

TARSO MORAIS PAIM

**Análise dos Efeitos da Vibração e Reatores de Derivação de Alta
Tensão**

Taubaté
2020

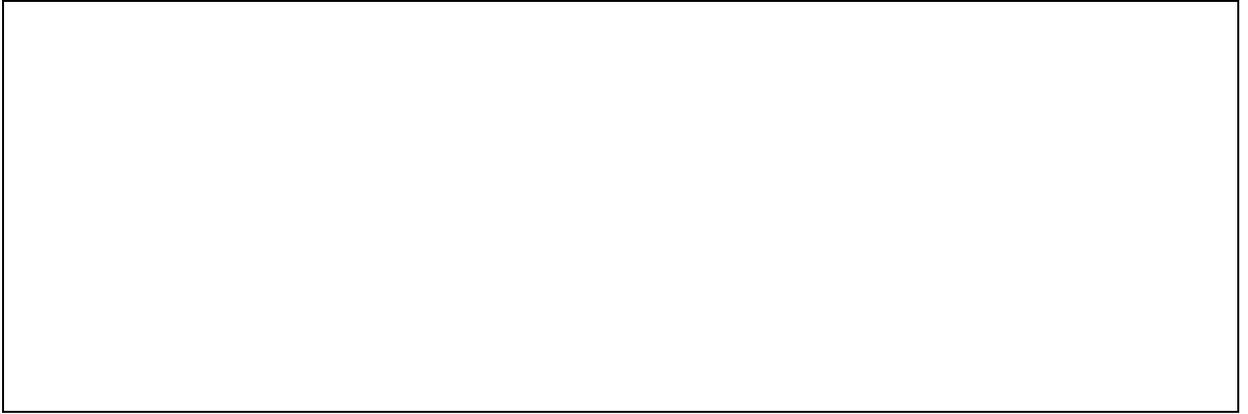
Tarso Morais Paim

Análise dos Efeitos da Vibração e Reatores de Derivação de Alta Tensão

Trabalho de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Taubaté, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica e Eletrônica.

Orientador (a): Prof. Me. Seide da Cunha Filho.

Taubaté
2020



Dedico este trabalho à minha família, esposa, professores, amigos e a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização sua realização.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e consciência que me foi proporcionada.

Agradeço à minha família, minha esposa Denise Divina Vaz Monteiro, que sempre esteve ao meu lado, meus pais, José Dirceu Paim e Maria Goretti de Moraes Paim, que sempre me incentivaram, desde criança, a desenvolver meus estudos.

Agradeço a todos os meus amigos de faculdade, que sempre, de alguma forma, contribuíram positivamente para meu desenvolvimento.

A todos os meus amigos e parceiros de trabalho, que sempre apresentaram boas ideias e especialmente ao engenheiro Daniel Benetti e a William Brasileiro Do Carmo Borges, que me forneceram suporte para desenvolvimento de meu trabalho de graduação.

A todos os professores presentes em minha trajetória acadêmica, pelos diversos ensinamentos acadêmicos e experiências vividas no campo de atuação, em especial Seide da Cunha Filho, excelente professor e orientador de trabalho de graduação.

A todos muito obrigado por terem participado diretamente ou indiretamente na conclusão dessa etapa em minha vida. Obrigado!

MORAIS PAIM, Tarso. **Análise dos efeitos da vibração em reatores de derivação de alta tensão**. 2020. 36 f. Trabalho de Graduação (Bacharel em Engenharia Elétrica e Eletrônica) – Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, Universidade Taubaté, Taubaté, 2020.

RESUMO

O trabalho desenvolve o estudo de caso em reatores de derivação, com o foco na vibração, materiais envolvidos com o processo e análise da estrutura do projeto. A necessidade do estudo se dá, em razão do surgimento de defeitos indesejados e inesperados no reator, que, com pouco tempo em operação, apresentou defeito de “fuga a terra” em seu circuito de monitoramento de proteção. Devido aos danos de isolamento nos cabos do circuito de monitoramento da proteção, decorrentes da vibração, fato este que, estimulou a necessidade do estudo, com o objetivo de sanar ou amenizar tal dano. Sendo assim, surge a necessidade de analisar o nível de vibração ao qual o reator se encontra exposto, bem como, as normas de fabricação, a qualidade dos materiais envolvidos e o projeto, visto que, essa situação está impactando diretamente na confiabilidade do reator de derivação.

Palavras-chave: Vibração, reator de derivação, confiabilidade.

MORAIS PAIM, Tarso. **Análise dos efeitos da vibração em reatores de derivação de alta tensão**. 2020. 36 f. Trabalho de Graduação (Bacharel em Engenharia Elétrica e Eletrônica) – Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, Universidade Taubaté, Taubaté, 2020.

ABSTRACT

This assignment develops a study case about reactors in derivation with a focus on vibration, the involved materials in the process, and the analysis of the project structure. The need for this assignment corresponds to the occurrence of undesired and unexpected defects with the reactor whose in operation for a short time presented a defected called "earth landscape" in the protection monitoring circuit of the reactor. Due to the rupture of the isolation of the cables caused by vibration, became necessary to develop the research with the goal of solve or appease the defected. Therefore, occurs the need of analyzing the level of vibration that the reactor finds itself exposed in the standards of manufacture, quality of the involved materials and the project. This situation has a true impact on the trustworthiness of the reactor of derivation.

Key words: vibration, derivation reactor, reliability.

FIGURAS

Figura 1: Âmbar.....	15
Figura 2: Magnetita.....	16
Figura 3: Bússola	17
Figura 4: Máquina Eletrotática	17
Figura 5: Sistema de para Raios	18
Figura 6: Pilha de Volta	19
Figura 7: Eletromagnetismo	20
Figura 8: Telégrafo	20
Figura 9: Lâmpada a arco e de filamento.....	21
Figura 10: Bobina de Tesla	22
Figura 11: Sistema de Geração Transmissão e Distribuição.....	23
Figura 12: Campo elétrico e Magnético.....	25
Figura 13: Linhas de Fluxo elétrico	26
Figura 14: Molde de montagem dos pacotes das bobinas do reator de derivação.....	29
Figura 15: Pacote de uma das bobinas do núcleo	30
Figura 16: Pastilhas de separação dos pacotes de bobinas.....	30
Figura 17: Bobinas e Espaçadores do reator de derivação.....	31
Figura 18: Núcleo com todos os pacotes de bobinas	31
Figura 19: Núcleo reatores de derivação.....	32
Figura 20: Núcleo e conector da bucha de alta tensão	33
Figura 21: Sistema de Resfriamento	34
Figura 22: Relatório das medidas de vibração realizadas em campo	38
Figura 23: Montagem para realização do ensaio	39

Figura 24: Comparação das curvas da realização dos ensaios	40
Figura 25: Resultado da comparação estatística.....	41
Figura 26: Desgaste na isolação do cabo na caixa de passagem	41
Figura 27: Desgaste na isolação do cabo na caixa de passagem	42
Figura 28: Desgaste na isolação do cabo na caixa de passagem	42
Figura 29: Desgaste na isolação do cabo na caixa de passagem	43
Figura 30: Desprendimento da porca no sistema de Resfriamento	43
Figura 31: Desprendimento da porca na válvula bay-pass.....	44
Figura 32: Poteção mecânica instalada nos cabos	45
Figura 33: Poteção mecânica instalada nos cabos	46
Figura 34: Poteção mecânica instalada nos cabos	46
Figura 35: Poteção mecânica instalada nos cabos	47
Figura 36: Porca auto travante.....	47

TABELA

Tabela 1: Relação da frequência com avaria do equipamento 39

ABREVIATURAS

CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
G	Condutância
UNITAU	Universidade de Taubaté
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IEC	International Electrotechnical Commission
ANSI	American National Standards Institute
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
ASME	American Society of Mechanical Engineers
VA	Unidade da Potência Reativa
V	Unidade de Tensão Elétrica (Volts)
Hz	Hertz unidade da frequência
K	Prefixo do Sistema Internacional de Unidades (Mil Unidades)
M	Prefixo do Sistema Internacional de Unidades (Mil Unidades)
m	Unidade de medida de comprimento (Metros)
μm	Unidade de medida de comprimento (micrometros)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	OBJETIVO	14
3.	HISTÓRICA DA ENERGIA ELÉTRICA.....	15
3.1	FATOS MARCANTES NO DESCOBRIMENTO DA ELETRICIDADE.....	15
3.1.1	Âmbar e Magnetita.....	15
3.1.2	Bússola	16
3.1.3	Máquina eletrostática	17
3.1.4	Para-raios.....	18
3.1.5	Pilha de Volta.....	18
3.1.6	Descobrimto do Eletromagnetismo	19
3.1.7	O telégrafo.....	20
3.1.8	A lâmpada	21
3.1.9	As invenções de Tesla	22
4.	A FUNÇÃO DOS SISTEMAS DE POTÊNCIAS.....	23
5.	HISTÓRIA DA LINHA DE TRANSMISSÃO	24
5.1	LINHA DE TRANSMISSÃO E SUAS PECULIARIDADES	24
5.1.1	Indutância	24
5.1.2	Capacitância	25
5.1.3	Resistência.....	26
5.1.4	Condutância.....	27
6.	A IMPORTÂNCIA DO REATOR DE DERIVAÇÃO PARA O SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA	28
7.	ESTRUTURA E FUNCIONAMENTO DO REATOR DE DERIVAÇÃO ...	29
7.1	NÚCLEOS	29
7.2	CONSTRUÇÃO DA BOBINA (ENROLAMENTO)	33
7.3	DISTRIBUIÇÃO DE FLUXO MAGNÉTICO	33
7.4	SISTEMA DE RESFRIAMENTO	33
7.5	NORMAS TÉCNICAS UTILIZADAS	35
7.6	VIBRAÇÃO.....	36
8.	ENSAIOS REALIZADOS.....	37

8.1	NORMAS UTILIZADAS PARA ENSAIO DE VIBRAÇÃO	37
8.1.1	Resultados do ensaio de vibração realizado no reator de derivação.....	37
8.1.2	Ensaio de deslocamento do núcleo	38
8.2	PROBLEMAS ENCONTRADOS COM REATOR EM ANÁLISE	41
9.	SOLUÇÃO ADOTADA PARA AMENIZAR A PRINCIPAL FALHA	45
10.	CONCLUSÃO	48
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

1 – INTRODUÇÃO

O trabalho apresenta estudo sobre os efeitos da vibração em reatores de derivação, que vem apresentando falhas indevidas durante sua operação, devido a danos causados na isolação dos cabos do circuito de proteção do reator, tornando necessário o entendimento das normas de vibração e de fabricação de especificações de reatores de derivação, afim de eliminar as falhas decorrentes da vibração.

2 – OBJETIVO

Avaliar a vibração do reator, para conhecimento e esclarecimento das normas de fabricação, assim determinar se o reator em estudo está em atendimento da norma de fabricação, e providenciar uma solução para amenizar ou eliminar os danos causados nos acessórios e cabos que estão expostos à vibração, assim reduzindo ou eliminando possíveis falhas no equipamento, elevando sua confiabilidade de operação.

3 – HISTÓRICA DA ENERGIA ELÉTRICA

Como seria o mundo sem a eletricidade? A evolução da humanidade em diferentes aspectos está ligada diretamente ao conhecimento da manipulação da eletricidade. Com sua aplicação se tornou possível elevar a qualidade de vida, acelerar o processo de industrialização, dentre vários outros ganhos. Existem inúmeras aplicações já descobertas e aplicadas, porém há muito que se evoluir e desenvolver sobre o assunto, no qual, a cada momento, em algum local do nosso planeta, algo é criado na área da eletricidade, assim, a cada momento, sua aplicação se torna ainda mais ampla.

3.1 – FATOS MARCANTES NO DESCOBRIMENTO DA ELETRICIDADE

A partir do conhecimento de alguns materiais, os quais apresentam características únicas, tais como o âmbar e a magnetita, vislumbrou-se a possibilidade de se desvendar a aplicabilidade dessas características, levando ao descobrimento da eletricidade.

3.1.1 – Âmbar e Magnetita

O âmbar é uma substância dura, quebradiça, translúcida, cuja cor varia do amarelo ao vermelho. É uma resina fóssil, isto é, provém da seiva escorrida durante muitos anos, de árvores de madeira macia, como o pinheiro (ALBERTO, 2005, pág. 7).

Figura 1: Âmbar:



Fonte ALBERTO (2005)

Nascido em Mileto por volta de 600 a.c, Tales de Mileto foi o primeiro filósofo a descrever as características do âmbar e a magnetita, sendo essencial para o desenvolvimento da curiosidade da eletricidade, portanto, Tales pode-se dizer que ele foi responsável por estimular a curiosidade sobre o assunto.

A magnetita é um minério de ferro, cinzento, escuro e brilhante (ALBERTO, 2005).

Figura 2: Magnetita



Fonte ALBERTO (2005)

Há séculos, descobriu-se que essas duas substâncias têm propriedades pouco comuns: o âmbar, quando atritado com um pedaço de lã, pode atrair pequenos corpos, como pedacinhos de folha. A magnetita, por sua vez, atrai espontaneamente o ferro. Um pedaço de magnetita, suspenso livremente no ar, vira sempre na mesma direção, fenômeno este já conhecido séculos antes de Cristo, pelos gregos, que chamavam o âmbar de elétron, termo que deu origem à palavra eletricidade. O nome magnetita vem de uma região da Grécia onde o minério é muito encontrado, chamada de Magnésia. É daí que vem o termo magnetismo (LOURENÇO, 2016).

3.1.2 – Bússola

As primeiras pesquisas sobre eletricidade que podem ser consideradas verdadeiramente científicas eram voltadas para o estudo do magnetismo e para a sua primeira aplicação prática: a bússola (ALBERTO, 2005).

No início, as bússolas serviam apenas para fazer mágicas ou para orientar a posição em que um edifício deveria ser construído. Só a partir do século X, ou XI, os chineses começaram a utilizá-las para orientação na navegação (LOURENÇO,2016).

Figura 3: Bússola

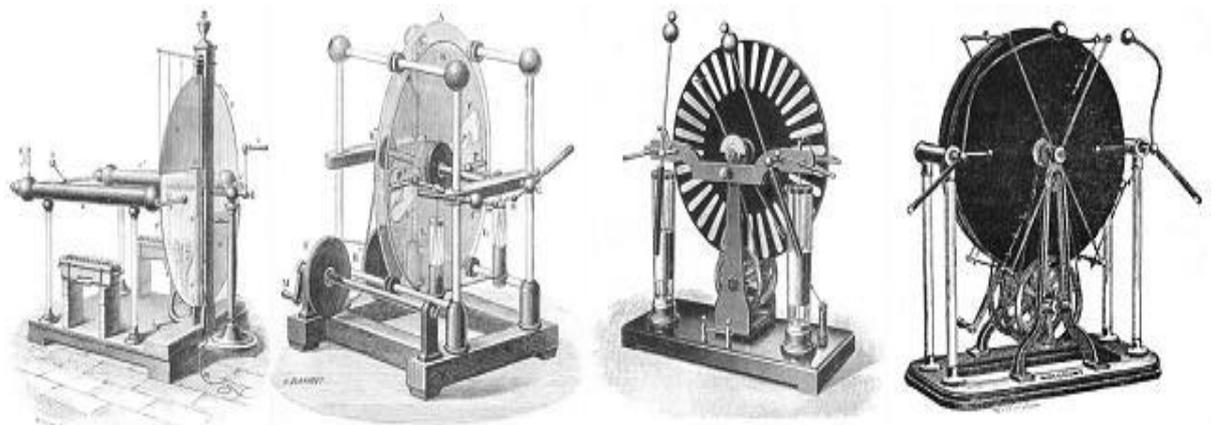


Fonte <https://www.infoescola.com/geografia/bussola/>

3.1.3 – Máquina eletrostática

Em 1660 surgiu a primeira máquina eletrostática, criada por Oto Von Guericke, para a produção de eletricidade em grande quantidade. Em seu mecanismo era utilizada uma enorme esfera de enxofre, que, quando girava, entrava em atrito com um pedaço de lã (ALBERTO, 2005).

Figura 4: Máquina Eletrostática

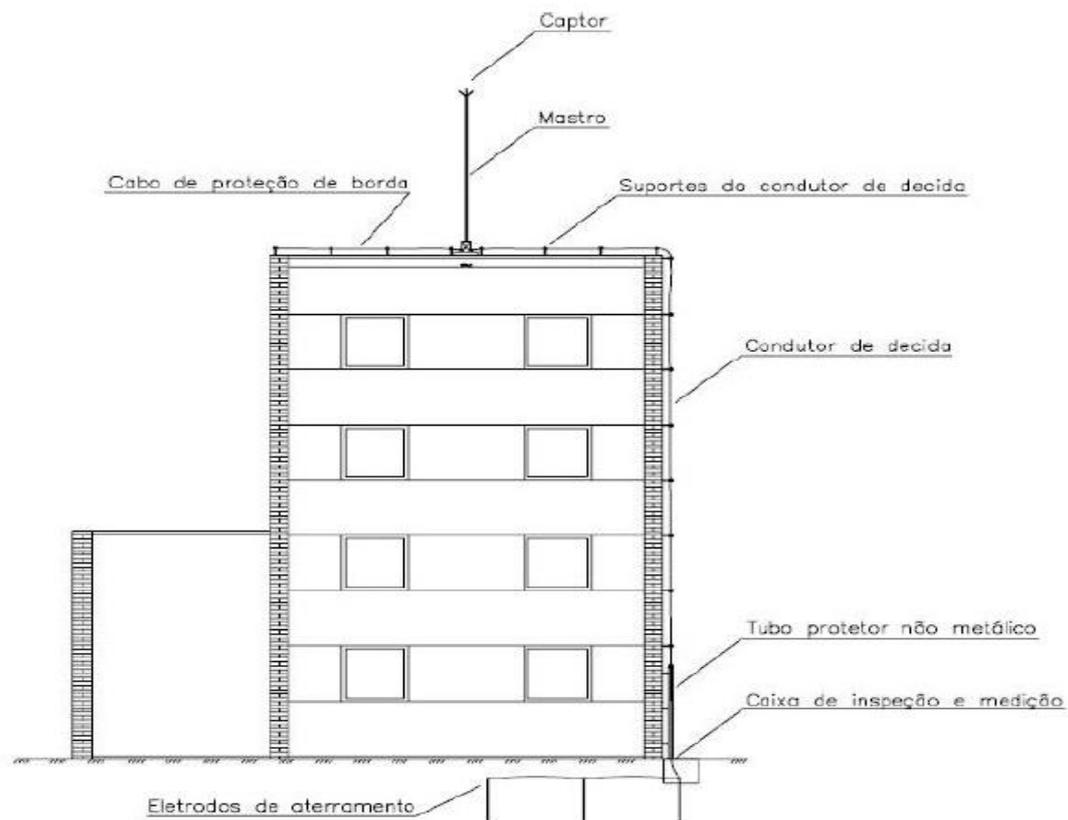


Fonte <https://www.coe.ufrj.br/~acmq/eletrostatica.html>

3.1.4 – Para-raios

Benjamin Franklin, americano da Filadélfia, descobriu que corpos em forma de ponta permitiam o “vazamento” da eletricidade. Por meio de saliências pontiagudas, um corpo podia perder ou adquirir eletricidade. Associando essas ideias, Franklin inventou o para-raios. A experiência em que testou sua invenção é provavelmente uma das mais famosas da história da Física (ALBERTO, 2005).

Figura 5: Sistema de Para-raios



Fonte BARBOSA (2014).

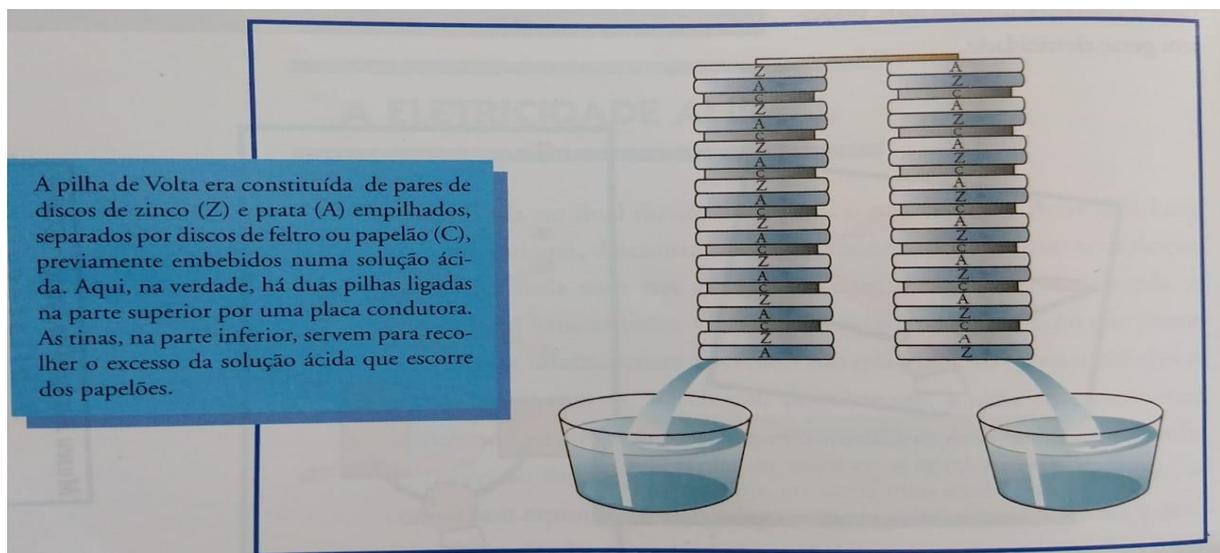
3.1.5 – Pilha de Volta

Os trabalhos de Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta o levaram a empilhar discos de metais diferentes – prata e zinco, prata e cobre ou cobre e zinco – intercalados com papelão ou feltro, umedecidos em água e sal ou vinagre. Criou assim, em 1796, a célebre pilha de Volta, a primeira fonte contínua de eletricidade produzida pelo ser humano. A

invenção de volta teve importância vital no desenvolvimento da eletricidade (TOLENTINO e ROCHA, 2000).

Mas o mais importante foi que, pouco mais de trinta anos depois da sua invenção, a pilha de Volta iria possibilitar a descoberta dos princípios básicos da eletricidade e do magnetismo. Esses princípios se fundiram numa nova ciência: o Eletromagnetismo (ALBERTO, 2005).

Figura 6: Pilha de Volta

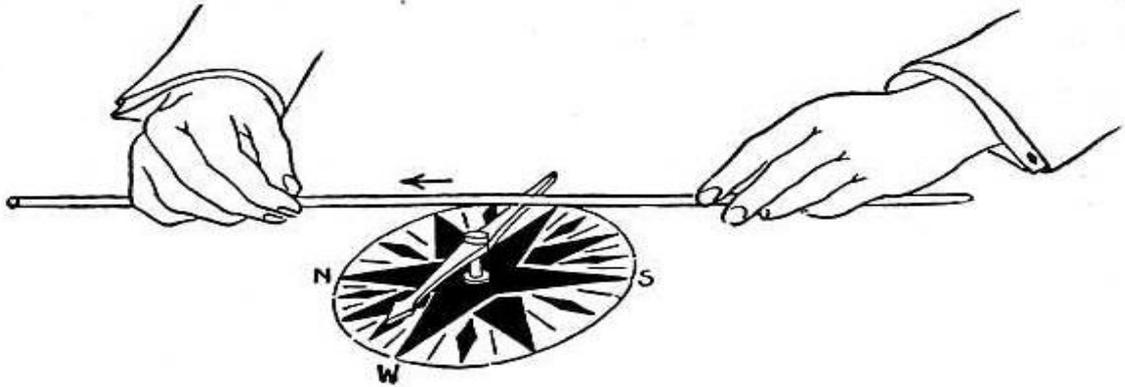


Fonte ALBERTO (2005)

3.1.6 – Descobrimto do Eletromagnetismo

Entre experimentos e demonstrações, os denominados Professores de Filosofia natural, descobriram fenômenos ligados à corrente elétrica como a produção de faíscas e a decomposição de água em oxigênio e hidrogênio. Dentre essas demonstrações em 1820, Hans C. Oersted, fazia um experimento demonstrativo com o aquecimento de um fio pela passagem de corrente elétrica, o qual se encontrava perto de uma bússola. Ele observou, surpreso, que quando a corrente elétrica passava pelo fio, a agulha da bússola girava e seu sentido de rotação dependia do sentido da corrente elétrica que atravessava o fio, o que permitiu a observação da relação da eletricidade e o magnetismo, surgindo assim o eletromagnetismo (ALBERTO, 2005).

Figura 7: Eletromagnetismo

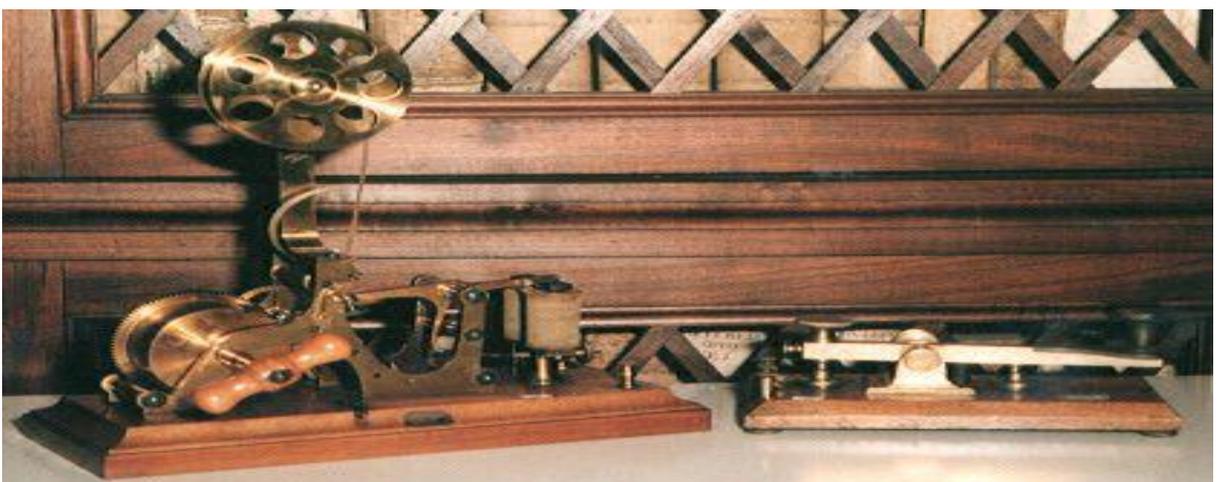


Fonte <https://www.infoescola.com/fisica/experiencia-de-oersted/>

3.1.7 – O telégrafo

Em 1837, três sistemas telegráficos foram postos em funcionamento. No entanto, o americano Samuel Morse, pintor de retratos e de paisagens, costuma ser considerado o inventor do telégrafo por ter criado um código de sinais que simplificou muito a concepção do aparelho. Utilizando esse código, bastava um interruptor no local onde a mensagem era emitida e um eletroímã no local onde a mensagem era recebida, acionado à distância pelo interruptor (SANTOS, 2018).

Figura 8: Telégrafo



Fonte http://www.icesi.edu.co/blogs_estudiantes/silva/files/2008/08/telegrafo1.jpg

3.1.8 – A lâmpada

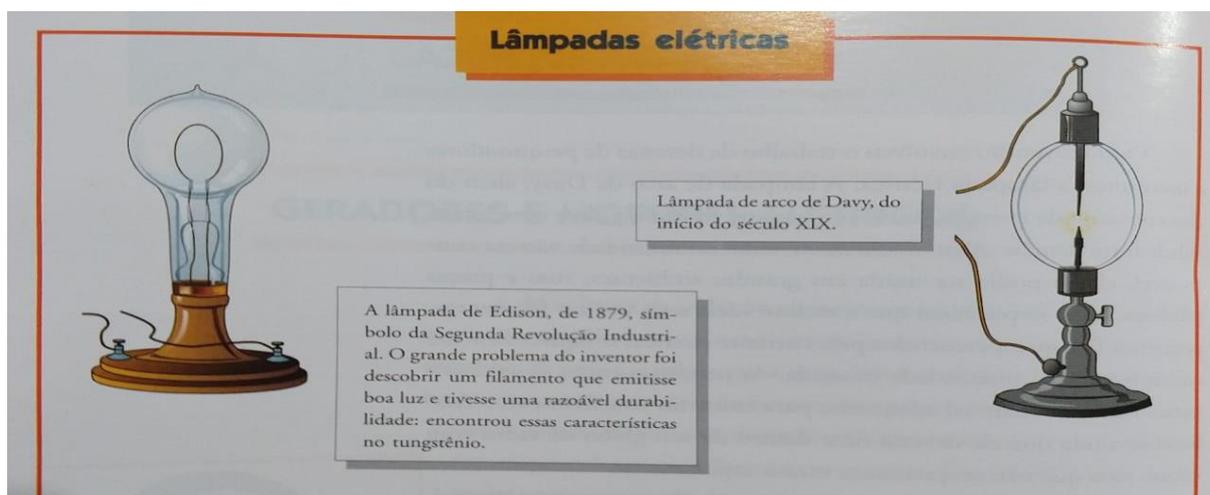
O trabalho de diversos pesquisadores e inventores foi necessário para o desenvolvimento da lâmpada elétrica. Diferente de pesquisas de observação de fenômenos, para uma lâmpada viável, alguns fatores precisaram ser ajustados, tal como a lâmpada de arco de Davy, que, além do alto consumo de energia, tinha um desgaste muito rápido e uma intensidade forte demais. Além de sua luminosidade não ser controlável, ela só podia ser usada em grandes ambientes, rua e praças públicas (SIMÕES, 2018).

Em 1845, o americano Starr e o inglês King construíram a primeira lâmpada com um elemento de carvão incandescente, colocado dentro de uma ampola de vidro à vácuo (ALBERTO, 2005)

Entre esses pesquisadores, desatacava-se o empresário americano Thomas Alva Edson, que estava preocupado em obter uma lâmpada que fosse adequada ao sistema de iluminação que estava projetando (SIMÕES, 2018).

Em 1879, chegou-se ao resultado esperado com uma lâmpada de alto vácuo. Feita com fio de algodão carbonizado, essa lâmpada ficou acesa durante dois dias. Os filamentos que, afinal, foram aprovados só foram utilizados a partir do ano seguinte. Eram de papel ou bambu carbonizados. Mais tarde, esses filamentos passaram a ser feitos de metal chamado de tungstênio (ALBERTO, 2005, PÁG 29).

Figura 9: Lâmpada a arco e filamento



Fonte ALBERTO (2005)

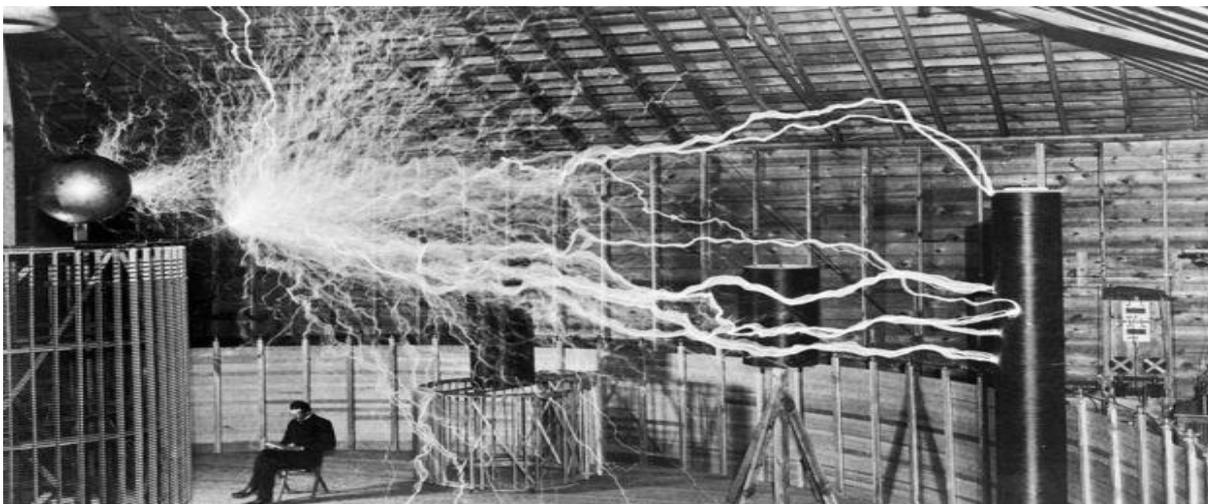
3.1.9 – As invenções de Tesla

Nikola Tesla nasceu em uma pequena aldeia, Smiljan, em 10 de julho de 1856, Império Austríaco, atual Croácia. Estudou engenharia elétrica na Universidade de Graz, na Áustria (à época ainda Império Austro-Húngaro) e, aos 26 anos, mudou-se para Paris para trabalhar na empresa do americano Thomas Edison, a Continental Edison Company. Tesla começa a trabalhar com Edison. Ele é contratado para melhorar o desempenho dos geradores de corrente contínua, seu funcionamento e aplicações - a turbina de Tesla, o motor de indução e o transformador de alta voltagem - quando ainda vivia em Paris (NUNES, 2015).

Na segunda metade dos anos 1880 aliou-se a George Westinghouse, dono da Westinghouse Electric Company, que financiou o projeto. Foi com essa tecnologia que, em 1895, Tesla e Westinghouse construíram a primeira usina hidrelétrica moderna, em Niagara Falls - tecnologia usada até hoje (MOTA, 2017).

Com suas ideias em prática Tesla elevou o conceito de potência no sistema elétrico, tornando aplicável e possível os motores elétricos polifásicos e geradores polifásicos. A aplicação polifásica de corrente alternada, com a elevação da tensão para transmissão da energia em longas distâncias, possibilitou a geração de energia em grandes potências centralizadas, como foi o caso de Niagara Falls, dentre outras inúmeras criações, o que foi capaz mudar a concepção do mundo sobre a eletricidade, não se imaginando a sociedade sem ela (TESLA, 2012).

Figura 10: Bobina de Tesla



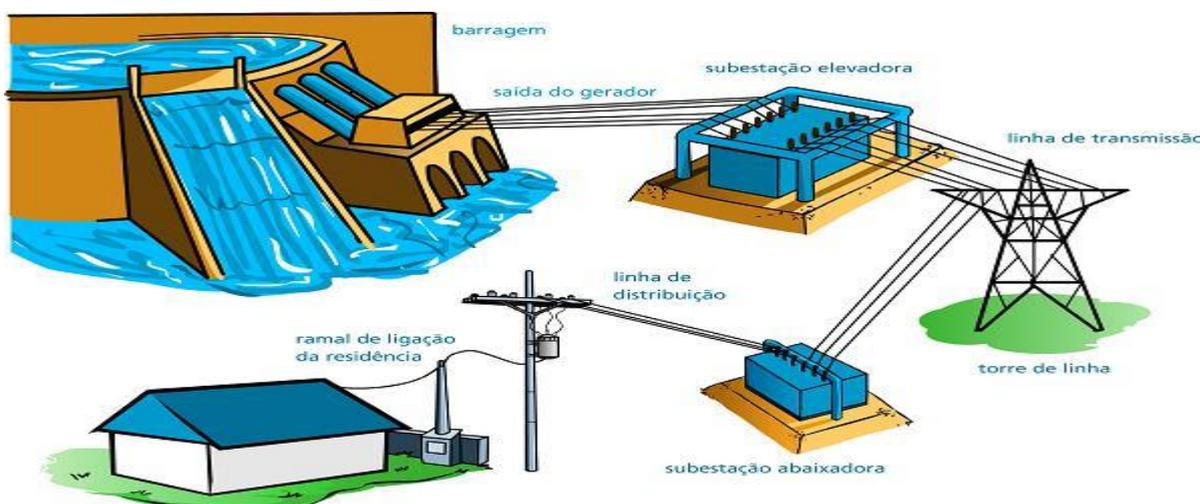
Fonte <https://www.bbc.com/portuguese/geral-42375111>

4 – A FUNÇÃO DOS SISTEMAS DE POTÊNCIAS

Os sistemas de potência são essenciais, especialmente para o Brasil que é um país de proporções intercontinentais. O sistema torna possível o transporte de grandes potências de energia, podendo, dessa forma, aproveitar potenciais hídricos, entre outras fontes de energia disponíveis no país, porém, que, nem sempre, estão próximos a grandes consumidores. Apesar dos benefícios advindos da possibilidade de se transportar a energia por grandes distâncias e poder utilizá-la onde existe a maior demanda, há as perdas envolvendo seu transporte, onde o reator de derivação atua como componente de tratamento da energia para, assim, adequar-se às normas de transmissão da energia.

O progresso industrial de uma nação pode ser medido pelo grau de aproveitamento de suas fontes de energia. A descoberta dessas fontes na natureza, o transporte da energia em suas várias formas de um lugar a outro e a convenção dessa energia para formas mais úteis, são partes essenciais de uma economia industrial. Um sistema de potência é uma das ferramentas utilizadas para a conversão e transporte da energia (STEVENSON, 1974, pág. 1).

Figura 11: Sistema de Geração, Transmissão e Distribuição



Fonte <https://www.mundodaeletrica.com.br/um-pouco-mais-sobre-o-sistema-eletrico-de-potencia-sep/>

Um sistema elétrico de potência consiste em três componentes principais: as estações geradoras, as linhas de transmissão e os sistemas de distribuição; as linhas de transmissão ligam as estações geradoras aos sistemas de distribuição; um sistema de distribuição liga todas as cargas individuais de uma determinada área às linhas de transmissão. Um sistema de potência bem projetado compreende um grande número de estações geradoras interligadas de modo que a energia total produzida possa ser utilizada em toda a região coberta pelo sistema (STEVENSON, 1974, pág. 2).

5 – HISTÓRIA DA LINHA DE TRANSMISSÃO

No início da transmissão da energia ainda não estava definida a melhor opção de corrente de transmissão: contínua ou a alternada. Era um período de recém descobrimento das fontes de energia. Grandes empresários interessados no segmento, defendiam suas teorias e, assim, observava-se uma certa concorrência entre as duas formas de transmissão de energia.

Até o momento, não existiam geradores multifásicos, somente após Nikola Tesla ter desenvolvido o motor multifases, e ter comprovado que a transmissão da energia elétrica em corrente alternada era mais eficiente para a época, começaram a se desenvolver as linhas de transmissão e, conseqüentemente, estudos sobre seu comportamento, tal qual o reator de derivação, objeto de estudo, essencial para controle da tensão em linhas de transmissão de energia alternada de longo alcance.

As primeiras linhas de transmissão eram monofásicas e a energia era consumida em geral apenas em iluminação. Também os primeiros motores elétricos eram monofásicos. No dia 16 de maio de 1888, Nikola Tesla apresentou um trabalho em que descrevia os motores de indução difásicos e os motores síncronos difásicos. As vantagens dos motores polifásicos tornaram-se logo evidentes e na “Columbian Exposition” de Chicago em 1893 foi mostrado ao público um sistema de distribuição difásico. A partir de então, a transmissão de energia elétrica em corrente alternada, principalmente trifásica, foi substituindo gradualmente os sistemas de corrente contínua (C.C.) existentes. Em janeiro de 1894 havia nos Estados Unidos cinco usinas geradoras polifásicas das quais uma era difásica e as demais trifásicas. Atualmente naquele país, a transmissão de energia elétrica é feita inteiramente C.A (STEVENSON, 1974, pág. 5).

5.1 LINHA DE TRANSMISSÃO E SUAS PECULIARIDADES

Uma linha de transmissão de energia elétrica possui quatro parâmetros que influenciam no seu comportamento como componente de um sistema de potência. São eles: resistência, indutância, capacitância e condutância (STEVENSON, 1974, pá. 14).

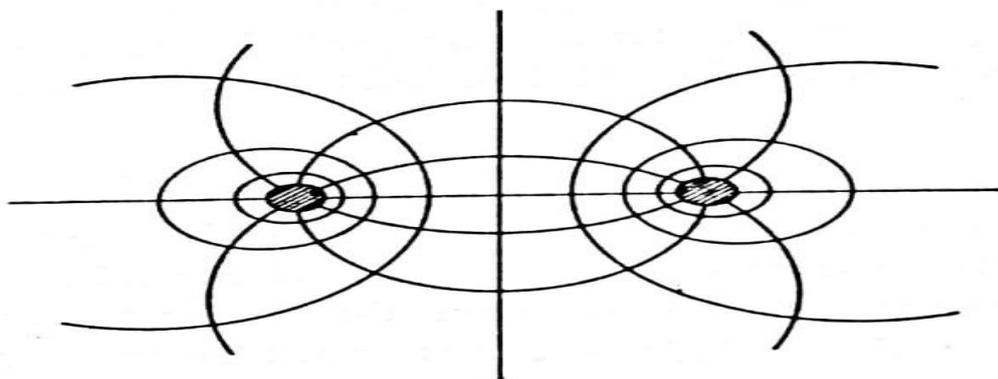
5.1.1 Indutância

A indutância é a medida de queda de tensão reativa, ao longo duma linha de transmissão e pode ser definida como a queda de tensão pela taxa de variação de corrente (HEDMAN, 1979). O reator de derivação, objeto desse estudo, é predominantemente

indutivo e, por essa característica, é considerado um equipamento de suma importância para o sistema elétrico de potência.

Os campos elétrico e magnético, presentes em um circuito percorrido por uma corrente, são usados para definir algumas das propriedades do circuito. A fig. 2.1 mostra uma linha aberta com dois fios e os campos a ela associados. As linhas de fluxo elétrico originam-se nas cargas positivas de um condutor e terminam nas cargas negativas do outro. As linhas de fluxo magnético são linhas fechadas que envolvem os condutores, atravessando o circuito por eles formado; dizemos que “estão concatenadas” com o circuito. A variação da corrente nos condutores provoca uma variação do número de linhas de fluxo magnético concatenadas com o circuito. Por sua vez, qualquer variação de fluxo provoca a indução de uma tensão no circuito, cujo valor é proporcional à taxa de variação do fluxo. Indutância é a propriedade do circuito que relaciona a tensão induzida por variação de fluxo com a taxa de variação de corrente (STEVENSON, 1974, pág. 14).

Figura 12: Campo Elétrico e Magnético



Fonte STEVENSON (1974)

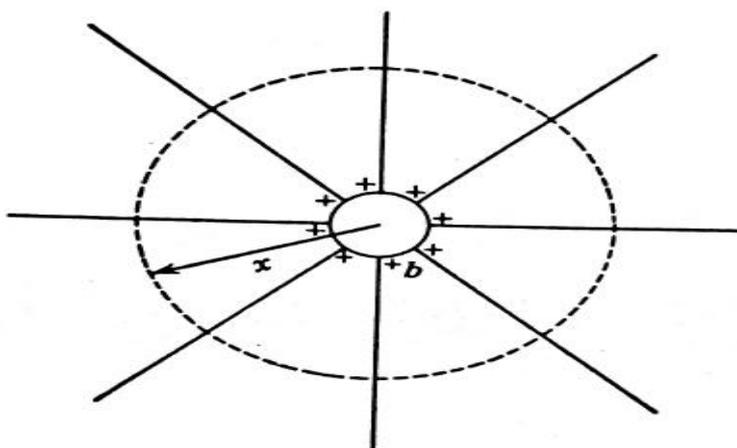
5.1.2 Capacitância

A capacitância, grandeza a ser controlada pelo equipamento em estudo, em longas linhas de transmissão de energia elétrica em corrente alternada, acumula-se, percentualmente, ao longo da linha. Quanto maior a linha de transmissão maior será sua capacitância final.

A diferença de potencial entre os condutores de uma linha de transmissão faz com que se carreguem da mesma maneira que as placas de um capacitor quando entre elas existe uma diferença de potencial. A capacitância entre os condutores é a carga por unidade de diferença de potencial. A capacitância entre condutores é constante, dependendo da seção e da distância entre elas. Para linhas de transmissão de até 80 km, o efeito da capacitância é pequeno e pode ser desprezado; esse efeito passa a ser de grande importância em linhas mais extensas e de alta tensão (STEVENSON, 1974, pág. 45).

A aplicação de uma tensão alternada a uma linha faz com que, em qualquer ponto dos seus condutores, a carga aumente a diminua, com o aumento e diminuição do valor instantâneo da tensão entre esses condutores, no ponto considerado. O fluxo da carga é uma corrente e a corrente causada pela carga e descarga de uma linha devido a tensão alternada, é chamada de corrente capacitiva da linha. Essa corrente existe até mesmo quando a linha está em vazio; afeta a queda de tensão ao longo da linha, seu rendimento e seu fator de potência, bem como a estabilidade do sistema do qual ela faz parte (STEVENSON, 1974, pág. 45).

Figura 13: Linhas de fluxo elétrico



Fonte STEVENSON (1979)

5.1.3 Resistência

A resistência dos condutores é a principal causa da perda de energia em uma linha de transmissão. A menos que seja para alguma outra especificação, o termo resistência aqui usado significa resistência efetiva (STEVENSON, 1979, pág. 65).

Sabe-se que a distribuição da corrente pela área da seção transversal de um condutor é uma função da frequência e, quanto mais alta a frequência, menor a densidade de corrente resultante no centro do condutor. Isso, é claro, significa que a corrente se concentra na superfície do condutor e, em consequência, a área da seção transversal condutora de corrente diminui, isto implica aumento da resistência e perda de potência, que poderia ser desprezível, mas, infelizmente, ocorre (CUTLER, 1976).

5.1.4 Condutância

O grau de facilidade que a corrente elétrica encontra, ao percorrer os materiais, é chamada de condutância. Essa grandeza é representada pela letra G . Facilidade encontrada pela corrente elétrica, ao atravessar um material (SENAI, 1996).

6 – A IMPORTÂNCIA DO REATOR DE DERIVAÇÃO PARA O SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Um sistema de transmissão apresenta condições de operação com variações da tensão, sendo seus valores superiores aos máximos permissíveis pelas normas, muitas vezes, devido à baixa carga da linha de transmissão, outras, por perda momentânea de carga, energização de linhas, rejeição de cargas ou outros fenômenos. Este aumento da tensão é uma condição indesejável e, normalmente, está associado às altas capacitâncias das linhas longas. Os reatores em derivação apresentam como característica, carga predominantemente indutiva. A instalação dos reatores de derivação em pontos da linha de transmissão em seus extremos é uma forma de minimizar o problema (TOSHIBA, 2018).

7. ESTRUTURA E FUNCIONAMENTO DO REATOR DE DERIVAÇÃO

7.1 NÚCLEOS

O diferencial de um reator de derivação é seu núcleo. É onde está sua parte mais importante, devido à sua construção ser diferenciada da construção de transformadores. A maioria das empresas que fabricam os transformadores possuem grande know-how nesse segmento, porém a construção do reator de derivação é sensível e complexa. O núcleo é onde está a fonte do desenvolvimento do estudo, pois é onde estão os separadores das bobinas onde se origina a vibração do reator, que está apresentado desgastes.

Abaixo na figura 14 temos o molde onde são montados os pacotes das bobinas do núcleo do reator, e a figura 15 demonstrando o pacote de uma das bobinas finalizado.

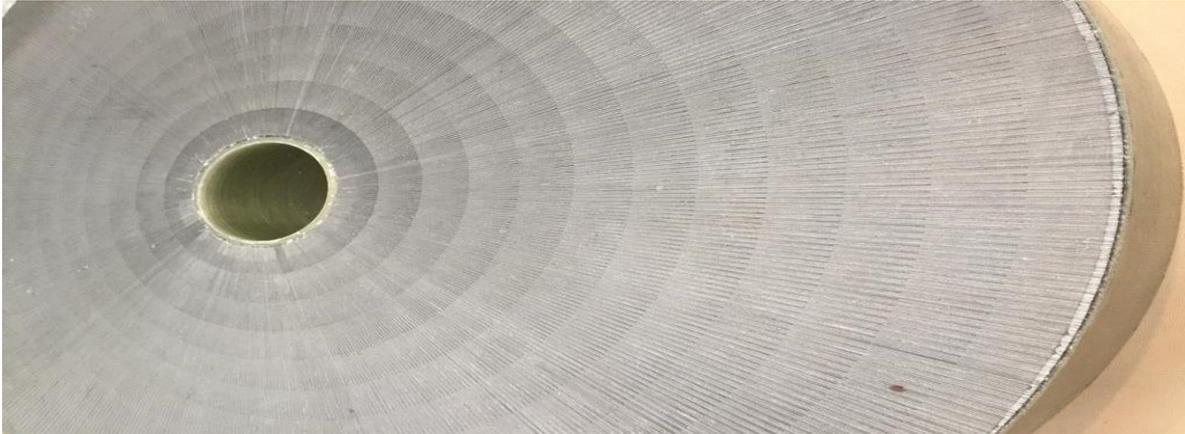
Figura 14: Molde de montagem dos pacotes das bobinas do reator de derivação



Fonte: Taubaté pertencente a área da Copel Geração e Transmissão.

Abaixo um pacote do núcleo, que é uma das bobinas do núcleo.

Figura 15: Pacote de uma das bobinas do núcleo



Fonte: Taubaté pertencente a área da Copel Geração e Transmissão.

Os espaçadores, que mantêm os gaps entre os blocos radiais, suportam as forças de compressão devido às forças de atração magnética entre os blocos e tem a função de minimizar as variações ocasionadas por essas forças, as quais são responsáveis pela geração de ruídos acústicos e vibração. Para suportar as forças de atração entre os blocos radiais, a cerâmica possui alta resistência à compressão, alto módulo de elasticidade, alta precisão dimensional e baixa contração. Além disso, os espaçadores são firmemente fixados aos blocos radiais, de forma a impedir a geração de qualquer ruído ou vibração e também suportar qualquer esforço que possa ser aplicado, durante o transporte do reator (TOSHIBA, 2018).

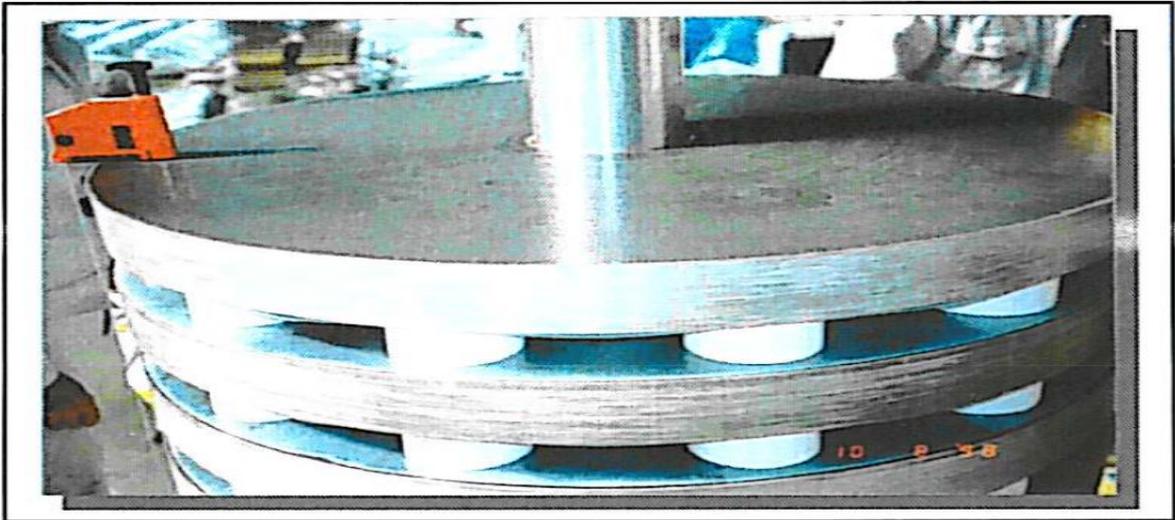
Abaixo na figura 16 estão as pastilhas empilhadas entre os pacotes de bobinas do núcleo, responsáveis por separar os pacotes de bobinas e a figura 17 é a demonstração de como são posicionadas as pastilhas.

Figura 16: Pastilhas de separação dos pacotes de bobinas



Fonte: Taubaté pertencente a área da Copel Geração e Transmissão.

Figura 17: Bobinas e espaçadores do reator de derivação



Fonte TOSHIBA (2018).

Devido ao fluxo radial, grandes forças de atração magnética aparecerão entre os gaps, tornando o núcleo uma fonte de ruídos acústicos elevados, bem como de vibração. Por este motivo, a superfície dos blocos radiais é controlada com alta precisão dimensional, e as tiras de aço silício são laminadas e totalmente moldadas nos blocos com resina epóxi, gerando uma estrutura mecanicamente muito resistente, de forma a poder suportar grandes pressões em suas superfícies (TOSHIBA, 2018).

Abaixo na figura 18 a perna central do núcleo já finalizado com todos os pacotes das bobinas do núcleo, faltando colocar o enrolamento.

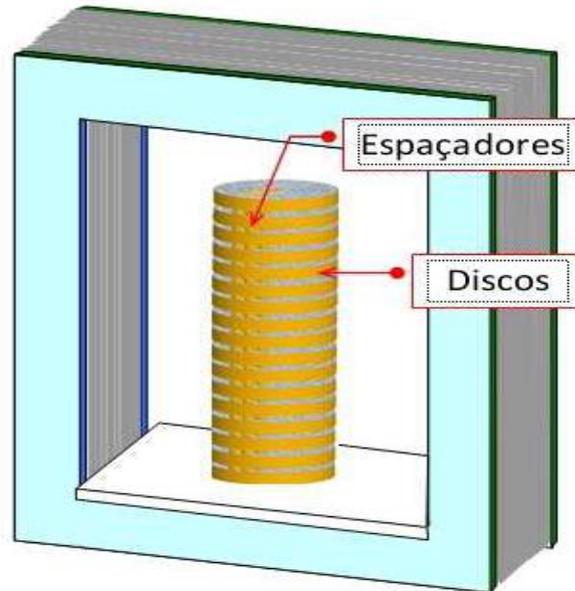
Figura 18: Núcleo com todos os pacotes de bobinas



Fonte: Taubaté pertencente a área da Copel Geração e Transmissão.

A figura 19 representa o núcleo dos reatores monofásicos. São três colunas, sendo a coluna principal, denominada de núcleo radial e as colunas laterais ou de retorno do fluxo que apresentam seção transversal retangular.

Figura 19: Núcleo reatores de derivação



Fonte TOSHIBA (2018).

Figura 20: Núcleo e conector da bucha de alta tensão



Fonte: TOSHIBA (2018).

A figura 20 apresenta a parte de potência concluída. A coluna central radial principal consiste de blocos radiais, feitos de tiras de aço silício de granulação orientada, de alta qualidade e moldada com resina epóxi. Estes blocos radiais são empilhados e entre cada bloco existe um gap, constituído de espaçadores de cerâmica de alta resistência mecânica a compressão.

7.2 CONSTRUÇÃO DA BOBINA (ENROLAMENTO)

Existem diversos tipos de bobinas que podem ser utilizadas. A escolha de um ou outro tipo é em função do nível de tensão e da intensidade de corrente. O tipo mais indicado para os reatores é a bobina de disco contínuo. Este é o tipo de bobina geralmente mais utilizado por ter uma grande faixa de aplicação de tensão e corrente (COÊLHO, 2010).

A bobina tipo disco contínuo consiste em várias bobinas elementares, denominadas de seções, em forma de disco, ligadas em série e separadas entre si por canais de refrigeração com função também de isolamento. Além disso, desde que não haja um número muito grande de espiras por seção, a distribuição de impulso no enrolamento é satisfatória, assegurando uma adequada característica dielétrica ao mesmo (TOSHIBA, 2018)

7.3 DISTRIBUIÇÃO DE FLUXO MAGNÉTICO

Na distribuição do fluxo magnético na coluna principal pode-se notar que a componente radial na região dos gaps torna-se elevada. Por isso as superfícies dos blocos radiais, nas quais a componente magnética radial do fluxo penetra são feitas com chapas de aço silício, de espessura mínima, de maneira a reduzir as perdas ocasionadas por correntes parasitas. Desta forma, também são evitados aquecimentos localizados. Devido às características acima, é possível aumentar as dimensões do gap e também trabalhar com uma densidade de fluxo relativamente mais alta, permitindo a utilização do núcleo radial para reatores de derivação de alta potência (COÊLHO, 2010).

7.4 SISTEMA DE RESFRIAMENTO

Os transformadores de potência normalmente possuem sistema de refrigeração forçada. Esse sistema de refrigeração entra em operação de acordo com a carga que o que está

sendo requerida do transformador. Quanto maior a carga, maior é a solicitação do sistema de refrigeração. Reatores de derivação operam com uma carga praticamente à sua potência nominal, dependendo somente da frequência e da tensão do sistema. Portanto, considerando as características de operação dos reatores, que operam a carga máxima, para reduzir o seu nível de ruído, utiliza-se somente o sistema de refrigeração natural.

A figura 21 demonstra o sistema de resfriamento sendo projetado, de modo a assegurar que o equipamento funcionará sem que sejam excedidos os limites de elevação de temperatura, durante a operação em carga nominal.

Figura 21: Sistema de Resfriamento



**Reator instalado na subestação Taubaté pertencente a área da Copel Geração e Transmissão.
Fonte: Próprio autor.**

7.5 NORMAS TÉCNICAS UTILIZADAS

- NBR 5356 – Transformadores;
- NBR 5356-6 – Reatores;
- NBR 5475 – Reatores elétricos de potência – Terminologia;
- NBR 6323 – Aço ou ferro fundido – Revestimento de zinco por imersão a quente;
- NBR 6963 – Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão, procedimento;
- NBR 7070 – Guia para amostragem e análise de gases livres e dissolvidos em óleos isolantes, métodos de ensaio;
- NBR 7876 – Linhas e equipamentos de alta tensão medição de radiofrequência na faixa de 0,15 a 30 MHz;
- NBR 7277 – Transformadores e reatores, determinação de nível de ruído;
- NBR 10202 – Buchas de tensões nominais 72,5, 145 e 242 kV para transformadores e reatores de potência, características elétricas construtivas, dimensionais e gerais;
- NBR 10443 – Tintas e vernizes, determinação da espessura de película seca;
- NBR 11003 – Ensaio de aderência em tintas e revestimentos similares, método de ensaio;
- NBR 11388 – Sistemas de pintura para equipamentos e instalações de tubulações elétricas;
- NBR 12458 – Válvulas para transformadores de potência acima de 500 kVA, características mecânicas;
- NBR 7569 – Reatores para sistemas de potência, método de ensaio.
- Quando necessário, poderão ser adotadas normas internacionais das seguintes instituições:
 - IEC – International Electrotechnical Commission;
 - ANSI – American National Standards Institute;
 - NEMA – National Electrical Manufacturers Association.
- Para os materiais e métodos de fabricação, devem ser observadas as normas aplicáveis da ABNT, ASTM, AWS, NEMA e ASME.

7.6 VIBRAÇÃO

Conforme a especificação Copel, os esforços por vibração não deverão exceder 2,0 kg/mm² e a amplitude máxima de vibração nas paredes laterais e tampa do torque não deverá exceder 200 µm, pico a pico, com o reator operando na tensão nominal e faixa de temperatura prevista (TOSHIBA, 2018).

O reator será energizado com máxima tensão operativa contínua ($V_m = 500/\sqrt{3}$ kV) na frequência nominal. Serão feitas medições ao redor de todo o tanque em um número suficiente de pontos que permita estabelecer uma média das medições. O ensaio deve ser realizado com todos os componentes do reator montados e com nível de óleo completo (TOSHIBA, 2018).

A amplitude máxima em qualquer ponto deverá ser ≤ 200 µm (pico a pico).

8 ENSAIOS REALIZADOS

8.1 NORMAS UTILIZADAS PARA ENSAIO DE VIBRAÇÃO

A norma IEEE C57.12.21 determina que o reator de derivação deve ser ensaiado sob condições normais de operação. De um modo geral, as partes ou componentes do reator devem ser medidos utilizando-se um transdutor. Uma das opções descritas na norma é de medir a aceleração na superfície do componente com um acelerômetro, e, então, calcular o valor de amplitude pico a pico. Medições de aceleração, ao invés de velocidades ou deslocamentos, são preferências para altas frequências. A precisão do instrumento de medição deve ser de, no mínimo, 10 % na segunda harmônica da frequência de excitação. A norma determina que o valor da amplitude média de todos os pontos não deve exceder 60 μm e também não deverá exceder um valor máximo em cada região de 200 μm .

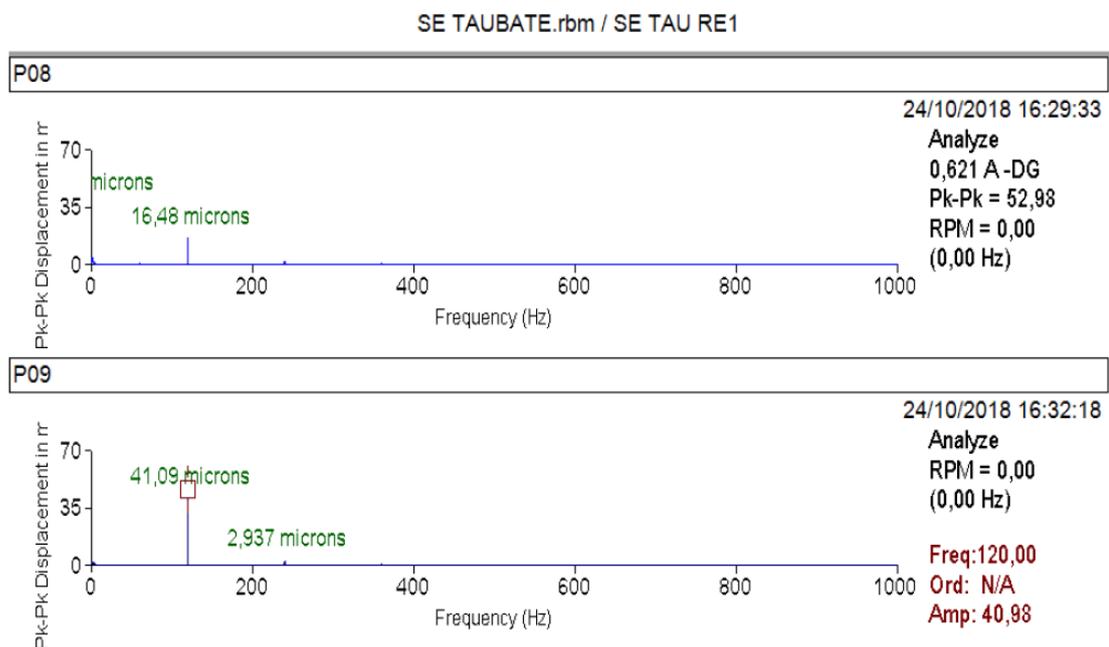
A norma IEC 289, não diferente na IEEE C57.12.21, com conceitos similares, prevê que a forma com que é realizado o ensaio deve ser decidida antes de se iniciarem as medições de vibração. Deve-se verificar as condições em que é acordado ou especificado o ensaio, de rotina ou de tipo, e se a tensão do reator para teste será a nominal ou a máxima de operação, e também, como e onde as medições devem ser tomadas. As medições devem ser determinadas pico a pico da amplitude de vibração e o valor máximo recomendado em qualquer lugar medido de 200 μm .

8.1.1 Resultados do ensaio de vibração realizado no reator de derivação

Para realização da coleta de dados foram utilizados acelerômetros, no lado externo do tanque, sendo dividido em áreas retangulares e, assim, a cada área um sensor ficou em contato com a chapa do tanque do reator, dessa forma realizando a varredura na área, a fim de verificar ao máximo o valor encontrado.

Após a entrada em operação do reator de derivação na subestação de Taubaté, realizados os ensaios de análise de vibração, todos os ensaios demonstraram que a vibração do reator está dentro da especificação das normas, não atingindo o limite de 200 μm , de pico a pico. A figura 22 representa uma das medições realizadas em campo, com leitura por sensor P08 e P09.

Figura 22: Relatório das medidas de vibrações realizadas em campo



**Gráfico de análise de vibração do reator instalado na subestação Taubaté.
Fonte: Próprio autor.**

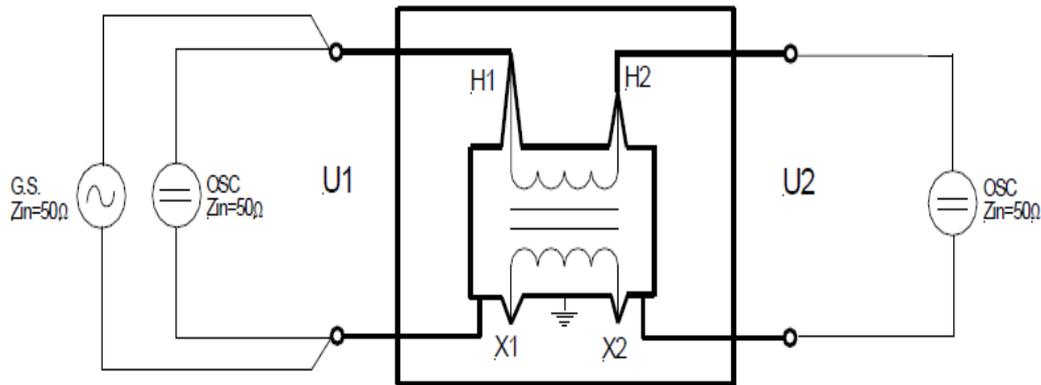
8.1.2 Ensaio de deslocamento do núcleo

O ensaio de resposta em frequência, denominado pela sigla FRA, do inglês “*Frequency Response Analysis*”, é qualquer ensaio envolvendo relações entre duas grandezas características de um componente elétrico ou eletrônico (resistor, capacitor, indutor, transistor, diodo, etc), de uma placa de circuito eletrônico complexo ou mesmo de um transformador de potência em uma faixa de frequências especificadas, ou seja, é um conceito bastante abrangente.

Pela própria definição de ensaio de resposta em frequência, necessitamos excitar o objeto sob ensaio com várias frequências para sabermos como este o objeto se comporta dentro de uma faixa de interesse. Podemos fazer isto aplicando varreduras de ondas senoidais, sucessivamente, desde a frequência inicial até a frequência final, com um degrau entre elas adequadamente escolhido. Este tipo de ensaio é denominado SFRA, do inglês “*Sweep Frequency Response Analysis*”.

O ensaio de FRA é a relação entre duas grandezas características do objeto de teste, sejam elas, tensões, correntes, tensão e corrente, etc. em uma faixa de frequências especificadas. Na figura 23 um circuito básico do ensaio de SFRA, onde o objeto de teste está representado como um transformador de potência.

Figura 23: Montagem para realização do ensaio



Fonte: INSTRONIC APOSTILA TREINAMENTO: Operação do Instrumento FRAX (2012)

No arranjo de ensaio, foi aplicada uma tensão senoidal entre a fase H1 e terra via gerador de sinais G.S. A medida da tensão aplicada U1 é feita pelo canal CH1 do osciloscópio, cuja impedância interna é 50Ω. O sinal transferido U2 entre a fase H2 e terra é medido pelo canal CH2 do osciloscópio, também em 50Ω.

De acordo com o grupo da norma IEEE (IEEE FRA Task Force C.57.149, 2005), cada região do gráfico de frequência representa uma parte do circuito equivalente do transformador de potência. Distorções nestas faixas de frequência podem indicar alguma avaria nos componentes conforme tabela 1.

Tabela 1: Relação da frequência com avaria do equipamento

Indicativo de defeito pela alteração da resposta de frequência	
Frequência	Indicativo
20 Hz a 2 kHz	Deformação no núcleo, circuito aberto ou em curto, magnetismo residual
2 kHz a 20 kHz	Movimento entre enrolamentos, alteração da força de prensagem
20 kHz a 200 kHz	Deformação no enrolamento principal ou regulação
200 kHz a 2 MHz	Movimento do enrolamento principal ou de regulação

O FRA é um método comparativo, recomendado para que seja realizado como um ensaio de aceitação em fábrica e, após qualquer evento de transporte ou surto no sistema elétrico, onde possa ter ocorrido um deslocamento interno da parte ativa do equipamento.

O ensaio de resposta em frequência é muito importante, pois por meio dele consegue-se detectar vários tipos de problemas, como referenciado na tabela 1. Tendo em vista que está sendo analisado o "stress" sofrido pelo reator em decorrência de vibrações, esse ensaio poderá apresentar as possíveis falhas internas do reator.

Uma das formas de avaliar essas falhas é o método de comparação estatística entre as curvas, que é de fácil identificação. Nesse caso utilizou-se um ensaio realizado em fábrica em 2016 e outro ensaio após um período em operação em 2019, para realizar as comparações. Como não foram constatadas diferenças significativas, concluiu-se que as vibrações estão afetando apenas os componentes externos do reator. Se houvesse alguma diferença significativa teria que ser aberto o reator e feita uma inspeção, provavelmente ocasionando a necessidade de um reaperto na estrutura de fixação do núcleo. O próprio programa realiza a comparação e apresenta o relatório. Segue demonstrativo do relatório apresentado pelo programa nas figuras 24 e 25.

Figura 24: Comparação das curvas da realização dos ensaios

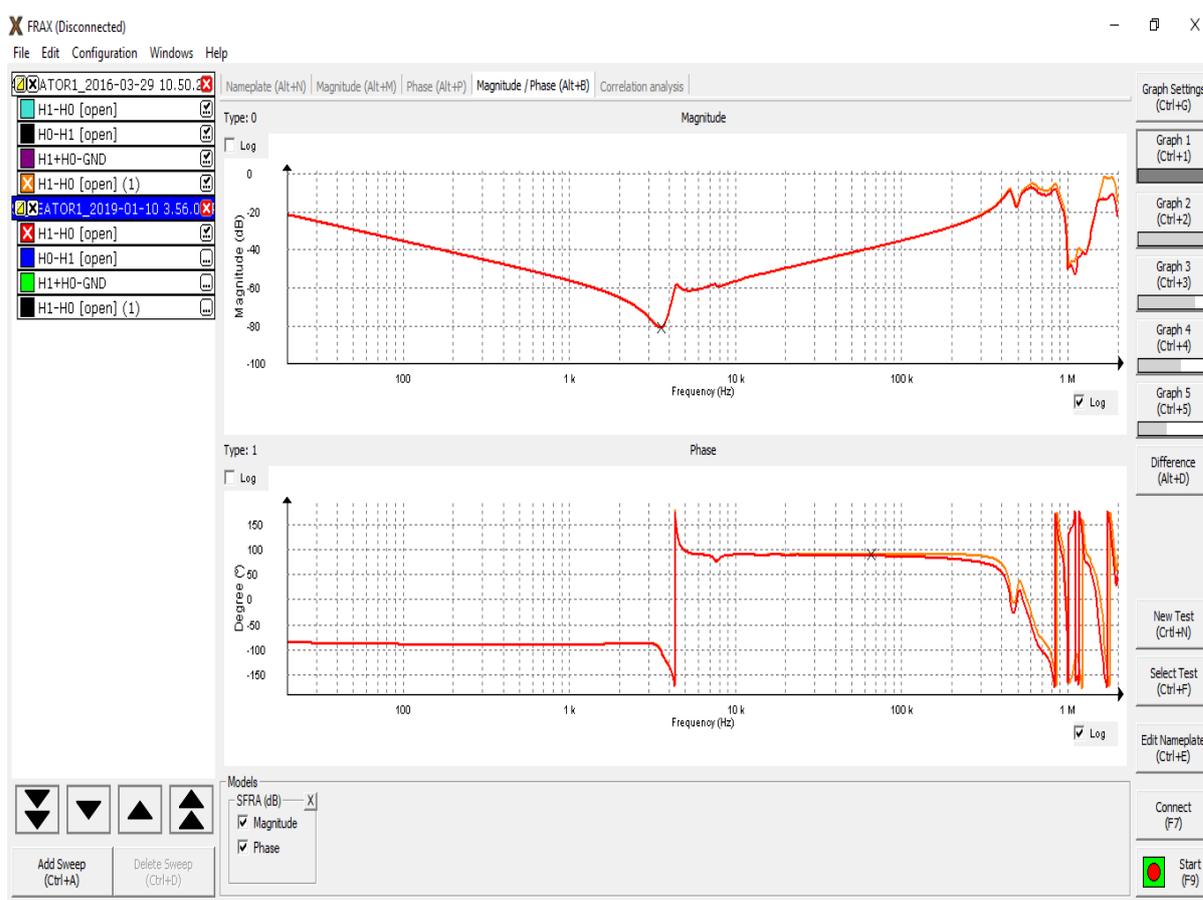
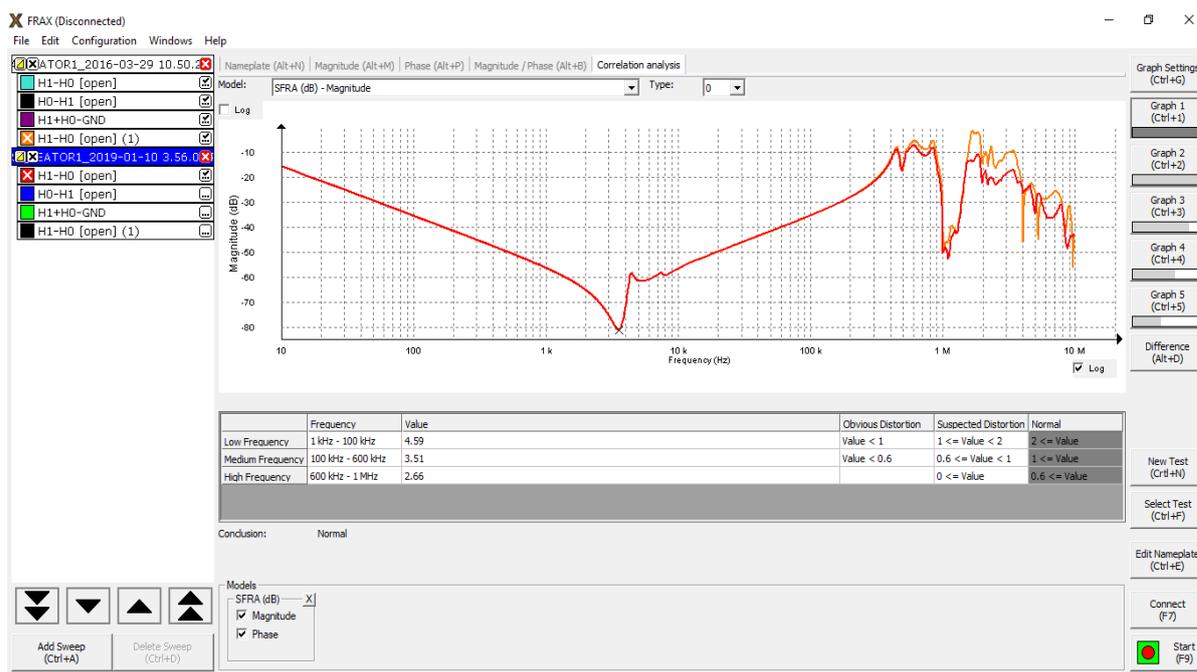


Gráfico do reator instalado na subestação Taubaté pertencente a área da Copel Geração e Transmissão. Fonte: Próprio autor.

Figura 25: Resultado da comparação estatística



**Gráfico do reator instalado na subestação Taubaté pertencente a área da Copel Geração e Transmissão.
Fonte: Próprio autor.**

8.2 – PROBLEMAS ENCONTRADOS COM REATOR EM ANÁLISE

Após a entrada do reator de derivação em operação houve atuações indevidas de desligamento (trip) e de “fuga a terra” no circuito de monitoramento de proteção do reator relé buchholz, devido ao rompimento da isolamento dos cabos decorrentes da vibração.

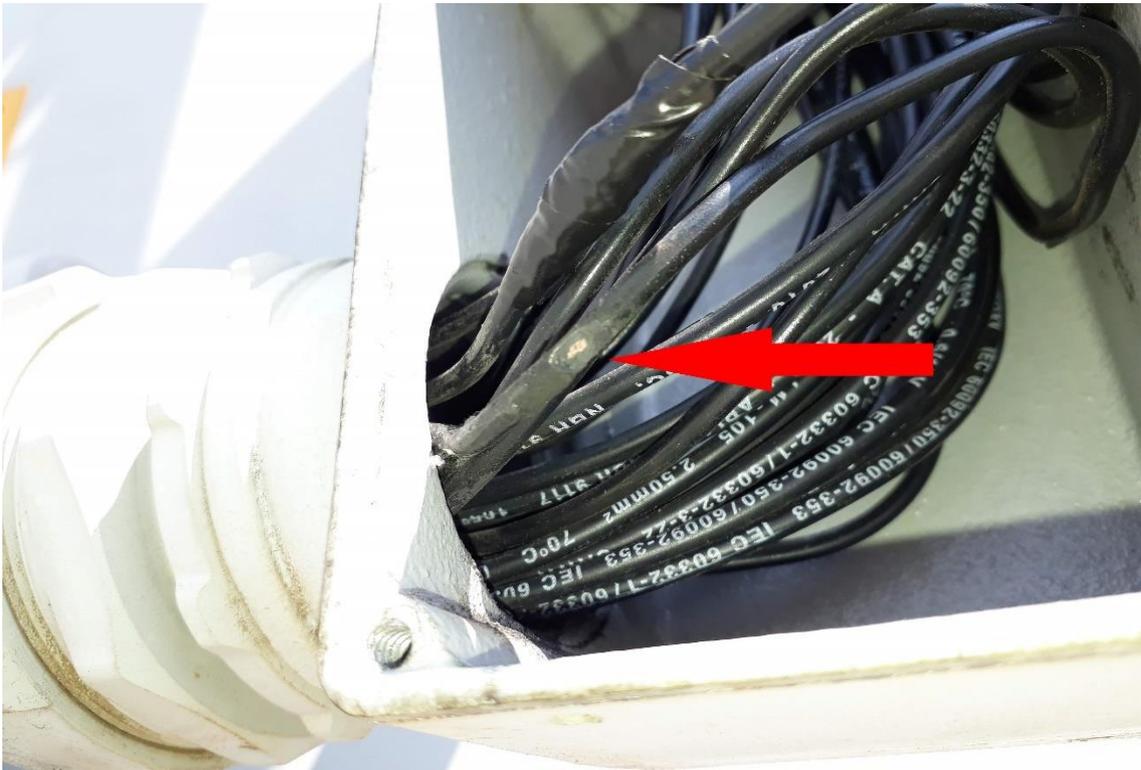
Nas figuras 26 à 29 está sendo demonstrado o desgaste na parte de isolamento dos cabos dos acessórios do reator de derivação.

Figura 26: Desgaste na isolamento do cabo na caixa de passagem



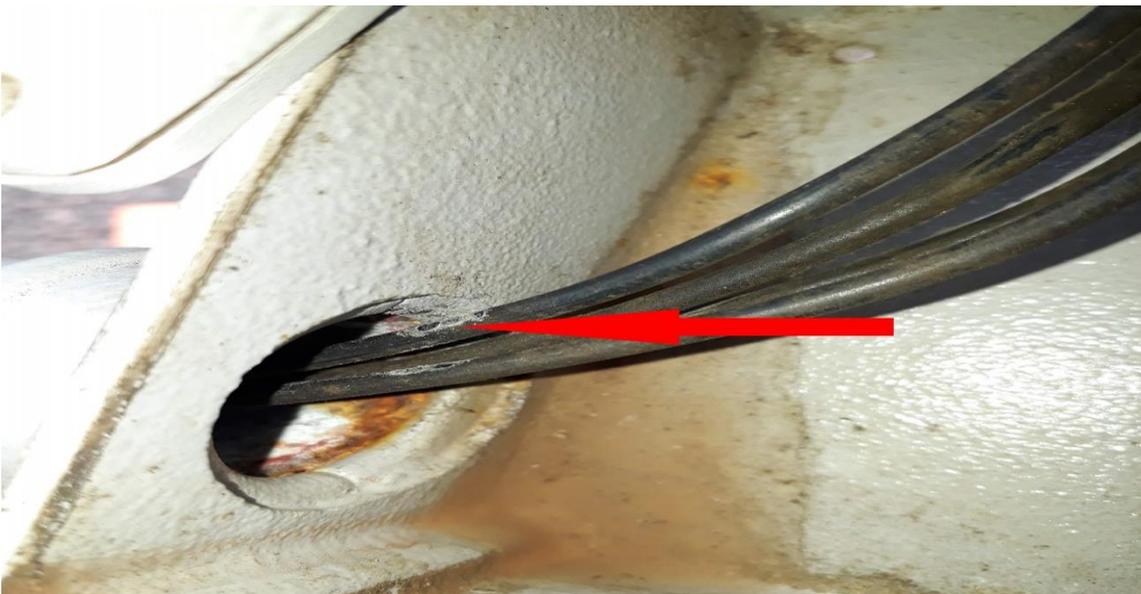
**Reator instalado na subestação Taubaté pertencente a área da Copel Geração e Transmissão.
Fonte: Próprio autor.**

Figura 27: Desgaste na isolação do cabo na caixa de passagem



**Reator instalado na subestação Taubaté pertencente a área da Copel Geração e Transmissão.
Fonte: Próprio autor.**

Figura 28: Desgaste na isolação do cabo na caixa de passagem



**Reator instalado na subestação Taubaté pertencente a área da Copel Geração e Transmissão.
Fonte: Próprio autor.**

Figura 29: Desgaste na isolação do cabo na caixa de passagem



**Reator instalado na subestação Taubaté pertencente a área da Copel Geração e Transmissão.
Fonte: Próprio autor.**

Nas figuras 30 e 31 está sendo demonstrado o desprendimento de porcas que asseguram acessórios do reator, devido a vibração.

Figura 30: Desprendimento da porca no sistema de Resfriamento



**Reator instalado na subestação Taubaté pertencente a área da Copel Geração e Transmissão.
Fonte: Próprio autor.**

Figura 31: Desprendimento da porca na válvula bay-pass



**Reator instalado na subestação Taubaté pertencente a área da Copel Geração e Transmissão.
Fonte: Próprio autor.**

9 – SOLUÇÃO ADOTADA PARA AMENIZAR A PRINCIPAL FALHA

Para evitar a atuação indevida da proteção, foi adotado o seguinte procedimento de instalação de proteção física, em todos os cabos com manta de borracha e organizador de cabos, afim de amenizar o efeito da vibração nos cabos, assim evitando a atuação indevida da proteção.

Especificação do material utilizado, fabricado em monômero de alta constante dielétrica e flexível, que acompanhará qualquer posição que o feixe (chicote) se destine, com a finalidade de proteger fios e cabos de forma versátil.

Abaixo na figura 32 à 35 está sendo demonstrado a solução adotada nos cabos dos acessórios do reator de derivação.

Figura 32: Proteção mecânica instalada nos cabos



**Reator instalado na subestação Taubaté pertencente a área da Copel Geração e Transmissão.
Fonte: Próprio autor.**

Figura 33: Poteção mecânica instalada nos cabos



**Reator instalado na subestação Taubaté pertencente a área da Copel Geração e Transmissão.
Fonte: Próprio autor.**

Figura 34: Poteção mecânica instalada nos cabos



**Reator instalado na subestação Taubaté pertencente a área da Copel Geração e Transmissão.
Fonte: Próprio autor.**

Figura 35: Poteção mecânica instalada nos cabos



**Reator instalado na subestação Taubaté pertencente a área da Copel Geração e Transmissão.
Fonte: Próprio autor.**

Na figura 36 está sendo demonstrado a solução para evitar o desprendimento das porcas dos acessórios do reator, instalando-se porcas auto travantes.

Figura 36: Porca auto travante



**Reator instalado na subestação Taubaté pertencente a área da Copel Geração e Transmissão.
Fonte: Próprio autor.**

10 – CONCLUSÃO

Após análise, constataram-se os seguintes problemas: a vibração está causando desgastes mecânicos excessivos nos cabos dos acessórios do reator, a deficiência na isolamento dos cabos está causando “fuga a terra” e desligamento indevido no reator, afetando diretamente em sua confiabilidade. Diante dessa situação se tornou necessária a realização de estudos sobre o assunto a fim de eliminar ou amenizar tal evento indesejado.

Após estudos, identificou-se que a vibração está dentro dos padrões aceitáveis em normas de fabricação, que é $\leq 200 \mu\text{m}$ (pico a pico), ou seja, já era previsto em projeto e em fábrica que a vibração estará presente durante a operação do equipamento e, conforme inspecionado no ensaio de SFRA o equipamento não está sofrendo desgastes anormais em seu interior.

Como inspecionado nos dois ensaios apresentados, verificou-se que o reator analisado está sofrendo desgaste devido à vibração somente em seu exterior, contudo, é pertinente realizar acompanhamento de seu interior por meio de ensaios de SFRA, com periodicidade, no mínimo, bienal, para averiguar se está iniciando algum tipo de desgaste anormal, adotando uma abordagem preventiva no equipamento e dessa forma conseguindo minimizar custos da empresa.

A conclusão a que se chega, portanto, é que houve erro na montagem do reator. Sendo de conhecimento que o equipamento sofre vibração durante seu funcionamento, deveria ter sido implementada alguma medida como forma de minimizar o desgaste mecânico da isolamento dos cabos de seus acessórios, evitando falha no equipamento e evitando também que fosse afetada sua confiabilidade para com o sistema, de forma geral.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTO, Gaspar. História da Eletricidade: Investigando a Física. Ed. Ática. 1ª edição, 3ª impressão. São Paulo - SP, 2005.

COÊLHO, Mauro Frank Oguino Fundamentos de física / Mauro Frank Oguino Coêlho. - Manaus: Centro de Educação Tecnológica do Amazonas, 2010. 63 p.: il. tabs.

CUTLER, Philip. Análise de Circuitos CA/ Cutler; tradução: Adalton Pereira de Toledo. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1976. P. ilustr.

HEDMAN, D. E. Teoria das Linhas de Transmissão I/ Hedman; tradução: José Wagner M. Kaehler. Universidade Federal de Santa Maria. 1979. 208 p.

LOURENÇO, Márcio Tavares *et al* Uma Proposta Didática Para O Ensino De Física Na Eja: Os Limites De Um Ensino Centrado Na Aprendizagem. II CINTEDI, Congresso Internacional de Educação Inclusiva, 2016.

MOTA, Camilla Veras. A história de Nikola Tesla, o excêntrico inventor rival de Thomas Edison que inspirou Elon Musk. BBC News, 22 de dezembro de 2017. Disponível em < <https://www.bbc.com/portuguese/geral-42375111> > acessado em 15/03/2020.

NUNES, Marcus Vinicius. Nikola Tesla: Uma Breve História dos Mestres dos Raios. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Estadual Paulista, Campus Presidente Prudente- MG, 2015.

SANTOS, César Destro. Eletrofísica: A Sociedade dos Circuitos. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto Federal de Ciência, Tecnologia e Educação de Santa Catarina. Araraguá. 2018.

SENAI. CPM - Programa de Certificação de Pessoal de Manutenção, Elétrica, Eletrotécnica. Espírito Santo, 1996. (Apostila).

SIMÕES, Cibele Forjaz. A Eletricidade entra e Cena. Urdimento, v.1, n.31, p.63-77, Abril 2018.

STEVENSON, Willian D. S. Jr. Elementos de Análise de Sistemas de Potência. Editora McGraw-Hill do Brasil, 1974.

TESLA, Nikola. Minhas Invenções: a Autobiografia de Nikola Tesla/ Nikola Tesla; tradução: Roberto Leal Ferreira.- 1. ed. São Paulo: Editora Unesp. 2012.

TOLENTINO, Mário; ROCHA, Romeu C. Filho. O Bicentenário da Invenção da Pilha Elétrica. Ver, Química Nova Escola. Nº 11, maio, 2000.

TOSHIBA. Treinamento COPEL, Reator Monofásico. Paraná. 2018. (Apostila).

VALE, Alan Rafael Menezes. Controle de Vibração em Reatores Elétricos Através de Absorvedores Dinâmicos Viscoelásticos/ Alan Rafael Menezes do Vale; Orientador Prof Dr. Newton Sure Soeiro. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, Mestrado em Engenharia Mecânica, Belém, 2006.