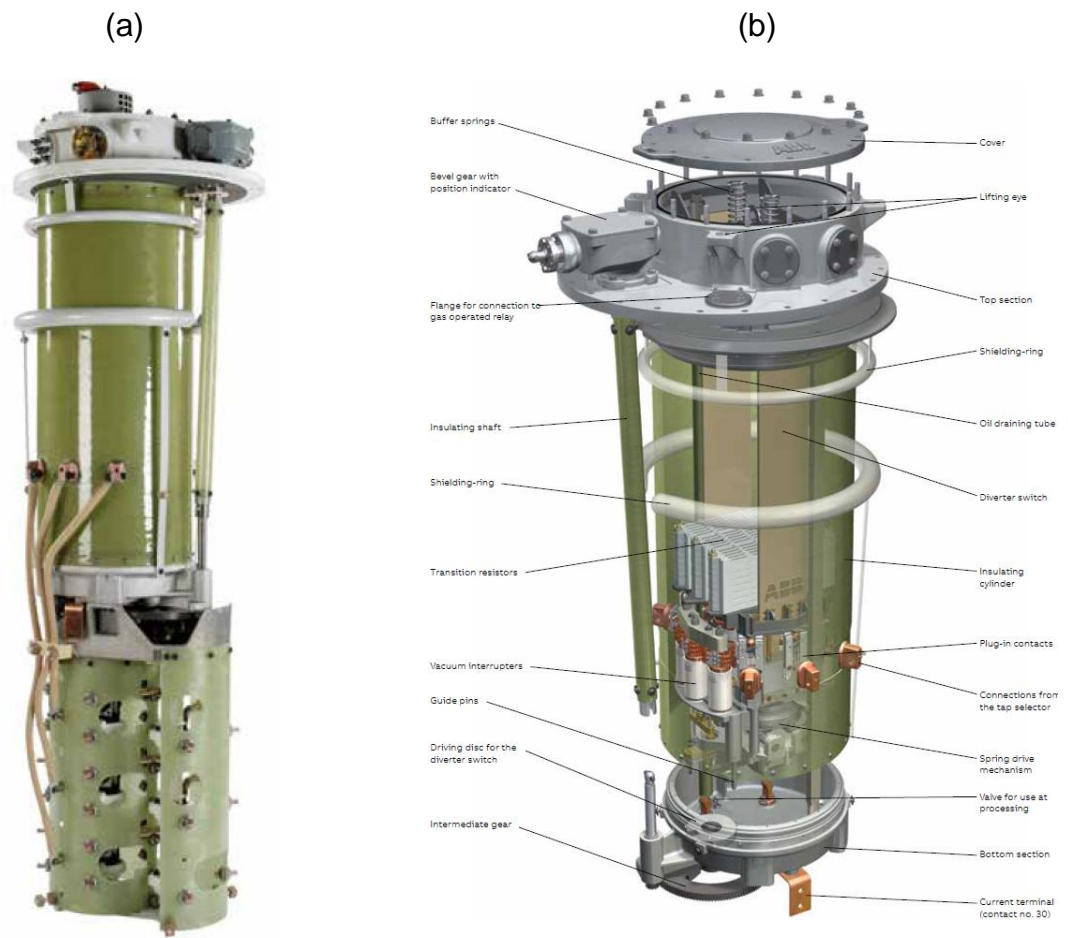


Figura 21: OLTC ABB tipo VUC com interruptor a vácuo: (a) cilindro e seletor de taps; (b) chave de carga (ABB, 2018, p. 1; 17).

4 A METODOLOGIA DE GESTÃO DE ATIVOS APLICADA AO CICLO DE VIDA DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos e considerações relevantes para o entendimento da metodologia da Gestão de Ativos (GA) quando aplicada ao ciclo de vida dos transformadores de potência, cuja importância é crucial para o sistema elétrico. Os transformadores de potência são ativos de elevado custo de aquisição e, em geral, representam o maior investimento em uma subestação de energia elétrica.

Logo, a confiabilidade e a performance operacional dos transformadores de potência são de grande importância para as concessionárias de energia elétrica. A falha repentina de um grande transformador pode causar a interrupção no fornecimento de energia, resultando em altos custos de reparo, perdas de receitas, bem como danos ambientais e colaterais (ARSHAD, 2004, p. 1).

4.1 Considerações metodológicas sobre a Gestão de Ativos

Desde a Revolução Industrial, com o advento da produção mecanizada, as empresas vêm desenvolvendo métodos e técnicas para melhorar o rendimento e o desempenho das máquinas e da produção. Dentre as várias metodologias desenvolvidas com o objetivo de aprimorar a produtividade empresarial, a Gestão de Ativos vem ganhando destaque nas últimas décadas. Esta metodologia surgiu na Inglaterra quando o IAM (*Institute of Asset Management*) publicou, em 2004, a norma PAS55 que trata dos requisitos para a Gestão de Ativos.

Posteriormente, com a criação do Fórum Internacional de Gestão de Ativos, surgiu a necessidade de se estruturar uma norma internacional que tratasse conceitualmente sobre o tema. Neste sentido, em 2014, é publicada pela ISO (*International Organization for Standardization*) a norma ISO 55000 cujo objetivo é fornecer uma visão geral de Gestão de Ativos, seus princípios e terminologias, bem como os benefícios esperados de um sistema de Gestão de Ativos (ABNT, 2014b, p. 1). A referida norma foi traduzida para o português e publicada em 10 de janeiro de 2014 pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (TAVARES, 2015, p. 102).

Em termos de padronização, a metodologia de Gestão de Ativos é composta por três normas distintas que em conjunto são referidas como um sistema

de Gestão de Ativos: a norma ABNT NBR ISO 55000 (2014) que apresenta a visão geral, os princípios e terminologia; a norma ABNT NBR ISO 55001 (2014) que apresenta os requisitos de um “sistema de gestão” para a Gestão de Ativos; e a norma ABNT NBR ISO 55002 (2020) que orienta sobre como interpretar os requisitos da ABNT NBR ISO 55001.

De acordo com a norma NBR ISO 55000 um ativo é um item, algo ou entidade que tem valor real ou potencial para uma organização. O valor referido de um ativo pode ser tangível ou intangível, financeiro ou não financeiro (ABNT, 2014, p. 15). Para as organizações industriais, normalmente, os ativos físicos ou tangíveis, tais como as máquinas do sistema produtivo, são o principal objeto de um plano de Gestão de Ativos. Por outro lado, as marcas, patentes, direitos de propriedade intelectual e ativos digitais pertencentes à empresa são considerados bens intangíveis (ABNT, 2014, p. 15).

A Gestão de Ativos pode ser conceituada, nos termos das normas da série ISO 55000, como uma atividade coordenada de uma organização para obter valor a partir dos ativos por meio do gerenciamento de riscos e oportunidades com o objetivo de atingir um equilíbrio entre custo, risco e desempenho (ABNT, 2014b, p. 1). A metodologia de Gestão de Ativos reflete uma mudança cultural no planejamento estratégico das empresas ativo-intensivas, cujo negócio está fundamentado na operação de ativos físicos, agregando à tradicional visão sobre produtos e clientes o foco nos ativos e no valor que eles são capazes de gerar para o negócio (PROCOBRE, 2019, p. 8).

Um sistema de Gestão de Ativos pode ser considerado como um conjunto de elementos interrelacionados ou que interagem para estabelecer a política e os objetivos da Gestão de Ativos, como também os processos para alcançar esses objetivos. A implementação de um sistema de gestão para a Gestão de Ativos pode proporcionar à organização os seguintes benefícios (ABNT, 2014, p. 2):

- Melhoria de desempenho financeiro;
- Melhoria na tomada de decisão sobre investimento em ativos;
- Risco gerenciado;
- Responsabilidade social demonstrada;
- Conformidade demonstrada;
- Melhoria de imagem;
- Melhoria da sustentabilidade organizacional.

Um sistema de Gestão de Ativos tem a função de estabelecer a política e os objetivos da Gestão de Ativos. O sistema de Gestão de Ativos é um subconjunto da Gestão de Ativos composto por elementos interrelacionados e ferramentas que darão apoio a gestão dos ativos estabelecidos no escopo de portfólio de ativos.

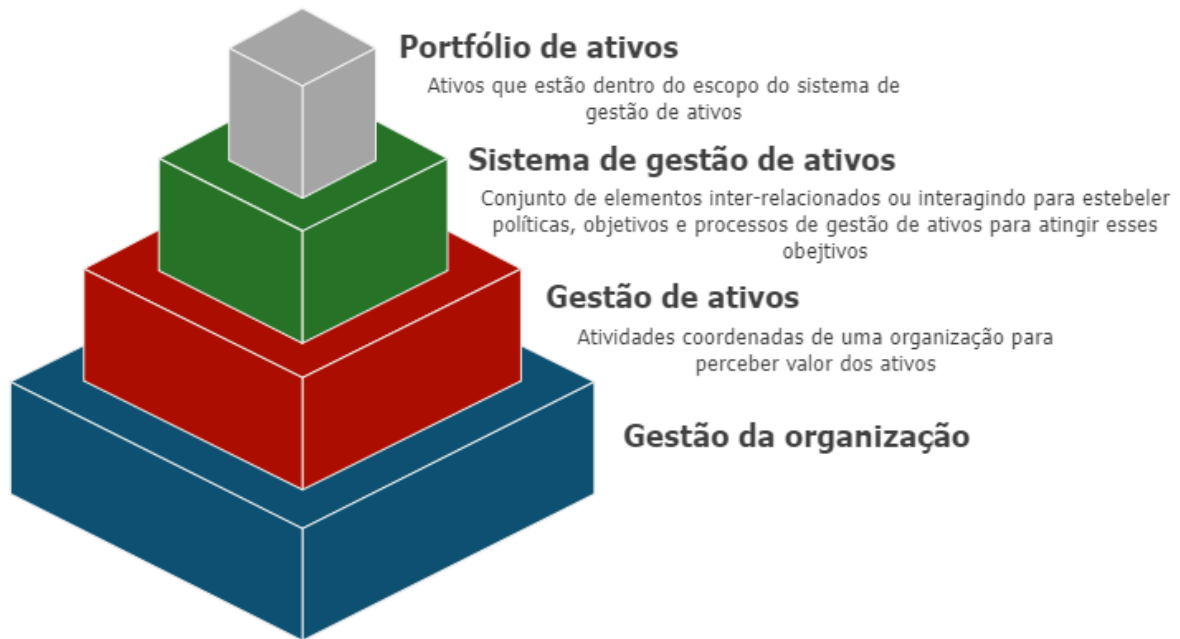


Figura 22: Relação entre os principais termos na Gestão de Ativos (elaboração própria).

Para a implementação da Gestão de Ativos é estritamente recomendável que a organização estabeleça uma política de Gestão de Ativos que deve estar interligada com seu planejamento estratégico. Para tanto, a norma recomenda que seja elaborado um plano estratégico de Gestão de Ativos (SAMP¹³) que deve ser utilizado para orientar a definição dos objetivos da Gestão de Ativos da organização e descrever o papel do sistema de Gestão de Ativos para o alcance desses objetivos.

O SAMP é a mais importante das informações documentadas usadas na conversão de objetivos organizacionais em objetivos de Gestão de Ativos, pois fornece a estrutura necessária para o planejamento, a priorização e a tomada de decisões para implementar, em todos os níveis organizacionais, a política de Gestão de Ativos com vistas a assegurar o alinhamento com a estratégia da empresa (PROCOBRE, 2019, p. 16).

¹³ *Strategic Asset Management Plan.*

Os planos de Gestão de Ativos devem ser um desdobramento do SAMP para cada ativo ou cada conjunto de ativos dentro do portfólio do sistema de Gestão de Ativos e devem conter as atividades a serem realizadas com objetivos específicos e mensuráveis (ABNT, 2014, p. 9). O desenvolvimento dos planos de Gestão de Ativos deve incluir análises dos impactos (financeiros, operacionais etc.) das ações propostas e as necessidades de recursos para cada fase do ciclo de vida dos ativos.

É recomendável, ainda, o estabelecimento de um plano especial para emergências ou contingências, que deve ser desenvolvido para os ativos críticos, de forma a prever ações para casos catastróficos ou de grande impacto. Ativos críticos são aqueles que possuem potencial para impactar significativamente nos objetivos da organização. A criticidade pode estar relacionada aos aspectos de segurança, ambiental ou de desempenho, como também aos requisitos legais, regulatórios ou estatutários (ABNT, 2014, p. 16).

O plano de contingência deve prever ações responsivas planejadas para a ocorrência de eventuais falhas dos ativos críticos. Para além disso, o plano de contingência deve estabelecer procedimentos para substituir rapidamente o ativo por outro reserva, se existente, em caso de ocorrência de uma falha funcional complexa e de difícil resolução.

Os modos de falhas dos ativos devem ser previamente mapeados por meio de ferramentas adequadas de análise tais como: o FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*, em português Análise do Modo e Efeitos da Falha); o FMECA (*Failure Mode Effects and Criticality Analysis*, em português Análise de Criticidade do Modo e Efeitos da Falha) e o RCM (*Reliability Centred Maintenance*, em português Manutenção Centrada em Confiabilidade).

De uma forma geral, a classificação de um ativo como crítico é decorrente de sua função no negócio da empresa. Desta forma, há ativos que em determinadas organizações são considerados críticos e em outras não. Subdividir os ativos em críticos e não críticos é uma tarefa importante para a Gestão de Ativos, pois os ativos críticos serão necessariamente monitorados com mais detalhes.

Por outro lado, independentemente de sua criticidade para a empresa, os ativos devem ser analisados e ter seu desempenho avaliado individualmente e em grupo (PROCOBRE, 2019, p. 26). Há ainda a possibilidade de separar os ativos críticos e não críticos em famílias, ou seja, agrupá-los por critérios ou características

que lhes sejam semelhantes, com o objetivo de realizar comparação entre o seu desempenho e prevenir a ocorrência de falhas e defeitos.

Monitorar os ativos é imprescindível para avaliar o nível de confiabilidade e a probabilidade de falha. A depender do tipo de ativo físico e de sua criticidade, a organização pode utilizar técnicas ou ferramentas de monitoramento baseadas no tempo e/ou na condição, com o ativo em serviço (*on-line*) ou desligado (*off-line*), ou ainda o monitoramento contínuo em tempo real (CIGRE, 2011, p. 5).

Como visto, a implementação da Gestão de Ativos por uma organização requer a adoção sistematizada de ações que viabilizem o gerenciamento de um ativo ou portfólio de ativos durante as diferentes etapas do seu ciclo de vida. O ciclo de vida, de uma forma genérica, pode ser compreendido como um conjunto de estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição da matéria-prima ou de sua geração a partir de recursos naturais até a disposição final (ABNT, 2009, p. 1).

A Gestão de Ativos requer, fundamentalmente, que a organização estabeleça uma política clara de renovação de ativos, os quais devem ser substituídos não somente quando sofrem um dano irreparável (o que não é desejável e a Gestão de Ativos tem a missão de minimizar este risco), mas, primordialmente, quando (PROCOBRE, 2019, p. 9):

- Os custos operacionais e/ou de manutenção durante a vida remanescente do ativo excederem o custo de substituição;
- Há risco iminente de falha do ativo;
- O impacto de uma provável falha supera o custo de substituição;
- Uma provável falha pode comprometer a confiabilidade e a segurança do sistema e de pessoas;
- Os ativos tornaram-se obsoletos e ineficientes para operar e manter o negócio;
- Os ganhos com a substituição implicam em melhoria de indicadores relativos à segurança de pessoas, do meio ambiente e desempenho da empresa.

A decisão de substituir ativos antecipadamente, ou seja, antes fim do seu ciclo de vida, deve ser tomada com base em análises e diagnósticos precisos de suas condições, de modo a garantir o melhor retorno do capital investido, a melhor performance operacional e o menor risco para a organização. Para que os objetivos estratégicos de Gestão de Ativos sejam alcançados, as propostas de manutenção,

reforma/revitalização e renovação de ativos devem fazer parte de um planejamento plurianual, com o objetivo de minimizar riscos e otimizar os custos operacionais da organização (PROCOBRE, 2019, p. 10).

4.2 A Gestão de Ativos para transformadores de potência

Para a expressiva maioria das empresas que atuam no setor elétrico, os transformadores de potência serão considerados ativos críticos. Do ponto de vista econômico, os transformadores são ativos de elevado custo total de propriedade (TCO - *Total Cost of Ownership*), que engloba o custo de aquisição e o custo do ciclo de vida (LCC). Além disso, os transformadores utilizados no Sistema Interligado Nacional (SIN) que são integrantes da Rede Básica de Transmissão, estão sujeitos a normas regulatórias que penalizam a empresa transmissora pela indisponibilidade dos seus ativos.

A empresa transmissora auferir uma receita (RAP¹⁴) mediante um contrato de concessão de serviço público de transmissão de energia elétrica para operar e manter seus ativos de modo que estejam disponíveis ao sistema elétrico. Caso ocorra uma falha de um transformador que o deixe indisponível por um determinado tempo, isto implicará na aplicação de uma multa, denominada Parcela Variável por Indisponibilidade (PVI), proporcional ao tempo de indisponibilidade, que será descontada da receita do ativo, infringindo uma severa penalidade financeira à concessionária de transmissão.

Outro aspecto relevante é que a falha de transformadores de potência, a depender de sua localização no sistema, pode ocasionar a interrupção do fornecimento de energia elétrica aos consumidores residenciais e indústrias, ao comércio, hospitais, escolas e órgãos públicos, impactando negativamente a reputação da empresa de energia envolvida.

Conforme citado na seção anterior, a política de Gestão de Ativos requer um monitoramento efetivo do desempenho e da confiabilidade dos ativos. Portanto, a política de Gestão de Ativos de uma organização deve ser desdobrada em estratégias, planos e atividades que visem maximizar a geração de valor pelos seus ativos (PROCOBRE, 2019, p. 25). No caso dos transformadores de potência, a Gestão de Ativos deve ter como objetivos:

¹⁴ Receita Anual Permitida.

- i. Melhorar o desempenho;
- ii. Maximizar a disponibilidade operacional;
- iii. Minimizar os riscos de falhas;
- iv. Reduzir os custos de operação e manutenção;
- v. Estabelecer o período ótimo para a renovação dos ativos.

O ciclo de vida do transformador de potência pode ser dividido em seis etapas: planejamento, especificação, aquisição, instalação, utilização e renovação ou revitalização (SOARES, 2011, p. 2), (VENDRAMETO, 2023, p. 24), (LIU et al., 2018, p. 2), (HEGEDIC et al., 2016, p. 6).



Figura 23: Etapas do ciclo de vida de um transformador de potência (elaboração própria).

A etapa de planejamento consiste na identificação da necessidade do transformador na rede elétrica, para adequação da potência instalada, para cumprir critérios de segurança de abastecimento ou devido à expansão da rede. Na rede básica de transmissão¹⁵, da qual os transformadores de potência com tensão primária igual ou superior a 230 kV fazem parte, os estudos desenvolvidos no Plano Decenal, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), determinam o acréscimo de potência em subestações novas ou existentes (FRONTIN, 2013, p. 198).

¹⁵ A Resolução Normativa Aneel nº 67, de junho de 2004, estabelece os critérios para composição da Rede Básica e das Demais Instalações de Transmissão (DIT).

No Plano de Ampliação e Reforços (PAR), de responsabilidade do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), é detalhado o cronograma de implantação das obras necessárias para preservar ou atingir o adequado desempenho da rede elétrica com horizonte de três anos (FRONTIN, 2013, p. 198)

Na etapa de especificação são estabelecidos os requisitos e critérios técnicos detalhados para a fabricação e fornecimento do transformador. Segundo Frontin (2013, p. 198), a especificação para fabricação de um transformador de potência deve levar em conta, dentre outros, os seguintes aspectos: i) temperatura ambiente do local de implantação; ii) curva de carga; e iii) carregamento típico em regime permanente. A especificação deve incluir, ainda, as diretrizes para avaliação técnica dos proponentes, garantias de fornecimento, critérios para comprovação da conformidade do projeto e requisitos para o controle de qualidade, tais como inspeções das fases de fabricação, ensaios e testes (VENDRAMETO, 2023, p. 24).

A etapa de aquisição consiste, basicamente, na seleção de um fornecedor para o transformador que atenda aos requisitos e critérios estabelecidos na especificação técnica, bem como atenda às expectativas de preços e prazos de fornecimento. É importante frisar que a empresa compradora poderá estabelecer, adicionalmente, critérios de ordem ambiental para a escolha do fornecedor, como por exemplo a quantidade de emissão de gases de efeito estufa (GEE) no processo de fabricação do transformador (pegada de carbono), prática que ainda não é muito comum no setor de energia elétrica.

Após sua fabricação e execução de todos os ensaios e testes de conformidade, o transformador é desmontado e preparado para o transporte até o local de utilização. Esta é a etapa de instalação, que inclui, além do transporte, a montagem final em campo e os ensaios e testes de comissionamento¹⁶. Por se tratar de uma máquina extremamente pesada e de grandes dimensões, a operação de transporte e descarga do transformador de potência é delicada, principalmente quando envolve grandes distâncias e estradas em más condições de conservação. Cuidados especiais, tais como a instalação de registradores de impacto, são normalmente requeridos.

¹⁶ O comissionamento compreende todos os ensaios e inspeções do transformador de potência e equipamentos associados realizados no campo que permitirão a sua operação comercial confiável de acordo com os requisitos técnicos especificados (FRONTIN, 2013, p. 71).

A etapa de utilização ou exploração consiste no período do ciclo de vida do transformador que vai do início de sua operação comercial até a declaração do seu final de vida útil. Esta fase pode ser subdividida em dois macroprocessos: a operação e a manutenção do transformador. A operação é o processo pelo qual o transformador deve cumprir a sua função de forma segura, eficiente e confiável. A operação é condicionada pelas exigências da rede onde o transformador está inserido, pelas condições ambientais, ocorrência de eventos ou incidentes, necessidade de manobras e eventuais contingências, fatores que não são controlados pela gestão do ciclo de vida do transformador, mas que o influenciam (SOARES, 2011, p. 2).

A manutenção compreende as atividades destinadas a manter os ativos em serviço e cumprindo seus objetivos funcionais e de desempenho (ABNT, 2021). A manutenção de transformadores pode ser considerada como toda atividade que se realiza direta ou indiretamente nos ativos com a finalidade de lhes assegurar confiabilidade e eficiência no desempenho da função para qual foram concebidos, considerando-se as condições operativas e econômicas (MILASCH, 1984).

Em geral, um transformador de potência é um equipamento robusto, com boa confiabilidade e que exige manutenção relativamente baixa. Durante a vida útil de um transformador, do ponto de vista da Gestão de Ativos, o proprietário precisa estabelecer uma estratégia de manutenção que garanta um nível adequado de confiabilidade e uma vida operacional otimizada (CIGRE, 2011, p. 3). Uma estratégia de manutenção otimizada fornecerá a disponibilidade e a confiabilidade necessárias do transformador durante sua vida útil a um custo mínimo.

O principal objetivo da manutenção no âmbito da política de Gestão de Ativos é detectar quaisquer anormalidades antes que elas causem danos que possam indisponibilizar o equipamento para a operação ou possam restringir sua capacidade. Desta forma, a função estratégica da manutenção de um transformador de potência é maximizar a disponibilidade operacional do equipamento atuando proativamente com o objetivo de evitar a ocorrência de falhas funcionais.

A figura 24 representa o ciclo de operação e manutenção do transformador de potência, desde o momento do comissionamento até o fim da vida útil.

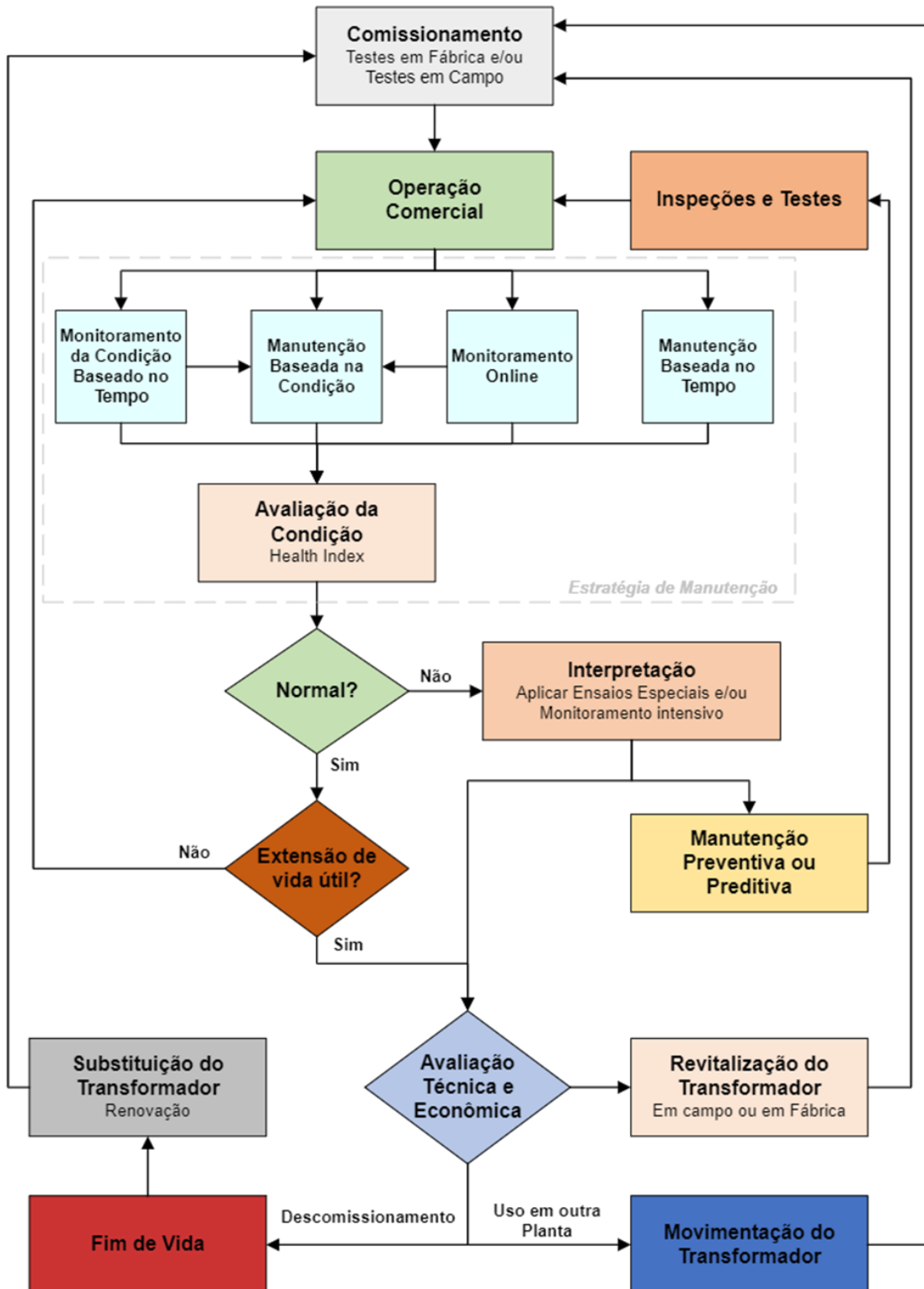


Figura 24: Ciclo de operação e manutenção de um transformador de potência (CIGRE, 2022, p. 18).

O fluxo segue da seguinte forma: i) uma vez detectada uma anormalidade, diversas técnicas de diagnóstico podem ser aplicadas para avaliar a gravidade do problema, localizá-lo e determinar se o transformador pode permanecer ou retornar ao serviço com ou sem restrição de operação; ii) se

necessário, uma ação preventiva pode ser executada ou, dependendo da condição, pode ser necessário executar uma intervenção mais intensiva no transformador; iii) por fim, pode ser decidido que é hora de realizar a reforma do transformador com a extensão de sua vida útil (revitalização) ou substituí-lo por um ativo novo (renovação). Esta é a última etapa do ciclo de vida do transformador que ocorre quando é atestado o seu final de vida útil (CIGRE, 2022, p. 18).

Para a Gestão de Ativos é essencial monitorar a condição do transformador de potência, tendo em vista que esta ação fomentará tomadas de decisões mais assertivas ao longo do ciclo de vida do ativo. A avaliação da condição é um processo pelo qual o transformador é diagnosticado em função de todos os aspectos que podem afetar o desempenho futuro.

As entradas para este processo serão os resultados de ensaios e testes, inspeções visuais, histórico operacional, conhecimento dos mecanismos e processos de falha, experiência anterior com equipamentos semelhantes e quaisquer outros conhecimentos e informações relevantes.

A avaliação pode variar desde uma simples classificação como condição normal ou anormal até um sofisticado critério denominado “índice de integridade dos ativos” (*asset health index*), que é um sistema de classificação ou pontuação em uma escala única ou múltipla para permitir decisões sobre manutenção ou substituição futura priorizadas para uma frota de transformadores (CIGRE, 2011, p. 6).

As principais informações para a avaliação da condição de um transformador advêm das técnicas de manutenção baseada na condição (CBM) e das técnicas de manutenção baseada no tempo (TBM). A CBM aplica-se aos casos em que a condição técnica pode ser medida e avaliada em função de critérios previamente definidos. Neste caso a manutenção é realizada apenas quando uma mudança na condição do equipamento justifica a tomada de ações (CIGRE, 2011, p. 5).

Já na TBM a manutenção é realizada em intervalos de tempo predeterminados, com o objetivo de reduzir a probabilidade de um item do equipamento falhar em serviço (CIGRE, 2011, p. 5). Muitas vezes o monitoramento da condição é realizado em intervalos de tempo previamente planejados resultando em um monitoramento da condição baseado no tempo (TBCM) o que é muito comum em transformadores de potência (CIGRE, 2011, p. 5).

O monitoramento on-line é um método em que as medições ou avaliações podem ser realizadas com o transformador em operação fornecendo informações sobre o seu estado ou condição. Isso pode incluir amostragem de óleo para análise de gases dissolvidos em laboratório, realização de inspeções termográficas para verificação de aquecimentos anormais, ou simples observações tais como os níveis de óleo em buchas condensivas e no conservador do transformador.

Existe ainda a técnica de monitoramento on-line contínuo na qual as medições são continuamente realizadas e supervisionadas, em intervalos de tempo configuráveis, por meio de um dispositivo eletrônico inteligente (IED). Os dispositivos são normalmente conectados em rede de modo que as leituras são disponibilizadas em tempo real, viabilizando tomadas de decisões ágeis que podem evitar falhas críticas dos ativos (CIGRE, 2011, p. 5).

Atualmente, com o avanço tecnológico, existem no mercado diversos dispositivos para monitoramento on-line contínuo de transformadores, que podem supervisionar grandezas como temperaturas de óleo e enrolamentos, gases dissolvidos e umidade no óleo isolante, tangente de delta e capacitância de buchas, nível de óleo isolante, descargas parciais, para citar os mais importantes.

Contudo, como a inserção destes dispositivos envolve custos adicionais ao ciclo de vida do transformador, o proprietário deve sempre avaliar a criticidade do ativo, em especial as consequências de uma eventual falha, para decidir sobre quais monitoramentos contínuos devem ser implantados, tendo em vista que monitorar criteriosamente uma frota completa de transformadores pode ter um custo proibitivo. A regra é: quanto mais alta a criticidade do ativo maior deverá ser o grau de observabilidade de sua condição.

A figura 25 demonstra uma condição teórica de degradação de um transformador em função do tempo. Neste gráfico três pontos importantes podem ser observados (CIGRE, 2011, p. 10):

- No ponto X, a condição ainda é satisfatória, mas está começando a mudar;
- No ponto Y, a condição mudou o suficiente para ser detectada por uma técnica de diagnóstico específica;
- No ponto Z, a condição se deteriorou suficientemente para causar a falha do transformador.

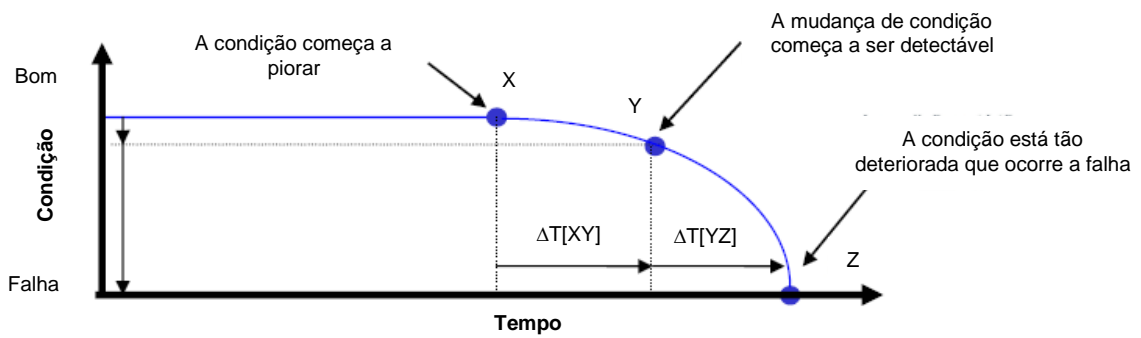


Figura 25: Curva teórica de degradação da condição de um transformador (CIGRE, 2011, p. 10).

Para ser tecnicamente viável, uma tarefa de monitoramento da condição de um transformador de potência deve ser capaz de (CIGRE, 2011, p. 10):

- i. detectar uma determinada mudança na condição que é relativamente pequena quando comparada com a mudança na condição em que a falha ocorre;
- ii. possuir um intervalo de medição ou inspeção menor que $\Delta T[XY] + \Delta T[YZ]$ para permitir a detecção da mudança de condição antes que a falha ocorra;
- iii. possibilitar a detecção da mudança de condição em um intervalo de tempo $\Delta T[YZ]$ suficientemente longo para viabilizar a tomada de ação preventiva (p.ex. retirar o transformador de operação).

O monitoramento do final da vida útil do transformador de potência é de especial interesse para a metodologia da Gestão de Ativos, pois possibilita o acompanhamento de fatores críticos que podem abreviar a vida do transformador, bem como permite a implementação de medidas que possam prolongar o tempo em serviço destes ativos. Além disso, acompanhar a perda de vida do transformador ao longo do tempo viabiliza o planejamento estratégico de ações para a extensão de vida útil ou de substituição do ativo que demandam um investimento intensivo de capital.

Do ponto de vista ambiental, a decisão de executar a reforma do transformador ou qualquer outra ação que vise a extensão de sua vida útil ou de realizar a substituição do ativo por outro de características técnicas semelhantes pode representar um impacto nos indicadores de ESG, caso, por exemplo, haja alguma estratégia relacionada ao mercado de carbono.

4.3 Mecanismos de envelhecimento dos transformadores de potência

Os principais aspectos do envelhecimento dos transformadores de potência imersos em líquido isolante estão relacionados com a degradação do isolamento sólido (papel isolante) e líquido (óleo isolante), que afetam as suas propriedades dielétricas e mecânicas (CIGRE, 2022, p. 63). O envelhecimento dos materiais é um processo natural que não pode ser completamente evitado.

Conhecer os mecanismos que promovem a degradação acelerada dos materiais que compõem o isolamento do transformador, evitando-os ou mitigando suas consequências, é de grande importância por dois fatores: i) podem prolongar a vida útil para além da expectativa inicial; e ii) podem reduzir a necessidade de troca ou extensão da vida útil antes do esperado. Ou seja, agir com precaução quanto aos agentes que causam o envelhecimento do transformador representa obter ganhos financeiros ao longo do ciclo operacional do ativo.

Os principais agentes que causam o envelhecimento do isolamento do transformador são: temperatura, água e oxigênio. De acordo com estudos citados em CIGRE (2022) um aumento de temperatura entre 6 e 8 graus resultará na perda de metade da vida útil do isolamento celulósico do transformador. Além disso, em temperaturas acima de 150°C, que podem ocorrer por exemplo em regime de sobrecarga, a degradação do papel e do óleo por pirólise torna-se mais dominante e o consumo de vida do transformador aumenta rapidamente.

Conforme descrito em CIGRE (2008), as três principais fontes de água relevantes para o envelhecimento do isolamento do transformador são: i) umidade residual proveniente da secagem em fábrica; ii) umidade que ingressa da atmosfera por falha nos sistemas selagem e vedação (vazamentos em juntas ou membranas); e iii) decomposição da celulose e degradação do óleo ao longo da vida útil do transformador.

Tal como em uma reação em cadeia, a água é ao mesmo tempo um subproduto da degradação do óleo e da celulose e um dos principais indutores desta reação de degradação denominada de hidrólise. A partir de 0,5% em peso, cada vez que o teor de umidade dobra, a taxa de degradação da celulose também dobra. Até 120°C, este é o mecanismo de envelhecimento predominante para os transformadores imersos em óleo isolante (CIGRE, 2022, p. 64).

Além disso, se o meio interno do transformador contiver alta concentração de oxigênio, que geralmente é proveniente do ar atmosférico quando entra em contato com o óleo isolante, a degradação do papel será de 6 a 10 vezes mais rápida por meio das reações de oxidação (CIGRE, 2022, p. 64).

O processo de oxidação do óleo ocorre quando o oxigênio entra em combinação com os hidrocarbonetos instáveis na presença dos catalisadores existentes no transformador, que são a água, o cobre dos enrolamentos e o ferro do núcleo. O calor é um agente acelerador da oxidação do óleo: quanto maior a temperatura maior será a velocidade de sua oxidação (MILASCH, 1984).

De acordo com pesquisa mencionada em MISLACH (1984), o processo de oxidação do óleo se desenvolve conforme dois ciclos. No primeiro há a formação de produtos solúveis da deterioração do óleo, principalmente ácidos. No segundo ocorre a transformação dos produtos solúveis em produtos insolúveis, que compõem o sedimento.

O sedimento ou borra, presente no óleo oxidado (envelhecido) pode se depositar sobre a isolação sólida, núcleo e bobinas, obstruindo, em casos mais severos, as passagens de circulação do óleo, sendo uma condição que prejudica a refrigeração da parte ativa. A consequência prática desta situação é o aumento da temperatura de operação do transformador, acelerando tanto a oxidação do óleo quanto a deterioração do papel isolante (MILASCH, 1984).

Os três mecanismos de degradação mencionados (hidrólise, oxidação e pirólise) ocorrem simultaneamente durante a vida do transformador. Avaliar qual destes processos contribuirá mais significativamente para a perda de vida útil do transformador não é uma tarefa simples e dependerá de alguns fatores, tais como: do projeto do transformador, da temperatura ambiente, do tipo de líquido de isolante, das condições operacionais, dentre outras. Podem ainda ocorrer efeitos sinérgicos entre as diferentes reações fazendo com que a oxidação ative a hidrólise, por exemplo, o que é bastante comum (CIGRE, 2022, p. 64).

Por fim, pode-se concluir que o envelhecimento do transformador está diretamente relacionado à deterioração de seu isolamento sólido e líquido, que ocorre por meio de um processo complexo combinado de três reações químicas principais catalisadas pela temperatura, pela água e pelo oxigênio. Prolongar a vida útil do transformador, portanto, significa provê-lo de estruturas que reduzam os

efeitos da incidência destes agentes sobre o seu isolamento, e, conseqüentemente, preserve por mais tempo a funcionalidade da sua parte ativa.

4.4 Requisitos para a determinação do final da vida útil dos transformadores de potência

Um bem é considerado inservível quando não puder desempenhar satisfatoriamente a função a que se destina, a qual é a razão da sua existência física. Nos termos do art. 2º do Anexo IV da Resolução Normativa nº 948/2021 da ANEEL, um bem é inservível quando por razões de ordem técnica ou operacional não mais se encontra apto, útil ou necessário à adequada prestação dos serviços de energia elétrica. Em linhas gerais, pode-se dizer que o fim de vida útil do transformador é alcançado quando ele não atende mais aos seus requisitos, principalmente com base nos resultados de avaliações técnicas e econômicas.

De acordo CIGRE (2022, p. 17), o fim de vida de um transformador pode ser dividido em três subcategorias:

- a) Fim da vida funcional: significa que o ativo deve ser substituído, pois não é mais “adequado à finalidade”. Este caso está relacionado a: i) suportabilidade de curto-circuito; ii) aumento de tensão de serviço; e iii) aumento de carga suportável;
- b) Fim da vida econômica: ocorre quando um ativo deve ser substituído, pois não é mais econômico continuar em sua posição atual. Este caso está relacionado a: i) custos de operação e manutenção; e ii) fim da vida útil por requisitos regulatórios;
- c) Fim de vida confiável: ocorre quando o ativo é considerado inadequado ou inutilizável, ou seja, quando falhas ou risco de falhas tornam-se inaceitáveis. Este caso está relacionado a: i) motivos de segurança ou proteção devido à localização do ativo; ii) impacto a clientes devido à baixa confiabilidade do ativo; e iii) questões ambientais devido ao risco de contaminação do meio ambiente.

A vida útil projetada do transformador de potência é geralmente definida pelos fabricantes para um período entre 25 e 40 anos. O grau elevado de incerteza quanto a este aspecto está relacionado, principalmente, com as condições operacionais e ambientais as quais o transformador estará submetido ao longo de sua vida. Existem transformadores no setor elétrico brasileiro, por exemplo, que estão em operação há mais de 50 anos, ou seja, além do que seria tecnicamente esperado.

No Brasil, o Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico (MCPSE), instituído pela Resolução Normativa 674/2015 da Agência Reguladora de Energia Elétrica (ANEEL), estabeleceu a vida útil de um transformador de potência em 35 anos com base em uma taxa linear de depreciação (2,86% ao ano) (ANEEL, 2015). Na perspectiva regulatória brasileira esta é a duração máxima de utilização do ativo. O critério foi definido com base em estudos e pesquisas realizadas pelo órgão regulador, em parceria com os demais agentes setoriais, considerando critérios técnicos (condição de uso, obsolescência e manutenção) e econômicos (VENDRAMETO, 2023, p. 21).

É premente frisar que a vida útil regulatória é uma referência sob a ótica econômico-financeira para o setor regulado, e revela-se importante para balizar a gestão dos ativos em concessão, definição de condições contratuais e investimentos em renovação da frota, porém ela não coincide necessariamente com a vida útil técnica (funcional ou confiável) que está relacionada aos aspectos físicos da condição e capacidade do ativo (VENDRAMETO, 2023, p. 21).

A vida útil técnica de um transformador de potência está diretamente relacionada à condição do sistema de isolamento papel-óleo, que deve ser capaz de suportar: i) os elevados estresses eletromecânicos em condições sistêmicas transitórias; e ii) as altas temperaturas durante o regime permanente de operação do transformador (CIGRE, 2019b, p. 22). O óleo isolante ao se degradar pelo uso no transformador e atingir o seu final de vida útil pode ser completamente substituído ou regenerado para restabelecer suas propriedades físico-químicas.

Em contrapartida, substituir o papel isolante envelhecido que reveste as espiras de cobre dos enrolamentos do transformador é uma tarefa tecnicamente complexa e economicamente inviável. Nestes casos a ação normalmente adotada é realizar a substituição dos próprios enrolamentos, caso seja mais vantajoso quando comparada com a substituição integral do transformador. Portanto, a condição do papel isolante é o fator crítico para a determinação do final de vida útil do transformador de potência (CIGRE, 2022, p. 16) (CIGRE, 2018, p. 7).

O principal constituinte das fibras de papel isolante é a celulose, um polímero orgânico composto, quando novo, por cadeias de 1000 a 1200 anéis de glicose. O número de anéis de glicose, que compõem as cadeias de celulose, é definido como grau de polimerização do papel (GP). O rompimento das cadeias macromoleculares da celulose leva a uma diminuição do GP do papel, e

conseqüentemente, ao enfraquecimento das fibras e alteração de suas propriedades mecânicas. Desta forma, o grau de polimerização é um indicador valioso que fornece informações sobre o estado de degradação da celulose e sua resistência mecânica (CIGRE, 2019b, p. 24).

Ao longo das últimas décadas tem sido utilizado na fabricação de transformadores o papel tipo *Kraft* termoestabilizado, que recebe um tratamento químico cujo propósito é neutralizar a produção de ácidos causados pela hidrólise (degradação térmica) da celulose quando é submetida a elevadas temperaturas. Resultados de pesquisas públicas indicam que papéis isolantes termoestabilizados retêm um percentual maior de sua capacidade tensional e de rompimento do que papéis não tratados quando expostos a elevadas temperaturas (ABNT, 2017, p. 8). A tabela 2 demonstra a vida estimada para o papel isolante comum e para o papel termoestabilizado sob condições diversas.

Tabela 2: Vida do papel isolante sob condições variadas (ABNT, 2017, p. 9).

Tipo de papel/temperatura de envelhecimento		Vida (em anos)	
		Seco e livre do ar	Com ar e 2 % de umidade
Polpa de papel a	80 °C	118	5,7
	90 °C	38	1,9
	98 °C	15	0,8
Polpa de papel termoestabilizado a	80 °C	72	76
	90 °C	34	27
	98 °C	18	12

A má qualidade do papel isolante pode ocasionar a degradação prematura do isolamento, que por sua vez pode levar à falha do transformador. À medida que o papel envelhece no transformador em serviço, ele vai se tornando tão frágil que pequenos esforços mecânicos podem provocar a sua quebra e ocasionar uma falha elétrica, visto que a função primária do papel é garantir a isolação elétrica entre as espiras das bobinas do transformador. Como a fadiga mecânica, provocada pelo enfraquecimento das fibras da celulose, ocorre antes que o papel perca por completo sua função dielétrica, a sua capacidade de resistir a tração mecânica é a característica mais relevante para a finalidade de avaliar o seu fim de vida útil (CIGRE, 2019b, p. 25).

O critério baseado no GP do papel apresenta boa correlação com as propriedades mecânicas, mas exige o desligamento e abertura do transformador

para a retirada da amostra. Além disso, a escolha do local de amostragem é um fator crítico. Sempre que possível, as amostras devem ser colhidas nas regiões de temperaturas mais elevadas da parte ativa (*hot-spots*), que, normalmente, são de difícil acesso. Além disso, a retirada das amostras exige cautela e a reposição do papel retirado para amostragem (ensaio destrutivo). O valor do GP utilizado como referência para estabelecer o fim de vida útil do papel isolante tem variado na literatura especializada entre 200 e 300 monômeros de glicose (CIGRE, 2022, p. 16); (ABNT, 2017, p. 11).

A determinação do grau de polimerização é realizada por meio do ensaio denominado grau viscosimétrico médio de polimerização (GPv) em que uma amostra do papel (de 50 a 100mg) é dissolvida em uma solução de cuprietenodiamina. A viscosidade da solução é determinada utilizando-se um viscosímetro capilar. A partir deste resultado, o grau de polimerização é calculado usando equações e constantes estabelecidas experimentalmente que podem ser encontradas nas normas técnicas ASTM D-4243 e IEC 60564 (CIGRE, 2007, p. 59).

Muito embora a medição do GPv seja um bom indicador da condição de envelhecimento do isolamento sólido, obter as amostras de papel para ensaio de um transformador em serviço é uma tarefa extremamente complexa e de custo elevado, pois depende do desligamento e abertura do equipamento para inspeção. Por esta razão, ao longo das últimas décadas, foram desenvolvidas algumas técnicas para avaliar de forma indireta a deterioração do isolamento celulósico do transformador (CIGRE, 2019b, p. 27).

O trabalho consiste em medir alguns subprodutos da degradação do papel contidos no óleo correlacionando-os com o estado de envelhecimento do papel. O objetivo principal é estabelecer uma relação entre o teor destes subprodutos no óleo com o GP do papel, que são denominados de marcadores químicos de envelhecimento do isolamento celulósico (CIGRE, 2019b, p. 27).

É preciso destacar que os métodos indiretos para a avaliação e diagnóstico do papel isolante dos transformadores em serviço são extremamente úteis por três razões: i) a sua execução não depende do desligamento do transformador, basta colher e analisar amostras de óleo periodicamente; ii) têm um custo razoavelmente baixo quando comparados ao processo de amostragem e ensaio do papel; e iii) possibilitam, dentro de suas limitações, um diagnóstico progressivo e antecipado da vida útil do papel.

Dentre os marcadores químicos de envelhecimento da celulose abordados na literatura especializada, os mais comumente utilizados são: a relação gasosa entre o CO e o CO₂ dissolvidos no óleo isolante; o teor de compostos furânicos; e o teor de álcoois (etanol e metanol).

A geração de monóxido de carbono e dióxido de carbono a partir do envelhecimento do papel é um fenômeno conhecido pela indústria de transformadores desde o início da década de 1930. No entanto, a medição destes gases como ferramenta de monitorização da condição do papel isolante tem sido amplamente utilizada a partir da década de 1970, levando à inclusão destes dois gases nas primeiras normas internacionais acerca da interpretação de medições de gases dissolvidos. O CO e o CO₂ podem ser extraídos do óleo por diversos métodos, sendo os mais utilizados atualmente a extração a vácuo e o *headspace*. A quantificação dos gases dissolvidos no óleo, normalmente, é feita pelo método de gás-cromatografia (CIGRE, 2019b, p. 27).

Quanto à análise dos gases dissolvidos (AGD), a norma IEC 60599, por exemplo, recomenda uma relação CO₂/CO entre 3 e 10 como faixa normal aceita para um transformador em serviço (IEC, 2022, p. 15). Já a norma IEEE Std C57.104 sugere uma faixa de normalidade entre 3 e 20 (IEEE, 2019, p. 69).

Entretanto, a interpretação da condição do papel pela relação CO₂/CO requer, além da experiência do analista, a observância de outros fatores, tais como a concentração absoluta dos gases CO₂ e CO, a taxa de geração de outros gases hidrocarbonetos, a condição de oxidação do óleo isolante e o tipo de sistema de preservação de óleo do transformador (se aberto ou selado) (CIGRE, 2019b, p. 27).

Os compostos furânicos foram identificados pela primeira vez como indicadores de envelhecimento do papel de transformadores no início da década de 1980. Os estudos demonstram que seis compostos furânicos estão relacionados com o potencial indicador de envelhecimento do papel, são eles: 2-furfural (2-FAL), 2-acetilfurano (2-ACF), ácido 2-furóico, 5-metil-2-furfural (5-MEF), álcool 2-furfurílico (2-FOL) e 5-hidroximetil-2-furfural (5-HMF). Dentre estes, o 2-FAL é mais utilizado devido à sua maior estabilidade e disponibilidade em concentrações mais elevadas no óleo (CIGRE, 2019b, p. 28).

A produção de 2-FAL geralmente está associada ao superaquecimento ou ao envelhecimento normal da celulose, como também está relacionada à deterioração acelerada do papel por meio das reações de hidrólise e pirólise

(CIGRE, 2019b, p. 28). A medição do teor de compostos furânicos no óleo do transformador frequentemente é realizada por técnicas de laboratório que utilizam análise por cromatografia líquida por serem menos complexas e de baixo custo (CIGRE, 2007, p. 48).

Quanto à correlação entre a concentração de 2-FAL no óleo e o grau de polimerização (GPv) do papel, alguns estudos mencionados em CIGRE (2019b) apontam para uma relação logarítmica regida pela seguinte equação:

$$\text{Log}_{10}[2\text{-FAL}] = A - B \times [\text{GPv}]$$

Em que [2-FAL] é a concentração de 2-FAL medida no óleo isolante do transformador, [GPv] é a estimativa do grau de polimerização do papel, A e B são constantes escolhidas de acordo com o método de cálculo conforme tabela abaixo.

Tabela 3: Constantes para a estimativa de GPv (CIGRE, 2019b, p. 31).

	Unidade teor 2-FAL	A	B
Burton	mg/g papel	0,714	0,0036
Shroff	mg/l	97,08	0,1239
Chengdong	mg/l	1,51	0,0035
Pahlavanpour	µg/kg	4,4394	0,0046

Apesar de ser um bom indicativo para a estimativa do GPv do papel, é possível perceber que os métodos citados não convergem entre si, tendo em vista que as constantes foram determinadas de modo experimental. Logo, para a avaliação da vida útil do papel de transformadores em serviço, é recomendável lançar mão de outras metodologias, tais como a análise comparativa entre a concentração de compostos furânicos para uma grande população de transformadores utilizando valores limites estabelecidos com base em análises estatísticas ou uma análise de tendência da concentração de compostos furânicos ao longo do tempo (CIGRE, 2019b, p. 32).

É preciso destacar, por fim, que os estudos sobre compostos furânicos como subprodutos da deterioração da celulose em transformadores apontam para uma baixa assertividade do método quando o papel utilizado é do tipo termoestabilizado (CIGRE, 2019b, p. 30). Neste caso, metodologias complementares devem ser utilizadas para avaliar a condição do isolamento.

Pesquisas relacionadas ao uso do etanol e do metanol como indicadores do envelhecimento do isolamento de transformadores vêm sendo desenvolvidas desde 2007 quando a primeira proposta para esta finalidade foi formulada, porém um método padrão para quantificá-los no óleo do transformador ainda está em desenvolvimento (CIGRE, 2019b, p. 32).

As principais vantagens da utilização de álcoois como indicadores do envelhecimento o papel em relação ao método do 2-FAL são: i) detectar precocemente a degradação do isolamento celulósico; e ii) possibilitar uma avaliação mais assertiva da condição do papel isolante termoestabilizado (CIGRE, 2019b, p. 47).

Apesar da ausência de normas técnicas padronizando a metodologia, a avaliação do papel isolante com base na concentração de álcoois (etanol e metanol) no óleo isolante é uma técnica promissora e vem sendo utilizada em diversos países (CIGRE, 2019b, p. 45) como ferramenta auxiliar da gestão do ciclo de vida dos transformadores de potência, porém ainda se faz necessária uma validação da técnica por parte da comunidade científica.

5 ECONOMIA CIRCULAR ASSOCIADA AOS PROCESSOS DE EXTENSÃO DE VIDA ÚTIL E DESCARTE DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Quando determinado ativo de produção se aproxima do final de sua vida útil algumas decisões precisam ser tomadas. A principal questão, do ponto de vista da Gestão de Ativos, conforme foi discutido no capítulo anterior, diz respeito a decisão entre manter o ativo em serviço mediante ações que prolonguem sua vida útil ou substituí-lo por outro de mesmas características. De acordo com o Manual de Contabilidade do Setor Elétrico, vida útil é o período durante o qual se espera que um ativo depreciável seja utilizado pela empresa (ANEEL, 2022, p. 768).

Para transformadores com idade avançada os riscos podem se tornar críticos devido (CIGRE, 2023, p. 41): i) ao aumento da probabilidade de falha; ii) aos elevados custos de manutenção; iii) à falta de peças sobressalentes; iv) aos impactos negativos no desempenho do sistema e aplicações de penalidades regulatórias. Desta forma, caso a probabilidade de falha seja tão elevada que possa afetar o desempenho do transformador a curto prazo, será necessária a realização de uma intervenção corretiva específica que deverá ser implementada para garantir a operação segura do ativo.

Para uma frota de transformadores, a decisão entre substituir alguns equipamentos ou executar ações de extensão de vida útil em outros, deve ser justificada individualmente considerando os seguintes aspectos (CIGRE, 2022, p. 21): i) condição dos ativos; ii) diretrizes regulatórias; iii) viabilidade econômica e financeira; e iv) fatores relacionados à sustentabilidade ambiental.

5.1 Extensão da vida útil de transformadores de potência

Conforme foi explanado no capítulo 2, a extensão de vida útil é um modelo de negócio eminentemente circular que resulta em maior valor agregado à organização com a otimização do uso de recursos extraídos do ambiente. Desta forma, materiais ou componentes que antes seriam descartados, podem ser reaproveitados e reinseridos na cadeia produtiva através de processos de manutenção, reparo e melhoria, reduzindo a necessidade de extração e beneficiamento de recursos naturais, e, conseqüentemente, aumentando a sustentabilidade ambiental do negócio.

De acordo com CIGRE (2022, p. 17) a extensão da vida útil pode ser definida como “um conjunto de grandes intervenções em um transformador, além da manutenção e reparo ‘normais’, para solucionar seus problemas, restaurar sua condição e adiar o fim previsto da vida funcional, econômica ou confiável. É aplicável, mas não limitada, a transformadores envelhecidos com ou sem defeitos ou falhas funcionais ou com falha”. Ainda de acordo com CIGRE (2022, p. 18), as ações de manutenção executadas em um transformador, que visem ou não a extensão de vida, são as seguintes:

- Revisão geral (*overhaul*): conjunto abrangente de ações de manutenção preventiva realizadas, a fim de manter o nível exigido de desempenho de um item;
- Reparo (*repair*): ação física tomada para restaurar a função necessária de um item defeituoso;
- Reconstrução (*rebuilding*): ação que se segue ao desmantelamento de um bem e à reparação ou substituição de peças, que se aproximam do fim da sua vida útil e/ou devem ser regularmente substituídos de forma a dotar o bem de uma vida útil prolongada. O objetivo é prover uma vida útil estendida a peças ou subitens do ativo;
- Reforma (*refurbishment*): reconstruir aplicando material novo; para restaurar o ativo às suas condições originais (ou melhores);
- Recondicionamento de meia-vida (*mid-life refurbishment - MLR*): é um processo para melhorar ou estender a vida útil do transformador e manter desempenho e confiabilidade similares.

No caso do presente trabalho a extensão de vida útil será considerada como um conjunto de manutenções realizadas no transformador que tenham como objetivo restaurar as suas condições originais de projeto e melhorar o seu desempenho técnico e operacional. Tais intervenções são também denominadas de ações de revitalização do transformador.

5.1.1 Intervenções no óleo isolante

São ações de manutenção que têm como objetivo remover ou reduzir componentes indesejados no óleo isolante do transformador ou aplicar aditivos que tenham um efeito positivo no líquido isolante ou nas superfícies internas do

transformador. Estas intervenções reduzem o efeito do envelhecimento do isolamento do transformador, e, por esta razão, podem ser consideradas como ações de extensão de vida útil. São elas: secagem do óleo isolante, a regeneração do óleo isolante e a substituição do óleo isolante (CIGRE, 2022, p. 81); (CIGRE, 2013, p. 155).

A secagem do óleo isolante é executada sempre que os valores de umidade monitorados periodicamente excedem valores recomendados em normas específicas. Neste caso, o processo de acondicionamento do óleo é executado por um tipo de equipamento específico que realiza a secagem por aquecimento e aplicação de vácuo, cujo método é denominado de tratamento termovácuo e pode ser realizado com o transformador energizado (CIGRE, 2022, p. 81); (CIGRE, 2013, p. 155).

A regeneração é um processo que elimina ou reduz contaminantes polares solúveis e insolúveis do óleo por processamento químico e físico restabelecendo suas propriedades físico-químicas (ABNT, 2017, p. 26). Este processamento pode ser realizado com o transformador em operação por meio de equipamentos específicos que utilizam materiais adsorventes naturais como o óxido de alumínio (CIGRE, 2022, p. 83).

A principal vantagem da regeneração em comparação com a substituição do óleo isolante é o baixo custo (CIGRE, 2022, p. 84). Entretanto, é preciso destacar que a regeneração é uma medida benéfica ao meio ambiente e de base circular, pois evita a extração de recursos naturais, neste caso, de insumos não renováveis, já que o óleo mineral isolante é produzido a partir do refino de petróleo.

A substituição do óleo do transformador não deve ser considerada a primeira escolha quando se trata de melhorar as características físico-químicas. Em quase todos os casos, onde as características do óleo não atendem aos requisitos, a secagem ou um processo de regeneração serão a melhor solução. O reaproveitamento do óleo mineral isolante deve ser a primeira escolha quando se trata de aspectos ambientais conforme já mencionado. Ademais, a regeneração é um procedimento que promove a extensão de vida útil do óleo isolante (CIGRE, 2022, p. 88).

Contudo, em alguns casos, a troca do óleo pode ser requerida, como em situações em que há contaminação por PCB¹⁷ (CIGRE, 2022, p. 86) ou por enxofre corrosivo, ou para óleos minerais que passaram por processo de regeneração seguidas vezes e não conseguem mais desempenhar o papel de fluido isolante adequadamente.

5.1.2 Secagem da parte ativa

A condição de envelhecimento do isolamento sólido é essencial para a confiabilidade de um transformador de potência a longo prazo. Dentre os fenômenos de envelhecimento, a umidade no isolamento sólido e líquido resulta em diversos problemas, conforme visto anteriormente, pois diminui a rigidez dielétrica, acelera a decomposição da celulose e causa a emissão de bolhas em altas temperaturas (CIGRE, 2022, p. 90).

Assim, a secagem do isolamento sólido localizado na parte ativa é uma medida importante para prolongar a vida útil de um transformador (CIGRE, 2022, p. 90). Existem diversos métodos que podem ser empregados para a secagem da parte ativa de um transformador, dentre eles o mais utilizados são (CIGRE, 2013, p. 150): circulação de óleo quente, aplicação de vácuo, aplicação alternada de circulação de óleo quente e vácuo, aspersão de óleo quente (*hot oil spray*), aquecimento em baixa frequência (*low frequency heating*) e aplicação de vapor de solvente sob vácuo (*vapour phase*).

5.1.3 Restauração do sistema de vedação

Vazamentos de óleo isolante são um dos motivos mais frequentes para a execução de trabalhos corretivos em transformadores. A perda de estanqueidade do tanque do transformador, geralmente, é causada pelo envelhecimento das gaxetas de vedação. Com a ação das intempéries, dos raios ultravioletas e da temperatura, as borrachas de vedação vão progressivamente perdendo suas propriedades mecânicas e a capacidade de conter o óleo (CIGRE, 2022, p. 94).

Vazamentos também podem acontecer por erros de montagem ou por falha na especificação das gaxetas de vedação. Podem ainda ocorrer vazamentos

¹⁷ *Polychlorinated biphenyls* ou bifenilas policloradas em português.

no tanque em pontos que sofreram corrosão significativa, como é comum se verificar nas aletas dos radiadores.

A restauração da vedação e o tratamento anticorrosivo são ações importantes para prevenir a degradação do transformador, pois como visto no capítulo 4, a preservação da estanqueidade evita a entrada de ar atmosférico e umidade para o interior do transformador, ação que possibilita a redução da degradação do papel por hidrólise e oxidação, sendo uma medida crucial para a preservação e o aumento da vida útil do transformador. Além disso, é extremamente necessário evitar o impacto que o derramamento de óleo isolante pode causar ao meio ambiente, como a contaminação de lençóis freáticos.

5.1.4 Substituição de componentes

Se o fim da vida útil estimada de um componente for menor que a vida estimada do próprio transformador a troca ou modernização deste componente pode ser considerada uma ação de prolongamento da vida útil (CIGRE, 2022, p. 97). O mesmo ocorre se a taxa de falha de um determinado componente do transformador aumenta consideravelmente em função do tempo, pois neste último caso a vida útil é estendida quando uma falha catastrófica do ativo, que pode levar à sua perda total, é evitada.

A substituição de componentes também pode ser requerida por obsolescência, por falta de peças de reposição ou para aumentar confiabilidade em função de uma tecnologia mais avançada disponibilizada no mercado. Os componentes mais críticos que podem ser substituídos antes do fim da vida do transformador são as buchas e o comutador de derivações em carga (OLTC).

De acordo com um levantamento citado em CIGRE (2022, p. 98), o comutador ocupa o segundo lugar no ranking de causa de falhas em transformadores, e as buchas capacitivas ocupam o terceiro lugar. Uma pesquisa de campo realizada em CIGRE (2019a, p. 36) demonstra estatisticamente que a taxa de falha das buchas de um transformador aumenta progressivamente com o tempo (ver figura 26). Geralmente, a falha de uma bucha ocasiona danos de grande magnitude no transformador e em casos mais severos pode ocasionar o sinistro e a perda total do ativo.

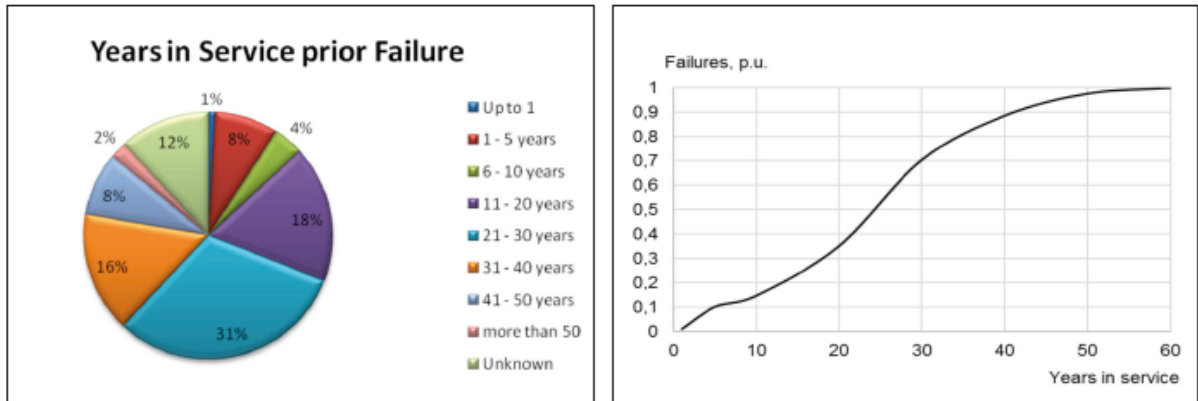


Figura 26: Taxa de falhas de buchas em função do tempo (CIGRE, 2019a, p. 36)

Observa-se, portanto, que a substituição estratégica de buchas pode ter um impacto positivo na confiabilidade do transformador, aumentando assim potencialmente a vida útil do ativo. O mesmo raciocínio vale para o OLTC, que é um componente mecânico complexo, dotado de partes móveis, cuja função é interromper a corrente de carga do transformador durante as comutações. Normalmente, a substituição de peças ou até mesmo do OLTC completo depende da quantidade de comutações realizadas, sendo este um componente que deve ser acompanhado por um rigoroso programa de manutenção.

Vale ressaltar que, antes de qualquer substituição ou modernização de componentes, é recomendável uma avaliação geral da condição do transformador para constatar se o investimento vale a pena (CIGRE, 2022, p. 97). Uma troca de bucha ou modernização do OLTC, por exemplo, talvez não faça sentido se o papel isolante for diagnosticado com elevado grau de deterioração.

5.1.5 Reforma do transformador

A substituição de enrolamentos é o método mais complexo para se prolongar a vida útil de transformadores de potência. Quando todos os enrolamentos são substituídos, juntamente com as buchas, o comutador de derivações em carga e é realizada a modernização dos sistemas auxiliares de supervisão e controle, pode-se afirmar que o transformador passou por um processo completo de revitalização, cujo custo do reparo pode ser de até 75% do valor de aquisição de um transformador novo (CIGRE, 2022, p. 113).

De acordo com informações fornecidas pela empresa Data Engenharia¹⁸, com base em dados estatísticos da Fundação COGE¹⁹, tendo em vista o aumento do custo de fabricação do núcleo e do tanque entre janeiro de 2020 e setembro de 2022, o custo estimado de uma reforma pode ficar em entre 45% e 55% do valor de um transformador novo. Esta é uma alternativa interessante tanto pelo viés econômico, quanto pelo viés ambiental, uma vez que componentes intensivos em recursos, como o núcleo e o tanque, são reaproveitados.

Do ponto de vista econômico, os custos de manutenção do transformador podem ser classificados como OPEX ou CAPEX. A sigla OPEX significa despesas operacionais (*operational expenditure*) que incluem todos os custos contínuos para operar e manter um sistema e são contabilizados na conta de lucros e perdas da empresa. Por exemplo, a manutenção de rotina ou manutenção corretiva durante a vida útil de um transformador é geralmente considerada como OPEX (CIGRE, 2022, p. 24). Por outro lado, CAPEX é a sigla para despesas de capital (*capital expenditure*), que é o capital que uma empresa aplica nos seus ativos fixos, por exemplo, quando novos ativos são comprados ou quando a vida útil de um ativo é significativamente prolongada. O CAPEX está vinculado ao valor contábil de um ativo e é altamente relevante para as demonstrações financeiras da empresa. A compra e instalação de um transformador novo é claramente CAPEX (CIGRE, 2022, p. 24).

Muitas vezes a classificação contábil das despesas efetuadas com os ativos depende de regulamentações governamentais específicas. Para os ativos sob concessão de serviço público de energia elétrica, as reformas realizadas podem ser reconhecidas e contabilizadas como investimento (CAPEX) pela agência reguladora de energia elétrica (ANEEL), conforme regras estabelecidas pelo Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico (MCPSE) e pelo Manual de Contabilidade do Setor Elétrico (MCSE). Os investimentos realizados nesses casos serão reconhecidos nas tarifas representando uma receita para as empresas detentoras das concessões (VENDRAMETO, 2023, p. 22).

Entretanto, caso a reforma não seja reconhecida, os custos serão tratados como despesas de manutenção (OPEX). O MCSE (ANEEL, 2022, p. 30) estabelece que, sempre que um bem sofrer um reparo, reforma ou transformação

¹⁸ Disponível em: <<https://www.data.com.br/>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

¹⁹ Disponível em: <<https://formulascope.org.br/>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

que resulte na alteração da vida útil, o valor será imobilizado em adição ao valor residual do ativo e a contagem da vida útil regulatória deverá ser reiniciada conforme taxa de depreciação prevista no MCPSE (VENDRAMETO, 2023, p. 22).

Porém, existe uma ressalva: a imobilização do valor investido com a reforma do ativo será contabilizada desde que seja suportada por laudo técnico emitido pela reformadora que ateste tal circunstância (ANEEL, 2022, p. 30). Portanto, do ponto de vista econômico, realizar a reforma do transformador com extensão de vida útil pode ser um excelente negócio para uma empresa que atua no ambiente regulado de concessão de serviço público no setor elétrico.

Para efeitos de classificação contábil, o MCPSE (ANEEL, 2015, p. 133) estabelece que o custo com a substituição dos seguintes itens será considerado CAPEX:

- Um transformador de força ou um autotransformador;
- Um motor de potência igual ou superior a 7,5 c.v.;
- Uma bomba requerendo acionador de potência igual ou superior a 7,5 c.v.;
- Um comutador sob carga;
- Um conjunto de buchas de mesma classe de tensão igual ou superior a 15kV ou 1000A;
- Um sistema de monitoramento;
- Um sistema de selagem/selamento;
- Um dispositivo de proteção;
- Um para-raios de classe de tensão igual ou superior a 34,5 kV;
- Um relé regulador de tensão;
- Um tanque para transformadores de potência igual ou superior a 20 MVA;
- Um conjunto de radiadores para transformadores com potência inferior a 50 MVA;
- Um radiador para transformadores de potência igual ou superior a 50 MVA;
- Um comutador para transformador de classe de tensão igual ou superior a 69 kV;
- Um conjunto de trocadores de calor para transformadores com potência inferior a 50 MVA;
- Um trocador de calor para transformadores com potência igual ou superior a 50 MVA;
- Um sistema de filtragem de óleo do comutador;

- Uma caixa de controle.

Do ponto de vista ambiental, a reforma do transformador de potência pode ser considerada uma ação mitigadora da emissão de gases de efeito estufa (GEE). Como exemplo, será utilizado um transformador de potência de tensão primária igual a 230kV, tensão secundária igual a 69kV e potência igual a 100.000kVA, comumente encontrado no sistema elétrico brasileiro. Para este transformador, conforme consulta ao fabricante, tem-se as massas constantes na tabela 4 abaixo.

Tabela 4: Massas de um transformador de potência 230/69kV – 100.000kVA.

	Material	Massa (kg)
Parte Ativa - Enrolamentos	Cobre	25.100
Parte Ativa - Núcleo Magnético	Aço-Silício	37.650
Tanque e acessórios	Aço-Carbono	40.665
Líquido isolante	Óleo Mineral Naftênico	34.935
Total		138.350

De acordo com o Instituto do Aço Brasil, para a produção de uma tonelada de aço no Brasil em 2022 foi emitido o equivalente 1,7 toneladas de CO₂ (tabela 5).

Tabela 5: Emissões específicas de GEE para a produção de aço no Brasil²⁰.

	2020	2021	2022
Emissão específica (t CO ₂ /t aço bruto)	1,9	1,9	1,7

Para o transformador citado, caso seja decidido executar a reforma para extensão de vida útil com o reaproveitamento do tanque e do núcleo magnético, seriam evitadas emissões de 133,13 toneladas de CO₂ conforme cálculos abaixo (tabela 6), considerando uma aproximação para o aço-silício que tem apenas 3% de silício (LANDGRAF, 2002, p. 109).

²⁰ Disponível em: <<https://acobrasil.org.br/site/indicadores-de-sustentabilidade/>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

Tabela 6: Emissões aproximadas de GEE para a manufatura do aço utilizado no tanque e núcleo de um transformador de potência 230/69kV – 100.000kVA.

	Material	Massa (ton)	Emissão de CO₂ (ton)
Parte Ativa - Núcleo Magnético	Aço-Silício	37,65	64,00
Tanque e acessórios	Aço-Carbono	40,66	69,13
Total		78,31	133,13

É preciso registrar que o cálculo acima não considera a emissão de CO₂ para a fabricação do núcleo e do tanque, apenas a manufatura do aço. Desta forma, a redução de emissões de GEE é ainda maior do que demonstrado acima. Quando se amplia o horizonte para os milhares de transformadores de potência em final de vida útil espalhados pelo sistema elétrico brasileiro, inclusive de maiores potências e dimensões, pode-se ter uma real noção dos benefícios ao meio ambiente.

Porém, não é só isso. Além de ser uma grande consumidora de energia e de materiais, a indústria siderúrgica também é responsável pela emissão considerável de efluentes, dada a grande quantidade de reações físico-químicas envolvidas nas diversas etapas do processo de fabricação do aço. Para a transformação do minério de ferro em produto laminado de aço, são produzidos grandes volumes de emissões gasosas, efluentes líquidos e resíduos sólidos conforme dados listados na tabela 7 (CARVALHO; MESQUITA; ARAÚJO, 2015, p. 187).

Outro aspecto ambiental importante da reforma do transformador de potência é a reciclagem do cobre dos enrolamentos. Um estudo publicado por Glöser *et al* estima que a taxa de reciclagem mundial de cobre em 2010 foi de aproximadamente 35% do estoque global de cerca de 350 milhões de toneladas (GLÖSER; SOULIER; ESPINOZA, 2013, p. 6571).

O cobre é um recurso infinitamente reciclável, principalmente por sua característica de elevada resistência à corrosão e estabilidade frente a uma significativa gama de agentes químicos, sendo um dos poucos materiais que podem ser remanufaturados repetidamente sem alteração de desempenho (SILVA, 2022).

Tabela 7: Principais insumos energéticos e efluentes da siderurgia (CARVALHO; MESQUITA; ARAÚJO, 2015, p. 188).

	Principais insumos energéticos	Principais efluentes		
		Gasosos	Líquidos	Sólidos
Rota integrada a coque	Sinterização	Coque Energia elétrica (baixo consumo)	Material particulado, CO, CO ₂ , SO ₂ , NO _x , VOCS, HF e HCL	- Pós, lamas e carepas
	Coqueria	Carvão metalúrgico Energia elétrica (baixo consumo)	Material particulado, CO, CO ₂ , SO ₂ , NO _x , VOCS, benzeno, PAH e CH ₄	Amônia, benzeno, tolueno e xileno Material particulado e alcatrão
	Alto-forno	Coque, PCI Energia elétrica (baixo consumo)	Material particulado, CO, CO ₂ , SO ₂ , NO _x , VOCS, HF e HCL	- Pós, lamas e escória
	Aciaria a oxigênio (LD/BOF)	Energia elétrica (baixo consumo)	Material particulado, metais (zinco), CO, VOCS, HF e HCL	- Pós, lamas, metais solúveis, zinco e escória
	Lingotamento contínuo	Energia elétrica (baixo consumo)	-	Óleo Sólidos suspensos e sucata
	Laminação	Gás de coqueria, gás de alto-forno ou de aciaria e energia elétrica (alto consumo)	Material particulado, CO, CO ₂ , SO ₂ , NO _x , VOCS e vapores ácidos	Óleos e ácidos Carepas, lamas e <i>pickle liquor</i> (líquor ácido)

Devido a sua boa condutividade elétrica, resistências mecânica e térmica elevadas, e ductibilidade, o cobre é amplamente utilizado na fabricação dos enrolamentos do transformador de potência. Contudo, conforme estudado no capítulo 4, não é o envelhecimento do cobre que importa para o fim de vida útil do transformador, e sim a degradação do papel isolante que envolve as espiras dos enrolamentos.

Neste sentido, quando o transformador é reformado e há a necessidade de substituição dos enrolamentos para extensão de vida útil, a sucata de cobre dos enrolamentos é revendida no mercado secundário e normalmente é reinserida em outras cadeias produtivas. Esta é mais uma característica circular vinculada ao processo de reforma do transformador.

Desta forma, a opção pela reforma de um transformador de potência: i) reduz a extração de matéria-prima do meio ambiente: minério de ferro e cobre; ii)

reduz a emissão de quantidades significativas de GEE; e iii) reduz a emissão de quantidades significativas de rejeitos e efluentes para o meio ambiente. Portanto, este processo contribui para a sustentabilidade ambiental do planeta além de melhorar os indicadores de ESG das empresas que atuam no setor eletroenergético.

5.2 Substituição de transformadores de potência em final de vida útil

A estratégia ideal de substituição de transformadores em final de vida útil é aquela que fornece o equilíbrio necessário entre custos do ciclo de vida, desempenho e risco para a concessionária. Na verdade, não existe uma estratégia única a ser adotada, pois normalmente ocorrerá a adoção de critérios de substituição baseados no risco e condição que subsidiará o planejamento estratégico da organização (CIGRE, 2023, P. 42).

O objetivo é manter ou aumentar a confiabilidade e reduzir custos, dentro de níveis aceitáveis de riscos de falha. A melhor estratégia de substituição é geralmente aquela que fornece o menor custo total do ciclo de vida, que inclui o CAPEX, o OPEX e os custos associados ao impacto nos valores do negócio (CIGRE, 2023, p. 42). Abaixo serão listadas algumas estratégias de substituição de ativos em final de vida útil.

5.2.1 Substituição corretiva ou reativa (funcionar até a falha)

Para alguns tipos de ativos não são realizadas substituições planejadas e proativas. Esses ativos são operados até que deixem de funcionar adequadamente, ou seja, permaneçam em serviço até falhar. Essa estratégia é utilizada para ativos com consequências de falha negligenciáveis ou muito baixas, cuja substituição não é complexa e demanda poucos recursos (CIGRE, 2023, p. 44).

Os custos das substituições reativas são normalmente baixos quando comparados com as substituições proativas ou até mesmo equivalentes. Neste caso é necessário determinar estatisticamente as taxas de falha para ter um estoque adequado de peças sobressalentes (CIGRE, 2023, p. 44). Essa estratégia, entretanto, não deve ser adotada para transformadores de potência em função do elevado custo de aquisição, bem como do tempo demandado entre o pedido de compra e o fornecimento, que normalmente é bem elevado.

5.2.2 Substituição baseada no tempo

Para uma estratégia de substituição baseada no tempo, os ativos devem ser substituídos em intervalos predeterminados. Este plano de substituição estabelece quando e quais ativos devem ser substituídos. Os intervalos para a substituição são determinados com base na experiência operacional e nas especificações do fabricante. Se não houver peças sobressalentes disponíveis, o ativo deve ser substituído com alta prioridade (CIGRE, 2023, p. 45).

Os intervalos em que as substituições são realizadas dependem de como o ativo foi utilizado e mantido ao longo da sua vida útil ou, em alguns casos, estão atreladas às regulamentações governamentais. Conforme mencionado no capítulo 4, a ANEEL estabeleceu a vida útil de um transformador de potência em 35 anos (Resolução Normativa nº 674/2015), sendo este o intervalo de tempo regulatório que as concessionárias devem considerar para a substituição baseada no tempo.

5.2.3 Substituição baseada na condição

A decisão de substituir ativos antecipadamente deve ser precedida de avaliações periódicas da condição ao longo do ciclo de vida, de modo a garantir o melhor retorno do capital investido, a melhor performance operacional e o menor risco para a organização. A avaliação da condição é um processo pelo qual os ativos são diagnosticados em função dos aspectos que podem afetar o seu desempenho futuro.

Para o transformador de potência a substituição baseada na condição deve considerar a avaliação de resultados de ensaios e testes, inspeções visuais, histórico operacional, conhecimento dos mecanismos e processos de falha, experiência anterior com equipamentos semelhantes e quaisquer outros conhecimentos e informações relevantes (CIGRE, 2023, p. 45). Como visto no capítulo 4, o maior desafio da Gestão de Ativos para os transformadores de potência, no que tange à manutenção baseada na condição, é determinar o final de vida útil do papel isolante de forma antecipar a necessidade de substituição do ativo.

5.3 Descarte de transformadores de potência em final de vida útil

O primeiro aspecto que deve ser destacado para o descarte de transformadores de potência vinculados à prestação de serviço público de geração,

transmissão ou distribuição de energia elétrica é que devem ser seguidos os procedimentos estabelecidos no Anexo IV da Resolução Normativa nº 948/2021 da ANEEL que trata da desvinculação de bens.

De acordo com este normativo, os agentes setoriais devem solicitar prévia anuência da ANEEL para a desvinculação de bens vinculados aos serviços de energia elétrica, exceto a desvinculação de bens considerados inservíveis à prestação do serviço público de geração, transmissão ou distribuição de energia elétrica, para os quais os agentes setoriais deverão constituir um dossiê da desvinculação. Normalmente, a inservibilidade dos bens é atestada por meio de um parecer emitido com base em critérios técnicos e/ou econômicos.

O transformador de potência em final de vida útil funcional, regulatória ou confiável é considerado um bem inservível à prestação do serviço público de geração, transmissão ou distribuição de energia elétrica. Nestes casos, o órgão regulador autoriza a alienação do bem para fins de desvinculação do contrato de concessão com estrita observância das regras e procedimentos estipulados pelo Manual de Contabilidade do Setor Elétrico (MCSE).

Os normativos da agência reguladora, por outro lado, não fazem referência a quaisquer procedimentos ambientais para a alienação e descarte dos ativos vinculados aos serviços de energia elétrica, fato este que merece um destaque negativo. Desta forma, os agentes setoriais devem estabelecer procedimentos próprios com base na legislação ambiental vigente.

Como visto no capítulo 2, estão sujeitos ao Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS), conforme previsto no art. 20 da Lei 12.305/2010 (PNRS), os estabelecimentos comerciais e de prestação de serviços que: i) gerem resíduos perigosos; e ii) gerem resíduos que, mesmo caracterizados como não perigosos, por sua natureza, composição ou volume, não sejam equiparados aos resíduos domiciliares pelo poder público municipal.

Quando se trata do descarte de equipamentos de grande porte esta ação envolve o manejo de centenas de toneladas de materiais, o que requer um controle rigoroso de sua destinação final. Além disso, no caso dos transformadores de potência, há o descarte do óleo mineral isolante usado, que é considerado um resíduo perigoso conforme classificação da norma NBR 10004/2004 devido a sua toxicidade.

É recomendável que as empresas que possuam transformadores de potência em seu sistema produtivo implementem um Sistema de Gestão Ambiental (SGA) conforme requisitos especificados pela norma ABNT ISO 14001/2004 para que possam desenvolver práticas sustentáveis em seus negócios, produtos e serviços. Um SGA é fundamental para o controle e destinação dos resíduos sólidos gerados pelo descarte dos transformadores de potência.

5.3.1 Destinação de resíduos ferrosos

Os materiais ferrosos correspondem a algo entre 50% e 70% dos resíduos gerados pelo descarte de um transformador de potência, tendo em vista que o tanque e o núcleo são as partes do transformador mais intensivas quanto ao uso de aço. A logística reversa de materiais ferrosos é bem difundida dentro da metalurgia e existem no mercado empresas especializadas para executar a destinação final e reciclagem destes materiais.

De acordo com o Instituto Aço Brasil, o aço é o material mais reciclado do mundo, com cerca de 630 milhões de toneladas recicladas anualmente. Por ser 100% reciclável, ele pode ser reprocessado e transformado em novos produtos infinitamente, sem qualquer perda de qualidade (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022). O potencial de reciclagem do aço é um aspecto fundamental do ponto de vista da Economia Circular, pois a circularidade tem como objetivo fazer com que os materiais permaneçam na cadeia produtiva em seu mais alto nível de utilidade e valor o tempo todo.

Neste caso, especificamente, o papel da empresa é fundamental para o ciclo reverso dos materiais ferrosos, de modo a garantir a sua reinserção na cadeia produtiva. Para tanto, um sistema de gestão de logística reversa como parte de um Sistema de Gestão Ambiental é primordial para esta finalidade, inclusive com o uso do sistema de logística reversa governamental disponibilizado no SINIR+.

5.3.2 Destinação de resíduos de cobre

Conforme já citado neste trabalho, o cobre é um recurso infinitamente reciclável, sendo classificado como um material que pode ser remanufaturado repetidas vezes sem alteração de desempenho. Desta forma, a reciclagem do cobre e o seu reaproveitamento na cadeia produtiva é uma prática circular e sustentável.

Um produto feito com ligas de cobre, quando atinge o fim de vida, gera uma sucata íntegra, de elevado índice de aproveitamento de massa, que resulta em um menor aporte de energia elétrica para a sua transformação (SILVA, 2022). Além disso, o cobre é uma sucata de alto valor agregado sendo bastante valorizada no mercado secundário (MANCINI; GIANELLI; FRANCO, 2009, p. 1).

Uma prática recomendável para as empresas do setor elétrico, com foco em sustentabilidade ambiental nas bases da Economia Circular, seria celebrar acordos de logística reversa com os fabricantes, com o objetivo de reinserir a sucata de cobre dos enrolamentos de transformadores no próprio ciclo produtivo da indústria de equipamentos para sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Outro aspecto interessante, como sugestão, seria celebrar acordos comerciais com os fabricantes para a compra de transformadores que, comprovadamente, utilizem cobre reciclado, ou seja, do mercado secundário, para a fabricação das bobinas dos equipamentos novos de modo a fomentar a Economia Circular.

5.3.3 Destinação de resíduos de óleo mineral isolante

O óleo mineral isolante tem sido usado predominantemente como meio de isolamento e de resfriamento na indústria de transformadores por mais de 100 anos devido as suas excelentes propriedades dielétricas e baixo custo (ABB, 2004, p. 161). Este fluido dielétrico é obtido a partir do refino de petróleo bruto, uma fonte não renovável e de origem fóssil.

De acordo com Sanderson (2017, p. 23),

O óleo mineral em geral é bastante nocivo ao meio ambiente (água, ar, solo). Em caso de falhas relativas a curto-circuito ou vazamentos em transformadores, os compostos de hidrocarbonetos contidos no solo contaminado, podem migrar, com a infiltração da água de chuva, da superfície para a primeira camada do lençol freático. No caso de contaminação em água, tem-se que 1 kg de óleo mineral, que tenha vazado de um transformador para um reservatório, torna 5 milhões de litros de água impróprios para consumo, sendo os custos, para tratar seus efeitos, bastante altos. Os produtos da combustão do óleo mineral, provenientes de sua ignição, devido a um curto-circuito, por exemplo, são considerados perigosos e causam uma grande poluição do ar, onde 1000 kg de óleo mineral queimado emitem cerca de 10 kg de substâncias nocivas na atmosfera

Portanto, a aplicação e manuseio do óleo mineral isolante requerem o estabelecimento de procedimentos rigorosos que visem evitar derramamentos

acidentais, visto que este tipo de evento pode ocasionar um inestimável impacto ao meio ambiente, constituindo, por força da legislação, uma grave infração ambiental.

Por outro lado, os resíduos de óleo mineral isolante de transformadores podem ser reciclados, passando por um novo processamento físico e químico para sua reintrodução na cadeia produtiva. Existem no mercado empresas prestadoras de serviço que executam a logística reversa do óleo mineral isolante, responsabilizando-se, mediante contrato, por todas as atividades inerentes à destinação final dos resíduos, inclusive emitindo as licenças requeridas junto aos órgãos ambientais governamentais.

Sugerem-se as seguintes etapas para a execução da logística reversa de resíduos de óleo mineral isolante de transformadores em final de vida útil (RODRIGUES et al., 2015, p. 138):

- a) Recolhimento do resíduo e acondicionamento em recipientes adequados (normalmente são utilizados tambores metálicos de 200 litros);
- b) Classificação de acordo com a norma NBR 10004/2004 e a Resolução do CONAMA nº 313 de 2002 como resíduo perigoso;
- c) Identificação dos recipientes com a cor laranja de acordo com a Resolução CONAMA nº 275 de 2001;
- d) Etiquetagem dos recipientes com etiqueta contendo informações como o nome do resíduo, origem, responsável, telefone, quantidade, estado físico, características etc.;
- e) Armazenamento dos recipientes em local abrigado e provido de sistema de contenção de vazamentos acidentais;
- f) Contratação de empresa especializada para realizar o transporte, tratamento e disposição final dos resíduos;
- g) Controle da destinação do resíduo até a sua disposição final.

6 CONCLUSÃO

O crescimento da população mundial vem intensificando o uso de recursos naturais e, em contrapartida, o avanço das tecnologias de produção não são capazes de suprir a demanda por novos equipamentos e garantir o máximo aproveitamento dos materiais com a redução dos impactos ao meio ambiente. O desperdício é incrementado pelo descarte sem responsabilidade ambiental e pela obsolescência programada que culmina no desuso de muitos equipamentos aplicáveis ao setor de energia.

O aumento da demanda por novos investimentos no setor incrementa os custos e gera a elevação dos preços aos consumidores. Por outro lado, o aumento do consumo de produtos e serviços pela indústria eleva os custos de produção e aumenta exponencialmente a geração de resíduos sólidos (sem solução para o descarte e reaproveitamento desses materiais). Até 2030 espera-se que sejam gerados, anualmente e em nível global, cerca de 2,59 bilhões de toneladas de resíduos, um cenário extremamente preocupante sob o ponto de vista ambiental, econômico e social.

Diante deste fato, a Economia Circular surge como um modelo econômico comprometido com o desenvolvimento sustentável, em uma sociedade responsável e resiliente, cuja base está sedimentada na preservação dos recursos naturais, dentro de uma sistemática que reduz os impactos negativos impostos pelos meios de produção ao ambiente, cujas práticas são comuns dentro do modelo econômico linear que visa extrair, transformar e descartar.

A Economia Circular é concebida de modo que a produção e o consumo estejam inter-relacionados e conectados com a sustentabilidade ambiental, com o objetivo de minimizar o desperdício, dando ênfase na busca de tecnologias que promovam a reutilização e reciclagem de materiais e equipamentos. O foco da Economia Circular é manter produtos, componentes e materiais em seu mais alto nível de utilidade, com maior eficiência e valor, dentro do ciclo de vida da cadeia produtiva.

Existem atualmente diversos modelos de negócios circulares que ajudam a fomentar a sustentabilidade ambiental de empresas integrantes dos mais variados setores econômicos, especialmente no setor energético. A logística reversa, o compartilhamento de bens e a extensão de vida útil de produtos são alguns

exemplos. No caso do setor elétrico, a implementação de modelos circulares na gestão dos ativos pode auxiliar as empresas quanto ao cumprimento de metas relacionadas a redução da emissão de gases de efeito estufa (GEE) com foco nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, mais especificamente o objetivo 13 que trata das ações contra a mudança global do clima.

A Gestão de Ativos é uma metodologia que visa ao aprimoramento da produtividade empresarial mediante a obtenção do máximo valor possível dos seus ativos de produção. Esta metodologia pode ser considerada um processo linear em que o bem é concebido, projetado, fabricado, adquirido, utilizado e descartado quando chega o seu fim de vida útil. Um dos principais objetivos da Gestão de Ativos é fornecer o suporte para que as organizações ativo-intensivas decidam o período ótimo para a substituição dos seus ativos em final de vida útil, ou optem pela permanência do ativo em serviço mediante a execução de reformas e melhorias que prolonguem o seu ciclo de vida com foco no equilíbrio entre custo, risco e desempenho.

Os transformadores de potência são equipamentos de elevado custo de aquisição e normalmente representam os maiores investimentos para as empresas do setor elétrico. Logo, a confiabilidade operacional destes ativos é primordial para a sustentabilidade econômica das companhias elétricas. A falha de um transformador pode ocasionar elevadas perdas financeiras, interrupção no fornecimento de energia e impactos ambientais pelo vazamento de óleo isolante.

Do ponto de vista da Gestão de Ativos, se faz necessário estabelecer uma estratégia de manutenção que garanta níveis adequados de confiabilidade e uma vida operacional otimizada para os transformadores de potência, que dever ser baseada no monitoramento da condição ao longo do seu ciclo de vida. Um aspecto relevante é adotar técnicas de monitoramento que avaliem a perda de vida útil do transformador com o objetivo de subsidiar o planejamento de ações de substituição ou de extensão de vida útil.

A decisão entre substituir um transformador ou executar ações de extensão de vida útil deve ser justificada considerando aspectos relacionados à condição do ativo, observância de diretrizes regulatórias, avaliação de viabilidade econômica e financeira, e fatores relativos à sustentabilidade ambiental.

A extensão de vida útil é um modelo de negócio circular que viabiliza a otimização de recursos extraídos do meio ambiente, fazendo-os permanecer na

cadeia produtiva por mais tempo. Neste sentido, materiais ou componentes que seriam descartados podem ser reaproveitados e reinseridos no ciclo produtivo. A reforma de um transformador de potência com extensão de vida útil, considerando o reaproveitamento do tanque e do núcleo magnético, representa uma vantagem econômica, pois o custo pode variar entre 45% e 75% do valor de um equipamento novo.

Além disso, do ponto de vista ambiental, a reforma de um transformador pode reduzir as emissões de gases de efeito estufa para o ambiente, considerando a economia de energia com a manufatura do aço do tanque e do núcleo magnético, além da reciclagem do cobre dos enrolamentos. No caso hipotético em que se reforma um transformador de potência de 230/69kV – 100.000kVA, seriam evitadas emissões de CO₂ da ordem de 130 toneladas.

Em suma, a opção pela reforma de um transformador de potência: i) reduz a extração de matéria-prima do meio ambiente: minério de ferro e cobre; ii) reduz a emissão de quantidades significativas de gases de efeito estufa; e iii) reduz a emissão de quantidades significativas de rejeitos e efluentes para o meio ambiente.

Quanto ao descarte de transformadores em final de vida útil é extremamente necessário que haja um controle criterioso de todos os resíduos gerados até a sua destinação final. As sucatas ferrosas e de cobre possuem uma cadeia de logística reversa nacional bem estabelecida, porém é primordial que as empresas geradoras desenvolvam um sistema de gestão ambiental para esta finalidade. A logística reversa do óleo mineral isolante usado, que é considerado um resíduo perigoso devido a sua toxicidade, requer níveis de controle ainda mais rigorosos.

No mundo atual são extremamente relevantes as proposições de novas práticas da indústria que liberem as corporações da obsolescência programada, demonstrando assim para a sociedade a capacidade, a ampliação e eficácia em boas práticas que promovam a sustentabilidade através de ações concretas que impactem no maior controle e redução de emissão de gases efeito estufa. Além disso, é extremamente necessário que as empresas pavimentem sua estrada rumo à transição energética e a descarbonização de seu processo produtivo e, conseqüentemente, reduzam a sua pegada de carbono, cujas demonstrações

compõem os relatórios de sustentabilidade e indicadores de ESG. A Economia Circular se propõe a ser um caminho bem consistente nesse sentido.

Conforme ficou demonstrado, é perfeitamente factível a aplicação dos conceitos de Economia Circular e de logística reversa ao processo de Gestão de Ativos para fomentar a sustentabilidade ambiental no setor de energia e na indústria de transformadores elétricos.

Por fim, vale ressaltar que o raciocínio do método de pesquisa aplicado neste trabalho aos transformadores de potência é perfeitamente extensível a outros ativos de geração e transmissão de energia elétrica, promovendo assim, a real proteção do meio ambiente para as atuais e futuras gerações.

7 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Seguem abaixo algumas propostas para a continuidade da pesquisa empreendida neste trabalho:

- Realizar um estudo de avaliação de ciclo de vida (LCA) para efeitos de análise comparativa entre a aquisição de um transformador novo e a reforma com extensão de vida útil em termos de geração de gases de efeito estufa (GEE).
- Empreender uma pesquisa de campo junto aos fabricantes de transformadores e empresas reformadoras com o objetivo de executar um balanço de consumo energético entre a fabricação de um transformador novo e a reforma de um transformador de mesmas características com extensão de vida útil.
- Desenvolver um método que possa quantificar as emissões de carbono evitadas com a execução da reforma com extensão de vida útil de transformadores de potência e conversão em créditos de carbono.
- Desenvolver uma proposta que possa demonstrar para os órgãos governamentais, em especial à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a vantajosidade ambiental da execução de reforma com extensão de vida útil de equipamentos de alta tensão com o objetivo de buscar incentivos financeiros para as empresas concessionárias de serviços públicos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.
- Estender a pesquisa acerca da aplicação da economia circular e extensão de vida útil para a gestão de outros ativos utilizados em subestações de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

ABB. **Transformer Handbook**. Zurich: 2004.

ABB. **On-load tap-changers type VUC User's guide**. Ludvika: 2018.

ABNT. **NBR 5356-1:2007 Transformadores de Potência Parte 1: Generalidades**. Rio de Janeiro: 2007.

ABNT. **NBR ISO 14040:2009 Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT. **NBR 5034:2014 Buchas para tensões alternadas superiores a 1 kV**. Rio de Janeiro: 2014a.

ABNT. **NBR ISO 55000:2014 Gestão de Ativos – Visão geral, princípios e terminologia**. Rio de Janeiro, 2014b.

ABNT. **NBR 5356-7:2017 Transformadores de potência Parte 7: Guia de carregamento para transformadores imersos em líquido isolante**. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT. **NBR ISO 55010:2021 Gestão de Ativos – Orientação sobre o alinhamento das funções financeiras e não financeiras na Gestão de Ativos**. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT. **NBR ISO 14001:2015 Sistemas de gestão ambiental – Requisitos com orientação para uso**. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT. **NBR 10004:2004 Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 605/2014: Manual de Contabilidade do Setor Elétrico – MCSE**. Brasília, 2014.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 674/2015: Manual De Controle Patrimonial do Setor Elétrico – MCPSE**. Brasília, 2015.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 948/2021: Aprova a Regulação Econômico-Financeira**. Brasília, 2021.

ALIANI, E.; ROMERO, A. A. **Consideraciones para la Gestión de Transformadores de Potencia, en el Marco de la ISO 55000**. San Juan: IEEE, 2014.

ARSHAD, M.; ISLAM, S. M.; KHALIQ, A. **Power transformer asset management**. 2004 International Conference on Power System Technology – POWERCON, 2004.

AZEVEDO, J. L. DE. A Economia Circular aplicada no Brasil: uma análise a partir dos instrumentos legais existentes para a logística reversa. **XI CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO**, 2015.

BANCO VOTORANTIN. Como o PPA funciona?. 2023. Disponível em: <<https://www.bv.com.br/bv-inspira/parceiro-solar/power-purchase-agreement>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

BATTAGLIN, P. D.; BARRETO, G. REVISITANDO A HISTÓRIA DA ENGENHARIA ELÉTRICA. **Revista de Ensino de Engenharia**, p. 49–58, 2011.

BORSCHIVER, S.; TAVARES, A. **Catalisando a Economia Circular: conceitos, modelos de negócios e sua aplicação em setores da economia**. Rio de Janeiro, 2022.

BORSCHIVER, SUZANA.; TAVARES, ALINE. Economia Circular e o setor energético. **FGV Energia**, jun. 2018.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, 1988.

BRASIL. **Decreto nº 10.240/2020: Regulamenta logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes**. Brasília, 2020.

BRASIL. **Decreto nº 10.936/2022: Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, 2022.

BRASIL. **Lei nº 12.305/2010: Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Brasília, 2010.

CARVALHO, P. S. L. ; MESQUITA, P. P. D.; ARAÚJO, E. D. G. Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade. **BNDES Setorial**, v. 41, p. 181–236, mar. 2015.

CIGRE. **Assessment of Transformer Paper Ageing and Post-Mortem Analysis.** Paris, 2018.

CIGRE. **Guia de Manutenção Para Transformadores de Potência.** 2013.

CIGRE. **TB 323 - Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformers.** Paris, 2007.

CIGRE. **TB 445 - Guide for transformer maintenance.** Paris, 2011.

CIGRE. **TB 755 - Transformer bushing reliability.** Paris, 2019a.

CIGRE. **TB 779 - Field experience with transformer solid insulation ageing markers.** Paris, 2019b.

CIGRE. **TB 887 - Life extension of oil filled transformers and shunt reactors.** Paris, 2022.

CIGRE. **TB 910 - Business requirements for asset performance management.** Paris, 2023.

CIRCLE ECONOMY. **The circularity gap report 2023.** Amsterdam, 2023.

CNI. **Circular economy: opportunities and challenges for the Brazilian industry.** Brasília, 2018.

DIAS, V. S.; MARTINS, R. DE A. MICHAEL FARADAY: O CAMINHO DA LIVRARIA À DESCOBERTA DA INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA. **Ciência & Educação**, p. 517–530, 2004.

EMF. **Rumo à Economia Circular: o racional de negócio para acelerar a transição**. 2015.

EMF. **Lei Antidesperdício e de Economia Circular da França: eliminando desperdícios e promovendo a inclusão social**. 2021.

EPE. **Balanço Energético Nacional 2023: Ano base 2022**. Rio de Janeiro, 2023.

FRANÇA, L.; SOUZA, N.; MUNIZ, R. Economia Circular e logística reversa aplicável ao setor de energia: impactos e contradições no cenário brasileiro. **Energia e ambiente - Tomo III**, 2022.

FRONTIN, S. DE O. **Equipamentos de alta tensão – prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas**. 1. ed. Brasília: Goya Editora, 2013.

GLÖSER, S.; SOULIER, M.; ESPINOZA, L. A. T. Dynamic Analysis of Global Copper Flows. Global Stocks, Postconsumer Material Flows, Recycling Indicators, and Uncertainty Evaluation. **Environmental, Science and Technology**, v. 47, p. 6564-6572, mai. 2013.

GOVINDAN, K.; SOLEIMANI, H.; KANNAN, D. Reverse logistics and closed-loop supply chain: a comprehensive review to explore the future. **European Journal of Operational Research**, v. 240, n. 3, p. 603–626, 2015.

GUIMARÃES, R. F. A. **Proposta de diagnóstico para uso, instalação e descarte de transformadores de distribuição recuperados**. Ilha Solteira, 2010.

HARTLEY, K.; VAN SANTEN, R.; KIRCHHERR, J. Policies for transitioning towards a circular economy: Expectations from the European Union (EU). **Resources, Conservation and Recycling**, v. 155, abr. 2020.

HEGEDIC, M. et al. **Life cycle assessment of power transformer-case study**. 2016.

IEC. IEC 60599: Mineral oil-filled electrical equipment in service - guidance to the interpretation of dissolved and free gases analysis. Genebra, 2022.

IEEE. IEEE Std C57.104: Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers. Nova Iorque, 2019.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Aço novo de novo: recicle para cuidar do meio ambiente. São Paulo: Instituto Aço Brasil, 2022.

JORDÃO, R. G. Transformadores. São Paulo: Blucher, 2002.

KAZA, S. et al. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Washington (DC), 2018.

KOWSZYK, YANINA. M. R. Estudios de caso sobre modelos de Economía Circular e integración de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en estrategias empresariales en la UE y ALC. Hamburgo, 2018.

LANDGRAF, F. J. G. Propriedades magnéticas de aços para fins elétricos. São Paulo, 2002.

LIU, Q. et al. Evaluation of transformer state based on the life cycle. IEEE, nov. 2018.

LUZ, B. Economia Circular Holanda: Brasil: da teoria à prática. Exchange 4 Change Brasil, 2017.

MANCINI, S. D.; GIANELLI, B.; FRANCO, C. Materiais descartados no setor elétrico: Perspectivas de reutilização e reciclagem. Latin-American congress on electricity generation and transmission, 2009.

MEDEIROS, L. H. et al. Finite Element Analysis applied to Electromagnetic Forces calculation on Power Transformers. Seminar on Power Electronics and Control - SEPOC, mai. 2021.

MILASCH, M. **Manutenção de transformadores em líquido isolante**. São Paulo: Blucher, 1984.

NOGUEIRA, T.; CARVALHO, J.; MAGANO, J. Eco-Friendly Ester Fluid for Power Transformers versus Mineral Oil: Design Considerations. **Energies**, v. 15, n. 15, 1 ago. 2022.

PAULINO, M. **História do Transformador**. 2014.

PROCOBRE. **Gestão de Ativos: guia para a aplicação da norma ABNT NBR ISO 55001**. 2019.

RODRIGUES, M. et al. Logística reversa do óleo isolante de transformadores em uma empresa do setor elétrico. **Revista Gestão Industrial**, v. 11, p. 128-143, 2015.

SANTOS, CHICO. **Grandes consumidores optam pela autoprodução**. Valor Econômico. Rio de Janeiro: Globo, 2023. Disponível em: <<https://valor.globo.com/publicacoes/especiais/mercado-livre-de-energia/noticia/2023/07/24/grandes-consumidores-optam-pela-autoproducao.ghtml>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

SILVA, M. R. DA. **Cobre como elemento chave da reciclagem consciente**. 2022.

SOARES, M. A. P. L. **Elementos para a gestão do ciclo de vida de transformadores eléctricos de potência**. Porto, 2011.

TAVARES, A. D.; GOMES, C. F. S. **ISO 55000: A Evolução da Gestão de Ativos**. 2015.

TEIXEIRA, B. L. **Análise e avaliação do ciclo de vida do transformador de potência para apoio à implementação da Economia Circular na EFACEC**. 2022.

VENDRAMETO, H. V. **Avaliação do ciclo de vida de transformadores de potência considerando aspectos técnicos, regulatórios e econômicos**. Bauru, 2023.