

CENTRO UNIVERSITÁRIO CAMPO LIMPO PAULISTA  
QUÍMICA BACHARELADO

ERIC MATIAS DE OLIVEIRA

**BORRACHA DE ALTA RESISTÊNCIA PARA APLICAÇÃO EM  
TRANSFORMADORES**

CAMPO LIMPO PAULISTA

2023

ERIC MATIAS DE OLIVEIRA

**BORRACHA DE ALTA RESISTÊNCIA PARA APLICAÇÃO EM  
TRANSFORMADORES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Universitário Campo Limpo Paulista para conclusão do curso de Química Bacharelado sob a orientação do Prof. Dr. Edison Franco Junior.

CAMPO LIMPO PAULISTA

2023

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este estudo a meus familiares, ao meu orientador, e aos amigos que tornaram possível a minha chegada até aqui.

## **AGRADECIMENTOS**

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho, registro aqui a minha gratidão, especialmente aos meus familiares.

Agradeço, ainda, ao Professor me que orientou o presente trabalho, sempre solícito a qualquer dúvida e necessidade para o desenvolvimento.

A todos o meu muito obrigado.

*“As Quatro Qualidades”*

*“A **Abençoada Beleza**”, frequentemente comentava: Há quatro qualidades que gosto muito de ver nas pessoas:*

***Primeiro:** entusiasmo e coragem;*

***Segunda:** um rosto adornado com sorrisos e um semblante radiante;*

***Terceira:** que vejam as coisas com seus próprios olhos e não com os olhos dos outros;*

***Quarta:** a habilidade de levar uma tarefa, uma vez, até o fim!”*

*Escrituras Bahá'is (1817-1892)*

## RESUMO

Esta pesquisa abrange a demanda por inovação no isolamento de transformadores, tendo em vista a demanda por sistemas mais eficazes e robustos nas últimas décadas. Objetivou-se, para tanto, investigar a viabilidade e os benefícios da aplicação da borracha de alta resistência em transformadores, com foco na melhoria do desempenho e da confiabilidade desses dispositivos em sistemas elétricos de larga escala. Justificou-se a seleção temática em razão da exigência por melhores materiais destinados ao isolamento e proteção de transformadores em conjunto com o aumento progressivo das redes elétricas nacionais. Neste prisma, a borracha de alta tensão tem demonstrado propriedades positivas para gerar otimizações nesses dispositivos. No eixo metodológico, realizou-se uma revisão bibliográfica documental e exploratória em harmonia com uma pesquisa observacional e qualitativa. Sob essa ótica, validou-se a relevância da borracha de alta resistência como material isolante em transformadores, tendo como base suas propriedades físico-químicas promissoras. Ainda mais, averiguou-se que a utilização desse material tende a favorecer a melhoria da eficiência energética, prolongamento da vida útil dos transformadores e a redução de impactos ambientais, alinhando-se com as demandas por soluções mais sustentáveis no setor.

**Palavras-chave:** Transformadores. Borracha de Alta Resistência. Propriedades. Aplicabilidade.

## **ABSTRACT**

This research covers the demand for innovation in transformer insulation, given the demand for more effective and robust systems in recent decades. The objective, therefore, was to investigate the feasibility and benefits of applying high-resistance rubber in transformers, with a focus on improving the performance and reliability of these devices in large-scale electrical systems. The thematic selection was justified due to the demand for better materials for the insulation and protection of transformers in conjunction with the progressive increase in national electrical networks. In this light, high tension rubber has demonstrated positive properties to generate optimizations in these devices. In the methodological axis, a documentary and exploratory bibliographic review was carried out in harmony with observational and qualitative research. From this perspective, the relevance of high-resistance rubber as an insulating material in transformers was validated, based on its promising physicochemical properties. Furthermore, it was found that the use of this material tends to improve energy efficiency, extend the useful life of transformers and reduce environmental impacts, in line with the demands for more sustainable solutions in the sector.

**Keywords:** Transformers. High Resistance Rubber. Properties. Applicability.

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>11</b>
<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>12</b>
<b>GERAL .....</b>	<b>12</b>
<b>ESPECÍFICOS .....</b>	<b>12</b>
<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>13</b>
<b>CAPÍTULO 1 – MATERIAIS ISOLANTES EM TRANSFORMADORES E BORRACHA DE ALTA RESISTÊNCIA.....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 Transformadores: Caracterização .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2 Materiais Isolantes em Transformadores .....</b>	<b>18</b>
<b>1.3 Resistência Dielétrica .....</b>	<b>22</b>
<b>1.4 Introdução à Borracha de Alta Resistência .....</b>	<b>24</b>
<b>CAPÍTULO 2 – PROPRIEDADES DA BORRACHA DE ALTA RESISTÊNCIA .....</b>	<b>29</b>
<b>2.1 Propriedades Físicas .....</b>	<b>29</b>
<b>2.2 Propriedades Químicas .....</b>	<b>31</b>
<b>CAPÍTULO 3 – APLICAÇÕES DA BORRACHA DE ALTA RESISTÊNCIA EM TRANSFORMADORES.....</b>	<b>34</b>
<b>3.1 Aplicabilidade da Borracha .....</b>	<b>34</b>
<b>3.2 Contribuições para o Desempenho e Durabilidade .....</b>	<b>36</b>
<b>3.3 Desafios e Limitações.....</b>	<b>38</b>
<b>3.4 Normas e Regulamentações .....</b>	<b>39</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>43</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>44</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Transformador .....	14
Figura 2: Transformador de Potência.....	16
Figura 3: Transformador de Distribuição.....	16
Figura 4: Transformador de Instrumentação.....	17
Figura 5: EPDM (Etileno-Propileno-Dieno Monômero).....	27
Figura 6: Principais Dienos para Produzir Borracha de EPDM: DCPD, ENB e 1,4 HD .....	32

## INTRODUÇÃO

Os transformadores denotam-se como elementares na eficiência e na transmissão segura de eletricidade em sistemas de distribuição de energia elétrica. Esses dispositivos atuam na conversão de tensões, favorecendo a transferência de eletricidade de usinas geradoras para consumidores finais. A capacidade de um sistema elétrico de atender às crescentes demandas de energia, garantindo a confiabilidade e a segurança da rede, está intrinsecamente ligada à qualidade dos transformadores e dos materiais de isolamento associados (MELO, 2017).

Nesta conjuntura, a borracha de alta resistência emerge como um elemento potencialmente inovador, ofertando uma série de possibilidades em termos de eficácia, desempenho e sustentabilidade desses dispositivos (CAMPOS, 2016).

A infraestrutura elétrica global enfrenta diversos desafios no período contemporâneo. À medida que a demanda por eletricidade continua a crescer, impulsionada por fatores como urbanização, industrialização e a progressiva eletrificação de setores como transporte e aquecimento, a confiabilidade dos sistemas elétricos torna-se ainda mais crítica. A necessidade de reduzir perdas de energia, minimizar impactos ambientais e garantir a integridade das redes elétricas se faz indubitável, levantando uma questão fundamental sobre como melhorar os transformadores (MELO, 2017).

Da mesma forma, aplicação de materiais de isolamento inovadores em transformadores é uma via de pesquisa essencial para lidar com tais adversidade. Em particular, a borracha de alta resistência, com suas notáveis propriedades físicas e químicas, se destaca como uma solução promissora. Ela possui uma combinação única de características, como elasticidade, resistência à tração, estabilidade química e resistência a agentes corrosivos, que a tornam um candidato ideal para aplicações em transformadores. A capacidade da borracha de alta resistência de manter seu desempenho mesmo em condições adversas a torna um material isolante de destaque em relação às exigências de um setor em expansão (FORTES *et al.*, 2019).

Este estudo visa preencher uma lacuna importante na literatura ao aprofundar a exploração da borracha de alta resistência como um material isolante para transformadores. A demanda por materiais de isolamento mais eficazes e confiáveis em sistemas elétricos não pode ser subestimada, especialmente à luz das crescentes

demandas por eletricidade e dos preceitos ambientais que impulsionam a busca por soluções inovadoras.

A pesquisa abordada neste estudo parte de um problema fundamental que permeia o campo da engenharia elétrica e de materiais, do ponto de vista da química, que é a necessidade de materiais de isolamento confiáveis em sistemas elétricos, especialmente em transformadores. Este problema é amplificado pelo contexto contemporâneo, no qual as redes de distribuição de eletricidade enfrentam obstáculos crescentes, resultantes do aumento da demanda por energia e da busca por maior eficiência energética e sustentabilidade (PINTO; NASCIMENTO; SIRQUEIRA, 2019)

A pergunta norteadora que orienta esta pesquisa é: Como a borracha de alta resistência pode ser aplicada de forma inovadora em transformadores, visando melhorar o desempenho e a confiabilidade desses dispositivos em sistemas elétricos de larga escala?

Este questionamento direciona a atenção para a compreensão teórica acerca da viabilidade e os benefícios potenciais da adoção da borracha de alta resistência, um material com propriedades notáveis, em aplicações de transformadores. Com isso, os materiais isolantes tradicionalmente empregados nesses dispositivos apresentam limitações, sobretudo na eficácia, durabilidade e sustentabilidade (FINOCCHIO; ANTUNES, 2021).

O desenvolvimento teórico desta pesquisa é estruturado através de três pontos primários: “Materiais Isolantes em Transformadores e Borracha de Alta Resistência”, “Propriedades da Borracha de Alta Resistência” e “Aplicações da Borracha de Alta Resistência em Transformadores”.

## JUSTIFICATIVA

A seleção temática é motivada por uma série de razões fundamentais e, portanto, é de significativa relevância em diversas instâncias da sociedade, com um enfoque particular na área da Química.

Tradicionalmente, materiais como papel e óleo têm sido utilizados como isolantes em transformadores, no entanto, a busca por materiais avançados, que possam melhorar o desempenho e a sustentabilidade, é uma demanda cada vez mais evidente. Portanto, a pesquisa sobre a aplicação da borracha de alta resistência representa uma resposta a esse processo de avanço tecnológico constante (PINTO; NASCIMENTO; SIRQUEIRA, 2019)

Além disso, a pesquisa nesta área é notória em termos de inovação e sustentabilidade. A borracha de alta resistência trata-se de um material que se destaca por suas propriedades físicas e químicas notáveis, tornando-se um candidato promissor para aplicações em transformadores. O estudo dessa borracha e sua adaptação às demandas de transformadores oferecem a oportunidade de desenvolver soluções mais assertivas e respeitosas ao meio ambiente.

A inovação em materiais de isolamento corrobora para a otimização da eficiência energética, redução de perdas de energia e, portanto, para a mitigação dos impactos ambientais negativos associados à geração e distribuição de eletricidade (OLIVEIRA *et al.*, 2022).

Adicionalmente, a relevância da pesquisa nesta área se estende a instituições reguladoras e à sociedade em geral. As normas e regulamentações que regem a segurança e o desempenho de transformadores são fundamentais para a operação segura e confiável das redes elétricas (FINOCCHIO; ANTUNES, 2021).

Com isso, entender a conformidade da borracha de alta resistência com essas normas e sua possível inclusão em regulamentações futuras é um aspecto indispensável desta pesquisa. Para a sociedade, essa pesquisa pode resultar em sistemas elétricos mais confiáveis e economicamente eficientes, com potencial para impactar positivamente a qualidade de vida das comunidades, sobretudo pela ampliação da segurança dos transformadores em diferentes eixos de fornecimento de energia elétrica.

## OBJETIVOS

### GERAL

Investigar a viabilidade e os benefícios da aplicação da borracha de alta resistência em transformadores, com foco na melhoria do desempenho e da confiabilidade desses dispositivos em sistemas elétricos de larga escala.

### ESPECÍFICOS

- Realizar uma revisão aprofundada da literatura sobre materiais tradicionalmente utilizados em transformadores, suas propriedades, desafios de manutenção e necessidades de inovação.
- Caracterizar em detalhes as propriedades físicas e químicas da borracha de alta resistência e compará-las com materiais isolantes tradicionais.
- Analisar as possíveis aplicações da borracha de alta resistência em diferentes partes de transformadores, considerando melhorias no desempenho e na durabilidade.

## **METODOLOGIA**

Metodologicamente, aplicou-se uma revisão bibliográfica documental e exploratória sob as vias de uma pesquisa observacional e qualitativa com o intuito de avaliar a possibilidade de inovação em transformadores, com ênfase nas borrachas de alta resistência.

Essa combinação de métodos garante a oportunidade de examinar materiais que ainda não foram previamente analisados ou que podem ser reavaliados, estabelecendo assim uma base valiosa para futuras pesquisas qualitativas. Isso também abre espaço para abordagens inovadoras impulsionadas pela criatividade do pesquisador. Ainda mais, a pesquisa documental possibilita a investigação de indivíduos que não estão fisicamente acessíveis, como aqueles que estão geograficamente distantes ou já falecidos. Os documentos, por sua parte, servem como fontes não reativas ideais para investigações de longo prazo (LAKATOS; MARCONI, 2017).

Com isso em vista, a utilização do método observacional em harmonia com a pesquisa qualitativa simplifica a condução de um estudo abrangente e alinhado com os objetivos do pesquisador. Esse método se apoia em processos sensoriais que emergem da imersão do pesquisador nos fenômenos empíricos, evidenciando-se pela distinção em relação às percepções do senso comum (LAKATOS; MARCONI, 2017).

O eixo observacional, por sua vez, complementa tais propósitos por captar com assertividade os aspectos essenciais e acidentais de um fenômeno no contexto empírico, tratando da averiguação do produto de um ato observado e registrado (GIL, 2010).

Para tanto, consultou-se bases de dados como Scientific Electronic Library Online (Scielo) e Google Acadêmico. Primordialmente, foram excluídos trechos de textos e artigos incompletos que não abordavam diretamente o tema, assim como obras que não se encaixavam nas definições pré-estabelecidas de idioma e período.

Isto posto, a delimitação desta pesquisa incorpora textos, obras e artigos científicos dos últimos 10 anos (2013-2023), tanto nacionais quanto internacionais, embasando-se nas seguintes palavras-chave: “transformadores”, “borracha de alta resistência”, “propriedades” e “aplicabilidade”.

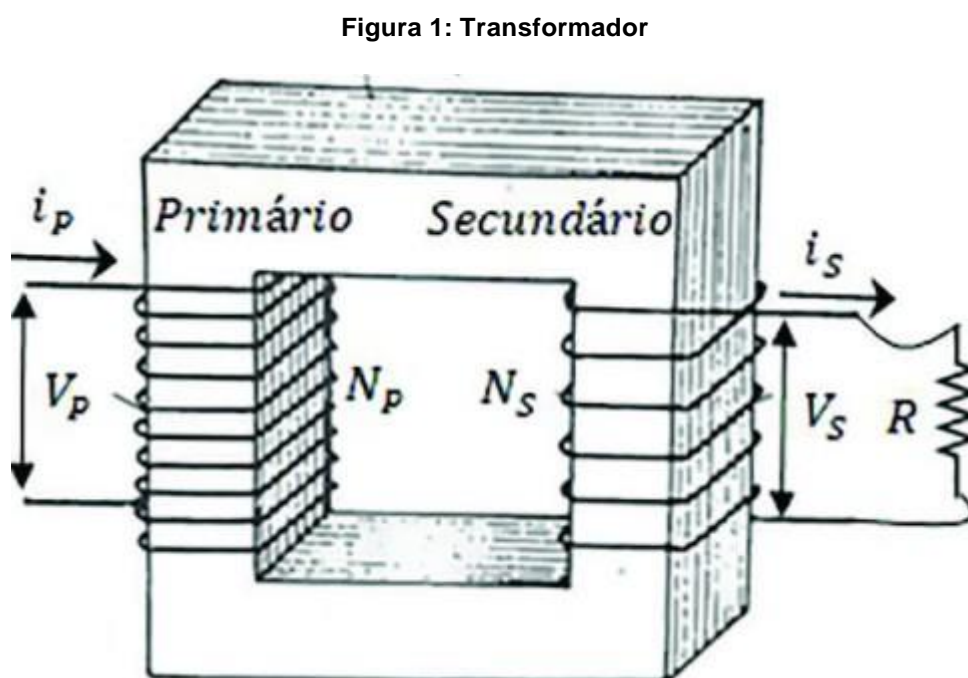
## CAPÍTULO 1 – MATERIAIS ISOLANTES EM TRANSFORMADORES E BORRACHA DE ALTA RESISTÊNCIA

### 1.1 Transformadores: Caracterização

Os transformadores são dispositivos fundamentais que impactam na transmissão e distribuição eficiente de energia elétrica. O entendimento dos fundamentos dos transformadores é essencial para a operação segura e eficaz dos sistemas de energia elétrica (MELO, 2017).

Os transformadores funcionam com base em princípios fundamentais da física, em particular na lei de Faraday da indução eletromagnética. Esses princípios são fidedignos para compreender como a variação de fluxo magnético em um transformador gera uma corrente elétrica induzida (FARIA, 2017).

O princípio de funcionamento de um transformador é baseado na relação entre o número de voltas dos enrolamentos primário e secundário, que determina a relação de tensão e corrente entre as bobinas como pode ser visto na Figura 1:



Fonte: Alves et al. (2022, p. 6).

A classificação de transformadores, por sua vez, é concernente à categorização e identificação de diferentes tipos de transformadores com base em sua aplicação e tensão de operação, abrangendo desde transformadores de potência utilizados em redes de alta tensão até transformadores de distribuição empregados em redes de baixa tensão (ANTONELLI *et al.*, 2013).

Para além dos princípios de funcionamento e classificação, os transformadores são compostos por componentes-chave que contribuem para seu desempenho e operação. Esses componentes incluem enrolamentos, que são bobinas condutoras que carregam a corrente elétrica e são responsáveis pela transferência de energia de um enrolamento para outro (FARIA, 2017).

O núcleo, composto por materiais ferromagnéticos, tem a função de concentrar o fluxo magnético gerado pela corrente elétrica, melhorando a eficiência do transformador. Gradativamente, o sistema de resfriamento demonstra ser um elemento imprescindível, uma vez que evita o superaquecimento do transformador, corroborando assim para sua operação, contínua, segura e duradoura (ANTONELLI *et al.*, 2013).

É através dessa base de conhecimento que se torna possível avaliar as implicações de novos materiais isolantes, como a borracha de alta resistência, e de tecnologias inovadoras para a melhoria da eficiência, confiabilidade e sustentabilidade dos sistemas de energia elétrica (OLIVEIRA *et al.*, 2022).

Neste segmento, as características elétricas dos transformadores são auxiliares na determinação de seu desempenho e adequação para aplicações específicas. A tensão nominal de um transformador, expressa em *volts*, representa a tensão para a qual o transformador é projetado para operar com segurança e eficiência (FORTES *et al.*, 2019).

A corrente nominal, medida em *amperes*, define a capacidade máxima de corrente que o transformador pode suportar continuamente, sem exceder sua capacidade. A potência nominal, medida em *watts* ou *volt-amperes*, consiste em uma indicação da capacidade de transferência de energia do transformador e é fundamental para dimensionar o transformador de acordo com as necessidades de uma aplicação específica. Essas características elétricas são demandadas para garantir que o transformador funcione adequadamente e não seja sobrecarregado, evitando falhas e riscos para a operação da rede elétrica (FARIA, 2017).



Os transformadores variam amplamente em tamanho e são projetados para atender a uma variedade de aplicações em sistemas elétricos. Os tamanhos e aplicações comuns de transformadores podem ser agrupados em diferentes categorias, como transformadores de potência (Figura 2), transformadores de distribuição (Figura 3) e transformadores de instrumentação (Figura 4) (FORTES *et al.*, 2019).

**Figura 2: Transformador de Potência**



Fonte: Scottech Electrical (2023).

**Figura 3: Transformador de Distribuição**



Fonte: Scottech Electrical (2023).

**Figura 4: Transformador de Instrumentação**



**Fonte:** Fergütz (2021, p. 19).

Os transformadores de potência, geralmente de grande porte, são utilizados em redes de transmissão de alta tensão para aumentar ou diminuir a tensão em níveis substanciais, enquanto os transformadores de distribuição são empregados em redes de média e baixa tensão, fornecendo eletricidade a consumidores finais, como residências e empresas (REIS; GUEDES, 2022).

Já os transformadores de instrumentação são aplicados em medição, controle e proteção de sistemas elétricos. Cada tipo de transformador tem requisitos específicos de tamanho e desempenho, o que demonstra a diversidade de aplicações para esses dispositivos na infraestrutura elétrica (ANTONELLI *et al.*, 2013).

Em consonância com a ampla gama de aplicações, os transformadores necessitam de materiais isolantes confiáveis para garantir sua operação segura e eficiente. Esses materiais isolantes auxiliam na prevenção de curtos-circuitos, no gerenciamento de campos elétricos e no isolamento de partes condutoras (MELO, 2017).

As necessidades de materiais isolantes confiáveis para transformadores são impulsionadas por fatores como a necessidade de alta rigidez dielétrica, resistência à

degradação em condições de operação e durabilidade ao longo do tempo. Qualquer falha nos materiais isolantes pode culminar em interrupções no fornecimento de eletricidade, danos a equipamentos e riscos para a segurança. Para tanto, a pesquisa e o desenvolvimento contínuos de materiais isolantes avançados, como a borracha de alta resistência, evidenciam-se através de um papel crucial na melhoria do desempenho e da confiabilidade dos transformadores em sistemas elétricos de larga escala (OLIVEIRA *et al.*, 2022).

A importância da química no segmento dos transformadores e materiais isolantes é um amplo, uma vez que essa área precisa ser atuante na pesquisa, desenvolvimento e aplicação de materiais isolantes que atendam às crescentes demandas por eficiência energética, segurança operacional e sustentabilidade ambiental (MELO, 2017).

Dentre os aspectos mais relevantes da química, situa-se a pesquisa de materiais isolantes avançados. Através da química, possibilita-se sintetizar e modificar materiais para atender a requisitos específicos, como alta rigidez dielétrica, resistência à umidade, estabilidade térmica e propriedades mecânicas adequadas. Isso permite o desenvolvimento de isolantes mais eficazes e duráveis, que, por sua vez, aprimoram o desempenho e a confiabilidade dos transformadores. Inclusive, é através da análise química que a formulação de materiais isolantes é aprimorada, além de identificar estratégias para aumentar sua resistência a fatores como calor, umidade e agentes corrosivos (FARIA, 2017).

O crescente foco na redução de impactos ambientais e na conformidade com regulamentações de sustentabilidade tem impulsionado a busca por isolantes que sejam menos tóxicos, mais fáceis de reciclar e que apresentem uma menor pegada de carbono. A química, por sua parte, agrega vantagens na criação de materiais isolantes que atendam a essas necessidades, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais associados à produção e ao descarte de materiais isolantes convencionais (ASSIS *et al.*, 2015).

## **1.2 Materiais Isolantes em Transformadores**

A escolha dos materiais isolantes é um dos pilares no projeto e no desempenho dos transformadores, uma vez que esses materiais são responsáveis por garantir a integridade operacional desses dispositivos. Entre os materiais isolantes tradicionais

mais comuns, o papel e o óleo isolante têm sido amplamente empregados em transformadores ao longo de décadas devido às suas propriedades dielétricas e térmicas notáveis (MELO, 2017).

O papel isolante trata-se de um dos materiais tradicionais mais antigos e amplamente utilizados em transformadores. Sua escolha se deve, em grande parte, às suas propriedades elétricas notáveis, que o tornam capaz de suportar altos campos elétricos sem ruptura (CAMPOS, 2016).

A rigidez dielétrica do papel é uma característica positiva que permite que ele sirva como uma barreira eficaz contra curtos-circuitos e descargas elétricas. Analogamente, o papel possui boas propriedades térmicas, sendo capaz de absorver e dissipar o calor gerado durante a operação do transformador. Todavia, é importante salientar que o papel está sujeito à degradação ao longo do tempo devido a fatores como a umidade, altas temperaturas e impurezas, afetando sua capacidade de isolamento elétrico (ANTONELLI *et al.*, 2013).

O óleo isolante é outro material frequentemente utilizado em combinação com papel isolante. O óleo é empregado devido às suas excelentes propriedades térmicas, sendo capaz de absorver e dissipar eficazmente o calor gerado durante a operação do transformador. Ademais, o óleo auxilia na refrigeração do transformador e atua como agente de isolamento dielétrico, impedindo o arco elétrico e a formação de descargas. No entanto, o óleo isolante também está sujeito à degradação ao longo do tempo e pode representar riscos ambientais devido ao seu potencial impacto negativo (CAMPOS, 2016).

As propriedades elétricas e térmicas desses materiais isolantes tradicionais são de extrema importância para a operação segura e eficiente dos transformadores. A rigidez dielétrica, a resistência térmica, a capacidade de dissipação de calor e a estabilidade química são propriedades críticas a serem consideradas na escolha e na manutenção desses materiais isolantes. A compreensão das características desses materiais é fundamental para a avaliação de seu desempenho sob diferentes condições operacionais, bem como para a identificação de estratégias de melhoria e inovação na engenharia de transformadores e conjunto com o ponto de vista químico desta inovação (ASSIS *et al.*, 2015).

A manutenção e substituição de sistemas antigos, como os transformadores que utilizam materiais isolantes tradicionais, apresentam desafios inerentes. À medida que os transformadores envelhecem, surgem diversas preocupações em relação à

segurança operacional, eficiência energética e confiabilidade do sistema elétrico. Esses obstáculos se tornam particularmente complexos devido à necessidade de equilibrar a operação contínua de sistemas críticos com a implementação de atualizações e melhorias (FORTES *et al.*, 2019).

Com o tempo, materiais como papel e óleo isolante sofrem alterações físicas e químicas que podem afetar negativamente suas propriedades dielétricas e térmicas. A presença de impurezas, a absorção de umidade e as altas temperaturas de operação contribuem para a degradação desses materiais, tornando-os menos eficazes como isolantes elétricos e térmicos (FARIA, 2017).

Como resultado, a manutenção regular se torna essencial, envolvendo testes de diagnóstico e, em alguns casos, a substituição dos materiais isolantes. Essa manutenção é desafiadora, pois pode exigir interrupções na operação do sistema elétrico, afetando a continuidade do fornecimento de energia (ANTONELLI *et al.*, 2013).

No decorrer do envelhecimento dos transformadores, a fabricação de peças de reposição específicas e a manutenção especializada podem se tornar escassas. Isso implica na necessidade de adaptação e, em alguns casos, na busca de soluções alternativas para manter os sistemas em funcionamento. Inclusive, a capacitação de técnicos qualificados para trabalhar em sistemas mais antigos requer investimentos em treinamento e aquisição de conhecimento específico (REIS; GUEDES, 2022).

A substituição de sistemas antigos também converge como uma adversidade devido ao investimento financeiro necessário e à logística envolvida. A aquisição e a instalação de novos transformadores ou sistemas de isolamento requerem planejamento cuidadoso e podem resultar em interrupções prolongadas na operação do sistema elétrico, podendo ser custoso e inconveniente para os consumidores. Além disso, a disposição ambientalmente adequada dos materiais antigos, que podem conter substâncias perigosas, é uma preocupação indispensável (CAMPOS, 2016).

Isto posto, os desafios de manutenção e substituição em sistemas antigos são complexos e envolvem considerações técnicas, financeiras e operacionais. Lidar com a degradação de materiais isolantes, a disponibilidade de peças de reposição e a gestão de técnicos qualificados são aspectos imprescindíveis na manutenção contínua de sistemas elétricos mais antigos. A substituição, por sua vez, requer planejamento minucioso e pode ser dispendiosa e impactante na operação (MELO, 2017).

As necessidades de inovação e aprimoramento na área de transformadores e materiais isolantes são impulsionadas por um conjunto diversificado e demandas no cenário contemporâneo. A busca por soluções inovadoras é motivada razões como a crescente demanda por eficiência energética, a necessidade de maior confiabilidade e segurança operacional, bem como a preocupação com a sustentabilidade ambiental. Essas necessidades de inovação e aprimoramento se desdobram em várias áreas-chave (ASSIS *et al.*, 2015).

Nesse íterim, os materiais tradicionais, como o papel e o óleo isolante, embora tenham sido amplamente utilizados, apresentam limitações em relação à sua capacidade de resistir a condições operacionais desafiadoras. Contextualmente, a pesquisa e o desenvolvimento de materiais isolantes de próxima geração tornam-se essenciais. Esses materiais devem ser projetados para oferecer não apenas excelente rigidez dielétrica e resistência térmica, mas também para serem mais resistentes à degradação, mais seguros para o meio ambiente e mais eficientes em termos energéticos (CAMPOS, 2016).

Outro aspecto notório da inovação é a aplicação de tecnologias avançadas de diagnóstico e monitoramento. A capacidade de avaliar o estado de transformadores em tempo real, por meio de técnicas como a análise de gases dissolvidos, termografia e monitoramento de descargas parciais, é de grande para identificar potenciais problemas antes que eles causem falhas no sistema. A inovação nesse campo engloba o desenvolvimento de sensores mais avançados, algoritmos de análise de dados e sistemas de monitoramento remoto, permitindo uma manutenção preditiva e preventiva mais eficaz (FARIA, 2017).

A necessidade de aprimoramento também se estende à eficiência energética dos transformadores. Ou seja, reduzir as perdas de energia durante a operação dos transformadores é uma prioridade importante, especialmente em um contexto de crescente consciência ambiental e regulamentações mais rigorosas. A inovação na concepção de transformadores, bem como o desenvolvimento de materiais de núcleo mais eficientes e técnicas de resfriamento avançadas, tornam-se elementos complementares na busca por transformadores seguros e de alta eficiência (SOUTO *et al.*, 2017).

Ainda mais, a integração de transformadores inteligentes em sistemas de energia elétrica trata-se de uma área promissora de inovação, haja vista que os transformadores inteligentes podem monitorar e controlar suas operações de forma

autônoma e se comunicar com sistemas de gerenciamento de energia em tempo real. Isso permite uma resposta mais rápida a eventos anormais, otimização da rede elétrica e redução de perdas de energia (BALLAN, 2019).

### **1.3 Resistência Dielétrica**

A resistência dielétrica do óleo isolante impacta na integridade e desempenho de sistemas elétricos, destacando a importância de compreender as propriedades intrínsecas desse material isolante. A base da eficácia do óleo isolante advém de sua composição química, que é desenvolvida para atender aos requisitos específicos de resistência dielétrica em ambientes elétricos diversos (ALMEIDA, 2019).

A composição química do óleo isolante é caracterizada pela presença predominante de hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, os quais conferem ao óleo propriedades dielétricas fundamentais. A presença de grupos funcionais, como hidroxilas e ésteres, também dispõe de um papel significativo na determinação das características dielétricas do óleo. A concentração e a natureza desses componentes químicos influenciam diretamente a polarização molecular, afetando a capacidade do óleo em resistir à passagem de corrente elétrica (SOUSA, 2020).

A viscosidade, densidade e ponto de fulgor são parâmetros físicos cruciais que influenciam a capacidade do óleo em manter a rigidez dielétrica ao longo do tempo e sob condições operacionais variadas. A viscosidade, em exemplificação, está intrinsecamente relacionada à capacidade do óleo de isolar efetivamente as partes energizadas do sistema elétrico, sendo um fator determinante na prevenção de descargas elétricas indesejadas (LIPPMANN, 2019).

A consideração conjunta das propriedades químicas e físicas do óleo isolante revela uma sinergia intrincada entre os diversos elementos que compõem esse material. A avaliação da resistência dielétrica do óleo isolante demanda a implementação de ensaios específicos, essenciais para garantir a conformidade com os padrões de segurança e desempenho estabelecidos em contextos industriais e de infraestrutura elétrica. Dentre os métodos de medição amplamente utilizados, destaca-se o ensaio de rigidez dielétrica, uma técnica que avalia a capacidade do óleo isolante em resistir à perfuração elétrica quando submetido a campos elétricos intensos (SANTOS, 2018).

No ensaio de rigidez dielétrica, uma célula de ensaio é preenchida com óleo isolante e submetida a um campo elétrico crescente. Este método mensura a tensão elétrica na qual ocorre a perfuração (SANTOS, 2018).

Além do ensaio de rigidez dielétrica, outros métodos, como o ensaio de fator de potência, são empregados para avaliar a qualidade do óleo isolante em termos de perdas dielétricas. Estes procedimentos ofertam uma visão abrangente do comportamento elétrico do óleo em condições operacionais representativas, auxiliando na identificação de potenciais falhas e na formulação de estratégias de manutenção preventiva (CARNEIRO *et al.*, 2018).

As borrachas naturais, derivadas do látex coletado de seringueiras, possuem características intrínsecas que as tornam adequadas para aplicações específicas em isolamento elétrico. Sua estrutura polimérica é composta principalmente por poliisopreno, conferindo-lhes flexibilidade, elasticidade e resistência ao desgaste. Contudo, a resistência dielétrica das borrachas naturais pode ser influenciada pela presença de impurezas e pela susceptibilidade à degradação quando expostas a condições ambientais adversas (ORNAGHI, 2018).

Por outro lado, as borrachas sintéticas, produzidas por síntese química a partir de hidrocarbonetos, oferecem uma gama diversificada de polímeros que podem ser ajustados para atender requisitos singulares de resistência dielétrica. Polímeros como o polietileno e o polipropileno são comumente utilizados em formulações sintéticas para otimizar as propriedades elétricas, mecânicas e térmicas. A capacidade de controle preciso da composição química dessas borrachas sintéticas possibilita uma adaptação mais refinada às exigências de aplicações específicas, proporcionando maior previsibilidade e estabilidade nas características dielétricas (LIPPMANN, 2019).

A influência da composição química nas propriedades dielétricas das substâncias é um aspecto crucial na compreensão do comportamento elétrico de materiais isolantes. As ligações químicas presentes desempenham um papel fundamental na determinação da resistência dielétrica, uma vez que afetam diretamente a mobilidade dos elétrons e a capacidade do material de suportar campos elétricos sem condução significativa (SOUSA, 2020).

Já a Teoria das Bandas, um pilar na compreensão do comportamento elétrico dos sólidos, oferece uma perspectiva abrangente sobre a estrutura eletrônica desses materiais. Os conceitos básicos desta teoria fornecem um arcabouço teórico essencial para explicar fenômenos de condução e isolamento elétrico. A estrutura eletrônica de



sólidos, conforme delineada por esta teoria, é denotada pela distribuição dos níveis de energia dos elétrons em um sólido cristalino, desencadeando a formação de bandas de energia e lacunas que desempenham um papel crucial nas propriedades elétricas do material (SANTOS, 2018).

A estrutura eletrônica de sólidos é influenciada pela disposição atômica, que determina a formação de bandas de energia. Estas bandas representam intervalos contínuos de níveis de energia em que os elétrons podem existir. A banda de valência, composta pelos elétrons de valência, e a banda de condução, que abriga os elétrons móveis responsáveis pela condução elétrica, são elementos fundamentais nesse contexto. A sobreposição ou separação destas bandas influencia diretamente a capacidade de um material conduzir ou isolar eletricidade (ALMEIDA, 2019).

Em isolantes, a lacuna de energia é elementar, exigindo uma quantidade significativa de energia para promover a excitação de elétrons da banda de valência para a banda de condução. Por outro prisma, nos condutores, essa lacuna é praticamente inexistente, permitindo uma mobilidade mais fácil de elétrons. Esta distinção na estrutura de bandas contribui para a explicação das propriedades elétricas de materiais variados, desde metais condutores até isolantes elétricos (LIPPMANN, 2019).

#### **1.4 Introdução à Borracha de Alta Resistência**

A borracha de alta resistência é um material composto utilizado na indústria elétrica e automotiva devido às suas propriedades físicas e químicas excepcionais que o tornam altamente adequado para uso como isolante em diferentes dispositivos elétricos (REIS; GUEDES, 2022).

As características gerais da borracha de alta resistência são marcadas por sua excepcional resistência elétrica e dielétrica, que a torna um isolante eficaz. A sua composição química e estrutura molecular conferem-lhe propriedades isolantes notáveis, tornando-a capaz de suportar altos campos elétricos sem sofrer descargas elétricas (BUCCI; BORBA, 2022).

Além disso, a borracha de alta resistência possui propriedades físicas que incluem flexibilidade e elasticidade, facilitando a sua aplicação em situações em que é necessária conformabilidade e adaptação a formas complexas, comumente

encontradas em sistemas de transformadores (PINTO; NASCIMENTO; SIRQUEIRA, 2019).

Este material é conhecido por sua capacidade de resistir a altas temperaturas e ambientes adversos, tornando-o adequado para uso em transformadores que operam sob condições extremas. Sua resistência à degradação em contato com óleo e outros agentes químicos também é uma característica valiosa em transformadores imersos em óleo (BUCCI; BORBA, 2022).

A borracha de alta resistência não apenas protege os componentes internos dos transformadores, mas também contribui para a estabilidade e confiabilidade operacional ao evitar a penetração de umidade, o que pode ser prejudicial ao isolamento (COSSA; CARVALHO; SIRQUEIRA, 2015).

Em relação aos benefícios adicionais, como a redução de custos de manutenção e prolongamento da vida útil dos transformadores, evidencia-se que a sua capacidade de suportar condições adversas reduz a necessidade de intervenções de manutenção frequentes, tornando os transformadores mais econômicos de operar a longo prazo. Já a sua durabilidade corrobora para a extensão da vida útil dos transformadores, reduzindo custos associados à substituição prematura (REIS; GUEDES, 2022).

A área de materiais isolantes de borracha tem sido objeto de extensa pesquisa e desenvolvimento nas últimas décadas, impulsionada pelas demandas crescentes do mercado por soluções inovadoras. Na última década, vários desenvolvimentos notáveis surgiram nesse campo, atendendo às demandas do mercado e enfrentando desafios técnicos significativos (BUCCI; BORBA, 2022).

Uma das áreas de pesquisa ativas é a formulação de compostos de borracha de alta resistência que ofereçam desempenho aprimorado em relação a fatores como resistência à umidade, estabilidade térmica e durabilidade. Isso envolve a exploração de diferentes composições químicas e técnicas de processamento para criar materiais isolantes com características dielétricas excepcionais (COSSA; CARVALHO; SIRQUEIRA, 2015).

Por exemplo, a incorporação de nanomateriais, como nanotubos de carbono, tende a melhorar a rigidez dielétrica e a resistência térmica dos materiais de borracha, tornando-os mais adequados para aplicações de transformadores em ambientes rigorosos (PINTO; NASCIMENTO; SIRQUEIRA, 2019).

Em paralelo, a análise de gases dissolvidos, o monitoramento de descargas parciais e a termografia infravermelha são algumas das técnicas avançadas que auxiliam na identificação precoce de potenciais problemas nos transformadores. A pesquisa nesta área se concentra em aprimorar a sensibilidade e a precisão dessas técnicas, bem como na integração de sistemas de monitoramento em tempo real para possibilitar a manutenção preditiva e preventiva (PINTO; NASCIMENTO; SIRQUEIRA, 2019).

A busca por soluções menos nocivas ao meio ambiente levou ao desenvolvimento de materiais isolantes que são isentos de substâncias tóxicas e que podem ser reciclados de maneira eficiente. A conformidade com regulamentações ambientais mais rigorosas impulsiona a pesquisa para mitigar os impactos ambientais da produção, uso e descarte de materiais isolantes (COSSA; CARVALHO; SIRQUEIRA, 2015).

As demandas do mercado por soluções inovadoras na área de materiais isolantes de borracha são impulsionadas pela necessidade de sistemas de energia elétrica mais eficientes, confiáveis e sustentáveis. Os desenvolvimentos recentes refletem um compromisso contínuo com a pesquisa e a inovação para atender a essas demandas e enfrentar os desafios tecnológicos e ambientais em constante evolução (SOUTO *et al.*, 2017).

A escolha do material de isolamento em transformadores é uma consideração fundamental desde o projeto de um sistema elétrico, iniciando-se com a busca por equipamento seguros e eficazes de acordo com a categoria dos recursos a serem aplicados uma vez que tem um impacto direto no desempenho elétrico e na confiabilidade do equipamento (PINTO; NASCIMENTO; SIRQUEIRA, 2019).

A borracha de alta resistência já é empregada nesse contexto devido às suas propriedades dielétricas excepcionais e à capacidade de suportar condições operacionais desafiadoras. Entre os diversos tipos de borrachas de alta resistência, a EPDM (Etileno-Propileno-Dieno Monômero) (Figura 5) destaca-se como uma das principais escolhas para aplicações de isolamento em transformadores (REIS; GUEDES, 2022).

**Figura 5: EPDM (Etileno-Propileno-Dieno Monômero)**



**Fonte:** Grupo RPF (2022).

A EPDM é reconhecida por suas propriedades elétricas superiores, abrangendo alta resistência dielétrica e constante dielétrica estável em uma ampla faixa de temperaturas. Além disso, a EPDM possui excelente resistência à umidade, sendo essencial em ambientes de transformadores, onde a presença de umidade pode comprometer o desempenho do equipamento. Sua resistência a agentes corrosivos, como óleo e produtos químicos, também a torna uma escolha sólida para materiais isolantes em transformadores (SOUTO *et al.*, 2017).

Além da EPDM, as borrachas de silicone também são consideradas para aplicações de isolamento em transformadores, especialmente em situações específicas. As borrachas de silicone apresentam boas propriedades dielétricas, resistência térmica e resistência ao ozônio, o que as torna adequadas para ambientes que envolvem temperaturas extremas. No entanto, a escolha entre a EPDM e as borrachas de silicone depende das necessidades específicas do transformador, das condições de operação e dos padrões de desempenho exigidos (COSSA; CARVALHO; SIRQUEIRA, 2015).

É importante mencionar que a borracha nitrílica (NBR), embora seja amplamente utilizada em transformadores e equipamentos elétricos, não é geralmente empregada como material isolante principal em transformadores. A NBR é preferencialmente utilizada em componentes de vedação e proteção, devido à sua notável resistência ao óleo e a muitos produtos químicos (SOARES, 2015).

No entanto, suas propriedades dielétricas não são tão favoráveis quanto as da EPDM ou das borrachas de silicone, o que a torna menos apropriada para funções de isolamento elétrico. Conseqüentemente, a escolha precisa ser cuidadosamente ponderada para garantir o desempenho elétrico e a segurança dos transformadores (SOUTO *et al.*, 2017).

## CAPÍTULO 2 – PROPRIEDADES DA BORRACHA DE ALTA RESISTÊNCIA

### 2.1 Propriedades Físicas

A borracha de alta resistência é um material composto que apresenta um conjunto de propriedades físicas notáveis que a tornam particularmente adequada para uso em ambientes elétricos e industriais desafiadores. Neste contexto, a análise das propriedades físicas, que engloba aspectos como elasticidade e resistência à tração e compressão, é de grande importância (COSSA; CARVALHO; SIRQUEIRA, 2015).

A elasticidade é uma característica marcante da borracha de alta resistência. Esse material possui uma estrutura molecular que lhe confere a capacidade de esticar e retrair de forma considerável sem sofrer deformação permanente. Essa elasticidade é essencial em aplicações de transformadores, pois permite que a borracha de alta resistência se adapte a variações de temperatura, pressão e carga (BUCCI; BORBA, 2022).

A capacidade de se esticar e recuperar a sua forma original é crucial para manter a integridade do isolamento em transformadores durante operações sujeitas a variações térmicas e mecânicas (PINTO; NASCIMENTO; SIRQUEIRA, 2019).

Além da elasticidade, a resistência à tração e compressão da borracha de alta resistência é uma propriedade física crítica. A resistência à tração mede a capacidade do material de suportar forças de tração sem rompimento. A borracha de alta resistência é notável por sua resistência a essas forças, o que é essencial em aplicações onde a tração pode ocorrer devido a variações na carga ou movimentações estruturais (SOUTO *et al.*, 2017).

Da mesma forma, a resistência à compressão é fundamental para evitar que o material seja esmagado sob pressões elevadas, o que pode ocorrer em aplicações de transformadores devido ao seu peso e condições operacionais (BUCCI; BORBA, 2022).

Em conjunto, essas propriedades físicas da borracha de alta resistência contribuem para sua capacidade de atuar como um isolante eficaz em transformadores e sistemas elétricos. A elasticidade permite a conformabilidade e a adaptação do material a diferentes geometrias e condições, enquanto a resistência à tração e compressão garantem sua durabilidade e capacidade de manter a integridade

estrutural. Essas propriedades físicas são fatores que tornam a borracha de alta resistência uma escolha viável e confiável para aplicações de isolamento elétrico em sistemas de energia elétrica (OLIVEIRA, 2015).

A comparação entre a borracha de alta resistência e materiais isolantes tradicionais em termos de flexibilidade é de grande notoriedade na avaliação de sua eficácia como isolantes em aplicações elétricas e, especialmente, em transformadores (OLIVEIRA, 2015).

A flexibilidade de um material isolante é impactante, uma vez que a capacidade de adaptação a diferentes condições operacionais é fundamental para garantir a segurança e o desempenho de sistemas elétricos. Comparar a flexibilidade da borracha de alta resistência com materiais isolantes tradicionais, como o papel, óleo e outros, é fundamental para avaliar as vantagens que essa inovação oferece (BUCCI; BORBA, 2022).

A borracha de alta resistência se destaca em termos de flexibilidade quando comparada a materiais isolantes tradicionais. Enquanto materiais como papel e óleo isolante podem ser rígidos e inflexíveis em grandes aplicações, a borracha de alta resistência demonstra uma capacidade excepcional de se esticar e adaptar a diferentes geometrias e condições de operação (PINTO; NASCIMENTO; SIRQUEIRA, 2019).

Essa flexibilidade permite que a borracha de alta resistência seja aplicada em áreas onde é necessária conformabilidade, como isolação entre enrolamentos de transformadores, onde a geometria varia dependendo do projeto (COSSA; CARVALHO; SIRQUEIRA, 2015).

De modo complementar, a capacidade da borracha de alta resistência de esticar e retrair de forma elástica é fundamental para absorver choques e sobrecargas elétricas que podem ocorrer durante operações normais ou anormais. Essa elasticidade auxilia na distribuição uniforme de forças e estresse ao longo do material, minimizando o risco de ruptura dielétrica e danos ao sistema elétrico. Além disso, a elasticidade contribui para a durabilidade do material, uma vez que a capacidade de absorver choques e impactos elétricos prolonga a vida útil do isolante (SOUTO *et al.*, 2017).

Portanto, a comparação entre a borracha de alta resistência e materiais isolantes tradicionais em relação à flexibilidade e à capacidade de absorção de choques elétricos destaca a superioridade desse material inovador em aplicações

elétricas e de transformadores. Sua flexibilidade e elasticidade são características distintivas que a tornam uma escolha eficaz para garantir a segurança, o desempenho e a durabilidade dos sistemas elétricos, especialmente em situações em que a adaptação a variações geométricas e absorção de impactos elétricos são essenciais, reforçando esse material como uma opção de isolamento confiável e inovadora (BUCCI; BORBA, 2022).

## **2.2 Propriedades Químicas**

As propriedades químicas da borracha de alta resistência evidencia sua eficácia como material isolante em aplicações elétricas, incluindo transformadores. A capacidade de resistir a reações químicas adversas e agentes corrosivos é essencial para manter a integridade do material isolante ao longo do tempo e em ambientes desafiadores. Duas propriedades químicas cruciais dessa borracha são a estabilidade química e a resistência a agentes corrosivos (PINTO; NASCIMENTO; SIRQUEIRA, 2019).

A estabilidade química da borracha de alta resistência refere-se à sua capacidade de manter suas propriedades físicas e dielétricas em presença de diversos produtos químicos e gases. Essa propriedade é demandada em transformadores imersos em óleo, onde a borracha de alta resistência é frequentemente utilizada (OLIVEIRA, 2015).

O óleo isolante pode estar sujeito a contaminações químicas ao longo do tempo, como a formação de produtos de degradação devido à exposição ao calor e à oxidação. A estabilidade química da borracha de alta resistência garante que ela resista a interações químicas prejudiciais, mantendo seu desempenho isolante e protegendo os componentes internos do transformador. Essa capacidade de manter a integridade dielétrica é fundamental para garantir a operação segura e confiável dos sistemas elétricos (BUCCI; BORBA, 2022).

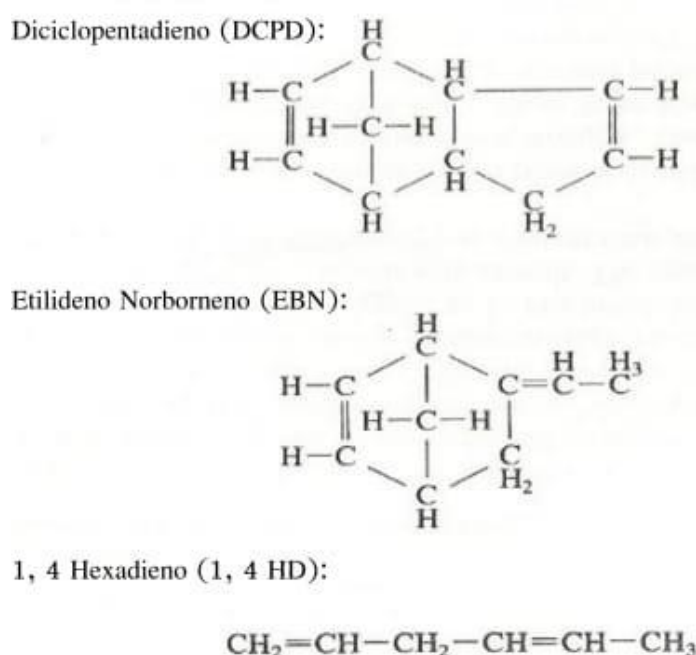
Em primeiro lugar, os transformadores e sistemas elétricos podem estar expostos a ambientes corrosivos devido à presença de substâncias químicas agressivas, umidade e outros fatores. A borracha de alta resistência é projetada para resistir à corrosão, o que significa que ela não se degrada ou sofre danos quando exposta a agentes corrosivos, garantindo que seu desempenho isolante seja preservado em condições desafiadoras. Isso é particularmente crucial para a



manutenção de transformadores e sistemas elétricos em ambientes industriais ou marítimos, onde a exposição a agentes corrosivos é comum (COSSA; CARVALHO; SIRQUEIRA, 2015).

Em resumo, as propriedades químicas da borracha de alta resistência (Figura 6), incluindo a estabilidade química e a resistência a agentes corrosivos, são essenciais para sua utilidade como material isolante em transformadores e sistemas elétricos (OLIVEIRA, 2015).

**Figura 6: Principais Dienos para Produzir Borracha de EPDM: DCPD, ENB e 1,4 HD**



Fonte: Gomes (2018).

Essas propriedades garantem que a borracha de alta resistência possa manter sua eficácia ao longo do tempo, mesmo em ambientes desafiadores, e desempenha um papel crítico na preservação da integridade dielétrica e na proteção dos sistemas elétricos contra reações químicas adversas. Essa análise destaca a substancialidade da seleção de materiais isolantes com essas propriedades químicas para garantir a segurança, a confiabilidade e o desempenho dos sistemas elétricos (SOUTO *et al.*, 2017).

Essas interações químicas impactam na estabilidade e na durabilidade do isolamento, sobretudo em transformadores imersos em óleo, onde a borracha de alta

resistência é comumente aplicada. Compreender como a borracha de alta resistência reage com o óleo isolante e outros produtos químicos presentes no ambiente do transformador é essencial para garantir um desempenho confiável e seguro do sistema elétrico (BUCCI; BORBA, 2022).

O óleo isolante em transformadores pode estar sujeito a processos de degradação ao longo do tempo, devido a vários fatores, incluindo o calor, a oxidação e a formação de produtos de degradação. As interações químicas entre a borracha de alta resistência e o óleo influenciam a estabilidade do sistema. Em exemplificação, no caso de reações adversas, a borracha de alta resistência tende a sofrer inchamento, degradação, endurecimento ou outros efeitos indesejados. Para isso, deve-se desenvolver práticas de manutenção e monitoramento mais eficazes (COSSA; CARVALHO; SIRQUEIRA, 2015).

No contexto de desenvolvimentos em tecnologias de revestimento químico, os materiais especiais demonstram uma ampla capacidade de proteger a borracha de alta resistência contra a absorção de óleo e outros agentes corrosivos, garantindo sua durabilidade. Inclusive, tais tecnologias de revestimento podem reduzir a permeabilidade a gases, o que é essencial para evitar a degradação do óleo e manter a rigidez dielétrica (BUCCI; BORBA, 2022).

## CAPÍTULO 3 – APLICAÇÕES DA BORRACHA DE ALTA RESISTÊNCIA EM TRANSFORMADORES

### 3.1 Aplicabilidade da Borracha

As partes dos transformadores onde a borracha de alta resistência é aplicada precisam ser abordadas na manutenção do desempenho, segurança e eficiência desses dispositivos. Uma das áreas de aplicação mais significativas da borracha de alta resistência é o isolamento entre enrolamentos do transformador. Esse isolamento é fidedigno para separar os diferentes enrolamentos elétricos presentes no interior do transformador, como o enrolamento primário e secundário, bem como para evitar descargas elétricas indesejadas, garantindo o funcionamento seguro e eficiente do dispositivo (GHELLER JÚNIOR, 2015).

A aplicação da borracha de alta resistência como material isolante entre enrolamentos oferece várias vantagens. Em primeiro lugar, sua alta rigidez dielétrica ajuda a prevenir descargas elétricas e a manter a integridade do isolamento entre as bobinas. Essa capacidade de suportar altos campos elétricos é essencial para impedir que correntes parasitas fluam entre os enrolamentos, o que poderia resultar em curto-circuitos e falhas no transformador (OLIVEIRA, 2015).

Devido à sua capacidade de se adaptar a diferentes geometrias, a borracha de alta resistência pode ser usada para isolar enrolamentos de formas variadas e tamanhos diferentes, sem comprometer a integridade do sistema. Essa característica é particularmente relevante em transformadores com designs complexos (SOUTO *et al.*, 2017).

Outro benefício é a resistência a condições ambientais adversas. A borracha de alta resistência é capaz de suportar variações de temperatura, umidade e pressão, o que é importante em transformadores que operam em ambientes variados. Ela também contribui para a vedação dos enrolamentos, impedindo a entrada de umidade e agentes corrosivos que poderiam prejudicar o desempenho do transformador (GABRIEL *et al.*, 2013).

Já o isolamento de conexões envolve a utilização desse material para separar e proteger as conexões elétricas dentro do transformador. Essas conexões podem incluir, por exemplo, a ligação entre os enrolamentos e os terminais de saída, bem

como as conexões entre diferentes partes do transformador, como os núcleos e os enrolamentos (BUCCI; BORBA, 2022).

A borracha de alta resistência é escolhida para essa aplicação devido às suas propriedades dielétricas excepcionais e à sua capacidade de suportar tensões elétricas significativas sem comprometer a integridade do isolamento. Ela ajuda a prevenir descargas elétricas e correntes parasitas, que poderiam causar falhas e curtos-circuitos nas conexões elétricas. A alta rigidez dielétrica da borracha de alta resistência é particularmente crucial nesse contexto, uma vez que as conexões elétricas estão sujeitas a campos elétricos intensos (COSSA; CARVALHO; SIRQUEIRA, 2015).

A capacidade da borracha de alta resistência de se conformar às diferentes formas das conexões, mantendo sua capacidade dielétrica, torna-a uma escolha ideal para essa aplicação. A borracha de alta resistência é capaz de resistir a variações de temperatura, umidade e pressão, o que é fundamental para garantir que as conexões elétricas permaneçam protegidas e eficazes em ambientes operacionais variados (RODRIGUES; SANTOS, 2013).

Em resumo, o isolamento de conexões em transformadores é uma aplicação crítica da borracha de alta resistência, fundamental para garantir a segurança e a confiabilidade do sistema elétrico. Suas propriedades dielétricas excepcionais, flexibilidade e resistência a condições ambientais adversas a tornam uma escolha eficaz para separar e proteger conexões elétricas complexas e críticas para o desempenho dos transformadores. O uso da borracha de alta resistência nessa aplicação demonstra capacidade de contribuir para sistemas elétricos seguros e eficientes, independentemente do porte (BUCCI; BORBA, 2022).

As inovações no design de transformadores que incorporam a borracha de alta resistência representam uma evolução neste campo, com impactos substanciais na eficiência e confiabilidade dos sistemas elétricos (GABRIEL *et al.*, 2013).

O uso desse material inovador em combinação com novas abordagens de design tem proporcionado vantagens notáveis em várias áreas da engenharia elétrica, destacando-se como um campo de pesquisa em constante crescimento. Essas inovações têm permitido melhorias em aspectos como a eficiência energética, a durabilidade, a segurança e a capacidade de adaptação de transformadores, beneficiando uma ampla gama de aplicações (SOUTO *et al.*, 2017).

Uma das principais inovações no design de transformadores é a utilização da borracha de alta resistência em sistemas de isolamento complexos. A capacidade desse material de manter sua rigidez dielétrica mesmo em condições adversas, como variações de temperatura e umidade, tem possibilitado a criação de transformadores mais resistentes a falhas elétricas e ambientais. Isso se traduz em uma maior confiabilidade dos sistemas elétricos, uma vez que a borracha de alta resistência fortalece a prevenção de falhas e a melhoria da segurança (COSSA; CARVALHO; SIRQUEIRA, 2015).

A capacidade de conformar-se a diferentes geometrias e exigências de isolamento oferece a oportunidade de projetar transformadores personalizados para aplicações específicas, otimizando a eficiência energética e o desempenho. Essa flexibilidade também é de suma notoriedade em transformadores de distribuição, cuja adaptação a espaços restritos e layouts variados é essencial (COSSA; CARVALHO; SIRQUEIRA, 2015).

Essas melhorias na eficiência energética são fidedignas em sistemas elétricos modernos, onde a demanda por menor consumo de energia e redução de emissões de carbono é uma prioridade. O uso de materiais isolantes avançados, como a borracha de alta resistência, desempenha um papel fundamental nesse contexto, permitindo que os transformadores operem de maneira mais eficaz e sustentável (SOUTO *et al.*, 2017).

### **3.2 Contribuições para o Desempenho e Durabilidade**

As contribuições da borracha de alta resistência para o desempenho e a durabilidade de transformadores são multifacetadas, sendo a melhoria da eficiência energética nos sistemas elétricos uma das vantagens mais evidentes. Os transformadores dispõem de um papel vital na transmissão e distribuição de eletricidade, e qualquer ganho na eficiência energética nesses dispositivos resulta em economia de energia, redução de perdas e menor impacto ambiental (BUCCI; BORBA, 2022).

Não obstante, sua alta rigidez dielétrica permite operar transformadores com tensões mais elevadas, o que reduz as correntes elétricas e, conseqüentemente, as perdas por efeito Joule, que são proporcionais ao quadrado da corrente. Além disso, a capacidade da borracha de alta resistência de manter sua performance dielétrica

mesmo sob condições adversas, como altas temperaturas, contribui para a estabilidade do isolamento e reduz as perdas de energia devido a falhas dielétricas (PEREIRA, 2022).

A capacidade da borracha de alta resistência de funcionar em uma ampla faixa de temperatura sem degradação significativa também é crucial para a eficiência energética. Isso permite que transformadores operem de maneira mais eficaz, mesmo em condições de carga variável e em ambientes com variações de temperatura. A resistência a temperaturas extremas minimiza a degradação do isolamento, o que, por sua vez, ajuda a manter a eficiência energética ao longo do tempo (PEREIRA, 2022).

A melhoria da eficiência energética proporcionada pela borracha de alta resistência reduz as perdas de energia nos sistemas elétricos ao passo que incorpora a sustentabilidade ambiental, uma vez que a geração de energia elétrica é frequentemente associada à emissão de gases de efeito estufa., a aplicação desse material inovador em transformadores tem implicações significativas na redução do consumo de energia e nas metas de conservação ambiental, tornando-se um componente basilar na busca por sistemas elétricos mais sustentáveis (BUCCI; BORBA, 2022).

O prolongamento da vida útil de um transformador é de extrema importância, uma vez que esses equipamentos são caros e impactam na infraestrutura elétrica. Vários fatores contribuem para otimização da borracha de alta resistência no aumento da durabilidade dos transformadores. Primeiramente, a capacidade da borracha de alta resistência de manter sua integridade dielétrica em condições adversas é um fator crucial (BALLAN, 2019).

Em transformadores, o isolamento é uma parte fundamental para garantir o funcionamento adequado e seguro. A borracha de alta resistência, com sua alta rigidez dielétrica, é capaz de resistir a condições de operação estressantes, como altas temperaturas e variações de carga. Isso resulta em um isolamento mais durável, que não degrada facilmente com o tempo e mantém seu desempenho dielétrico ao longo dos anos (PEREIRA, 2022).

Da mesma forma, a flexibilidade da borracha de alta resistência desempenha um papel importante no prolongamento da vida útil dos transformadores. Essa flexibilidade garante que o material se adapte a diferentes geometrias e variações de temperatura, o que ajuda a reduzir o estresse mecânico e térmico nas partes isolantes

do transformador. Isso evita rachaduras e fissuras no isolamento que poderiam levar a falhas prematuras do transformador (PEREIRA, 2022).

### **3.3 Desafios e Limitações**

A implementação em larga escala da borracha de alta resistência em transformadores, apesar de suas inúmeras vantagens, enfrenta uma série de desafios significativos. A primeira consideração importante diz respeito à adaptação da indústria de transformadores para a incorporação desse material inovador (GHELLER JÚNIOR, 2015).

Tradicionalmente, a indústria de transformadores tem utilizado materiais isolantes convencionais, como papel e óleo, em larga escala. A transição para a borracha de alta resistência requer mudanças substanciais nos processos de fabricação, nas especificações técnicas e nas práticas de teste. Essa transição envolve barreiras de engenharia, treinamento de pessoal e aquisição de novos equipamentos de produção. A capacidade da indústria de transformadores de adotar essas mudanças de maneira assertiva é um dos desafios a serem superados (BUCCI; BORBA, 2022).

De maneira similar, a garantia de que esses transformadores atendem aos requisitos de desempenho e segurança, requer a criação de padrões de teste específicos, bem como o desenvolvimento de métodos de avaliação e monitoramento adequados para o isolamento à base de borracha. A verificação rigorosa da conformidade e a garantia de qualidade ao longo do ciclo de vida do transformador são elementos necessários para a aceitação generalizada da borracha de alta resistência (OLIVEIRA et al., 2016).

A borracha de alta resistência evidencia-se como um material avançado e, como tal, pode ser mais cara do que materiais isolantes convencionais, como o papel. O custo da borracha de alta resistência pode ser um obstáculo para a sua adoção em larga escala, especialmente em locais com orçamentos limitados para infraestrutura elétrica. Além disso, a disponibilidade do material pode ser uma preocupação, uma vez que sua produção pode ser mais restrita em comparação com materiais convencionais amplamente utilizados (FRIEDENBERG; SANTANA, 2014).

No entanto, é importante observar que, à medida que a demanda por materiais isolantes mais avançados cresce e a indústria de transformadores se adapta às

mudanças tecnológicas, os desafios de custo e disponibilidade podem ser superados progressivamente. À medida que a produção em larga escala da borracha de alta resistência se expande e as economias de escala entram em jogo, os custos podem diminuir (AVILA *et al.*, 2023).

### 3.4 Normas e Regulamentações

A existência de normas e regulamentações aplicáveis a materiais isolantes em transformadores é fundamental para garantir a segurança, eficiência e confiabilidade dos sistemas elétricos. No contexto de transformadores, as normas são norteadoras na especificação de requisitos técnicos e na definição de padrões de qualidade que devem ser seguidos pela indústria. A aplicação dessas normas é essencial para evitar falhas no isolamento e garantir o desempenho adequado dos transformadores (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

Uma das normas mais amplamente reconhecidas no campo de transformadores é a norma IEC 60076, desenvolvida pela Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC). Essa norma abrange uma ampla variedade de aspectos relacionados a transformadores, incluindo especificações técnicas para isolamento e materiais isolantes. A IEC 60076 define requisitos detalhados para propriedades dielétricas, mecânicas e térmicas de materiais isolantes, bem como métodos de teste e procedimentos de ensaio. A conformidade com essa norma é amplamente reconhecida como um padrão de qualidade internacional para transformadores (AVILA *et al.*, 2023).

Para além da IEC 60076, diferentes regiões e países dispõem de suas próprias normas e regulamentações específicas para transformadores e materiais isolantes. Por exemplo, nos Estados Unidos, o Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) publica normas relevantes para transformadores e equipamentos elétricos. As normas da IEEE abordam requisitos técnicos e práticas recomendadas para projetos, testes e operação de transformadores. No caso de transformadores destinados a serem utilizados em sistemas elétricos de energia, a norma IEEE C57.12.00 é uma referência importante (AVILA *et al.*, 2023).

As normas e regulamentações que se aplicam a materiais isolantes, como a borracha de alta resistência, incluem requisitos relacionados à rigidez dielétrica, estabilidade química, resistência térmica e outros aspectos críticos. O cumprimento



desses requisitos é primordial para garantir a segurança operacional e a confiabilidade dos transformadores em serviço. Aliás, a conformidade com as normas é, por vezes, uma exigência regulatória para a fabricação e o uso de transformadores em sistemas de energia elétrica, o que enfatiza ainda mais a notoriedade das normas vigentes (FINOCCHIO; ANTUNES, 2021).

A avaliação da conformidade da borracha de alta resistência com as normas estabelecidas para materiais isolantes em transformadores é um processo rigoroso que garante que o material atenda aos requisitos técnicos e de desempenho especificados pelas normas aplicáveis. A conformidade com essas normas é demandado para garantir a qualidade, a segurança e a eficiência dos transformadores que utilizam a borracha de alta resistência como material isolante (LINHARES *et al.*, 2014).

As normas estabelecem requisitos técnicos detalhados, como propriedades dielétricas, resistência térmica, estabilidade química e métodos de teste. A primeira etapa da avaliação é, para tanto, uma compreensão completa desses requisitos normativos (PEREIRA, 2022).

Uma vez identificadas as normas pertinentes, o próximo passo é verificar se a borracha de alta resistência atende a esses requisitos. Isso envolve a realização de ensaios e testes rigorosos de laboratório para determinar as propriedades e o desempenho do material. Os testes incluem medidas da rigidez dielétrica, resistência à tração, resistência à compressão, estabilidade química, resistência térmica, entre outros. Esses ensaios buscam demonstrar que a borracha de alta resistência atende ou excede os limites e critérios especificados pelas normas aplicáveis (OLIVEIRA, 2015).

Além dos testes de laboratório, a avaliação da conformidade deve incluir a revisão de documentação técnica, como relatórios de testes, documentação de produção, informações de qualidade e relatórios de conformidade (GHELLER JÚNIOR, 2015).

A avaliação da conformidade também é uma atividade sujeita à auditoria e à revisão por parte de entidades reguladoras e organismos de certificação independentes. Essas entidades têm a responsabilidade de verificar se os materiais isolantes atendem às normas aplicáveis e, quando aprovados, podem ser utilizados em transformadores (PEREIRA, 2022).

À medida que materiais inovadores são desenvolvidos e ganham destaque no mercado, surge a necessidade de avaliar se as normas existentes são suficientes para abranger esses novos materiais ou se devem ser revisadas e aprimoradas para acomodar as características específicas desses materiais (MARQUES *et al.*, 2013).

Uma das razões fundamentais para a discussão sobre a atualização das normas é o potencial impacto positivo que novos materiais podem ter no desempenho e na eficiência dos transformadores. A borracha de alta resistência, por exemplo, demonstra propriedades dielétricas superiores e resistência a condições adversas, o que pode resultar em transformadores mais confiáveis e duráveis. A inclusão de materiais como a borracha de alta resistência nas normas pode promover a adoção de tecnologias mais avançadas, impulsionando a inovação e a eficiência em sistemas elétricos (PEREIRA, 2022).

Além disso, a atualização das normas é importante para estabelecer requisitos claros e consistentes para a indústria, fabricantes e operadores de transformadores. A inclusão de novos materiais nas normas fornece orientação sobre como esses materiais devem ser testados, qualificados e aplicados em transformadores, garantindo que atendam aos padrões mínimos de desempenho e segurança (FARIA, 2017).

Entretanto, a atualização das normas não é um processo simples. Ele requer a colaboração entre especialistas da indústria, órgãos reguladores e organizações de padronização, como a IEC e o IEEE. É importante garantir que as mudanças nas normas sejam baseadas em evidências científicas sólidas e na compreensão aprofundada das propriedades e características dos novos materiais. De modo análogo, a atualização das normas deve ser conduzida de forma transparente e inclusiva, de modo a envolver todas as partes interessadas e garantir que os interesses de segurança e desempenho sejam adequadamente representados (MELO, 2017).

As perspectivas de futuras regulamentações no setor de transformadores são de grande importância, uma vez que refletem a dinâmica em constante evolução da indústria elétrica e a busca por soluções mais eficientes, confiáveis e sustentáveis em sistemas de energia. A necessidade de regulamentações atualizadas e específicas para acomodar novos materiais, como a borracha de alta resistência, é uma tendência que vem ganhando destaque devido às vantagens desses materiais em termos de desempenho e segurança (AMERICO *et al.*, 2017).

Uma das principais perspectivas no setor de transformadores é a evolução das normas e regulamentações para abranger materiais isolantes inovadores. Isso envolve a revisão e atualização das normas existentes, bem como o desenvolvimento de normas específicas para novos materiais. Essas normas podem incluir diretrizes para testes, métodos de avaliação de desempenho e requisitos técnicos que devem ser atendidos para a utilização segura e eficaz de materiais como a borracha de alta resistência (PEREIRA, 2022).

A demanda por redução de impactos ambientais e eficiência energética está impulsionando a pesquisa e o desenvolvimento de materiais e tecnologias mais ecológicos. Regulamentações que incentivem a adoção de materiais isolantes de alto desempenho e aprimorem o projeto de transformadores visando a eficiência energética podem desempenhar um papel fundamental na busca por soluções mais sustentáveis em sistemas elétricos (PEREIRA, 2022).

A segurança é mais um fator de grande impacto nas perspectivas de futuras regulamentações. As regulamentações devem garantir que os materiais isolantes atendam a padrões rigorosos de segurança e que os transformadores sejam fabricados e operados de maneira segura. Isso inclui a definição de requisitos para a resistência a sobretensões, proteção contra riscos elétricos e confiabilidade em condições adversas (AVILA *et al.*, 2023).

Porém, é verossímil notar que as futuras regulamentações devem ser desenvolvidas com base em um diálogo amplo e colaborativo entre a indústria, órgãos reguladores, instituições de pesquisa e outras partes interessadas. A cooperação entre essas partes é fundamental para garantir que as regulamentações sejam equilibradas, baseadas em evidências científicas sólidas e adequadas às necessidades do setor de transformadores (FARIA, 2017).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

No decorrer deste estudo, explorou-se diversas descobertas e reflexões que se revelaram fundamentais no contexto da borracha de alta resistência como material isolante em transformadores. A pesquisa proporcionou uma visão aprofundada das características e propriedades desse material, bem como suas aplicações em transformadores, desafios associados e possíveis inovações para o setor.

Uma das principais descobertas condiz com a constatação de que a borracha de alta resistência possui propriedades físicas e químicas que a tornam um candidato promissor para aplicações em transformadores. Sua alta elasticidade, resistência à tração, flexibilidade e estabilidade química são características capazes de corroborar de maneira substancial para com o desempenho e a durabilidade desses dispositivos. Outrossim, a borracha de alta resistência apresenta vantagens em termos de resistência a agentes corrosivos, tornando-se adequada para ambientes desafiadores, sobretudo em grandes sistemas elétricos.

Ademais, a capacidade de atender aos requisitos de segurança e eficiência em sistemas elétricos modernos destaca-se como um importante avanço tecnológico partindo deste material. Como pontos benéficos, verificou-se o prolongamento da vida útil dos transformadores e a redução de impactos ambientais, alinhando-se com as demandas por soluções mais sustentáveis no setor.

Sugere-se que áreas para pesquisa futura incluam a continuação do desenvolvimento de materiais isolantes inovadores, como a borracha de alta resistência, com foco na otimização de suas propriedades e na adaptação a diferentes aplicações em sistemas elétricos. Além disso, evidencia-se a relevância de aplicações na prática para aferir as vantagens deste material em frente das composições convencionais.

Conseqüentemente, enfatizou-se a importância da aplicabilidade da borracha de alta resistência como material isolante em transformadores, destacando suas vantagens e contribuições para a eficiência e a sustentabilidade dos sistemas elétricos. Ao mesmo tempo, reconheceu-se a necessidade contínua de pesquisa e desenvolvimento, juntamente com a atualização de regulamentações, para garantir o êxito dessa inovação no setor de transformadores e sua capacidade de atender às crescentes demandas da indústria elétrica moderna.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Mario Sergio de Souza Almeida. **Estudo da resistência ao cisalhamento de um solo não saturado quando percolado por fluidos de diferentes constantes dielétricas.** 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/>. Acesso em: 19 nov. 2023.

ALVES, André Luíz *et al.* **O transformador: teoria, construção e análise do rendimento.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 44, p. e20210413, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/>. Acesso em: 02 set. 2023.

AMERICO, Jonatas P. *et al.* **Um estudo qualitativo das técnicas utilizadas para medição e localização de descargas parciais em transformadores de potência.** Revista Espacios, v. 38, n. 34, 2017. Disponível em: <https://www.revistaespacios.com/>. Acesso em: 17 out. 2023.

ANTONELLI, Gustavo Alves *et al.* **Análise de métodos de secagem de transformadores de potência.** 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://www.tcc.sc.usp.br/>. Acesso em: 09 out. 2023.

ASSIS, Beethoven Nóbrega de *et al.* **Estudo sobre rigidez dielétrica de óleo isolante em transformadores.** 2015. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/>. Acesso em: 09 out. 2023.

AVILA, Mauro Cesar de; MUNARO, Ana Paula; MUNARO, Marilda. **Avaliação da compatibilidade de formulações de borracha nitrílica com fluidos isolantes (OMI e ENI) usados em transformadores de potência.** Matéria (Rio de Janeiro), v. 27, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/>. Acesso em: 18 out. 2023.

BALLAN, André Felipe Matzenbacher. **Transformadores trifásicos: comparativo de materiais para os enrolamentos.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br/>. Acesso em: 17 out. 2023.

BUCCI, Ana Luisa de Sousa; BORBA, Jessica Beatriz. **Efeito do sistema de reticulação em uma borracha nitrílica submetida a oxidação térmica.** 2022. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/>. Acesso em: 06 out. 2023.

CAMPOS, Felipe de Souza. **Avaliação da eficiência dos óleos isolantes em transformadores em rede de transmissão elétrica.** 2016. Disponível em: <https://bdm.unb.br/>. Acesso em: 11 out. 2023.

CARNEIRO, Tessa Martins de Carvalho *et al.* **Síntese sustentável, caracterização físico-química e estudo das propriedades mecânica e elétrica de polímeros de óleo de soja e suas formulações com a borracha de silicone.** 2018. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/>. Acesso em: 16 nov. 2023.

COSSA, Matheus Magioli; CARVALHO, Anna Paula Azevedo; SIRQUEIRA, Alex. **Cinética de reticulação de borracha nitrílica carboxilada.** Acta Scientiae et

Technicae, v. 2, n. 2, 2015. Disponível em: <http://www.uezo.rj.gov.br/>. Acesso em: 05 out. 2023.

FARIA, Flávio. **Método de Avaliação de Desempenho de Bolsas para Sistemas de Preservação de Transformadores de Potência**. Inovação. Rio Claro/SP, 2017. Disponível em: <https://www.cgti.org.br/>. Acesso em: 09 out. 2023.

FERGÜTZ, Marcos. **Transformadores para Instrumentação**. 2021. Disponível em: <https://www.udesc.br/>. Acesso em: 02 set. 2023.

FINOCCHIO, Marco Antonio Ferreira; ANTUNES, Lucas de Oliveira. **A Vida Útil de Transformadores Elétricos em Resina Epóxi**. 2021. Disponível em: <https://www.confex.org.br/>. Acesso em: 18 out. 2023.

FORTES, Márcio Zamboti *et al.* **Lógica Fuzzy como Ferramenta para Diagnóstico de Falhas em Transformadores de Potência**. 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/>. Acesso em: 18 out. 2023.

FRIEDENBERG, Luiz Eduardo; SANTANA, Ruth Marlene Campomanes. **Propriedades de óleos isolantes de transformadores e a proteção do meio ambiente**. IX Simpósio internacional de qualidade ambiental, 2014. Disponível em: <https://www.abes-rs.org.br/>. Acesso em: 18 out. 2023.

GABRIEL, Cléverson F. S. *et al.* **Estudo da Cinética de Vulcanização de Composições com Diferentes Tipos de Borracha Nitrílica**. In: 12º Congresso Brasileiro de Polímeros. Florianópolis-SC. 2013. Disponível em: <http://e-democracia.com.br/>. Acesso em: 05 out. 2023.

GHELLER JÚNIOR, Jordão. **Efeito de nanocargas de diferentes morfologias em borracha nitrílica hidrogenada**. 2015. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/>. Acesso em: 07 out. 2023.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010. 184 p. ISBN 978-85-22458233.

GOMES, Manuel Morato. **Borracha Etileno-Propileno-Dieno (EPDM)**. 2018. Disponível em: <https://www.rubberpedia.com/>. Acesso em: 01 set. 2023.

GRUPORPF. **EPDM: funções para a indústria**. 2022. Disponível em: <https://gruporpf.com.br/>. Acesso em: 01 set. 2023.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Metodologia do trabalho científico**. 7ª edição. São Paulo: Atlas, 2017.

LINHARES, F. N. *et al.* **Influência da absorção de biodiesel nas propriedades da Borracha Nitrílica**. Blucher Chemical Engineering Proceedings, v. 1, p. 13502-13509, 2014. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/>. Acesso em: 11 out. 2023.

LIPPMANN, Gabriel. **Avaliação do Fator de Perdas Dielétricas em Revestimento de Borracha de Silicone (RTV) Aplicadas em Isoladores Cerâmicos de Linhas de**

**Transmissão.** 2019. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/>. Acesso em: 16 nov. 2023.

MARQUES, André Pereira *et al.* **Técnicas preditivas de manutenção em transformadores de potência—um estudo de caso.** In: I World Congress on Systems Engineering and Information Technology, Porto. 2013. p. 17-20. Disponível em: <http://copec.eu/>. Acesso em: 17 out. 2023.

MELO, André de Souza. **Identificação de pontos quentes em transformadores de potência por meio de técnicas não invasivas.** 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/>. Acesso em: 03 out. 2023.

OLIVEIRA, Luiz Fernando de *et al.* **Modelos de alta frequência para transformadores de potência: um estudo sobre a sensibilidade da resposta para alterações nas propriedades constitutivas dos materiais.** 2022. Disponível em: <https://www.researchgate.net/>. Acesso em: 18 out. 2023.

OLIVEIRA, Maria Aparecida de Souza *et al.* **Influência do método de vulcanização nas propriedades mecânicas e na densidade de ligações cruzadas da borracha natural.** *Polímeros*, v. 26, p. 43-48, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/>. Acesso em: 11 out. 2023.

OLIVEIRA, Vinicius. **Borracha nitrílica reforçada com fibra aramida para aplicação em mangotes.** 2015. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/>. Acesso em: 07 out. 2023.

ORNAGHI, Felipe Gustavo. **Incorporação de nanotubos e nanofibras de carbono como carga em borracha fluorada.** 2018. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/>. Acesso em: 19 nov. 2023.

PEREIRA, Gabriela Martins. **Estudo da aplicação de sensor eletromagnético para monitoramento remoto de parâmetros de qualidade do óleo mineral isolante em transformadores de potência.** 2022. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <http://riut.utfpr.edu.br/>. Acesso em: 18 out. 2023.

PINTO, Patricia Re; NASCIMENTO, Ziceli Cardozo; SIRQUEIRA, Alex da Silva. **Misturas elastoméricas de SBR/borracha nitrílica carboxilada compatibilizadas com poliacroleína.** *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, v. 5, n. 1, p. 0037-0042, 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/>. Acesso em: 06 out. 2023.

REIS, Ana Claudia Cabral dos Santos; GUEDES, Carmen Luisa Barbosa. **Avaliação do óleo de crambe (*crambe abyssinica hoechst*) como fluido isolante em transformadores elétricos.** *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. 3, p. 20730-20746, 2022. Disponível em: <https://scholar.archive.org/>. Acesso em: 08 out. 2023.

RODRIGUES, João Paulo C.; SANTOS, Cristina Calmeiro dos. **Resistência à compressão a altas temperaturas do betão com agregados reciclados de borracha de pneu.** In: 2º Congresso Ibero-Latino-Americano sobre Segurança contra Incêndio. 2013. Disponível em: <https://repositorio.ipcb.pt/>. Acesso em: 11 out. 2023.

SANTOS, Josiane Alexandrino dos. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos piezoelétricos de PZT com matriz cimentícia e borracha natural**. 2018. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/>. Acesso em: 20 nov. 2023.

SCOTECHELECTRICAL. **Transformadores**. 2023. Disponível em: <http://pt.scotech-electrical.com/>. Acesso em: 02 set. 2023.

SOARES, Valdeir Ribeiro *et al.* **Requisitos e restrições do uso do óleo vegetal de tungue como líquido isolante para transformadores elétricos de distribuição de média tensão**. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br/>. Acesso em: 18 out. 2023.

SOUSA, Eliraldrin Amorin de. **Obtenção e caracterização de microfibras de borracha natural incorporadas com negro de fumo**. 2020. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/>. Acesso em: 19 nov. 2023.

SOUTO, Loan Filipi Calheiros *et al.* **Estudo das propriedades reológicas, mecânicas e de blindagem eletromagnética de misturas elastoméricas envolvendo borracha nitrílica (NBR) e borracha nitrílica carboxilada (XNBR)**. *Polímeros*, v. 27, p. 14-19, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/>. Acesso em: 03 out. 2023.