

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS MACEDO CUNEGUNDES CABRAL

**BLECAUTES EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA: UM
LEVANTAMENTO DAS PRINCIPAIS CAUSAS**

São Luís

2018

MATHEUS MACEDO CUNEGUNDES CABRAL

**BLECAUTES EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA: UM
LEVANTAMENTO DAS PRINCIPAIS CAUSAS**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão para obtenção do bacharelado em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Onoda Pessanha

São Luís

2018

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Cabral, Matheus Macedo Cunegundes.

BLECAUTES EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA: UM
LEVANTAMENTO DAS PRINCIPAIS CAUSAS / Matheus Macedo
Cunegundes Cabral. - 2018.
83 f.

Orientador(a): José Eduardo Onoda Pessanha.
Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica,
Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

1. Blecautes. 2. Estabilidade. 3. Sistemas Elétricos
de Potência. I. Pessanha, José Eduardo Onoda. II. Título.

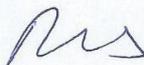
BLECAUTES EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA: UM LEVANTAMENTO
DAS PRINCIPAIS CAUSAS

Monografia apresentada ao curso de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal do Maranhão para
obtenção do bacharelado em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Onoda Pessanha

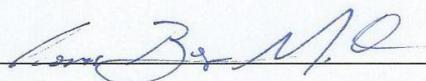
Aprovada em: 12 / 07 / 2018

BANCA EXAMINADORA



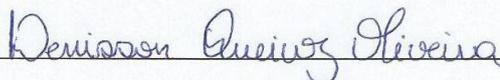
Prof. Dr. José Eduardo Onoda Pessanha (orientador)

Universidade Federal do Maranhão



Prof. Dr. Clóvis Bôsko Mendonça Oliveira

Universidade Federal do Maranhão



Prof. Dr. Denisson Queiroz Oliveira

Universidade Federal do Maranhão

A Deus por sempre guiar meus caminhos
e à minha família que é coluna em minha
vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus e seu filho Jesus que sempre estiveram presentes em minha vida e na da minha família, e cujos ensinamentos sempre me deram forças para continuar caminhando.

A minha mãe Nubia Macedo Cunegundes, mulher guerreira e exemplo de vida, que sempre me apoiou e me ensinou sobre justiça, humildade, perseverança e fé, além de me mostrar que o amor incondicional pelos filhos supera todos os obstáculos.

Ao meu pai José Ribamar Carvalho Cabral que não está presente fisicamente nesta vitória, mas que foi a base para meus estudos e esforços em busca do bacharelado.

A minha noiva que Deus colocou em minha vida, que sempre me deu o ombro quando precisei e que sempre me incentivou quando fraquejei. Pelo seu carinho e amor, por ter sido luz em minha vida e ter me mostrado o que realmente significa companheirismo.

A todos os familiares e amigos que sempre apoiaram meus estudos e o sonho em ser Engenheiro Eletricista.

Aos meus companheiros de curso Caetano Bastos, Pedro Igor Fonseca, Yago Freitas e Kayo Jorge Ribeiro que compartilharam comigo momentos de dificuldades e momentos de alegria ao decorrer do curso.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Eduardo Onoda Pessanha que me apoiou e me incentivou em momentos decisivos.

A todos os professor, funcionários e colegas da UFMA que de alguma forma contribuíram para minha formação acadêmica.

“Tudo posso naquela que me fortalece.”

(Filipenses 4:13)

RESUMO

O presente trabalho investiga os principais documentos técnicos de causas de blecautes de grandes proporções em sistemas elétricos de diversas regiões. Com isto, possui a finalidade de identificar e examinar as causas mais frequentes e as razões para a interrupção no fornecimento de energia elétrica. Através da análise, de cada causa, se menciona os mais conhecidos e principais blecautes de grandes proporções ocorridos, e como eventos singulares ou em conjunto levam o sistema à perda de estabilidade e, por consequência, ao estado crítico de colapso, atingindo vários consumidores e prejudicando suas atividades dependentes de energia elétrica. Além disso, o trabalho apresenta os danos resultantes de blecautes nos componentes de sistemas elétricos. Utiliza-se conceitos teóricos ao invés de matemáticos, no intuito de desenvolver uma leitura que possa ser compreendida não somente pelos engenheiros eletricitas e técnicos da área, mas também pelo cidadão comum que possa ter interesse em compreender melhor o porquê este fenômeno ocorre e quais são as causas mais recorrentes.

Palavras-chaves: Blecautes; Sistemas elétricos de potência; Estabilidade.

ABSTRACT

The present work investigates the main technical documents about the causes of blackouts of great proportions in the electrical system of several regions. Therefore, it has the purpose of identifying and examining the most frequent causes and the reasons for the interruption in the electric power supply. Through the analysis, about each cause, it is mentioned the most well-known and major blackouts of large proportions occurred and how singular or several events lead to the loss in the system's stability and hence to the critical state of collapse, reaching many consumers and damaging its activities dependent on the electrical energy. In addition, this work presents the damages caused by the blackouts in the components of the electrical system. Theoretical concepts are used instead of mathematical concepts, in order to develop a work that can be easily understood not only by electrical engineers or electrical technicians, but also by the ordinary citizen who may have an interest in better understanding why this phenomenon occurs and which are the most frequent causes.

Keywords: Blackouts; Electrical power systems; Stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Modelo de Sequência do SEP.....	5
Figura 2.2 - Curva característica Tempo x Corrente de disjuntor tipo B.....	9
Figura 2.3 - Disjuntor interruptor de SF6 em subestação de alta tensão.....	10
Figura 2.4 - Transformador de potência de grande porte.....	16
Figura 2.5 - Sistema simplificado e ilustrativo de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.....	17
Figura 2.6 - Esquema de planta de geração baseada em combustível fóssil.....	18
Figura 2.7 - Gráfico do tipo de energia e sua capacidade instalada no SIN em 2016.....	20
Figura 2.8 - Torres de transmissão aérea.....	22
Figura 2.9 - Esquema de circuito HVDC.....	23
Figura 2.10 - Medidas e atuações em sistemas de controle.....	26
Figura 2.11 - Períodos de tempo de atuação.....	28
Figura 3.1 - Fases de um blecaute.....	33
Figura 3.2 - Número de casos por período em continentes.....	34
Figura 3.3 - Acúmulo de neve em uma linha de transmissão.....	37
Figura 3.4 - Torre de transmissão atingida por ventos fortes.....	39
Figura 3.5 - Arco elétrico em chaves seccionadoras.....	40
Figura 3.6 - Gráfico de frequência de ocorrência de descargas elétricas que ultrapassam certo valor de pico.....	43
Figura 4.1 - Diagrama unifilar do sistema elétrico entre a usina de Itaipu e a subestação de Tijuco Preto.....	49
Figura 4.2 - Registro acumulado de descargas atmosféricas no dia 10/11/2009 entre 13:00h e 14:00h.....	51

Figura 4.3 - Registro acumulado de descargas atmosféricas no dia 10/11/2009 entre 22:10h e 22:15h.....	52
Figura 4.4 - Registro de geração programada e verificada na UHE de Itaipu - 60 Hz, no dia 10/11/2009.....	53
Figura 4.5 - Sequência de eventos e efeito resultante da perturbação de 10/11/2009.....	55
Figura 4.6 - Oscilograma da SE de Itaberá de tensões e correntes das fases e residual da LT 765 kV Ivaiporã-Itaberá C1.....	56
Figura 4.7 - Corrente residual no reator do circuito C3 da LT 765 kV Ivaiporã-Itaberá....	57
Figura 4.8 - Gráfico da variação da frequência nos subsistemas Sul e Sudeste.....	58
Figura 4.9 - Principais desligamentos sequencias resultantes do distúrbio de 10/11/2009.....	59
Figura 4.10 - Registro gráfico da variação da frequência na SE Bongi (subsistema Nordeste).....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Redes de distribuição existentes nas 101 distribuidoras.....	14
Tabela 3.1 - Eventos iniciais de blecautes.....	32
Tabela 3.2 - Blecautes ocorridos em períodos intensos de verão e inverno em várias regiões.....	36
Tabela 4.1 - Corte de carga por região para valores de subfrequência.....	48
Tabela 4.2 - Interrupções de energia devido ao distúrbio de 10/11/2009 no SIN.....	62

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Justificativa.....	2
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura do trabalho	3
2 O SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA: UMA BREVE DESCRIÇÃO.....	4
2.1 Preâmbulo.....	4
2.2 Introdução.....	4
2.3 Segurança no Sistema Elétrico de Potência.....	5
2.4 Sistema de Proteção.....	7
2.4.1 Dispositivos e equipamentos de uma rede elétrica.....	7
2.4.2 Aterramento	11
2.5 Padronização no Sistema Elétrico de Potência.....	12
2.5.1 Padronização da Frequência	12
2.5.2 Padronização dos níveis de tensão	12
2.6 Instalações e dispositivos importantes no desenvolvimento do SEP	14
2.6.1 Transformador	14
2.6.2 Subestação	16
2.6.3 Geração.....	18
2.6.4 Sistemas de Transmissão	21
2.6.5 Distribuição	24
2.7 Controle de sistemas de potência.....	25
2.7.1 Controle na geração	26
2.7.2 Controle na transmissão.....	27
3 PRINCIPAIS CAUSAS DE BLECAUTES NOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	29
3.1 Preâmbulo.....	29

3.2	Introdução	29
3.3	Conceitos e considerações importantes para análise de blecautes	30
3.4	Blecautes devido ao ambiente e fenômenos da natureza.....	35
3.4.1	Pico de estações climáticas.....	36
3.4.2	Vento forte.....	38
3.4.3	Arco elétrico	39
3.4.4	Descarga atmosférica.....	41
3.5	Blecautes devido a falhas em equipamentos	44
3.6	Blecautes devido a falha humana	45
4	ANÁLISE DE CASO	47
4.1	Introdução.....	47
4.2	Considerações sobre o SIN para análise do caso.....	47
4.3	Considerações iniciais sobre o sistema elétrico.....	49
4.4	Condições meteorológicas no dia do evento	51
4.5	Medidas de controle que antecedem a perturbação	52
4.6	Perturbação de 10/11/2009 no SIN.....	54
4.6.1	Eventos iniciais.....	54
4.6.2	Eventos em cascata.....	57
4.6.3	Carga interrompida	61
4.6.4	Considerações finais da análise	62
5	CONCLUSÃO.....	64
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

A sociedade está progressivamente dependente da energia elétrica, conseqüentemente, os sistemas elétricos de potência estão sempre em evolução para atender o crescimento constante de carga. Contudo, a expansão dos sistemas elétricos acompanha o incremento na complexidade do sistema, implicando em mais componentes, equipamentos e instalações destinados a suprir a demanda e elevar a eficiência no fornecimento de energia elétrica. Apesar dos avanços tecnológicos, os sistemas elétricos continuam a ser atingidos por vários distúrbios que podem ocasionar a interrupção do fornecimento de energia elétrica, resultando em blecautes de grandes proporções. O blecaute produz elevados prejuízos socioeconômicos, se tornando um problema para a população, pois, nos dias atuais, os consumidores utilizam cada vez mais atividades automatizadas.

Devido à complexidade que envolve o domínio do fluxo da eletricidade, há muitas variáveis que podem ser influenciadas de forma que prejudique os sistemas elétricos. Com a experiência adquirida pela indústria da eletricidade com as várias interrupções no suprimento de energia elétrica já registradas, pôde-se notar que algumas causas são recorrentes, porém, há eventos e situações singulares, tornando dispendioso para a indústria da eletricidade se prevenir de todos os possíveis cenários, devido a redundância em conexões e em utilização de equipamentos.

Geralmente, os blecautes de grande proporção ocorrem devido a retirada ou desligamento de um ou mais componentes vitais na transmissão de energia elétrica, condicionando o sistema elétrico a uma situação de colapso de suas funções, modificando as características da rede e aumentando a instabilidade do sistema. Há muitos fatores atuantes que causam as retiradas de operação de objetos e/ou instalações, sendo eles provenientes de fenômenos naturais ou ação humana.

Para a inibição do colapso de sistemas elétricos e otimização na transferência de energia elétrica se utiliza de sistemas de controle e proteção, com sofisticados equipamentos e tecnologias desenvolvidos para operar em conjunto no intuito de monitorar o sistema, preservar a qualidade de energia e manter a continuidade no fornecimento.

1.1 Justificativa

Blecautes em sistemas elétricos de potência vêm se tornando uma questão cada vez mais relevante entre as fornecedoras de energia elétrica e os consumidores, visto que, para ambos, a suspensão no suprimento de energia elétrica acarreta em custos significativos, principalmente para os consumidores de elevadas cargas, como os industriais, que utilizam a energia elétrica como principal fonte de manutenção da continuidade de suas atividades econômicas. Apesar de que uma grande parcela da população, de alguma forma, já tenha sido diretamente ou indiretamente atingida pelas consequências de blecautes de grandes proporções, se percebe que não há muito interesse da maioria dos cidadãos nas causas técnicas que levaram à suspensão de energia elétrica, e sim da causa superficial através de documentos e meios de comunicação não oficiais.

Sistemas mais confiáveis e estáveis, auxiliado por tecnologias e ferramentas de controle que reduzem a probabilidade de blecautes, vêm ganhando notoriedade na sociedade, pois as consequências da interrupção do fornecimento de energia são cada vez mais sentidas pelo consumidor.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é reunir e apresentar informações e relatos registrados por técnicos que trabalham com sistemas elétricos de potência, expondo as principais causas que produzem distúrbios significativos que possam levar um sistema elétrico ao colapso, ocasionando blecautes, de forma que leigos e peritos da área possam compreender que fatores como fenômenos elétricos e o meio em que o sistema está inserido podem influenciar para a condição de insustentabilidade do suprimento de energia elétrica. Se utiliza de análises de casos ocorridos, de blecautes de grandes proporções, pretendendo a familiarização do leitor com algumas causas e efeitos de blecaute.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente capítulo destina-se a contextualização do assunto abordado e a importância do mesmo.

O capítulo 2 apresenta uma descrição do sistema elétrico de potência e seus principais componentes.

O capítulo 3 reúne as principais causas de blecautes em sistemas elétricos e o processo que envolve os acontecimentos que antecedem o blecaute até a sua ocorrência de fato.

O capítulo 4 faz uma análise de um caso específico, exaltando todos os fatores envolvidos.

O capítulo 5 expõe as conclusões adquiridas com as investigações.

2 O SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA: UMA BREVE DESCRIÇÃO

2.1 Preâmbulo

Este capítulo tem por objetivo esclarecer pontos importantes e familiarizar o leitor com os principais eventos e equipamentos responsáveis pelo início da indústria da energia elétrica, começando com uma abordagem histórica e evolutiva dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP).

2.2 Introdução

Um Sistema Elétrico de Potência engloba basicamente três estágios, geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Cada um possui suas características e técnicas próprias para manter um grau de qualidade de energia a fim de atender consumidores cada vez mais exigentes e conhecedores dos seus direitos, incluindo residenciais, comerciais e industriais.

Os sistemas de geração, transmissão e distribuição estão conectados em série, ou seja, primeiramente tem-se a geração de energia elétrica feita pelos geradores (geralmente máquinas síncronas), que produzem energia no nível de média tensão e necessita de uma subestação de elevação. Esta subestação transmite energia através de linhas de transmissão em alta ou extra alta tensão até os pontos de cargas que necessitam de outra subestação para reduzir o nível em média/baixa tensão para o sistema de distribuição. A Figura 2.1 [1] ilustra a sequência.

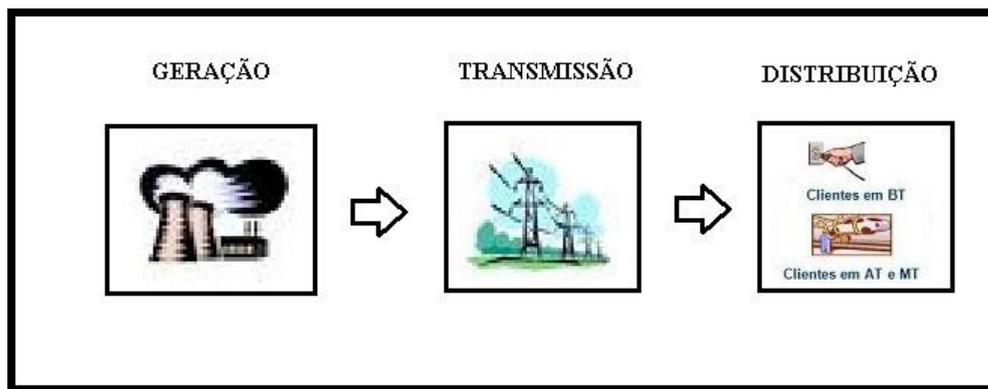


Figura 2.1- Modelo de Sequência do SEP [modificado pelo autor]

Para melhor compreender toda a trajetória da energia elétrica, da conversão de energia mecânica em elétrica até os terminais de uma tomada do sistema de distribuição e todo os problemas enfrentados no meio desse processo, deve-se buscar as primeiras informações e invenções mais importantes para evolução do sistema elétrico.

2.3 Segurança no Sistema Elétrico de Potência

A sociedade moderna tem a tendência de sempre atualizar seus conceitos de segurança e manuseamento de equipamentos nocivos ao ser humano, não diferente disto são os conceitos de precaução no sistema elétrico de potência. É necessário observar que apesar de aumentar burocracias ou retirar flexibilidade de um usuário de equipamentos elétricos, estas cautelas trazem benefícios à integridade da vida. Através de eventos ou ações não intencionais no início da indústria da eletricidade, estudos para aprimorar a plenitude da manipulação segura de materiais energizados estão sempre em desenvolvimento.

As medidas tomadas em relação à segurança envolvendo eletricidade deve sempre priorizar a vida humana, padronizando as instalações e visando uma maior segurança do corpo técnico responsável pela operação e manutenção dos sistemas elétricos. Este é submetido a regras e medidas técnicas elaboradas no intuito de evitar acidentes, que em muitos casos, e principalmente na média, alta e extra alta tensão são fatais, devido à magnitude dos parâmetros tensão e corrente.

Há também informações, recomendações e advertências de órgãos mundiais como o *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, sendo uma organização com membros de mais de 160 países. Os membros colaboram de todas as formas através de publicações, conferências e atividades que buscam a otimização das ciências e tecnologias da eletricidade e da informação [2].

No Brasil o órgão responsável por produzir as normas técnicas de segurança é a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e o Ministério do Trabalho (MT), que elaboram as Normas Regulamentadoras (NR). Existem medidas técnicas específicas determinadas para cada tipo de nível de tensão e a forma com que se realiza o serviço, estas técnicas estão voltadas para as pessoas que trabalham com o sistema elétrico, e as mais relevantes são:

- NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão [3];
- NBR 14039: Instalações elétricas de média tensão [4];
- NBR 5419: Proteção contra descargas atmosféricas [5];
- NR 10: Segurança em instalações e serviços em eletricidade [6].

Existem outras medidas para reforçar a segurança no trabalho, sendo uma delas a obrigação do uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPI), que estão de acordo com a faixa de tensão e atividade realizada pelo técnico. De acordo com a NR 6 [7] “[...] considera-se Equipamento de Proteção Individual - EPI, todo dispositivo ou produto, de uso individual utilizado pelo trabalhador, destinado à proteção de riscos suscetíveis de ameaçar a segurança e a saúde no trabalho[...]”. Estes equipamentos devem ser fornecidos pelas empresas e devem passar por rigorosos testes de qualidade garantindo o uso sem medo pelo usuário.

Após a prioridade da vida humana, a segurança no sistema elétrico de potência deve buscar a integridade dos equipamentos, primeiramente através de manutenções preventivas. Neste complexo conjunto de dispositivos de proteção, caso algum destes não realizar sua função, ou realizar apenas parcialmente, deixa vulnerável o resto do sistema podendo causar até mesmo acidentes envolvendo explosões de equipamentos devido a sobrecargas, o que além de implicar no possível risco a vida humana gera prejuízos consideráveis.

2.4 Sistema de Proteção

É necessário observar que o sistema de proteção é desenvolvido para evitar e minimizar eventos indesejáveis. Porém, não há segurança plena na sua eficiência devido aos complexos fenômenos elétricos e mecânicos que podem ocorrer, principalmente aos que são originados de fenômenos naturais como descargas elétricas, impactando severamente na rede [8].

2.4.1 Dispositivos e equipamentos de uma rede elétrica

Os dispositivos de proteção devem atuar rapidamente quando seus limites mínimos de acionamento forem atingidos, garantindo a interrupção da corrente elétrica, que no caso de curtos-circuitos atingem valores bem maiores que as correntes nominais [9].

Se percebe que os dispositivos de proteção diferem para cada tipo de sistema, não somente devido à faixa de atuação existente entre baixa, média, alta e extra alta tensão, mas devido aos diferentes equipamentos e características específicas das instalações.

De acordo com [9], o projeto de proteção de uma planta deve ser feito de forma geral, e não setorialmente. Este procedimento, evita falta de coordenação dos subsistemas que podem ocasionar interrupções desnecessárias nos setores de produção. Para que o sistema seja eficiente, deve atender aos seguintes fatores básicos [9]:

- Seletividade: característica importante que é referente a retirada de apenas a parte danificada da rede, isolando os circuitos não atingidos;
- Exatidão e segurança: garante confiabilidade ao sistema;
- Sensibilidade: referente a parte em que o dispositivo atua e não atua.

É importante notar que um circuito deve ser limitado à capacidade de atuação de seus dispositivos de proteção, ou seja, significando a subutilização da potência nominal dos equipamentos ou capacidade dos condutores se necessário. Um projeto bem estruturado e em harmonia com os equipamentos a serem protegidos evita o desperdício de potência disponível [9].

Alguns dos dispositivos básicos de um sistema de proteção são [9]: fusíveis, disjuntores e os *Intelligent Electronics Devices* (IED's). Os parâmetros mais utilizados para acionar esses dispositivos é a magnitude da corrente de curto-circuito, sobrecorrentes e sobretensões. Além destes fatores há também o fator resposta ao distúrbio e duração do tempo submetido pelas excessivas correntes e tensões nos casos de sobrecorrentes e sobretensões.

Além dos 3 dispositivos mencionados há um muito utilizado em baixa e média tensão e importante para a proteção à vida que é o dispositivo diferencial-residual (DR), sendo designado para correntes de fuga não superiores a 30mA. Estas correntes podem estar presentes em carcaças metálicas que não foram propriamente desenergizadas e quando entram em contato com o corpo humano utilizam como caminho de descarga, podendo resultar em morte [9].

Além de valores e informações nominais de dispositivos, estes possuem curvas características que servem de auxílio para o usuário caso este necessite de maiores detalhes sobre a faixa de atuação do equipamento. No caso do disjuntor, este pode ser classificado pela sua curva característica de tempo versus corrente. A Figura 2.2 [10] mostra a curva característica de um disjuntor termomagnético classificado por pertencer a curva tipo B, que apenas para título de informação são disjuntores indicados para cargas resistivas de baixa tensão.

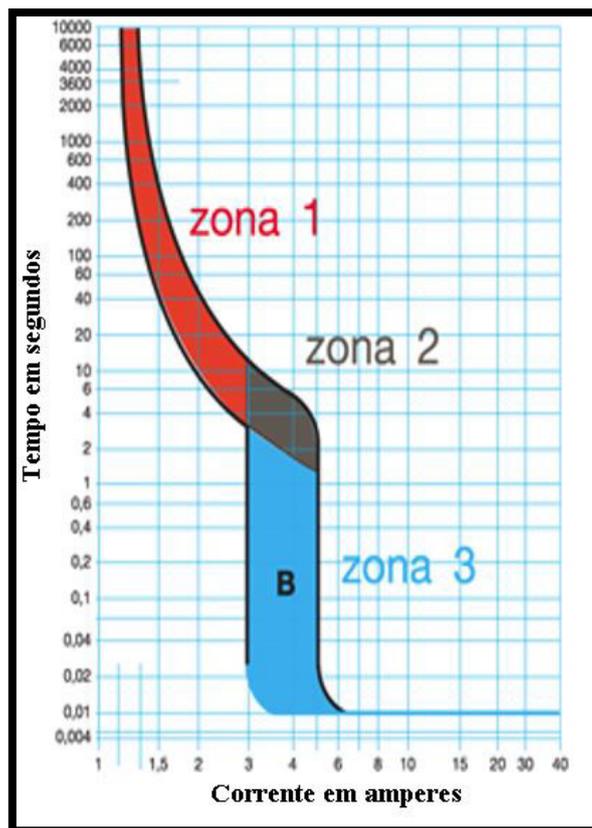


Figura 2.2 - Curva característica Tempo x Corrente de disjuntor tipo B [10]

A zona 1 ilustrada na Figura 2.2 é considerada a faixa lenta de atuação, que é referente a sobrecargas e seu parâmetro interno para disparo é a temperatura do condutor. A zona 3 é responsável por detectar rapidamente corrente de curto circuito, chamada faixa rápida de atuação, o parâmetro interno utilizado para disparo é referente a forças magnética. A zona 2 é o ponto de intersecção na utilização de fatores ou térmicos ou magnéticos para disparo [10].

O fusível é muito utilizado na proteção de transformadores, pois o transformador é muito sensível a sobrecargas e sobretensões, podendo apresentar riscos de explosões resultando em incêndios. O fusível é um filamento sensível ao aumento de temperatura se rompendo ou derretendo no intuito de separar a linha ou equipamento do condutor exposto à sobrecargas, garantindo a interrupção de alimentação para não ocorrer maiores danos.

Em subestações, principalmente as de alta e média tensão, é comum o uso de disjuntores interruptores, possuindo várias funções além de proteção, como manobra de

banco de capacitores ou manobra de motores. Há vários tipos de disjuntores de média e alta tensão, de acordo com [11] são eles:

- Disjuntores secos;
- Disjuntores secos com sopros magnéticos;
- Disjuntores a óleo;
- Disjuntores a gás;
- Disjuntores à vácuo.

Estes diferem na escolha de acordo com a aplicabilidade e custo benefício que considera vários fatores como níveis de tensão, tipo da instalação e configuração do sistema. A Figura 2.3 [11] demonstra um interruptor disjuntor de hexafluoreto de enxofre (SF₆) para isolar os contatos.



Figura 2.3 - Disjuntor interruptor de SF₆ em subestação de alta tensão [11]

De acordo com [12], IED's são “dispositivos em que a função é detectar linhas defeituosas, instrumentos ou condições do sistema de potência de natureza anormal ou perigosa iniciando uma ação de controle apropriada”. Possui inúmeras aplicações e é utilizado em vários níveis de tensão.

2.4.2 Aterramento

É um acoplamento de parte metálicas no intuito de formar um caminho de baixa impedância para escoamento de correntes originadas de descargas elétricas ou do sistema, assegurando continuidade elétrica e condução segura [13].

De acordo com [13], as principais funções do aterramento são:

- Proteger o usuário de equipamentos das descargas atmosféricas através de caminho alternativo;
- Descarregar cargas estáticas;
- Desviar correntes para a terra facilitando o funcionamento de equipamentos de proteção.

De acordo com [14], há dois tipos básicos de aterramento:

- Aterramento funcional: conecta-se um condutor do sistema (geralmente o neutro) à terra; e
- Aterramento de proteção: conecta-se as massas e elementos condutores estranhos à instalação por um condutor extra;

Além desses dois tipos há também o aterramento de trabalho. Este utiliza condutores entre equipamentos ou trechos da rede com à terra para realizar manutenção e serviços, sendo este retirado quando o serviço for concluído [14].

As hastes de aterramento nesse sistema são próximas aos postes que sustentam os transformadores, onde se localiza o conjunto para-raios. Um dos objetivos é dispersar as correntes resultantes de possíveis sobretensões causadas por descargas atmosféricas ou chaveamentos realizados na linha de distribuição. O sistema de para-raios possui especificações de instalação produzida pela ABNT, onde este difere para cada sistemas. O material condutor utilizado geralmente é o Cobre devido a sua baixa impedância [13].

Para subestações as exigências de instalações de aterramento são mais rigorosas, pois a magnitude de uma possível corrente de curto-circuito nessas instalações atinge valores muito elevados. Uma das precauções dentro de subestações é o cuidado com as chamadas tensões de passo. Esse fenômeno eletromagnético ocorre quando uma corrente elétrica é descarregada para o solo, aumentando o potencial do mesmo, em torno do

eletrodo de aterramento. Caso uma pessoa der um passo muito longo situado em cima dessa região, causa uma diferença de potencial entre seus pés podendo haver uma circulação de corrente pelo corpo [9].

2.5 Padronização no Sistema Elétrico de Potência

As questões de padronização são imprescindíveis para o sistema elétrico de potência, sempre buscando a compatibilidade, segurança, qualidade e manutenção do fornecimento constante de energia elétrica. Deve atender as especificações de suprimento do consumidor final e a segurança do conjunto de instalações e equipamentos elétricos com a menor variação possível de suas faixas de utilização [8].

2.5.1 Padronização da Frequência

No início da expansão da indústria elétrica não se priorizou a padronização, logo houve muitas incompatibilidades entre sistemas elétricos em um mesmo país. Portanto, foi necessário padronizar níveis de tensão, bem como a frequência utilizada, visto que se operava em diferentes frequências entre 25, 50, 60, 125 e 133 Hz [15].

No Brasil utiliza-se 60 Hz, enquanto países vizinhos utilizam 50 Hz. Ressalta-se que para sistemas de mesmo país é economicamente desvantajoso e complexo se cada empresa pudesse escolher sua faixa de operação. Se adota certos níveis, mundialmente, por conveniência, como a frequência, sendo geralmente 50 ou 60 Hz.

2.5.2 Padronização dos níveis de tensão

É necessário observar que tais manuseios e domínios do nível de tensão só são possíveis através de transformadores em subestações elevadoras, no caso de transmissão, e as subestações abaixadoras, no caso da subtransmissão e distribuição.

A agência reguladora responsável por desempenhar diversas atividades, visando garantir o desenvolvimento com equilíbrio do setor elétrico nacional, beneficiando a sociedade, é a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). O Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), da ANEEL, é o documento responsável que tem por intuito normatizar e padronizar as atividades técnicas relacionadas ao desempenho e funcionamento dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Para o sistema de distribuição a ANEEL [16] classifica os seguintes níveis de tensão:

- Baixa Tensão (BT): igual ou inferior a 1 kV;
- Média Tensão (MT): superior a 1 kV e inferior a 69 kV;
- Alta Tensão (AT): Superior a 69 kV e inferior a 230 kV;
- Extra Alta Tensão (EAT): Superior a 230 kV.

No Brasil, de acordo com a ANEEL, a Nota Técnica nº 0075/2011-SRD/ANEEL [17] estabelece os seguintes níveis padronizados de tensão para cada sistema, conforme segue:

- Transmissão e subtransmissão: 750; 500; 230; 138; 69; 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;

Desde meados do início do uso de sistemas de transmissão, pesquisas estão sempre tendendo a elevar os níveis para transmissão devido as inovações de capacidade dos equipamentos, baixa queda de tensão e redução das perdas na linha. Com o crescimento constante de carga, necessita-se cada vez mais de tecnologias e estratégias que possam otimizar o fluxo de potência, como a elevação do nível da tensão de transmissão [8].

Em 2011 foi realizado um levantamento pela ANEEL [17] junto a 101 distribuidoras (concessionárias e permissionárias) obtendo um panorama das tensões nominais de atendimento no Brasil. Notou-se que a padronização ideal seria de fato 100% dos valores normatizados pela ANEEL, e valores que contrariam a reguladora afetam o consumidor final que possui instalações e equipamentos para um dado nível, e que em

muitos casos não operam na faixa designada trazendo riscos à integridade em longo prazo. A Tabela 2.1 [17] informa os dados do levantamento.

Tabela 2.1 - Redes de distribuição existentes nas 101 distribuidoras [17]

	BT		MT		AT	
	Padronizada	Não padronizada	Padronizada	Não padronizada	Padronizada	Não padronizada
Número de Tensões	5	6	4	26	2	2
Porcentagem de Unidades Consumidoras	87,24%	12,76%	63,08%	36,92%	95,95%	4,01%
Porcentagem de Linhas e Redes	89,78%	10,22%	84,92%	15,08%	98,02%	1,48%

2.6 Instalações e dispositivos importantes no desenvolvimento do SEP

Se nota que o sistema elétrico de potência necessita de harmonia entre seus componentes como dispositivos, equipamentos e instalações. Através de uma atividade coordenada e eficiente se consegue transferir potência de forma eficaz. Alguns desses componentes possuem função vital para o fornecimento de energia.

2.6.1 Transformador

O transformador é um dos principais componentes no sistema elétrico de potência, sendo utilizado nas subestações e em todo sistema, ajustando os níveis de tensão e/ou corrente de operação. Este equipamento possui muitas utilidades e opera com diversos níveis de tensão e corrente. Através de conceitos eletromagnéticos o transformador consegue reduzir ou aumentar a grandeza desejada proporcionalmente na sua saída, ou seja, há uma relação de transformação [8].

Percebe-se que a modificação no nível do parâmetro, principalmente no da tensão, pode ser de grande utilidade para o controle de tensão e de potência reativa, pois o transformador pode “forçar” um nível de tensão se necessário. Para isto, este equipamento

conta com tap, que é uma ferramenta interna que atua modificando o número de enrolamentos utilizado [15].

Outra utilidade dos transformadores é reduzir o nível da grandeza para o monitoramento da rede através de transformadores de corrente (TC's) e transformadores de potencial (TP's), visto que quando se opera em média ou alta tensão raramente se encontra equipamentos de medição e aferição que suportam tais tensões. Mesmo que suportem geralmente não são viáveis economicamente, logo os TC's e TP's são métodos alternativos para que o nível da grandeza seja reduzido a um valor seguro para o usuário ou para o equipamento.

A solução para os primeiros problemas de transmissão e queda de tensão obteve êxito em 1886, com o primeiro transformador em nível comercial, solucionando alguns problemas de transmissão. O transformador instalado em corrente alternada, atraiu a indústria com suas vantagens em comparação à corrente contínua, como a possibilidade de transmitir energia em vários níveis de tensão e com menores perdas devido a menor dissipação de calor. A transmissão em corrente contínua necessita de equipamentos de alta dissipação de calor e com isso equipamentos mais caros tornando ainda mais desvantajoso para os padrões da época [8,15].

É muito comum visualizar transformadores em postes de distribuição, sendo responsáveis por reduzir a tensão entre distribuição primária e secundária, para fornecimento em baixa tensão. Ao contrário dos transformadores de distribuição que são posicionados e fixados nos postes, há também transformadores de grandes dimensões, instalados no solo e em subestações necessitando de bastante espaço, a Figura 2.4 [18] ilustra um transformador abaixador de 230 kV para 13.8 kV, medindo aproximadamente 4.8 metros de altura e 5.2 metros de comprimento [18].

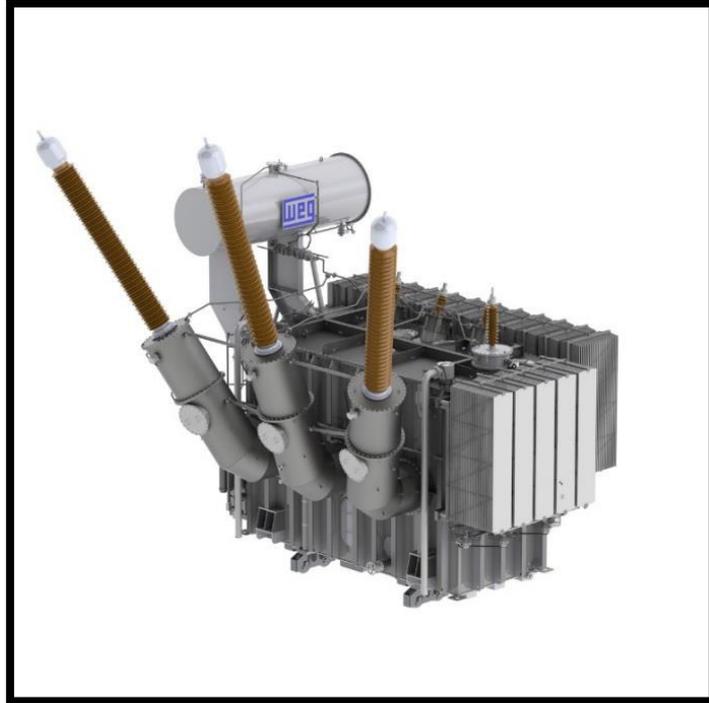


Figura 2.4 - Transformador de potência de grande porte [18]

O transformador de grande porte possui dispositivos sofisticados como isoladores de alta tensão alocados na parte superior do equipamento, por onde passam os condutores, e caminhos para que seu líquido dielétrico possa ser resfriado, além de sistema de proteção. Todas essas ferramentas auxiliares possuem o intuito de elevar a segurança e eficiência do equipamento [13].

2.6.2 Subestação

A subestação é uma instalação que utiliza componentes tais como condutores e equipamentos no intuito de modificar as principais características da energia elétrica, tensão e corrente, adequando essas grandezas a um nível de utilização [9].

De acordo com [19], existe 4 tipos de subestações:

- Subestação elevadora: Localizada na saída das turbinas dos geradores, e tem por função elevar o nível de tensão para níveis de transmissão e subtransmissão. Possibilitando que a energia produzida escorra pelas linhas de transmissão;

- Subestação de manobra: Responsável por chavear as linhas de transmissão e conectar tais linhas com os barramentos, geralmente localizada no fim das linhas originadas das usinas geradoras;
- Subestação de distribuição: A mais comum entre os tipos de subestações, é designada para abaixar os níveis de tensão em valores nominais para alimentação do consumidor final; e
- Subestação do consumidor: Atende os requisitos técnicos de um consumidor em específico;

A Figura 2.5 [autor] ilustra um sistema simplificado para demonstrar a sequência de conexão entre as subestações [19], afim de esclarecer as funções de cada uma no sistema elétrico de potência.

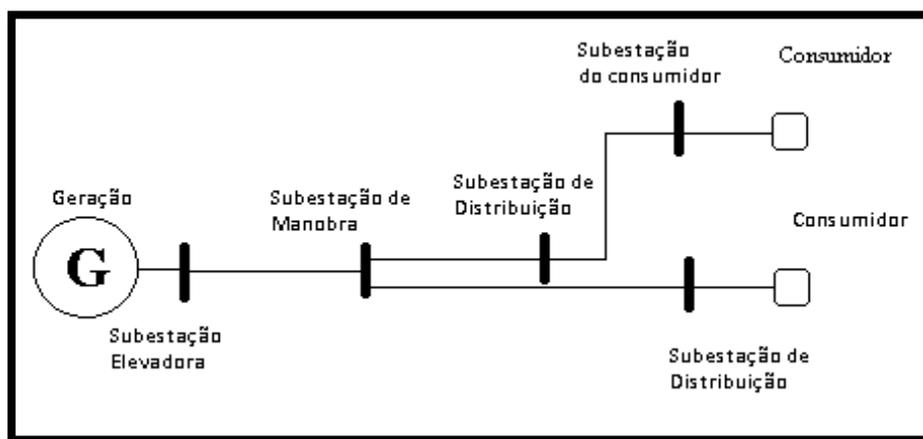


Figura 2.5 - Sistema simplificado e ilustrativo de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica [autor]

Ressalta-se que pela importância dessas instalações, principalmente as subestações elevadoras e de manobra que dominam funções vitais para o sistema elétrico de potência, estas merecem uma atenção maior por parte dos operadores do sistema. Logo, se percebe que pela localização e função no sistema elétrico, uma falta em uma subestação elevadora ou de manobra pode vir a comprometer inúmeros consumidores interrompendo o fornecimento de energia elétrica.

Um projeto de subestação deve sempre considerar questões como estabilidade, confiabilidade, capacidade e crescimento de carga, sendo amparadas por medidas que

buscam segurança, fácil acesso, integridade dos equipamentos e modificação futura na planta [19].

2.6.3 Geração

O sistema de geração é baseado na conversão da energia mecânica em energia elétrica através de fenômenos eletromagnéticos. As fontes de força mecânica mais utilizadas são as provenientes da natureza. Os elementos da natureza mais usados para realizar essa tarefa são a água, o vento e combustíveis fósseis, sendo o último utilizado para combustão nas grandes caldeiras no intuito de produzir vapor. A Figura 2.6 [20] ilustra uma usina baseada em combustível fóssil. A ideia central é girar turbinas que estão acopladas no eixo do gerador induzindo tensões em seus terminais, esta é a forma mais convencional de geração de energia elétrica [20].

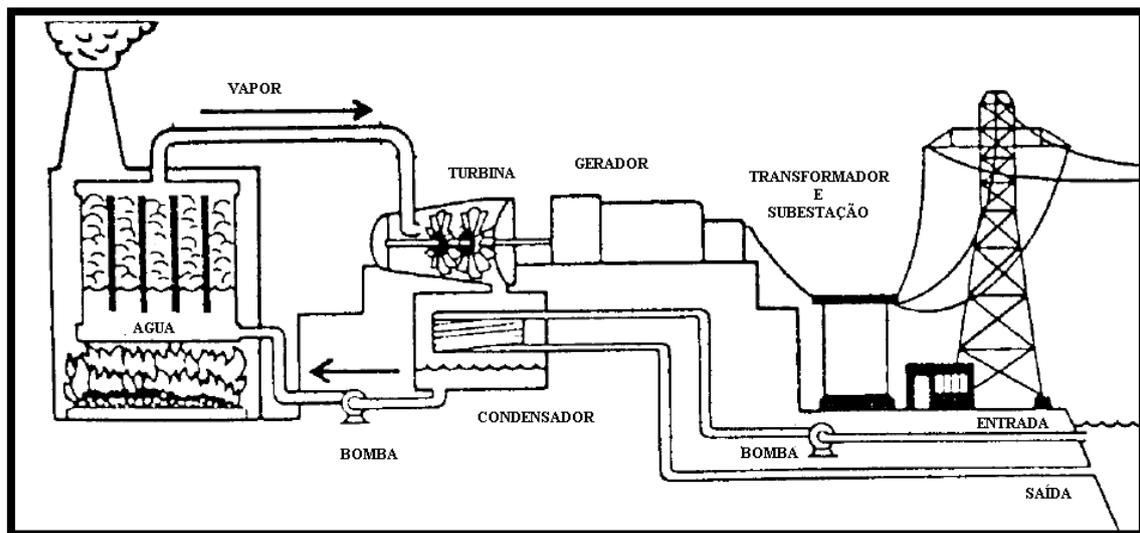


Figura 2.6 - Esquema de planta de geração baseada em combustível fóssil [modificado pelo autor]

Existe duas nomenclaturas em relação à funcionalidade da usina geradora onde a primeira é a “usina baseada em carga”, na qual é a usina principal e que opera com grande capacidade, muitas vezes próxima a sua capacidade máxima, e a “usina reserva” que entra em operação ou quando há uma solicitação maior de carga da usina principal ou quando

há interrupção das atividades da principal. As usinas reservas possuem benefícios como entrar e sair de operação mais rapidamente e geralmente com custos mais baixos em relação a sua construção, porém a energia gerada é mais cara [20].

O gerador síncrono de corrente alternada é a principal máquina utilizada nas usinas. A frequência da corrente elétrica gerada é diretamente relacionada a frequência de rotação do seu eixo, ou seja, suas frequências relacionam-se de forma proporcional, por isto ditas síncronas. Está é uma das vantagens desta máquina, pois a frequência permanece fixa independente da carga que o gerador está suprindo [8].

A conexão do sistema de geração com o sistema de transmissão é realizada através da subestação elevadora que é localizada na própria usina de geração. As tensões nos terminais do gerador geralmente não ultrapassam 35 kV e a subestação é responsável tanto pelo chaveamento e proteção relacionado aos possíveis distúrbios na rede, quanto pela transformação da tensão através de transformadores de potência para o sistema de transmissão [15].

O sinônimo de instabilidade para o sistema de geração pode ser definido como a implicação da perda de sincronismo dos equipamentos da rede, ou seja, a dificuldade em manter as máquinas em sincronismo. Este fator de instabilidade é influenciado pelo dinamismo dos ângulos do rotor do gerador e ângulo das potências. A falta de sincronismo na geração pode ocasionar a retirada de operação dos geradores, tentando evitar uma aceleração ou desaceleração brusca do rotor, dependendo do caso, podendo causar danos irreparáveis como a perda total da máquina [15].

O sistema de geração é suscetível a vários eventos originados na rede elétrica, pois uma falta em um elemento crítico da rede causará impactos de várias formas, modificando as características do sistema e dos níveis de tensão na transmissão e nos barramentos por exemplo, implicando em efeito cascata, pois como as características da rede se alteram, é natural que dispositivos identifiquem o distúrbio e tentem isolar o elemento defeituoso.

As usinas geradoras estão, geralmente, distantes dos grandes centros de consumo. Em um projeto de construção de uma usina geradora vários fatores devem ser analisados para a execução plena do projeto para evitar imprevistos desagradáveis e conseqüentemente prejuízos, como exemplo cita-se o estudo de requisição de licenças ambientais na construção de uma hidrelétrica, o estudo do seu impacto no ecossistema e se tais impactos justificam sua execução. No caso de uma termelétrica a disponibilidade

do combustível fóssil e a logística são fatores relevantes. Devido a magnitude da construção e toda sua complexidade, somente a fase de projeto pode durar mais de 5 anos, algumas das razões para isso são o levantamento de danos e licenças [20].

O fator disponibilidade de matéria prima é muito importante na escolha do tipo de usina que irá predominar na sua geração. Apesar de alguns países possuírem rios extensos, estes podem enfrentar longos períodos de estiagem ou outros fatores adversos. De acordo com um levantamento de 2016 pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), no Brasil, entre as usinas de geração de energia predomina-se a hidrelétrica, devido ao fato da vasta disponibilidade de quedas d'água. A Figura 2.7 [autor] apresenta um gráfico com a capacidade instalada no Sistema Interligado Nacional (SIN) e a diversidade na utilização de matérias prima e quanto cada uma coopera para esta capacidade, totalizando 142.042 MW [21].

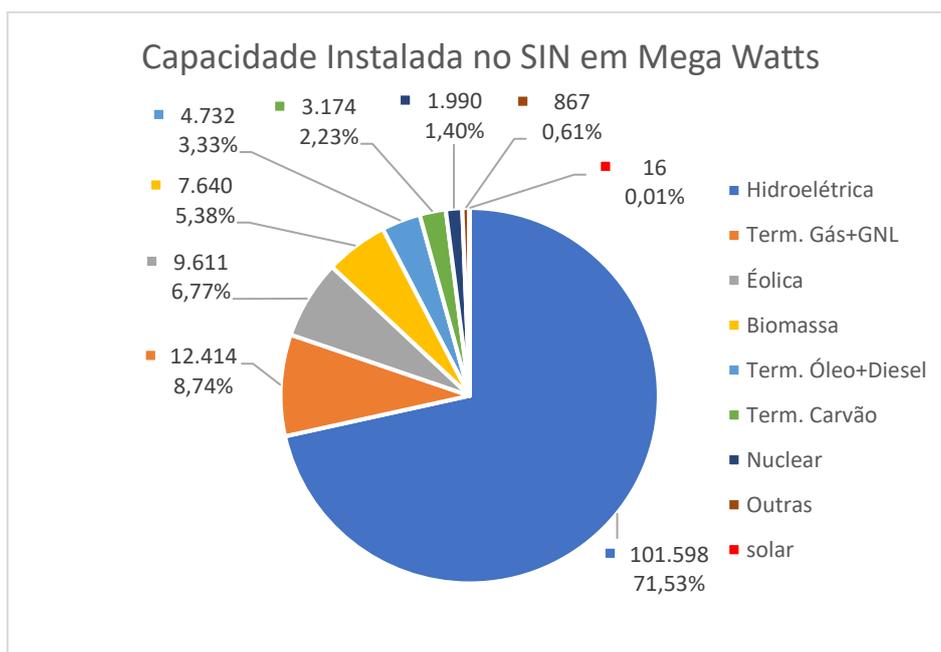


Figura 2.7 - Gráfico do tipo de energia e sua capacidade instalada no SIN em 2016 [autor]

A estabilidade do sistema elétrico é essencial, porém se percebe que a estabilidade do sistema de geração recebe uma maior atenção devido a sua função e posição no sistema elétrico de potência. Havendo uma necessidade maior de controle e monitoramento em tempo real, trocando informações com seus sistemas de transmissão e distribuição, bem como com outras usinas que estão interconectadas.

2.6.4 Sistemas de Transmissão

A função primordial de um sistema de transmissão é transferir potência elétrica das usinas geradoras para os centros de cargas, iniciando na saída da subestação da usina e terminando na subestação da subtransmissão, através de linhas aéreas ou cabos subterrâneos. Em 1891 a primeira linha de transmissão trifásica na Alemanha entra em atividade, transmitindo energia por 179 km com nível de 12 kV [8].

As linhas aéreas são utilizadas para longas distâncias atravessando geralmente as áreas abertas e rurais do país, enquanto que os cabos subterrâneos são utilizados geralmente para situações especiais, como em áreas urbanas ou conexões subaquáticas [8]. De acordo com [22], os custos das linhas aéreas chegam a ser de 6 a 10% inferiores aos cabos a cada milha (1.6 km).

Este sistema possui inúmeros benefícios, desde baixo custo da eletricidade em relação a magnitude de potência transferida, acesso a usinas de energias renováveis situadas distantes dos centros populacionais e a possibilidade de transferir energia de fontes geradoras alternativas em caso de falhas nas fontes principais [8].

O congestionamento da linha de transmissão é uma grande preocupação neste sistema. Os investimentos, ou a falta destes, não acompanham o crescimento de carga, logo, os custos com congestionamento em sistemas elétricos tendem a elevar. Além disso, o congestionamento constante no sistema de transmissão implica em uma operação próxima de seus limites, o que é arriscado devido a falta de flexibilidade em caso de contingências. Um sistema de controle com boas estratégias e um maior investimento em medidas podem minimizar o problema de congestionamento [8].

A manutenção no nível da tensão é muito importante em sistemas de transmissão, visto que, este sistema está conectado entre as usinas geradoras e aos barramentos próximos às cargas, logo, uma modificação brusca neste nível acarreta riscos de blecaute. Por exemplo, uma queda no nível da tensão pode dessincronizar as máquinas e as unidades geradoras [8]. De acordo com [15], o principal fator que causa instabilidade no nível da tensão é a dificuldade do sistema elétrico em atender a demanda de potência reativa.

As linhas de transmissão são condutores dispostos e separados por estruturas metálicas (torres de transmissão). Estas estruturas tem a função de posicionar, isolar e proteger as linhas de descargas elétricas ou ações humanas, de forma eficaz e eficiente. A Figura 2.8 [23] ilustra torres de transmissão aérea. Devido a fenômenos eletromagnéticos envolvendo os condutores as linhas necessitam de um espaçamento previamente projetado, dependendo do tipo de sistema utilizado (CA ou CC), material do condutor e nível de tensão. As estruturas, entretanto, possuem formatos que levam mais em consideração as intemperes do meio ambiente que está instalada, sempre atendendo as condições que otimizam a transmissão de energia elétrica [8].



Figura 2.8 - Torres de transmissão aérea [23]

A necessidade da indústria de transmitir energia com nível de tensão cada vez maior é devido ao interesse pela redução de perdas elétricas na linha de transmissão. Um nível de tensão elevado implica em um nível de corrente menor, diminuindo o efeito joule nos condutores.

Os condutores são geralmente de alumínio ou alguma mistura com alumínio, pois tais condutores precisam atender a um conjunto de características como boa resistência mecânica, alta condutividade, leve, resistência à oxidação e baixo custo. O alumínio atende a esses critérios além de ser abundante na natureza [8]. Outros fatores que devem ser levados em consideração na escolha do condutor é capacidade térmica para suportar

sobrecargas por longos períodos, além de correntes de curto circuito, que implica na elevação de temperatura no condutor.

Apesar das vantagens das inovações e questões de segurança, o custo benefício é bastante relevante se tratando de instalações e equipamentos da rede elétrica. Logo no início de operação das primeiras linhas de transmissão e usinas geradoras notou-se que a transmissão merecia mais interesse, pois se percebeu a praticidade e maior viabilidade em transferir energia há longas distâncias, mesmo com suas dificuldades e limitações, do que construir usinas para cada centro de consumo.

O sistema CA trifásico é o convencional utilizado para a transmissão de energia elétrica. Outra função importante das linhas de transmissão é conectar sistemas vizinhos, ou seja, usinas de regiões distantes formando sistemas interconectados. Estas conexões exercem benefício mútuo entre os sistemas em relação a congestionamento, monitoramento da rede em geral e sistemas de controle implicando na otimização da confiabilidade [8].

Há também transmissão de energia em alta tensão em sistemas CC, conhecido pelo acrônimo em inglês HVDC (*High-Voltage Direct Current*), como mostrado na Figura 2.9 [24]. Tal sistema utiliza transformadores permitindo um nível de tensão adequado para os conversores que são os dispositivos responsáveis pela comunicação entre os sistemas CA e CC, utilizando chaves que comutam as fases do sistema CA. Este tipo de transmissão é classificado pelos números de condutores utilizados [24].

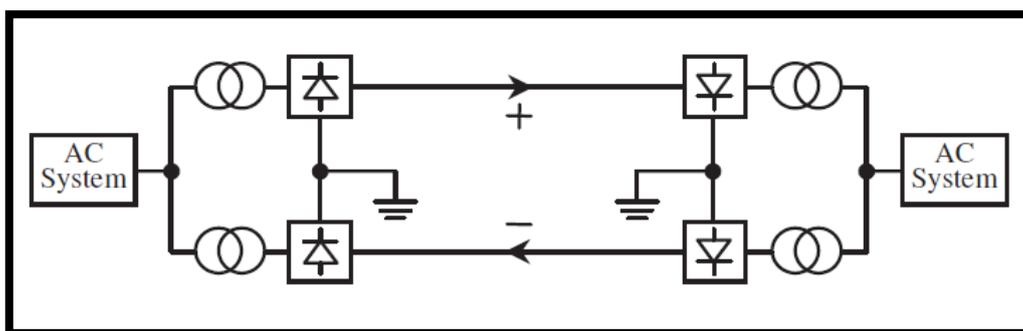


Figura 2.9 - Esquema de circuito HVDC [24]

Uma das grandes vantagens da transmissão HVDC é a conexão entre dois sistemas assíncronos, ou seja, ou possuem frequências nominais diferentes ou possuem problema de estabilidade. Um exemplo real de conexão entre sistemas assíncronos é a hidrelétrica binacional de Itaipu, parceria entre Brasil e Paraguai. O Paraguai utiliza a frequência elétrica de 50 Hz, diferentemente do Brasil que utiliza 60 Hz, logo a conexão de energia entre esses dois sistemas é através de conversores do sistema CC.

Com a utilização de tiristores a transmissão em corrente contínua se torna bastante viável. Em 1972 foi lançada a primeira linha HVDC comercial utilizando tiristores. A diminuição constante no tamanho e no custo dos dispositivos fez com que a transmissão em corrente contínua fosse motivo de interesse crescente. Estas linhas, comparadas as linhas de transmissão CA só são vantajosas para distâncias que excedem 600 km, se forem aéreas, e 30 km, se forem subterrâneas. Por este motivo, geralmente, só são implementadas em casos especiais não conseguindo competir com a predominância das linhas já existentes em corrente alternada, apesar de inúmeras vantagens em confiabilidade e capacidade de transferência de grandes blocos de potência [15].

2.6.5 Distribuição

Se evidencia que todos os esforços realizados pelos sistemas de geração e de transmissão são para manter a qualidade de energia dos consumidores finais, que estão conectados ao sistema elétrico através do sistema de distribuição. Este sistema é dividido em distribuição primária e secundária, a primária opera na faixa da média tensão e a secundária na de baixa tensão. Tais operações só são possíveis através de transformadores de potência, que modificam o nível de tensão e corrente de acordo com a necessidade [8].

Há diferentes tipos de consumidores, classificados como industriais, comerciais e residenciais. Os industriais são responsáveis por uma grande parcela do consumo de energia elétrica, dependendo do nível de carga, podem até ser supridos diretamente das subestações de subtransmissão [18]. Se percebe que muitas são as classificações utilizadas para distinguir os consumidores, como nível da tensão utilizada, se a instalação é monofásica ou polifásica e até mesmo em relação a demanda instalada do consumidor. Entretanto, estas classificações diferem para cada região de acordo com os órgãos locais responsáveis por administrar o mercado de energia elétrica.

O tipo de fornecimento de energia elétrica pela distribuição é muito diversificado, devido as características e requisitos de cada consumidor. Os industriais, por exemplo, utilizam muitos motores ou equipamentos que possuem características predominantemente indutiva. A concessionária deve ter transparência com seus consumidores e apresentar as informações corretas e necessárias como variação da tensão de suprimento, tensão de fornecimento, garantia de suprimento da carga dentro de condições satisfatórias e entre outros fatores, tornando o fornecimento de energia mais seguro e confiável [9].

O sistema de distribuição e os consumidores finais formam “o ponto final” do sistema elétrico, estando sujeitos à distúrbios que porventura ocorram nos sistemas elétricos superiores (geração, transmissão e subtransmissão). Estes distúrbios podem se propagar aos consumidores e causar danos temporários ou permanentes nos seus equipamentos elétricos. Além disso, os distúrbios podem causar desligamentos e interromper, por um longo período, o fornecimento de energia elétrica. Porém, as interrupções (blecautes) de maiores proporções, ou seja, aquelas que atingem várias regiões, ocorrem geralmente na geração ou nos sistemas de transmissão. Este último é o tema de interesse nesta monografia.

2.7 Controle de sistemas de potência

Os sistemas de controle disponíveis na geração e na transmissão são responsáveis pela monitoração e segurança na operação dos sistemas elétricos. As instalações locais de controle, no nível de geração, estão instaladas na usina geradora e são responsáveis pelo bom desempenho dos geradores. Já as instalações de controle centralizado podem estar localizadas em áreas entre as instalações locais que pertencem ao sistema elétrico [8].

Todos os esforços dos sistemas de controle são para garantir estabilidade transitória angular e alta confiabilidade na operação da rede elétrica. Algumas medidas e ações desses sistemas estão ilustradas na Figura 2.10 [21].



Figura 2.10 - Medidas e atuações em sistemas de controle [21]

As interconexões entre sistemas é uma estratégia útil para sistemas de controle. A troca de informações e monitoramento desses sistemas ajudam a identificar possíveis problemas. Caso uma usina apresente sobrecarga, a transferência de potência de uma usina interconectada pode solucionar temporariamente o problema de congestionamento [8].

O tipo de equipamento utilizado e a atividade necessária para garantir a estabilidade de sistemas variam entre os estágios do SEP, onde cada um possui característica e equipamentos próprios que enfrentam problemas distintos devido suas complexidades. Vários dispositivos são utilizados no intuito de atenuar distúrbios na rede.

2.7.1 Controle na geração

O sistema de controle da geração atua principalmente no controle de tensão nos terminais do gerador, sendo conhecido como regulador automático de tensão (sistemas de excitação). Já o torque imposto pela turbina no gerador é controlado pelo regulador de velocidade. Sistemas de excitação aumentam a confiabilidade do gerador e são utilizados para auxiliar em medidas corretivas, caso ocorram distúrbios severos no sistema [15].

Quando há uma sobrecarga súbita a tendência das máquinas síncronas é responder a solicitação através de incremento no ângulo do rotor. Para que isto não ocorra, o sistema regulador de velocidade atua no sentido de corrigir a alteração na velocidade angular do gerador. Dependendo da magnitude da sobrecarga as medidas podem não ser suficientes para que isto ocorra. Outro fator adverso é a queda ou aumento repentino no nível de tensão, nos terminais do gerador. Neste caso, é o regulador de tensão que atua para reestabelecer o nível de tensão do gerador para um valor de referência. Caso nenhuma dessas ações resulte no efeito esperado, um, ou mais geradores podem perder o sincronismo, e estas máquinas serão desligadas agravando ainda mais a situação.

2.7.2 Controle na transmissão

Sistema de controle alocados nos sistemas de transmissão atuam principalmente na regulação de tensão, no alívio de congestionamento por sobrecargas e na redução da potência reativa das linhas [8,15]. É necessário observar que tanto as linhas quanto os transformadores possuem limitações de capacidade de transferência de potência. Logo, a sobrecarga e congestionamento na transmissão pode sobrecarregar os condutores e equipamentos, causando atuação da proteção ou até estresses mecânicos por uso excessivo de suas capacidades.

Os sistemas de transmissão podem conter reguladores automáticos de tensão, compensadores síncronos ou estáticos, e os conhecidos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*), para minimizar ou até solucionar os problemas causados por distúrbios severos. Estes equipamentos contribuem bastante para garantir uma operação segura e assim evitar danos maiores aos consumidores e ao próprio sistema elétrico. Os equipamentos que fazem parte de um sistema elétrico, e os respectivos períodos de tempo de atuação (milissegundos), estão ilustrados na Figura 2.11 [25].

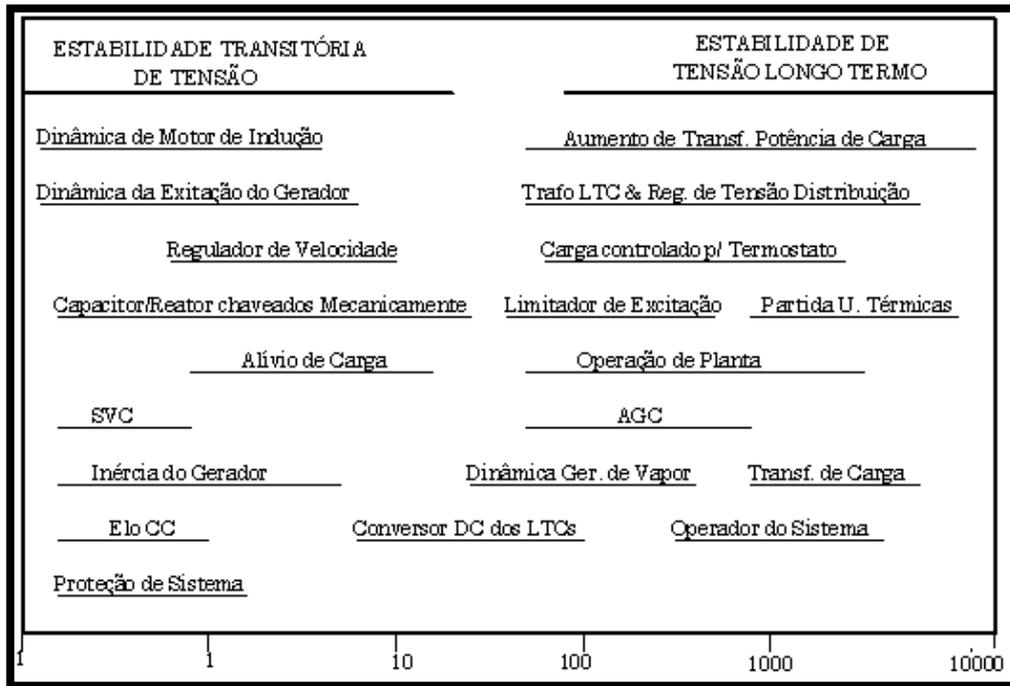


Figura 2.11 – Períodos de tempo de atuação [25]

3 PRINCIPAIS CAUSAS DE BLECAUTES NOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

3.1 Preâmbulo

Este capítulo reúne as causas mais recorrentes de blecautes ao redor do mundo. É necessário salientar que as causas são influenciadas por muitos motivos, entretanto há aspectos semelhantes nos eventos e ações que originam a interrupção do fornecimento de energia elétrica aos consumidores.

3.2 Introdução

Muitos motivos podem interferir na eficiência da transmissão de energia elétrica de forma segura, porém algum desses motivos se repetem de forma constante, enquanto outros são casos isolados. A palavra blecaute deriva da palavra inglesa “*blackout*”, termo utilizado pelos engenheiros eletricitas para descrever a interrupção no fornecimento de energia elétrica para uma determinada região. De acordo com [26], blecaute é a falta de potência, sendo uma interrupção parcial ou completa do fornecimento de energia elétrica. Apesar dos esforços empregados para manter o suprimento de energia elétrica, desde o início da indústria da eletricidade até os dias atuais, em alguns casos, o blecaute é inevitável, ou seja, sua incidência envolve inúmeros fatores. Alguns desses fatores estão além do controle humano como os provenientes de fenômenos da natureza.

A indústria da eletricidade é uma das que mais movimentam dinheiro no mundo. Porém, o custo benefício é algo constantemente considerado, desde a fase de projeto à fase final de conclusão da obra. Um simples incremento, no valor de um certo equipamento ou até na reestilização de algum sistema, causa um grande efeito econômico no custo final. Apesar de algumas medidas serem viáveis tecnicamente, estas podem não ser viáveis economicamente. Por isto, as empresas focam nos principais e mais simples meios de prevenção e proteção contra blecautes, respeitando sempre o custo benefício, pois o sistema elétrico é suscetível a vários eventos. Todos os gastos são repassados ao consumidor final. Logo, uma rede elétrica com muitos dispositivos, que atuam para

garantir confiabilidade e alimentação contínua, irão tornar o valor de tarifação extremamente elevado, sendo mal recebida pela sociedade [21].

De acordo com [27], a interrupção de energia elétrica em grande escala possui elevado impacto socioeconômico, como exemplo cita-se o blecaute de 14 de agosto de 2003 envolvendo os Estados Unidos e o Canadá, durando 48 horas para reestabelecer energia em todos os consumidores afetados. Estima-se que os prejuízos na época, foram de aproximadamente 8,6 bilhões de dólares. Neste valor está contido o custo total em consequências diretas e indiretas do incidente.

Em casos que o reestabelecimento de energia demora mais que algumas horas, se percebe que a região afetada paralisa praticamente todas as suas atividades econômicas, tornando os blecautes uma questão muito relevante e delicada para a sociedade. Além disso, gera inconveniência e sensação de vulnerabilidade para as pessoas afetadas.

A utilização de geração emergencial, em caso de blecaute, geralmente é realizada por serviços essenciais como instalações hospitalares, controle de tráfego aéreo, sistemas de segurança nacional entre outros, sendo estes os prioritários no reestabelecimento do fornecimento, por motivos relacionadas à preservação e segurança da vida dos cidadãos.

3.3 Conceitos e considerações importantes para análise de blecautes

A rede elétrica está sujeita a frequentes distúrbios, entretanto, o sistema de controle é responsável por atenuar e lidar com tais contingências. Geralmente, os distúrbios são atenuados automaticamente por equipamentos implantados para este propósito, como reguladores de tensão e de frequência. Se percebe, que a maioria dos relatos de blecautes são devido a incidentes nos sistemas de geração e de transmissão, quando as atuações automáticas e manuais (operador) não são suficientes.

De acordo com [28], blecautes de pequena escala acontecem constantemente, já os de grande escala raramente. Em relação a este trabalho, se considera apenas os blecautes em grande escala, que são os que afetam grandes regiões e todos os tipos de consumidores.

Vários sistemas elétricos ao redor do mundo, inclusive do Brasil, se empenham em otimizar a confiabilidade, além de mitigar as contingências através do preenchimento do critério N-1. O critério determina que o sistema elétrico apesar de sofrer a perda de qualquer equipamento, deve continuar operando sem que haja interrupção de energia elétrica, ou seja, que mesmo havendo contingências o sistema deve continuar suprindo os consumidores, sem modificar suas características em condição normal e sem sobrecarregar equipamentos e instalações [21].

Uma das medidas adotadas para atender ao critério N-1 é a interconexão com sistemas vizinhos. Se um sistema sofre uma perturbação, como sobrecarga, é possível solicitar ajuda para os demais operadores. Os sistemas vizinhos não devem estar operando próximo aos seus limites, para que atenda parcialmente ou integralmente a demanda do sistema afetado, aliviando os efeitos do incidente [28].

O compartilhamento de demanda com interconexões em momentos de emergência é muito eficaz na mitigação do congestionamento, sendo possível através do fluxo de potência entre as linhas de transmissão [29]. A não ser que o blecaute tenha danificado o circuito por completo, geralmente há um evento inicial que muda a característica da rede. Entretanto, geralmente não é suficiente para a perda imediata do fornecimento [28].

Curto-circuito, sobrecarga e falha em proteção são causas mais comuns que estão entre os eventos iniciais. A Tabela 3.1 [28] ilustra a ocorrência de eventos iniciais, em alguns casos de blecaute em diferentes países. É importante observar que o fator atuante, por exemplo de um curto-circuito, pode ser a abertura de uma linha de transmissão através de fenômenos naturais (descargas elétricas, por exemplo), ou seja, a causa é devido ao fenômeno e a consequência é o curto-circuito.

Tabela3.1 - Eventos iniciais de blecautes [modificado pelo autor]

Blecautes	Eventos iniciais			
	1	2	3	4
09/11/1965 Estados Unidos		√	√	
07/1978 Nova Iorque			√	
27/12/1983 Suécia		√		
08/06/1995 Israel	√			
12/03/1996 Flórida		√		
16/04/1996 Estados Unidos	√	√		
02/07/1996 Estados Unidos	√			
10/08/1996 Noroeste da California		√		
26/08/1996 Nova Iorque			√	
21/09/1996 Pitsburgo			√	
11/03/1999 Brasil	√			
12/01/2003 Croácia	√		√	
14/08/2003 Norte dos Estados Unidos e Canadá	√			
28/08/2003 Londres			√	
23/09/2003 Leste da Dinamarca e Sul da Suécia				√
28/09/2003 Itália	√	√		
12/07/2004 Atenas e Sul da Grécia				√
14/03/2005 Sul da Austrália	√			
Total : 18	8	6	6	2
1- Curto Circuito, 2- Sobrecarga, 3- Falha na proteção, 4- Perda de planta de geração				

Não surtindo os efeitos esperados nas medidas para mitigar os efeitos da falha em curto tempo, as consequências alcançam os eventos cascata, onde uma série de dispositivos detectam a falha e se isolam do problema por autoproteção, resultando em interrupção por completo do fornecimento. Os eventos cascata causam oscilações dos parâmetros da rede como tensão, corrente e frequência. A progressão dos eventos no blecaute se divide em 5 fases distintas, sendo estas: pré-condição, eventos iniciais, eventos cascata, estado final e restauração [28]. Estas fases são demonstradas na Figura 3.1 [28] e estão em ordem de incidência.

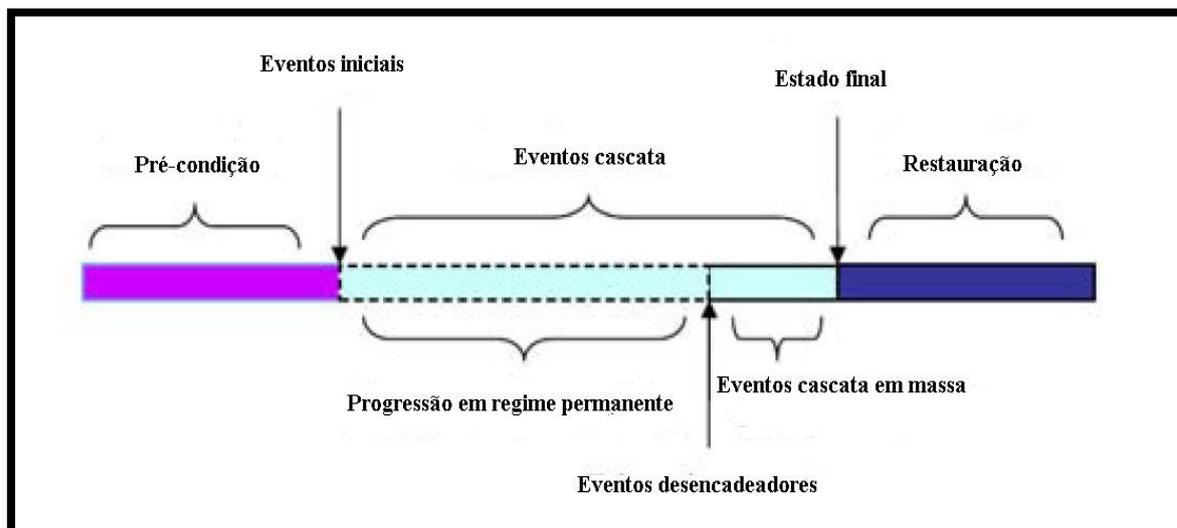


Figura 3.1 - Fases de um blecaute [34]

Se percebe que em alguns casos esta ordem não é seguida, já que eventos iniciais podem desencadear imediatamente eventos em cascata, retirando uma linha de transmissão de operação em poucos segundos.

Programas computacionais se tornam ferramentas imprescindíveis no controle, monitoramento e prevenção de sistemas elétricos [30]. Esses programas conseguem supervisionar e atuar automaticamente sem/com a intervenção humana (operadores), reduzindo, por exemplo, o risco de perda de qualquer forma de estabilidade (transitória angular, tensão e de frequência). Um sistema muito utilizado nos dias atuais é o *supervisory control and data acquisition* (SCADA), sendo este um sistema remoto de controle e monitoramento do sistema elétrico [29].

Os sistemas que utilizam tecnologia *smartgrid* possuem ferramentas importantes contra distúrbios na rede, separando a parte afetada através de comunicação, quase que em tempo real, com outros equipamentos que identificam o problema, cooperando para evitar danos maiores a equipamentos vizinhos e preservando o fornecimento contínuo [30].

Sistemas modernos possuem algumas dificuldades que diferem dos sistemas antigos devido as novas tecnologias e técnicas desenvolvidas para evitar a interrupção no fornecimento de energia elétrica. Logo, as incidências e tipos de blecaute se diferem também pela época de ocorrência, sendo muitos eventos comuns para uma determinada

época e não para outra. Além das questões climáticas de determinada região, as questões socioeconômicas e culturais também refletem nos motivos para as interrupções. De acordo com [31], as 3 principais causas de blecautes, são: furacão ou vento forte, tempestade de neve e falha em equipamento.

Blecautes relacionados a falha em equipamentos e sistemas fracos possuem maior ocorrência em continentes subdesenvolvidos como África, Ásia e América do Sul. Já as ocorrências em continentes como América do Norte, Europa e Oceania há maior incidência de furacão/vento forte [32]. A Figura 3.2 [32] ilustra, através de gráfico, o número total de grandes blecautes, referente a incidências por continente, separando os dados em períodos (que estão em anos): antes de 2000, entre 2000 e 2010, e após 2010 até 2016.

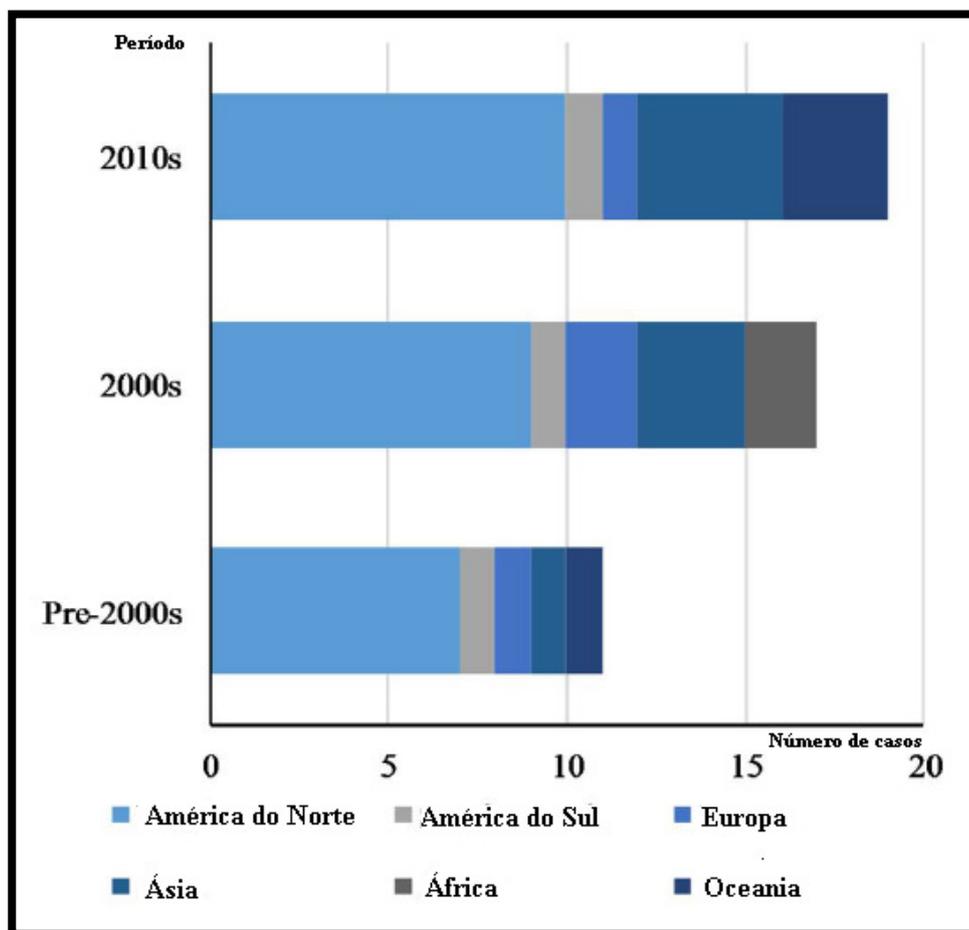


Figura 3.2 - Número de casos por período em continentes [modificado pelo autor]

Uma das razões, para o crescimento de ocorrências de blecautes ilustrados na Figura 3.2, pode ser o aumento na eficiência das linhas de transmissão, implicando que as linhas de transmissão operam próximas de seus limites técnicos, por períodos mais longos, reduzindo a capacidade em emergências ou sobrecargas. Uma das justificativas, para essa condição, é que a evolução dos sistemas elétricos não consegue acompanhar o crescimento das cargas [29]. Deve-se levar em conta que as faltas são mais monitoradas, investigadas e divulgadas atualmente do que no início da indústria da eletricidade [32].

A análise de blecautes é algo muito complexo devido aos diferentes fatores e variedade de equipamentos envolvidos. Por isto, quando se analisa um determinado blecaute, geralmente se encontra mais de uma causa condicionante.

Neste trabalho, alguns dos principais blecautes mencionados podem estar incluídos em mais de uma classificação de causa. De acordo com a causa, exemplos de grandes blecautes são mencionados no intuito de comprovar e consolidar o impacto nos sistemas elétricos.

3.4 Blecautes devido ao ambiente e fenômenos da natureza

Observa-se que esta causa é a mais abrangente (diversidade de fenômenos naturais) e recorrente nos casos de interrupção no fornecimento de energia elétrica. Pode estar entre os eventos iniciais ou eventos únicos, dependendo da intensidade com que atinge o sistema. A região geográfica a qual o sistema elétrico está inserido, deve ser monitorada afim de elaborar medidas preventivas devido a situações recorrentes do clima local. Os fenômenos mais frequentes são [28,33]:

- Tempestade de inverno;
- Tempestade solar (elevadas temperaturas);
- Ventos fortes;
- Arco elétrico;
- Descarga atmosférica.

Alguns desses fenômenos naturais são combinações de outros fenômenos naturais, por exemplo, tempestades de neve podem ser acompanhadas por ventos fortes.

3.4.1 Pico de estações climáticas

As regiões que possuem clima temperado estão mais sujeitas a este tipo de causa devido as fortes características das 4 estações do ano. No entanto, as estações que causam maiores incidentes são o verão e o inverno intenso [33]. A Tabela 3.2 [28] expõe alguns casos de blecautes em condições adversas no verão e no inverno.

Tabela 3.2 - Blecautes ocorridos em períodos intensos de verão e inverno em várias regiões [modificado pelo autor]

Blecautes no pico do verão	Blecautes no pico do inverno
07/1978, Nova Iorque, EUA	09/11/1965, Estados Unidos
1987, Japão	19/12/1978, França
24/08/1994, Itália	01/1981, Idaho, Utah e Wyoming, EUA
08/06/1995, Israel	27/12/1983, Suécia
02/07/1996, 14 estados nos Estados Unidos	12/01/1987, França
10/08/1996, Califórnia, EUA	12/03/1996, Flórida, EUA
26/08/1996, Nova Iorque, EUA	01/1998, Canadá, Nova Iorque e Nova Inglaterra (EUA)
07/1999, Cidade de Nova Iorque, EUA	12/1998, São Francisco e Califórnia, EUA
14/08/2003, Estados Unidos e Canadá	12/01/2003, Croácia e Bósnia e Herzegovina
28/08/2003, Londres	14/12/1994, Arizona e Washington, EUA
12/07/2004, Grécia	

É importante ressaltar que os equipamentos elétricos e a maioria das estruturas da indústria da eletricidade são de metais, estando sujeitos, portanto, à adversidades climáticas. O estresse mecânico, sofrido ao longo do tempo, deve ser levado em

consideração, sendo necessário manutenções periódicas para análise de condição do material.

Um exemplo do efeito das fortes condições climáticas no inverno, e influência dos danos no sistema de transmissão, é o blecaute ocorrido na ilha grega de Cefalônia em 24 de janeiro de 2006. A interrupção no fornecimento de energia ocasionou-se devido à queda de torres de transmissão, em consequência do peso da camada de neve que envolve os condutores nessa estação do ano [31]. A Figura 3.3 [34] mostra o acúmulo de neve em uma linha de transmissão.



Figura 3.3 - Acúmulo de neve em uma linha de transmissão [34]

Os fenômenos naturais também influenciam na demanda de energia elétrica da sociedade. No caso de uma tempestade solar, é tendência que a sociedade busque meios de aliviar a sensação térmica com aparelhos elétricos para arrefecimento. A mesma situação se aplica, no uso de aparelhos elétricos, em fenômenos que tendem a abaixar a temperatura ambiente, sendo utilizado aquecedores de ar. Estes aparelhos possuem a característica de consumir muita energia elétrica [35].

Em 23 de julho de 1987, a cidade de Tóquio, no Japão, é atingida por um fenômeno anticiclone no verão, resultando em uma elevação acelerada de temperatura. Apesar do sistema de controle prever uma reserva de potência para possíveis incrementos na demanda, devido à estação do ano, tais ações não se deram por suficiente para atender a rápida elevação de carga, de forma estável. O incremento incomum na demanda resultou

da utilização, pelos habitantes, de aparelhos de ar-condicionado, na busca por redução na temperatura ambiente. A característica predominante indutiva do equipamento coopera para o aumento da corrente e a redução nos níveis de tensão do sistema elétrico. Como resultado, ocorreu um colapso de tensão (declínio rápido) no sistema de transmissão por volta de 13:19h, horário de descanso e de muito calor, levando à atuação do sistema de proteção, retirando de operação linhas de transmissão importantes para a alimentação da cidade, interrompendo o fornecimento de energia elétrica a 2.8 milhões de pessoas. [36].

3.4.2 Vento forte

A incidência de rajadas de vento acompanha muitos fenômenos naturais, como exemplo cita sua presença em tempestades de areia, de chuva e de neve, incluindo tornados. Além de estar presente nesses fenômenos, é muito comum nas estações do outono e da primavera. O impacto do vento forte em estruturas e condutores das linhas de transmissão causa muito estresse mecânico. Dependendo da intensidade dos ventos, ou dos fenômenos que este acompanha, pode romper as linhas ou derrubar estruturas, ocasionando no contato dos condutores com o solo, árvores ou até mesmo com outros condutores ocasionando curto-circuito [27].

A Figura 3.4 [37] expõe a força que o vento intenso pode causar, derrubando uma torre de transmissão, no caso específico em Itajaí (SC).



Figura 3.4 - Torre de transmissão atingida por ventos fortes [37]

O contato com árvores é muito comum em sistemas de distribuição e transmissão de energia, sendo um dos motivos devido a ventos fortes, que eventualmente levam a árvore a cair ou se inclinar, propiciando o contato. Nota-se que esta situação é muito recorrente em relatórios de grandes interrupções e faltas, pois há muita proximidade de vegetação com estruturas da rede elétrica. A manutenção em relação a poda é importante para evitar contato com linhas de transmissão, se tornando um dos eventos frequentes iniciais em blecautes de grandes proporções. A gestão de controle da vegetação próxima de condutores de energia elétrica desempenha papel vital para evitar faltas [28,29].

3.4.3 Arco elétrico

O arco elétrico ou arco voltaico, é um fenômeno resultante do rompimento da isolamento dielétrica do meio entre dois pontos. Este fenômeno é muito comum em subestações, principalmente na atividade dos disjuntores interruptores em tensões elevadas. Dependendo da duração do arco, este pode danificar severamente uma chave seccionadora convencional, por exemplo, e comprometer a sua capacidade de interrupção [8]. A Figura 3.5 [38] ilustra este fenômeno em chaves seccionadoras.



Figura 3.5 - Arco elétrico em chaves seccionadoras [38]

Um exemplo de falta, devido a formação do arco voltaico, é o blecaute ocorrido em 3 de julho de 2000, em Marrocos. A formação do fenômeno, em um isolador do barramento de uma determinada usina de geração, resultou na retirada de 2 unidades geradoras e 2 linhas de 225 kV conectadas à usina, causando sobrecarga no sistema de transmissão, ocasionando no ilhamento deste sistema [32].

Além do arco elétrico envolvendo chaves seccionadoras, há também a possibilidade do fenômeno de ruptura dielétrica do meio com objetos próximos de condutores, como as árvores ou com algum objeto em contato com o solo, fornecendo um caminho de corrente, causando curto-circuito [8]. É importante ressaltar que esta situação não possui contato direto com o objeto.

De acordo com [29], condutores que operam próximo a sua capacidade máxima, ou acima dela, se aquecem devido ao efeito joule. Em consequência de um aquecimento elevado em condutores, o risco de ocorrer um curto-circuito por arco elétrico em linhas

de transmissão aumenta, principalmente se estas linhas estiverem próximas ao solo ou a quaisquer objetos aterrados. O acúmulo de substâncias, tais como poeira ou fuligem, devido a queimadas próximas, aumenta a possibilidade de arco elétrico, pois tais substâncias cooperam para a redução da isolamento de estruturas e equipamentos [28].

Dois exemplos de interrupção no fornecimento de energia elétrica associados à arco elétrico, resultando em curto-circuito através de árvores, são os blecautes de 14 de agosto de 2003 nos Estados Unidos e Canadá, afetando mais de 50 milhões de pessoas; e o de 28 de setembro de 2003 na Itália, afetando mais de 57 milhões de pessoas [26]. Em ambos os casos, a proximidade das linhas de transmissão com objeto em contato com o solo, resultaram em arco elétrico e conseqüentemente abertura em cascata de linhas de transmissão ocasionando os blecautes. Estes casos expõem a negligência no controle de vegetação.

De acordo com [29], em relação ao caso dos Estados Unidos e Canadá, o contato elétrico entre a linha de transmissão com árvore, foi a principal razão para a perda de 3 linhas de 345 kV e uma de 138 kV. Três dessas linhas apresentavam sobrecarga no momento do incidente.

No caso da Itália, apesar do primeiro evento não ser localizado em solo italiano, porém suíço, a primeira linha de 380 kV do sistema de transmissão a ser desligada devido a arco elétrico com árvore, era importante para o sistema elétrico. Com a sobrecarga resultante da perda da primeira linha, se deu uma série de eventos. Inclusive, há uma possibilidade, não esclarecida, de uma segunda linha de transmissão suíça de 380 kV ter saído de operação por causa de outro arco elétrico com árvore. Porém, não há certeza se este realmente é o motivo ou se seria o acionamento da proteção por causa de sobrecarga [29,39].

3.4.4 Descarga atmosférica

De acordo com [40], as descargas atmosféricas estão, historicamente, entre as causas de blecautes que acarretam maiores danos à rede, devido aos danos severos nos equipamentos. Além disso, as faltas provenientes deste fenômeno tendem a apresentar um processo restaurativo demorado do sistema elétrico.

As descargas atmosféricas ou descargas elétricas, são classificadas da seguinte forma [41]:

- Descarga descendente negativa;
- Descarga descendente positiva;
- Descarga ascendente negativa;
- Descarga ascendente positiva.

Sua nomenclatura é dada em relação a origem do seu sentido de fluxo, no caso, descendente é da nuvem para terra e ascendente da terra para nuvem, e em relação a característica da carga, sendo ela positiva ou negativa. As descargas descendentes negativas são as mais comuns que afetam a rede de transmissão, pois estas possuem maior incidência em estruturas não muito altas [41].

Devido à alta velocidade que a descarga alcança a corrente de pico, geralmente em até 10 microssegundos, interruptores podem não responder a tempo dependendo da distância de incidência, pois estes operam normalmente com 50 milissegundos. Logo, o impacto pode destruir os isoladores, causando blecautes [8].

Se ressalta que os relâmpagos vistos a olho nu não são apenas uma descarga isolada, e sim o efeito de várias descargas em conjunto, tornando este fenômeno imprevisível. A Figura 3.6 [8] reúne dados de descargas elétricas e a porcentagem das ocorrências que ultrapassam um determinado valor de pico de corrente, próximo a 10 kA.

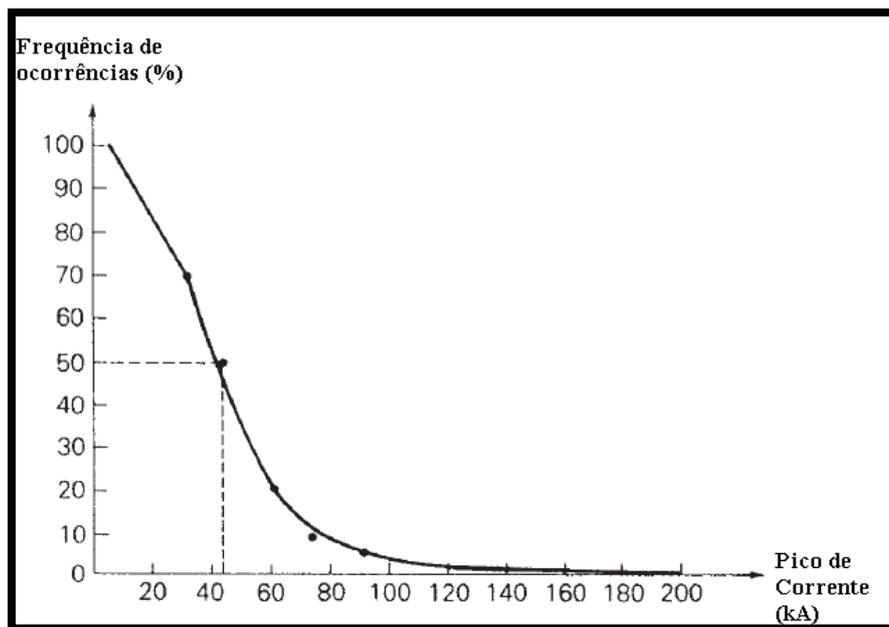


Figura 3.6 - Gráfico de frequência de ocorrência de descargas elétricas que ultrapassam certo valor de pico [8]

Se nota que a Figura 3.6 deixa explícito que 50% das ocorrências que ultrapassam o valor de pico de referência, atingem o valor de aproximadamente 45 kA de pico, e que em certas ocasiões pode chegar a 200 kA de pico.

É importante exaltar que muitos são os fatores que influenciam nos valores alcançados das correntes de descargas atmosféricas, entretanto algumas medidas podem ser realizadas afim de minimizar esses valores e impactos, como o formato e altura da estrutura da torre, impedância da torre, impedância de aterramento, possuir ou não cabos para-raios e entre outros [42].

O aterramento bem dimensionado é muito importante na prevenção desses danos. As descargas elétricas por si só causam distúrbios de sobretensões no sistema devido a fenômenos elétricos, apesar de haver caminho de menor impedância para o solo [8].

Uma pesquisa com companhias elétricas nos Estados Unidos e Canadá, cobrindo um total de 40.000 km de linhas de transmissão durante um período de 14 anos entre as décadas de 1950 e 1970, mostra que 65% das faltas em linhas de transmissão de 345 kV estão diretamente relacionadas as descargas atmosféricas, além de causar 26% das faltas em linhas de 230 kV [43].

Outra pesquisa de características e intuitos similares em rede de distribuição primária, realizada no Reino Unido, por um período de 14 anos também mostra que em 50.000 faltas as descargas atmosféricas descendentes (as mais recorrentes) causam 47% das faltas, em circuitos de 33 kV e acima disso [8]. Estas porcentagens são muito expressivas em ambas as pesquisas, alocando as descargas elétricas entre as principais causas de blecautes.

3.5 Blecautes devido a falhas em equipamentos

Este tipo de blecaute exerce forte impacto, tanto em eventos iniciais quanto em eventos cascata. As falhas de equipamentos podem ser devido à demora, ou não atuação, falta de manutenção e o envelhecimento dos equipamentos podendo comprometer suas funções [8]. Nota-se, que os equipamentos que são designados para interromper a passagem da corrente elétrica possuem o intuito de proteger componentes, que estão “após” a chave interruptora. Sendo assim, se há falha nos dispositivos, elevadas correntes podem atingir o circuito resultando em danos permanentes ou temporários aos equipamentos. Alguns desses equipamentos têm função vital na continuidade de fornecimento de energia. A probabilidade de blecaute é muito alta nos casos de falha em equipamentos, visto que cada dispositivo possui sua parcela de importância no sistema elétrico de potência como um todo, onde é necessário a harmonia entre as funções.

Em 31 de julho de 2004 no Bahrein, um vazamento de gás SF₆ de um disjuntor foi causa de um blecaute. Primeiramente, devido a retirada da subestação no sistema elétrico, e logo após causando a separação da área afetada e conseqüentemente do resto do sistema em efeito cascata [32].

Outro caso de blecaute, ocorrido em 13 de agosto de 2004 na Austrália, no estado de Nova Gales do Sul, devido a uma falha interna em um transformador de corrente que logo em seguida explodiu, retirando toda a usina do sistema. A usina possuía 34 linhas de transmissão, sendo todas desligadas pela atuação da proteção. As conseqüências resultaram em perda do fornecimento de energia elétrica de 5 grandes unidades geradoras e 1 unidade de porte médio [29].

De acordo com [40], as falhas em equipamentos são mais comuns em meses de verão e inverno. Sugerindo que tais falhas devem estar relacionadas a estresse pelas intempéries do clima nesses meses. Além disso, o envelhecimento de componentes do sistema elétrico aumenta a probabilidade de falha nos mesmos, devido a vida útil ultrapassada ou o desgaste sofrido ao longo dos anos.

Uma falha em uma válvula de vapor de uma usina nuclear na Suécia, provocou a perda de 1200 MW da rede elétrica. Após 5 minutos do início do problema, ocorreu uma falha em uma chave interruptora de uma subestação próxima, contribuindo para a perda de mais 2 unidades da usina nuclear, cada uma com capacidade de gerar 900 MW, e a queda de várias linhas de transmissão. Em consequência dos eventos a linha restante, de 400 kV, passou a operar em sobrecarga até que o sistema entrou em colapso de tensão e de frequência, tornando inevitável o blecaute [44].

Não há relatos de blecaute na Rússia entre 1975 e 2005, pois o sistema possuía alta confiabilidade. Entretanto, em 25 de maio de 2005, devido ao fato de 70% das subestações de 220 kV continuarem em atividade após ultrapassarem as respectivas vidas úteis, o sistema elétrico passou a operar em forma instável, principalmente em situações emergenciais, ocorrendo, portanto, blecautes [28].

No blecaute observado nos Estados Unidos e no Canadá, em 14 de agosto de 2003, entre as principais causas está o fato de que entre os horários de 12:15h e 16:06h o programa computacional responsável pelo sistema de controle da região se encontrava inoperante devido a problemas técnicos. O operador do sistema elétrico em questão, não obteve informações necessárias da localização do incidente ou quais medidas deveriam ser implementadas. Além disso, os avisos sonoros e visuais não se encontravam disponíveis para auxiliar os operadores. Após uma sequência de eventos, muitos consequentes da falta de informação e ferramentas de monitoramento, ocorreu o blecaute [29].

3.6 Blecautes devido a falha humana

As falhas devido a erro humano, geralmente ocorrem à nível de controle do sistema elétrico. O operador do sistema dispõe de informações e ferramentas para

administrar e planejar medidas que buscam uma maior estabilidade e confiabilidade do sistema elétrico [29]. Para cumprir suas atribuições, o operador utiliza de ferramentas como programas computacionais sofisticados de monitoramento, ações remotas e acionamento de máquinas elétricas utilizadas para regulação de parâmetros da rede. De posse das informações de pontos estratégicos, como limites técnicos, o operador deve coordenar suas atividades entre leitura do estado do sistema elétrico e ações para manter o bom funcionamento do mesmo [29,30].

A troca de informações e comunicação com sistemas vizinhos possui papel fundamental para uma operação estável e que atenda o critério N-1. Além da comunicação, é essencial uma coordenação de atividades entre operadores no caso de blecautes, medidas emergenciais e manutenção. O aviso prévio de manutenção ou desconexão de algum circuito, assegura uma maior confiabilidade entre os sistemas interconectados. Em situação de emergência, a troca de informações, principalmente em tempo real, otimiza o tempo em que as centrais de controle perdem ao procurar identificar os distúrbios [29].

Percebe-se que a maioria dos erros humanos, que resultam em blecaute, é devido a possível falta de experiência do operador ao defrontar situações de emergência, falta de comunicação com instalações e interconexões importantes, e o desrespeito de critérios e medidas importantes que garantem a estabilidade do sistema elétrico de potência [26,29].

O blecaute nos Estados Unidos e no Canadá, já mencionado, é o resultado de várias falhas, muitas delas no nível de controle. De acordo com [26], através de investigações foram identificadas as principais causas que envolvem falhas humanas, associadas ao blecaute:

- Após a queda da primeira linha de 345 kV o operador não obteve êxito em executar as medidas necessárias para atender o critério N-1;
- O operador do sistema interligado não foi informado do problema em andamento por outros técnicos;
- Falta de experiência do operador.

4 ANÁLISE DE CASO

4.1 Introdução

Este capítulo tem por objetivo analisar um blecaute de grandes proporções ocorrido no Brasil em 10/11/2009. Os eventos principais, descritos neste capítulo, começaram na linha de transmissão de 765 kV entre as SE's de Ivaiporã e Itaberá.

4.2 Considerações sobre o SIN para análise do caso

É importante salientar, previamente à análise do caso, que o SIN (acrônimo de Sistema Interligado Nacional) é o sistema majoritário responsável pela produção e transmissão de energia elétrica do Brasil. Este sistema, através de interconexões entre subsistemas que constituem as malhas, tem por objetivo os ganhos sinérgicos, e por consequência, a otimização do mercado de energia elétrica nacional com mais segurança, confiabilidade e economicidade. O SIN é coordenado e operado pelo Operador Nacional do Sistema – ONS [21]. Ainda de acordo [21], o SIN é dividido em 4 subsistemas, listados a seguir:

- Subsistema Sul;
- Subsistema Sudeste/Centro-Oeste;
- Subsistema Nordeste;
- Subsistema Norte.

O ONS utiliza de procedimentos de rede para aumentar a segurança e confiabilidade da rede, e através dos Sistemas Especiais de Proteção, que são sistemas automáticos de controle e proteção, dispõem de ferramentas de atuações e medidas que visam: a utilização adequada dos sistemas de geração, transmissão e distribuição; uma maior confiabilidade na operação do SIN; proteger o sistema de perturbações que possam resultar em instabilidade ou colapso de tensão; e propiciar uma maior segurança elétrica

operacional [21]. Os principais Sistemas Especiais de Proteção utilizados pelo ONS são [21]:

- Esquemas de Controle de Emergências (ECE): Possui a finalidade de preservar a integridade de equipamentos e linhas de transmissão, quando estes são submetidos às condições de operação anormais;
- Esquema de Controle de Segurança (ECS): Quando o sistema é submetido a contingências múltiplas, este sistema tem por objetivo evitar a propagação de distúrbios que possam agravar a situação da rede elétrica;
- Esquema Regional de Alívio de carga (ERAC): Através de IED's de frequência, este sistema possui o intuito de minimizar os efeitos resultantes de subfrequência desligando do sistema blocos de carga de forma escalonada.

A Tabela 4.1 [21] exhibe a forma como o ERAC atua, retirando de operação as cargas por determinada região, no intuito de reestabelecer a frequência padrão (60 Hz no caso do SIN), distorcida pelo déficit entre geração e carga. Se ressalta que os desligamentos de cargas se dão através dos sistemas elétricos das permissionárias de energia, que são interligados ao SIN [21].

Tabela 4.1 - Corte de carga por região para valores de subfrequência [modificado pelo autor].

SUL				
FREQUÊNCIA (Hz)	59,5	59	58,5	58
CORTE TOTAL (MW)	315	634	952	1268
SUDESTE				
FREQUÊNCIA (Hz)	59,5	59	58,5	58
CORTE TOTAL (MW)	1452	2902	4361	5811
CENTRO-OESTE				
FREQUÊNCIA (Hz)	59,5	59	58,5	58
CORTE TOTAL (MW)	90	179	269	360
NORTE				
FREQUÊNCIA (Hz)	59,5	59	58,5	58
CORTE TOTAL (MW)	223	448	670	893
NORDESTE				
FREQUÊNCIA (Hz)	59,5	59	58,5	58
CORTE TOTAL (MW)	437	877	1315	1752

Percebe-se, pela Tabela 4.1, que os valores de alívio de carga, para determinada frequência, não são equivalentes entre os subsistemas. Isto ocorre devido às diferenças de carga e geração entre os subsistemas. Ressalta-se que no mesmo ano da perturbação analisada (2009), os sistemas, até então isolados, dos estados do Acre e Rondônia são devidamente acoplados ao SIN.

4.3 Considerações iniciais sobre o sistema elétrico

A linha de transmissão em que ocorreu o incidente está localizada entre a SE de Ivaiporã e a SE de Itaberá, possuindo 265 km de extensão. Estas duas SE's estão entre a Usina Hidrelétrica (UHE) de Itaipu, através da SE de Foz do Iguaçu, localizada no estado do Paraná, e a SE de Tijuco Preto, localizada no estado de São Paulo. Logo, se percebe que o tronco de transmissão atingido possui muita importância para o SIN, visto que a UHE de Itaipu é a usina de maior capacidade de geração e o estado de São Paulo está localizado no subsistema de maior consumo e geração de energia elétrica. Além disso, a linha de transmissão se origina na subestação de transmissão que recebe diretamente a geração da UHE de Itaipu [21,45]. A Figura 4.1 [46] ilustra o diagrama unifilar do sistema entre a UHE de Itaipu e a SE de Tijuco Preto.

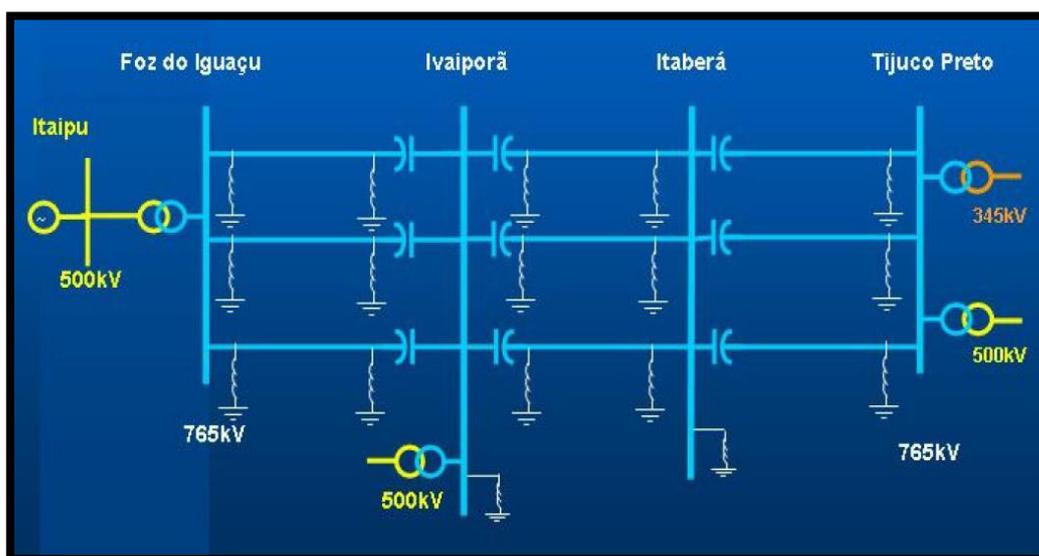


Figura 4.1 - Diagrama unifilar do sistema elétrico entre a usina de Itaipu e a subestação de Tijuco Preto [46].

É importante esclarecer que a UHE de Itaipu possui unidades geradores em 60 Hz e em 50 Hz, portanto, quando se menciona esta usina se utiliza a distinção da frequência logo após seu nome para identificar quais unidades de geração são as referidas (de 60 ou de 50 Hz), e no caso de ausência da distinção, se refere da instalação da usina por completo.

O sistema elétrico operava em normalidade antes do evento. As intervenções programadas de operação de equipamentos ou linhas de transmissão estavam devidamente supridas, por medidas da ONS [46]. Ainda de acordo com [46], os sentidos do fluxo, respectivamente, em linhas de transmissão e carregamentos de transformadores, antes do evento, onde C1, C2 e C3 são referentes a circuitos 1,2 e 3, estão listados a seguir:

- LT 500 kV Itaipu - 60 Hz → Foz do Iguaçu C1 = 1385 MW;
- LT 500 kV Itaipu - 60 Hz → Foz do Iguaçu C2 = 1338 MW;
- LT 500 kV Itaipu - 60 Hz → Foz do Iguaçu C3 = 1391 MW;
- LT 500 kV Itaipu- 60 Hz → Foz do Iguaçu C4 = 1378 MW;
- LT 765 kV Foz do Iguaçu - 60 Hz → Ivaiporã C1 = 1832 MW;
- LT 765 kV Foz do Iguaçu - 60 Hz → Ivaiporã C2 = 1881 MW;
- LT 765 kV Foz do Iguaçu - 60 Hz → Ivaiporã C3 = 1753 MW;
- LT 765 kV Ivaiporã - 60 Hz → Itaberá C1 = 2237 MW;
- LT 765 kV Ivaiporã - 60 Hz → Itaberá C2 = 2160 MW;
- LT 765 kV Ivaiporã - 60 Hz → Itaberá C3 = 2148 MW.

De acordo com [46], as interligações regionais e o tronco de 765 kV suportariam contingências duplas, no momento da perturbação, devido ao fato de estarem operando com um grau adicional de segurança. O montante de carga do SIN, antes da perturbação, é exibido a seguir de acordo com seu subsistema [46]:

- Sul: 9656 MW;
- Sudeste/Centro-Oeste: 37647 MW;
- Nordeste: 10571 MW;
- Norte: 2901 MW;

4.4 Condições meteorológicas no dia do evento

Através de programas computacionais de monitoramento de meteorologia e descargas elétricas, notou-se o deslocamento de uma frente fria acompanhada de chuva e vento na região do Norte de Santa Catarina e no Paraná [46]. A partir de 14:00h, observou-se fortes condições climáticas em Foz do Iguaçu e Cascavel com pancadas de chuva, ventos e descargas elétricas, conforme mostra a Figura 4.2 [46]. É importante ressaltar, que na Figura 4.2, as descargas são representadas pelo símbolo da cruz no mapa, e os que possuem cor verde significa que foram registradas no período entre 12:00h do dia 10/11/2009 e 00:00h do dia 11/11/2009, em todo território brasileiro, apesar da Figura 4.2 representar apenas uma região do país.

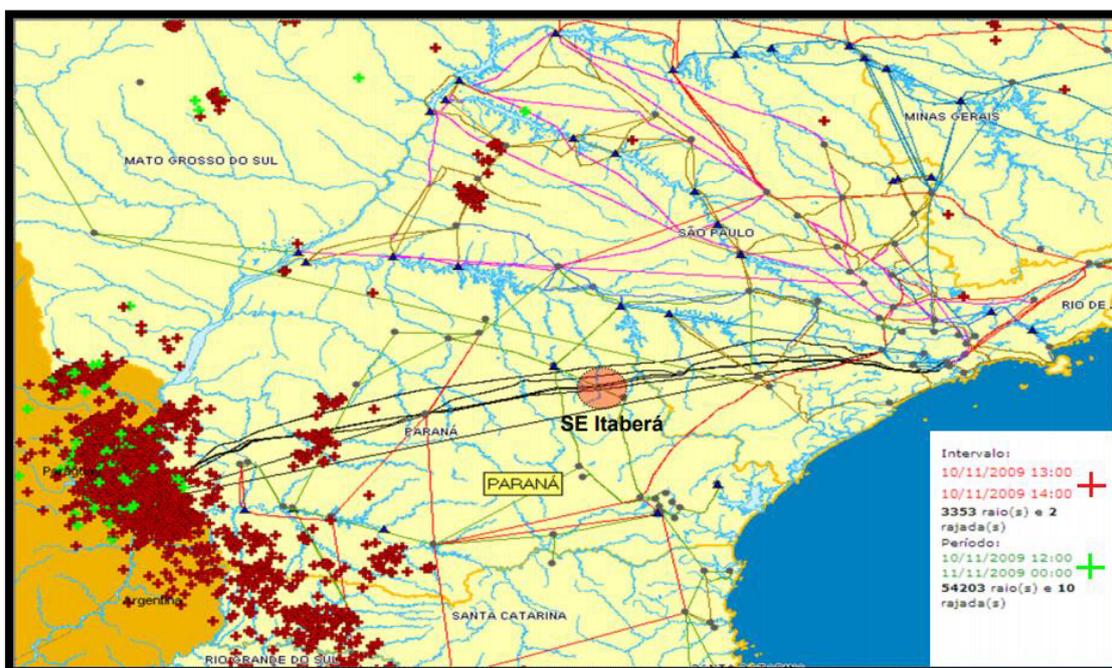


Figura 4.2 - Registro acumulado de descargas atmosféricas no dia 10/11/2009 entre 13:00h e 14:00h [modificado pelo autor]

A ideia central da Figura 4.2 não é representar quantitativamente as descargas atmosféricas, e sim a concentração das mesmas em determinada região.

A Figura 4.3 [46] apresenta o acumulo de descargas atmosféricas no período entre 22:10h e 22:15h do dia 10/11/2009.

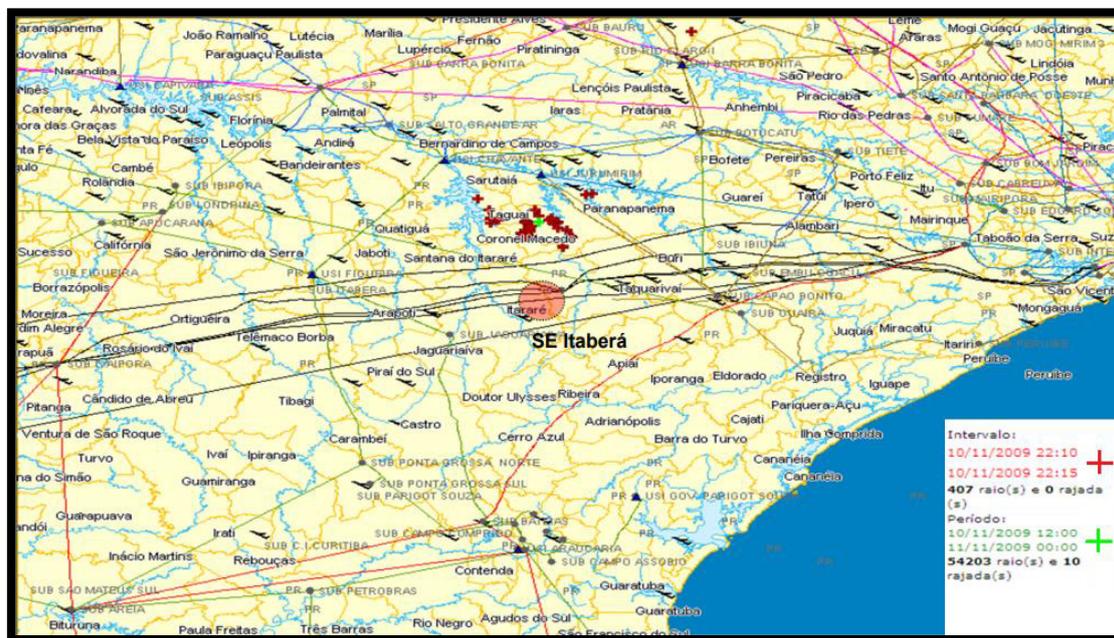


Figura 4.3 - Registro acumulado de descargas atmosféricas no dia 10/11/2009 entre 22:10h e 22:15h [modificado pelo autor]

Apesar da grande diferença de descargas atmosféricas registradas entre as Figuras 4.2 e 4.3, havendo maior incidências na Figura 4.2, percebe-se, que na Figura 4.3 há uma concentração maior de descargas próximo à SE Itaberá em um curto período de tempo (5 minutos), onde se registrou os eventos iniciais que desencadearam a perturbação que atingiu o SIN. É necessário destacar, que não se deve menosprezar descargas atmosféricas por número de incidências, visto que apenas uma descarga atmosférica isolada é necessária para causar danos permanentes e/ou temporários.

4.5 Medidas de controle que antecedem a perturbação

Como já mencionado, o sistema de controle também opera no intuito de monitorar possíveis situações que ocasionem distúrbios, para que, caso possível, atue com medidas preventivas para atenuar as possíveis contingências. Apesar do SIN estar operando com

valores de geração na UHE de Itaipu – 60 Hz que suportavam perda dupla, o ONS diminuiu o despacho de energia elétrica da usina, reduzindo a transferência de potência pelo tronco de transmissão de 765 kV, objetivando uma maior segurança do sistema elétrico. Porém, por volta de 19:30h, tendo em vista o alívio do clima adverso (corroborado com a Figura 4.3), o tronco de transmissão é liberado para operação normal [46]. A Figura 4.4 [46] ilustra o gráfico do registro de geração programada e verificada na UHE de Itaipu – 60 Hz no dia 10/11/2009, na escala de potência gerada pelo horário no dia.

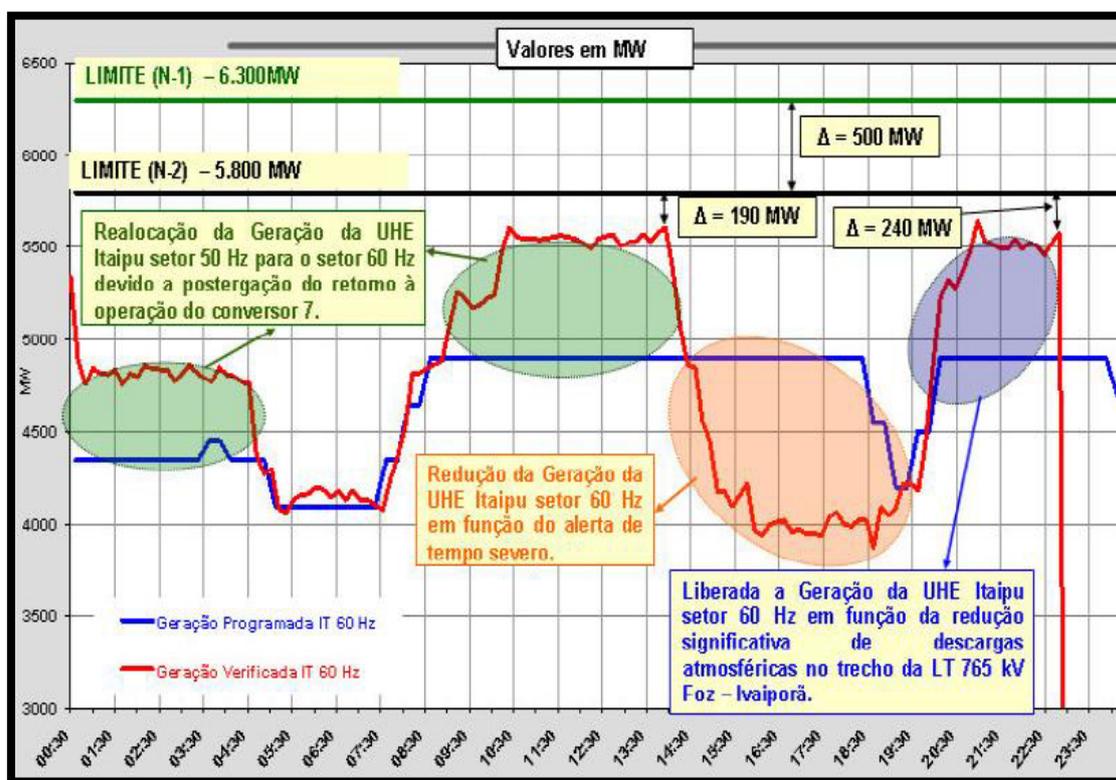


Figura 4.4 - Registro de geração programada e verificada na UHE de Itaipu - 60 Hz, no dia 10/11/2009 [46]

Logo, apesar das medidas tomadas pelo ONS ter sido as corretas, de posse das informações obtidas, o evento ocorreu poucas horas após a normalização da geração de energia elétrica, na usina mencionada. Entretanto, a baixa probabilidade, contrariou as expectativas do sistema de controle.

4.6 Perturbação de 10/11/2009 no SIN

4.6.1 Eventos iniciais

De acordo com [46], o primeiro evento teve início às 22:13h, no horário de Brasília. Detectou-se um curto-circuito monofásico no circuito C1 da LT 765 kV Itaberá-Ivaiporã, na fase branca envolvendo a terra, localizado em um isolador do circuito na SE de Itaberá. Antes da eliminação da primeira falha ocorrida, se sucede dois curtos-circuitos monofásicos adicionais no mesmo tronco de transmissão, nos circuitos C2 e C3. O curto-circuito em um isolador do circuito C2, envolvendo a fase vermelha e a terra, se deu após 13,5 ms da falha no circuito C1, e após 17 ms da falha no circuito C1, ocorreu curto-circuito monofásico em uma coluna isoladora da barra A, envolvendo a fase azul do circuito C3 e a terra, na SE de Itaberá.

Observa-se que a sequência de curtos-circuitos se dá em um curto intervalo de tempo, logo, por um momento, o sistema detectou 3 faltas monofásicas, quase que simultâneas, eletricamente localizadas na SE de Itaberá. Devido a isto, o sistema reconhece o distúrbio como falta trifásica envolvendo a terra, e por consequência retira a linha de transmissão de operação [46].

Realizou-se a eliminação da falha no circuito C1 da LT 765 kV Itaberá-Ivaiporã pela detecção e atuação de suas proteções principal e alternada de distância baseada em ondas viajantes. A eliminação da falha no circuito C2 se deu por atuação de sua proteção principal e alternada de sobrecorrente direcional para faltas desbalanceadas. No caso do circuito C3, do tronco de transmissão citado, primeiro ocorreu a proteção da barra A da SE de Itaberá por sua proteção de sobrecorrente instantânea de neutro do reator, e logo após a abertura do circuito C3 em si, pela atuação da recepção de transferência de disparo [46]. A Figura 4.5 [46] ilustra os principais eventos e efeitos resultantes da sequência de distúrbios, na escala do tempo.

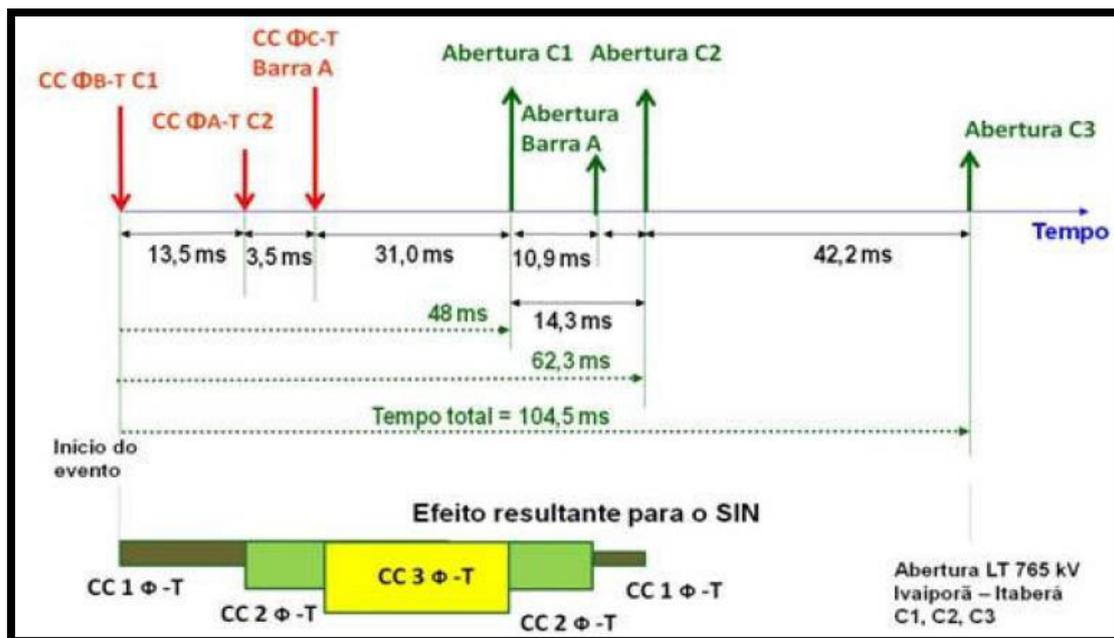


Figura 4.5 - Sequência de eventos e efeito resultante da perturbação de 10/11/2009 [46]

Se ressalta, que apesar do curto-circuito monofásico do circuito C3, da LT 765 kV Itaberá-Ivaiporã, ocorrer 3,5 ms após a falta no circuito C2, do mesmo tronco, o sistema de proteção da barra A na SE de Itaberá atuou primeiro que a lógica do sistema de proteção do circuito C2. Isto ocorreu devido às diferentes lógicas e tempo de resposta para ocasiões diferentes de faltas em sistemas de controle [46].

Percebe-se, através da Figura 4.5, que o tempo decorrido entre o início do evento e a abertura do último circuito do tronco afetado é de apenas 104,5 ms. Apesar deste período ser considerado muito curto para outras atividades, que não são relacionadas à eletricidade, para sistemas elétricos, e principalmente pelas magnitudes de um sistema de transmissão, os valores de picos de sobretensões e sobrecorrentes são atingidos rapidamente, em questões de milissegundos. Logo, o sistema de proteção deve detectar e atuar nessa escala de tempo também, pois a demora no acionamento da proteção aumenta a probabilidade de ocorrer danos severos aos equipamentos e instalações. De acordo com [46], as proteções do tronco Ivaiporã-Itaberá atuaram de forma correta e a Figura 4.5 constata a resposta de atuação do sistema de proteção. Para uma análise mais detalhada do efeito do curto-circuito monofásico nas linhas de transmissão, a Figura 4.6 [46] exhibe as formas de onda das tensões e correntes das fases e residual (neutro) da LT 765 kV Ivaiporã-Itaberá do circuito C1 pelo oscilograma da SE de Itaberá. Os valores do eixo

vertical estão relacionados à razão da magnitude de pico de seus valores nominais e o eixo horizontal está em milissegundos.

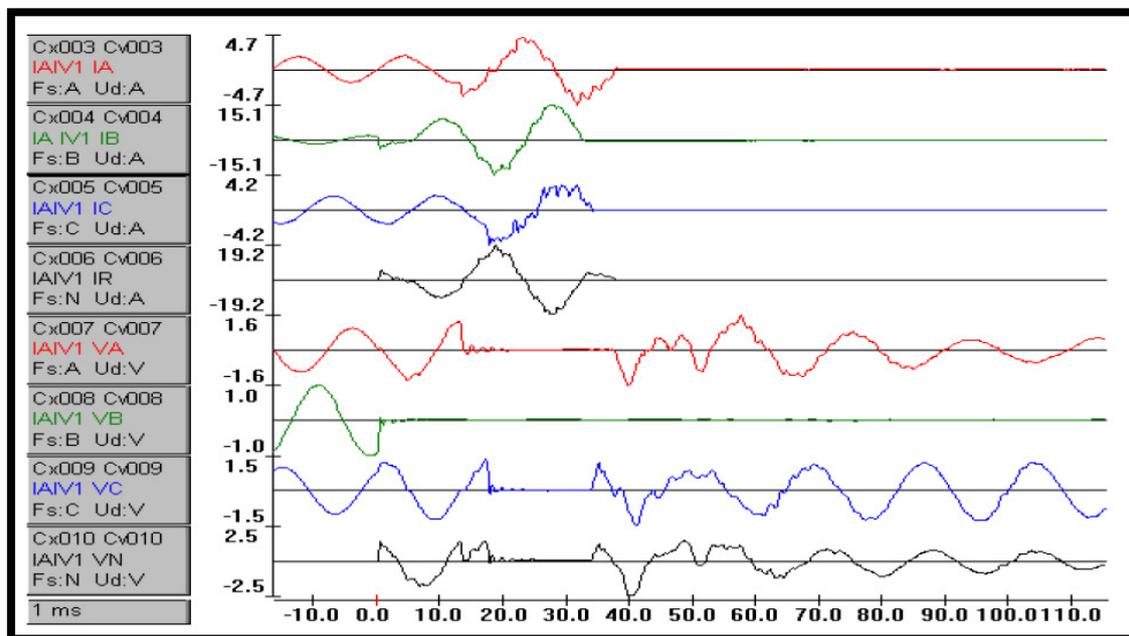


Figura 4.6 - Oscilograma da SE de Itaberá de tensões e correntes das fases e residual da LT 765 kV Ivaiporã-Itaberá C1 [46]

A Figura 4.6 é muito útil para análise do caso e de fenômenos elétricos em sistemas elétricos submetidos a distúrbios. Se nota que no momento 0.0 ms (início do curto-circuito monofásico) na fase B, fase em que ocorre o curto-circuito monofásico do circuito C1, houve uma redução drástica no seu nível de tensão para valores próximos de zero, em contrapartida, um período transitório de elevadas correntes se inicia, que chega a alcançar o valor de aproximadamente 15.1 da razão do seu valor nominal. Além disso, é importante notar que praticamente no mesmo instante em que há modificação na corrente da fase B, se percebe que a corrente residual começa a apresentar formato visível (na escala selecionada) em sua onda além, de chegar a alcançar 19.2 de razão do seu valor nominal, visto que idealmente este valor seria zero em um circuito perfeitamente balanceado, implicando no desbalanceamento do circuito trifásico, que acarreta consequências como sobrecarga. A tensão residual, após o tempo 0.0 ms, começa a demonstrar valores consequentes do desbalanceamento das tensões, e se percebe que entre o período 20.0 ms e 40.0 ms em que as três fases possuem valores aproximadamente

zero, esta tensão também acompanha a tendência, que implica na equivalência de valores. Se exalta que a fase B do circuito C1 continua com valores próximos de zero, apesar das outras fases não, devido a perda do condutor em questão. A Figura 4.7 [46], mostra o registro da corrente residual no reator do circuito C3 da LT 765 kV Ivaiporã-Itaberá, no terminal de Ivaiporã.

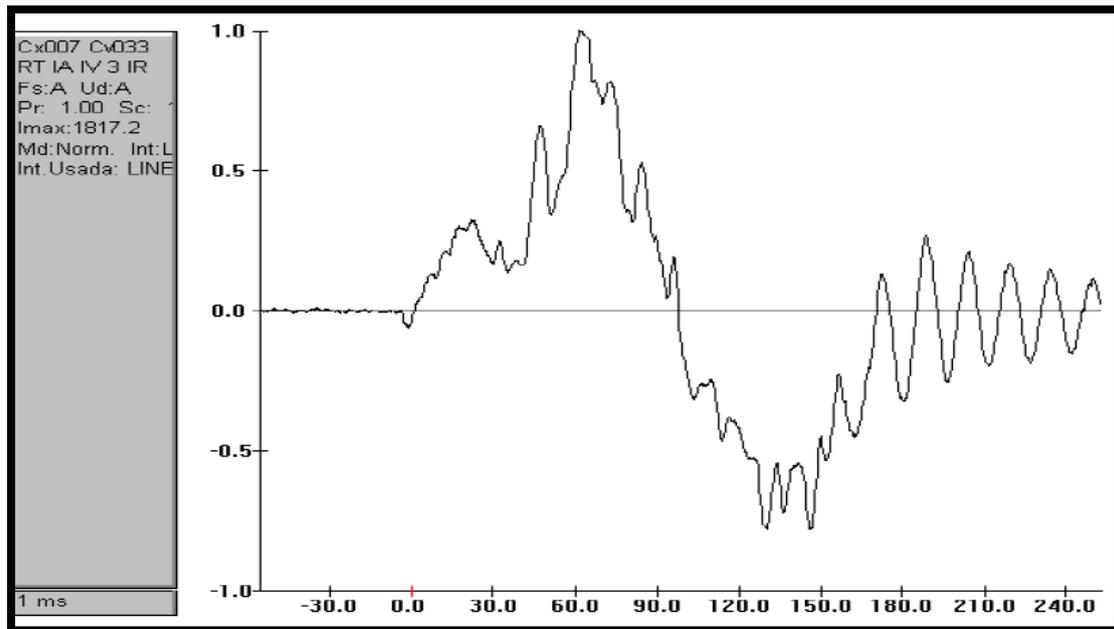


Figura 4.7 - Corrente residual no reator do circuito C3 da LT 765 kV Ivaiporã-Itaberá [46]

Através da Figura 4.7, percebe-se a discrepância entre o formato da onda antes do momento 0.0 ms, e após este momento, onde a corrente atinge seu valor máximo de corrente de pico de 1817.2 A.

4.6.2 Eventos em cascata

De acordo com [46], houve uma sequência de eventos em cascata durante 1 minuto e 47 segundos após o evento inicial, e mais 2 eventos 26 minutos após o primeiro curto-circuito, chegando a atingir 18 estados no Brasil.

Devido à já mencionada importância, em relação à região e quantidade de potência transmitida, do tronco de transmissão entre Ivaiporã e Itaberá, ocorreram várias atuações de proteção e de redução de cargas, via Sistemas Especiais de Proteção [46].

Se ressaltar que o evento de maior destaque é a perda da UHE Itaipu - 60 Hz, preservando a região Sul e promovendo seu ilhamento. Logo, por consequência dos distúrbios e aberturas de linhas de transmissão de diferentes níveis de tensões como 765, 525, 500, 440, 345, 230 e 138 kV em sistemas CA e 600 kV em sistema CC, os subsistemas Sul e sudeste se dessincronizaram, acarretando em elevação de frequência no subsistema Sul e redução de frequência no subsistema Sudeste. Estes subsistemas atingiram valores de frequência na ordem de 63,5 e 58,3 Hz, respectivamente. A Figura 4.8 [46] ilustra o gráfico do sistema de Brasília (subsistema Sudeste) e de Curitiba (subsistema Sul), afim de evidenciar a dessincronização entre os subsistemas. Após a elevação de frequência apresentada no subsistema Sul ocorre atuação de proteção na LT 765 de Foz do Iguaçu, retirando por completo a UHE de Itaipu - 60 Hz do SIN [46].

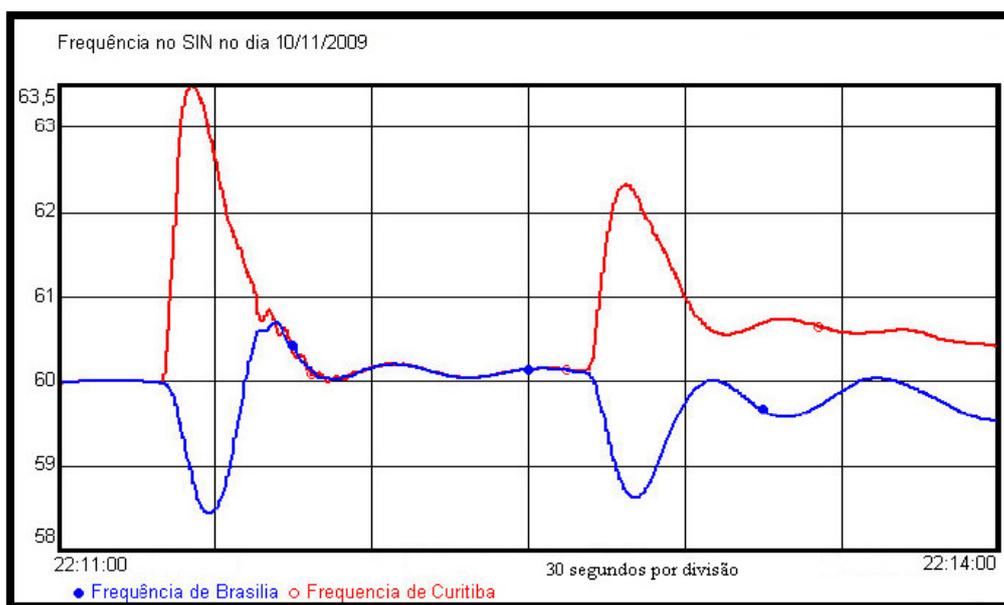


Figura 4.8 - Gráfico da variação da frequência nos subsistemas Sul e Sudeste [modificado pelo autor]

De acordo com [46], após a perda de sincronismo inicial (durante 20 segundos) entre as frequências dos subsistemas demonstrados na Figura 4.8, houve-se um período de estabelecimento de sincronismo das mesmas (durante 1 minuto), até a abertura da linha

de transmissão de 525 kV Assis-Araraquara, que até então mantinha o sistema fisicamente interligado, resultando na separação por completo destes subsistemas.

A transmissão HVDC da UHE Itaipu - 50 Hz, conectada à uma SE no estado de São Paulo, interrompeu o fornecimento de energia elétrica devido a oscilações e afundamento de tensão, visto que este tipo de alimentação é dependente da tensão do sistema receptor, que também sofreu com o distúrbio, isolando esta usina por completo do SIN. Os estados mais afetados pela sequência de eventos foram: São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo e Mato Grosso do Sul. Estes sofreram colapso quase que integralmente do fornecimento de energia elétrica. Ressalta-se que nos outros estados afetados houve cortes de carga, porém não houve colapso dos sistemas elétricos como nos estados mencionados. Além disso, ocorreu desligamento da interconexão entre os estados de Acre e Rondônia com o SIN, promovendo o ilhamento dos mesmos no intuito de evitar o colapso dessa região [46].

O subsistema Sudeste/Centro-Oeste apresentou maiores danos pela perturbação. De acordo com [21], este subsistema era responsável por 45% da produção de energia elétrica do SIN, em 2009, e a UHE de Itaipu responsável por 19%. A Figura 4.9 [46] exhibe os principais desligamentos sequenciais após o início do distúrbio, na região mais afetada.

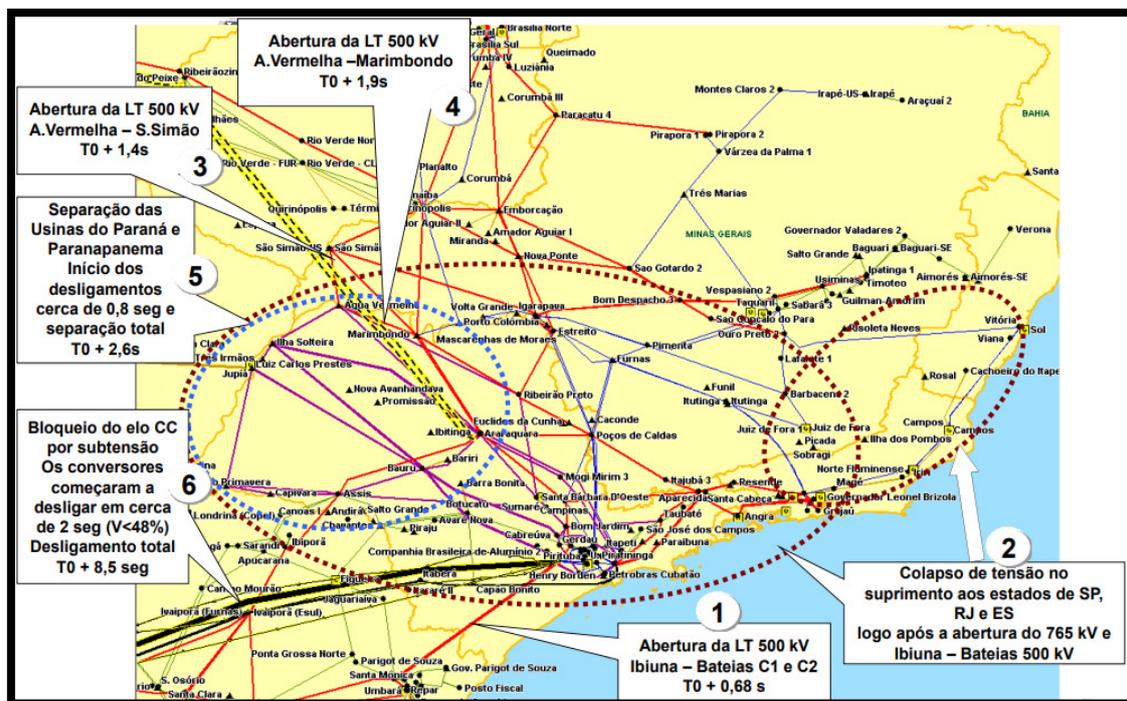


Figura 4.9 - Principais desligamentos sequenciais resultantes do distúrbio de 10/11/2009 [46]

Observa-se que devido ao curto período de tempo entre a maioria dos desligamentos e ilhamentos, pela atuação dos Sistemas Especiais de Proteção ECE, ECS e ERAC, o sistema de controle atuou rapidamente para preservar a segurança do sistema elétrico. Este procedimento evitou interferências do operador, ao contrário de alguns casos como os mencionados no capítulo 3, em que entre o(s) evento(s) inicial(is) e os eventos cascata teve-se tempo suficiente para realizar medidas via operador humano.

De acordo com [46], o sistema especial de proteção ERAC atuou no sistema ilhado de Acre/Rondônia, nos subsistemas Norte, Nordeste, Centro-Oeste e na área de Minas Gerais. A Figura 4.10 [46] ilustra o gráfico da frequência registrada na SE Bongí, localizada no subsistema Nordeste.

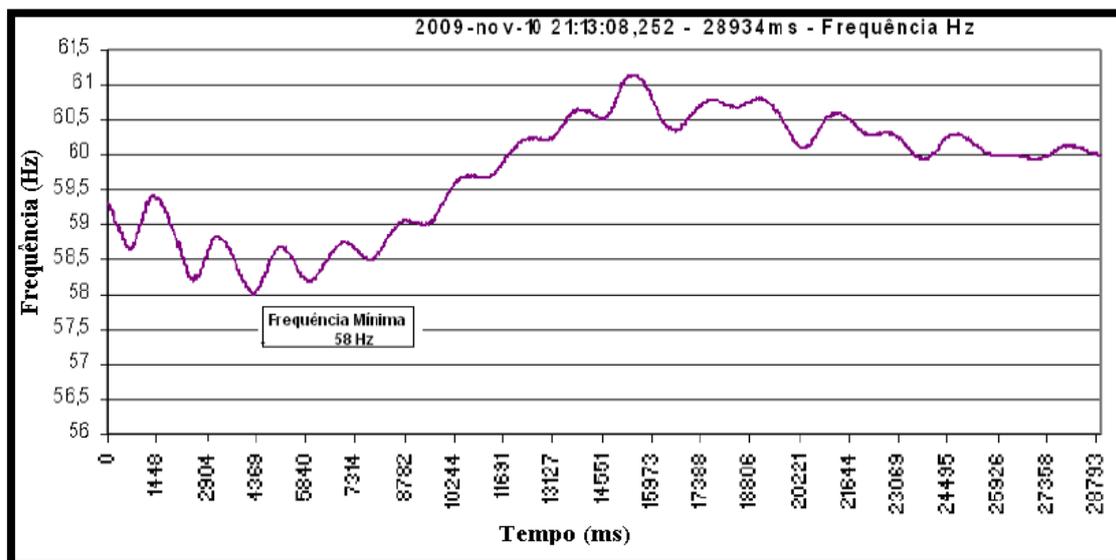


Figura 4.10 - Registro gráfico da variação da frequência na SE Bongí (subsistema Nordeste) [46]

Através do gráfico da Figura 4.10, se percebe que a partir do momento inicial da falha até aproximadamente 29 segundos após a mesma, o sistema elétrico apresenta oscilações na frequência que apresentou taxas de variação entre 0,78 Hz/s e 1,49 Hz/s, até variar com valores próximos a 60 Hz novamente, onde a atuação do ERAC começa a surtir efeito, na tentativa de balancear a defasagem entre geração e carga, evitando colapso do sistema [46].

4.6.3 Carga interrompida

O desligamento da UHE Itaipu – 60 Hz é o primeiro evento significativo que ocorreu no SIN em 10/11/2009, rejeitando 5.564 MW de geração. Com os efeitos cascata, o setor de 50 Hz da usina, que utiliza a transmissão HVDC para alimentar o SIN, também é retirado de operação, rejeitando um adicional de 5.329 MW, e por consequência toda a UHE de Itaipu é desligada do sistema [46]. O desligamento desta usina é o resultado mais adverso deste evento.

A seguir está relacionado a interrupção de carga por cada subsistema [46]:

- Sudeste/Centro-Oeste: 23.335 MW;
- Sul: 104 MW;
- Nordeste: 802 MW;
- Norte: 195 MW.

As interrupções descritas totalizaram 24.436 MW de cargas do SIN, significando 40% do sistema, na época, com evidência para a região Sudeste, que representou aproximadamente 38% da interrupção [46]. A Tabela 4.2 [47] resume as interrupções de cargas por região e por estado afetado, além de apresentar o tempo médio de duração do distúrbio e o MWh interrompido.

Tabela 4.2 - Interrupções de energia devido ao distúrbio de 10/11/2009 no SIN [47]

Estado/Região	Carga Interrompida (MW)	Tempo Médio (min)	Energia Interrompida (MWh)	
SP	14378	256	61399,0	Áreas mais atingidas
RJ	6231	232	24126,8	
ES	1342	129	2881,7	
MG	517	61	524,5	
SUDESTE	22468	237	89932,0	
PR	53	3	2,7	
SC	35	18	10,5	
RS	16	6	1,6	
SUL	104	9	14,8	
GO	89	9	13,4	
MT	190	32	101,3	Cargas interrompidas pelo ERAC
MS	588	94	921,2	
CENTRO-OESTE	867	72	1035,9	
AC	59	30	29,5	
RO	136	30	68,0	
NORTE	195	30	97,5	
AL	54	31	27,9	
BA	150	30	75,0	
PB	94	5	7,8	
PE	414	22	151,8	
RN	38	5	3,2	
SE	52	5	4,3	
NORDESTE	802	20	270,0	

De posse desses valores, se destaca a importância do subsistema Sudeste/Centro-Oeste para o Sistema Interligado Nacional, visto que, além de liderar com 45% da geração do SIN [21], no período analisado, também é o líder em consumo.

4.6.4 Considerações finais da análise

De acordo com [46], as análises técnicas finais concluíram que os curtos-circuitos monofásicos registrados na LT 765 kV Itaberá-Ivaiporã, foram resultantes de um *flashover*, devido a descargas atmosféricas ou redução da isolação nos isoladores por causa das condições meteorológicas adversas como chuvas intensas, ventos fortes e descargas atmosféricas, na região. Este caso se encaixa na causa mais recorrente de blecautes em sistemas elétricos de potência, que é devido fenômenos da natureza.

O SIN, através dos seus Sistemas Especiais de Proteção, atuou de forma correta e à tempo, no sentido de preservar os componentes dos sistemas elétricos interligados via desligamentos e ilhamentos que evitaram maiores colapsos e propagações dos distúrbios. Se ressalta que houve estados que não sofreram qualquer tipo de corte de carga, como no caso do Pará e Maranhão, mesmo estando interligados ao SIN. Com isto, prova-se a eficiência do sistema de controle analisado, neste caso específico, bem como a confiabilidade que as interligações adicionam ao sistema elétrico de potência.

5 CONCLUSÃO

Apesar das estratégias, avanços tecnológicos e a constante otimização de sistemas elétricos, a transmissão de energia elétrica pode ser interrompida por diversos fatores. As causas de blecautes de grandes proporções mais presentes em documentos de caráter técnico são as relacionadas aos agentes e fenômenos da natureza, onde as intempéries ocasionam distúrbios que favorecem um cenário de colapso das funções vitais dos sistemas elétricos. Fatores como a região em que o sistema elétrico se localiza é muito relevante, pois países que possuem condições climáticas adversas acabam sendo mais suscetíveis a blecautes deste tipo. Se nota que os períodos em que mais se registrou a interrupção de energia em grande proporção foram os que as estações do ano estão mais intensas, além de em muitos casos os agentes da natureza se associarem nestes períodos evidenciando ainda mais o forte clima.

Dependendo da intensidade da perturbação, em milissegundos vários equipamentos e instalações podem ser retirados de atividade ou os efeitos podem atuar por um período mais longo, incrementando progressivamente a instabilidade da rede e comprometendo a continuidade do fornecimento de energia elétrica até se tornar inevitável os desligamentos, e por consequência blecaute. Em ambos os casos, os desligamentos ocorrem em uma série de eventos em cascata pela atuação dos sistemas de proteção, entretanto tal medida de segurança coopera na propagação da falta de sincronismo entre os sistemas interconectados. Há mais registros de blecautes de grandes proporções que atingem um número maior de consumidores nas últimas décadas do que anteriormente, isto pode ser relacionado ao fato de que cresce cada vez mais o número de interconexões, o que resulta em maior vulnerabilidade do sistema interconectado ser sujeito aos distúrbios.

Sistemas de controle e proteção são essenciais para a atenuação dos danos resultantes dos blecautes, pois a rápida detecção e atuações lógicas de controle e proteção preservam a integridade de componentes do sistema elétrico, de forma a limitar os possíveis danos permanentes, com isto, reduzindo os prejuízos econômicos além de favorecer um reestabelecimento do suprimento mais rapidamente pela contenção dos efeitos. Além disso, medidas de controle como os ilhamentos de sistemas se mostram eficazes na tentativa de manter o fornecimento de energia elétrica, pois preservam a geração, transmissão e distribuição local, de perturbações originadas em outras regiões.

Logo, entre outras medidas de controle e proteção investigadas, se percebeu que quando o sistema de controle possui uma operação bem coordenada acaba se tornando muito eficiente contra distúrbios, evitando prejuízos e danos significativos.

REFERÊNCIAS

- [1] ENTIDADE REGULADORA DOS SERVIÇOS ENERGÉTICOS <<http://www.erse.pt/>>. Acesso em: 23 de maio de 2018.
- [2] IEEE. About IEEE. <<https://www.ieee.org/about/index.html>>. Acesso em: 15 de junho de 2018.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, NBR 5410 - Instalações Elétricas de Baixa Tensão. Rio de Janeiro, 2004.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, NBR 14039 - Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV. Rio de Janeiro, 2005.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, NBR 5419 – Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro, 2000.
- [6] MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. NR 10 Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. Brasília, 2004.
- [7] MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. NR 6 Equipamento de Proteção Individual. Brasília, 2009.
- [8] GLOVER, J.; SARMA, M.; OVERBYE, T. Power System Analysis & Design: 5th ed. Stamford: Cengage Learning, 2008.
- [9] MAMEDE J. Instalações Elétricas Industriais: 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2007.
- [10] DINIZ, Fernando. Proteções e Dimensionamentos. 2016. Slide.
- [11] PESSANHA, José. Subestações Isoladas a Ar e Configuração de Barras. 2017. Slide.
- [12] BLACKBURN, J. Protective Relaying Principles and Applications: 2nd ed. New York: CRC Press, 1997.
- [13] CURSOS LED. Apostila do curso de instalações de alta/baixa tensão. São Luís.
- [14] Creder, H. Instalações Elétricas: 15ª ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2007.
- [15] KUNDUR, P. Power System Stability and Control: McGraw-Hill, 1994.

- [16] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico de Nacional – PRODIST. 2011.
- [17] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, Nota Técnica 0075/2012. Brasília, 2012.
- [18] WEG. Transformadores de potência a óleo: “Transformador Óleo 90000/120000 kVA 230.0/13.8kV CST ONAF”.
<<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Transformadores-e-Reatores-a-%C3%93leo/Transformadores-de-Pot%C3%Aancia-a-%C3%93leo/50-001-a-400-000-kVA/Transformador-%C3%93leo-90000-120000-kVA-230-0-13-8kV-CST-ONAF/p/13122046>> Acesso em: 29 de maio de 2018.
- [19] MCDONALD, J. Electric Power Substation Engineering: 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [20] PANSINI, A.; SMALLING, K.; Guide To Electric Power Generation, 3rd ed. Lilburn: The Fairmont Press, 2006.
- [21] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO <<http://ons.org.br/>> Acesso em: 23 de maio de 2018.
- [22] GRIGSBY L. Electric Power Generation, Transmission and Distribution: 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [23] Arruda Karina. Novembro começa com aumento de tarifa da energia elétrica. GPS notícias. <<https://www.gpsnoticias.com.br/2016/10/31/novembro-comeca-com-aumento-de-tarifa-na-energia-eletrica/control>> Acesso em: 29 de maio de 2018.
- [24] ANDRADE, L.; LEÃO T. A Brief History Of Direct Current in Electrical Power Systems. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal. “Third IEEE History of Electro-Technology Conference”, 2012.
- [25] ARQUIÑEGO, A. IMPLEMENTAÇÃO DE UM SIMULADOR-NUMÉRICO EM UM PROGRAMA COMPUTACIONAL DE ESTABILIDADE. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Eletricidade) - Universidade Federal do Maranhão.

- [26] ZANETA, E.; ANTON, B. Blackout In The Power Systems. Slovak University of Technology in Bratislava Faculty of Electrical Engineering and Information Technology. 2008.
- [27] ADIBI, M.; MARTINS, N. Impact of Power Systems Blackout. Denver. “IEEE Power e Energy Society General-Meeting”, 2015.
- [28] LU, W.; BÉSANGER, Y.; ZAMAI, E.; RADU, D. Blackouts: Description, Analysis and Classification. France. 2006.
- [29] COOKE, D. Learning from the Blackouts: Transmission system security in competitive electricity Markets. Auburn. 2009.
- [30] SAVULESCU, S. Real-Time Stability in Power Systems: 2nd. ed. New York.
- [31] WU, Y.; CHANG, S.; HU, Y. Literature Review of Power Systems Blackouts. Taiwan. “4th International Conference on Power and Energy Systems Engineering Conference”, 2017.
- [32] COMMITTEE OF INTERCONNECTED ARAB NETWORKS. Major Interruptions (blackouts) Study. 2006.
- [33] MCLINN, J. Major Power Outage in the US, and around the World. Hanover. “IEEE Reliability Society 2009 Annual Technology Report”, 2009.
- [34] NIE repairs iced over power line. BBC News <<https://www.bbc.co.uk/news/uk-northern-ireland-16209787>> Acesso em: 19 de junho de 2018.
- [35] NYE, D. When The Lights Went Out. The MIT Press, 2010.
- [36] KURITA, A.; SAKURAI, T. The Power System Failure on July 23, 1987 in Tokyo. Tokyo. 1988.
- [37] Ventos derrubam torres de linhas de alta tensão em Itajaí, Litoral Norte. Sol diário. <<http://osoldiario.clicrbs.com.br/sc/cidades/noticia/2014/12/ventos-derrubam-torres-de-linhas-de-alta-tensao-em-itajai-litoral-norte-4671975.html>> Acesso em: 14 de junho de 2018.
- [38] VOLNEI REIS PROJETOS ELÉTRICOS. Arco Elétrico. <<https://vrprojetoseletricos.blogspot.com/2012/>> Acesso em: 14 de junho de 2018.
- [39] BERIZZI, A. The Italian 2003 blackout. Italy. 2004.

- [40] RAHMAN, K.; MUNNEE, M.; KHAN, S. Largest Blackouts Around the World: Trends and Data Analyses. India. “2016 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering”, 2016.
- [41] PESSANHA, José. Aterramento em Sistemas Elétricos de Potência. 2017. Slide.
- [42] IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems. The Institute of Electrical and Electronics Engineers. New York. 1997.
- [43] IEEE-EEI COMMITTEE REPORT. Extra High Voltage Line Outages. 1967.
- [44] ANDERSSON, G. et al. Causes of the 2003 Major Grid Blackouts in North America and Europe, and Recommended Means to Improve System Dynamic Performance. 2005.
- [45] ITAIPU BINACIONAL. Comparações. <<https://www.itaipu.gov.br/energia/comparações>> Acesso em 14 de junho de 2018.
- [46] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Análise da perturbação do dia 10/11/2009 às 22h13min envolvendo o desligamento dos três circuitos da LT 765 kV Itabera – Ivaiporã. 2009.
- [47] SENADO FEDERAL. <http://www.senado.leg.br/comissoes/ci/ap/AP20091126_HermesChipp.pdf> Acesso em 26 de junho de 2018.