

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ  
DANILO SABINO SOARES PEREIRA**

**ANÁLISE PROSPECTIVA PARA OCORRÊNCIA DE FERRORESONÂNCIA EM  
TRANSFORMADORES DE POTENCIAL INDUTIVO- 230 kV**

**CASCAVEL  
2018**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ  
DANILO SABINO SOARES PEREIRA**

**ANÁLISE PROSPECTIVA PARA OCORRÊNCIA DE FERRORESSONÂNCIA EM  
TRANSFORMADORES DE POTENCIAL INDUTIVO- 230 kV**

Projeto de pesquisa apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz para elaboração do Trabalho de Conclusão de Curso.

**Orientador: Prof. Denise Da Costa Canfiled.**

**CASCABEL  
2018**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ  
DANILO SABINO SOARES PEREIRA**

**ANÁLISE PROSPECTIVA PARA OCORRÊNCIA DE FERRORESSONÂNCIA EM  
TRANSFORMADORES DE POTENCIAL INDUTIVO- 230 kV**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Elétrica, do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, sob orientação da Professora Denise Da Costa Canfield.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Denise da Costa Canfield  
Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz

---

Helder José Costa Carozzi  
Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz

---

Maycon Roberto Boening  
Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz

Cascavel, 05 de dezembro de 2018

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ter me dado principalmente força de vontade, paciência, persistência, calma e sabedoria para poder chegar até essa parte final desse ciclo de ganho de conhecimento. Agradeço a toda minha família por ter ajudado direta e indiretamente a poder passar pelas mais diversas provações e sentimentos resultantes desse período.

Agradeço especialmente a minha esposa Tânia Regina Beck Pereira, por toda paciência, dedicação e trabalho demonstrado ao passar desses anos aos quais me dediquei a uma atividade que busca uma evolução para nossa família.

Agradeço a todos professores que fizeram parte desse período ao qual através deles pude absorver parte de seu conhecimento e dedicação a ensinar e assim perpetuar o conhecimento em especial agradeço, a minha professora orientadora Denise Da Costa Canfid.

## RESUMO

O fenômeno ferorrressonante é um caso o qual pode ocorrer em diversos instantes dentro de subestações de transmissão de eletricidade. Este evento, tem características não lineares as quais trazem consigo a alteração de diversas grandezas elétricas de grande importância para todo o sistema elétrico de potência nacional. A alteração de parâmetros e grandezas elétricas como tensão, corrente e frequência, podem desencadear a atuação de diversos relés presentes no sistema de proteção de subestações, tais atuações podem tirar de operação, de maneira repentinamente, grandes blocos de potência do sistema interligado nacional. Dentre os diversos cenários possíveis para que ocorra ferorrressonância em subestações enfatiza-se o circuito composto por disjuntores com capacitores ligados em paralelo com a sua câmara principal e transformadores de potencial indutivo; isto pode se dar - no momento de manobra de troca de barras principal e barra de transferência, tal circuito estando propenso a ser causador de ferorrressonância, em consequência das interações de suas reatâncias indutiva e reatâncias capacitivas, provenientes dos equipamentos que fazem parte do conjunto de subestações.

Palavras-chave: Ferorrressonância, Transformadores de Potencial Indutivo, Disjuntores, Manobra, Subestações, Sistema Elétrico De Potência.

## **ABSTRACT**

The ferroresonance phenomenon is a case that can occur in several instants within electricity transmission substations, this event has non-linear characteristics that bring with it the change of several electric magnitudes of great importance for the entire national power system. The change of value such as voltage, current and frequency can trigger in the operation of several relays in the substation protection system, such actions can suddenly take out large blocks of power from the national interconnected system. Among the several possible scenarios for ferroresonance in the substations, the circuit compound of circuit breakers with capacitors connected in parallel with their main chamber and inductive potential transformers is emphasized when at the moment of the main bar exchange and transfer bar circuit is prone to be the cause of ferroresonance due to the interactions of its inductive reactances and capacitive reactances coming from the equipments that are part of the set of substations.

Key words: Ferroresonance, Inductive Potential Transformers, Circuit Breakers, Maneuver, Substations, Power System.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Linha do tempo do setor elétrico Brasileiro.....	15
Figura 2 - Empreendimentos de geração .....	19
Figura 3 - Empreendimentos de transmissão.....	20
Figura 4 - Mapeamento organizacional das instituições que dirigem o sistema energético nacional.....	21
Figura 5 - Representação do esquema energético de transmissão de energia elétrica.....	22
Figura 6 - Disjuntores para subestações ao ar livre .....	24
Figura 7 - Partes básicas de disjuntores.....	26
Figura 8 -Secionadoras de abertura central; .....	28
Figura 9 -Transformador de potencial .....	29
Figura 10 - Representação elétrica transformador de potencial de derivação .....	30
Figura 11 - Representação elétrica transformador de potencial indutivo .....	31
Figura 12 - Principais partes TPC.....	31
Figura 13 - Representação elétrica transformador de potencial capacitivo.....	32
Figura 14 - Circuito ressonante série .....	36
Figura 15 - Resultado da resposta da corrente do circuito variando os parâmetros .....	37
Figura 16 - Resultado para diversos valores de reatâncias capacitivas .....	38
Figura 17 - Localização capacitores em disjuntor de AT.....	40
Figura 18 - Interação entre disjuntor e TP no efeito ferorrressonante .....	40
Figura 19 - Configuração de troca de barras em subestações.....	42

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Classificação de subestações por níveis de tensão alternada.....23

Tabela 2 - – Níveis de tensão e suas respectivas distâncias de segurança.....27

## LISTA DE ABREVIACOES

<b>AT:</b>	Alta Tensão
<b>ANEEL:</b>	Agencia Nacional de Energia Elétrica
<b>ANSI:</b>	<i>American National Standards Institut</i>
<b>ANEEL:</b>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<b>ABRADEE:</b>	Associao Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
<b>ATP:</b>	<i>Alternative Transient Program</i>
<b>BT:</b>	Baixa Tensão
<b>CPFL:</b>	Companhia Paulista de Força e Luz
<b>CEMIG:</b>	Companhia Energética de Minas Gerais
<b>CEEE:</b>	Companhia Estadual de Energia Elétrica
<b>EAT:</b>	Extra Alta Tensão
<b>GD:</b>	Gerao Distribuída
<b>GE:</b>	General Electric
<b>LT:</b>	Linha de Transmissão
<b>LIGHT:</b>	Light Serviços de Eletricidade S.A
<b>MT:</b>	Média Tensão
<b>MW:</b>	Megawatt
<b>ONS:</b>	Operador Nacional do Sistema Elétrico
<b>PND:</b>	Programa Nacional de Desestatizao
<b>PRODIST:</b>	Procedimentos de Distribuico de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
<b>SIN:</b>	Sistema interligado Nacional
<b>SF6:</b>	Hexafluoreto de enxofre
<b>TP:</b>	Transformador de potencial
<b>TPC</b>	Transformador de potencial indutivo
<b>TPI</b>	Transformador de potencial capacitivo

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>15</b>
2.1. BREVE HISTÓRICO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO .....	15
2.2. O SISTEMA ENERGÉTICO BRASILEIRO.....	17
2.2.1 O Sistema Interligado Nacional.....	18
2.2.2 O Sistema De Transmissão Energético Nacional .....	19
2.3. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA .....	21
2.4. Subestações.....	22
2.4.1 Subestações De Transmissão .....	22
2.5 DISJUNTORES.....	24
2.5.1 Técnica De Funcionamento .....	25
2.6 CHAVES SEZIONADORAS.....	27
2.7 TRANSFORMADOR DE POTENCIAL.....	29
2.7.1 Particularidades e Fabricação .....	30
2.7.3 Transformador De Potencial Capacitivo.....	31
2.8 CONJUNTOS DE AUTOMAÇÃO EM SUBESTAÇÕES .....	33
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>35</b>
3.1. FERRORESSONÂNCIA .....	35
3.1.1 Estudo Do Fenômeno De Ferrorressonância .....	36
3.1.2 Exploração Do Efeito Ferrorressonante .....	38
3.1.3 Ferrorressonância Com Configuração Disjuntor E TP Indutivo .....	39
3.2 IMPACTOS CAUSADOS PELA OCORRÊNCIA DE FALHAS NO SEP .....	41
3.2.1 Falhas No SEP Em Consequência De Ferro Ressonância.....	42
3.3 SUPRESSÃO DO EFEITO FERRORRESSONANTE .....	44
3.3.1 Emprego De Resistor Amortecedor Do Efeito Ferrorressonante .....	44
<b>6. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>49</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A qualidade nos sistemas de energia elétrica, nos dias de hoje, passou a ser uma característica fundamental para diversas sociedades que buscam desenvolvimento social, cultural, industrial e comercial em todo mundo. Contudo, para que grandes blocos de energia possam ser gerados e distribuídos, pelo sistema elétrico de potência, são necessárias diversas estruturas tais como usinas, redes de transmissão e subestações.

As subestações de energia elétrica são estruturas que acomodam diversos equipamentos, os quais têm inúmeras funções dentro do sistema elétrico de potência, como proteção, medição e transformação de grandezas elétricas; podem também diversificar as rotas do fluxo de energia, e no caso de problemas no sistema elétrico o conjunto de proteção presente nas subestações podem tomar as ações de isolar uma determinada área do circuito elétrico abrangente, com o intuito de proteger o restante do sistema energético alimentado pela planta.

Contudo, para que isto aconteça é necessário que as subestações possuam diversos equipamentos de páteo. Sendo que este conjunto de equipamentos, na grande maioria das vezes, encontram-se próximos uns aos outros. Este cenário pode, em determinadas situações, ocasionar danos de grandes proporções, muitas vezes catastróficos aos equipamentos da subestação que podem ser causados pelos mais diversos motivos possíveis, como explosão de equipamentos e autocombustão devido a temperaturas excedentes das temperaturas de trabalho.

É importante lembrar que as subestações podem ser descritas do ponto de vista de circuitos elétricos como circuitos RLC não lineares, os quais estão propensos a diversos efeitos elétricos e magnéticos; já que sob certas condições os circuitos RLC, que tem atrelados a si materiais ferromagnéticos provenientes dos equipamentos indutivos, tornam as reatâncias indutivas variáveis, sendo que estes efeitos passam a proporcionar situações de ressonância a vários pontos no sistema. Este efeito é denominado ferrorressonância e pertence ao grupo nomeado como sobretensões sustentadas, neste caso a análise prospectiva dos efeitos de ferrorressonância se torna uma alternativa para auxiliar no estudo deste fenômeno.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

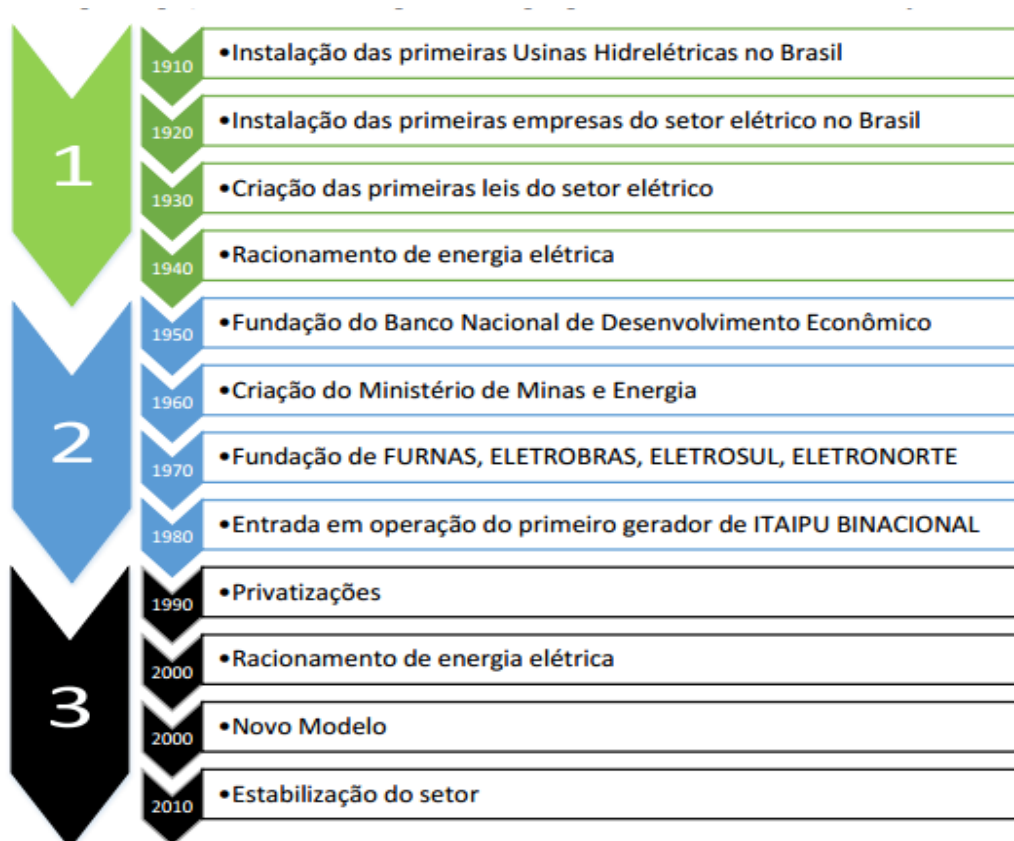
### 2.1. BREVE HISTÓRICO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

A qualidade nos sistemas de energia elétrica nos dias de hoje passou a ser uma característica fundamental para diversas sociedades que buscam desenvolvimento social, cultural, industrial e comercial em todo mundo.

Contudo o desenvolvimento do setor energético Brasileiro teve início no século XX, através do progresso de grandes capitais brasileiras como Rio de Janeiro e São Paulo, a partir disso passou a ocorrer investimentos principalmente de capitais estrangeiros, afim que ocorresse a instalação de empresas do ramo de energia elétrica no Brasil [1].

Conforme a figura 1, historicamente o setor energético brasileiro é constantemente modificado em consequência de alterações de paradigmas por parte dos setores responsáveis pela administração do setor elétrico em nosso país.

**Figura 1 --** Linha do tempo do setor elétrico Brasileiro



Fonte: [2]

O histórico apresentado na figura 1, mostra três momentos na história do Brasil com características marcantes por parte da administração do setor energético Brasileiro, sendo que no primeiro momento de 1910 a 1940 ocorre a introdução da energia elétrica no Brasil, no segundo período 1950 a 1980 o Estado é parte com grande importância para o aumento da Matriz Energética Brasileira com o intuito do desenvolvimento industrial no país, já no terceiro instante que abrange os anos de 1990 a 2010 se apresenta uma mudança no setor energético Brasileiro onde se busca uma maior presença do setor privado [2].

Em consonância com a figura 1, o primeiro período foi composto de um passo inicial no que diz respeito a geração e consumo de energia elétrica no Brasil, neste período o governo buscou desenvolver leis aos quais poderiam lhes proporcionar um maior controle no tocante a regulamentação de atividades no setor e controle do uso de fontes energéticas.

Neste período grandes empresas, que até os dias de hoje são gigantes do setor energético Brasileiro, deram início às suas atividades, empresas como Light Serviços de Eletricidade S.A (Light), Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE) e General Electric (GE)[2].

O período entre 1950 a 1989 foi definido por uma grande mediação do Estado em conceber formas de criação de meios que fossem capazes de desenvolver o Setor Energético Brasileiro e no ano de 1952 foi criado o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico (BNDE) que por intermédio desta instituição diversas empresas receberam investimentos os quais foram utilizados no setor de geração e transmissão de energia. Outro grande destaque deste período foi a criação de Ministério de Minas e Energias – MME e a escolha da frequência 60 Hz para todo o sistema elétrico nacional na década de 1960.

Entre 1984 e 1990 diversos acontecimentos de grande importância para todo o Sistema Elétrico de Potência ocorreram, a expansão econômica e tecnológica do país dependia de um acréscimo exponencial de potência em todo sistema interconectado nacional. Como respostas a estes anseios o aumento de 14 mil megawatts em consequência do funcionamento das 20 novas unidades geradoras da usina de Itaipu, trouxe a todo sistema uma maior segurança e esperança de progressiva melhora ao setor energético nacional [3].

Entre 1985 e 1990 ocorreram diversas alterações no Sistema Energético Brasileiro em consequência de programas criados pelo governo com o intuito de adequar todo sistema energético de maneira a aproveitar da melhor maneira possível a Matriz Energética Brasileira, programas como o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) e a Revisão Institucional do Setor Elétrico (REVISE), tornaram possíveis a ocorrência das

mudanças ocorridas no Sistema Elétrico de Potência (SEP) que ocorreram na década de 90 [2].

A partir do ano de 1990 o Brasil desenvolveu um programa que pode dar uma guinada nos moldes anteriormente estabelecidos no tocante a maneira de administrar o setor energético nacional, neste período foi criado e aplicado o Programa Nacional de Desestatização (PND). O programa referido mudou a maneira a qual o Brasil tratava o SEP, neste momento o Brasil deixa de ser agente executor de serviços e passa a tomar atuações de órgão regulador do mercado energético nacional [4].

A partir do PND cronologicamente passou-se a acontecer diversos fatos de grande importância para o setor energético nacional, fatos estes são listados a seguir:

1. Fevereiro de 1995: sancionada a lei Nº 8.987, dispondo sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos.
2. Julho de 1995: sancionada a lei Nº 9.074, dispondo sobre as normas para outorga e prorrogação das concessões e permissões de serviços públicos, e a criação da modalidade de Cliente Livre de energia elétrica.
3. Setembro de 1995: regulamentação das modalidades de geração de energia elétrica intituladas de Autoprodutor e Produtor Independente por meio do decreto Nº 2.003.
4. Agosto de 1997: criação de Eletrobrás Termonuclear S.A. – Eletronuclear, para ser responsável pelas usinas termonucleares brasileiras e instituição do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e da Agência Nacional do Petróleo (ANP) por meio da lei Nº 9.478.
5. Dezembro de 1997: instituição da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) com base na lei Nº 9.427.
6. Maio de 1998: reestruturação da ELETROBRÁS por meio da lei Nº 9.648.
7. Julho de 1998: regulamentação do Mercado Atacadista de Energia Elétrica (MAE) e do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) por meio do decreto Nº 2.655 [4].

## 2.2. O SISTEMA ENERGÉTICO BRASILEIRO

O sistema energético Brasileiro apresenta diversas características únicas em função de abranger um país de características continentais e em pleno desenvolvimento econômico e

tecnológico de sua grande malha industrial, para que o SEP consiga suprir as necessidades de deslocamento de grandes blocos de energia por sua rede é necessário que o sistema sempre esteja em mudança constante de arranjos físicos e tecnológicos de toda sistema interligado nacional [5].

### 2.2.1 O Sistema Interligado Nacional

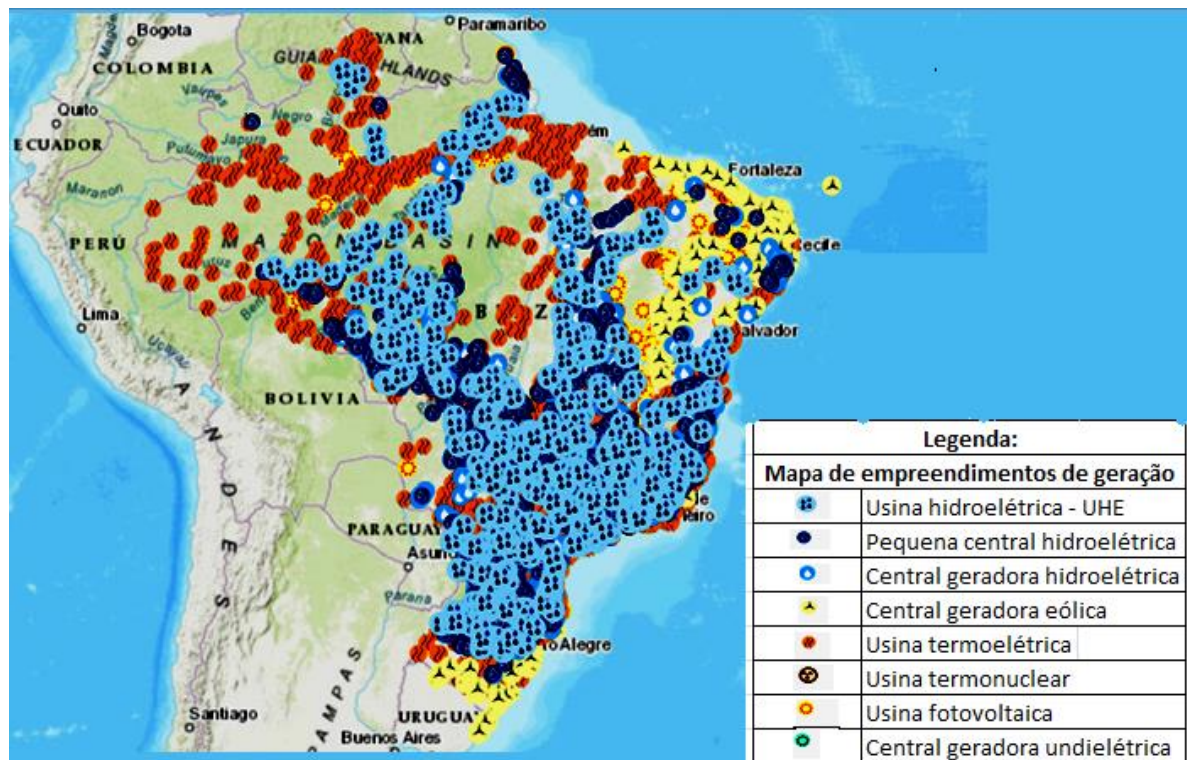
O sistema interligado nacional – SIN, é um sistema extremamente complexo, devido aos seus grandes desafios em suprir a necessidades energéticas de um país o qual apresenta dimensões continentais e a cada ano demonstra crescimento em demanda energética.

O sistema elétrico Brasileiro apresenta como fontes energéticas uma matriz hidrotérmica, porém com hegemonia hídrica, devido a essas características as fontes geradoras diversas vezes se encontram em locais distantes dos centros consumidores, fato este o qual demanda redes de transmissões com elevadas extensões [5].

Devido as grandes dimensões do SIN, o mesmo é particionado por cinco regiões, as quais são sul, sudeste, centro-oeste, nordeste e parte da região norte, além de ter regiões as quais são isoladas em consequência do afastamento de redes de transmissão, estas regiões são alimentados por fontes energéticas em sua maioria pequenas geradoras hidroelétricas ou com fonte a geradores a diesel [5].

A figura 2, a seguir, informa os empreendimentos de geração de energia elétrica no Brasil, e demonstra a grande prevalência hídrica do qual o nosso sistema energético é grande consumidor.

Figura 2 - Empreendimentos de geração



Fonte [6]

Conforme a figura 02 é possível determinar que na atualidade a matriz energética nacional tem como fonte predominante fontes as quais dependem do ciclo hídrico, tais fontes variam sua capacidade geradora de acordo com mudanças as quais não podem ser controladas por possuírem características naturais[6].

## 2.2.2 O Sistema De Transmissão Energético Nacional

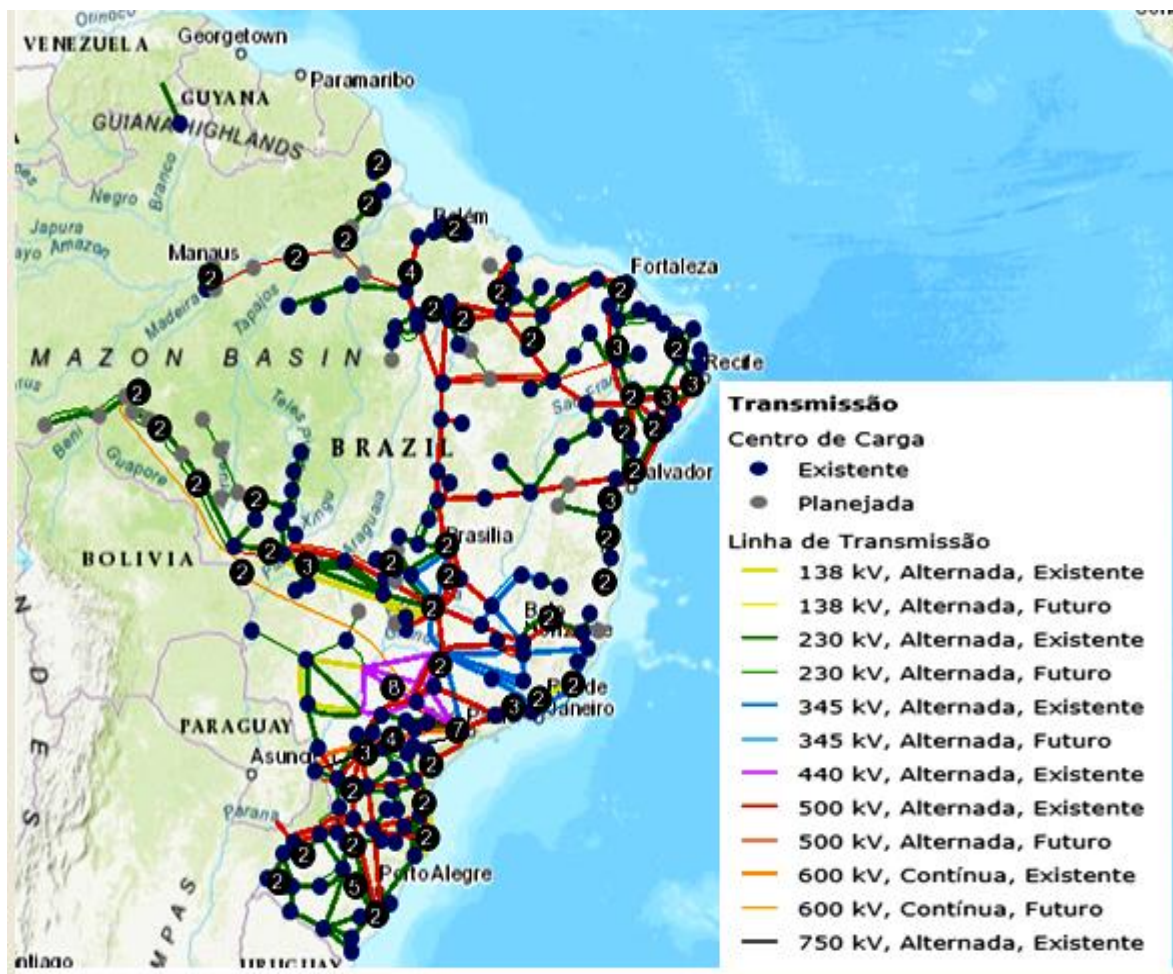
Em consequência dos diversos níveis de tensão ao qual o sistema energético Brasileiro é concernente, enquadram-se como setor de transmissão as redes as quais tem como níveis de tensão valores iguais ou superiores a 230 mil volts.

No Brasil existem cerca de 80 empresas as quais detêm o poder de participar como agentes geradores e transmissores de eletricidade por meio de concessões adquiridas juntamente a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, estas empresas tem como função interligar grandes blocos geradores de energia elétrica por meio de extensas redes de transmissão que no Brasil chegam a mais de 100.000 quilômetros de linhas de transmissão [7].

O sistema de transmissão proporciona que ocorra uma forte interação entre todas as regiões as quais detêm características que promovem a geração de eletricidade, em consequência desta vasta rede é possível nivelar o despacho de grandes blocos de cargas a setores do país os quais em algum instante possam a vir ser cometidos de dificuldades de geração em consequência do regime hidrológico de sua área [5].

Na figura 3, apresentam-se empreendimentos de transmissão os quais tornam possível a conexão de grande parte do território Brasileiro.

**Figura 3 – Empreendimentos de transmissão**



Fonte [8]

O sistema de transmissão energético nacional apresenta características distintas as quais podem ser divididas por regiões, peculiaridades como flora e fauna dentre outras interferem diretamente em aspectos construtivos das mais diversas estruturas as quais fazem parte de todo sistema de transmissão Brasileiro [8].

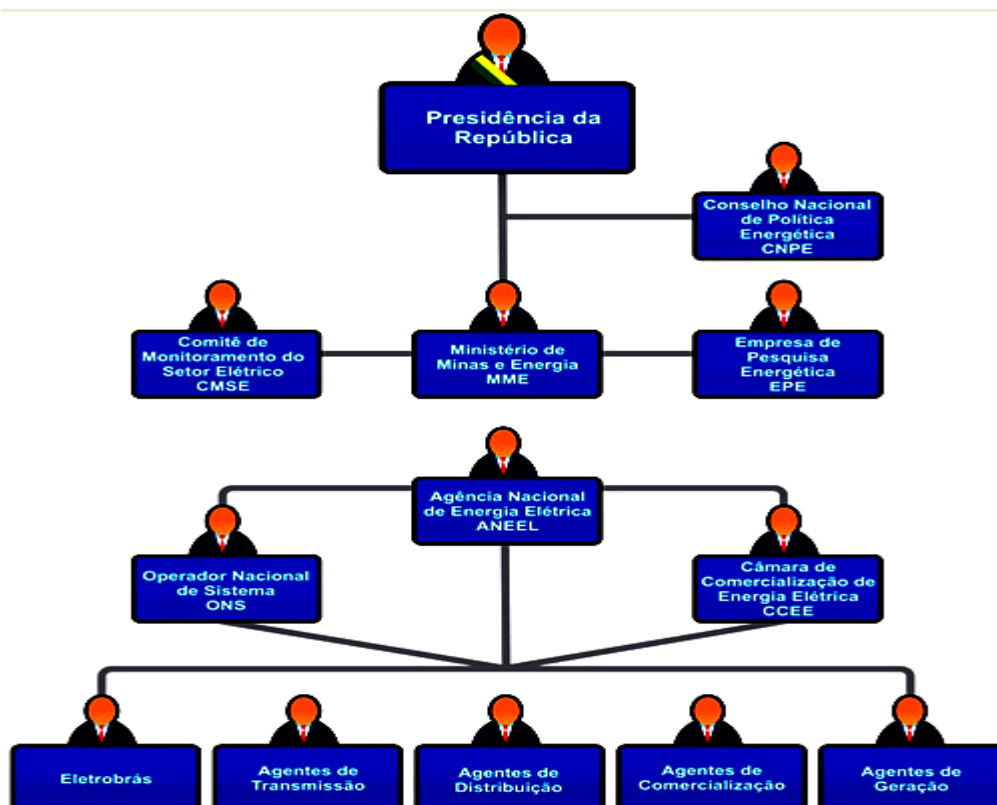
### 2.3. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA

O Operador Nacional do Sistema – ONS, é a instituição a qual detêm algumas incumbências, dentre elas estão as de assegurar o desenvolvimento do SIN visando o menor custo para o sistema porém primando pela qualidade e tecnologia do todo; posteriormente a ONS deve garantir que todos clientes do setor elétrico tenham acesso ao sistema energético nacional assegurando que não ocorra nenhum tipo de discriminação e garantir a melhora das condições operacionais do SIN sempre com uma visão futurista do desenvolvimento nacional [9].

Esta instituição é regulamentada pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, é constituída por diversas concessionárias, outra característica desse operador é ser constituído por uma associação civil sem fins lucrativos e com natureza jurídica de direito privado [10].

A ilustração 4, ilustra o - Mapeamento organizacional das instituições que dirigem o sistema energético nacional.

**Figura 4** - Mapeamento organizacional das instituições que dirigem o sistema energético nacional



Fonte: [7]

A partir da figura 4 é demonstrada a alta complexibilidade a qual se encontram as empresas inseridas no SEP.

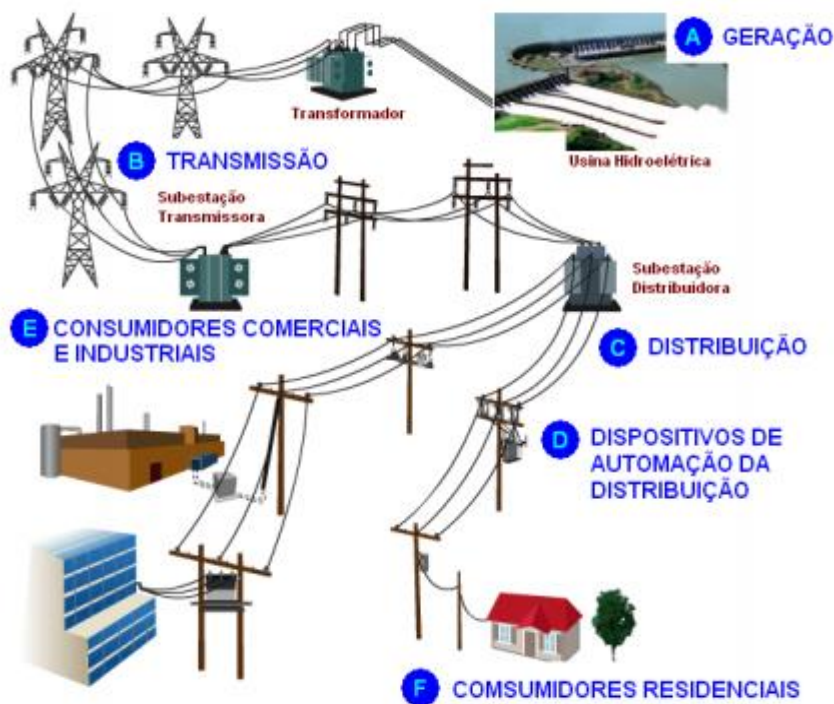
## 2.4. Subestações

### 2.4.1 Subestações De Transmissão

Subestações são pontos de convergência para diversos circuitos elétricos dentro sistema elétrico de potência, as subestações podem ser classificadas de acordo com suas funções no sistema, como subestações elevadoras de tensão, rebaixadoras de tensão e subestações de manobras; por diversas vezes as subestações representam conexões com grande importância entre sistemas distintos.

As estruturas das subestações dispõem de diversos equipamentos que visam manter o sistema com a maior operabilidade possível durante o máximo período de tempo, sem que haja interrupções que possam a vir provocar custos financeiros, ou custos sociais em escala macro e micro na sociedade a qual a mesma supri com seu fornecimento de energia [11].

**Figura 5** - Representação do esquema energético de transmissão de energia elétrica



Fonte: [13]

### 2.4.2 Classes De Subestações

As subestações energéticas pertencentes ao SEP desenvolvem diversas funções ao Sistema Energético Brasileiro, se diferem umas das outras por diversas características construtivas e operativas, características estas as quais em conjunto buscam atender ao crescimento energético existencial em todo e qualquer sociedade. Dentre as diversas construções e tipos de subestações elétricas existentes no SEP, a seguir serão descritas as subestações dos tipos *switchyards*, cliente, comutação e de distribuição [11].

Subestações de tipo *switchyards*: São construções as quais são montadas em usinas, estas subestações têm como sua principal função fornecer eletricidade para os equipamentos da planta da usina e interligar os geradores ao sistema elétrico. Nestas subestações encontram-se todos equipamentos de proteção e manobras pertencentes ao início do circuito alimentador de grandes cargas, esta função é de grande importância ao sistema por ser o portador da primeira linha de proteção de grandes unidades geradoras do SEP [12].

Subestações de característica cliente: Neste tipo de empreendimento o principal detentor das funções da subestação é um cliente que detém um grande consumo energético, o cliente possui preferência em concernência ao sistema público.

Subestações de comutação: São as responsáveis por interligar os blocos de energia provenientes das subestações *switchyards*, para as subestações distribuidoras, estas subestações são as maiores fisicamente comparadas aos tipos de subestações citadas acima, são construções de alto valor monetário e grande importância ao SEP [12].

Subestações de distribuição: A característica desta subestação é ser construída perto dos consumidores finais, tem como principal função reduzir os potenciais de entrada para valores compatíveis com os clientes finais, e distribuir os blocos de energia para diversos clientes com características individuais no sistema elétrico.

Outra característica da classificação dos tipos de subestação diz respeito aos níveis de tensão alternada de alimentação á qual a subestação é exposta, a tabela 1 demonstra os valores mais característicos do SEP nacional [12].

**Tabela 1** - Classificação de subestações por níveis de tensão alternada

Fonte [12]	
Nível de tensão	Classificação
$\leq 1\text{kV}$	Baixa Tensão

---

1 a 34.5 kV	Média Tensão
34.5 a 230 kV	Alta Tensão
> 230 kV	Extra Alta Tensão

---

## 2.5 DISJUNTORES

Os disjuntores são equipamentos que tem uma importância relevante para o bom funcionamento de todo o sistema elétrico nacional, estes equipamentos quando em funcionamento em subestações devem sempre estar relacionados a relés com funções específicas que auxiliam na detecção de defeitos e falhas nos circuitos aos quais os disjuntores tem a função de proteger [14].

Estes equipamentos inúmeras vezes são instalados em ambientes abertos os quais apresentam características hostis ao funcionamento do conjunto eletromecânico dos disjuntores, aspectos como umidade, irradiação solar excessiva, poluição e efeitos eletromagnéticos; podem causar falhas e defeitos que acarretam problemas em suas operações, contudo estes equipamentos devem sempre estar em condições de operação, para que no caso de uma necessidade de manobra do circuito, em consequência de um curto circuito, ele seja capaz de atuar na escala de mili segundos, sem que possa ser possível ou admissível uma falha para tal operação [15].

Na figura 6, é possível visualizar um equipamento montado ao ar livre, juntamente com diversos outros equipamentos instalados no pátio de uma subestação 525 kV, este disjuntor tem como meio isolante um gás inerte chamado de SF<sub>6</sub>, seu acionamento ocorra por conta do acionamento de um sistema hidráulico acrescido de força por conta da compressão de nitrogênio em seus acumuladores de energia.

**Figura 6** -Disjuntores para subestações ao ar livre



Fonte: [15]

Equipamentos os quais são instalados em instalações sem proteção, tem como parte de seus componentes de fabricação compostos os quais devem resistir a ação de intempéries e sol excessivo, variáveis como essa podem acelerar o processo de degradação de diversas partes do equipamento [15].

#### 2.5.1 Técnica De Funcionamento

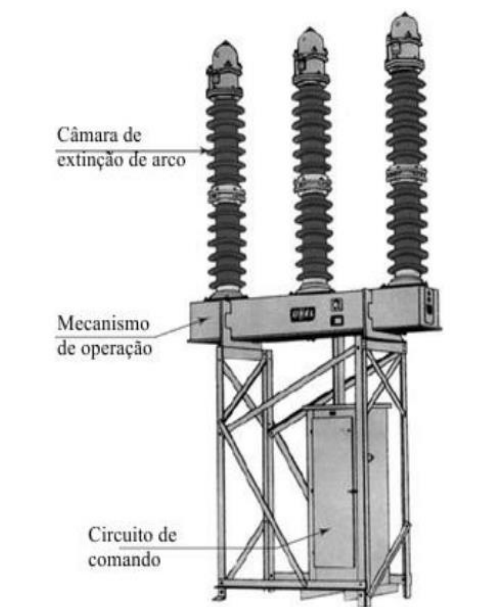
Os disjuntores são equipamentos os quais devem operar em situações de grande importância para o SEP, seja quando em situações as quais os mesmos devem interromper curtos circuitos para que não ocorram falhas no sistema, ou quando os mesmos são usados para reestabelecer a conexão a circuitos que transportam grandes blocos de energia.

O funcionamento desses equipamentos tem características eletromecânicas as quais devem estar intimamente conectadas para que o todo dessa máquina possa funcionar corretamente em qualquer situação [16].

O conceito da interrupção de um curto circuito por este equipamento inicia-se em consequência do comando transmitidos por relés de controle que são atrelados ao sistema de proteção de subestações, a partir de uma falta ou curto circuito identificado os relés de proteção emitem a ordem para que ocorra a abertura dos contatos do disjuntor para que se cesse a passagem da corrente elétrica, assim evitando que danos possam ocorrer a equipamentos que fazem parte do circuito protegido pelo disjuntor [14].

Comandos de abertura ou fechamento dos circuitos elétricos protegidos pelo disjuntor podem ser transmitidos pelos operadores do sistema a qualquer instante, seja para operações de manutenção nos equipamentos ou consequência de extinções manuais de defeitos no sistema.

**Figura 7** – Partes básicas de disjuntores



Fonte [16]

O sistema de abertura dos contatos do disjuntor parte do princípio de afastamento dos contatos principais e contatos auxiliares, sendo que os mesmos estão envoltos em meio dielétrico capaz de suportar a alta temperatura causada pelos arcos elétricos e ao mesmo tempo por um meio isolante para as tensões as quais o equipamento é projetado. Os contatos do disjuntor e sua câmara de extinção de arcos elétricos se localizam no interior da superfície de porcelana envoltória do disjuntor, a figura 7 demonstra a localização das principais partes do equipamento [16].

Devido aos grandes níveis de ruídos em consequência da interrupção de curtos circuitos e manobras os disjuntores são expostos a elevados e diferentes níveis de tensão em seus contatos fixos e móveis, em consequência deste efeito empregam-se capacitores de em paralelo com as câmaras de extinção de arco, assim sendo é possível elevar a vida útil dos contatos e consequentemente garantir um adequado funcionamento a todo sistema elétrico ao qual o disjuntor tem a responsabilidade de proteger [16].

## 2.6 CHAVES SECCIONADORAS

As chaves seccionadoras são dispositivos potencialmente versáteis quando se trata da sua função em circuitos elétricos, segundo a NBR 6935 as chaves seccionadoras são equipamentos que em condições normais devem ser capaz de transmitir uma corrente elétrica coerente com seu projeto, e também ser capaz de, por um determinado período de tempo de conduzir correntes de curto circuito sem que haja avarias aos seus contatos [15].

Estes equipamentos têm funções diferentes do disjuntor, porém são usados em conjunto com os mesmos para diversas manobras dentro de subestações tais como:

1. Manobrar circuitos elétricos dentro da subestação;
2. Garantir distância de segurança para os isolamentos de cada nível de tensão;
3. Proporcionar o *by-pass* de equipamentos dentro da planta das subestações;
4. Segregar equipamentos quando os mesmos estão sob intervenção das equipes de manutenção [17].

Na tabela 2 serão abordados os níveis mais usuais de tensão utilizados em transmissão e suas respectivas distâncias de segurança.

**Tabela 2** - – Níveis de tensão e suas respectivas distâncias de segurança

Nível de tensão	Distância de segurança (cm)
10 a 15 kV	150
30 a 36 kV	158
60 a 70 kV	190
110 a 132 kV	310
220 a 275 kV	380
480 a 700 kV	720

Fonte: [17]

Dispositivos de seccionamento são equipamentos projetados para conduzir correntes elétricas de características normais do circuito ao qual o equipamento se engloba, e este elemento do circuito tem a capacidade de suportar correntes de curto circuito por um determinado período de tempo conforme as orientações do projeto.

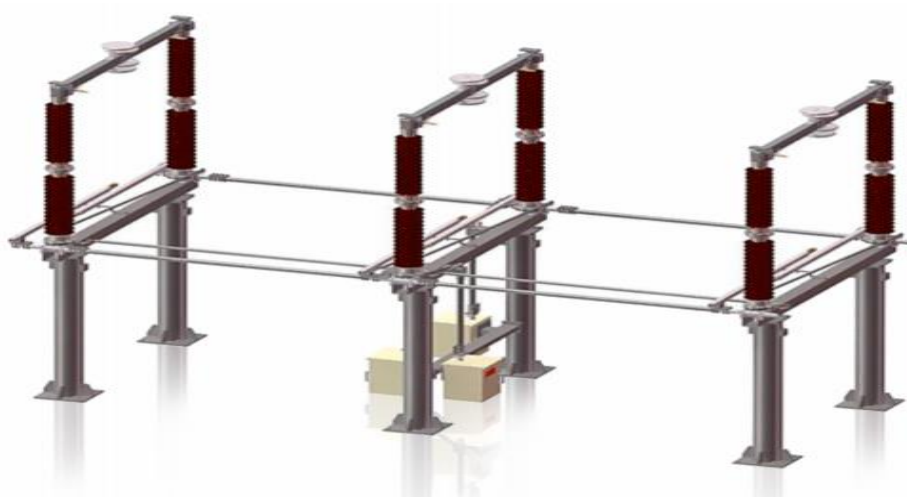
Dentre suas principais características de sua concepção, as características que se mostram mais relevantes tecnicamente aos projetos são:

1. - Classe de Tensão;
2. - Corrente Nominal;
3. - Nível básico de isolamento;
4. - Corrente Térmica Suportável de Curto Circuito;
5. - Corrente Dinâmica Suportável de Curto Circuito;
6. - Conceito de montagem vertical ou horizontal;
7. - Tipo de abertura;
8. Características de acionamento.

Secionadoras são equipamentos que podem se adequar ao meio ao qual foram instaladas, com o objetivo de alcançar a distância de isolamento para o nível de tensão escolhido no projeto, estes equipamentos podem ser encomendados para o tipo de abertura que melhor se adequa a instalação ao qual o mesmo será montado, a figura 8 mostra uma abertura de tipo de abertura central [17].

A figura 8 demonstra uma secionadora que tem como método de abertura, abertura central, esta configuração é normalmente utilizada em subestações ao ar livre em diversas classes de tensão.

**Figura 8** -Secionadoras de abertura central;



Fonte: [18]

As secionadoras podem apresentar diversos parâmetros os quais devem ser alterados para que possam fazer parte das características de projeto na qual a mesma será instalada [17].

## 2.7 TRANSFORMADOR DE POTENCIAL

Os transformadores de potencial são apresentados como transformadores de medição devido a sua função no sistema elétrico, a qual é representar de maneira fiel os níveis de tensão impostos aos seus enrolamentos primários e conseqüentemente refletem em seus enrolamentos secundários valores que por intermédio das interações eletromagnéticas entre seus enrolamentos são valores reduzidos, sendo que este efeito proporciona que se possa empregar equipamentos com classes de isolamento menor e virem a ser menos robustos e dispendiosos [15].

Estes equipamentos segundo a NBR 6855 devem ser separados por classe de exatidão, que por sua vez consiste no erro entre a relação de transformação e o defasamento angular entre as tensões primária e secundária. As classes de erro são as classes 0.1 – 0.3 – 0.6 e 1.2 e são descrita a seguir:

1. **Classe 0.1:** Esta classe é utilizada quando se necessita de uma alta precisão nos valores mensurados, geralmente são utilizadas em laboratório.
2. **Classe 0.3:** Empregue em medições de energia elétrica para o fim de faturamento;
3. **Classe 0.6:** Utilizados para a obtenção de parâmetros a serem controlados por equipamentos de proteção e medição;
4. **Classe 1.2:** Aplicados somente quando existe uma necessidade de medição de tensão apenas de forma indicativa, nessa classe o transformador serve apenas como parâmetro informal ao sistema [15].

Abaixo a figura 9 mostra um conjunto de transformador de potencial empregado em subestações.

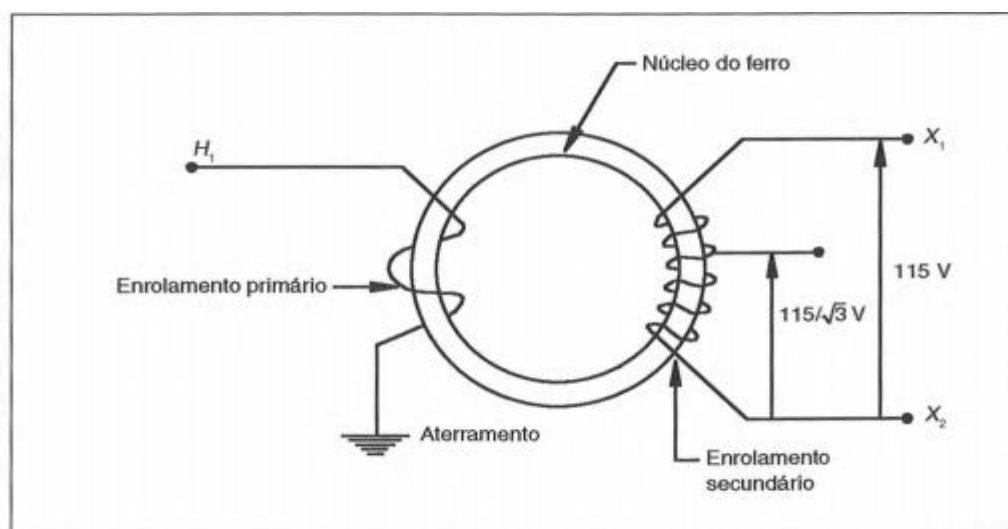
**Figura 9** -Transformador de potencial



Fonte: [19]

Na figura 10 é demonstrada a representação elétrica do transformador de potencial de derivação.

**Figura 10** -- Representação elétrica transformador de potencial de derivação



Fonte: [1]

A possibilidade de atenuar os valores aos quais o primário dos transformadores de potencial é exposto, possibilita a utilização de equipamentos sensibilizados a partir da tensão rebaixada no secundário de serem fabricados com classes de isolamento altamente rebaixadas em relação a tensão de trabalho da subestação [15].

### 2.7.1 Particularidades e Fabricação

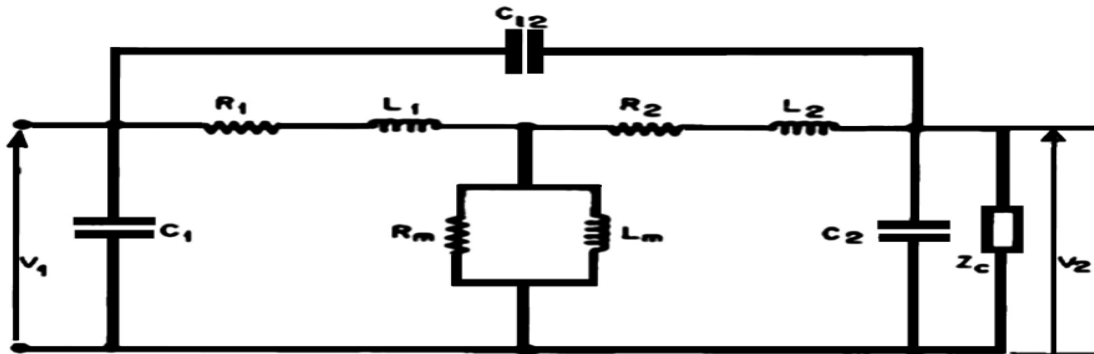
Os transformadores de potencial devem seguir algumas premissas em relação à segurança dos equipamentos e das pessoas as quais tem acesso às medições, essas premissas são:

1. Garantir isolamento galvânica entre enrolamentos primários e secundários, essa característica garante que equipamentos e pessoas possam ter acesso aos valores expressos no secundário com segurança;
2. Os valores obtidos no secundário do TP devem ser compatíveis com os equipamentos os quais terão a função de receber e interpretar os níveis de tensão e a partir deles tomar decisões em relação a medição ou proteção do sistema elétrico pertencente [20].

### 2.7.2 Transformadores De Potencial Indutivo

Devido a qualidades comerciais os equipamentos de medição do tipo indutivo são empregues em valores de potencial até 138 kV, a fim de obter uma representação apenas do circuito elétrico do equipamento a figura 11, demonstra as interações de resistências, impedâncias, indutâncias e capacitâncias de um transformador de potencial indutivo [20].

**Figura 11** - Representação elétrica transformador de potencial indutivo



Fonte: [20]

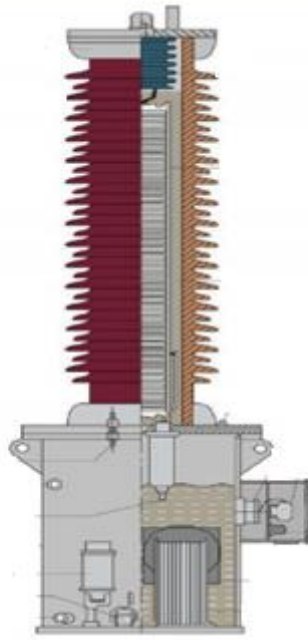
A representação elétrica de um transformador de potencial indutivo é concebido a partir de capacitâncias primárias e secundárias que são obtidas em consequência de potenciais parasitas resultantes a partir das interações eletromagnéticas do TP ( $C_1, C_2$ ); Resistências de enrolamentos primários e secundários ( $R_1, R_2$ ); indutâncias de enrolamentos primário e secundário ( $L_1, L_2$ ), Resistências e indutância resultantes do ramo magnetizante ( $R_m, L_m$ ), tensão RMS(*root mean squar*) de enrolamento primário e secundário e Capacitância parasita entre enrolamentos primário e secundário ( $C_{12}$ ) [15]

### 2.7.3 Transformador De Potencial Capacitivo

A NBR 6546 descreve o transformador de potencial capacitivo como um transformador para instrumentos, o qual deve ser composto de coluna capacitiva á qual deve ser acoplada a uma unidade eletromagnética, a tensão que é aplicada ao divisor de tensão o qual está localizado ligado ao terminal primário, deve refletir um valor o qual seja compatível de maneira equilibrada e proporcional na unidade eletromagnética ligada ao terminal secundário do transformador de potencial capacitivo [15].

A figura 12 demonstra um desenho em corte do transformador de potencial capacitivo.

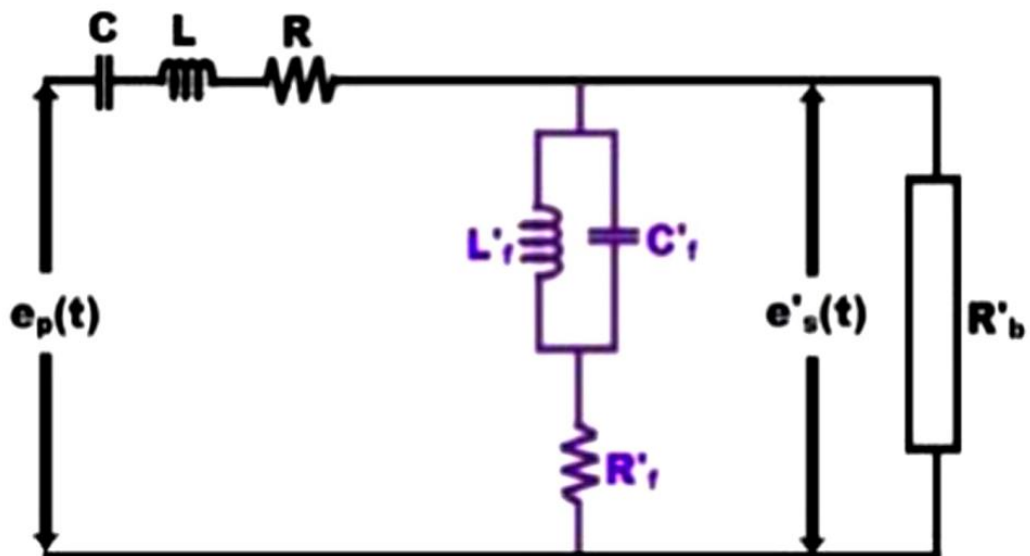
**Figura 12** - Principais partes TPI



Fonte: [20]

O conceito elétrico de um transformador de potencial capacitivo pode ser demonstrado através das grandezas ilustradas na figura 13, todas as grandezas encontram-se referidas ao primário, RTP é a relação de transformação do primário para o secundário,  $\Gamma_f$ ,  $R'_f$ ,  $C'_f$  representam as indutância, resistência e capacitância do ramo supressório do fenômeno de ferro ressonância, C representa a capacitância do divisor capacitivo consequentemente R e L demonstram os valores de resistência e indutância do reator de compensação[15].

Figura 13 - Representação elétrica transformador de potencial capacitivo



Fonte: [15]

## 2.8 CONJUNTOS DE AUTOMAÇÃO EM SUBESTAÇÕES

O Sistema Elétrico quando exposto a perturbações sofre consequências, tais como danos em equipamentos ou faltas de continuidade no suprimento de energia elétrica. Com o objetivo de evitar que os danos venham a se propagar é importante que o conjunto de automação esteja corretamente ajustado [21].

Os equipamentos que tem a função no conjunto de automação de monitorar e dar mais confiabilidade as tomadas de decisões dentro do sistema elétrico são os relés, que tem a função de monitorarem diversos parâmetros tais como corrente, tensão, defasagem de ângulos fasoriais, para isto é necessário que áreas dentro dos circuitos sejam divididas em zonas, e que essas zonas a partir de estudos possam disponibilizar valores os quais serão configurados nos equipamentos como valores limites; no caso da extrapolação dos valores limites os relés buscam isolar os defeitos fazendo assim que o sistema se previna de maiores danos [21].

Com o intuito de melhor entendimento do conjunto de automação é possível dividi-lo em três vertentes:

- **Proteção:** As funções de proteção são desempenhadas por relés que a partir de informações obtidas, na maioria das vezes por medições indiretas resultantes dos equipamentos instalados no pátio da subestação, do circuito ao qual a mesmo está instalado torna possível a identificação de anomalias no sistema que poderiam vir a causar impactos negativos ao SEP.
- **Supervisão:** Este sistema tem como funcionalidade identificar, em tempo real, qual a situação dos equipamentos no pátio da subestação, e a partir das informações obtidas pelo sistema de supervisão é possível identificar instantaneamente falhas em manobras de abertura, transferência ou fechamento de circuitos.
- **Telecomunicação:** Esta terceira vertente do sistema de automação de subestações é responsável por interligar os sistemas de proteção e supervisão, a partir das informações coletadas e transportadas via sistema de telecomunicação é possível que plantas de grande importância ao SEP sejam operadas por intermédio de centros de operações os quais por diversas vezes estão em localidades distintas das subestações que são operadas [12].

O sistema de proteção de uma subestação deve ter como objetivo deter características as quais são imprescindíveis para o seu perfeito funcionamento, estas características são:

- **Seletividade:** Situações as quais se impõe ao SEP cenários de falhas ao sistema, devem ser identificadas e atenuadas prontamente pelo sistema de proteção, caso contrário o ato de não se ilhar um problema pode culminar em efeitos de grande monta como um blecaute. O sistema de proteção deve ser capaz de selecionar apenas a área a qual foi atingida pela falha, a partir desta ação será possível atenuar maiores efeitos ao SEP.
- **Sensibilidade:** É desejável que os equipamentos sejam capazes de reconhecer irregularidades impostas ao sistema de maneira pronta, sempre que os valores ultrapassem limites os quais possam danificar os equipamentos ou sistema.
- **Agilidade:** O sistema de proteção de uma subestação deve ser ágil o suficiente para em questão de poucos segundos ser capaz de identificar uma anomalia no sistema e agir com o objetivo de proteger o SEP.
- **Confiabilidade:** Esta é uma qualidade a qual todo o sistema de proteção deve apresentar, todo o sistema deve estar sempre em pleno funcionamento para agir a qualquer instante, independentemente das condições operativas do sistema, porém sempre atendendo os parâmetros de sensibilidade e seletividade [22].

Sendo assim, o sistema de automação de subestações tem grande importância para o bom andamento de todas as atividades impostas ao sistema, suas características são de grande valia para um sistema forte e confiável o qual possa ser exposto aos maiores desafios do ponto de vista elétrico e obtenha grande desempenho e confiabilidade para o bom funcionamento do sistema interligado nacional [12].

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. FERRORESONÂNCIA

O fenômeno de ferroressonância apresenta características não lineares com grande potencial de afetar instalações elétricas, a sua ocorrência súbita leva ao aparecimento de sobretensões de aspectos elevados que são sustentadas por tempo suficiente para produzir danos aos equipamentos elétricos do circuito, estas sobretensões proporcionam distorções com altos níveis de distorção harmônicos [23].

A ferroressonância pode ser provocada por qualquer componente elétrico que venha causar oscilações num circuito, como o que ocorre no caso de arranjos elétricos que possam ter como componentes equipamentos que apresentem reatâncias capacitivas (linhas de transmissão e banco de condensadores elétricos) e reatâncias indutivas (transformado potencial, transformadores de potência).

Existem variáveis necessárias para que o efeito de ferro ressonância possa vir a ocorrer como os apresentados nos itens de 1 a 3:

1. Sistema em corrente alternada;
2. Característica de indutâncias não lineares no sistema;
3. Alta capacitância nos cabos, ou capacitância a terra de um sistema não eficazmente aterrado [23];

Algumas das condições as quais proporcionam o aparecimento desse fenômeno são transientes que podem ser provenientes de descargas atmosféricas, manobras no circuito para desenergização e energização de transformadores ou cargas, trabalhos em linha viva.

Os sintomas de ferroressonância mais comuns apresentados em circuitos elétricos são demonstrados nos itens de 1 a 7:

1. Altas sobretensões permanentes tanto entre fase-fase como entre fase-terra;
2. Altas sobrecorrentes permanentes;
3. Altas distorções permanentes na forma de onda da corrente e tensão;
4. Deslocamento da tensão do ponto neutro;
5. Aquecimento em transformadores (operando em vazio);
6. Contínuo, e excessivo, ruídos em transformadores e reatores;
7. Danos em equipamentos elétricos (banco de capacitores, TP indutivos, TP capacitivos. etc.) devido a rompimentos da isolação por efeito térmico [23].

### 3.1.1 Estudo Do Fenômeno De Ferrorressonância

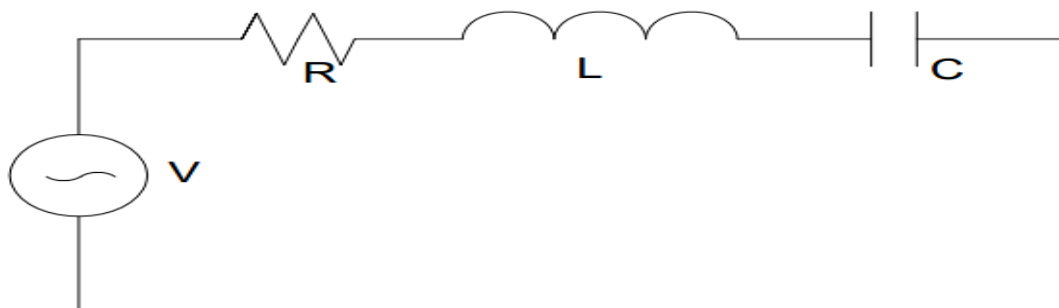
O fenômeno de ferrorressonância é um evento o qual devido a suas características peculiares despertou em diversos pesquisadores do setor de transmissão um grande interesse no que se refere a uma maior compreensão e entendimento de suas características.

Os primeiros estudos relativos a ferrorressonância são atribuídos aos pesquisadores Auer e Schultz no ano de 1954, desde então diversas pesquisas veem sendo desenvolvidas acerca do assunto com o intuito de através do conhecimento adquirido se possa atenuar os efeitos aos quais os equipamentos são expostos em função de altos valores de tensão e corrente provenientes de efeitos ferrorressonantes ao circuito [24].

Para a ocorrência de ferrorressonância é preciso que o circuito o qual se desencadeie o fenômeno seja composto com equipamentos os quais garantam características não-lineares ao circuito, em subestações equipamentos como o transformadores de potencial indutivo e disjuntores com capacitâncias paralelas aos contatos principais, detêm a capacidade de ejetar valores não lineares de indutâncias e capacitâncias ao circuito aos quais o mesmo compõe [23].

Com o interesse de analisar o efeito ferrorressonante é importante que se faça uma comparação com o efeito ressonante série encontrado em circuitos com interações entre elementos resistivos, capacitivos e indutivos conforme a figura 14.

**Figura 14** - Circuito ressonante série



Fonte: [24]

Com o objetivo de calcular a amplitude da corrente (I) do circuito será considerado que as reatâncias capacitivas (XC) e indutivas (XL) detêm valores elevados se comparado ao valor da resistência (R) existente no circuito, em função destas condições a formulação da corrente do circuito será:

$$I = \frac{V}{\sqrt{(R^2 + (XL^2 - XC^2))}}$$

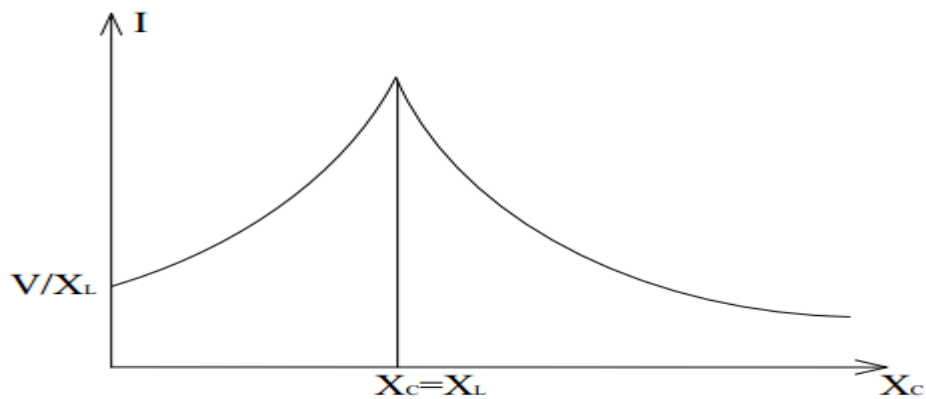
Devido as condições citadas acima pode-se simplificar a equação 3.1 de modo a desconsiderar o valor da resistência (R) devido ao seu ínfimo valor, a partir disso a corrente do circuito pode ser descrita a partir da equação 3.2:

$$I = \frac{V}{XL - XC}$$

Nos cenários onde os valores de reatância capacitiva ou indutiva venham a se tornar variáveis, e em consequência os valores do conjunto reatância indutiva adicionado a resistência ou reatância capacitiva adicionado a resistência são valores lineares, nota-se que a corrente elétrica (I) torna-se totalmente dependente da variação de valores de capacitâncias ou indutâncias do circuito [25].

O gráfico da figura 15 demonstra o valor de corrente que flui no circuito quando a corrente passa a ser limitada apenas pela parte resistiva inserida [25].

**Figura 15** - Resultado da resposta da corrente do circuito variando os parâmetros



Fonte: [24]

### 3.1.2 Exploração Do Efeito Ferrorressonante

Devido à alta complexibilidade do efeito ferrorressonante é de grande valia a observação de gráficos os quais através de seu conteúdo expõe de maneira clara os efeitos que a grandeza tensão será exposta e por consequência desguarnecerão aos circuitos do SEP, com o objetivo de tornar análise menos intrincada as perdas do circuito serão desconsideradas e a reatância capacitiva torna-se não-linear [24].

Em consequências das equações referente as reatâncias capacitivas (XC) equação 3.3 e indutiva (XL) equação 3.4, nota-se que a componente da frequência (F) tem grande poder de determinar o valor ao qual os equipamentos serão expostos, quando em regime de efeito ferrorressonante no circuito [25].

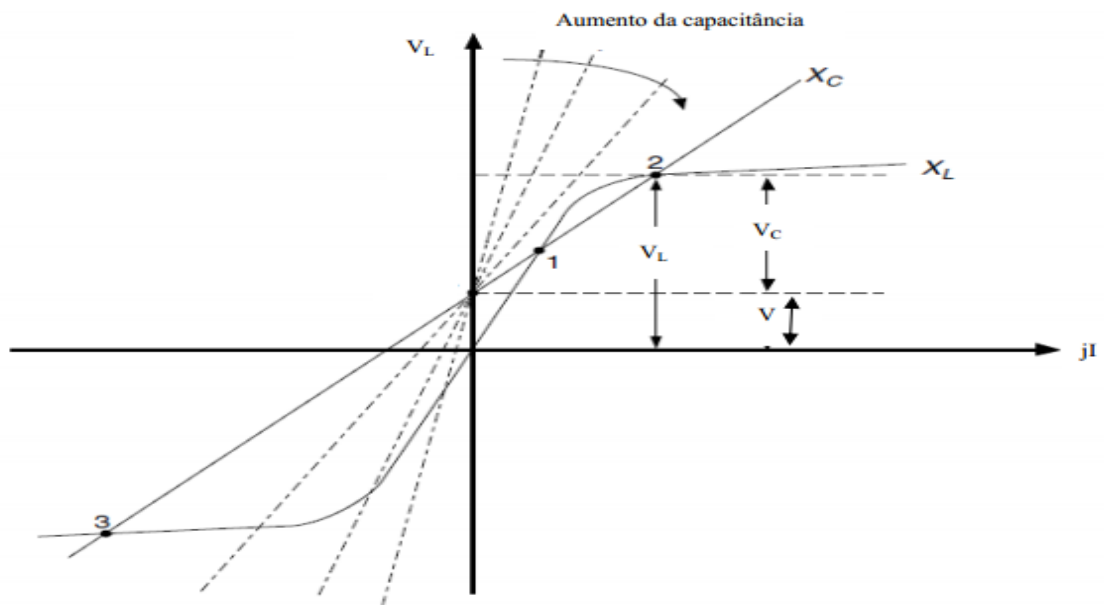
$$XC = \frac{1}{2 * \pi * F * C}$$

$$XL = 2 * \pi * F * L$$

A equação de Duffing, equação 3.5 é uma equação de terceira ordem a qual descreve um circuito massa mola com características não lineares, usando métodos de Newton Rafo é possível chegar a soluções as quais se aproximam grandemente de circuitos ferrorressonantes.

$$\frac{d^2}{dt^2}x + k \frac{d}{dt}x + x^3 = A \cos(t)$$

**Figura 16** - Resultado para diversos valores de reatâncias capacitivas



Fonte: [24].

A figura 16 ilustra que em consequência da variação referente a valores correspondentes a reatância capacitiva a inclinação de sua reta pode aumentar ou diminuir seu ângulo, em consequência da tensão resultante ( $V$ ) ser a soma fasorial das tensões sobre a parte indutiva acrescida da tensão sobre a parte capacitiva do circuito, essa combinação pode ser suficientemente expressiva para que valores de isolamento dos equipamentos que fazem parte do sistema elétrico de potencia seja superada, assim sendo cada componente do sistema pode reagir de maneira distinta, sendo possível desde atuações indevidas em relés até casos catastróficos como explosão de transformadores de potencial [24].

### 3.1.3 Ferrorressonância Com Configuração Disjuntor E TP Indutivo

Os disjuntores são equipamentos os quais ficam expostos a altos níveis de cargas constantemente, com o intuito de atenuar os desgastes dos contatos principais dos equipamentos, em disjuntores de alta potencia em paralelo como a câmara principal são acoplados capacitores os quais tem a função de equalizar os potenciais [14].

A figura 17 demonstra a localização dos capacitores no disjuntor.

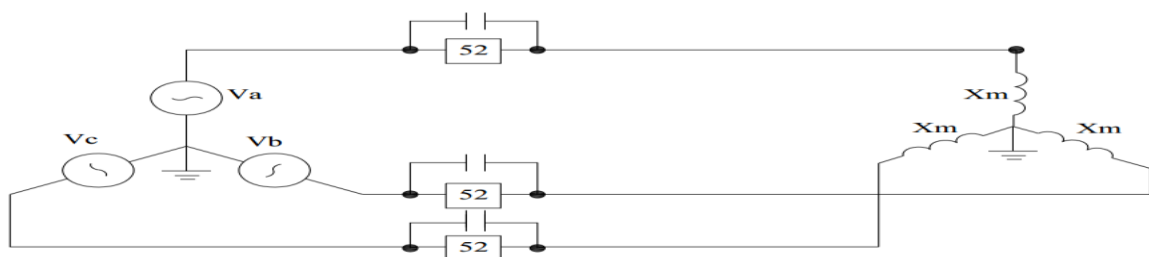
**Figura 17** - Localização capacitores em disjuntor de AT



Fonte: [26]

Contudo a interação entre o sistema de proteção da subestações e os transformadores de instrumentos pode ser a combinação necessária para que ocorra o efeito ferorrressonante no circuito do SEP, a partir dessa combinação foi criado o cenário necessário no sistema de potência para que a capacitância presente no disjuntor, possa agir juntamente com a indutância fortemente presente no transformador de potencial e assim propagar o fenômeno para os equipamentos da subestação [14].

**Figura 18** - Interação entre disjuntor e TP no efeito ferorrressonante



Fonte: [26]

O circuito ilustrado na figura 18 demonstra a interligação na qual a interação entre os

equipamentos disjuntor e transformador de potencial indutivo tem a capacidade de ampliar a possibilidade para que o fenômeno ferorrressonante possa ser instituído no sistema energético da subestação [26].

### 3.2 IMPACTOS CAUSADOS PELA OCORRÊNCIA DE FALHAS NO SEP

As falhas no sistema de potência frequentemente são provenientes de efeitos severos para toda estrutura, como no caso de curtos circuitos em todas suas configurações possíveis trifásico, bifásico, monofásico e fase a terra, nestes casos todo o sistema é submetido a valores elevados de corrente por um curto espaço de tempo; em consequência da falha na intervenção de maneira rápida e metódica do sistema de proteção, esta ação promoverá efeitos de grande monta ou irreparáveis aos sistemas e equipamentos [1].

Dentre diversos outros eventos de possível ocorrência no SEP as sobrecargas se comportam de maneira distinta dos curtos circuitos, sendo que as mesmas tendem a durar por prolongados períodos de tempo, e muitas vezes são ocorridas por falhas na operação do sistema.

Existem dados os quais as operadoras do sistema nacional de potência usam para margear seu planejamento estratégico e operacional, visando assim a melhor tomada de decisões para funcionar o mais próximo possível da perfeição do sistema elétrico nacional. [1]

#### **A) Causas das interrupções**

Fenômenos naturais: 48%

Falhas em materiais e equipamentos: 12%

Falha humana: 9%

Falhas diversas: 9%

Falhas operacionais: 8%

Falha na proteção e medição: 4%

Objetos estranhos sobre a rede: 4%

Condições ambientais: 6%

#### **B) Origem das interrupções**

Linha de transmissão: 68%

Rede de distribuição: 10%

Barramento de subestação: 7%

Transformador de potência: 6%

Gerador: 1%

Próprio sistema: 4%

Consumidor: 4%

### 3.2.1 Falhas No SEP Em Consequência De Ferro Ressonância

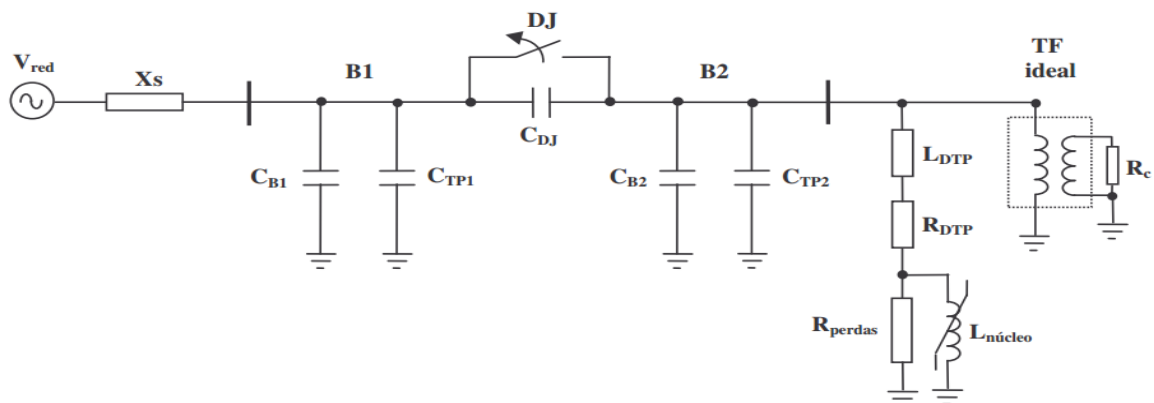
O acontecimento de distúrbios originários por efeitos ligados a ferorrressonância em subestações de extra alta tensão tem como um possível cenário a interação que ocorre no instante de manobras de transferência de barras, no caso de quando a transferência de barra é executada por disjuntores com capacitores ligados em paralelo, com sua câmara principal.

Com o objetivo de estudar as consequências de tal interação o uso de simulações computacionais contribui fortemente para o entendimento de efeitos os quais não se manifestam de maneira rotineira no SEP.

No momento de manobras de troca de barra a partir do instante no qual as seccionadoras são fechadas de maneira prévia anteriormente ao fechamento dos disjuntores, passa-se ter no barramento um nível de potencial proveniente da alimentação dos capacitores presentes no disjuntor, esse nível de potencial somente será instinto após a desenergização dos disjuntores e abertura dos seccionadores do circuito de transferência de barra [27].

A figura 18 foi empregue para demonstrar o circuito em subestações quando ocorre a interligação de barras, a partir de tal circuito foram gerados dados referentes a ferorrressonância.

**Figura 19** - Configuração de troca de barras em subestações



Fonte: [28]

$V_{red}$  = tensão da rede elétrica;

$X_s$  = equivalente da rede elétrica, calculada a partir das potências de curto-circuito;

CB1 = capacitância da Barra 1;

CB2 = capacitância da Barra 2;

CTP1 = capacitância do TPI da Barra 1;

CTP2 = capacitância do TPI da Barra 2;

CDJ = capacitância do DJ de transferência;

LDTP = indutância do primário do TPI, a 1 pu de tensão;

RDTP = resistência do primário do TPI;

Rperdas = resistência equivalente das perdas do TPI, a 1 pu de tensão;

RC = carga do TPI, equivalente a potência de 200 VA (F.P. = 1,00);

$L_{\text{núcleo}}$  = indutância do núcleo do TPI, conforme valores fornecidos pela Arteche;

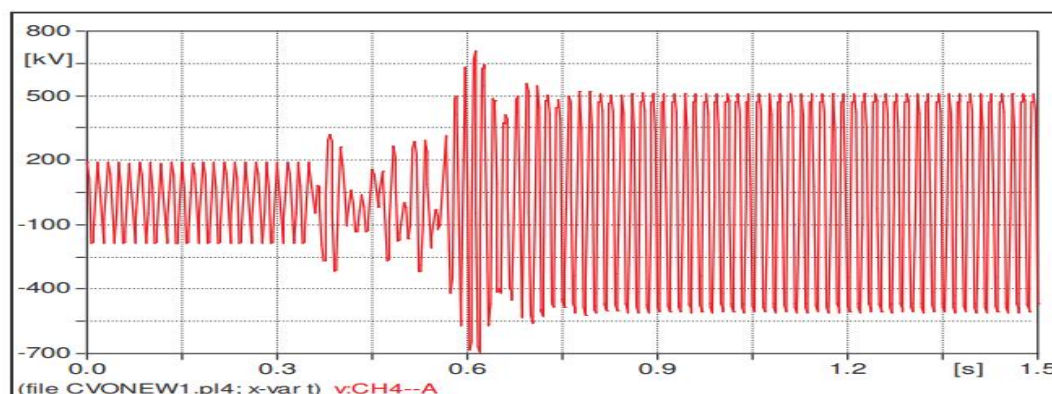
B1 = barra principal 1;

B2 = barra principal 2;

DJ = disjuntor de transferência [28]

Com o uso do *software Alternative Transient Program – ATP* para a simulação do circuito acima, foi possível estabelecer o fenômeno de ferorrressonância na barra 2, as Figuras 20 e 21 demonstram que o nível de potencial na barra se estabilizou em 508 kVpico (2,71 pu), enquanto a corrente no primário do TPI atingiu 1,74 Apico em regime permanente, valores estes extremamente severos e além da suportabilidade do TPI.

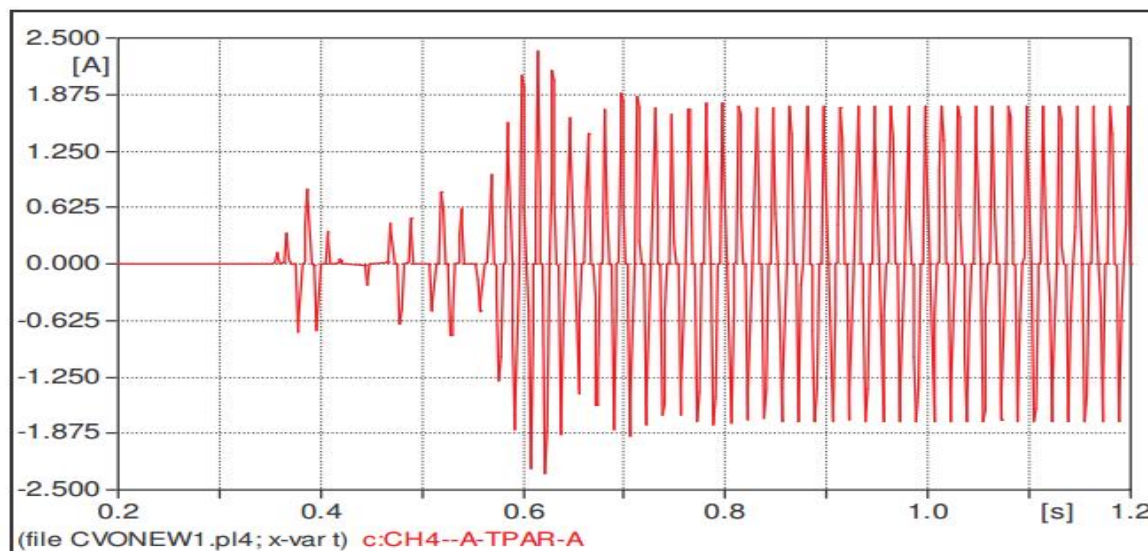
**Figura 20** - Análise gráfica da alteração de potencial da barra em consequência de ferorrressonância



Fonte: [28]

A figura 21, demonstra graficamente a alteração na corrente elétrica do circuito em consequência da presença do fenômeno ferrorressonante.

**Figura 21** - Análise gráfica da alteração de corrente da barra em consequência de ferrorressonância



Fonte: [28]

Efeitos como os demonstrados nas figuras 20 e 21 seriam responsáveis por atuações procedentes do sistema de proteção da subestação a qual seria controlada pelo mesmo, atuações dos relés 59 (sobretensão) e relé 51 (sobrecorrente) seriam responsáveis por isolar os defeitos em tempo ágil para que não ocorresse danificação dos equipamentos do circuito protegido[15].

### 3.3 SUPRESSÃO DO EFEITO FERRORESSONANTE

#### 3.3.1 Emprego De Resistor Amortecedor Do Efeito Ferrorressonante

Devido às características severas do efeito ferrorressonante é de grande valia a utilização de técnicas para que ocorra a atenuação e extinção deste fenômeno, o uso de fechamento em delta aberto com fechamento através de resistor de potência tem se demonstrado uma técnica com altos níveis de sucesso no tocante a extinção do efeito ferrorressonante no SEP [29].

A potência térmica do terceiro enrolamento estabelece o valor mínimo do resistor de amortecimento, e pode ser calculada pela expressão 3.6 abaixo:

$$R_d = \frac{3 * \sqrt{3} * U_n^2}{P_{th}} \quad (3.6)$$

onde:

$U_n$  = tensão do terceiro secundário;

$P_{th}$  = potência térmica do enrolamento;

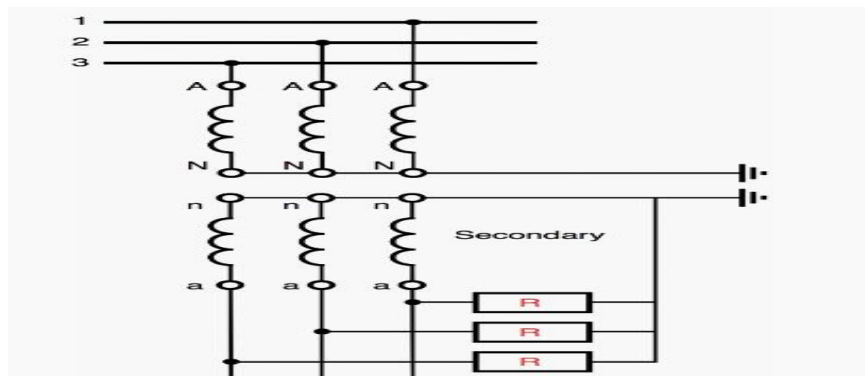
$R_d$  = Resistor de dissipação [28].

A potência teórica de curta duração do resistor se dá pela fórmula 3.7:

$$P_c = \frac{(3 * U_n)^2}{R_D} \quad (3.7)$$

A figura 22 mostra o esquema elétrico resultante da adição de resistor de potência atrelado ao circuito.

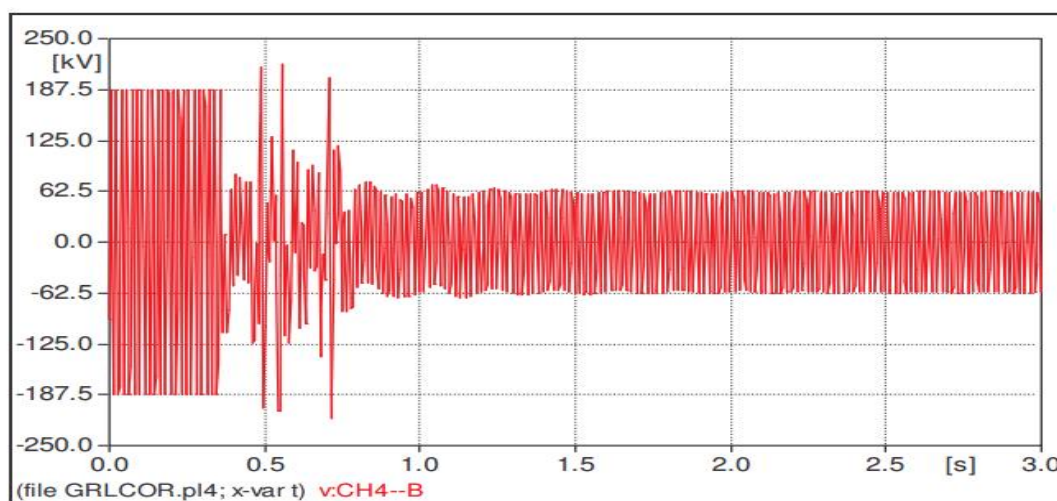
**Figura 22** - Esquema elétrico resistor amortecedor de efeito ferorrressonante



Fonte: [29]

A partir dos resultados das fórmulas e usando as especificações da simulação da figura 19, foi possível simular os resultados os quais o circuito estaria exposto após a utilização de resistor de amortecimento conectado ao terceiro enrolamento do transformador de potencial indutivo, a figura 23 demonstra que o efeito ferorrressonante foi extinto da simulação após o emprego do resistor de amortecimento calculado.

**Figura 23** - Tensão na barra após inserção de resistor de dissipação



Fonte: [28]

A figura 23, demonstra graficamente a alteração na tensão do circuito em consequência da presença do resistor com objetivo de atenuar o efeito ferorrressonante no circuito [28].

#### 4. CONCLUSÃO

Mediante os estudos aqui proporcionados, a intenção de alcançar o melhor entendimento sobre o efeito ferorrressonante era o foco central deste trabalho, uma vez que este assunto é pouco explorado devido a carência de informações no meio acadêmico, assim sendo esta monografia teve como efeito um entendimento mais fluido sobre o efeito concernente ao trabalho.

Este entendimento contribui para que um maior número de pesquisas possa ser trabalhado com o objetivo de se desenvolverem equipamentos os quais a partir de seus projetos possam atenuar ou extinguir o efeito ferorrressonante do sistema.

Os efeitos impostos ao sistema elétrico de potência em consequência de quadros posteriores a ocorrência de ferroressonância em subestações são efeitos não – lineares que impõem alterações drásticas de características de tensão e corrente, estas alterações tem potencial mais que suficiente de oportunizar que algumas particularidades de projetos no sentido de meios dielétricos e isolantes dos transformadores de potencial indutivo venham a ser exacerbados.

A partir de cenários como o de não atendimento de atributos de projeto de grande especificidade é possível que danos de grande monta possam ser impostos as plantas das subestações pertencentes ao SEP, principalmente as plantas que tem como nível de extra alta tensão, como é o caso de subestações as quais interligam grandes blocos de potência no sistema integrado nacional.

A ocorrência de falhas no sistema elétrico nacional reflete diretamente em vários aspectos da vida social e econômica nacional, as características hoje impostas ao Sistema Elétrico Brasileiro interliga diversas regiões, as quais em consequência de efeitos indesejados têm refletidos em varias partes do país o desligamento indevido de cargas, isto ocorre em consequência de manobras de reconstituição do sistema elétrico.

Durante o trabalho foi possível entender que para que ocorra o fenômeno de ferroressonância é necessário que ocorram diversas interações entre distintos equipamentos presentes no pátio de subestações, esta característica insondável do fenômeno ferroressonante traz consigo a possibilidade de diversas vertentes para que ocorra um melhor entendimento de suas peculiaridades, o uso de programas de simulação e métodos complexos de cálculos buscam exemplificar de maneira mais acessível este importante efeito.

As manobra de troca de barra descrita nessa monografia, é de grande importância em subestações em consequência da mesma ser usada em diversas situações dentro de subestações, como as de manutenção de equipamentos, ilhamento de defeitos na planta, reconstituição de transmissão na planta em consequência de defeitos em equipamentos dentre outras, porém o atenuante a respeito de ferroressonância é o uso de disjuntores os quais tem dentre seus componentes capacitores de equalização. Estes detalhes devem ser previstos quando em projetos de subestações, a observação de tais minúcias do projeto tem potencial de suprimir ou atenuar o fenômeno de ferroressonância em subestações futuras que passarão a fazer parte do sistema energético interligado nacional.

## **5. PROPOSIÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

Devido a vasta área de exploração do conteúdo pesquisado nessa monografia, fica como sugestão de pesquisas posteriores:

1. Confeção de circuitos ferromressonantes em laboratório para maior conhecimento prático sobre o fenômeno;
2. Estudo de técnicas para correção do efeito ferromressonante em menores níveis de tensão;
3. Aprofundamento sobre manobras em subestações e projetos de subestações com o intuito de não ocorrência de ferromressonância;

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] PUC RIO (Rio de Janeiro). **Um breve histórico do setor energético Brasileiro**. 2010. Disponível em: <[https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/13064/13064\\_3.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/13064/13064_3.PDF)>. Acesso em: 19 jul. 2018.
- [2] SANTOS, Felipe Marques dos. **Sistema elétrico brasileiro: Histórico, estrutura e análise de investimentos no setor**. 2015. 3 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Aranguá, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/159354>>. Acesso em: 17 jul. 2018.
- [3] ITAIPU BINACIONAL. **Nossa história**. disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/nossahistoria>> Acesso em: 06 de agosto de 2018.
- [4] ALMEIDA, J. A. J. **P&d no setor elétrico brasileiro: um estudo de caso na companhia hidroelétrica do são francisco**. 2008. Dissertação (Mestre em Economia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.
- [5] VIEIRA, Isabela Sales. **Expansão Do Sistema De Transmissão De Energia Elétrica No Brasil**. 2009. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2009. Disponível em: <[http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/4034/1/2009\\_IsabelaSalesVieira.pdf](http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/4034/1/2009_IsabelaSalesVieira.pdf)>. Acesso em: 20 ago. 2018.
- [6] ANEEL. **Mapas Linhas De Transmissão Do Brasil** Disponível em:<<http://sigel.aneel.gov.br/portal/home/item.html?id=3ee2fe1d374a40b483440104857df021>> Acesso em: 15 de agosto de 2018.
- [7] ABRADÉE. **Visão Geral Do Setor De Transmissão De Energia Elétrica Nacional** Disponível em:< <http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/visao-geral-do-setor>> Acesso em: 20 de agosto de 2018.
- [8] ANEEL. **Mapas Tipos De Geração De Eletricidade No Brasil** Disponível

em:<<http://sigel.aneel.gov.br/portal/home/item.html?id=3ee2fe1d374a40b483440104857df021>> Acesso em: 15 de agosto de 2018.

[9] Operador nacional do sistema. **Sobre o ons** Disponível em:<<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons>> Acesso em: 23 Ago. 2018.

[10] FERREIRA, Débora da Costa. **Atuação das Diversas Instituições do Setor Elétrico Brasileiro no Processo de Licenciamento Ambiental dos Empreendimentos de Transmissão de Energia Elétrica que Integrarão o Sistema Interligado Nacional**. 2012. 55 f. Monografia (Especialização) - Curso de Pós-graduação Lato Sensu em Direito da Regulação do Setor Elétrico, Instituto Brasiliense de Direito Público – Idp, Brasília, 2012.

[11] MUZY, Gustavo Luiz Castro de Oliveira. **Subestações Elétricas**. 2012. 122 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10005233.pdf>>. Acesso em: 07 abr. 2018.

[12] BARRETO, Leandro Henrique Borges. **Sistemas De Proteção, Controle E Supervisão Em Subestações De Energia Elétrica: Uma Visão Geral**. 2013. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10008656.pdf>>. Acesso em: 26 set. 2018.

[13] GONÇALVES, Renato Massago. **Guia De Projeto Para Subestações De Alta Tensão**. 2012. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2012. Disponível em: <[http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180450/tce-17042013-151031/publico/Goncalves\\_Renato\\_Masago.pdf](http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180450/tce-17042013-151031/publico/Goncalves_Renato_Masago.pdf)>. Acesso em: 04 abr. 2018.

[14] SAMPAIO, André Lawson Pedral. **Consolidação de material didático para a disciplina de equipamentos elétricos – disjuntores**. 2012. 10 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de

Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://www.dee.ufrj.br/~acsl/grad/equipamentos/TCC Andre Lawson - Versão Final.pdf>>. Acesso em: 16 abr. 2018.

[15] FILHO, João Mamede. **Manual De Equipamentos Elétricos**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

[16] SANTANA, Henrique Nunes. **Análise da aplicabilidade de sensores de acoplamento capacitivo no monitoramento de disjuntores de alta tensão**. 2017. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017. Disponível em: <[http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFCG\\_95a61241cdee6f89074e86f9105b6aaf](http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFCG_95a61241cdee6f89074e86f9105b6aaf)>. Acesso em: 02 set. 2018.

[17] KOTRYK, Adilson Franco; MOLHOFF, Fredy Rudi; OLESKO, Harding Ducci. **Estudo Comparativo De Tecnologias Aplicadas Em Subestações**. 2015. 48-52 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: <[http://www.daelt.ct.utfpr.edu.br/engenharia/tcc/monografia\\_guia\\_se\\_industriais\\_2001.pdf](http://www.daelt.ct.utfpr.edu.br/engenharia/tcc/monografia_guia_se_industriais_2001.pdf)>. Acesso em: 17 abr. 2018.

[18] SIEMENS. **Seccionador De Abertura Central**. Disponível em: <<https://searchext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1YVA000106&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>>. Acesso em: 17 abr. 2018.

[19] SIEMENS. **Transformador De Potencial**. Disponível em: <<http://www.trenchgroup.com/Produkte-Loesungen/Messwandler/Induktive-Spannungswandler/Oel-isolierte-induktive-Spannungswandler>>. Acesso em: 21 abr. 2018.

[20] CAMILOTTI, Luis Eduardo. **Resposta Em Frequência De Transformadores De Potencial E Suas Implicações Para O Sistema Elétrico De Potência**. 2017. 79 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/p/arquivostccs/423.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2018.

[21] HORNUNG, Felipe; KUSSEK, Marcos. **Estudo E Ajustes Do Relé Digital Para A Proteção Em Subestações De Alta Tensão**. 2017, n.127, p. 1-31, TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em: <[http://nupet.daelt.ct.utfpr.edu.br/tcc/engenharia/doc-equipe/2016\\_2\\_16/2016\\_2\\_16\\_final.pdf](http://nupet.daelt.ct.utfpr.edu.br/tcc/engenharia/doc-equipe/2016_2_16/2016_2_16_final.pdf)>. Acesso em: 22 abr. 2018.

[22] SILVA, Márcio Gabriel Melo. **Avaliação de Desempenho de Relés de Proteção Digitais**. 2012. 114 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10005149.pdf>>. Acesso em: 26 set. 2018.

[23] VIENA, Lissandro Brito. **Modelagem de Transformadores no Programa ATP para o Estudo do Fenômeno da Ferro ressonância**. 2010. 147 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010. Disponível em: <<http://www.ppgee.eng.ufba.br/teses/76773e5fb517369696e3eba6d56e67da.pdf>>. Acesso em: 06 maios 2018.

[24] VIENA, Lissandro Brito. **Modelagem de Transformadores no Programa ATP para o Estudo do Fenômeno da Ferrorressonância**. 2010. 167 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010. Disponível em: <<http://www.ppgee.eng.ufba.br/teses/76773e5fb517369696e3eba6d56e67da.pdf>>. Acesso em: 06 jul. 2018.

[25] DAVID, E. Johnson et. al **Fundamentos de Análises de Circuitos Elétricos**, 4ª Edição, Ed. LTC.

[26] CARDOSO JÚNIOR, Edirlei; SILVA, Halley José Braga da; COSTA, Paulo Izidio da. **Sistema De Monitoramento Para Disjuntores De Alta Tensão**. 2008. 75 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica - Telecomunicações, Universidade Paulista, Bauru, 2008. Disponível em: <<https://www.ebah.com.br/content/ABAAAoE4AL/monitoramento-disjuntores-alta-tensao?part=4>>. Acesso em: 23 out. 2018.

[27] SOARES, vera lúcia et al. **Aspectos Do Desempenho Transitório De Transformadores De Potencial Em Subestações**. Curitiba: xviii snpte - grupo x - gsc, 2005, disponível em: <<http://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/01/aspectos-do-desempenho-transitorio-de-transformadores-de-potencial-em-subestacoes.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

[28] MISHIMA, Auro Seiji. **Ocorrência de ferorressonância em transformadores de potencial arteche, tipo UTF-245**. Curitiba: Cop, 2010.

[29] CSANYI, Edvard. **Practical solutions for preventing or damping ferroresonance in electrical installations**. 2017. Disponível em: <<https://electrical-engineering-portal.com/preventing-damping-ferroresonance>>. Acesso em: 15 out. 2018.