

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**GILBERTO RAMOS JUNIOR**

**AVALIAÇÃO DIDÁTICA DE FALTA À TERRA EM SERVIÇOS AUXILIARES DE  
CORRENTE CONTÍNUA EM SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO**

**MEDIANEIRA**

**2023**

**GILBERTO RAMOS JUNIOR**

**AVALIAÇÃO DIDÁTICA DE FALTA À TERRA EM SERVIÇOS AUXILIARES DE  
CORRENTE CONTÍNUA EM SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO**

**Didactic evaluation of ground failures in direct current auxiliary services in  
high voltage substations**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Thiago Naufal Santelo.

Coorientador: Evandro André Konopatzki.

**MEDIANEIRA**

**2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença

**GILBERTO RAMOS JUNIOR**

**AVALIAÇÃO DIDÁTICA DE FALTA À TERRA EM SERVIÇOS AUXILIARES DE  
CORRENTE CONTÍNUA EM SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO**

Trabalho de conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 15/junho/2023

---

Thiago Naufal Santelo  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Evandro André Konopatzki  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Marcos Fischborn  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

José Airton de Azevedo santos  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**MEDIANEIRA**

**2023**

Dedico este trabalho aos meus pais, sem os quais  
este sonho não seria possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Risolete Bender e Gilberto Ramos, apenas por serem quem são, por terem me dado a oportunidade de viver e amar.

À minha amada Emanuelle Verônica de Moura Pilati, pelo amor, compreensão e companheirismo nesta árdua trajetória.

À minha irmã, Helena Bender Pereira, pelo entusiasmo e brilho no olhar contagiante que a juventude proporciona.

Ao meu professor coorientador, Evandro André Konopatzki, pelo zelo ao se comunicar e paciência ao ensinar.

Ao meu professor orientador, Thiago Naufal Santelo, pela parceria e coragem ao topar continuar um projeto em andamento.

Ao meu grande amigo, Lázaro Henrique Moraes Fernandes, pelas palavras essenciais em momentos precisos.

Ao meu grande amigo, Gabriel Seabra de Freitas Barbosa, pela total compreensão, sem ao menos ter que dizer uma palavra.

A meu supervisor de estágio, Claudio Augusto Mota, tanto pelo conhecimento técnico aplicado em campo e neste trabalho, bem como pela referência que é como pessoa.

A todos aqueles que não foram citados nominalmente, mas que, porém, são tão importantes quanto.

E por fim, a mim mesmo, por pensar inúmeras vezes em desistir, e mesmo assim, ter conseguido chegar até este ponto final.

## RESUMO

Os serviços auxiliares são categorizados pela natureza da corrente elétrica em que opera, alternada e contínua, ou pela importância das cargas que alimenta, normais e essenciais, respectivamente. Este nível de hierarquia existe pelo fato de que algumas destas cargas jamais podem ser desligadas, caso contrário a operação da subestação elétrica se tornaria inviável. Durante a operação normal de uma subestação, retificadores de corrente elétrica são os alimentadores primários das cargas essenciais, porém, quando em um estado emergencial, onde o fornecimento de corrente alternada é interrompido, são instalados em paralelo ao sistema, bancos de baterias, os quais podem fornecer energia às cargas essenciais até que o defeito seja solucionado. A descarga da corrente elétrica por meio de contato do material condutor com o solo é denominada falta à terra, e trata-se de um caso comum em subestações de alta tensão, em serviços auxiliares CC o defeito em questão afeta parte vital do sistema. Como conclusão dessa pesquisa constatou-se que foi possível modelar os circuitos elétricos, de forma didática, correspondentes ao sistema de corrente contínua para análise de correntes e tensões nominais; que a caracterização dos tipos de falta à terra nesses circuitos se deu pela elevação das correntes elétricas e, conseqüentemente redução na tensão elétrica e; ainda, que faltas próximas à fonte do sistema CC apresentam os piores cenários de falta, sendo o cenário em que a tensão é reduzida de forma mais abrupta, por possuir a menor resistência equivalente no sistema.

**Palavras-chave:** corrente contínua; subestação elétrica; retificadores de corrente elétrica; circuitos elétricos.

## ABSTRACT

Auxiliary services are categorized by the nature of the electrical current in which they operate, either alternating or direct current, or by the importance of the loads they supply, either normal or essential, respectively. This hierarchy exists because some of these loads can never be disconnected, otherwise the operation of the substation would become unfeasible. During the normal operation of a substation, electric current rectifiers are the primary feeders of the essential loads, however, when in an emergency state, where the supply of alternating current is interrupted, are installed in parallel to the system, banks of batteries, which can provide power to essential loads until the fault is resolved. The discharge of electrical current through contact of the conductor material with the ground is called a ground fault, and is a common occurrence in high voltage substations. In DC auxiliary services, this type of fault affects a vital part of the system. As a conclusion of this research, it was possible to model the electrical circuits with satisfactory results, in a didactic way, corresponding to the DC system for analysis of nominal currents and voltages. It was found that the characterization of ground faults in these circuits was determined by the increase in electrical currents and, consequently, the reduction in electrical voltage. Additionally, it was observed that faults near the DC system source present the worst fault scenarios, as this is the scenario in which the voltage is reduced more abruptly, due to the lower equivalent resistance in the system.

**Keywords:** direct current; electrical substation; electric current rectifiers; electric circuits.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema de geração, transmissão e distribuição de energia. ....	13
Figura 2 - Subestação FURNAS. ....	16
Figura 3 - Subestação isolada a ar, com alguns de seus equipamentos - em destaque. ....	16
Figura 4 - Alimentação típica de serviços auxiliares de corrente alternada - de usinas (a) e subestações (b). ....	18
Figura 5 - Diagrama unifilar de serviço auxiliar de corrente alternada - para o caso de uma subestação elétrica. ....	20
Figura 6 - Banco de baterias e conexões de sistemas de telecomunicações. ....	22
Figura 7 - Diagrama unifilar típico de um serviço auxiliar em corrente contínua. ....	23
Figura 8 - Diagrama esquemático de (a) condições normais de operação - e de (b) falta à terra em circuitos elétricos em corrente contínua, com detalhe para o rompimento da isolação do cabo. ....	25
Figura 9 - Diagrama esquemático do serviço auxiliar em corrente contínua em condições de operação: normal (acima) e falta à terra (abaixo). ....	26
Figura 10 - Diagrama esquemático do método de sinalização por lâmpadas. ....	27
Figura 11 - Diagrama esquemático do método de sinalização por diferença de tensões nos resistores e relés de detecção de falta à terra. ....	27
Figura 12 - Diagrama esquemático do método de sinalização por diferença de tensões nos resistores e relés de detecção de falta à terra quando da ocorrência de falta à terra. ....	28
Figura 13 - Formato de onda das correntes (a) contínua e (b) alternada. ....	29
Figura 14 - Circuito RL com abertura abrupta. ....	30
Figura 15 - Correntes e Tensões de um teste de curto-circuito. ....	31
Figura 16 - Tela inicial do Multisim com destaques. ....	32
Figura 17 - Circuito de demonstração da funcionalidade do Multisim. ....	33
Figura 18 - Circuito base para simulação de falta à terra em serviços auxiliares - C.C. ....	34
Figura 19 - Montagem do cenário genérico no Multisim. ....	35
Figura 20 - Simulação do cenário 1. ....	37
Figura 21 - Dinâmica de tensões e correntes no cenário 1. ....	38
Figura 22 - Simulação do cenário 2. ....	38
Figura 23 - Dinâmica de tensões e correntes no cenário 2. ....	39
Figura 24 - Simulação do cenário 3. ....	40
Figura 25 - Dinâmica de tensões e correntes no cenário 3. ....	40
Figura 26 - Dinâmica de tensões dos 3 cenários. ....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de resistência e reatância indutiva para cabos - de cobre, em 60 Hz. ....	36
---	----

## SUMÁRIO

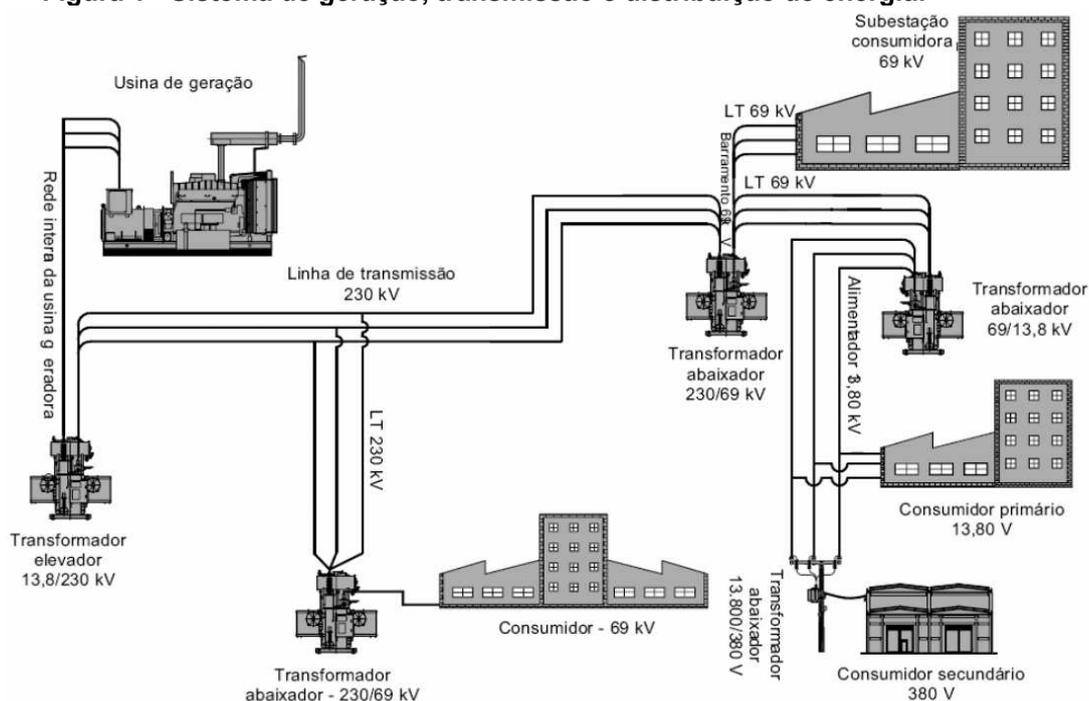
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Subestações Elétricas (SE) .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Serviços auxiliares .....</b>	<b>17</b>
2.2.1	Serviços auxiliares em corrente alternada.....	18
2.2.2	Serviços auxiliares em corrente contínua.....	21
<b>2.3</b>	<b>Falta à terra .....</b>	<b>23</b>
2.3.1	Circuito elétrico de detecção da falta à terra em circuitos $\pm 62,5$ Vcc ....	25
2.3.2	Disjuntores CC .....	28
2.3.3	Simuladores computacionais.....	32
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO.....</b>	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>37</b>
<b>4.1</b>	<b>Resultados para o cenário 1.....</b>	<b>37</b>
<b>4.2</b>	<b>Resultados para o cenário 2.....</b>	<b>38</b>
<b>4.3</b>	<b>Resultados para o cenário 3.....</b>	<b>39</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÃO .....</b>	<b>42</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>43</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O sistema de produção e distribuição de energia elétrica brasileiro é denominado Sistema Interligado Nacional (SIN), sendo a própria malha de transmissão que realiza a interconexão dos sistemas elétricos do país (ONS, 2023). Pode-se dizer que os meios de geração de energia elétrica, como as usinas hidrelétricas e nucleares, ou até mesmo as de característica renovável como solares e eólicas, são de conhecimento popular, porém, como esta energia é transmitida até o seu destino final, pode não ser tão trivial.

Através da Figura 1, pode-se visualizar simplificada o esquemático da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

**Figura 1 - Sistema de geração, transmissão e distribuição de energia.**



**Fonte: Mamede Filho (2021)**

Subestações são instalações de suma importância para o SIN, uma vez que este elemento do sistema elétrico está presente desde a transmissão da energia gerada, para destinos de dezenas a centenas de quilômetros, até a distribuição desta energia para pontos residenciais. Mas, de onde provém o fornecimento de energia para os equipamentos internos de uma subestação, como computadores, lâmpadas e tomadas?

As subestações de alta tensão devem ser providas de serviços auxiliares necessários ao seu funcionamento em condições normais de operação e permitir, em condições de defeito interno ou externo às instalações, manter determinados serviços básicos, de forma a possibilitar os trabalhos das equipes de manutenção para sua reinserção no sistema. Serviços estes que, variam em sua natureza da corrente elétrica em que opera, a depender do grau de importância da carga alimentada. (Mamede Filho, 2021).

Ao deparar-se com a informação de que existe um grau de hierarquia entre as cargas alimentadas pelo serviço auxiliar em uma subestação, é necessário que haja uma garantia de que cargas de alto valor não sejam desenergizadas quando da presença de um sinistro. Para tal, cargas vitais para a operação normal de uma subestação devem ser alimentadas em corrente contínua, uma vez que não há maneira de armazenamento de corrente alternada.

A alimentação primária de cargas essenciais é proveniente de um retificador/carregador. Quando um defeito está presente no sistema afetando a rede de alimentação alternada, se justifica a instalação de bancos de baterias e geradores paralelos à estas cargas, de modo que a operação da subestação continue viável, energizando principalmente os equipamentos de proteção. Desta forma, a confiabilidade do sistema em questão se torna maior.

Este trabalho teve como objetivo analisar possíveis faltas à terra que, quando presentes no sistema, possam acarretar em descarregamentos indevidos destes bancos de bateria, o que deve ser tratado com prioridade alta, já que estes elementos constituem a grande parte da alimentação emergencial de uma subestação. Sendo assim, foram delimitados os seguintes objetivos específicos:

1. Modelar os circuitos elétricos correspondentes ao sistema de corrente contínua para análise de correntes e tensões nominais;
2. Simular didaticamente faltas à terra, através do software Multisim, com diferentes impedâncias de falta.
3. Caracterizar os diferentes cenários de falta, pelos níveis de tensão e corrente.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Subestações Elétricas (SE)

A NBR 5460 define subestação como “Parte de um sistema de potência, concentrada em um dado local, compreendendo primordialmente as extremidades de linhas de transmissão e/ou de distribuição [...]”, possuindo equipamentos de proteção, manobra e/ou transformação.

Subestações podem ser classificadas quanto à sua (1) construção, (2) função, e (3) nível de tensão, alguns exemplos são citados abaixo:

1. Construção: Como é o ambiente da subestação em questão, a disposição dos equipamentos na mesma, fechada/interna ou a céu aberto/externa.
2. Função: Qual é o papel de determinada subestação perante o sistema elétrico, pode ser uma subestação que eleva o nível de tensão que chega até si, ou que abaixa este mesmo nível de tensão.
3. Nível de Tensão: Baixa  $\leq 1$  kV;
  - $1 \text{ kV} < \text{Média} \leq 34,5 \text{ kV}$ ;
  - $34,5 \text{ kV} < \text{Alta} \leq 230 \text{ kV}$ ;
  - Extra Alta  $> 230 \text{ kV}$ .

Na Figura 2 pode-se visualizar a subestação de FURNAS, localizada na cidade de Foz do Iguaçu. Tal subestação é de extrema importância para o sistema elétrico de energia, uma vez que secciona toda a rede de 60 Hz e uma parcela de 50 Hz, da energia proveniente da usina de Itaipu Binacional.

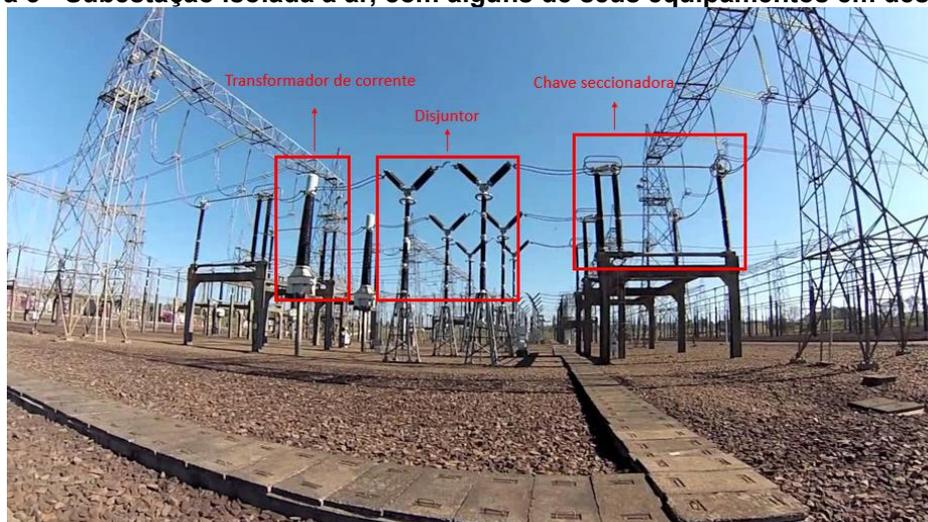
Esta subestação tem como característica construtiva do tipo a céu aberto e possui duas funções: A de elevar o nível de tensão de 500 kV  $\rightarrow$  750 kV (60 Hz); bem como, converter a energia que chega na forma de corrente alternada, em corrente contínua (50 Hz).

**Figura 2 - Subestação FURNAS.**

Fonte: H2FOZ (2021)

Como dito anteriormente, as subestações possuem equipamentos ligados aos circuitos de alta tensão, estes que podem ser de manobra, proteção e transformação, sendo estes seus principais componentes. Tratando-se de Subestações de alta tensão, são listados a seguir alguns dispositivos e na Figura 3, pode-se visualizar alguns destes equipamentos.

- Equipamentos de Transformação: Transformadores de potência, Transformadores de Medição (Transformadores de Corrente e de Potencial);
- Equipamentos de Manobra: Disjuntores e Chaves seccionadoras;
- Equipamentos de Proteção: Relés e Para-Raios.

**Figura 3 - Subestação isolada a ar, com alguns de seus equipamentos em destaque.**

Fonte: Adaptado de Unigoias (2023)

Agora, tomando o disjuntor como exemplo, seu funcionamento pode ser dividido em (1) como o arco elétrico será extinto, da mesma maneira que, (2) qual o mecanismo de acionamento deste disjuntor. Alguns exemplos abaixo:

1. Extinção do arco elétrico: A óleo, vácuo, ar comprimido e, SF<sub>6</sub>;
2. Mecanismo de acionamento: Sistema de mola, hidráulico, ar comprimido e, vácuo.

O disjuntor apresentado na Figura 3, por exemplo, tem ambos o mecanismo de acionamento, bem como o princípio de extinção do arco, um sistema de ar comprimido.

Agora, focando no acionamento do disjuntor e não em seu princípio per se, uma vez em que haja a necessidade de que este disjuntor atue, a corrente elétrica será o gatilho para a ativação deste dispositivo. Esta corrente que passa pelo disjuntor, é a mesma que passa pelo transformador de corrente, conectado em série com o mesmo, que reduz esta corrente para um nível de baixa tensão, e subsequentemente é analisada por relés de proteção, que farão o disjuntor ser acionado. Tem-se aqui então, que mesmo um disjuntor sendo de alta, seu acionamento é realizado em baixa tensão.

O sistema responsável pela alimentação destes relés de proteção, entre outros equipamentos de uma subestação, é chamado de serviço auxiliar (Duailibe, 1999), (Mamede Filho, 2013).

Um sistema é uma combinação de componentes que atuam em conjunto e realizam um determinado objetivo (OGATA, 2010). Por sua vez, tratando-se de sistema de energia elétrica, os serviços auxiliares são sistemas elétricos projetados para atender, em regime normal de operação ou regime de emergência, as necessidades funcionais de instalações de geração, de transmissão ou de distribuição, para manutenção da capacidade operativa dessas instalações (ONS, 2017).

## **2.2 Serviços auxiliares**

Os serviços auxiliares tipicamente encontrados em instalações das empresas que compõem o setor elétrico brasileiro dividem-se de acordo com o tipo de tensão

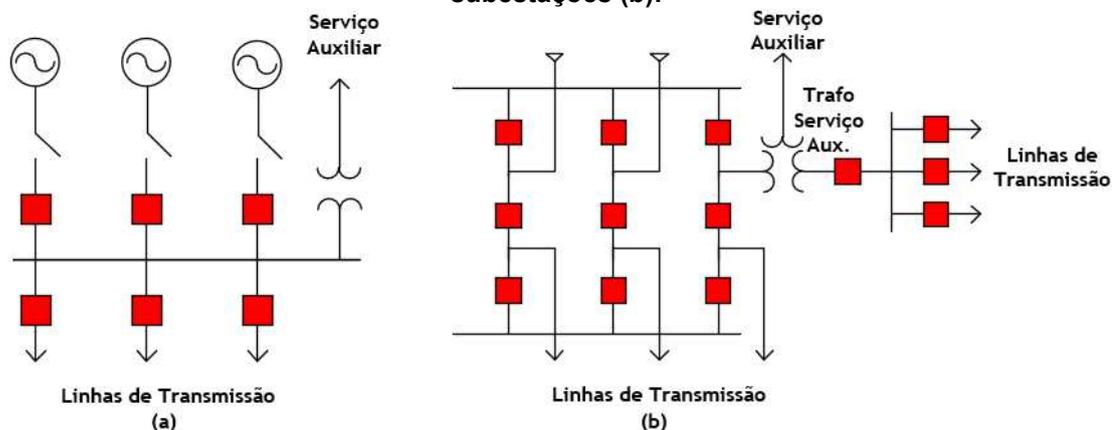
elétrica de alimentação em dois tipos: (1) serviços auxiliares em corrente alternada e (2) serviços auxiliares em corrente contínua.

Essa diferenciação acarreta na separação das cargas elétricas relacionadas a cada um dos serviços auxiliares levando-se em consideração a importância do circuito alimentado e os danos causados à instalação elétrica em questão nos casos de desenergização intempestiva dessas cargas.

### 2.2.1 Serviços auxiliares em corrente alternada

Os serviços auxiliares em corrente alternada se relacionam, tipicamente, com a alimentação de cargas elétricas com níveis de relevância baixos ou médios para a instalação elétrica ou com redundância plena de alimentação através de outras fontes. Os *layouts* típicos de serviços auxiliares em corrente alternada, utilizados em usinas e em subestações, podem ser visualizados na Figura 4, mostrada a seguir.

**Figura 4 - Alimentação típica de serviços auxiliares de corrente alternada de usinas (a) e subestações (b).**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Conforme pode ser visualizado na parte (a) da Figura 4, a alimentação típica de serviços auxiliares de corrente alternada provém, no caso de usinas, através de uma transformação conectada ao próprio barramento principal alimentado pelas unidades geradoras.

Dessa forma, devido ao fato de que a alimentação para o serviço auxiliar em corrente alternada, normalmente, é realizada em tensão elétrica de 13,8 kV, faz-se necessário um transformador próprio para serviço auxiliar como aquele apresentado na Figura 4 (a). Naturalmente, quanto maior a tensão elétrica do barramento principal

da usina em questão, maior o transformador (ou banco de transformadores) necessário para rebaixar a tensão até o nível requerido pelo serviço auxiliar em corrente alternada.

Em subestações elétricas, Figura 4 (b), a alimentação típica dos serviços auxiliares em corrente alternada dessas instalações é obtida através do terciário de um dos transformadores de potência instalados na planta. Os transformadores de potência tipicamente utilizados em subestações possuem três enrolamentos, sendo que o terciário, na maioria dos casos com tensão elétrica nominal de 13,8 kV, pode ser destinado à alimentação do serviço auxiliar de corrente alternada (D'Ajuz, 1985).

Logicamente, porém, essa utilização deve ser considerada desde a etapa de projeto visto que deve compor a especificação em termos de carregamento de potência a qual o transformador pode ser submetido. Em caso de especificação inadequada, por exemplo, o transformador de potência pode sofrer avarias de corrente alternada ou ocorrências de curto circuitos nesse serviço auxiliar (Frontin, 2013).

Independente da instalação elétrica considerada, quer usinas, quer subestações elétricas, o serviço auxiliar de corrente alternada possui um padrão da natureza das cargas elétricas que alimenta. Algumas cargas elétricas tipicamente alimentadas em corrente alternada são:

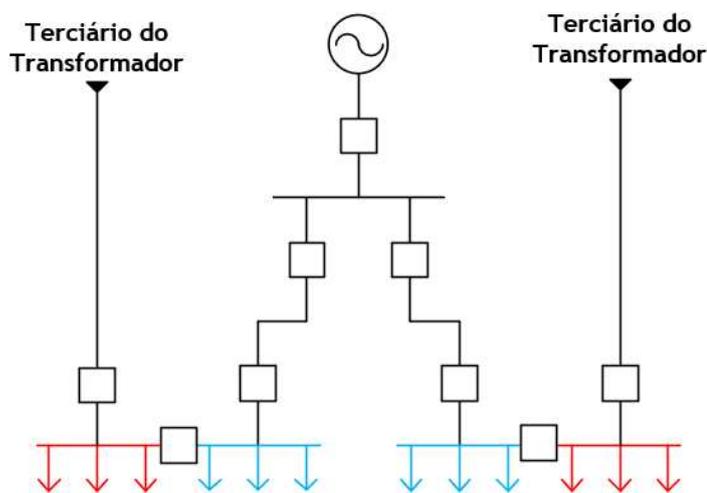
- Circuitos de iluminação normal das instalações;
- Circuitos de tomadas para uso geral ou para uso específico;
- Sistemas de aquecimentos de painéis elétricos (destinados a evitar a condensação da umidade do ar ambiente dentro desses painéis);
- Circuitos elétricos para acionamento de bombas hidráulicas (destinadas ao esvaziamento de poços de drenagem, pressurização de circuitos de óleo utilizados em reguladores de velocidade ou acionamento de sistemas anti-incêndio, por exemplo); e
- Sistemas de compressão de ar (destinados à pressurização de sistemas interligados de ar comprimido utilizados em diversas aplicações industriais).

Nem todas as cargas elétricas alimentadas pelo serviço auxiliar de corrente alternada possuem o mesmo nível de importância. Dessa forma, existe uma diferenciação destas cargas elétricas de acordo com critérios de relevância diante de condições emergenciais observadas na operação diária em tempo real.

Tal diferenciação resulta no fato de que as cargas elétricas em corrente alternada com maior relevância possuam duas ou mais fontes de alimentação e que, necessariamente, pelo menos uma dessas fontes seja alimentada por um grupo gerador de emergência (na maioria dos casos, um grupo gerador de emergência movido a um motor diesel). Essas cargas elétricas de maior relevância são denominadas cargas elétricas essenciais.

Por sua vez, as cargas elétricas alimentadas pelo serviço auxiliar em corrente alternada que não possuem redundância de alimentação ou que não sejam alimentadas em condições emergenciais (através de um grupo gerador de emergência) são denominadas cargas normais. A Figura 5 apresenta o diagrama unifilar típico do serviço auxiliar em corrente alternada de uma instalação elétrica evidenciando a diferença entre as cargas elétricas alimentadas.

**Figura 5 - Diagrama unifilar de serviço auxiliar de corrente alternada para o caso de uma subestação elétrica.  
Gerador Diesel**



Fonte: Adaptado de Furtado (2014)

Na Figura 5 vê-se um diagrama unifilar de serviço em corrente alternada padrão. Nesse diagrama pode-se observar a diferença, no tocante às fontes de alimentação, entre as cargas essenciais (azul) e as cargas elétricas normais (vermelho).

Em condições normais de operação do serviço auxiliar em corrente alternada, o disjuntor localizado no barramento das cargas elétricas permanece fechado sendo que todo o barramento permanece alimentado através dos circuitos oriundos do enrolamento terciário do transformador da subestação.

Em condições de emergência, que ocasionem a desenergização do transformador de potência e, por consequência, seu enrolamento terciário, o gerador diesel de emergência recebe um comando de partida e assume as cargas elétricas essenciais. As cargas normais são desenergizadas através da abertura do disjuntor de interligação do barramento de cargas para que não haja sobrecarga do gerador de emergência.

O nível de tensão básico do serviço auxiliar em corrente alternada, é 460 Vac e 220 Vac, tradicionalmente. Dessa forma, o próprio serviço auxiliar é composto de transformadores rebaixadores para atender às cargas elétricas nesses níveis de tensão.

Diante de um curto-circuito em qualquer das cargas de serviço auxiliar em corrente alternada ocorre o disparo do disjuntor de alimentação da respectiva carga de tal forma a proteger o restante das cargas do problema envolvendo o circuito pontual.

### 2.2.2 Serviços auxiliares em corrente contínua

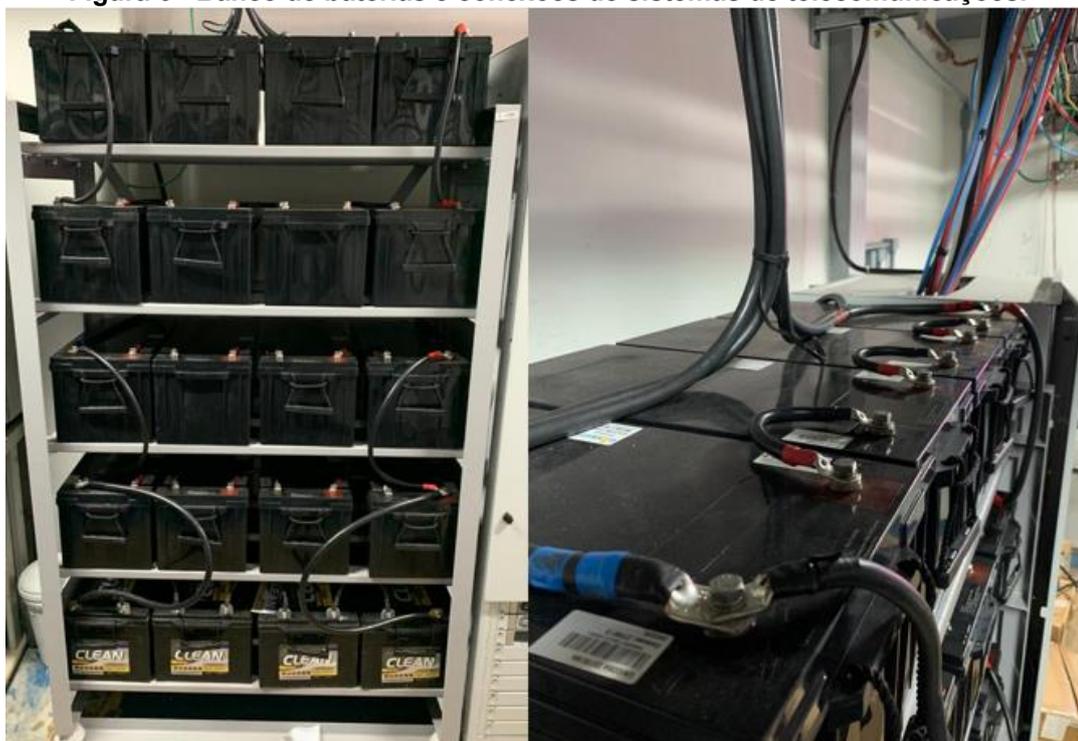
Os serviços auxiliares em corrente contínua, por sua vez, são construídos para alimentar circuitos essenciais para a operação da instalação elétrica em questão. Esses circuitos elétricos essenciais que não podem ser desenergizados em hipótese alguma, correspondem às seguintes cargas elétricas:

- Sistemas de proteção elétrica e/ou mecânica de equipamentos (unidades geradoras, linhas de transmissão, transformadores de potência, reatores, barramentos, bancos de capacitores, dentre outros);
- Circuitos de controle de equipamentos de alta relevância (sistemas de regulação de velocidade, sistemas de regulação de tensão, circuitos relacionados à partida e parada de unidades geradoras, por exemplo);
- Circuitos de iluminação de emergência;
- Sistemas relacionados à medição e faturamento de energia elétrica (atrelado à linhas de interligação); e
- Circuitos digitais relacionados a sistemas supervisórios, alimentação de anunciadores de alarmes e de eventos.

Tradicionalmente, os serviços auxiliares em corrente contínua contam com duas fontes de alimentação independentes. A primeira, que em condições normais de operação trabalha como fonte principal, provém da retificação da corrente alternada conectada diretamente do serviço auxiliar em corrente alternada.

A segunda fonte de alimentação do serviço auxiliar em corrente contínua, por sua vez, tem como origem um banco de baterias alcalinas (mostrado na Figura 6).

**Figura 6 - Banco de baterias e conexões de sistemas de telecomunicações.**



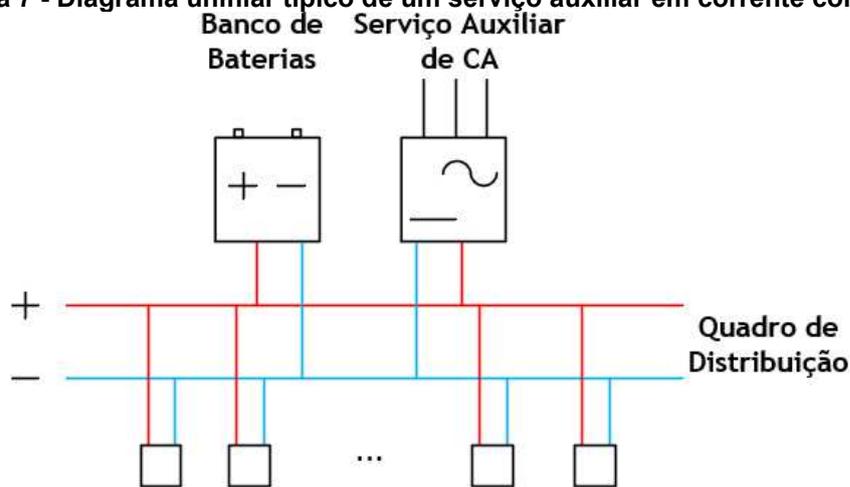
**Fonte: Autoria própria (2023)**

Essa fonte de alimentação garante a continuidade da alimentação das cargas ligadas em corrente contínua em caso de perda do serviço auxiliar em corrente alternada. O diagrama unifilar tradicional de um serviço auxiliar em corrente contínua pode ser visualizado na Figura 7.

O nível de tensão típico dos serviços auxiliares em corrente contínua é 125 Vcc entre os terminais positivo (vermelho) e negativo (azul). Essa diferença de potencial pode ser obtida de duas formas: (1) elevando o potencial positivo a 125 Vcc e aterrando o potencial negativo, em 0 Vcc ou (2) elevando o potencial positivo a 62,5 Vcc e rebaixando o potencial negativo a -62,5 Vcc.

Em instalações elétricas com maior necessidade de confiabilidade, o segundo modo anteriormente citado é preferível visto que a perda de um dos polos não acarreta na perda do sistema como um todo.

**Figura 7 - Diagrama unifilar típico de um serviço auxiliar em corrente contínua.**



Fonte: Adaptado de Furtado (2014)

Em condições normais de operação, a tensão elétrica fornecida pelo retificador é mantida em níveis ligeiramente superiores ao nível nominal (em torno de 130 Vcc). Esse nível mais alto de tensão (denominado tensão de flutuação), visa alimentar as cargas elétricas conectadas ao serviço auxiliar em corrente contínua e, simultaneamente, carregar continuamente os bancos de baterias.

A conexão involuntária ao potencial de terra, denominada comumente como falta à terra, se constitui o principal problema relacionado a serviços auxiliares em corrente contínua e a identificação do circuito elétrico sob falta deve ser realizada de forma emergente devido à vulnerabilidade à qual o serviço auxiliar em corrente contínua se submete.

Mediante uma condição de curto-circuito, não ocorrerá o disparo do disjuntor de alimentação do circuito em questão. Tal condição deve-se ao fato de as cargas elétricas em corrente contínua não poderem ser desenergizadas. A ocorrência dessa situação resulta na condição de falta à terra no serviço auxiliar em corrente contínua.

### 2.3 Falta à terra

Falta à terra em serviços auxiliares em corrente contínua é a denominação comum da diminuição da resistência de isolamento de determinado circuito elétrico em

corrente contínua devido ao comprometimento da isolação elétrica desse circuito. Essa diminuição resulta em uma corrente elétrica de fuga e submete o polo envolvido a uma queda em sua diferença de potencial, que é detectada através de um relé de subtensão especial, denominado relé de falta à terra (Reimert, 2005).

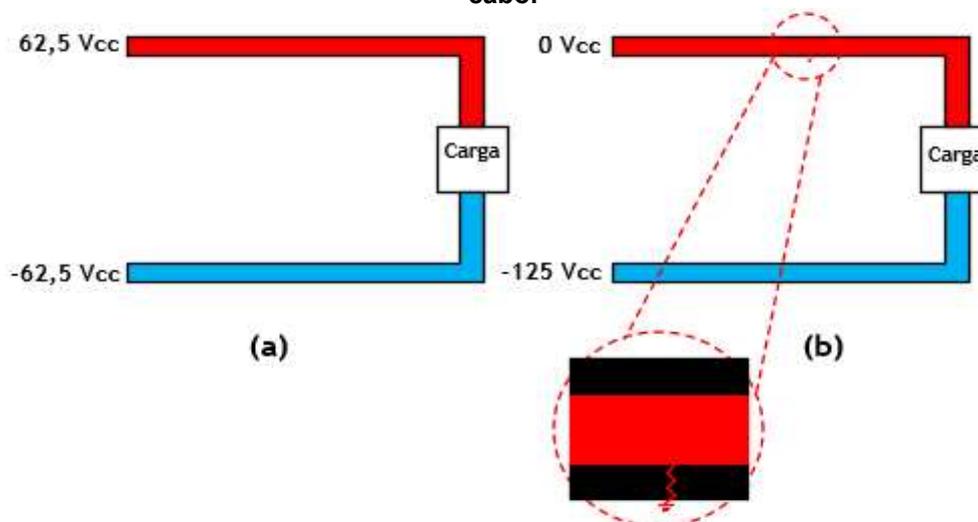
As causas de falta à terra podem ser as mais variadas, desde o aumento da umidade presente ao redor dos condutores energizados, a execução de aterramentos involuntários durante a execução de serviços relacionados à manutenção corretiva ou preventiva de equipamentos alimentados pelo serviço auxiliar em corrente contínua, até animais ou insetos que possam vir a danificar a isolação do condutor (Eish & Youssef, 1988). Um diagrama esquemático do modo de ocorrência das faltas à terra em serviços auxiliares em corrente contínua está apresentado na Figura 8.

Logicamente, para casos citados anteriormente, o comportamento da queda de tensão elétrica varia. Enquanto que em faltas à terra devido à umidade ao redor dos condutores, a queda de tensão é gradual e atinge o valor de pick-up do relé de falta à terra próximo aos limiares de acionamento, as faltas à terra derivadas de trabalho das equipes de manutenção são permanentes e geram maiores valores de tensão elétrica.

Porém, tendo como base a Figura 8 (b), vê-se o seguinte comportamento típico da tensão elétrica do serviço auxiliar em corrente contínua diante de uma falta à terra: a diferença de potencial do terminal (positivo ou negativo) com falha de isolação tende a se aproximar de zero (quanto menor a impedância sobre a qual a falta se instaura, menor a tensão elétrica resultante).

Por outro lado, os retificadores e os bancos de bateria são projetados de tal forma a manter a diferença de potencial em 125 Vcc. Assim, diante do afundamento de tensão elétrica do terminal sob falta, o terminal sadio tem a diferença de potencial compensada, atingindo valores próximos a 125 Vcc. Essa é a razão pela qual em sistemas que necessitam de alta confiabilidade, ambos os terminais são afastados do potencial de terra.

**Figura 8 - Diagrama esquemático de (a) condições normais de operação e de (b) falta à terra em circuitos elétricos em corrente contínua, com detalhe para o rompimento da isolamento do cabo.**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Na prática, em condições normais de operação, a ocorrência de uma falta à terra não acarreta em problemas imediatos, mas torna o sistema vulnerável à ocorrência de uma segunda falta à terra envolvendo o terminal sadio. Diante da ocorrência dessa segunda falta, as cargas elétricas alimentadas em corrente contínua são desenergizadas, o que pode resultar na operação indevida de equipamentos de proteção, por exemplo.

A identificação e localização do circuito elétrico com baixa isolamento, que está refletindo na condição de falta à terra do sistema, são bastante complicadas e requerem manobras ou atuações pela parte da equipe de operação/manutenção, mais invasivas que o comum, que podem acarretar em uma queda no grau de confiabilidade da alimentação das cargas elétricas, conectadas a este sistema (Marrero, 2000).

### 2.3.1 Circuito elétrico de detecção da falta à terra em circuitos $\pm 62,5$ Vcc

A detecção de falta à terra no serviço auxiliar de corrente contínua, conforme citado anteriormente, é efetuada através de um relé de detecção de falta à terra, localizado nos quadros de distribuição. Esses relés funcionam como relés de subtensão ajustados para sinalizar a falta para tensões inferiores a determinado valor de ajuste (tradicionalmente 40 Vcc).

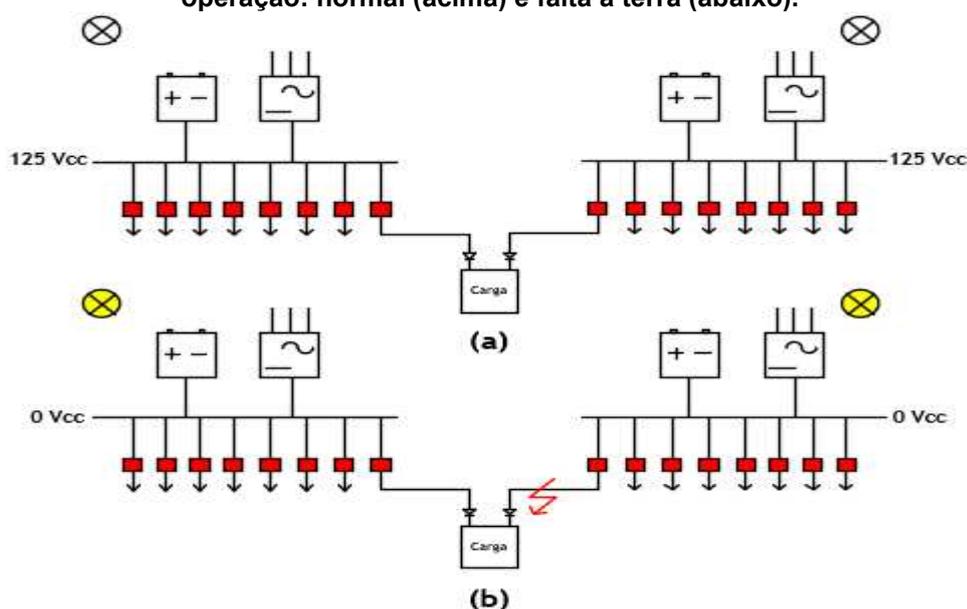
Para garantir o atendimento, os serviços auxiliares em corrente contínua são compostos por dois quadros de distribuição, de modo a garantir a redundância de

alimentação e permitir a desconexão de um deles para manutenções periódicas ou corretivas, quando necessário.

Assim, diante do acionamento da condição de falta à terra, como ambos os quadros de distribuição operam conectados, os relés de detecção de falta à terra dos dois quadros de distribuição acionam informando a condição defeituosa. Normalmente, essa sinalização ocorre no local, na parte frontal desses quadros e nos sistemas digitais de supervisão.

O diagrama esquemático dos quadros de distribuição em corrente contínua que alimentam as cargas elétricas de alta relevância dentro de uma instalação elétrica (quer usina quer subestação) estão apresentadas na Figura 9. Nessa mesma figura, está apresentada a sinalização frontal dos quadros de distribuição e o acionamento desta quando da detecção de falta à terra pelos relés.

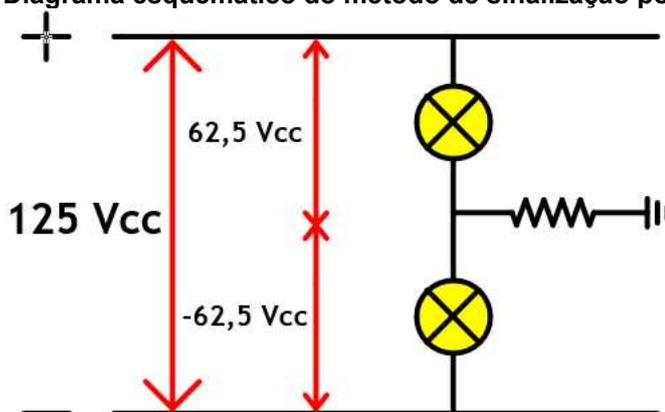
**Figura 9 - Diagrama esquemático do serviço auxiliar em corrente contínua em condições de operação: normal (acima) e falta à terra (abaixo).**



Fonte: Adaptado de Furtado (2014)

A sinalização presente nos quadros de distribuição de corrente contínua é acionada através do método de sinalização por diferença de lâmpadas (Araujo, 2004). A sinalização por diferença de lâmpadas faz uso de um circuito elétrico simples composto por duas lâmpadas permanentemente acesas ligadas em conjunto com um relé de alarme (código 74 da tabela ANSI). Esta configuração está apresentada na Figura 10.

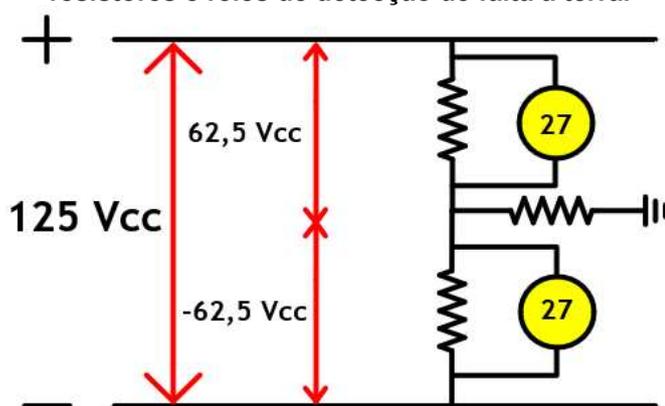
Figura 10 - Diagrama esquemático do método de sinalização por lâmpadas.



Fonte: Adaptado de Furtado (2014)

Em condições normais, as lâmpadas apresentam a mesma intensidade luminosa, porém em condições de falta à terra em qualquer dos polos, a luminosidade se torna diferente, possibilitando a identificação visual de falta e acionamento do alarme. A evolução deste método fez com que as lâmpadas (e, por consequência, a identificação visual), fossem substituídas por resistores cujas quedas de tensão são monitoradas pelos relés de detecção de falta à terra, citado anteriormente. O valor de pick-up deste relé está ajustado, conforme dito anteriormente, em 40 Vcc. Esse esquema pode ser visualizado na Figura 11.

Figura 11 - Diagrama esquemático do método de sinalização por diferença de tensões nos resistores e relés de detecção de falta à terra.

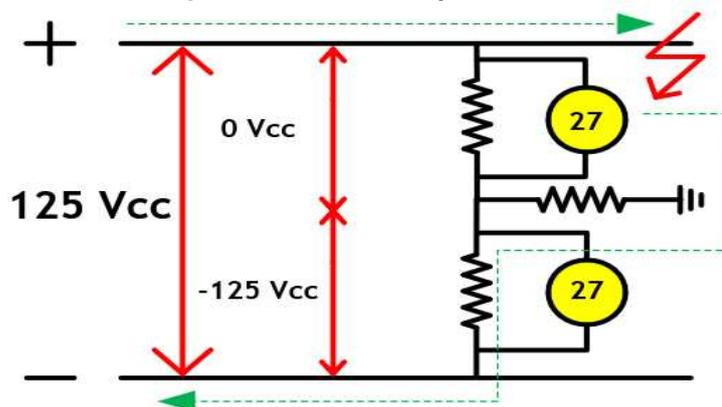


Fonte: Adaptado de Furtado (2014)

Esse esquema de detecção de falta à terra em serviços auxiliares em corrente contínua possui um arranjo elétrico bastante semelhante às proteções elétricas utilizadas para a determinação de defeitos com envolvimento de terra em rotores de unidades geradoras (Kindermann, 1999).

A atuação dos relés de detecção de falta à terra se dá mediante a subtensão originada no desbalanço da corrente elétrica entre os ramos do circuito apresentado anteriormente no instante da falta. O diagrama esquemático contendo o circuito elétrico resultante no momento da falta à terra está apresentado na Figura 12.

**Figura 12 - Diagrama esquemático do método de sinalização por diferença de tensões nos resistores e relés de detecção de falta à terra quando da ocorrência de falta à terra.**



Fonte: Adaptado de Furtado (2014)

Diante da atuação da falta à terra, deve-se localizar o circuito elétrico sob falta na brevidade possível. Esse fato, como citado, pode afetar equipamentos que estiverem ao alcance do curto-circuito, como cabeamento relacionado a dados e ou controle de equipamentos, podendo resultar em operações indesejadas e danos à instalação (por exemplo, incêndios) apesar da corrente contínua fluindo à terra possuir diferenças consideráveis em relação à corrente alternada que envolvam a perda de isolamento em circuitos elétricos (Thomas, Wiggins, Salas, Nickel, & Wright, 1994), (Fleischer & Parise, 1996), (Chew & Tseng, 2016), (Woodhouse, Tocher, & Bale, 2016).

### 2.3.2 Disjuntores CC

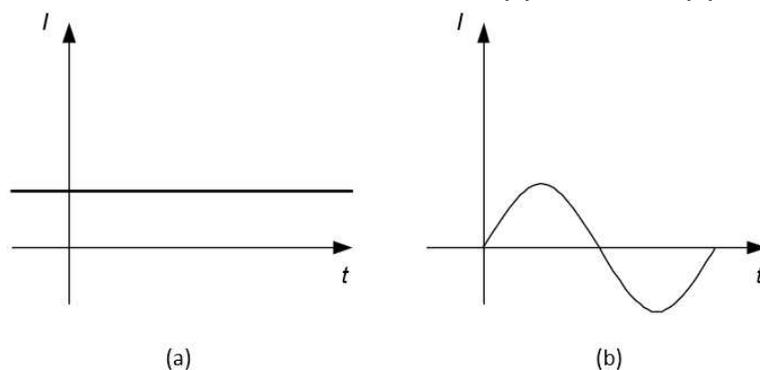
Disjuntores são equipamentos capazes de interromper a corrente de um circuito elétrico de maneira que seja possível, após o seu seccionamento, o religamento deste equipamento. Atua tanto na proteção contra sobrecargas, que geram correntes pouco elevadas em relação à nominal, bem como contra curtos-circuitos, onde se tem valores de corrente de até oito vezes a nominal. (NBR 5361).

Pode ser utilizado também na operação de circuitos, como seccionador estratégico, entre cargas de prioridades maiores que outras, por exemplo. No diagrama da Figura 5, pode-se visualizar esta aplicação do disjuntor, representado pelos quadrados brancos, onde aqueles que dividem os barramentos entre vermelho (não prioritário) e azul (prioritário), atuam de maneira a isolar uma região específica do circuito totalitário.

A diferença na natureza das correntes elétricas contínua e alternada, é algo que merece atenção, quando se trata da interrupção de arco elétrico, gerado pela abertura abrupta dos terminais de um disjuntor. Nesse quesito, o artigo técnico de aplicação de (ABB, 2011) foi utilizado como base para o entendimento dos principais critérios os quais um disjuntor de corrente contínua deve cumprir.

Através da Figura 13, pode-se visualizar as formas de onda comuns das correntes: contínua (a) e alternada (b). Por meio desta visualização, fica explícita a causa da nomenclatura destes tipos de corrente, e também pode-se observar o fato de que quando se trata de corrente alternada, há a passagem natural dela pelo zero (valor nulo), e quando se observa o comportamento da corrente contínua, fica claro que o mesmo não acontece com este tipo de corrente.

**Figura 13 - Formato de onda das correntes (a) contínua e (b) alternada.**



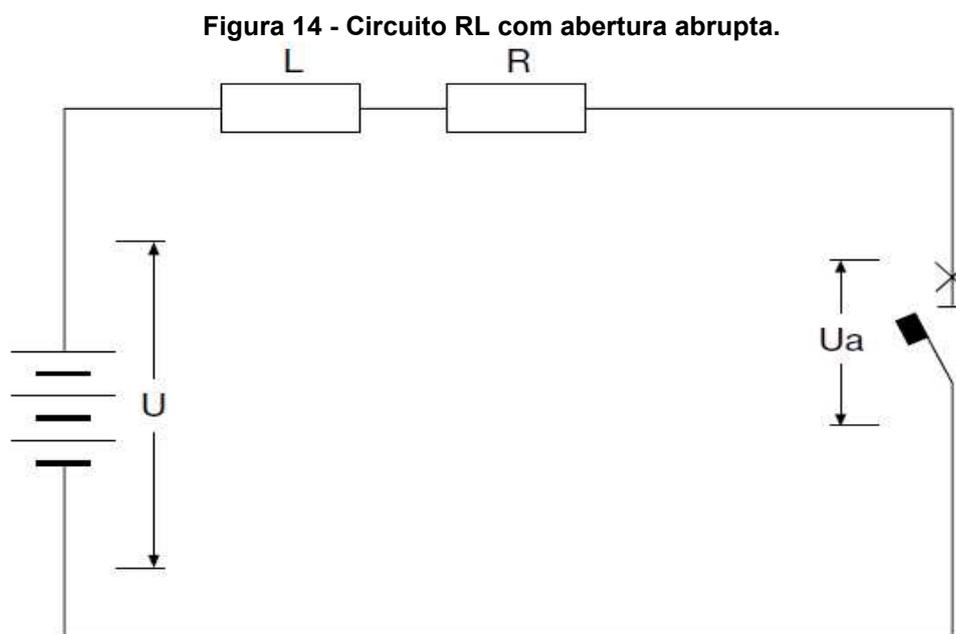
**Fonte: Adaptado de ABB (2011)**

Se tratando de proteção de sistemas, e mais especificamente da extinção do arco elétrico formado pela separação abrupta de dois contatos, o fato de a corrente alternada ciclicamente passar pelo valor nulo, dá ao disjuntor CA uma vantagem, já que quando a corrente se encontra neste valor, a separação dos seus contatos pode ser feita sem a formação de um arco elétrico.

De maneira distinta, sabe-se que em se tratando de corrente contínua, o mesmo não ocorre, então, para que o disjuntor CC possa atuar de fato, o valor da

corrente elétrica deve ser forçado a zero, para que altos valores de tensão de pico sejam evitados, devido às causalidades que estas magnitudes de tensão ocasionariam.

Para que a extinção do arco seja efetiva em um disjuntor CC, é necessário atender a uma condição, a qual será descrita através da equação obtida pela da Lei de Kirchoff para as tensões, através da representação de um circuito LR, na Figura 14.



Fonte: Adaptado de ABB (2011)

Sendo  $U$  a tensão da fonte,  $U_a$  a tensão do arco elétrico,  $L$  a indutância e  $R$  a resistência do circuito, assume-se então, uma corrente  $i$  no sentido horário, desta forma, obtemos a equação (1).

$$U - L \frac{di}{dt} - Ri - U_a = 0 \quad (1)$$

Isolando o termo  $\frac{di}{dt}$ , sendo este a derivada da corrente elétrica do circuito em relação ao tempo, ou aquele que representa a variação de corrente em questão.

$$L \frac{di}{dt} = U - Ri - U_a \quad (2)$$

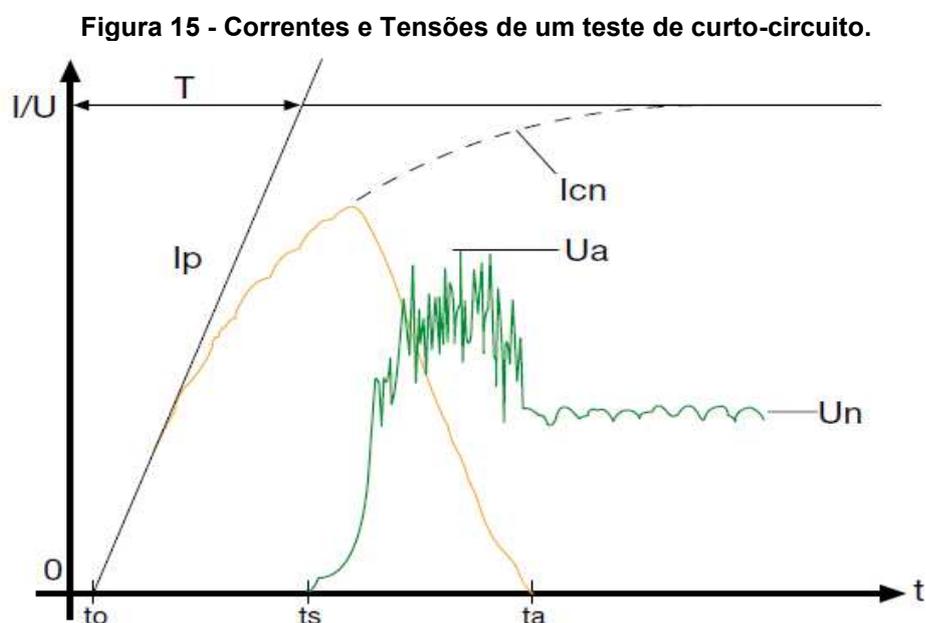
Para que ocorra a extinção do arco elétrico, é necessário que a variação de corrente no instante seja decrescente, ou seja:

$$\frac{di}{dt} < 0 \rightarrow U_a > U - Ri \quad (3)$$

Desta maneira se conclui que para que o disjuntor atue de maneira correta, o valor da tensão de arco  $U_a$  deve ser maior que a tensão do sistema somada à queda de tensão dos fios e/ou carga.

Analisando a Figura 15, pode-se notar a tela de um osciloscópio que foi utilizado para um teste de curto-circuito. Este gráfico apresenta variáveis importantes, quando se trata da atuação de um disjuntor CC.

O início se dá pelo tempo  $t_0$ , quando o evento do curto-circuito acontece, e  $I_p$ , a corrente de curto, que ascende proporcionalmente à constante de tempo  $T$ . Em  $t_s$ , os contatos do disjuntor se separam, originando assim, o arco voltaico, que precisa ser extinto e resfriado, para que assim, a resistência gerada pelo arco seja crescente, durante o processo de abertura dos contatos, ocasionando em uma tensão de pico  $U_a$ , que retorna para  $U_n$ , a tensão da rede, assim que a corrente de falta é extinta, em  $t_a$



Fonte: (ABB, 2011)

É válido ressaltar que estas características necessárias para a extinção do arco elétrico em disjuntores CC se aplicam apenas para disjuntores de alta tensão, porém seu princípio de ação é o mesmo para todos os níveis de tensão.

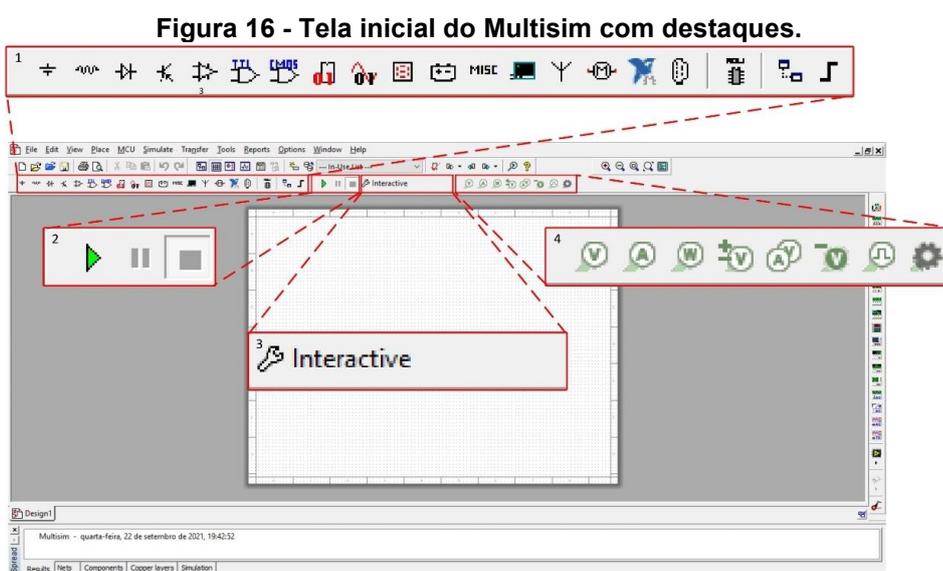
### 2.3.3 Simuladores computacionais

Esta seção do trabalho se dedica a mencionar o software NI Multisim Student Edition, o qual possibilitou a elaboração dos circuitos que representam uma parcela de um serviço auxiliar C.C.

Simulador do tipo SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), ou, simulação programada com ênfase em circuitos integrados, o Multisim possui uma vasta biblioteca de elementos de circuitos elétricos e parâmetros de simulação, desde elementos simples como resistores, até a complexidade de circuitos integrados. “O Multisim™ é um ambiente de simulação SPICE padrão da indústria e software de projeto de circuitos para o ensino e pesquisa de eletrônica digital, analógica e de potência.” (Instruments, 2021).

A Figura 16 apresenta a tela inicial do software, com alguns destaques para as ferramentas, geralmente, mais utilizadas, sendo elas:

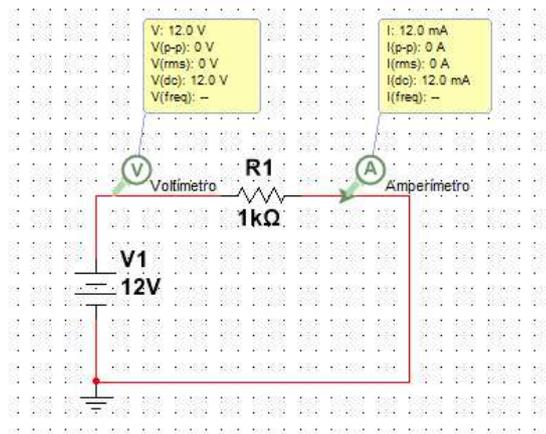
- (1) – Barra de elementos circuitais, onde se escolhe e adiciona ao canvas, desde resistores, até circuitos integrados;
- (2) – Barra de inicialização, pausa ou parada da simulação;
- (3) – Barra de interação, onde se escolhe os parâmetros da simulação; e
- (4) – Barra de testes, onde se localizam os medidores de grandezas elétricas, como tensão, corrente ou potência.



**Fonte: Autoria própria (2023).**

Uma simulação de exemplo é demonstrada na Figura 17, que apresenta um circuito básico, com uma fonte de corrente contínua, e um resistor em série, bem como as medidas de corrente e tensão do circuito, apresentadas pelas pontas de prova.

**Figura 17 - Circuito de demonstração da funcionalidade do Multisim.**

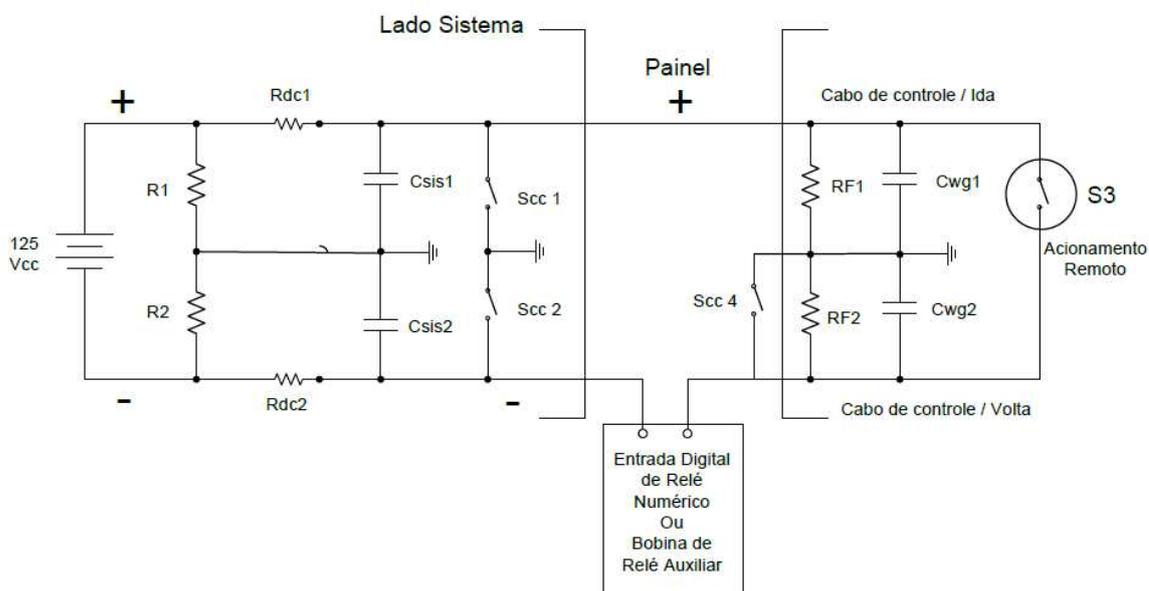


**Fonte: Autoria própria (2023)**

### 3 DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO

O primeiro passo para a avaliação e, conseqüentemente, caracterização das faltas à terra, foi definir a estrutura do circuito elétrico que representa, neste trabalho, um sistema auxiliar de corrente contínua. A Figura 18, retirada do artigo “Detecção de fuga a terra em sistemas de corrente contínua”, serviu de base para a montagem das simulações realizadas no Multisim.

**Figura 18 - Circuito base para simulação de falta à terra em serviços auxiliares C.C.**



**Fonte: Adaptado de Ederson C. dos Santos, et al., (2015)**

Para o presente trabalho, foram definidos 3 cenários de falta à terra em um circuito de corrente contínua, sendo eles:

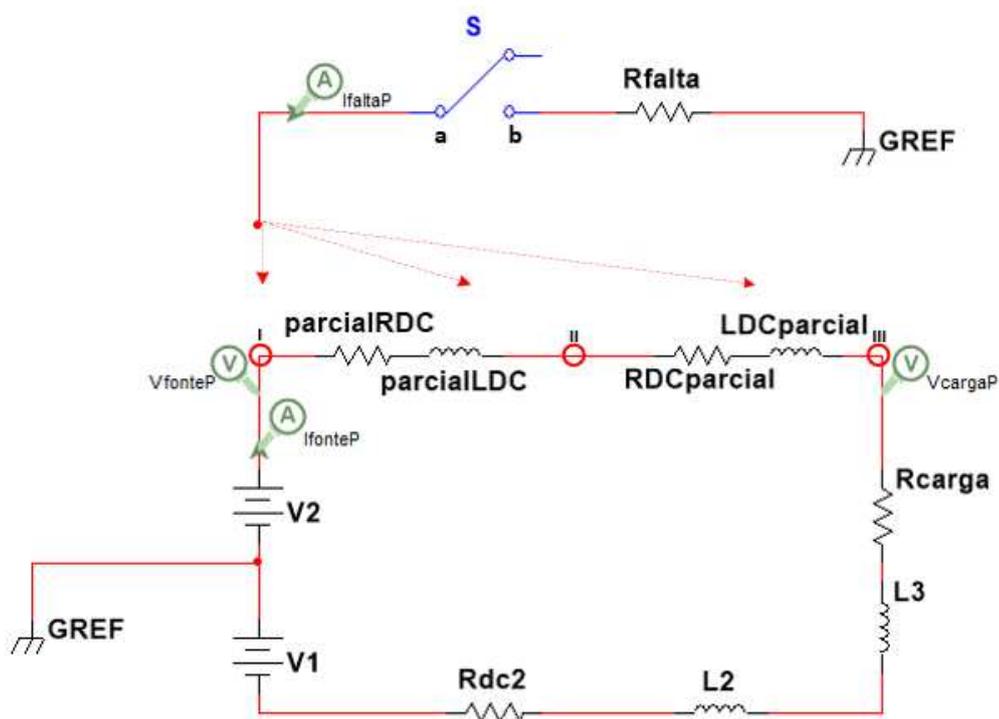
Cenário 1 – Falta diretamente em um dos polos do banco de baterias;

Cenário 2 – Falta em um trecho do circuito, entre a carga e o banco de baterias; e

Cenário 3 – Falta diretamente em um dos polos da carga.

As simulações realizadas têm sua estrutura simples, uma fonte e três conjuntos de resistência + reatância, sendo dois destes referentes às impedâncias cabos, e o conjunto restante, à carga do circuito. Através da Figura 19, é possível visualizar a montagem de uma simulação genérica, demonstrando a conexão do ramo de falta aos seus devidos pontos do circuito.

Figura 19 - Montagem do cenário genérico no Multisim.



Fonte: Autoria própria (2023)

Em um regime normal de operação, chave seletora S, se encontra em sua posição inicial (aberta), durante o tempo de operação “a”, quando este tempo é atingido, a chave muda de posição (fechada), fazendo com que uma parte do circuito seja conectada, através de uma impedância de falta, à terra. A chave fica na posição fechada, até que o tempo “b” seja atingido.

Os diferentes cenários propostos, se dão pela conexão do ramo de falta, a um dos 3 círculos indicadores no circuito (I, II e III), seguindo a mesma ordem proposta pelos cenários, ou seja, quando se simula o primeiro cenário, a conexão será feita com o ponto I, de maneira subsequente, o segundo cenário no ponto II, e finalmente o terceiro e último cenário, no ponto III.

Como se trata de um cenário genérico, foi necessária a divisão da impedância de linha do polo positivo, a qual, em sua totalidade se dá pela soma de  $RDC + LDC_{parcial} + parcialRDC + parcialLDC$ . Tomando um exemplo para um melhor entendimento: suponha-se que a falta tenha ocorrido em um ponto do circuito que representa 30% da linha que conecta o polo positivo à carga, a parte  $parcialRDC + parcialLDC$  será dada pela impedância total da linha *versus* 30%, e conseqüentemente, a parte  $RDC + LDC_{parcial}$ , 70%.

Existem também, neste circuito, medidores de tensão e corrente, que serão as variáveis coletadas e analisadas, sendo eles:

- Ifalta1P – Corrente de falta;
- Ifonte1P – Corrente proveniente do banco de baterias;
- Vfonte1P – Tensão do banco de baterias; e
- Vcarga1P – Tensão na carga.

Para o regime de operação dos circuitos analisados, a impedância do cabo de conexões foi determinada através do livro “Proteção de Sistemas Elétricos de Potência”, que possibilitou a construção da Tabela 1. Além disso o valor da carga também foi retirado do mesmo.

**Tabela 1 - Valores de resistência e reatância indutiva para cabos de cobre, em 60 Hz.**

Área de secção transversal ( $mm^2$ )	Resistência ( $\frac{\Omega}{m}$ )	Reatância ( $\frac{\Omega}{m}$ )
4	$5,5118 \cdot 10^{-3}$	$0,1279 \cdot 10^{-3}$
6	$3,7065 \cdot 10^{-3}$	$0,1225 \cdot 10^{-3}$
10	$2,2221 \cdot 10^{-3}$	$0,1207 \cdot 10^{-3}$
16	$1,3899 \cdot 10^{-3}$	$0,1173 \cdot 10^{-3}$

**Fonte: Adaptado de Filho & Mamede (2011).**

A configuração do banco de baterias pode ser vista na Figura 19, dividido em dois elementos únicos de  $62,5V_{cc}$ , de impedância interna  $10^{-6} \Omega$ , conectados em série, com a referência do circuito entre os dois elementos. A distância escolhida entre o banco de baterias e a carga, foi de 150 metros para cada polo do banco. Além disso, a bitola do fio condutor selecionado foi de  $16mm^2$ .

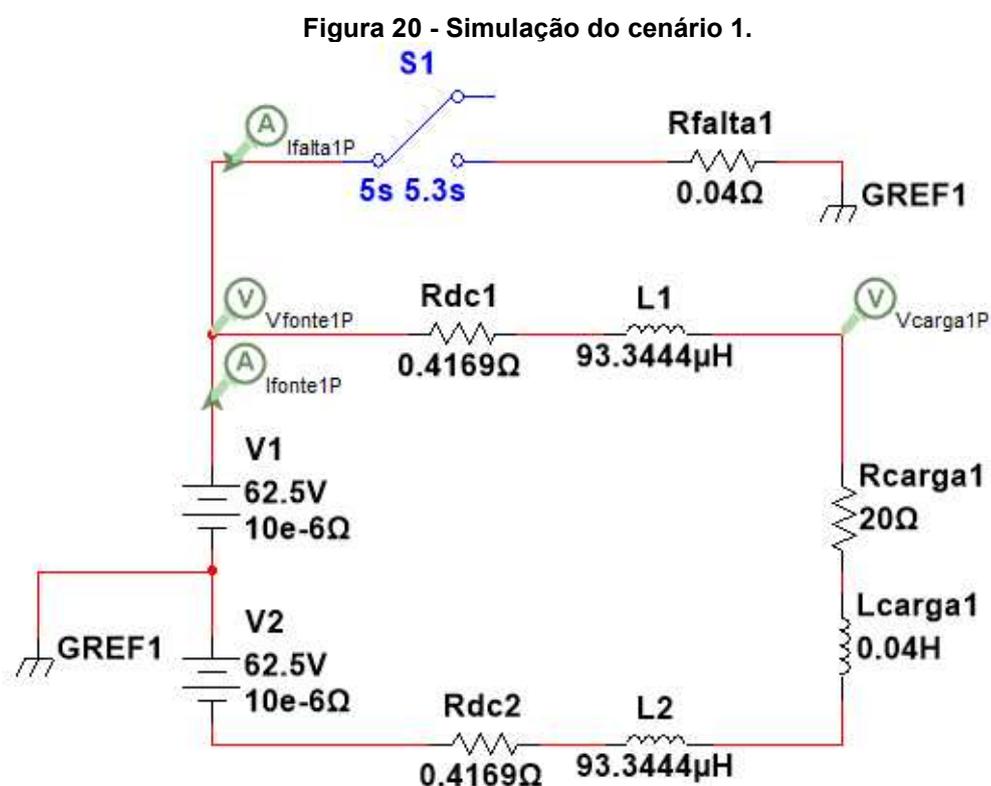
Na simulação, as faltas foram sustentadas por 0,3s e, em seguida, o circuito foi normalizado pela abertura da chave S, como se pode visualizar na Figura 19.

Os resultados foram apresentados em gráficos de tensão e corrente elétrica versus tempo, fornecidos pelo Multisim, onde foram analisadas as quedas de tensão e correntes de falta de cada cenário simulado.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Resultados para o cenário 1

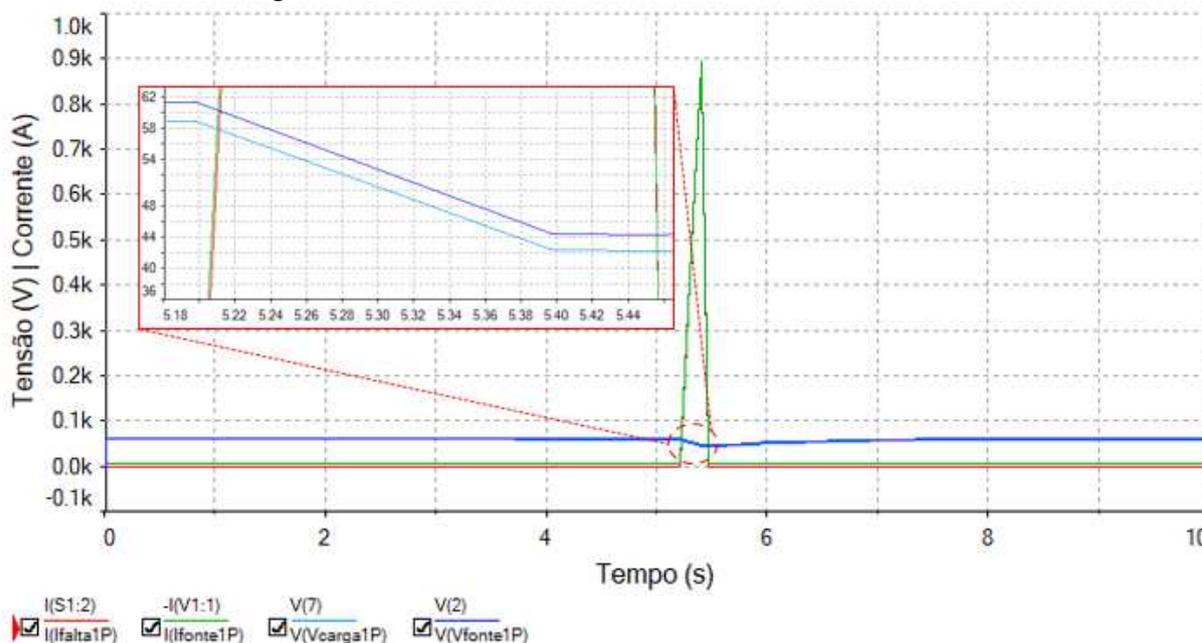
No cenário 1, ao atingir um tempo de simulação de 5s, o ramo da falta é conectado ao circuito, permanecendo até o tempo 5.3s, posteriormente a chave retorna à sua posição original, eliminando a falta do circuito. Como apresentado na Figura 20.



Fonte: Autoria própria (2023)

A corrente da fonte foi elevada de 6A para 894A, enquanto a tensão na fonte e carga foram reduzidas ao patamar de 44V e 42V, como mostra a Figura 21

Figura 21 - Dinâmica de tensões e correntes no cenário 1

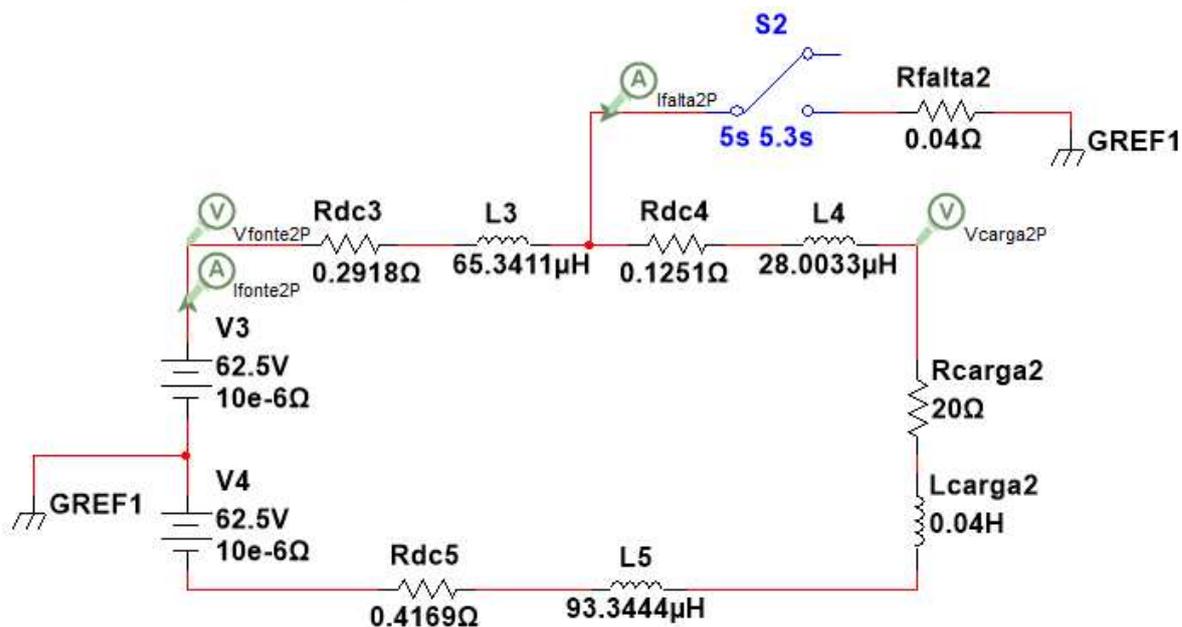


Fonte: Autoria própria (2023)

## 4.2 Resultados para o cenário 2

No cenário 2 a chave seletora é conectada no instante de 5s, assim como o anterior, e retornando à posição original da mesma maneira, demonstrado na Figura 22.

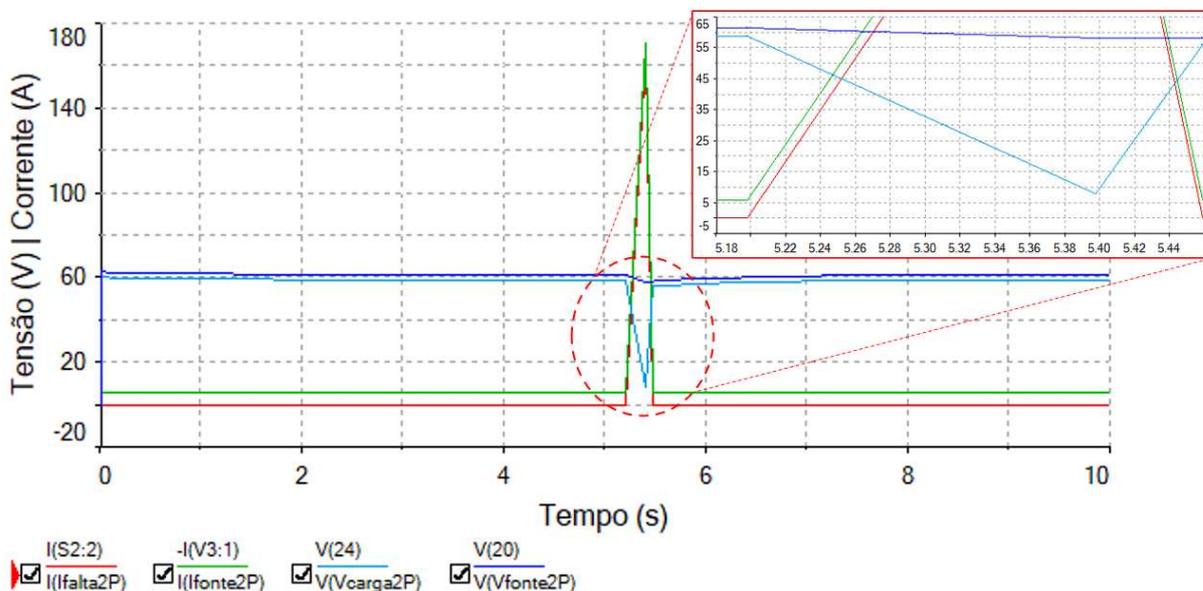
Figura 22 - Simulação do cenário 2.



Fonte: Autoria própria (2023)

A corrente da fonte foi elevada de 5.9A para 170.35A, enquanto a tensão na fonte e carga foram reduzidas ao patamar de 58.14V e 7.91V, como mostra a Figura 23.

**Figura 23 - Dinâmica de tensões e correntes no cenário 2**

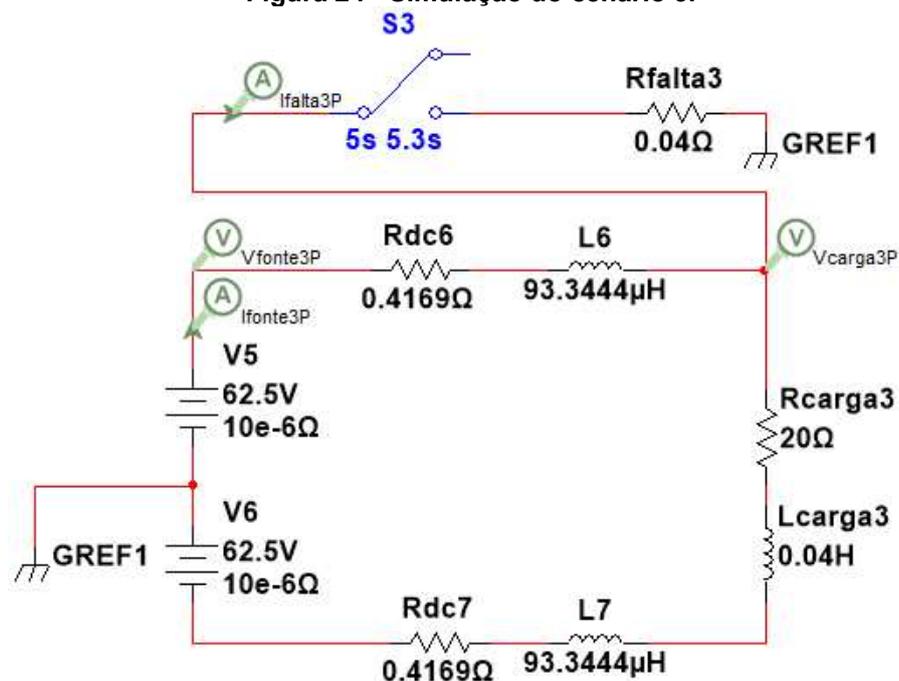


Fonte: Autoria própria (2023)

### 4.3 Resultados para o cenário 3

Por fim, no cenário 3, a chave seletora da falta é conectada e desconectada do circuito nos mesmos instantes dos cenários anteriores, como apresentado na Figura 24.

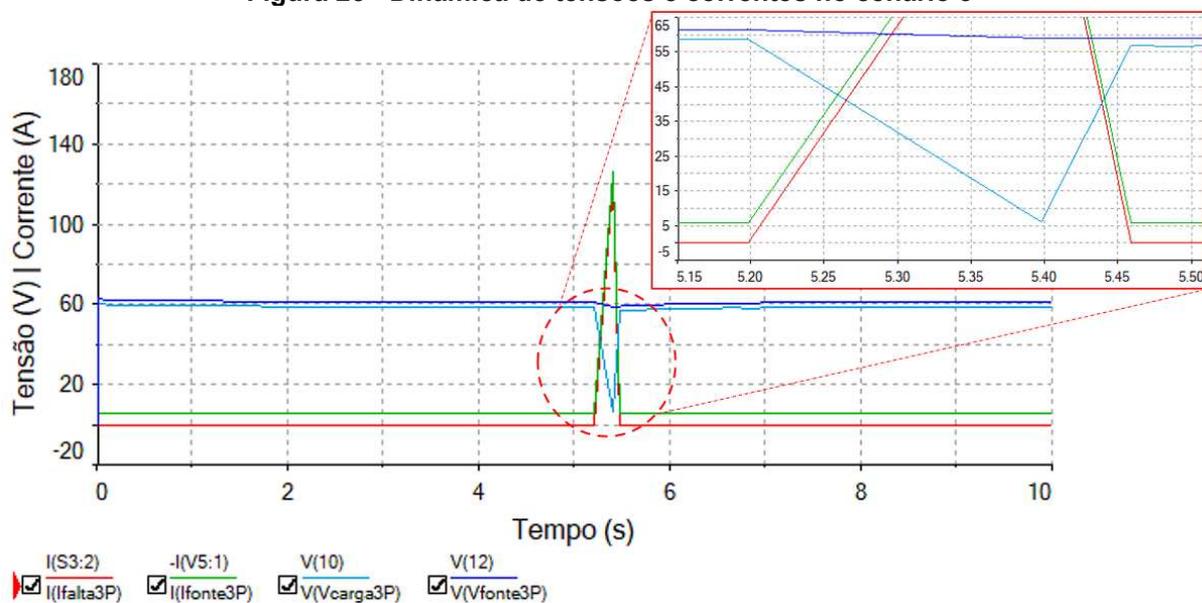
Figura 24 - Simulação do cenário 3.



Fonte: Autoria própria (2023)

A corrente foi elevada de 5.9A para 126.5A, enquanto a tensão na fonte e carga foram reduzidas ao patamar de 59V e 6.16V, como mostra a Figura 25.

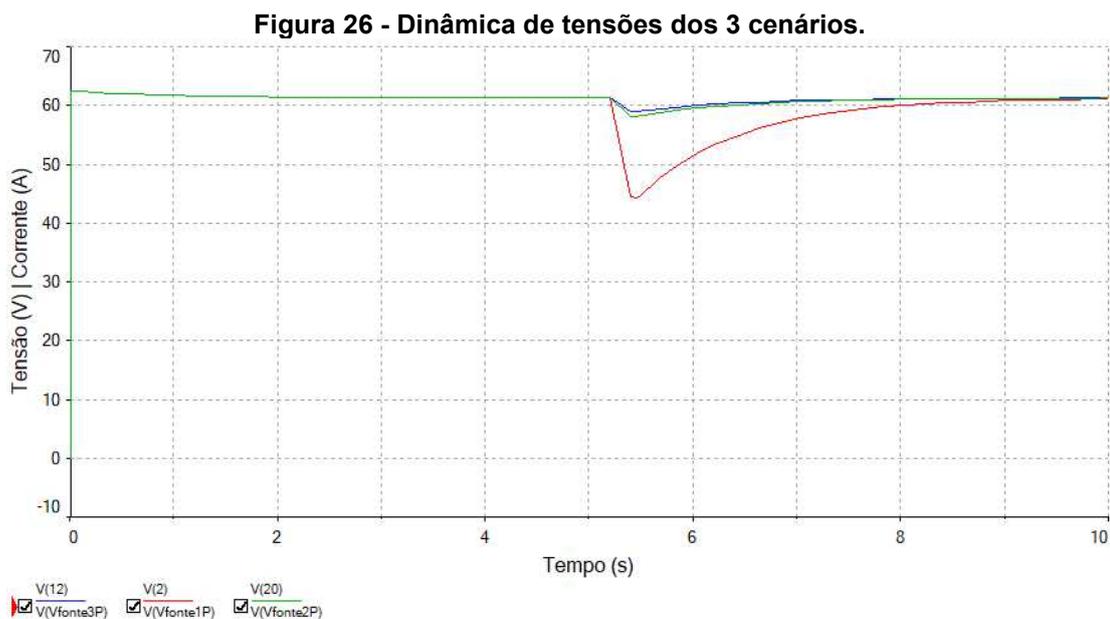
Figura 25 - Dinâmica de tensões e correntes no cenário 3



Fonte: Autoria própria (2023)

### 3.4. Análise comparativa das quedas de tensão

Ao realizar-se uma sobreposição das tensões e correntes dos circuitos simulados acima, pode-se ter uma perspectiva geral dos sistemas, bem como entender qual o pior dos cenários, através da Figura 26.



Fonte: Autoria própria (2023)

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÃO

Este trabalho buscou caracterizar os sistemas auxiliares quanto às faltas para a terra em circuitos de baixa tensão de corrente contínua. Esses circuitos são alimentados por bancos de baterias, fontes e retificadores e remetem ao acionamento dos equipamentos instalados nas subestações de alta tensão.

A simulação didática de faltas à terra, através do software Multisim, em trechos distintos da conexão à terra, mostrou-se aplicável na avaliação de faltas em circuitos CC, representando simplificadamente seus efeitos elétricos, possibilitando assim, um estudo mais aprofundado do assunto, se desejado.

Foi possível modelar os circuitos elétricos, com resultados satisfatórios, correspondentes ao sistema de corrente contínua para análise de correntes e tensões nominais.

A caracterização dos tipos de falta à terra nesses circuitos se deu pela elevação das correntes elétricas e, conseqüentemente redução na tensão elétrica.

Para faltas próximas à fonte do sistema CC, nota-se o pior cenário de falta, sendo aquele em que a tensão é reduzida de forma mais abrupta, por possuir a menor resistência equivalente no sistema.

O presente trabalho buscou, inicialmente, simular cenários de falta à terra em ambas as polaridades do sistema banco de baterias/carregador, porém, devido à limitação do tema e simulação, os resultados obtidos foram diferenciados apenas por um espelhamento em relação ao eixo das abcissas, tornando desnecessária a apresentação destes resultados.

Como sugestão de trabalhos futuros, para continuidade desta pesquisa, a realização de ensaios de campo poderia validar os circuitos desenvolvidos. Bem como o dimensionamento do sistema de proteção do serviço auxiliar CC.

## REFERÊNCIAS

ABB. (2011). **Technical Application Papers No.5 ABB circuit-breakers for direct current applications.**

ARAUJO, F. (2004). **Detecção de Falta a Terra no Serviço auxiliar em Corrente Contínua das Subestações de Energia Elétrica.** Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1992). **NBR 5460: Sistemas Elétricos de Potência.** Rio de Janeiro.

CHEW, S., & TSENG, K. (2016). **A Line to Ground Fault Detection Technique for ELVDC Distribution System in Built Environment.** IEEE Transaction on Power Delivery.

D'AJUZ, A. (1985). **Equipamentos Elétricos: Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão.** Furnas, Rio de Janeiro, Brasil.

DUALIBE, P. (1999). **Subestações: Tipos, Equipamentos e Proteção.**

Ederson C. dos Santos, C., Jorge M. Oura, V., Paulo K. Maezono, V., Takayuti Ko-bayashi, V., Thiago V. Oliveira, E., & Paulo R. Andreus, E. (2015). **Detecção de fuga a terra em sistemas de corrente contínua.**

EISH, T., & YOUSSEF, F. (1988). **Effect of temperature rise and water contamination on leakage current in underwater used XLPE insulated power cables.** IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Boston, Estados Unidos.

FILHO, J. M. (2013). **Manual de Equipamentos Elétricos.** Rio de Janeiro: LTC.

FILHO, J. M. (2021). **Subestações de Alta Tensão.** Rio de Janeiro: LTC.

FILHO, J. M., & MAMEDE, D. R. (2011). **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Rio de Janeiro: LTC.

FLEISCHER, K., & PARISE, G. (1996). **DC Auxiliary Power System Minimum and Arcing Ground Faults in Industrial Facilities**. IEEE Transaction on Power Delivery.

FRANCHI, C. M. (2008). **Acionamentos Elétricos**. São Paulo: Érica .

FRONTIN, S. D. (2013). **Equipamentos de Alta Tensão - Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas**. Teixeira, Brasília, Brasil.

FURTADO, J. B. (2014). *Slideshare*. Fonte: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência: <https://pt.slideshare.net/marceloqueirozlira/aula-11-44609644>

H2FOZ. (21 de 10 de 2021). **Prevalece o verde. Nível dos rios do Paraná melhorou em sete dias**. Fonte: H2FOZ:  
<https://www.h2foz.com.br/meteorologia/prevalece-o-verde-nivel-dos-rios-do-parana-melhorou-em-sete-dias>

INSTRUMENTS, N. (23 de 09 de 2021). **National Instruments**. Fonte: National Instruments: <https://www.ni.com/pt-br/shop/electronic-test-instrumentation/application-software-for-electronic-test-and-instrumentation-category/what-is-multisim.html>

KINDERMANN, G. (1999). **Proteção de Sistemas Elétricos - Volume 1**. Editora UFSC, Florianópolis, Brasil.

MARRERO, J. (2000). **Understand Ground Fault Detection and Isolation in DC Systems**. Power Engineering Society Summer Meeting IEEE, Volume 3, p.1707-1711.

OGATA, k. (2010). **Engenharia de Controle Moderno**. São Paulo: Pearson Prentice Hall.

ONS. (08 de 02 de 2023). **O que é o SIN**. Fonte: Operador Nacional do Sistema: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>

ONS, Operador Nacional do Sistema. (2017). **Procedimentos de Rede - Sumódulo 20.1 - Glossário de Termos Técnicos**. Rio de Janeiro, Brasil.

REIMERT, D. (2005). **Protective relaying for power generation systems**. Taylor and Francis Group, Danvers, Estados Unidos.

THOMAS, D., WIGGINS, C., SALAS, T., NICKEL, F., & WRIGHT, S. (1994). **Induced Transients in Substation Cables: Measurement and Model**. IEEE Transaction on Power Delivery.

UNIGOIAS. (08 de 02 de 2023). **Engenharia Elétrica**. Fonte: UNIGOIAS: <https://anhanguera.edu.br/cursos/engenharia-eletrica/>

WOODHOUSE, D., TOCHER, W., & BALE, M. (2016). **How does Current Flow in the Ground?** IEEE Transaction on Power Delivery.