

UNIAMÉRICA CENTRO UNIVERSITÁRIO

**FALHAS EM SECCIONADORAS DE ALTA TENSÃO:
MONITORAMENTO PREDITIVO**

Foz do Iguaçu – PR

MATHEUS SOUSA DIAS

FALHAS EM SECCIONADORAS DE ALTA TENSÃO:
MONITORAMENTO PREDITIVO

Trabalho de Graduação apresentado ao curso de
Bacharelado em Engenharia Elétrica da Uniamérica
Centro Universitário como requisito para a graduação.

Foz do Iguaçu - PR
2019

RESUMO

Várias empresas do ramo de energia elétrica tem relatado problemas com o desempenho de seccionadoras de alta tensão. Esse equipamento é fundamental em manobras de subestações e linhas de transmissão, e deve apresentar alta confiabilidade para que o sistema funcione adequadamente, sob pena de pesadas multas por indisponibilidade. Este trabalho apresenta um estudo acerca do baixo desempenho de chaves seccionadoras de alta tensão e o uso de um sistema especialista para monitoramento da seccionadora com objetivo preditivo na busca de uma maior confiabilidade.

Palavras-Chave: Chave Seccionadora, Subestação, Confiabilidade.

ABSTRACT

Several power companies have reported problems with the performance of high voltage disconnectors. This equipment is critical in substation and transmission line maneuvering, and must be highly reliable for the system to function properly, otherwise heavy penalties for unavailability. This paper presents a study about the low performance of high voltage disconnect switches and the use of an expert system to monitor the disconnect switch with predictive objective in the search for greater reliability.

Keywords: Disconnect Switch, Substation, Reliability.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
1.1 PRELIMINARES	6
1.2 JUSTIFICATIVA	6
1.3 OBJETIVOS	7
1.4 METODOLOGIA	7
2 REFERENCIAL TEÓRICO	8
2.1 INTRODUÇÃO A SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	8
2.2 O SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO	9
2.3 PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS DE SUBESTAÇÃO	11
2.3.1 DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO	11
2.3.2 CHAVE SECCIONADORA	15
2.4 CONFIABILIDADE, DISPONIBILIDADE	17
3 FALHAS NA SUBESTAÇÃO 220KV 50Hz DA ITAIPU	19
3.1 A SUBESTAÇÃO DA MARGEM DIREITA (SEMD)	19
3.2 FALHAS EM SECCIONADORAS DO PÁTIO DE 220KV	20
3.3 SISTEMA DE MONITORAMENTO DE SECCIONADORES	22
4 CONCLUSÃO	29
REFERÊNCIAS	30

1 INTRODUÇÃO

1.1 PRELIMINARES

A energia elétrica proporciona à sociedade trabalho, produtividade e desenvolvimento, e aos seus cidadãos conforto, comodidade, bem-estar e praticidade, o que torna a sociedade moderna cada vez mais dependente de seu fornecimento e mais suscetível às falhas do sistema elétrico (LEÃO, 2009).

O sistema elétrico de potência tem função de gerar, transmitir (transportar) e distribuir energia dos parques geradores aos centros consumidores. Geralmente os geradores e consumidores estão separados por longas distâncias, o que faz com que este processo se torne complexo e oneroso, envolvendo inúmeros equipamentos que devem estar em condições adequadas para realizar suas funções, muitos deles instalados desabrigados sofrendo diversas ações do ambiente, como sol e chuva.

A chave seccionadora, que é o dispositivo de manobra alvo deste trabalho, é um equipamento essencial para a execução de manobras em subestações de alta tensão. A NBR IEC 62271-102:2006 a define como um dispositivo mecânico de manobra capaz de abrir e fechar um circuito elétrico quando uma corrente de intensidade desprezível é interrompida ou restabelecida, capaz de conduzir correntes sob condições normais do circuito e, durante um tempo especificado, correntes sob condições anormais, como curto-circuito. Tem como uma de suas principais funções isolar disjuntores e linhas de transmissão.

Apesar de sua simplicidade construtiva esses equipamentos representam um desafio quanto a garantia de disponibilidade, pois tem têm princípio de funcionamento basicamente mecânico e são manobradas esporadicamente, sendo assim vulneráveis à corrosão e outros desgastes com o tempo (SANTOS et al., 2018).

1.2 JUSTIFICATIVA

A falha de equipamentos é um fato do nosso mundo e devemos nos preparar para esse tipo de evento, buscando investir em pesquisas que busquem elevar cada vez mais os níveis de confiabilidade e disponibilidade do fornecimento de energia elétrica (JENS, 2006).

Várias empresas têm relatado um grande número de problemas em seccionadoras de alta tensão, o que incorre em manutenções não programadas, que tendem a ser onerosas, e indisponibilidade, que podem acarretar em multas de alto valor. Os problemas mais críticos são as falhas durante os processos de abertura e fechamento das seccionadoras, onde é necessário um bom funcionamento do circuito de comando e dos componentes mecânicos, porém há

também outros defeitos, como por exemplo pontos quentes nas conexões (SANTOS et al., 2018).

Tendo em vista a importância deste tema, é essencial um trabalho pragmático e organizado em cima deste assunto, buscando estratégias de manutenção que mitiguem essas falhas e também procurando suas origens.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é analisar as principais causas de falhas em seccionadoras de alta tensão, e os meios de mitigar essa fonte de indisponibilidade.

Os objetivos específicos são:

- Definir SEP, SIN e equipamentos de subestação;
- Explanar sobre os recorrentes problemas em seccionadoras;
- Expor a experiência de autores e empresas na mitigação desses problemas, citando o caso da Itaipu Binacional.

1.4 METODOLOGIA

Para Fonseca (2002), “metodologia é o estudo da organização, dos caminhos a serem percorridos, para se realizar uma pesquisa ou um estudo, ou para se fazer ciência. Etimologicamente, significa o estudo dos caminhos, dos instrumentos utilizados para fazer uma pesquisa científica”.

Este trabalho é uma monografia de caráter teórico de objetivo descritivo, onde foram adotados procedimentos de revisão bibliográfica e de pesquisa documental, com abordagem qualitativa e quantitativa, com objetivo descritivo. A pretensão é produzir uma simplificada sistematização sensata de pensamentos advindos de fontes consagradas acerca do assunto em questão (GUIMARÃES, 2002)

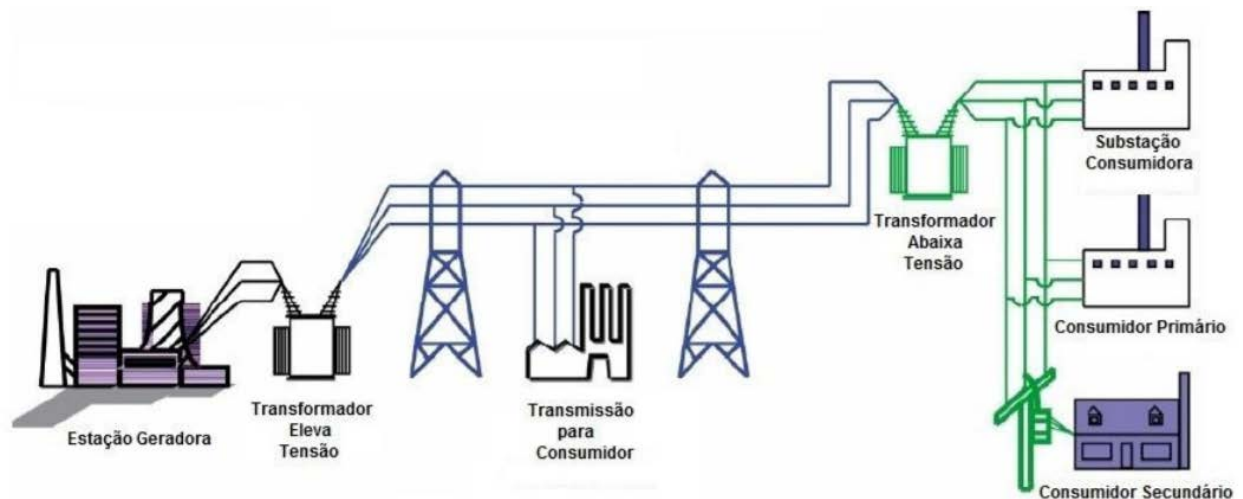
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 INTRODUÇÃO A SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

O sistema elétrico de potência compreende a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Em geral, grandes usinas de geração transformam alguma outra fonte de energia em eletricidade, e essa é transmitida por longas distâncias por linhas de transmissão de alta tensão, que posteriormente é distribuída em baixa e média tensão para os consumidores.

Próximo aos geradores, a subestação elevadora aumenta o nível de tensão para diminuir as perdas na linha de transmissão. No outro lado da linha, a tensão é transformada para valores de subtransmissão ou distribuição para que os consumidores sejam atendidos em segurança. Esse processo é ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Esquema de um sistema elétrico de potência.



Fonte: LEÃO, Ruth. 2009.

No Brasil, os níveis de tensão estão atualmente padronizados pela Nota Técnica 0075/2011-SRD/ANEEL:

- transmissão e subtransmissão: 750; 500; 230; 138; 34,5; 13,8 kV
- distribuição primária em redes públicas: 34,5 e 13,8 kV
- distribuição secundária em redes públicas: 380/220 e 220/127 volts, em redes trifásicas; 440/220 e 254/127 volts, em redes monofásicas;

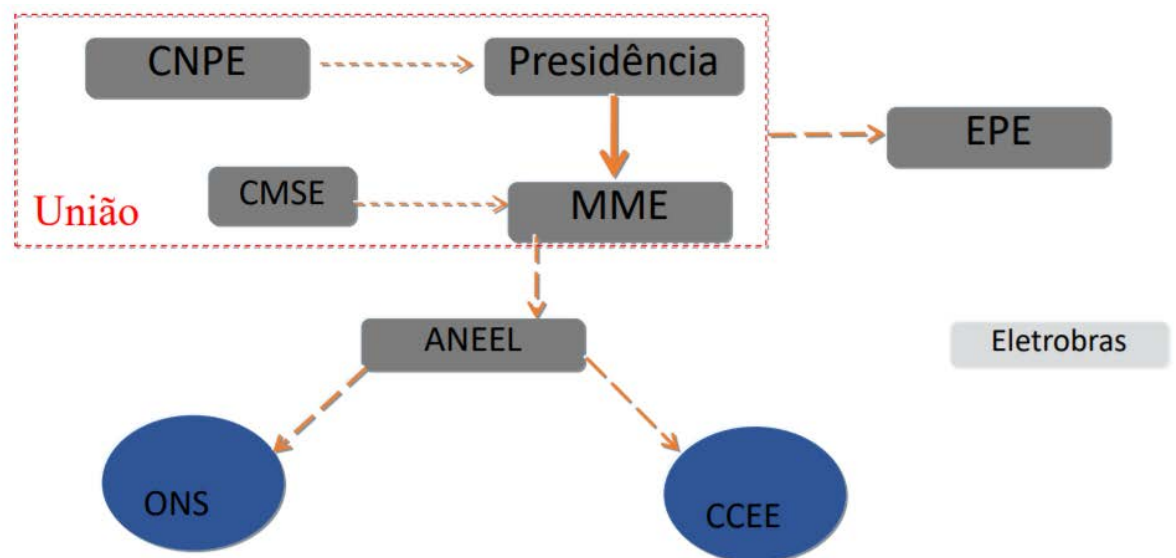
Os consumidores atendidos pela rede de transmissão são apenas aqueles com alto consumo de energia elétrica e subestação abaixadora própria, como indústrias por exemplo.

2.2 O SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Até 1999 o Brasil contava com diversos sistemas elétricos de potências desconectados, causando diminuição da confiabilidade, dificuldade na homogeneização do mercado, e problemas na otimização dos recursos energéticos das bacias hidrográficas. Com a criação do Sistema Interligado Nacional - SIN esses problemas foram resolvidos, e o Operador Nacional do Sistema (ONS) tem controle sobre toda a operação do sistema elétrico.

Hoje o SIN alimenta cerca de 98% da demanda brasileira, sendo o restante composto por pequenos sistemas elétricos destinados a atender necessidades localizadas, que se encontram principalmente na região amazônica. Estes são chamados Sistemas Isolados.

Figura 2 – Estrutura Organizacional do SEP brasileiro.



Fonte: GESEL, 2018.

O setor elétrico brasileiro é controlado por um sistema de entidades setoriais conforme o diagrama da Figura 2.

- O Conselho Nacional de Política Energética - CNPE é a entidade responsável por formular as políticas nacionais de energia, não só de eletricidade mas também de petróleo e gás. Esta entidade propõe ao Presidente da República políticas relacionadas a promoção do aproveitamento racional dos recursos energéticos, assegurar o suprimento de insumos energéticos às áreas mais remotas ou de difícil acesso, rever a matriz energética e as tecnologias disponíveis, sugestão de medidas para

garantir o atendimento à demanda nacional considerando planejamento de curto, médio e longo prazo.

- O Comitê de Monitoramento do Sistema Elétrico - CMSE é composto por quatro representantes do Ministério de Minas e Energia, e titulares da ANEEL, ONS, EPE, CCEE e ANP (Agência Nacional do Petróleo). Tem como função acompanhar e avaliar permanentemente a continuidade e a segurança do suprimento eletroenergético em todo o território nacional. Isso é feito através de acompanhamento, avaliação, identificação de dificuldades e propondo ajustes das atividades de geração, transmissão, distribuição, comercialização, importação e exportação de energia elétrica, gás natural e petróleo e seus derivados.

- O Ministério de Minas e Energia – MME é o órgão da administração direta que representa a União (representante jurídico da República Federativa do Brasil) como poder concedente e formulador de políticas públicas, bem como indutor e supervisor da implementação dessas políticas em todo o setor de energia.

- A Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL é uma autarquia vinculada ao MME que tem a finalidade de regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica em conformidade com as políticas e diretrizes do governo federal. Além disso, também fixa tarifas, gere contratos de concessão e intermedia divergências entre agentes setoriais e consumidores.

- O Operador Nacional do Sistema – ONS tem suas operações reguladas pela ANEEL é responsável pelas atividades de coordenação e controle da operação da geração e transmissão da energia elétrica integrante do SIN, assim como previsão de carga e planejamento da operação do Sistema Isolado. Também supervisiona e coordena a operação das interligações internacionais, contrata e administra serviços de transmissão e propõe ampliações e melhorias.

- A Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE é responsável por viabilizar as atividades de comercialização de energia elétrica no SIN. Ela trabalha promovendo leilões de compra e venda de energia delegados pela ANEEL, contabilizando montantes comercializados, apurando descumprimento de limites de contratação e outras infrações, e aplicando penalidades.

- A Empresa de Pesquisa Energética – EPE tem como finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, realizando estudos e projeções da matriz energética brasileira, realizando

estudos de impacto social, ambiental, viabilidade técnico-econômica para empreendimentos, etc.

- A Eletrobrás é uma empresa de capital aberto que tem como acionista majoritário o governo federal. É a maior companhia do setor elétrico da América Latina, e detêm cerca de 30% da capacidade instalada de geração do país e metade das linhas de transmissão.

2.3 PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS DE SUBESTAÇÃO

2.3.1 DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO

Disjuntor é um equipamento destinado a interromper a corrente elétrica de um circuito em condições normais, anormais ou em curto circuito sendo esta uma das tarefas mais difíceis confiadas aos equipamentos instalados em sistemas de potência. Ao mesmo tempo, devem ser capazes de energizar/desenergizar equipamentos, interromper correntes de carga e sobrecarga, corrente de curto-circuito e efetuar o desligamento quando acionado por algum sistema de proteção (MUZY, 2015).

A necessidade de realizar todas essas tarefas de forma absolutamente confiável, para impedir danos aos demais equipamentos, inclui os disjuntores entre os equipamentos de maior complexidade instalados nas subestações.

Segundo MUZI (2015), as principais características de funcionamento de um disjuntor são:

- Interromper rapidamente, e quantas vezes forem necessárias, a corrente de curto-circuito;
- Suportar a tensão a vazio presente em seus terminais quando os mesmos estão abertos;
- Fechar ou abrir um circuito em curto imediatamente após o mesmo tentar eliminá-lo;
- Suportar os efeitos do arco elétrico bem como os efeitos eletromagnéticos, mecânicos e térmicos do curto-circuito; e
- Interromper, estabelecer e conduzir as correntes nominais de cargas dos circuitos em regime permanente, as correntes de magnetização dos componentes indutivos (trafos e reatores) e ainda as correntes capacitivas das linhas a vazio e dos bancos de capacitores.

Classificação de Disjuntores

Os disjuntores são classificados de acordo com o seu sistema de acionamento e o meio de extinção do arco elétrico. Quanto ao meio de extinção do arco, as tecnologias mais usadas são as seguintes (MUZY, 2015):

- Disjuntores a óleo: Os primeiros disjuntores a serem desenvolvidos foram os disjuntores a óleo. Alguns destes equipamentos estão em operação até os dias de hoje. Foram desenvolvidos dois tipos básicos de disjuntores a óleo, disjuntores de grande volume de óleo e de pequeno volume de óleo. No tipo de grande volume de óleo (GVO), os contatos ficam no centro de um grande tanque contendo óleo, que era usado tanto para interrupção das correntes, quanto para prover um isolamento para a terra. No disjuntor de pequeno volume de óleo (PVO), o óleo servia principalmente para a extinção do arco e não necessariamente para a isolação entre partes vivas e a terra. A maior vantagem dos disjuntores de grande volume sobre os de pequeno volume de óleo era a possibilidade de utilização de transformadores de corrente de bucha.
- Disjuntores a ar comprimido: Nos disjuntores a ar comprimido, a extinção do arco é obtida a partir da admissão, nas câmaras de ar comprimido (armazenado num reservatório pressurizado) que, ao ser soprado sobre a região entre os contatos, determina o resfriamento do arco e sua compressão. A operação dos disjuntores a ar comprimido, muitos dos quais ainda continuam em operação, sempre produz um grande ruído causado pela exaustão de ar para atmosfera. Uma redução do nível de ruído produzido é obtida por meio de silenciadores.

Apesar do bom desempenho dos disjuntores a ar comprimido na interrupção de correntes de curto-circuito, certas manobras de abertura em condições de carga eram difíceis para eles. Sua capacidade de interrupção apropriada para as altas correntes era insatisfatória, algumas vezes, diante de correntes menores que a nominal. Para corrigir essa deficiência, foi concebida a técnica de inserção temporária de resistores em série com os circuitos associados, no processo de abertura dos disjuntores. Resistores de abertura podiam também, em situações especiais, se revelar necessários à redução das sobretensões de manobra que se seguiam à abertura de uma falta. Cada resistor era instalado no interior de uma câmara auxiliar, na qual a interrupção do arco formado entre os contatos era feita por processo semelhante ao usado nas câmaras principais. Esses acessórios eram utilizados, em casos especiais, por escolha do fabricante. Com a interrupção da fabricação de disjuntores de ar

comprimido pela indústria, os resistores de abertura também caíram em desuso e deixaram de ser fabricados.

- Disjuntores a gás SF₆: No disjuntor a gás utiliza como meio de extinção de arco o gás SF₆ (hexafluoruro de enxofre). Hoje é uma das formas mais utilizadas para extinção de arcos, sendo utilizado inclusive em subestações totalmente blindadas em SF₆. As técnicas de interrupção resumidas acima foram amplamente usadas em sistemas elétricos de transmissão e distribuição. Elas foram sendo progressivamente substituídas pelas técnicas de interrupção a vácuo e a SF₆, que não possuem algumas das desvantagens associadas às tecnologias a óleo e a ar comprimido. O SF₆ é um gás excepcionalmente estável e inerte, sendo 5 vezes mais pesado que o ar, não apresentando sinais de mudança química para temperaturas em que os óleos empregados em disjuntores começam a se oxidar e decompor.

Quanto ao sistema de acionamento os disjuntores são classificados da seguinte forma (MUZY, 2015):

- Acionamento por Solenóide: neste sistema, uma bobina solenóide – que na maioria dos tipos de acionamento é usada somente para disparo - é utilizada diretamente para acionar os contatos na operação de fechamento e também para carregar a mola de abertura. Aliás, este é um princípio comum a todos os acionamentos, pois o disjuntor na condição "fechado" deverá estar sempre com energia armazenada para a operação de abertura. Este tipo de acionamento não é muito utilizado, pois tem capacidade de armazenamento de energia limitada.
- Acionamento a Mola: para este caso, a energia para o fechamento é acumulada em uma mola. As molas são carregadas através de motores, os quais podem ser de corrente contínua ou alternada. Pode-se ter também o acionamento manual. Quando o mecanismo de disparo é acionado, a mola é destravada, acionando os contatos do disjuntor, fechando-o, acontecendo nesta operação o carregamento simultâneo da mola de abertura. Cada fabricante tem seu próprio arranjo para este tipo de acionamento, entretanto, o princípio de funcionamento aqui descrito é comum a todos eles. O acionamento a mola é muito difundido para disjuntores de média tensão (até 38 kV) e alta tensão (69 a 138 kV) em grande volume de óleo, pequeno volume de óleo, sopro magnético, a vácuo e a SF₆, podendo ser tripolar ou monopolar. Neste tipo de acionamento, a caixa que abriga o mecanismo, abriga também o bloco de comando, ou seja, acionamento e unidade de comando estão num

mesmo subconjunto principal o que é uma característica mais ou menos constante em disjuntores de média tensão. O sistema de acionamento a mola tem funcionamento simples, dispensando qualquer supervisão, tornando-o ideal para média tensão. No entanto, deve-se ter em mente que a ausência de supervisão, se por um lado simplifica e barateia o disjuntor, por outro, não permite que se tenha controle das partes vitais do acionamento, de maneira a se prever qualquer falha na operação que, neste caso, ocorreria de forma totalmente imprevista. Em sistema onde haja sucessivos religamentos sua aplicação se torna difícil, já que há um limite no acúmulo de energia.

- **Acionamento a Ar Comprimido:** o acionamento a ar comprimido consiste em armazenar a energia necessária à operação do disjuntor em recipientes de ar comprimido, a qual é liberada através de disparadores atuando sobre válvulas, que acionam os mecanismos dos contatos via êmbolos solidários, ou através de conexões pneumáticas. Este tipo de acionamento é utilizado para disjuntores de média, alta tensões e é a solução natural para disjuntores que usam o ar comprimido como meio extintor, embora também seja usado para disjuntores a óleo e SF₆.
- **Acionamento Hidráulico:** neste tipo de acionamento, a energia necessária para a operação do disjuntor é armazenada em um "acumulador hidráulico" que vem a ser um cilindro com êmbolo estanque tendo, de um lado, o óleo ligado aos circuitos de alta e baixa pressão através da bomba hidráulica e, de outro, um volume reservado a uma quantidade prefixada de N₂. Em algumas execuções, o N₂ pode estar contido em uma membrana de elastômero. A bomba hidráulica de alta pressão comprime o óleo e, conseqüentemente, o N₂, até que seja atingida a pressão de serviço (aproximadamente 320 bar). Através de disparadores de abertura ou fechamento são acionadas as válvulas de comando que ligam o circuito de óleo com o êmbolo principal de acionamento. A característica principal deste tipo de acionamento é a sua grande capacidade de armazenamento de energia, aliada às suas reduzidas dimensões, o que é conseguido através da pressão de operação, que é da ordem de 320 atm. Além disso, sem a necessidade de ser mudar a configuração básica do acionamento, ou seja, dos blocos das válvulas de comando e dos êmbolos, pode-se aumentar a capacidade do mesmo, aumentando-se o volume de nitrogênio. Isto é particularmente importante para disjuntores a SF₆ em EAT com resistores de abertura ou fechamento e de abertura rápida (2 ciclos), ou no caso em que o usuário tem exigências específicas com relação à seqüência de operação.

2.3.2 CHAVE SECCIONADORA

As chaves seccionadoras são dispositivos destinados a fechar, abrir ou transferir as ligações de um circuito em que o meio isolante o ar. Essa operação prevista para acontecer após a abertura do circuito por outro dispositivo, no caso um disjuntor. Tais operações devem atender aos requisitos de manobra, que são (MUZY, 2015):

- Na posição fechada não deve oferecer resistência corrente que circula (nominal ou de defeito);
- Na posição aberta deve suportar com segurança as tensões que se estabelecem;
- Todas as partes que em qualquer condição de operação possam ficar em sobtensão, devem ser isoladas (para terra e entre fases);
- Somente operam em circuitos sem passagem de corrente Os seccionadores podem interromper correntes pequenas, tais como: correntes de magnetização de transformadores, ou correntes em vazio de linhas de transmissão.

Classificação de Chaves Seccionadoras

Para GONÇALVES (2012) chaves seccionadoras podem ser classificadas por sua função e pelo mecanismo de abertura e fechamento. Essas são as classificações por sua função:

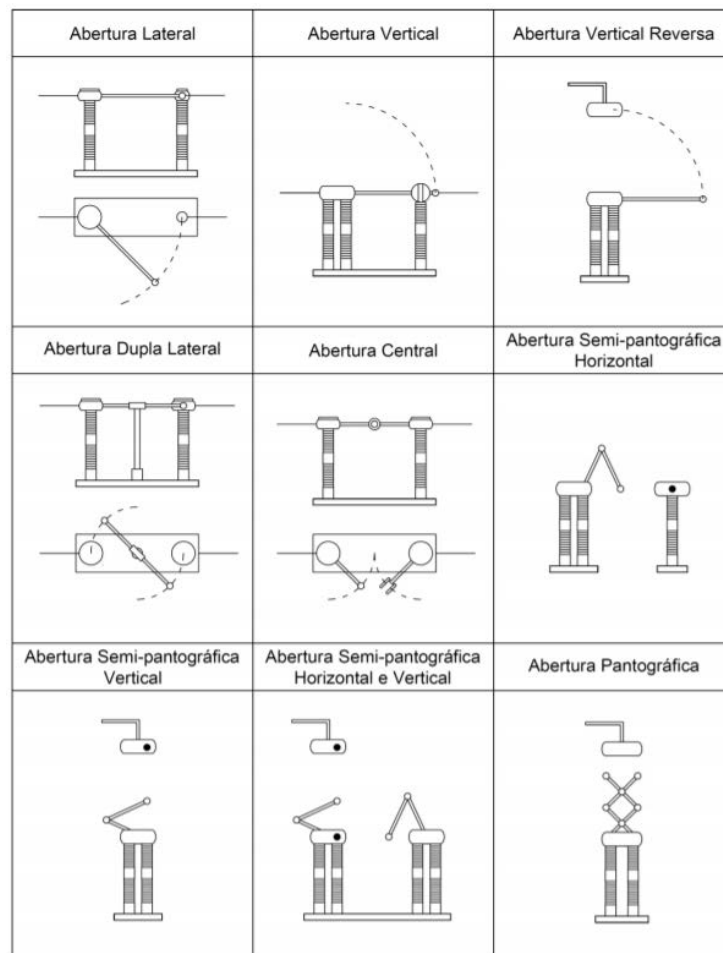
- Chaves seccionadoras: São utilizadas para contornar (by-pass) ou isolar equipamentos das subestações como disjuntores, capacitores série, dentre outros, a fim de se realizar a manutenção destes equipamentos. Ainda, são utilizadas para se realizar as manobras de transferência entre barramentos de uma subestação (principal, secundário, transferência, dentre outros);
- Chaves de terra: São utilizadas para aterrar os equipamentos do sistema que está em manutenção, ou para aterrar linhas de transmissão, barramentos, ou bancos de capacitores em derivação;
- Chaves de aterramento rápido: Estas chaves possuem um tempo de fechamento extremamente rápido e possuem várias aplicações, como:
 - a) Aterrar componentes energizados, provocando uma falta intencional na rede, a fim de solicitar os esquemas de proteção;
 - b) Aterrar componentes energizados no caso de defeitos em reatores não manobráveis ligados à linha de transmissão sem sistemas de proteção com transferência de disparo;

- c) Aterrar componentes energizados no caso de linhas de transmissão terminadas por transformador sem disjuntor no outro lado da linha;
- d) Proteção dos geradores contra sobretenção e auto-excitação.

Abaixo estão listadas os mecanismos de abertura e fechamentos de seccionadoras (GONÇALVES, 2012). A Figura 3 ilustra cada um deles.

- Chave de abertura lateral;
- Chave de abertura vertical;
- Chave de abertura vertical reversa;
- Chave de abertura dupla lateral;
- Chave de abertura central;
- Chave de abertura semi-pantográfica horizontal;
- Chave de abertura semi-pantográfica vertical;
- Chave de abertura semi-pantográfica horizontal e vertical;
- Chave de abertura pantográfica.

Figura 3 – Tipos de Seccionadoras.



Fonte: GONÇALVES, 2012.

2.4 CONFIABILIDADE, DISPONIBILIDADE

Os principais conceitos e terminologias sobre confiabilidade e disponibilidade surgiram em meados de 1970 com a criação do comitê IEEE-CS (*Institute of Electrical and Electronics Engineers – Computer Society*), os quais são descritos a seguir (JENS, 2006).

A confiabilidade é definida como a probabilidade de um sistema permanecer operacional por um determinado período de tempo sem produzir erros, supondo que o mesmo estava operando corretamente no instante inicial de tempo e que as condições ambientais permaneçam as mesmas nesse período.

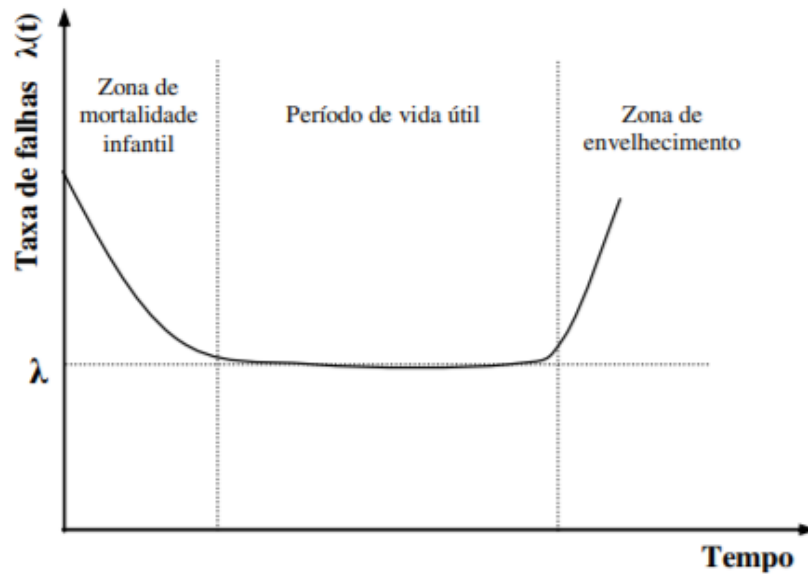
A disponibilidade de um sistema é definida como a probabilidade de um sistema estar operacional em um determinado instante de tempo, representando a fração de tempo em que o sistema permaneceu funcionando em relação ao tempo total de operação. Assim, os tempos de reparo do sistema exercem impacto sobre este indicador, tanto na forma preventiva como na corretiva.

“As principais ameaças à confiabilidade e disponibilidade são as falhas, erros e defeitos. É fundamental prestar atenção a estes três conceitos, pois apesar de parecerem semelhantes, possuem significados diversos (AVIZIENIS et al., 2004 apud JENS).”

A falha é uma operação incorreta de um sistema ou de um de seus componentes, mas não necessariamente implica em um erro. O erro é um resultado incorreto, fora da especificação, produzido por um sistema ou por um de seus componentes. Já o defeito acontece apenas quando um erro causa impacto no resultado do serviço, alcançando a interface de serviço de um sistema ou componente. Na falha está a causa inicial do defeito.

Um termo importante para expressar a confiabilidade é a taxa de falhas (λ). A sua definição consiste na quantidade esperada de falhas que um componente ou sistema deverá apresentar dentro de um intervalo de tempo. Um dispositivo que apresenta uma falha a cada 1000 horas tem uma taxa de falha de 0,001 falhas/hora. Geralmente essa taxa de falhas tem uma relação com o tempo, conforme o gráfico da Figura 4 (JENS, 2006).

Figura 4 – Taxa de falhas em relação à idade do equipamento (curva da banheira).



Fonte: JENNS, 2006.

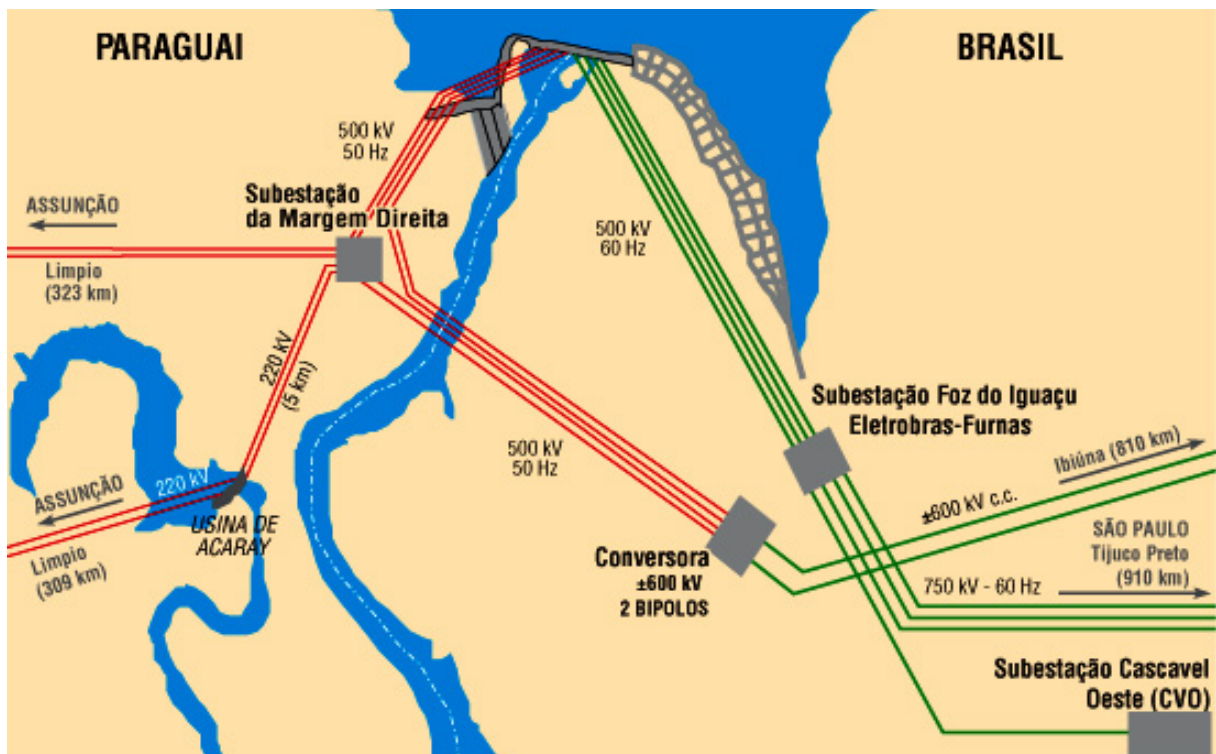
Segundo (JENS, 2006), curva da banheira apresenta três zonas: Mortalidade infantil, período de vida útil, e zona de envelhecimento. No período de vida útil espera-se a taxa de falhas baixa e constante. No período de mortalidade infantil a taxa de falhas é mais alta e vai abaixando como tempo. Na prática são realizados testes exaustivos nos equipamentos de sistemas elétricos visando acelerar a passagem por este período. Na zona de envelhecimento a taxa de falhas começa a aumentar e sinaliza que o equipamentos deve ser substituído.

3 FALHAS NA SUBESTAÇÃO 220KV 50Hz DA ITAIPU

3.1 A SUBESTAÇÃO DA MARGEM DIREITA (SEMD)

A Usina Hidrelétrica de Itaipu tem capacidade instalada de 14000 MW, sendo que ela produz metade de sua energia em 60 Hz, que é a frequência utilizada no Brasil, e metade de sua energia em 50 Hz, que é a frequência utilizada no Paraguai. A Subestação da Margem Direita (SEMD) da Itaipu intermedia toda a energia produzida em 50 Hz. A Figura 5 mostra o layout das subestações e das linhas de transmissão. Atualmente a Itaipu fornece 14,6% da energia consumida no Brasil, e 90,8% da energia consumida no Paraguai (PORTAL ITAIPU, 2019).

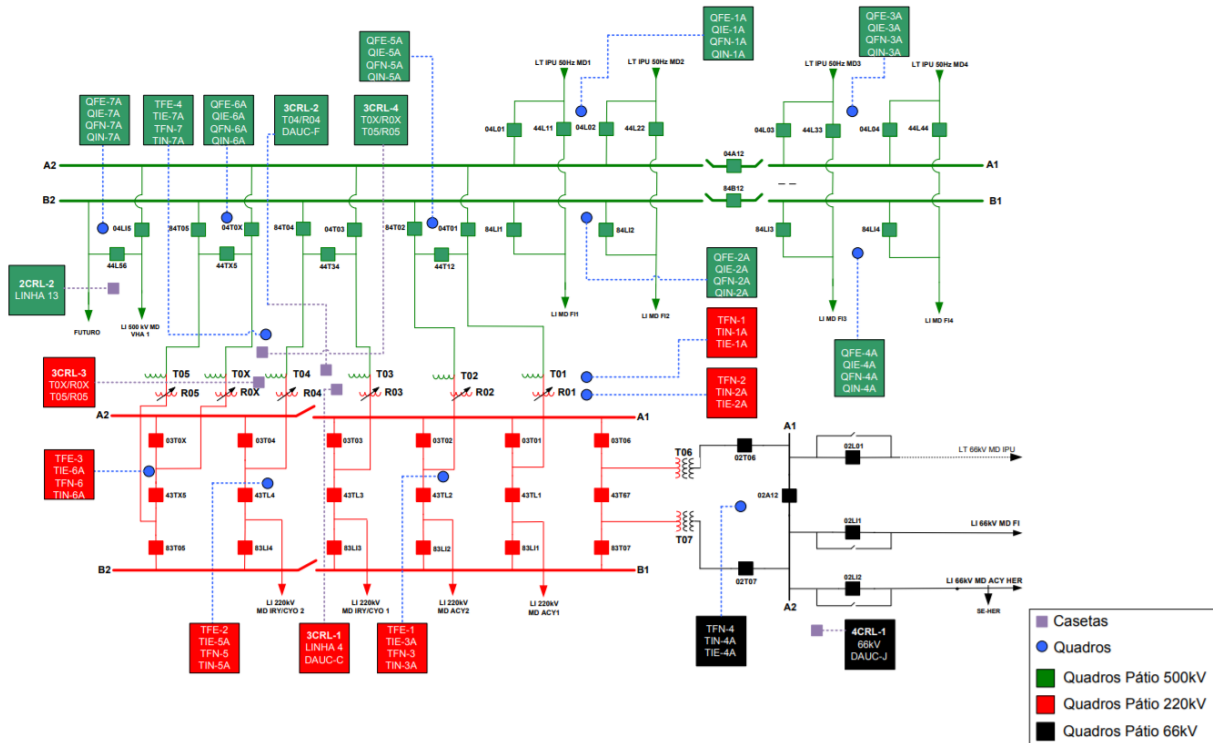
Figura 5 – Layout de linhas e subestações



Fonte: ITAIPU, 2019.

A SEMD é dividida em três setores principais: Pátio de 500 kV, pátio de 220kV e pátio de 66kV, conforme a Figura 6.

Figura 6 – Diagrama da SEMD.



Fonte: ITAIPU, 2019.

O setor de 500kV é responsável por alimentar a linha de Vila Hayes, que alimenta uma subestação próxima a Assunção, o elo CC, que faz a interligação entre a energia em 50 Hz e o Sistema Elétrico Brasileiro (SEB), e os 6 transformadores 500/220kV.

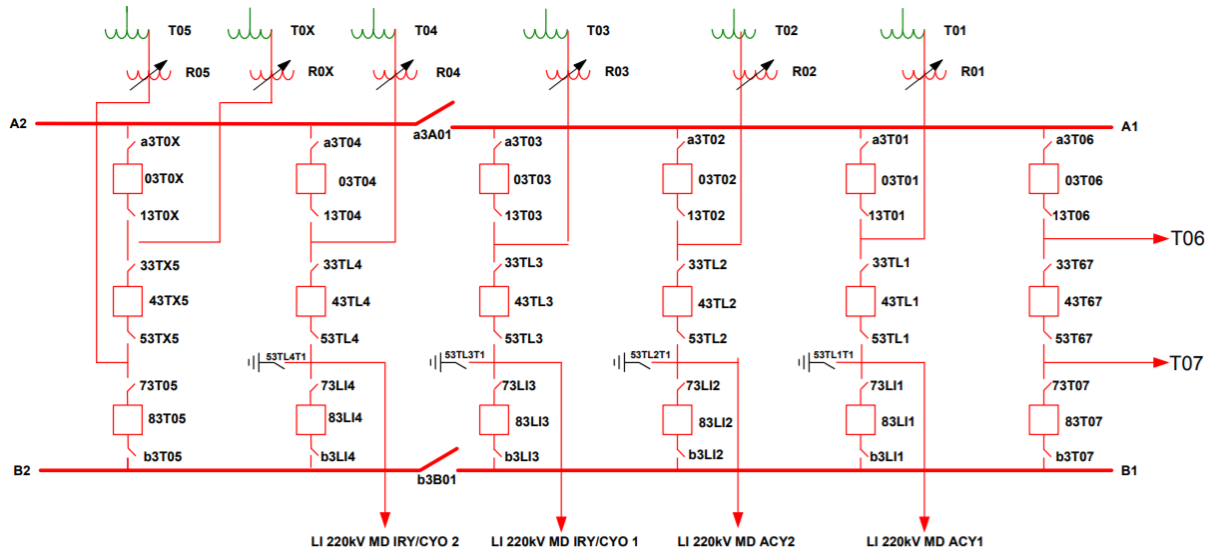
O setor de 220kV alimenta os transformadores do setor de 66kV e 4 linhas de transmissão em 220kV.

O setor de 66kV alimenta 4 linhas de transmissão, sendo uma delas a alimentação secundária do serviço auxiliar 50 Hz da usina.

3.2 FALHAS EM SECCIONADORAS DO PÁTIO DE 220KV

Este pátio tem grande importância na subestação. Antes da implantação da linha de 500kV Vila Hayes em 2013, era responsável por praticamente toda a energia fornecida ao Paraguai pela Itaipu. Este pátio é composto por seis vãos na configuração de disjuntor e meio, como mostra a Figura 7.

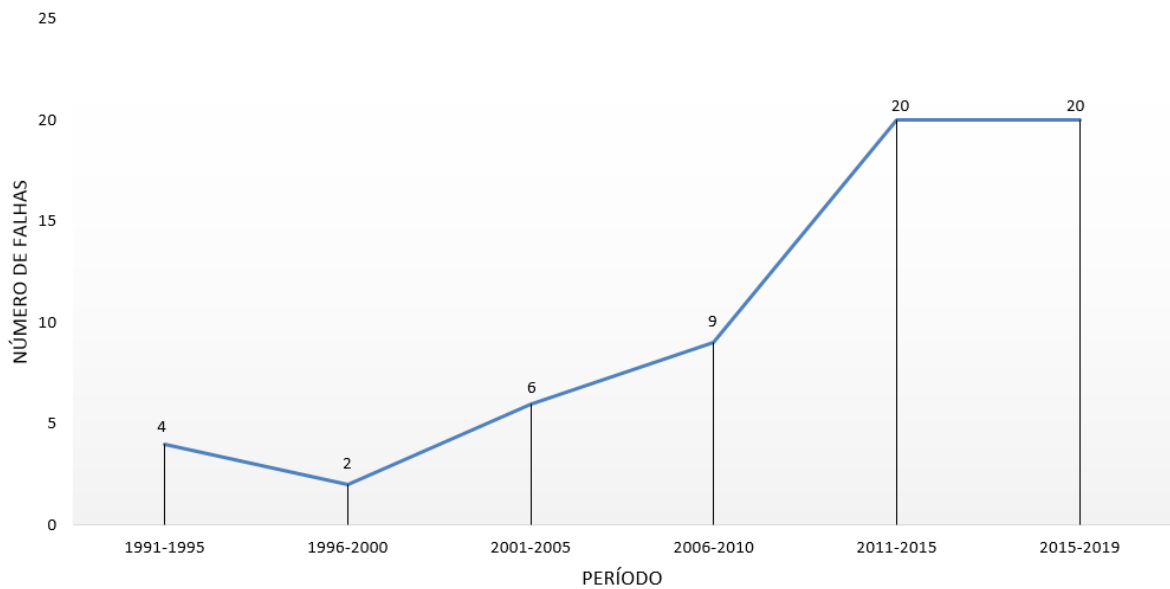
Figura 7 – Pátio 220kV da SEMD.



Fonte: ITAIPU, 2019.

Devido sua grande importância, é necessário que a SEMD mantenha altos níveis de disponibilidade, e isso está diretamente ligado ao bom funcionamento de seus ativos. Porém, conforme pesquisa no aplicativo da intranet da empresa chamado Sistema de Manutenção Aperiódica (SMA), o setor de 220kV tem experimentado um aumento no número de falhas em seccionadoras nos últimos anos, como mostrado na Figura 8. Os números deste gráfico mostram todas as falhas durante manobras, sejam elas mecânicas, do circuito de comando ou elétricas.

Figura 8 – Número de falhas em seccionadoras de 220kV por período.



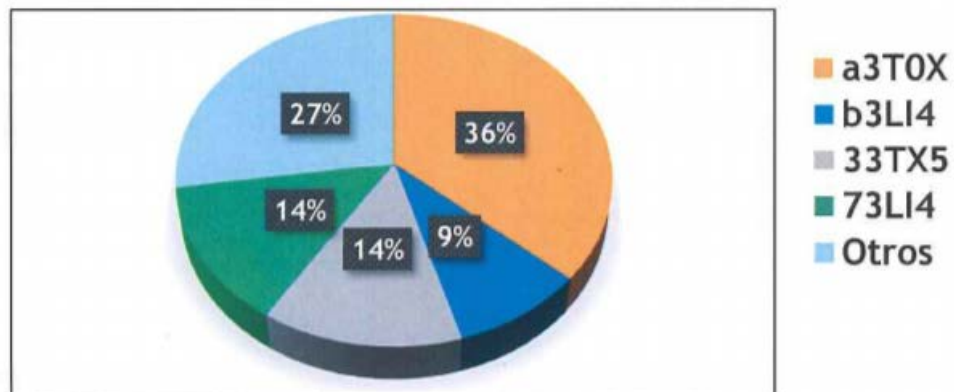
Fonte: ITAIPU, 2019.

Ao analisar o perfil deste gráfico é fácil imaginar que as falhas estão aumentando devido ao envelhecimento da subestação, onde a mesma estaria entrando na zona de envelhecimento da subestação. Porém ao analisar mais profundamente o resultado é diferente.

A SEMD 220kV passou por diversas expansões durante o tempo. No começo da operação da Itaipu haviam apenas três de transformadores rebaixadores 500/220kV, sendo eles o T1, T2 e T3. Posteriormente foi implantado o T4, e ainda depois, em 2011, entrou em operação os transformadores TX e T5.

Ao analisar apenas as falhas devido a componentes do sistema mecânico de acionamento, contatos e demais partes que ficam em contato com alta tensão, observa-se que as seccionadoras com maior número de falhas são as mais novas, como mostrado no gráfico da Figura 9.

Figura 9 – Seccionadoras com maior número de falhas.



Fonte: MAURO, 2019.

Assim, identificar origens dessas falhas se tornou um processo mais complexo, e a busca por métodos e técnicas de diagnóstico que permitissem identificar previamente a eminência da ocorrência de uma falha se tornou essencial para a gestão da manutenção da Itaipu (SANTOS et al., 2018).

3.3 SISTEMA DE MONITORAMENTO DE SECCIONADORES

Uma medida adotada foi a instalação de um monitor especialista de seccionadoras (SDS), que mantém supervisão de corrente do motor de acionamento, e o deslocamento das seccionadoras, que é monitorado através de um sistema especialista. Esse sistema foi implantado nas seccionadoras do vão TX/RX, que vêm apresentando as maiores taxas de falhas, especialmente as de origem mecânica.

Para SANTOS et al. (2018), a relação entre o torque e a corrente de um motor de indução CA é regida pela seguinte equação:

$$T = \frac{30 \cdot m}{\pi \cdot n} (U \cdot I - I^2 \cdot R)$$

onde:

T – torque entregue no eixo do motor (N.m);

m – número de fases do estator do motor;

n – velocidade síncrona (rpm);

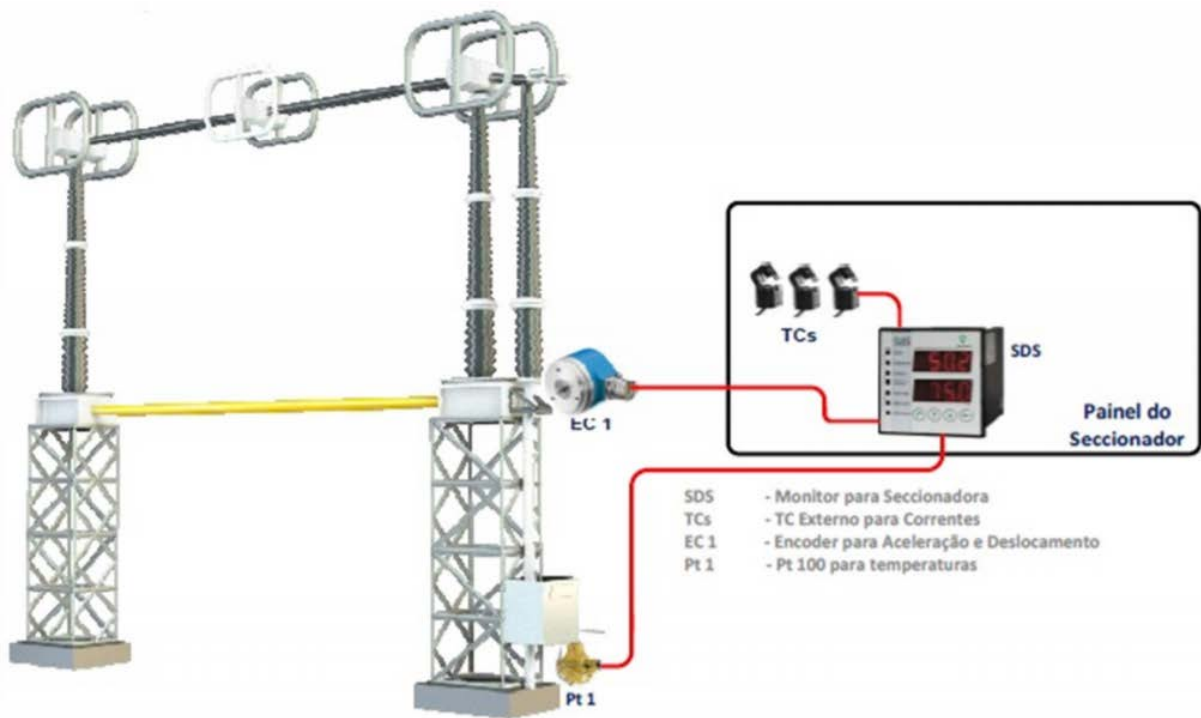
U – tensão de alimentação do motor (V);

I – corrente no estator do motor (A);

R – resistência do enrolamento estatórico (Ω).

A informação sobre a corrente do motor permite obter-se uma imagem de todo o conjunto mecânico uma vez que esta possui relação direta com o torque do mesmo. E a informação sobre o deslocamento do mesmo complementa a leitura do estado do conjunto mecânico. Por fim, também foi implementado o monitoramento da temperatura através de sensores tipo Pt-100, para avaliar a influência dessa variável. A Figura 10 mostra a arquitetura do sistema de monitoramento e a Figura 11 mostra o encoder instalado em uma seccionadora para supervisionar sua posição e deslocamento.

Figura 10 – Arquitetura do sistema de monitoramento.



Fonte: SANTOS et al., 2018.

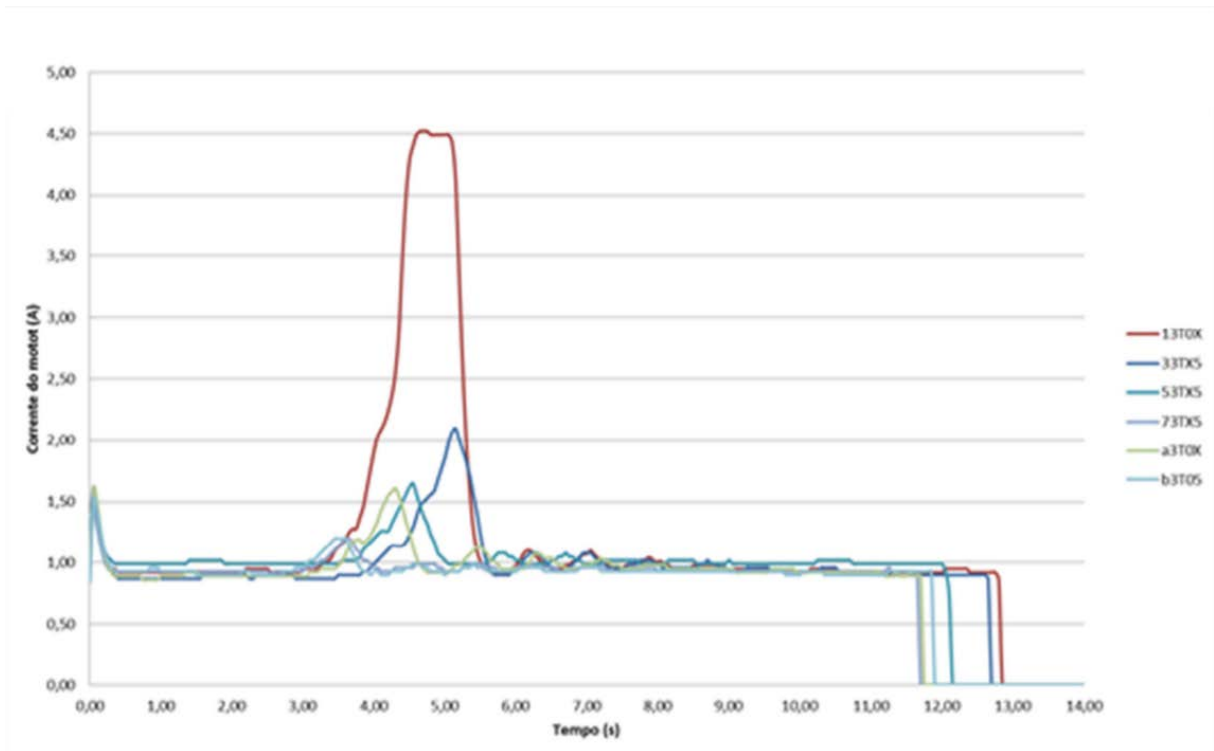
Figura 11 – Encoder.



Fonte: SANTOS et al., 2018.

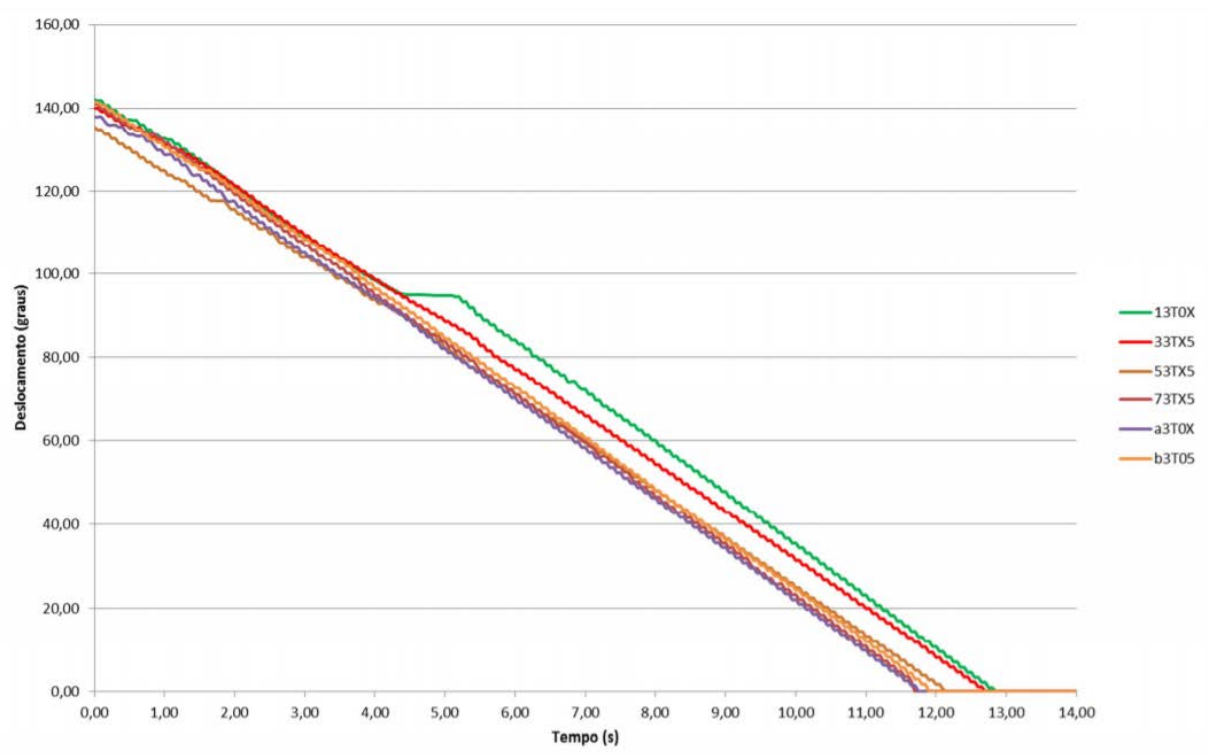
A maioria das falhas ocorriam durante o processo de abertura das seccionadoras, por isso, essas manobras foram escolhidas para serem monitoradas pelo SDS. A Figura 12 mostra o perfil de correntes para manobras de abertura registradas nas seccionadoras, e a Figura 13 o deslocamento das mesmas.

Figura 12 – Perfil de correntes nas seccionadoras.



Fonte: SANTOS et al., 2018.

Figura 13 – Deslocamento da seccionadora.



Fonte: SANTOS et al., 2018.

A partir dos gráficos é possível perceber que há um pico de corrente no momento em que acontece o desacoplamento do contato móvel, e que na seccionadora 13TOX houve um

travamento da movimentação nessa fase da abertura, que condiz com a elevada corrente no motor.

Buscando uma investigação mais profunda da causa de problema na 13T0X, essa seccionadora juntamente com a 73TX5 foram desmontadas e tiveram diversas grandezas dimensionais comparadas entre si e com o manual do fabricante. As medidas são mostradas na Tabela 1 abaixo.

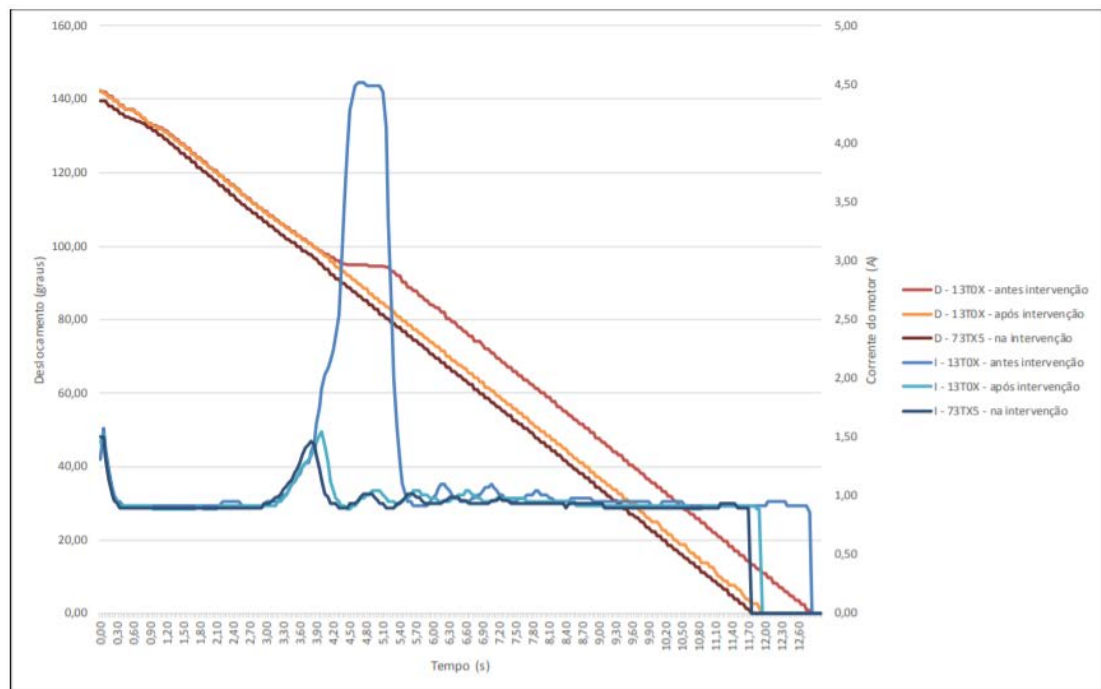
Tabela 1 – Resultados das medições.

TIPO MEDIDA	FASE	REFERÊNCIA FABRIC.	SECC 13T0X	SECC 73TX5
Ângulo da alavanca de transmissão (5.9) na base de cada pólo na posição "aberto"	R	22,5°	31°	26°
	S	22,5°	30°	24°
	T	22,5°	28°	24°
Distância média (D) entre as lâminas do contato fixo	R	sem referência	76,0 mm	78,5 mm
	S	sem referência	71,5 mm	78,0 mm
	T	sem referência	75,5 mm	77,8 mm
Ajuste da mola de balanceamento (2.20)	R	sem referência	45,8 mm	54,0 mm
	S	sem referência	46,0 mm	49,0 mm
	T	sem referência	45,0 mm	48,0 mm
Resistência de contato total	R	100 $\mu\Omega$ $\pm 20\%$ @20°C	102 $\mu\Omega$	100 $\mu\Omega$
	S	100 $\mu\Omega$ $\pm 20\%$ @20°C	112 $\mu\Omega$	103 $\mu\Omega$
	T	100 $\mu\Omega$ $\pm 20\%$ @20°C	103 $\mu\Omega$	101 $\mu\Omega$

Fonte: SANTOS et al., 2018.

Devido ao pequeno intervalo de tempo que os equipamentos podem ficar desenergizados, após essas constatações os equipamentos sofreram manutenção e foram normalizados. Durante a abertura da 13T0X para a manutenção houve o disparo do disjuntor térmico. Posteriormente, foi realizada limpeza e lubrificação nesta. A Figura 14 abaixo mostra os resultados de corrente após a intervenção na seccionadora 13T0X.

Figura 14 – Correntes após intervenção da manutenção.



Fonte: SANTOS et al., 2018.

Utilizando os dados do SDS e as medições realizadas, as equipes da Itaipu envolvidas chegaram nas seguintes conclusões (SANTOS et al., 2018):

“1. O travamento mecânico verificado na curva de deslocamento do seccionador 13TOX foi comprovado pela interrupção da manobra de abertura quando do início da intervenção.

2. O ângulo da alavanca de transmissão (5.9) em todas as fases do seccionador 13TOX é maior do que os verificados no seccionador 73TX5 e bem superior a referência do fabricante. Isso pode acarretar em maior avanço e penetração do contato móvel no contato fixo no seccionador 13TOX, muito embora se observe na Figura 14 que o deslocamento total de ambos os seccionadores é semelhante e próximo de 140°, o que excede o valor nominal do fabricante de 135°.

3. A distância média D entre as lâminas do contato fixo são menores no seccionador 13TOX, especialmente na fase S. Essa distância não pode ser regulada por parafusos e quaisquer outros meios de regulagem (mediante deformação, por exemplo) não são citados ou autorizados pelo fabricante em seu manual.

4. A mola de balanceamento, segundo descrito pelo fabricante, tem a função de compensar o peso da lâmina principal durante a manobra de fechamento e auxiliar o motor no desacoplamento dos contatos durante a manobra de abertura, ou seja, a mola sofre retração no

fechamento e expansão na abertura. Constatou-se nas intervenções que as molas do seccionador 73TX5 estão mais retraídas que as molas do seccionador 13T0X, o que pode acarretar para este último maior esforço do motor para execução da manobra de abertura. Um fato interessante é que no histórico de falhas dos seccionadores existem duas ocorrências de desprendimento da mola de balanceamento, sendo uma delas na fase S do seccionador 13T0X em 2017.

5. As resistências de contato de ambos os seccionadores atendem a referência do fabricante e apresentam-se bastante semelhantes entre si.

6. Conforme pode-se ver na Figura 14, os perfis de corrente e de deslocamento do seccionador 13T0X, após seus contatos passarem por limpeza e lubrificação durante a intervenção, assemelham-se aos do seccionador 73TX5 no início da intervenção. Ainda na Figura 14 decidiu-se inserir as mesmas curvas de corrente e deslocamento do seccionador 13T0X antes da intervenção, apresentadas nas Figuras 12 e 13, a fim de evidenciar a sensível mudança da amplitude de corrente e do tempo total de abertura.”

Após a limpeza e lubrificação da chave seccionadora 13T0X, a corrente durante a abertura voltou ao padrão normal. Porém em 2016 este mesmo seccionador já havia recebido a mesma manutenção, o que nos leva a concluir que o problema se repetirá. O fabricante recomenda a verificação dos contatos a cada 5 anos ou 500 manobras. O número de manobras realizadas no equipamento até aquela data foi de 248, e já haviam sido realizadas intervenções corretivas. Uma informação relevante é que as seccionadoras instaladas em 2012 (73TX5 e b3T05) apresentam um histórico de apenas uma falha, enquanto as instaladas em 2011, pertencentes a outro contrato, tiveram 19.

4 CONCLUSÃO

Ficou constatada a eficácia do sistema de monitoramento para o acompanhamento do desempenho das seccionadoras, já que a seccionadora com o padrão de corrente diferente e travamento falhou em sua segunda manobra. Isso vai viabilizar um acompanhamento contínuo, implementação de alarmes e a possibilidade de programar manutenções preditivas antes de ocorrerem falhas durante manobras.

A expansão do sistemas elétrico paraguaio, maximiza a necessidade de alta confiabilidade nessa subestação por conta de seu protagonismo. As experiências acumuladas demonstram que devemos estar preparados para cada vez mais desafios, uma vez que o corpo de funcionários deve lidar com as questões relacionadas a novos equipamentos ao mesmo tempo que parte mais antiga da subestação envelhece, sendo assim essencial a contínua expansão e melhoria das atividades de todos os setores da empresa para garantir o cumprimento das diretrizes de desenvolvimento para o futuro. A nível organizacional, o acompanhamento das preferências e exigências de equipamentos exige precisão e a participação ativa e responsável de diversos setores da empresa.

O SDS se mostrou uma boa ferramenta para melhorar manutenções preditivas, com capacidade de evitar eventos de grande impacto negativo, porém o problema na seccionadora persiste. É necessário realizar estudos para viabilizar as correções e modificações mecânicas necessárias nessas seccionadoras, assim como impor requisitos mínimos nas especificações de desempenho nos equipamentos no processo de aquisição, para que fornecimentos de qualidade ruim sejam barrados.

REFERÊNCIAS

ALSTOM. **Manual de Instruções N° D-590-P** – Seccionador de abertura vertical S3CV / S3CVT 245 kV – 1250 – 2000 A (Alstom. Ed. 3ª, 2008).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 62271-102:2006**. High-voltage switchgear and controlgear: Alternating current disconnectors and earthing switches. 2006.

DUALIBE, P. **Subestações: Tipos, equipamentos e proteção**. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. 1999.

ITAIPU BINACIONAL. **Participação nos Mercados**. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/energia/participacao-nos-mercados>>. Acesso em 15/11/2019.

JENS, Rodrigo Dias. **Modelo De Monitoramento E Avaliação Da Confiabilidade E Disponibilidade De Sistemas De Distribuição De Energia Elétrica Com Base Nas Condições De Uso De Transformadores**. Universidade Politécnica de São Paulo. São Paulo. 2006.

GESEL – GRUPO DE ESTUDOS DO SETOR ELÉTRICO. **Panorama geral do setor elétrico e governança setorial**. Rio de Janeiro: 2018.

GONÇALVES, Renato Masago. **Guia de Projeto para Subestações de Alta Tensão**. Universidade de São Paulo. São Carlos. 2012.

Leão, Ruth. **Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. 2009. 38f. Apostila – Universidade Federal do Ceará. 2009.

MUZY, Gustavo Luis Castro de Oliveira. **Subestações Elétricas**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2012

MAURO, Marco Aurelio Siqueira. **Falhas durante manobras nas seccionadoras 220kV da SEMD**. Usina de Itaipu, Departamento de Engenharia e Manutenção. Foz do Iguaçu. 2019.

SANTOS, Mario Augusto Caetano, MORAES, Rodrigo Eduardo Chaparro, OLIVEIRA, Sérgio Henrique Sobreira. **Avaliação de chaves seccionadoras de alta tensão mediante monitoramento online**. Itaipu Binacional. Foz do Iguaçu. 2018.