

**INSTITUTO FEDERAL**

Paraíba

Campus João Pessoa

CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

KIJARTAN ALENCAR BARROS DE VASCONCELOS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ESTUDOS DE PROTEÇÃO DIGITAL PARA SISTEMAS ELÉTRICOS  
DE POTÊNCIA SOB DIVERSAS CONDIÇÕES DE FALTAS EM  
BANCADA DIDÁTICA SMART GRID**

João Pessoa  
2023

KIJARTAN ALENCAR BARROS DE VASCONCELOS

ESTUDOS DE PROTEÇÃO DIGITAL PARA SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA SOB  
DIVERSAS CONDIÇÕES DE FALTAS EM BANCADA DIDÁTICA SMART GRID

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação do Curso Superior de Bacharelado  
em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da  
Paraíba como parte dos requisitos necessários  
para a obtenção do grau de Bacharel em  
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Orientadora:

Diana Moreno Nobre, Dra.

João Pessoa  
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *campus* João Pessoa

V331e Vasconcelos, Kijartan Alencar Barros de.

Estudos de proteção digital para sistemas elétricos de potência sob diversas condições de faltas em bancada didática *smart grid* / Kijartan Alencar Barros de Vasconcelos - 2023.

69 f.: il.

TCC (Graduação - Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação da Paraíba / Unidade Acadêmica de Processos Industriais, 2023.

Orientação: Prof<sup>a</sup> D.ra Diana Moreno Nobre.

1. Sistema elétrico de potência. 2. Proteção digital. 3. Rede elétrica. 4. Bancada *smart grid*. 5. Relé digital de proteção de linha. I. Título.


CDU 621.3.016.2(043)

KIJARTAN ALENCAR BARROS DE VASCONCELOS

ESTUDOS DE PROTEÇÃO DIGITAL PARA SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA SOB  
DIVERSAS CONDIÇÕES DE FALTAS EM BANCADA DIDÁTICA SMART GRID


*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação do Curso Superior de Bacharelado  
em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da  
Paraíba como parte dos requisitos necessários  
para a obtenção do grau de Bacharel em  
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Trabalho Aprovado em 10 / 02 / 2023 pela banca examinadora:

Documento assinado digitalmente  
 ALVARO DE MEDEIROS MACIEL  
Data: 06/04/2023 21:15:56-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Álvaro de Medeiros Maciel, Dr  
Examinador, IFPB

Documento assinado digitalmente  
 FRANKLIN MARTINS PEREIRA PAMPLONA  
Data: 06/04/2023 18:22:25-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Franklin Martins Pereira Pamplona, Dr.  
Examinador, IFPB

Documento assinado digitalmente  
 DIANA MORENO NOBRE  
Data: 10/04/2023 10:27:22-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Diana Moreno Nobre, Dra.  
Orientadora, IFPB

*Este trabalho é dedicado a todos que me apoiaram com incentivo, com ações, com palavras e com todo tipo de suporte durante essa trajetória na qual passei por diversos tipos de adversidades e, sem essas pessoas, nada disso seria possível.*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por conta que sem ele agindo de forma indireta através das pessoas que me apoiaram durante todo esse processo de formação, me dando forças e determinação para continuar me erguendo em meio às dificuldades.

A partir disso, quero começar agradecendo a minha noiva Letícia Regina de Souza e ao meu irmão Dartanhan Alencar, por estarem sempre me apoiando e caminhando junto comigo em meio às dificuldades que se colocaram na nossa vida, sendo fundamentais em me manter focado aos meus objetivos, com suas palavras calorosas de incentivo, seus gestos de carinho, além de me ensinar a nunca desistir independente do quão difícil a situação poderia parecer, agradeço a Deus todos os dias por tê-los em minha vida, sem eles eu com certeza não conseguiria chegar nesse momento e tão pouco continuar lutando pelas coisas que são importantes para mim.

Desejo agradecer também a todos os meus amigos, colegas e professores, os quais me apoiaram no decorrer de todo o desenvolvimento do curso e na produção desse Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), atuando diretamente no meu crescimento acadêmico de maneira geral. Em especial agradeço ao meu amigo Villeneve Oliveira, ao professor Franklin Martins Pereira Pamplona e à professora Diana Moreno Nobre, os quais foram fundamentais na formação da minha base de conhecimento sobre as atividades desenvolvidas durante todo o processo.

Agradeço também à empresa Colégio Pio XI Bessa, a qual acreditou no meu trabalho enquanto ainda estava em formação escolar, contratando-me para trabalhar nas áreas de robótica e informática, atividades nas quais me ajudaram a desenvolver meu conhecimento sobre aspectos indispensáveis de tecnologia aplicadas na formação dos alunos que orientei, tanto em relação a maneira na qual o conteúdo era transmitido a eles, quanto aos aspectos em que se deve organizar todo tipo de estudo da maneira mais efetiva possível.

Quero agradecer de forma especial ao meu antigo chefe de trabalho, o professor Leonardo de Carvalho, o qual faleceu em julho de 2021, o mesmo era peça chave em todo meu desenvolvimento sobre robótica de um aspecto em geral, além de lições valiosas sobre a vida e sobre trabalho, as quais vou me lembrar durante toda minha jornada independentemente do local em que eu venha a atuar.

Por fim, quero agradecer de maneira muito especial ao meu pai Antonio Alencar Diniz, no qual faleceu no dia 22/11/2021, e a minha mãe Claudia Aracelli Barros de Vasconcelos, que faleceu no dia 14/09/2022. Os mesmos foram indispensáveis em toda minha criação e meu desenvolvimento, tanto no aspecto da vida quanto no de caráter, das minhas visões sobre todo tipo de aspecto das coisas sobre o mundo, e sempre me apoiaram em finalizar meu curso de forma independente das dificuldades. Vou ser eternamente grato a eles por terem sido tão fundamentais e importantes em minha vida. Tenho fé que eles consigam ver a finalização desse TCC e de todo meu curso, além de tudo que ainda pretendo desenvolver no decorrer do meu caminho.

## RESUMO

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a atuação de um relé digital de proteção de linha, aplicando diferentes tipos de faltas ao sistema elétrico simulado na bancada didática Smart Grid no Laboratório de Sistemas Elétricos de Potência (LABSEP), no Instituto Federal da Paraíba – Campus João Pessoa. Para esta avaliação, são simulados experimentalmente diversos tipos de faltas como: 1) Curto-circuito trifásico, 2) Curto-circuito monofásico (ambos, com e sem impedância de terra), 3) Curto-circuito bifásico simples e 4) Curto-circuito bifásico com terra. As respostas de um relé de proteção digital predefinido para as falhas simuladas são avaliadas. Para uso em laboratório, foi desenvolvida uma interface “Supervisão e Aquisição de Dados” (SCADA), específica para realização de testes que, posteriormente, poderá ser utilizada em aulas práticas relacionadas à proteção de linhas em sistemas elétricos de potência.

**Palavras-chave:** Sistema Elétrico de Potência, Proteção, Rede Elétrica, Smart Grid.



## ABSTRACT

The general objective of of this work is to evaluate the digital line protection relay, applying different types of faults to the electrical system simulated in the Smart Grid didactic bench at the Laboratory of Electrical Power Systems (LABSEP), at the Federal Institute of Paraíba - Campus Joao Pessoa. For this evaluation, several types of faults are experimentally simulated, such as: 1) Three-phase short-circuit, 2) Single-phase short-circuit (both with and without ground impedance), 3) Single-phase short-circuit and 4) Two-phase short-circuit with land. The responses of a standard digital protection relay to the simulated faults are evaluated. For use in the laboratory, a “Supervision and Data Acquisition” (SCADA) interface was developed, specific for carrying out tests that, later, can be used in practical classes related to the protection of lines in electrical power systems.

**Keywords:** System, Protection, Electrical Network, TCC, Smart Grid.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Funcionamento base de um sistema de proteção. ....	17
Figura 2: Diagrama unifilar sobre um sistema de proteção para uma linha de transmissão. ....	18
Figura 3: Exemplo de uma zona de proteção. ....	19
Figura 4: Principais componentes do TC. ....	22
Figura 5: Método simbólico representando um ponto de marcação;.....	24
Figura 6: Ligação de um Transformador de Potência (TP). ....	25
Figura 7: Sequência do Processo decorrente de um arco elétrico nos disjuntores de alta tensão. ....	26
Figura 8: Ilustração simplificada de um relé eletromecânico. ....	27
Figura 9: Base de uma proteção diferencial. ....	28
Figura 10: Modelo genérico de uma proteção diferencial. ....	29
Figura 11: Representação de um curto-circuito fora da zona de proteção. ....	29
Figura 12: Ilustração de um curto-circuito ocorrido dentro da zona protegida. ....	30
Figura 13: Bancada Smart Grid De Lorenzo. ....	36
Figura 14: Módulos utilizados no desenvolvimento. ....	36
Figura 15: Exemplificação da maneira em que uma geração de um sistema elétrico se comporta. ....	38
Figura 16: Esquema de ligação nos módulos com o intuito da simulação de uma geração eólica. ....	40
Figura 17: Esquema de ligação nos módulos com o intuito da simulação de uma geração fotovoltaica. ....	41
Figura 18: Ilustração do módulo DL SIMSUN. ....	42
Figura 19: Esquema de ligação nos módulos com o intuito da simulação de uma geração hidrelétrica. ....	44
Figura 20: Representação de um sistema elétrico de Transmissão. ....	45
Figura 21: Linha de transmissão de 360 km, 380 kV e 1000A, Módulo DL7901TT. ...	46
Figura 22: Módulo DL7901TTS, Linha de transmissão de 100 km, 380kV e 1000 <sup>a</sup> . ....	47
Figura 23: Fluxograma da metodologia aplicada. ....	55
Figura 24: Diagrama unifilar do circuito. ....	56
Figura 25: Circuito montado na bancada. ....	57
Figura 26: Exercício do software SCADA sobre sobrecorrente. ....	58

Figura 27: Capacitâncias na linha de transmissão.....	59
Figura 28: Bancada de carga resistiva.....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estatísticas da falta em relação ao elemento do sistema elétrico. ....	15
Tabela 2: Módulos da Bancada Smart Grid De Lorenzo utilizados para simulação do sistema de geração eólica. ....	39
Tabela 3: Módulos da Bancada Smart Grid De Lorenzo utilizados para simulação do sistema de geração fotovoltaico.....	41
Tabela 4: Módulos da Bancada Smart Grid De Lorenzo utilizados para simulação do sistema de geração hidrelétrica.....	43
Tabela 5: Módulo DL7901TT, características construtivas e parâmetros da linha de transmissão de 360 km .....	46
Tabela 6: Módulo DL7901TTS, características construtivas e parâmetros da linha de transmissão de 100 km. ....	47
Tabela 7: Seções didáticas do software SCADA.....	53

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Alternating Current
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente alternada
CC	Corrente Contínua
DC	Direct Current
IFPB	Instituto Federal da Paraíba
NBR	Norma Brasileira
LABSEP	Laboratório de Sistemas Elétricos de Potência
PB	Paraíba
SCADA	Supervisão e Aquisição de Dados
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TPC	Transformador do tipo Capacitivo
TPI	Transformador de Potência do tipo Indutivo

# SUMÁRIO

1. Introdução .....	14
1.1. Sistema de Proteção .....	16
1.2. Elementos de um sistema de proteção .....	17
1.3. Base de condições para sistemas de proteção .....	19
2. Princípios Básicos dos Equipamentos de Proteção nos Sistemas Elétricos.....	21
2.1. Introdução .....	21
2.2. Transformador de Corrente.....	22
2.3. Transformadores de Potência.....	24
2.4. Disjuntores para Alta Tensão.....	25
2.5. Características dos Relés de Proteção.....	26
2.5.1. Características do Relé de Sobrecorrente.....	27
2.5.2. Características do Relé Diferencial .....	28
2.5.3. Conceito dos Componentes Simétricos.....	30
3. Materias e Métodos.....	35
3.1. Introdução .....	35
3.2. Bancada Smart Grid.....	35
3.2.1. Sistemas para Geração .....	38
3.2.2. Sistemas de Proteção.....	47
3.2.3. Software SCADA.....	52
4. Desenvolvimento e Resultados .....	55
4.1. Resultados .....	61
5. Conclusões .....	62
Referências .....	63

# 1. INTRODUÇÃO

Quando falamos sobre o tema “energia elétrica”, com certeza uma das primeiras coisas que vem a nossa mente é sua periculosidade, assim como representa os raios e trovões na natureza, porém, durante o passar da história humana, nossa civilização avançou tanto de maneira geral, que as pessoas começaram a entender como realmente funciona grande parte dos fenômenos que rondam nosso cotidiano e começaram a adaptá-los ao nosso favor. A partir desse princípio, o ser humano foi capaz de gerar, transmitir e distribuir energia elétrica por basicamente todo o território do mundo, sendo cada país responsável individualmente pela forma em que se estrutura cada sistema. Hoje existem uma quantidade mínima de locais que não possui energia elétrica, tudo isso graças ao fato daqueles que se dedicam a essa área terem conseguido gerar uma filosofia para que a humanidade pudesse avançar de pontos isolados de geração, para chegar em um sistema interligado.

Um sistema combinado, embora mais complexo em operação e projeto, além da possibilidade de distúrbios locais se espalharem pela rede, traz muitas vantagens que resolvem problemas como: mais grupos geradores, menos demanda. capacidade de reserva para emergências, troca de energia entre diferentes regiões sazonais, etc. Essa prática foi aceita em todo o mundo e principalmente no Brasil teve início no final da década de 1950.

Atualmente, o Brasil possui dois grandes sistemas interligados: o Sistema Regional Sul/Sudeste/Centro-Oeste e o Sistema Regional Norte. / Nordeste. As duas áreas são conectadas por uma linha de transmissão de 500 kV capaz de transportar cerca de 1.000 MW. A principal filosofia de atuação desta associação é produzir o máximo de energia possível no sistema norte/nordeste durante as grandes enchentes da região (especialmente norte, Tucuruí) e exportá-la para o sudeste, onde estão localizadas no país grandes reservatórios, para coletar água.

Em tempo seco, o fluxo é invertido e o "linhão", com 1.270 km de extensão, sai da subestação de Imperatriz no Maranhão, que passa por todo o estado do Tocantins, e chega à Brasília. A finalidade de um sistema de fornecimento de energia elétrica é distribuir essa energia em muitos pontos para várias aplicações. Tal sistema deve ser projetado e operado de forma que forneça energia de acordo com dois requisitos básicos:

qualidade e economia, que são relativamente contraditórios, mas podem ser conciliados com conhecimento técnico e bom senso.

A partir disso, pode-se notar que a energia elétrica está em operação em todo o nosso país independente da região, porém, assim como quase todo tipo de sistema que existe no mundo, um sistema interligado de energia elétrica também está propenso a sofrer falhas, assim, os mesmos devem ser projetados com base em que algum momento uma falha vai acontecer. Os sistemas elétricos atuais estão em operação há mais de cem anos e, durante esse tempo, a experiência acumulada de profissionais da área mostrou que faltas com apenas uma única linha monofásica acaba ocorrendo com uma maior frequência em comparação a um curto simultâneo entre todas as três linhas, faltas trifásicas, na qual é o menos provável.

Linhas de energia expostas a efeitos meteorológicos são mais propensas a falhas, enquanto equipamentos protegidos são menos. Segundo MAMEDE (2011), as falhas de barramento são raras e estatisticamente não ultrapassam 10 falhas no sistema elétrico, o que inclui tanto os sistemas de geração, transmissão e distribuição. As possibilidades nas quais pode se vir a ocorrer uma falha, estão representados na Tabela I.

Tabela 1: Estatísticas da falta em relação ao elemento do sistema elétrico.

Elemento do sistema de potência	Probabilidade de falha (%)
Linhas em sobrecarga	50
Cabos subterrâneos	9
Transformadores	10
Geradores	7
Comutadores	12
Relés, TC, TP, Equipamentos de controle, etc	12
Total	100

FONTE: (PAITHANKAR e Bhide, 2003).

A gravidade da falta pode ser expressa pela magnitude da corrente de falta, de modo que pode causar danos. Além do curto-circuito, a sobrecarga é um fator anormal em sistemas elétricos que pode causar sérios danos materiais. Existem outros fenômenos igualmente destrutivos, como subtensão e sobretensão, que podem ocorrer como resultado de raios ou curtos-circuitos.



Com isso, a necessidade de um sistema de proteção para a rede elétrica se tornou algo indispensável, considerando que sua função seja detectar qualquer tipo de anomalia existente independentemente do tipo, e assegurar que a mesma seja desconectada do sistema, evitando assim qualquer tipo de dano mais extremo que poderia vir a ocorrer. Além disso, a função do sistema de proteção é fornecer informações ao usuário para facilitar a detecção de erros e dar celeridade à correção adequada.

## 1.1. SISTEMA DE PROTEÇÃO

Em todos os sistemas elétricos nominais, o principal objetivo da proteção é poder fornecer um serviço cada vez mais consistente, confiável, a um preço cada vez mais barato e seguro, ou seja, sempre seguindo as normas das autoridades reguladoras sobre o setor elétrico brasileiro e internacional. Isso ocorre porque os sistemas elétricos não são imunes a falhas, por isso é necessário utilizar um sistema de proteção para isolar a área defeituosa e manter o restante do sistema funcionando, de preferência, totalmente.

A proteção possui determinados parâmetros que determinam sua qualidade e eficiência, como por exemplo: o grau de extinção da falta e a sensibilidade. E com o projeto certo, pontos importantes como confiabilidade, segurança, tempo e custos financeiros com manutenções corretivas e preventivas, além de melhorar o fornecimento de energia em termos de transmissão e distribuição, podem ser significativamente afetados.

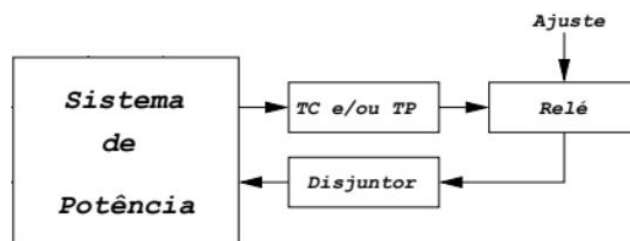
Ressalta-se que uma elevada corrente de curto-circuito que perdura por muito tempo pode causar algum dano ao sistema elétrico ou até mesmo colapso da rede, portanto é muito importante que o sistema de proteção seja configurado de forma a garantir a reparação da avaria no menor tempo possível, minimizando perdas e custos, aumentando a segurança (materiais e pessoas) e garantindo a coordenação e alguma seletividade em todo o sistema (limitando a interrupção ao menor trecho possível).

O nível de curto-circuito deve ser sempre o mais baixo possível para minimizar danos ao dispositivo em caso de curto-circuito. No entanto, nem sempre é possível que o nível de curto-circuito seja baixo devido à queda de tensão, ao regime permanente. Em sistemas elétricos industriais, geralmente é mais fácil projetar e medir equipamentos que operam em um nível mais baixo de curto-circuito porque a queda excessiva de tensão que ocorre ao iniciar certas máquinas pode ser mitigada por dispositivos redutores de corrente como dispositivos do tipo "soft starter", além dos inversores de frequência.

## 1.2. ELEMENTOS DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO

Os componentes elétricos do sistema de potência devem ser protegidos contra curtos-circuitos ou condições anormais de operação, que geralmente são causadas pelo próprio curto-circuito. Nesses casos, é necessário isolar rapidamente a parte danificada do restante da rede elétrica para evitar danos materiais e limitar seu impacto no sistema. Esta função é realizada pelo sistema de proteção, no qual tem seu princípio básico ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Funcionamento base de um sistema de proteção.



Fonte: Fonte própria.

O estado do sistema elétrico é constantemente monitorado por um sistema de medição analógico (transformadores de instrumento), que são transformadores de corrente (TCs) e transformadores de potencial (TPs). As correntes e tensões convertidas em grandezas secundárias alimentam um sistema de decisão lógica (relé de proteção) que compara o valor medido com o valor previamente ajustado no relé. O relé opera sempre que o valor medido exceder o valor definido pela chave. Alguns equipamentos que formam um sistema de proteção são:

- **Transformadores de instrumentos:**

Os transformadores de instrumentos são redutores para medições de corrente (TC) e tensão (TP), cuja função, além de padronizar valores secundários, é isolar circuitos de relés de alta tensão.

- **Relé de proteção:**

Para o caso do relé de proteção, temos um dispositivo que toma decisões comparando um valor medido com um valor predefinido.

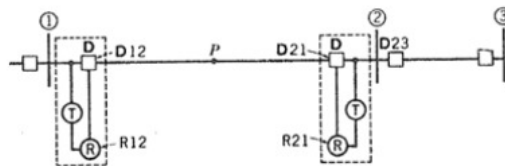
- **Disjuntor:**

No caso do disjuntor, o mesmo funciona a partir do princípio de ser um dispositivo de alta tensão capaz de interromper a corrente de curto-circuito e isolar a parte defeituosa do restante do sistema.

Quando se tem o foco voltado aos mecanismos que compõem os sistemas de proteção, podemos observar que um dos principais elementos de proteção dos sistemas elétricos é o relé, que colocado em locais estratégicos e corretamente ajustado, protege o sistema caso seja necessário. O relé é ativado quando um alarme ou falha é detectado, então o relé funciona para isolar a falha do resto do sistema.

Uma quebra rápida do sistema de proteção requer o funcionamento correto de vários subsistemas. Considerando o sistema mostrado na Figura 2, as barras 1 e 2 são os dois terminais da linha de transmissão. Existem dois sistemas de segurança idênticos, identificados pelas linhas tracejadas; cada um encontra-se em uma extremidade da linha de transmissão. O sistema de proteção pode ser dividido em três subsistemas: chaves (D), transformadores (T) e relés (R).

Figura 2: Diagrama unifilar sobre um sistema de proteção para uma linha de transmissão.

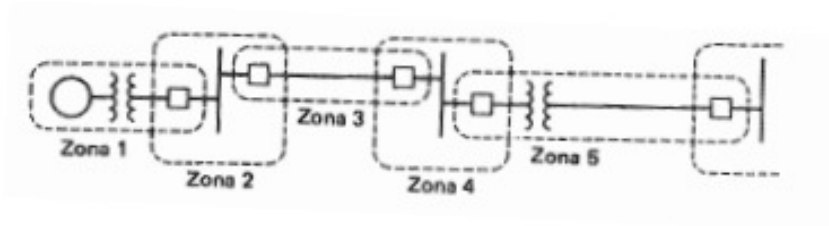


Fonte: (STEVENSON, 1986).

Os níveis de tensão e corrente usados em sistemas elétricos são elevados para a leitura dos relés, então conversores são usados para reduzir os valores de tensão e corrente. Os transformadores comumente usados são transformadores de corrente (TCs) e transformadores de potencial (TPs).

Um relé pode ser considerado basicamente um bloco que aceita corrente e tensão e fecha um contato normalmente aberto na saída. O circuito do relé, tendo informações sobre o valor da corrente do sistema, faz uma estimativa e compara com os valores da bobina do contator, que muda seu estado. O contato de saída do relé é conectado a um circuito que se conecta a um disjuntor que abre automaticamente o ponto de falha e evita danos. As partes da rede de distribuição protegidas por dispositivos de proteção são chamadas de zonas de proteção, vistas na Figura 3.

Figura 3: Exemplo de uma zona de proteção.



Fonte: (STEVENSON, 1986).

### 1.3. BASE DE CONDIÇÕES PARA SISTEMAS DE PROTEÇÃO

Para obter um bom desempenho, a proteção deve levar em consideração algumas características importantes e adaptá-las da melhor forma possível ao problema encontrado, como segue abaixo:

- **Sensibilidade**

O sistema de proteção deve ser capaz de detectar uma pequena corrente de falta. Quanto menor a corrente de falha que o sistema detecta, mais sensível ele é. Sensibilidade é a capacidade do sistema de identificar com precisão a região onde deve ou não funcionar. A avaliação numérica do valor de sensibilidade segue a Equação 1:

$$N_s = I_{ccmi} / I_{ac} \quad (1)$$

Na qual:

$I_{ccmi}$  é o valor máximo da corrente de curto-circuito no ponto extremo da zona de proteção;

$I_{ac}$  é a corrente de partida do elemento de proteção, ou seja, o valor mínimo da corrente que pode desligar o dispositivo de proteção.

- **Seletividade**

Uma técnica usada em pesquisa de proteção e coordenação onde apenas o elemento mais próximo da área defeituosa desconecta a parte defeituosa do resto do sistema, visando assim a supressão do problema pelo decorrer de toda a rede interligada ao mesmo.

- **Velocidade**

O sistema de proteção deve operar por um determinado tempo mínimo, que é inversamente proporcional à magnitude da corrente de falta, para que o sistema protegido não seja danificado.

- **Confiabilidade**

Uma característica que depende das características acima mencionadas, na qual o elemento de proteção deve executar com segurança e precisão as funções que lhe são atribuídas.

## 2. PRINCÍPIOS BÁSICOS DOS EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO NOS SISTEMAS ELÉTRICOS

### 2.1. INTRODUÇÃO

Para entender a operação do sistema de relés de proteção, é importante conhecer a natureza e os métodos de trabalho do sistema elétrico. A eletricidade é um dos recursos básicos da sociedade moderna, que está disponível a qualquer hora, na tensão e na frequência certas e exatamente na quantidade necessária ao consumidor. Este desempenho notável é alcançado através de um cuidadoso planejamento, projeto, construção e uma complexa rede elétrica que inclui geradores, transformadores, linhas de transmissão e distribuição e outros equipamentos auxiliares.

Para o consumidor, o sistema elétrico parece sempre se comportar em um estado constante: imperturbável, contínuo e inesgotável. No entanto, existem constantes perturbações no sistema elétrico, que são causadas por flutuações aleatórias de carga, falhas devido a causas naturais e, em alguns casos, também por erros de equipamentos ou humanos. Apesar dessas fontes de perturbação, o sistema elétrico permanece em um estado quase estável devido a dois fatores principais: o tamanho das cargas ou geradores individuais é muito pequeno em relação ao tamanho do sistema e a operação rápida e correta dos dispositivos de proteção.

O sistema de proteção detecta o estado anormal do sistema elétrico e implementa medidas corretivas o mais rápido possível para que o sistema elétrico não se desvie do seu estado normal. A velocidade de reação é uma parte importante do sistema de proteção e o tempo geralmente é da ordem de alguns milissegundos. A ativação do sistema de proteção deve ser automática, rápida e limitar ao mínimo a área de influência. Em geral, um relé de proteção não evita danos ao equipamento, ele atua após a ocorrência de um alarme, que pode já ter causado danos.

Suas tarefas são, portanto: limitar os danos, minimizar os perigos humanos, reduzir a carga em outros equipamentos e, acima de tudo, manter a integridade e estabilidade do restante do sistema elétrico, o que facilita a restauração do sistema elétrico. O estado do sistema elétrico é constantemente monitorado por um sistema de medição analógico (transformadores de instrumento), que são transformadores de corrente (TCs) e transformadores de potencial (TPs). As correntes e tensões convertidas em grandezas secundárias alimentam um sistema de decisão lógica (relé de proteção) que

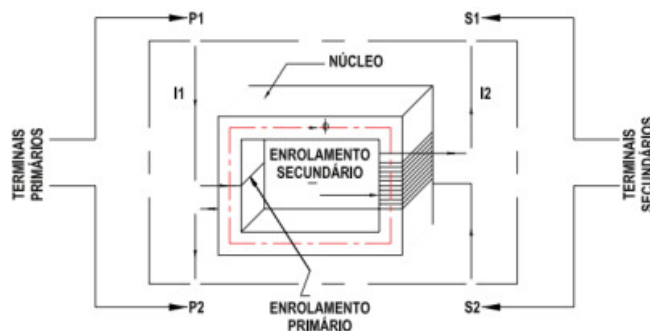
compara o valor medido com o valor previamente ajustado no relé. O relé opera sempre que o valor medido exceder o valor ajustado, o que afeta a chave. Os dispositivos que compõem o sistema de proteção estão sendo especificados e caracterizados em sequência.

## 2.2. TRANSFORMADOR DE CORRENTE

A proteção refere-se à detecção e medição de correntes de falta em diferentes partes do sistema, essa medição seria perigosa e cara, até mesmo impossível de ser realizada diretamente a partir da carga real e correntes de falta, que são grandes, usando relés de medição. Uma forma prática de solucionar esses problemas é a utilização de transformadores de corrente (TC), que possibilitam isolar as tensões principais dos dispositivos de medição e proteção.

A construção de transformadores de corrente geralmente segue o esquema de ter um núcleo de material de ferro que é magnetizado pela corrente no enrolamento primário (é utilizado isolamento adequada à tensão do sistema entre o enrolamento primário e o núcleo e o enrolamento secundário). Na Figura 4 são mostrados os principais componentes de um TC: os terminais primários P1 e P2, os terminais secundários S1 e S2, o núcleo e os enrolamentos primário e secundário.

Figura 4: Principais componentes do TC.



Fonte: (MARDEGAN, 2010).

Um transformador de corrente deve reproduzir com precisão as condições primárias do lado secundário em amplitude e fase, mesmo em correntes muito mais altas. Os transformadores de corrente de proteção são essencialmente os mesmos usados em amperímetros, medidores de watt-hora e outros dispositivos. Para padronização, quase todos esses transformadores são projetados para corrente de 1 A ou 5 A.

Como o fio protegido é conectado em série com o enrolamento primário do TC, ele deve causar uma queda de tensão desprezível no sistema, de modo que o circuito

primário geralmente consiste em algumas voltas de fio grosso e o circuito secundário de vários fios finos. De acordo com a NBR 6856 (ABNT, 1992), os TCs de proteção são divididos em TCs de classe A e TCs de classe B.

Os TCs de classe A tem como características a sua alta impedância, a reatância de fuga do enrolamento secundário tem um valor significativo em comparação com a resistência total do circuito secundário em carga nominal. No caso dos TCs de classe B, os mesmos apresentam princípios básicos de baixa impedância, o enrolamento secundário tem um valor insignificante em comparação com a resistência total do circuito secundário.

A corrente que flui na corrente primária não depende das características do TC e da resistência de carga conectada à sua corrente secundária, ou seja, a corrente primária determina a corrente secundária ao contrário do transformador de potência. De acordo com MARDEGAN: “Outro aspecto importante é que os transformadores de força trabalham próximos da condição de circuito aberto, ao passo que os TCs trabalham próximos da condição de curto-circuito”.

A polaridade do TC indica a direção instantânea relativa da corrente primária e secundária. A polaridade que vem a ser analisada pode tanto ser aditiva como também subtrativa, variando seu valor representativo, dependendo do referencial em análise. A ABNT afirma que os transformadores construídos no Brasil devem ter polaridade escalonada. A polaridade depende da direção dos enrolamentos da bobina e de suas conexões internas.

A proteção diferencial usa um TC em cada terminal do dispositivo protegido, resultando em um TC com mais de um primário. Atenção especial deve ser dada às marcações envolvendo as polaridades dos TCs. Considere três bobinas interligadas A, B e C com terminais A1-A2, B1, B2 e C1-C2 (Figura 5), quando a bobina A é energizada de tal forma que o pólo A1 fica positivo em relação ao terminal A2, implica na corrente alternada. fluir através da bobina A, produzindo uma corrente alternada.

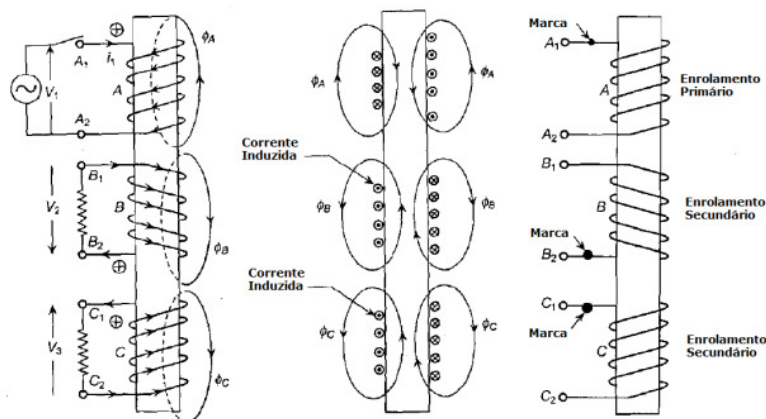
Esta corrente também excita ambas as bobinas B e C. As tensões são induzidas nestas bobinas. Agora que a carga está conectada aos terminais B1 e B2, uma corrente é gerada. De acordo com a lei de Lenz, essa corrente fluiria na direção oposta à corrente responsável pela corrente na bobina B.

Portanto, a direção da corrente na bobina B é tal que a corrente resultante se opõe a ela. corrente da bobina. Assim, a corrente flui no terminal B2, tornando o B2 imediatamente positivo em relação a B1. Portanto, B2 tem a mesma polaridade que A1.



Assim, os pontos de marcação podem ser colocados em A1 e B2 como representado na Figura 5 para mostrar que os dois plugues têm compartimentos semelhantes.

Figura 5: Método simbólico representando um ponto de marcação;



Fonte: (PAITHANKAR e BHIDE, 2003).

A partir disso, podemos concluir que quando a corrente entra no ponto de marcação no lado primário do TC, a corrente também deve sair do ponto de marcação no lado secundário. Podemos também observar que quando uma corrente é aplicada aos terminais marcados de duas ou mais bobinas conectadas, as correntes produzidas por essas correntes são tais que elas se somam.

### 2.3. TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

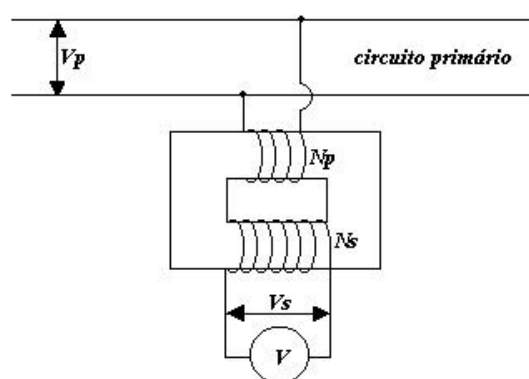
Um transformador de potencial ou TP, como qualquer transformador, possui características próprias e, portanto, aplicam-se as mesmas considerações acima, e é instalado em medidores de energia elétrica com o enrolamento primário conectado em derivação aos pólos do circuito. Mede a tensão quando o secundário está conectado aos possíveis terminais de um ou mais dispositivos de medição, controle ou proteção. Todos conectados em paralelo. A tensão do circuito secundário é geralmente menor e é considerada um redutor de tensão na prática.

Os TPs devem suportar 15% ou 90% de sobretensão em uma tensão nominal na frequência nominal sem exceder os limites de aumento de temperatura. Eles são usados para alimentar instrumentos de alta impedância (voltímetros, bobinas de voltímetros, etc.) que consomem muito pouca corrente no secundário, gerando um valor muito baixo e operando quase sem carga.

Quando a tensão nominal para a qual foi projetada é aplicada ao primário do TP, a tensão de corrente secundária é de 115 V. Se a tensão primária for menor ou maior que a tensão nominal, a tensão secundária é obtida inferior ou superior a 115 V. O TP pode ser medido para uma conexão entre fases e neutro, onde a tensão primária é a tensão fase-fase dividida por  $\sqrt{3}$  e a tensão secundária nominal é  $115/\sqrt{3}$  ou 115 V.

Os TPs geralmente são classificados para uma tensão secundária padronizada de aproximadamente 115 V ou  $115/\sqrt{3}$  V. A tensão primária nominal depende da tensão primária aplicada a ela, assim como representado na Figura 6.

Figura 6: Ligação de um Transformador de Potência (TP).



Fonte: Fonte própria

Podemos separar e caracterizar os transformadores de potência pela sua construção, sendo eles divididos entre o Transformador de Potência do tipo Indutivo (TPI) e o Transformador do tipo Capacitivo (TPC).

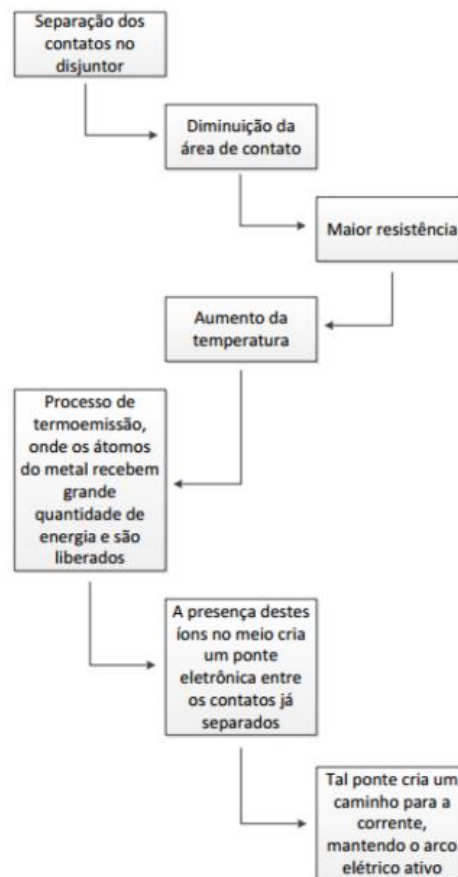
Essencialmente todos os TPs para uso em tensões de até 138kV. O TPI utiliza apenas indução de tensão entre dois enrolamentos, sendo o enrolamento primário dimensionado para aceitar diretamente a tensão nominal do sistema em que está instalado. São projetados assim como demonstra um dos três grupos de ligação como descrito na NBR 6855.

## 2.4. DISJUNTORES PARA ALTA TENSÃO

Os disjuntores são dispositivos cuja função é interromper ou restaurar correntes, seja uma falha, carga (nominal) ou sobrecarga em um sistema elétrico especial. Eles são a parte de trabalho físico do relé, ou seja, eles recebem a ordem de abertura ou fechamento dos relés que se comunicam com eles.

No momento em que a chave funciona ao abrir, ocorre um arco elétrico entre seus contatos, onde uma grande quantidade de energia é dissipada em temperaturas muito altas, que podem chegar a aproximadamente 14726 °C no núcleo dos contatos de distribuição da chave, como é ilustrado na Figura 7.

Figura 7: Sequência do Processo decorrente de um arco elétrico nos disjuntores de alta tensão.



Fonte: Fonte própria.

O arco continua até que o meio seja desionizado, então o meio deve ser trocado. Existem diferentes maneiras de ionizar o meio entre os contatos e isso depende do tipo de chave, podemos citar alguns tipos de disjuntores que fazem parte do nosso campo de utilização como os: Disjuntores a óleo, Disjuntores a ar comprimido, Disjuntores a SF<sub>6</sub>, Disjuntores a vácuo, e alguns outros.

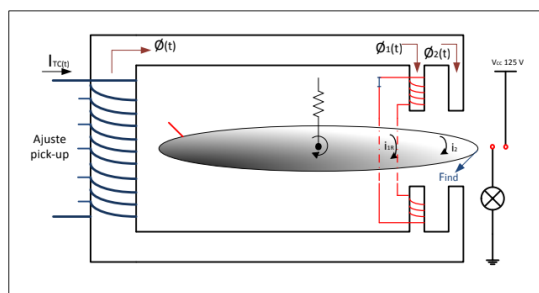
## 2.5. CARACTERÍSTICAS DOS RELÉS DE PROTEÇÃO

Os relés são dispositivos elétricos projetados/programados para responder a determinadas condições de entrada de maneira pré-programada e, quando determinadas

condições são atendidas, eles produzem um contato ou ação semelhante no circuito de controle elétrico associado. Os tipos estruturais de relés são os seguintes: relés eletromecânicos, estáticos, digitais (circuitos lógicos) e relés microprocessados (numéricos).

Os tipos eletromecânicos, apesar de serem os tipos de relé mais antigos, ainda são amplamente utilizados, principalmente por sua longa vida útil, e somente quando atingem o final de sua vida útil são substituídos por relés mais modernos. A Figura 8 mostra um esquema simplificado da placa de indução de um relé eletromecânico. Basicamente, esse tipo de relé funciona por indução magnética, que movimenta a placa até que determinado contato seja fechado.

Figura 8: Ilustração simplificada de um relé eletromecânico.



Fonte: Fonte própria.

Sendo um componente amplamente utilizado em diversos aspectos e diferentes áreas de qualquer atividade que envolva energia elétrica, o mesmo possui tipos com características bem adaptadas para as situações do cotidiano.

### 2.5.1. CARACTERÍSTICAS DO RELÉ DE SOBRECORRENTE

Analisando o relé de sobrecorrente, podemos inicialmente perceber que a sua fonte de operação é a corrente elétrica que percorre o sistema. O mesmo pode ser usado para proteger qualquer componente do sistema de energia, como linhas de transmissão, transformadores, geradores ou motores, outros equipamentos, dispositivos e sistemas (COURY, OLESKOVICZ e GEOVANINI, 2007). Quando abordamos o assunto sobre os relés de sobrecorrente, podemos observar que os mesmos costumam ser eletrônicos (estado sólido), eletromecânicos ou digitais.

Hoje em dia, no entanto, os relés eletromecânicos e eletrônicos são amplamente substituídos por relés digitais. As concessionárias tendem a preferir a tecnologia digital, porque os relés digitais podem armazenar grandes quantidades de dados e suas capacidades de integração com outros dispositivos são excelentes.

Todas as correntes e tensões devem ser reduzidas a um sinal que a eletrônica possa suportar e analisar com a maior confiabilidade possível. No caso da magnitude e do ângulo de fase na corrente, devem ser reproduzidos com precisão mesmo nas condições ambientais e nas condições elétricas mais adversas em que a situação possa chegar.

### 2.5.2. CARACTERÍSTICAS DO RELÉ DIFERENCIAL

No caso das características dos relés diferenciais, eles tendem a gerar uma proteção baseada em um princípio fundamental em que se compara a corrente elétrica de entrada, em relação a mesma no momento da saída, processo no qual, podem existir variações entre essas conexões, podemos representar essa relação na Figura 9.

Figura 9: Base de uma proteção diferencial.



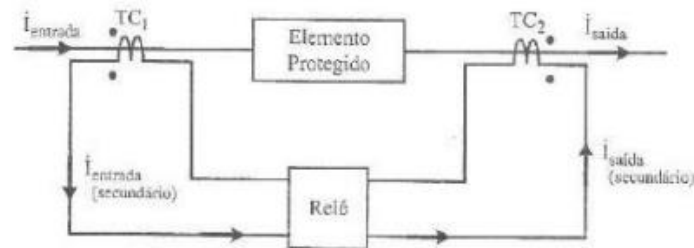
Fonte: (KINDERMANN, 2005) modificado.

A diferença entre a corrente de entrada  $I_{input}(I_{entrada})$  e a corrente de saída  $I_{output}(I_{saída})$  é a corrente detectada pelo relé diferencial  $I_{relé}$ , então se  $I_{input} = I_{output}$  a corrente registrada pelo relé vai ter o valor de 0 e o mesmo não irá funcionar, porque o elemento protegido não está com defeito. Uma corrente  $I_{set}$  determinada pelo relé com o princípio de ajustar o valor dela, parte para a comparação em que, se  $I_{input} - I_{output}$ , ou seja,  $I_{relé}$  for menor ou igual a  $I_{set}$ , a proteção não funciona, se  $I_{input} - I_{output}$  for maior que  $I_{set}$ , a proteção funciona porque há um elemento com defeito no dispositivo protegido.

A Figura 10 mostra o diagrama geral desta proteção, onde a relação dos TCs é 1:1. Neste caso, o sistema elétrico funciona normalmente, ou seja, fornece a carga, as correntes de entrada e saída são as mesmas e o relé não opera. Observe que os relés de proteção

diferencial podem ser usados em sistemas de energia radial e anelar, além de ter a sua faixa de operação seletiva localizada entre os dois TCs.

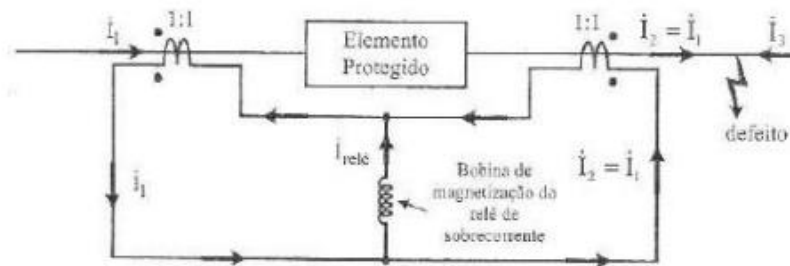
Figura 10: Modelo genérico de uma proteção diferencial.



Fonte: (KINDERMANN, 2005).

Em sequência, temos a Figura 11, na qual representa o caso de um curto-circuito ocorrido fora da área protegida por dois TCs. Assumindo um sistema em anel, as correntes de alimentação de curto-circuito vêm de ambos os lados, mas porque a falha ocorreu fora da área de proteção diferencial, os dois TCs veem a mesma corrente  $I_1$  e o relé não opera.

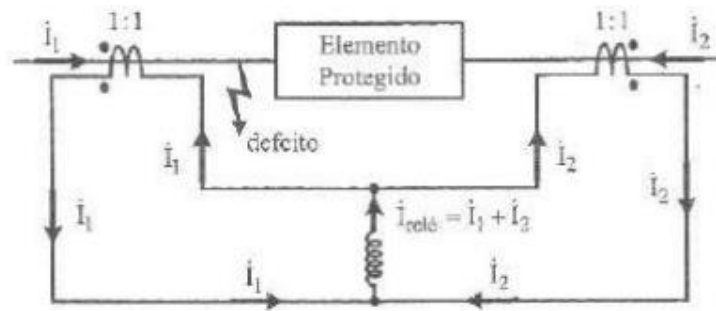
Figura 11: Representação de um curto-circuito fora da zona de proteção.



Fonte: (KINDERMANN, 2005).

A seguir, observamos a Figura 12, mostrando um curto-circuito dentro do diferencial. Se o sistema for radial, a corrente  $I_2 = 0$  e se for anelar, a corrente  $I_2$  deve ser caracterizada como uma corrente de curto-circuito. A corrente através da bobina de magnetização do relé é  $I_1 + I_2$ , levando a proteção a ter sua ativação iniciada.

Figura 12: Ilustração de um curto-circuito ocorrido dentro da zona protegida.



Fonte: (KINDERMANN, 2005).

Embora as conexões anteriores sejam comuns, elas podem causar problemas se o curto-circuito ocorrer fora da região seletiva, mas muito próximo ao TC. Isso se deve aos seguintes motivos: TCs não são perfeitamente combinados, saturação de TCs (TCs saturados não produzem corrente secundária), carregamento de correntes secundárias de TC causando saturação do núcleo e outros problemas inerentes a dispositivos protegidos. Estas situações causam falhas nos TCs, que podem fazer com que o relé de sobrecorrente opere desnecessariamente.

### 2.5.3. CONCEITO DOS COMPONENTES SIMÉTRICOS

Na época de 1918 C. L. Fortesque demonstrou a maneira como seu estudo "Método de coordenadas simétricas para resolução de redes polifásicas", se mostraria muito útil na análise de redes trifásicas assimétricas, pois as redes trifásicas apresentam constantemente falhas diferentes, por exemplo, curtos-circuitos como circuitos fase-terra, fase-fase ou trifásicos que causam um desequilíbrio em um sistema trifásico. Nas coordenadas simétricas que foram apresentadas por Fortesque, vieram a ser reconhecidas como "teorema de Fortescue", as quais são comumente conhecidas como componentes simétricas ou componentes em série.

Semelhante ao teorema da onda complexa de Fourier, a teoria das componentes simétricas consiste em dividir um sistema trifásico desequilibrado em três sistemas trifásicos balanceados. Em outras palavras, qualquer sistema de vetores trifásicos desbalanceados pode ser representado e resolvido como uma soma de três sistemas balanceados, que são dois sistemas simétricos definidos por ordem positiva e negativa, respectivamente, e um terceiro sistema que ocorre apenas sob certas condições, termos são chamados de ordem zero. Este sistema não é válido, por exemplo, se um sistema trifásico for composto por três fases sem linha de retorno. Na prática, entretanto, a maioria

dos sistemas trifásicos tem um quarto condutor (neutro, terra, revestimento do cabo) como retorno.

A sequência positiva é composta de três fasores de tamanhos iguais, mas fora de fase, que são a mesma sequência de fase do sistema desequilibrado, deslocados  $120^\circ$  no sentido horário um do outro. Todos os três ponteiros são marcados com uma assinatura. No caso da sequência negativa, a mesma se baseia em três desses fasores com os mesmos tamanhos, a sequência de fase do sistema se torna desequilibrada e as fases são deslocadas  $120^\circ$  no sentido anti-horário uma da outra. Todos os três ponteiros são indicados pelo subscrito "-". A sequência zero consiste em três fasores do mesmo tamanho e em fase entre si, nos quais possuem marcações com índice 0.

Cada um dos fasores de sequência positiva, negativa e, se necessário com valor zero, pode ser usado para formar um sistema trifásico assimétrico, resultando em um processo chamado síntese, que envolve superposição linear. A análise sintética pode ser feita tanto gráfica quanto matematicamente. A técnica gráfica serve apenas para ilustrar a síntese, caso contrário, prevalece o método computacional. Por exemplo, assumindo um sistema trifásico desbalanceado com tensões assimétricas  $V_a$ ,  $V_b$ , e  $V_c$  das fases A, B e C, ele pode ser representado por um conjunto de componentes simétricos, de forma fasorial, com tensões correspondentes a cada fase, conforme as equações 2, 3 e 4:

$$\dot{V}_a = \dot{V}_{a+} + \dot{V}_{a-} + \dot{V}_{a0} \quad (2)$$

$$\dot{V}_b = \dot{V}_{b+} + \dot{V}_{b-} + \dot{V}_{b0} \quad (3)$$

$$\dot{V}_c = \dot{V}_{c+} + \dot{V}_{c-} + \dot{V}_{c0} \quad (4)$$

Considerando uma perspectiva matemática, podemos definir um operador "a", no qual o mesmo recebe a determinação de definir a rotação de um complexo em  $120^\circ$ , com isso:  $\hat{a} = 1\angle 120^\circ$ . Assim,  $\hat{a}^2 = 1\angle 240^\circ$ , levando  $\hat{a}^2$  a ser considerado um vetor unitário com seu valor representado em  $240^\circ$  adiantado em relação ao eixo referencial, a partir disso:

$$\hat{a}^3 = 1\angle 360^\circ \quad (5)$$

$$1 + \hat{a} + \hat{a}^2 = 0 \quad (6)$$

Assim, os expoentes de sequência positiva podem ser representados como  $\dot{V}_{a+}, \dot{V}_{b+} = a^2 \dot{V}_{a+}$  e  $\dot{V}_{c+} = a \dot{V}_{a+}$ , relações semelhantes se aplicam à sequência negativa  $\dot{V}_{a-}, \dot{V}_{b-} = a \dot{V}_{a-}$  e  $\dot{V}_{c-} = a^2 \dot{V}_{a-}$ . Para simplificar,  $\dot{V}_{a+}$  denota  $\dot{V}_{+}$  e  $\dot{V}_{a-}$  pode ser considerado  $\dot{V}_{-}$ . Todo o sistema negativo é caracterizado por  $\dot{V}_0$  por conta que  $\dot{V}_{a0} = \dot{V}_{b0} = \dot{V}_{c0} = \dot{V}_0$ . Isso permite uma descrição simplificada de fasores individuais para componentes do sistema. Assim, as sequências positiva, negativa e zero são cada uma



representada por um único ponteiro, no caso dos outros dois, acabam os mesmos podendo ser derivados usando a comparação de fasores usando o operador de rotação complexo. Portanto, as equações sintéticas podem ser expressas por:

$$\dot{V}_a = \dot{V}_+ + \dot{V}_- + \dot{V}_0 \quad (7)$$

$$\dot{V}_b = \dot{a}^2 \dot{V}_+ + \dot{a} \dot{V}_- + \dot{V}_0 \quad (8)$$

$$\dot{V}_c = \dot{a} \dot{V}_+ + \dot{a}^2 \dot{V}_- + \dot{V}_0 \quad (9)$$

Com a finalidade de encontrar o valor de  $\dot{V}_+$  (vetor de sequência positiva) deve-se analisar baseado no princípio em que as componentes relacionadas a  $\dot{V}_-$  e  $\dot{V}_0$  precisam ser anuladas. A partir disso, necessita-se multiplicar as expressões (8) por  $\dot{a}$  e (9) por  $\dot{a}^2$ , resultando em:

$$\dot{V}_a = \dot{V}_+ + \dot{V}_- + \dot{V}_0 \quad (10)$$

$$\dot{a} \dot{V}_b = \dot{a}^3 \dot{V}_+ + \dot{a}^2 \dot{V}_- + \dot{a} \dot{V}_0 \quad (11)$$

$$\dot{a}^2 \dot{V}_c = \dot{a}^3 \dot{V}_+ + \dot{a}^4 \dot{V}_- + \dot{a} \dot{V}_0 \quad (12)$$

A partir desse princípio, podemos somar as três equações apresentadas para obter:

$$\dot{V}_a + \dot{a} \dot{V}_b + \dot{a}^2 \dot{V}_c = (1 + \dot{a}^3 + \dot{a}^3) \dot{V}_+ + (1 + \dot{a}^2 + \dot{a}^4) \dot{V}_- + (1 + \dot{a} + \dot{a}^2) \dot{V}_0 \quad (13)$$

Fazendo uso de meios de simplificação e utilizando as equações (5) e (13), conseguimos chegar a seguinte resolução:

$$\dot{V}_a + \dot{a} \dot{V}_b + \dot{a}^2 \dot{V}_c = (1 + 1 + 1) \dot{V}_+ + (1 + \dot{a}^2 + \dot{a}) \dot{V}_- + (1 + \dot{a} + \dot{a}^2) \dot{V}_0 \quad (14)$$

Com a finalidade de encontrar o valor de  $\dot{V}_+$ , podemos utilizar as fórmulas (6) e (16), encontrando o resultado:

$$\dot{V}_a + \dot{a} \dot{V}_b + \dot{a}^2 \dot{V}_c = 3 \dot{V}_+ \quad (15)$$

$$\dot{V}_+ = \frac{1}{3} (\dot{V}_a + \dot{a} \dot{V}_b + \dot{a}^2 \dot{V}_c) \quad (16)$$

Seguindo a mesma linha de pensamento, podemos encontrar a fórmula para encontrar o valor do vetor negativo  $\dot{V}_-$  :

$$\dot{V}_- = \frac{1}{3} (\dot{V}_a + \dot{a} \dot{V}_b + \dot{a}^2 \dot{V}_c) \quad (17)$$

No intuito de encontrar  $\dot{V}_0$ , devemos somar as equações (7), (8) e (9), chegando ao resultado:

$$\dot{V}_0 = \frac{1}{3} (\dot{V}_a + \dot{a} \dot{V}_b + \dot{a} \dot{V}_c) \quad (18)$$

As relações representadas anteriormente também se aplicam aos sistemas trifásicos considerados assimétricos. No caso da combinação de componentes simétricos de tensão com componentes simétricos de corrente, podem resultar no conceito de sequência positiva, sequência negativa e impedância de sequência zero, assim como representados em formato de equação a seguir:

$$\dot{Z}_+ = \frac{\dot{V}_+}{\dot{I}_+} \quad (19)$$

$$\dot{Z}_{a-} = \frac{\dot{V}_-}{\dot{I}_-} \quad (20)$$

$$\dot{Z}_0 = \frac{\dot{V}_0}{\dot{I}_0} \quad (21)$$

Na questão sobre a impedância de sequência com valor positivo  $\dot{Z}_+$  relacionado a um dispositivo elétrico, ele representa o quociente entre a tensão de fase e o valor da corrente do condutor, se ele estiver equipado com uma sequência simétrica positiva. Isso corresponde à já conhecida resistência longitudinal das linhas:  $\dot{Z} = R + jX$ . A impedância pode ser omitida nos cálculos de falta, por conta que a mesma é muito menor que a reatância da linha e porque não somam diretamente, para obter resultados satisfatórios (STEVENSON, 1986).

Em relação a impedância de sequência negativa  $\dot{Z}_-$ , temos que a mesma possui seu valor representado pelo quociente entre a tensão de fase e o valor da corrente do condutor na entrada dela. A impedância de sequência senoidal negativa de uma linha é igual à sua impedância de sequência senoidal positiva, porque a sequência de fase não afeta o nível de corrente. A resistência de sequência zero  $\dot{Z}_0$  de um dispositivo elétrico é o quociente de tensão e corrente quando todas as três fases são alimentadas por uma única tensão CA.

Como as três fases do dispositivo são colocadas em paralelo e formam os condutores de alimentação, enquanto o quarto condutor atua como uma linha de retorno comum, essa linha transporta três vezes a corrente do neutro. Portanto, os fios de alimentação e retorno carregam correntes diferentes. Se isso for levado em consideração na formulação da equação do loop, a impedância de sequência-zero pode ser representada por:

$$\dot{Z}_0 = Z_+ + 3Z_t \quad (22)$$

Na qual  $Z_t$  é a representação do valor da impedância do condutor da terra.

Da definição segue-se que uma resistência de sequência zero normalmente significa um dispositivo conectado em estrela. Dispositivos conectados em delta não podem ser configurados para impedância de sequência zero porque não há condutor de retorno comum. Não existe uma relação universal entre as impedâncias de sequência zero, positiva e negativa de um dispositivo elétrico.

A resistência neutra de um fio depende, por exemplo, do tipo de linha em questão, nas quais podem ser cabo aéreo ou terra, fio terra, cabo encamisado/encapado, a construção do fio e a condutividade do aterramento local em questão, o que requer alguma função de retorno. Com isso, a impedância de sequência zero tende a ser determinada por medições ou estimativas.

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1. INTRODUÇÃO

Nessa seção será demonstrado a maneira como ocorreu todo o processo de desenvolvimento da ideia base deste TCC, explicando os materiais que foram utilizados no mesmo como por exemplo a bancada Smart Grid, além de explicar a forma na qual eles influenciaram no decorrer de toda a geração dos princípios fundamentais utilizados para produzir um exemplar que contenha a maioria dos testes de proteção de rede.

### 3.2. BANCADA SMART GRID

Localizado dentro do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), Campus João Pessoa, está o Laboratório de Sistemas Elétricos de Potência (LABSEP). No mesmo existem diversas bancadas utilizadas com o princípio de auxiliar na produção e execução de testes com foco em desenvolver conteúdos relacionados a Geração, Transmissão e Distribuição de energia. Entre essas, existe uma bancada didática na qual simula uma rede inteligente (Smart Grid), desenvolvida por uma empresa de origem italiana conhecida como De Lorenzo.

A mesma também produz diversos outros equipamentos com o intuito de gerar simulações de sistemas elétricos, além de servir como base para um treinamento técnico e profissional nas mais diversas áreas de conhecimento, assim como: Engenharia Elétrica e Redes Inteligentes, Eletrônica, Eletrônica de Potência, Eletrônica Industrial, Telecomunicações, Mecânica de Fluidos e várias outras disciplinas técnicas que são estudadas em diversas instituições de ensino, podemos analisar de maneira geral a bancada SMART GRID na Figura 13.

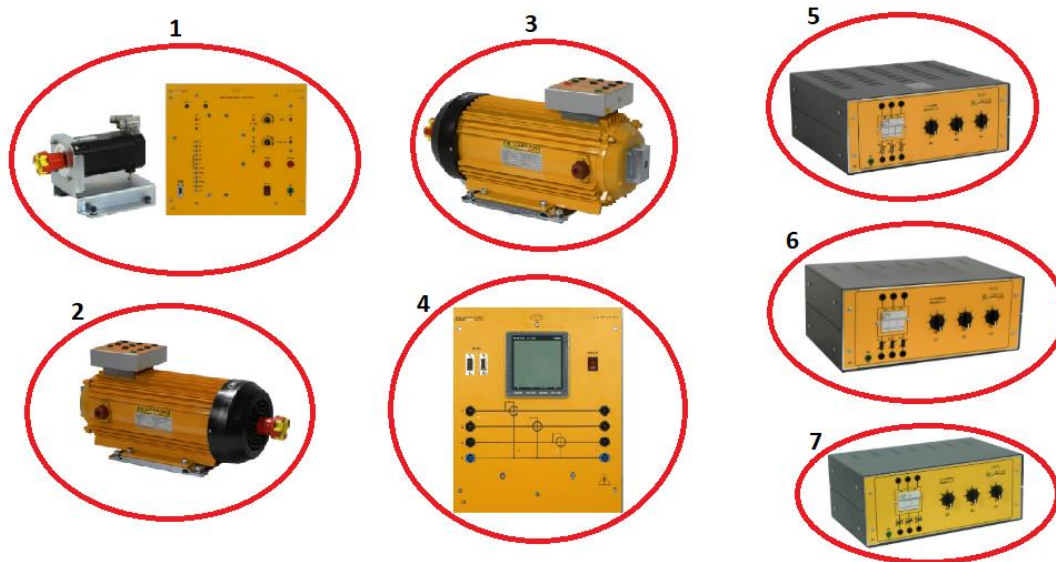
Figura 13: Bancada Smart Grid De Lorenzo.



Fonte: Empresa De Lorenzo

A bancada Smart Grid, trata principalmente de questões relacionadas à produção, transmissão, distribuição e uso de energia elétrica nas mais diversas aplicações, sejam elas industriais, comerciais ou domésticas. É composto por módulos que simulam diferentes subsistemas que compõem um sistema elétrico completo. Os principais módulos utilizados no desenvolvimento deste trabalho são mostrados na Figura 14, em que estão enumerados de 1 a 7, além de serem brevemente descritos.

Figura 14: Módulos utilizados no desenvolvimento.



Fonte: Empresa De Lorenzo

No item 1, temos representado o módulo 2108T26, no qual funciona como um controlador automático de motores cuja configuração normalmente é determinada pela realidade de cada aplicação, além do fato de que o mesmo também pode monitorar em tempo real o que está acontecendo no sistema simulado. Este módulo possui encoder

eletrônico de 1 kW, controla o sistema por frequência e tensão, controla os eventos e se conecta ao software através da comunicação RS485.

Os motores elétricos DC sem escova, ou motores BLDC, são motores síncronos alimentados por um inversor (controlador), geralmente por uma fonte DC de baixa tensão. Eles têm vantagens sobre os motores CC com escovas, como maior confiabilidade, menor ruído, ausência de escovas, longa vida útil, eliminação da ionização do comutador e redução da interferência eletromagnética. Porém, a desvantagem mais importante deste motor é o preço mais elevado, pois estes motores passaram a exigir componentes mais precisos (mosfet de alta potência) para seus dispositivos de controle de velocidade, por outro lado, embora sejam menos eficientes, também podem ser controlados com um único resistor ajustável (potenciômetro ou reostato).

O módulo 1022P4 apresentado no item 2, se trata de uma máquina de assíncrona com um anel coletor trifásico, no qual possui enrolamentos em ambos os seus componentes, rotor e estator, podendo fornecer dois níveis de tensão dependendo do tipo de fechamento realizado nos seus terminais, fechamento delta ( $\Delta$ ) com 220V e para estrela(Y) serão 380V, também pode variar a velocidade nominal de acordo com a frequência a que está exposto, 1500 ou 1600 rpm a respectivamente 50 HZ e 60 Hz.

No caso do módulo 1026P4, representado no item 3, temos um gerador síncrono trifásico com enrolamentos de armadura trifásica, que pode funcionar em um motor ou gerador, o enrolamento de excitação está localizado no rotor. Sua capacidade é de 1kVA dependendo do tipo de ligação, estrela ou triângulo escolhido para os terminais, sua tensão e corrente podem variar e são 220 V sendo 2.6 A e 380 V tendo 1.5 A. A frequência de rotação varia entre 1500 e 1800 rpm conforme sua frequência determinada no momento em que se realiza o experimento.

Em relação ao módulo 2109T29, localizado no item 4, podemos analisar que o mesmo se trata de um medidor de energia elétrica no qual tem como objetivo monitorar diversos parâmetros de uma rede elétrica, como por exemplo: energia ativa, energia reativa, energia aparente, o fator de potência, a frequência e as distorções harmônicas, que determinam a qualidade, o desperdício e a energia real utilizada, independentemente de as conexões serem de 3 ou 4 fios.

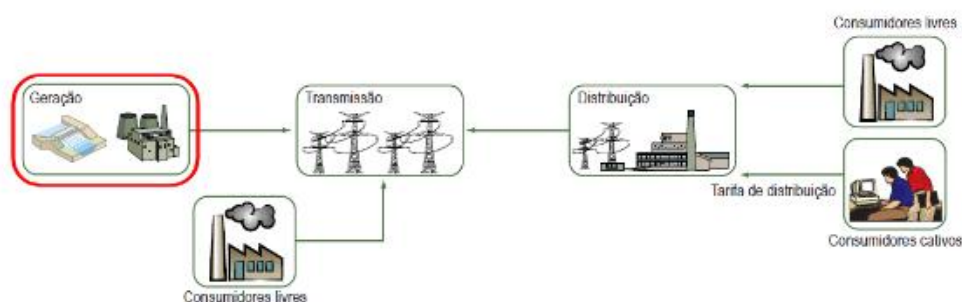
No módulo 1017R representado pelo item 5, temos uma sequência de três resistores que podem ser conectados em estrela ou triângulo, individualmente em série ou em paralelo, existe uma chave com a função de conectar a carga ou desconectá-la do sistema, cada resistor é classificado com um chave seletora, na qual possui sete diferentes

níveis representando cada um. Os módulos 1017L (item 6) e 1017C (item 7) possuem as mesmas características do 1017R, diferindo apenas no tipo de carga, que é indutiva e capacitiva, respectivamente.

### 3.2.1. SISTEMAS PARA GERAÇÃO

A maioria das usinas usa a energia gerada de uma fonte selecionada para operar grandes máquinas projetadas para converter energia cinética em eletricidade. Nessas instalações, o gerador é o coração do sistema, os mesmos são máquinas rotativas que convertem energia mecânica em energia elétrica. A energia utilizada para operar essas máquinas varia de acordo com os combustíveis disponíveis, as tecnologias utilizadas, as condições e a disponibilidade de fontes naturais de energia. Esses sistemas impulsionam a indústria elétrica que conhecemos de maneira geral, como ilustrado na figura 15.

Figura 15: Exemplificação da maneira em que uma geração de um sistema elétrico se comporta.



Fonte: <https://www.gov.br/aneel/pt-br>

Vento, energia solar, água e carvão são algumas das principais forças usadas para acionar geradores. A água é o principal recurso no Brasil, enquanto o carvão é a principal fonte de reserva, sempre esperando e pronto para agir se necessário, com o intuito de atender aqueles que não puderem se beneficiar da geração de energia a partir da água. Energia eólica, solar, hídrica e térmica são sistemas de geração de energia que podem ser simulados na bancada SMART GRID da De Lorenzo. Cada tipo de geração possui um conjunto de módulos especiais que reproduzem todas as características inerentes a esta conversão de energia.

### 3.2.1.1. GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA

O vento é um grande volume de ar em constante movimento, no qual se torna uma peça fundamental para converter energia cinética gerada pelo mesmo, em energia elétrica. Essa conversão é possível graças às turbinas eólicas, que geralmente são grandes máquinas equipadas com pás que se moldam e usam a força do vento para se movimentar, produzindo assim um campo magnético nos enrolamentos do gerador. Essas dimensões foram desenhadas com duas lentes para fazer as pás girarem mais lentamente, tornando-as menos visíveis e conseguindo uma melhor segurança dos animais aéreos.

Esta fonte de produção de energia carece de características estáveis que a diferenciam de outras formas de produção, por isso vários dados e parâmetros devem ser analisados ao estudar sua viabilidade técnica e rentabilidade. Ao longo dos anos, essa energia é constante, mas analisada em um curto período de tempo, sofre grandes oscilações. Um aumento na produção de energia eólica em uma determinada região implica a necessidade de ajustar a rede elétrica para atender aos picos de produção aumentando a capacidade de armazenamento, bem como compensar manipulando a eletricidade de áreas vizinhas para a rede, quando a demanda for alta e a energia eólica se tornar insuficiente (PLATT, 2013).

Quando analisamos a bancada didática utilizada neste trabalho, podemos observar que a mesma possui um bloco constituído por diferentes módulos, cujo objetivo é simular a produção de energia elétrica a partir do vento, incluindo a sua ligação à rede elétrica, de forma a conhecer a maneira que se comporta sua contribuição, características, vantagens e impactos na rede elétrica. O sistema inclui dispositivos de controle, medição e aplicação, turbina eólica, servo motor, motor gerador (LORENZO, 2013). Esses módulos são descritos na Tabela 2.

Tabela 2: Módulos da Bancada Smart Grid De Lorenzo utilizados para simulação do sistema de geração eólica.

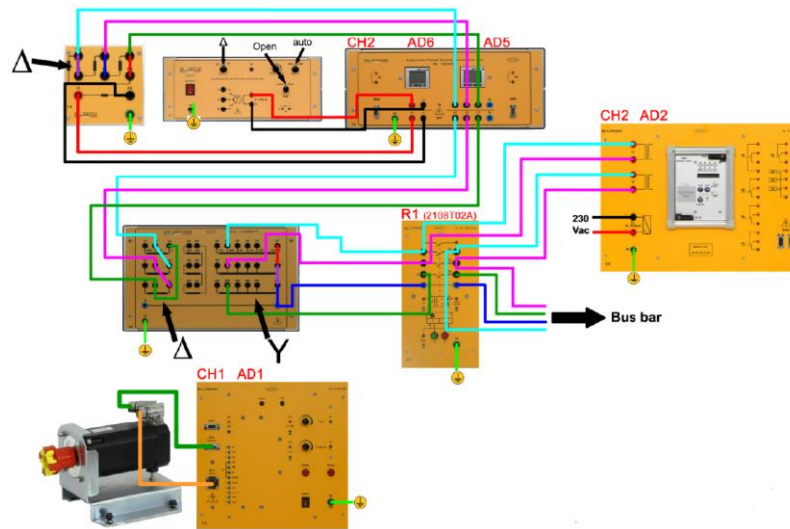
MÓDULOS	DESCRIÇÃO
DL2108T26	Controlador de motor sem escovas
DL 2108T02	Circuito disjuntor de energia
DL 2108T23	Relé gestor de alimentação
DL 2109T29	Medidor trifásico de potência
DL 1022P4	Motor trifásico assíncrono de anel coletor
DL 2108TAL-SW	Unidade de fornecimento trifásica
DL HUBRS485F	Comunicação RS485

Fonte: Empresa De Lorenzo



Na bancada Smart Grid, temos os módulos apresentados na tabela sendo utilizados com a finalidade de produzir uma simulação de uma geração eólica, com isso, temos um modelo da montagem de um circuito apresentado pela empresa De Lorenzo, no qual serve para auxiliar na execução do teste, demonstrada na Figura 16.

Figura 16: Esquema de ligação nos módulos com o intuito da simulação de uma geração eólica.



Fonte: Guia prático – Bancada Smart Grid da De Lorenzo

### 3.2.1.2. GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

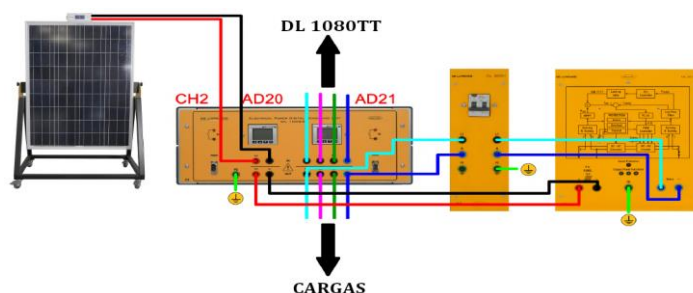
A produção de energia através de sistemas fotovoltaicos ocorre a partir da conversão (transformação) da luz solar (radiação) em energia elétrica. Elementos chamados fótons compõem a energia da luz solar e, quando aplicados a certos semicondutores, podem transferir sua energia para elétrons na camada de valência dos mesmos. Quando essa luz incide sobre as células solares, parte dela é absorvida, então é possível quebrar suas conexões para que fiquem livres e possam se mover no material, então quanto maior a intensidade da luz, maior a corrente elétrica. Com esse distúrbio, cria-se um espaço vazio (gap), que, juntamente com o movimento dos elétrons, caracteriza as condutividades elétricas do semicondutor, sendo que ambos podem ser caracterizados como portadores de carga.

A ligação entre o gap do material semicondutor e os elétrons emitidos pela luz solar não pode ser restabelecida para a geração de eletricidade, pois o movimento entre eles em direções opostas provoca uma corrente elétrica no semicondutor, na qual é

extraída e utilizada no circuito externo. (ALONSO, GARCÍA e SILVA, 2013a). Em suma, a conversão da luz solar (radiação) em energia elétrica ocorre como resultado de uma reação química, diferente da maioria dos tipos de produção de eletricidade, onde transformam a energia primária da fonte geradora em energia mecânica e depois a convertem em eletricidade.

No princípio, é realizado um agrupamento das células fotovoltaicas em série ou paralelo para formar os módulos solares. A corrente gerada nestes módulos é contínua, pois as cargas utilizadas diariamente são em sua maioria projetadas para trabalhar com corrente alternada, portanto este tipo de produção requer um potente inversor para convertê-la. A utilização em corrente alternada desse dispositivo também permite que a energia gerada seja direcionada para a rede elétrica (ALONSO, GARCIA e SILVA, 2013b). A Figura 17 mostra quais conexões e módulos devem ser utilizados para simular um sistema de geração de energia solar, e logo em sequência é apresentada uma tabela que mostra os módulos participantes do experimento.

Figura 17: Esquema de ligação nos módulos com o intuito da simulação de uma geração fotovoltaica.



Fonte: Guia prático – Bancada Smart Grid da De Lorenzo

Tabela 3: Módulos da Bancada Smart Grid De Lorenzo utilizados para simulação do sistema de geração fotovoltaico.

MÓDULOS	DESCRIÇÃO
Painel fotovoltaico inclinável	90W, 12Vcc, com sensor para medir a intensidade da radiação solar
DL 9031	Interruptor termomagnético diferencial
DL 9013G	Inversor sincronizado na rede elétrica (12 V, 300 W)
DL 10065N	Módulo de medição de energia elétrica em kW/h
DL SIMSUN	Módulo com lâmpadas para fornecer a iluminação adequada para o painel solar quando usado em laboratório

Fonte: Empresa De Lorenzo

O DL SIMSUN é usado para garantir iluminação suficiente do módulo fotovoltaico, a intensidade da luz pode ser ajustada por potenciômetro ou controlada automaticamente pela entrada de 0-10V para realizar experimentos com diferentes intensidades de luz, simulando condições adversas de luz do amanhecer até o anoitecer DL SIMSUN inclui: 4 lâmpadas halógenas de 300 W cada; dimmer para ajustar a intensidade da luz; chave magneto-térmica, diferencial 10 A e um potenciômetro, 10k, mostrado na Figura 18.

Figura 18: Ilustração do módulo DL SIMSUN.



Fonte: Empresa De Lorenzo.

### 3.2.1.3. GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA

A produção de energia das usinas hidrelétricas é feita pelo aproveitamento do fluxo hídrico, seja captando água em grandes quantidades em reservatórios formados por barragens ou utilizando o curso de um rio, a primeira escolha apresenta uma vantagem na gestão da produção de energia, principalmente nos períodos de estiagem, geralmente estão localizados nas cabeceiras dos rios para aproveitar as grandes quedas d'água devido ao desnível do terreno, a gestão dos recursos hídricos também facilita a implantação da cadeia produtiva nas usinas, pois as mesmas começam a controlar o fluxo dos rios. No caso da segunda opção, a mesma não faz com que a água se acumule nos reservatórios, ela aproveita o fluxo característico do rio.

Esse tipo de produção leva em consideração diversas variáveis que servem para classificá-los quanto ao porte, seja pequeno, médio ou grande, segundo critérios como: altura da cachoeira, vazão, potência ou capacidade instalada, tipo de turbina utilizada, localização, tipo de barragem e reservatório. Todos esses fatores estão inter-relacionados,

a altura do jato afeta diretamente a vazão, dependendo das condições onde as instalações são construídas, o que determina, portanto, a potência instalada, que determina o tipo de turbina, represa e reservatório.

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), são consideradas hidrelétricas aquelas com capacidade instalada de até 1 MW, as pequenas centrais hidrelétricas com capacidade instalada de 1,1 MW a 30 MW são classificadas como Usinas Hidrelétricas de Energia (UHE) as que apresentam mais de 30 MW. O tamanho da rede principal é inevitavelmente determinado pelo tamanho das instalações cuja função é fornecer energia aos consumidores (BRASIL, 2008a).

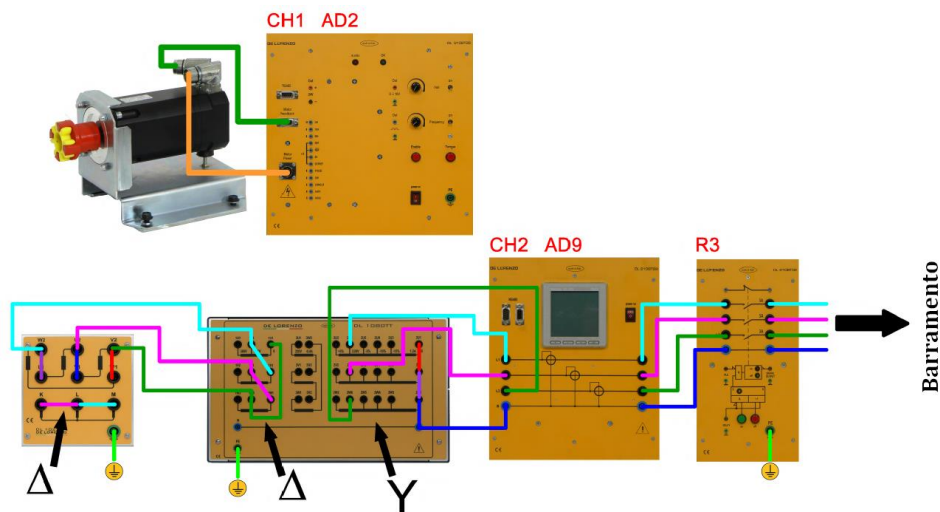
O conjunto dos módulos necessários para executar a simulação do sistema de geração de energia por hidrelétrica, como também as conexões que devem ser realizadas estão, respectivamente, listados e apresentados na Tabela 4 e na Figura 19.

Tabela 4: Módulos da Bancada Smart Grid De Lorenzo utilizados para simulação do sistema de geração hidrelétrica

<b>MÓDULOS</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
DL 2108T26	Controlador de motor sem escovas
DL 2108T02	Circuito disjuntor de energia
DL 1026P4	Gerador Assíncrono Trifásico
DL HUBRS485F	Comunicação RS485
DL 1080TT	Transformador Trifásico
DL 2109T29	Medidor trifásico de potência

Fonte: Empresa De Lorenzo

Figura 19: Esquema de ligação nos módulos com o intuito da simulação de uma geração hidrelétrica



Fonte: Guia prático – Bancada Smart Grid da De Lorenzo

#### 3.2.1.4. SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

A eletricidade é geralmente produzida a centenas de quilômetros de distância dos usuários finais, porque são grandes instalações e dependem diretamente das condições estabelecidas por sua fonte de produção. Devido a essas distâncias, havia a necessidade de utilizar uma infraestrutura que transportasse a energia produzida até as unidades distribuidoras (concessionárias), que por sua vez a abasteceriam aos consumidores. Nesse sentido, as linhas aéreas tornaram-se o meio mais importante de transmitir eletricidade de suas fontes de geração para distribuidores/consumidores.

Embora as linhas de transmissão não sejam a parte mais complexa de um sistema elétrico em termos de número de elementos que a compõem, são as partes que mais dependem de suas propriedades físicas para um bom desempenho, e dentre essas propriedades, sua geometria é a protagonista. Cabos de controle, isoladores, cabos estruturais e para-raios também fazem parte e partes essenciais da linha de energia.

Fazendo uso de uma alta condutividade elétrica, um baixo custo, uma resistência mecânica, um baixo peso específico e uma resistência tanto à oxidação quanto à corrosão de contaminantes químicos, seriam características ideais dos condutores, pois assim causariam pouca perda de calor (efeito Joule); a integridade mecânica dos cabos para evitar o risco de quebra e acidentes de objetos em seu entorno; cabos mais leves, ou seja,

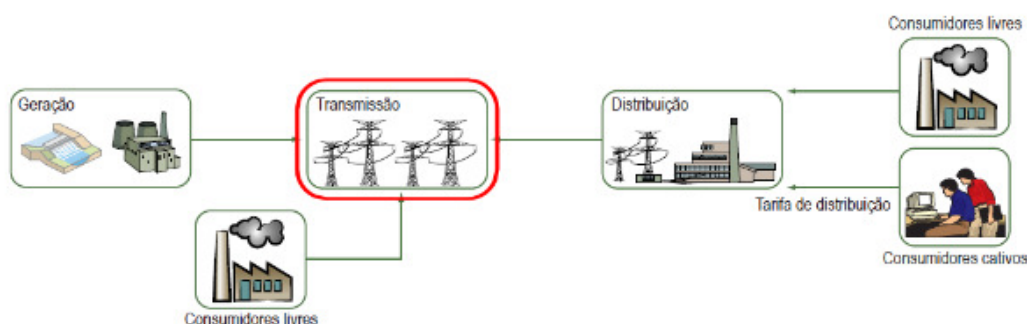
estruturas que não precisassem carregar tanto peso. Porém, nem todas essas propriedades são encontradas juntas em um mesmo material, então busca-se um equilíbrio entre elas, e dois materiais, cobre e alumínio, são usados em maior quantidade em linhas de transmissão (FUCHS, 1977a).

As linhas aéreas requerem estruturas de suporte que são escolhidas de acordo com as características da linha de energia nela instalada e podem ser de diferentes tamanhos ou formas. Tendo escolhido uma estrutura de suporte, a proposta selecionada tem de ter influência da distância entre fios, dimensões e formas de isolamento, altura de segurança, disposição dos fios, número de circuitos.

No Brasil, os materiais utilizados para as estruturas de sustentação das linhas elétricas são geralmente metais, portanto materiais condutores, por isso é necessário o uso de isoladores fixados nas estruturas que sustentam as linhas elétricas, mantendo-as isoladas eletricamente. Esses elementos devem ser feitos para suportar ambas as forças mecânicas, pois estão expostos a efeitos como força e pressão do vento e peso dos fios; como fenômenos elétricos, como surtos, picos de tensão induzidos por movimento e até surtos atmosféricos.

Em relação às estruturas de sustentação das linhas de energia são principalmente postes de grandes dimensões, tanto em altura quanto em largura, são de metal e são fatores que podem contribuir para que as descargas atmosféricas sejam atraídas para torres de energia ou mesmo linhas de energia. Nesse contexto, os para-raios são utilizados para solucionar esse problema, e os resultados são ainda melhores em áreas com más condições topográficas e de resistência do solo (FRANCO ENGENHARIA, 2003).

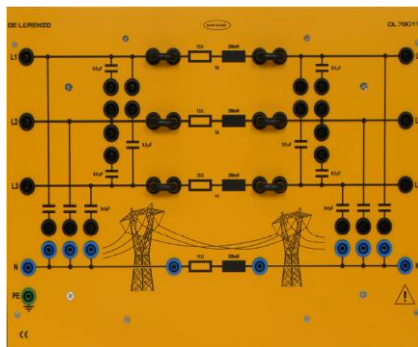
Figura 20: Representação de um sistema elétrico de Transmissão.



Fonte: <https://www.gov.br/aneel/pt-br>

Na bancada didática utilizada neste trabalho, dois módulos apresentam as características da linha de transmissão, porém essas características específicas diferem entre estes módulos, pois um deles é projetado para simular as condições de operação, reações e comportamento de uma linha de transmissão trifásica com 360 km de extensão, tensão de 380 kV e corrente de linha de até 1000 A, a segunda representa uma linha de 100 km e tem a mesma tensão e corrente da anterior, como mostrado nas figuras 21 e 22.

Figura 21: Linha de transmissão de 360 km, 380 kV e 1000A, Módulo DL7901TT.



Fonte: Empresa De Lorenzo

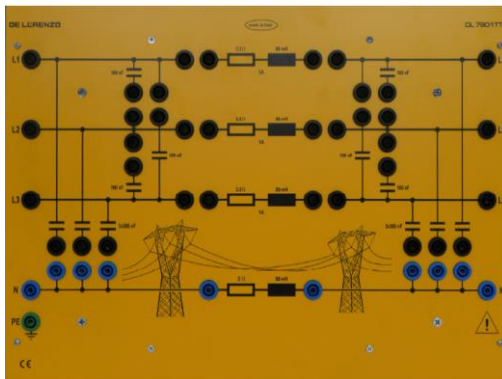
A tabela 5 em seguida apresenta as características intrínsecas a linha de transmissão de 360 km, simulada pelo módulo DL7901TT.

Tabela 5: Módulo DL7901TT, características construtivas e parâmetros da linha de transmissão de 360 km

<b>CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS E PARÂMETROS</b>	
Fatores de escalas	Tensão: 380 V: 380 kV = 1:1000 Corrente: 1 A: 1000 A = 1:1000
Parâmetros da linha	Resistência = 13 $\Omega$ Indutância = 290 mH Capacitância mútua = 0,5 $\mu\text{F}$ Capacitância neutro = 1 $\mu\text{F}$
Parâmetros de retorno pelo neutro	Resistência = 11 $\Omega$ Indutância = 250 mH
Capacitância de operação	2,5 $\mu\text{F}$
Impedância característica	340 $\Omega$
Circuito equivalente ao modelo $\pi$	

Fonte: Empresa De Lorenzo

Figura 22: Módulo DL7901TTS, Linha de transmissão de 100 km, 380kV e 1000ª.



Fonte: Empresa De Lorenzo

Em sequência temos a tabela 6 mostrando quais são as características intrínsecas a linha de transmissão de 100 km, simulada pelo módulo DL7901TTS

Tabela 6: Módulo DL7901TTS, características construtivas e parâmetros da linha de transmissão de 100 km.

<b>CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS E PARÂMETROS</b>	
Fatores de escalas	Tensão: 380 V: 380 kV = 1:1000 Corrente: 1 A: 1000 A = 1:1000
Parâmetros da linha	Resistência = 3.3 $\Omega$ Indutância = 80 mH Capacitância mútua = 100 nF Capacitância neutro = 200 nF
Parâmetros de retorno pelo neutro	Resistência = 3 $\Omega$ Indutância = 69 mH
Capacitância de operação	500 nF
Impedância característica	400 $\Omega$
Circuito equivalente ao modelo $\pi$	

Fonte: Empresa De Lorenzo

### 3.2.2. SISTEMAS DE PROTEÇÃO

Neste trabalho, analisaremos os tipos de sistemas de proteção que foram utilizados no desenvolvimento do circuito preventivo das ocorrências de falhas: Excesso de corrente (sobrecorrente), Excesso de tensão (sobretensão) ou falta de tensão, além da falha de aterramento e proteção.



### 3.2.2.1. SISTEMA DE PROTEÇÃO PARA SOBRECORRENTES

Quando observamos o cotidiano daqueles que lidam com sistemas elétricos de forma geral, podemos afirmar que um problema relativamente comum é a sobrecorrente, na qual é um fenômeno que expressa o excesso de corrente no circuito. Ou seja, de uma corrente que ultrapassa seu valor nominal. Porém, dentro dessa categoria de falha em questão, a mesma pode ser categorizada em dois aspectos, sendo eles o curto-circuito e a sobrecarga.

Um curto-circuito pode ser atribuído à categoria "Falha", ou seja, uma condição não planejada e indesejada que ocorre devido ao aparecimento de defeitos, mau funcionamento ou erros em circuitos elétricos. Normalmente, esta situação leva a um desligamento momentâneo do equipamento, pois todos os elementos conectados ao sistema sofrem um aumento súbito de tensão ou corrente. Portanto, um curto-circuito pode ser detectado quando a resistência elétrica no circuito diminui drasticamente - até que a corrente elétrica através dele atinja uma intensidade alta - e a tensão da rede elétrica cai e se aproxima de zero.

A sobrecarga também é um problema comum que ocorre quando a carga que passa pela rede elétrica é maior do que o originalmente pretendido. Esta situação sobrecarrega o sistema e provoca quedas de tensão intermitentes na entrada das proteções. Embora um curto-circuito exija um aumento acentuado da força, o problema de sobrecarga pode ocorrer até mesmo com um pequeno aumento se o sistema não o suportar.

Sempre que ocorrer uma sobrecorrente, é possível que além de interromper o circuito, o aparelho seja danificado permanentemente, causando prejuízo financeiro por substituição e inoperacionalidade temporária. O fenômeno pode acontecer devido a alguns aspectos como: algum tipo de mau funcionamento no sistema, a fiação do sistema ser inadequada, algum tipo de problema no isolamento entre as fases, ou até mesmo fusíveis e disjuntores com defeitos.

Um dos pré-requisitos básicos para a proteção de sobrecorrente - seja curto-circuito ou sobrecarga - é que haja uma relação de coordenação entre o dispositivo utilizado para essa função e os condutores do circuito que está sendo protegido. Para tanto, a NBR 5410 (Norma Técnica Brasileira), lista as condições para a seleção adequada de equipamentos de proteção. O mais importante é saber qual dispositivo de chave ou

fusível pode ser usado. Geralmente é colocado no ponto inicial do circuito, mas também existe a possibilidade de movimentação - em caso de proteção contra curto-circuito.

Percebe-se que em relação à proteção de sobrecorrente, a norma se dedica a enfatizar a importância da escolha correta do dispositivo. É interessante notar que nada impede a presença simultânea de dispositivos de proteção contra sobrecarga e curto-circuito. Assim como pode haver itens que protegem apenas contra um problema ou outro.

### 3.2.2.2. SISTEMA DE PROTEÇÃO PARA SOBRETENSÃO

Sobretensão ou excesso de tensão, é um valor elétrico maior do que o circuito em questão pode suportar. Isso significa que é uma onda de tensão na qual acaba sendo maior do que a tensão nominal da rede. Esse valor de tensão elétrica refere-se à diferença de potencial elétrico entre dois pontos. A alta tensão pode danificar permanentemente qualquer tipo de dispositivo receptor, além de outros componentes anexados à rede de uma forma geral.

Esse fenômeno pode ocorrer derivado de várias fontes, nas quais acabam influenciando diretamente na quantidade de tensão estabelecida num determinado sistema no momento em que vierem a acontecer. Entre algumas das razões de existir um excesso de tensão na rede, podemos falar sobre as descargas atmosféricas, nas quais ocorrem com maior potencial de destruição. A descarga causa uma sobretensão transitória que pode percorrer longas distâncias. Isso pode causar uma falha completa ou até mesmo a destruição de toda a instalação.

Um grande causador de uma sobretensão na rede, também pode vir a ocorrer derivado das operações de comutação, as mesmas vindo de máquinas com um alto desempenho ou em um curto-circuito na rede de alimentação. Eles podem criar surtos indutivos que se propagam em cabos de alimentação de corrente muito alta. Uma outra maneira de se gerar uma sobretensão na rede elétrica, pode vir do acontecimento de uma colisão ou um toque entre corpos com algum potencial eletrostático diferente.

A partir disso, todo um sistema pode vir a sofrer consequências devido a ocorrência de uma sobretensão, nas quais podem ser: destruição ou avaria de equipamentos interligados a rede, tempo de imobilização das instalações, perda de dados e até mesmo levar ao óbito de pessoas ou animais que possam acabar entrando em contato.

Mesmo que alguns fenômenos em específico não possam ser evitados, como é o caso das descargas atmosféricas, existem métodos que devem ser utilizados para evitar os impactos da sobretensão sobre os equipamentos e até mesmo nas pessoas. A proteção

eficaz contra a sobretensão começa com uma avaliação adequada dos riscos potenciais de todos os equipamentos protegidos. Como resultado do conceito de proteção, todas as interfaces de entrada de energia, bem como a comunicação de dados e telecomunicações.

Somente assim, por exemplo, todos os dispositivos finais da rede de informações, local de produção ou edifícios são protegidos de forma completa e eficaz. Dispositivos de proteção contra surtos de tensão, garantem alta disponibilidade e segurança de sistemas em todas as áreas da engenharia elétrica com a ajuda de vários dispositivos de alta qualidade e tecnologia inovadora. A representação descritiva do conceito de proteção contra raios é o chamado circuito de proteção.

Com a finalidade de ter o melhor desempenho possível, um sistema de proteção deve fazer uso de equipamentos projetados especificamente para esse meio, entre eles temos: disjuntores para proteção contra sobrecarga e curtos-circuitos, interruptores diferenciais residuais (DR) para proteção contra os choques elétricos e incêndios, além dos dispositivos de proteção contra surtos (DPS) para proteção contra sobretensões.

### 3.2.2.3. SISTEMA DE PROTEÇÃO PARA FALHA DE ATERRAMENTO E PROTEÇÃO

Segundo a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), aterramento significa colocar instalações e equipamentos no mesmo potencial do aterramento. Assim, em caso de descarga de corrente elétrica, a eletricidade tende a ir para o potencial mais baixo; como no caso do solo, no qual tem o potencial de aterramento quase zero. Desta forma, pessoas próximas a equipamentos energizados não sofrerão choque elétrico.

Um dos principais objetivos de um sistema de aterramento elétrico é garantir a segurança das pessoas que interagem com a eletricidade em casa ou no trabalho. Além disso, o mesmo é contemplado pela NBR 5410 e também pela norma regulamentadora NR10. Portanto, o aterramento elétrico é necessário para proteger o bom funcionamento dos equipamentos elétricos e a integridade física das pessoas.

Fusíveis e interruptores dependem do aumento da corrente elétrica. Sem um sistema de aterramento elétrico, não ocorre a vazão da corrente. Por exemplo, uma geladeira com corrente contínua no motor. Se não tiver um sistema de aterramento adequado, a sobrecarga pode ser descarregada assim que uma pessoa tocar no invólucro. Ele recebe um choque que é direcionado ao solo.

Para realizar um aterramento do sistema elétrico, o mesmo pode ser dividido entre um aterramento funcional, um aterramento de proteção e um aterramento temporário. No

caso do aterramento funcional, o mesmo acontece através da ligação de um dos condutores do sistema neutro. Quando analisamos o aterramento de proteção, podemos analisar que ele ocorre derivado da ligação à terra das massas e dos elementos condutores estranhos à instalação. Um aterramento temporário é uma conexão elétrica feita intencionalmente a um aterramento de baixa resistência. O objetivo é garantir um potencial igual e constante em todas as instalações elétricas.

Embora existam formas e materiais que ajudem a prevenir falhas no aterramento do sistema elétrico, as mesmas acabam sendo inevitáveis em algum momento, a partir disso, foram desenvolvidos métodos para detectar a ocorrência dessas falhas, entre eles nós temos: Método de retorno ao solo, método de detecção de seqüência zero e método de detecção residual.

O método mais simples e prático é o chamado método de retorno ao solo. Este método de detecção é baseado no fato de que todas as correntes fornecidas por um transformador devem retornar a esse transformador. Quando o condutor energizado quebra o metal até o aterramento, a corrente de falta flui de volta ao longo do retorno no neutro do transformador de origem. Este caminho inclui um fio de eletrodo de aterramento, às vezes chamado de pulseira de aterramento.

Outro método de detecção de faltas à terra é usar o método de detecção de seqüência zero. Este método de detecção requer um sensor único e especialmente projetado, seja toroidal ou retangular. O método de detecção é baseado no fato de que a soma vetorial das correntes de fase e neutro em qualquer circuito de distribuição é zero, a menos que haja uma falha de aterramento após o sensor. Todas as correntes que fluem apenas nos condutores do circuito, incluindo correntes normais ou de falha, balanceadas ou desbalanceadas fase-fase e fases-neutro e correntes harmônicas, produzirão saída de sensor zero.

O terceiro método básico de detecção de falta à terra envolve o uso de múltiplos sensores de corrente acoplados a um método de detecção residual. Este é um método de detecção muito comum usado em disjuntores com dispositivos de disparo eletrônico e proteção de falta à terra sólida. No método de detecção residual, a razão do sinal do pólo é crítica. Uma vez que a soma vetorial das correntes em todos os condutores é zero sob condições normais de falta à terra, é essencial usar polos apropriados para refletir essa condição.

### 3.2.3. SOFTWARE SCADA

Com o intuito de se tornar possível uma simulação completa dos experimentos feitos na bancada smart grid da empresa De Lorenzo, é feita a utilização de um software SCADA (controle de supervisão e aquisição de dados). Esse sistema é controlado por computadores que monitoram e controlam processos em larga escala, abrangendo vários locais e percorrendo longas distâncias, mais comumente conhecido como sistema de controle industrial.

Funções como: controle e monitoramento do sistema para obtenção de dados físicos dos dispositivos; controle de funções por meio de atuadores; monitoramento por meio de interface homem máquina (IHM) que apresenta dados e gráficos gerados pelo funcionamento de equipamentos e dispositivos; uma ferramenta de segurança, como uma etiqueta de chave; rastreamento e envio de pedidos; unidades terminais remotas (RTUs), que convertem os sinais do sensor em dados digitais e os transmitem ao sistema de monitoramento; controladores lógicos programáveis (CLPs) usados como dispositivos de campo por serem econômicos, versáteis, flexíveis e configuráveis; infraestrutura de comunicação; Todos estes são (mas não limitados a) componentes ou subsistemas que podem ser controlados, monitorados, controlados e/ou controlados por este software.

Nos sistemas de gerenciamento de energia de hoje, esses softwares são cruciais para o desenvolvimento e implantação de redes inteligentes. Eles processam grandes quantidades de energia de fontes renováveis, independentemente da direção ou estabilidade do fluxo de energia produzido por geradores de vários tamanhos. Essas fontes coletam, processam, gerenciam e analisam dados e informações de diversos pontos da rede elétrica, seja ela regional ou mesmo nacional. Essas informações são usadas para determinar manutenções preventivas, identificar falhas e organizar redes.

Este software foi integrado à bancada didática da empresa De Lorenzo por permitir o estudo de conceitos relacionados ao sistema Smart Grid, que, conforme apresentado anteriormente, é composto por uma série de módulos e dispositivos e o software SCADA que possibilita experimentos práticos, com tecnologias, características e especificações de produção, transmissão, proteção e uso de eletricidade na rede "inteligente" de nova geração. O software fornece coleta, além do armazenamento de dados de módulos de medição para instrumentos e um controle de atuadores para gerenciamento "inteligente" de todo o sistema elétrico.

### 3.2.3.1. SEÇÕES DO SOFTWARE SCADA

Durante a produção do software, pode-se notar que o mesmo passou por uma subdivisão em seu conteúdo geral, no qual foram geradas um total de cinco sessões didáticas, esse fator ocorreu com a finalidade de proporcionar uma maior facilidade no desenvolvimento de experimentos feitos na mesma na bancada Smart Grid.

Tabela 7: Seções didáticas do software SCADA.

<b>SEÇÕES DIDÁTICAS</b>	
Seção A	Sistema Hidrelétrico
Seção B	Sistema Eólico
Seção C	Sistema Fotovoltaico
Seção D	Transmissão
Seção E	Rede Inteligente

Fonte: Software SCADA

Na parte referente a seção A, trata-se da simulação de um sistema de geração de energia hidrelétrica para entender e se desenvolver uma melhor compreensão sobre as características da fonte geradora. Nesta seção é mostrado como usar um motor brushless; ligando o motor com o sistema de ajuste; conectando a carga ao gerador e verificando o comportamento dos parâmetros elétricos tanto no gerador quanto na carga; conectando o gerador síncrono à rede elétrica, permitindo avaliar o efeito da sincronização mecânica que possibilita esta conexão; provoca eventos de sobrecorrente, sobretensão, excesso de frequência ou mesmo subtensão, falta de frequência e programa as soluções necessárias.

A seção B examina a geração eólica, em resumo, usa a força dos ventos para girar as pás das turbinas eólicas e transformá-las em eletricidade. Esta fonte de alimentação possui diversas variáveis que devem ser consideradas durante a produção. Nesta seção é possível simular características como: o esforço das asas, pois deve mudar de acordo com a força exercida sobre elas pelo vento, o aproveitamento e a eficiência da produção de eletricidade; compreender o funcionamento mecânico de um motor eólico, pois controlar o momento e o passo das pás evita os esforços mecânicos provocados pelas rajadas de vento; verificando a estabilidade do gerador, além de conferir sua potência ativa quando conectado à rede.

No caso da seção C, temos como foco a energia solar, compreendendo a caracterização dos painéis solares em relação às vertentes, procurando o melhor ângulo de incidência dos raios solares; de acordo com a potência gerada; conexão com a rede elétrica e como ocorre a troca (fluxo) de energia entre os sistemas.

Na seção D, são descritos os meios de transporte elétrico pelos quais se desloca da produção para a distribuição, as linhas elétricas. Comportamento dos parâmetros elétricos na linha com ou sem carga; efeitos capacitivos; relação tensão-corrente do fio para uma carga ôhmica mista ou puramente indutiva ou capacitiva; licenças automáticas necessárias para as linhas; conexão em série ou paralelo de dois fios e seus efeitos nas grandezas elétricas; a presença de aterramento ou a falta dele; ajuste do sistema de proteção; estas são as lições que podem ser simuladas e testadas nesta seção.

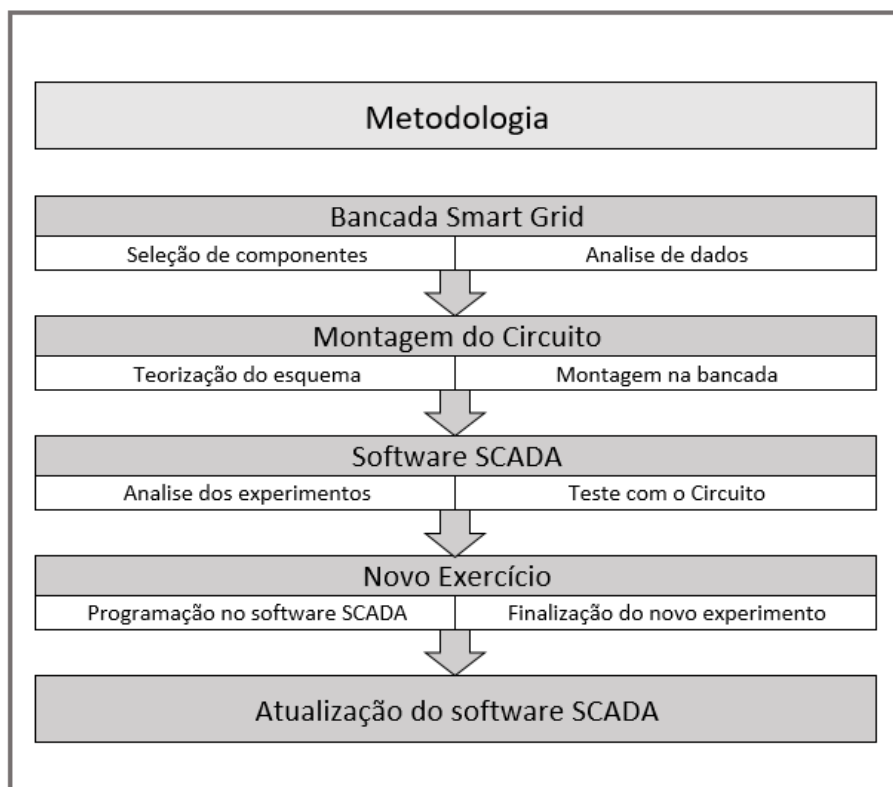
Referente a seção E, todo o conhecimento adquirido nas partes anteriores é importante, pois esta parte introduz a ideia de simulação e pesquisa de uma rede inteligente, onde todos os meios de geração, transmissão e distribuição estão interligados e se comunicam entre si, no qual permite analisar e controlar a participação de cada fonte produtora de energia, o comportamento das linhas de transmissão sob diferentes tipos de cargas, o efeito das cargas no sistema como um todo.

## 4. DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

Tendo como base a interação com a bancada SMART GRID De Lorenzo durante o decorrer do curso, observou-se que a maior parte dos experimentos propostos no software SCADA, eram fundamentados em um único circuito no qual ocorria algum tipo de falha ou fenômeno a ser analisado.

A partir disso, foi possível se perceber que não existia um experimento proposto pela empresa, em que num único circuito, ocorreriam mais de uma falha na rede elétrica, com isso, a proposta de elaborar um único exercício em que pudesse gerar uma ocorrência de sobretensão, sobrecorrente e uma falha de aterramento, foi colocada em prática seguindo a ordem exposta no fluxograma da Figura 23.

Figura 23: Fluxograma da metodologia aplicada.



Fonte: Kijartan Alencar

Com a finalidade de produzir o melhor resultado possível em relação ao experimento, a proposta teve início analisando as ferramentas disponíveis na bancada SMART GRID, tendo em foco quais componentes seriam utilizados para se montar um circuito em torno deles no qual fosse capaz de executar todos os testes de falhas previamente propostos.

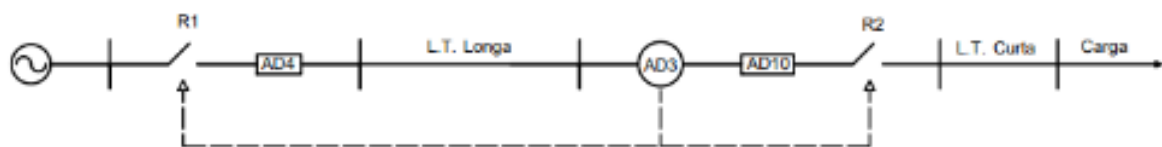


A partir disso, observou-se que para se ter uma maior abrangência de testar a maneira como as falhas de sobretensão, sobrecorrente e a falha de aterramento se comportam, decidiu-se implementar no circuito as linhas de transmissão de 100km e de 300 km. Para controlar de forma eficiente as falhas que viriam a ocorrer na extensão do sistema, ao menos dois disjuntores teriam que ser colocados ao circuito, com isso foram utilizadas as chaves “R1” e “R2”.

Tendo o “corpo” geral do circuito em mente, antes do mesmo ser propriamente montado na bancada SMART GRID De Lorenzo, restava implementar uma maneira de monitorar os valores que acionaram as condições da existência das falhas, assim, foram selecionados os componentes “AD4”, “AD3” e “AD10”, sendo eles conectados ao circuito de forma que os resultados de tensão e corrente presentes no sistema pudessem ser vistos a todo momento.

Com isso, todos os aspectos necessários para produzir o circuito responsável em gerar as falhas de sobretensão, sobrecorrente e a falha de aterramento, estavam preparados. A partir disso, o esboço do circuito em questão começaria a ser montado na bancada SMART GRID, da mesma forma que o mesmo está representado na Figura 24.

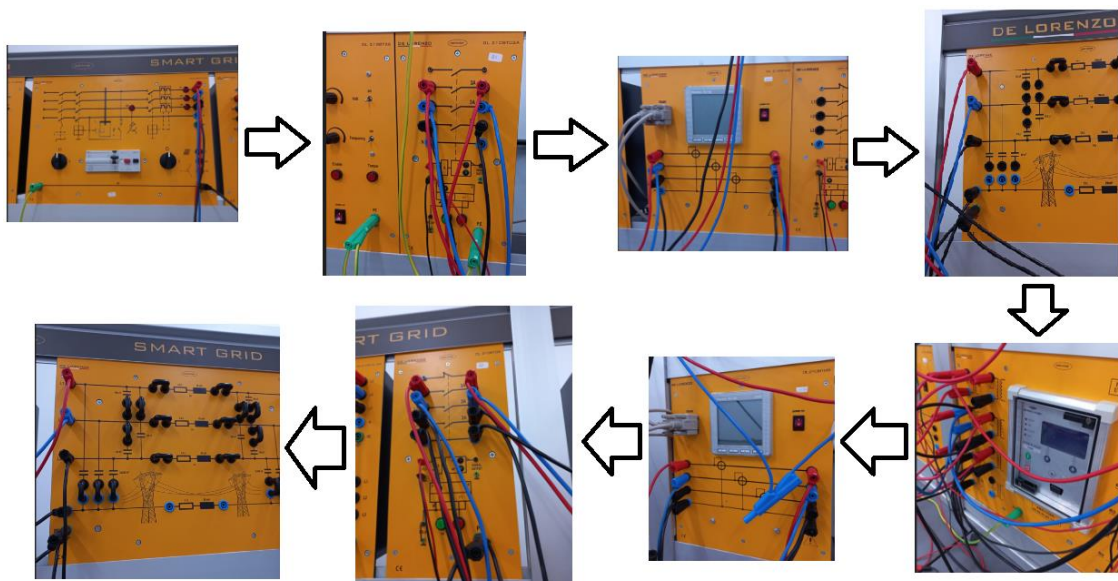
Figura 24: Diagrama unifilar do circuito.



Fonte: Kijartan Alencar

Assim, a montagem propriamente dita do circuito na bancada SMART GRID De Lorenzo começou, inicialmente a fonte que alimenta o sistema foi conectada, assim como demonstrado na Figura 25.

Figura 25: Circuito montado na bancada.



Fonte: Bancada SMART GRID De Lorenzo

Seguindo a maneira como o circuito foi planejado, ligado diretamente a fonte e com a função de servir como disjuntor, temos a chave “R1”. No decorrer do circuito, temos o componente “AD4” ligado ao “R1”, no qual tem como função monitorar os valores de tensão e corrente que estão entrando naquele trecho. Conectado a saída do “AD4” encontra-se a linha de transmissão longa, na qual representa uma extensão total de 300 km.

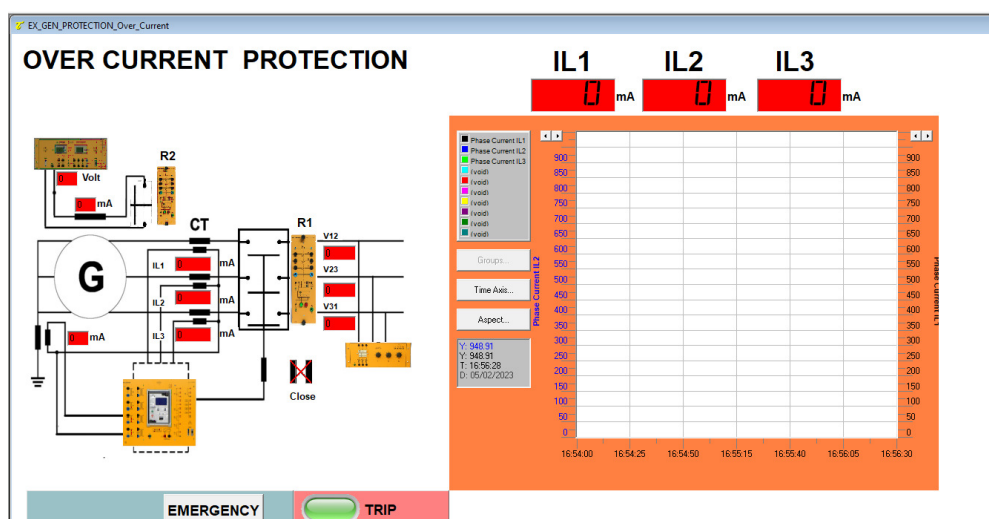
Seguindo o caminho do circuito, temos a presença do componente “AD3”, no qual tem a função de monitorar o valor de tensão e corrente registrados após passar pela linha de transmissão de 300 km. Prosseguindo com o desenho do circuito, encontra-se a presença do componente “AD10”, ligado à saída do “AD3”. Em seguida, podemos observar ligado bem ao lado do “AD10” está o que chamamos de “R2”, no qual funciona como chave para controlar essa parte do circuito. Conectado a saída do “R2” nós temos a linha de transmissão curta com um valor significativo de 100 km. Localizado ao final do circuito, nós temos as cargas de Resistência, de Indutância e de Capacitância, na qual estão conectadas ao circuito para uma melhor execução dos experimentos em relação às falhas.

Com a finalização da montagem do circuito na bancada SMART GRID, passamos para a etapa de aplicar as falhas no circuito e identificar seu comportamento, com o intuito de fundamentar na prática o funcionamento do sistema. Com isso, fizemos uso do software SCADA, porém, como ainda não havia um exercício moldado ao mesmo no qual tivesse a opção específica para as três falhas que seriam testadas, foi usado o circuito

do exercício 1, do tópico de proteção na geração, relacionado a falha de sobrecorrente localizado na Seção 1, na qual é equivalente a seção didática A, que aborda os experimentos sobre o sistema Hidrelétrico.

A escolha desse exercício em particular foi baseada no fato do mesmo ter os componentes “R1” e “R2” interligados ao mesmo, por conta que são eles que devem conseguir ter seu estado alterado na medida que os testes de falhas eram executados, pois os valores de tensão e corrente eram ajustados diretamente na bancada, além do fato de que os outros componentes tinham seus valores comparados com o do próprio sistema, para garantir que os testes fossem executados de maneira correta, o circuito utilizado do software SCADA está representado na Figura 26.

Figura 26: Exercício do software SCADA sobre sobrecorrente.



Fonte: Software SCADA

Tendo o software devidamente conectado e o circuito corretamente montado na bancada SMART GRID De Lorenzo, os testes das falhas puderam ser iniciados. O foco inicialmente foi em executar a falha por excesso ou falta de tensão no sistema elétrico, assim, embora o circuito em utilização do software não fosse o selecionado especificamente para o caso, o mesmo fazia uso dos componentes “R1” e “R2”, fator que tornava possível a execução do experimento.

A partir disso, o valor de tensão inicial na fonte foi ajustado para 380V, para executar o teste de sobretensão com sucesso, o componente “R1” foi programado a partir do software SCADA, para que o mesmo abra sua conexão com o circuito, caso o valor medido de tensão acabasse passando uma margem proposta de 10% do valor nominal.

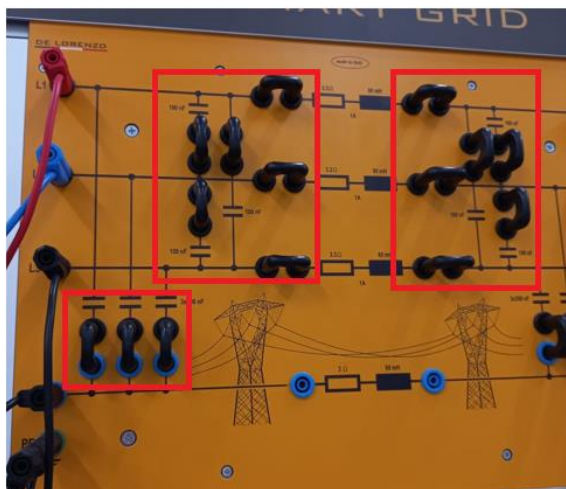
Com isso, o valor da tensão foi sendo aumentado gradativamente na fonte, com o propósito de registrar uma sobretensão, com base na porcentagem definida, o sistema de proteção deve ser ativo quando o valor medido no circuito esteja próximo de 418 V. Assim, como previamente calculado, no momento em que a tensão chegou em um valor médio de aproximadamente 421 V, o sistema abriu a chave “R1”, cortando a alimentação do restante do sistema, mostrando que o circuito montado está prevenindo falhas causadas pelo aumento da tensão.

Após o sucesso no teste de sobretensão, manteve-se o circuito proposto da maneira em que estava montado, retornando apenas o valor da tensão para 380 V, assim, evitando a ocorrência da abertura de “R1”, e fazendo uso da base do exercício 1 do software SCADA, o mesmo utilizado anteriormente, o foco foi mudado para a execução da falha de sobrecorrente.

Para que o teste com foco em analisar o excesso de corrente no circuito possa ser executado, algum tipo de parâmetro máximo desse valor deve ser indicado ao sistema do software SCADA, a partir disso, foi implementado na programação um valor de 0,5 como o topo em que o sistema elétrico suportaria de corrente, esse número em questão equivale a um total de 5 A.

Assim, mantendo a tensão inicial ainda fixa no valor de 380V, o circuito necessitaria de alguma interferência para que o aumento da corrente no mesmo supera-se o limite de 5 A, com essa finalidade, foram alterados os valores de capacitância em relação a linha de transmissão de 300 km, por meio da própria bancada SMART GRID, como mostrado na Figura 27.

Figura 27: Capacitâncias na linha de transmissão.



Fonte: Bancada SMART GRID De Lorenzo

Tendo o valor da capacitância devidamente ajustado nas linhas de transmissão, o valor da corrente no sistema elétrico superou o valor máximo de 5 A, gerando assim uma sobrecorrente, fator esse que gerou a abertura da chave “R2” do circuito de proteção, comprovando assim, que o sistema de proteção montado, também está apto para intervir em problemas relacionados com aumento excessivo de corrente.

Por fim, após a conclusão do teste de falha relacionado a sobrecorrente, restava analisar se o circuito era capaz de identificar a falha de aterramento, com essa finalidade, os valores de capacitância que tinham sido ajustados na linha de transmissão equivalente a 300 km, foram retirados e a tensão foi mantida em 380 V. Com o valor máximo da corrente no software SCADA ainda colocado em 5 A, a maneira utilizada para testar a funcionalidade do circuito foi através da adição de cargas indutivas, capacitivas e resistivas, ao final do circuito, com a finalidade de diminuir a corrente que é direcionada à terra.

Por meio das bancadas de cargas conectadas ao circuito, seus valores foram sendo aumentados periodicamente, até o momento em que o circuito iria ter seu valor máximo de corrente ultrapassado, para isso, em cada banca individualmente, existem 3 opções de cargas, tanto indutiva, como capacitiva, como também resistiva, que podem ser adicionadas ao circuito de forma individual. Porém, quando os testes foram realizados, a única forma das cargas influenciarem no circuito, foi colocando duas cargas de cada bancada, e aumentando seu valor de estágio simultaneamente, assim como mostrado na Figura 28.

Figura 28: Bancada de carga resistiva.



Fonte: Bancada SMART GRID De Lorenzo

Uma das maiores adversidades que foram observadas, foi o fato que aumentar o estágio de apenas uma dessas cargas, não influenciava no circuito, mesmo que o estágio estivesse com valor muito elevado, nenhuma mudança era notada. Porém, quando foram utilizadas a mudança de estágio em duas cargas simultaneamente, o valor da corrente que

deveria ser dispersada pelo terra, acabou retornando ao circuito, assim causando uma falha de aterramento no sistema.

A partir disso, o circuito de proteção atuou abrindo a chave “R2”, prevenindo que o sistema elétrico fosse danificado pela falha, com isso, observou-se que o circuito de proteção estava atuando com a maior eficácia possível, e comprovou-se que o mesmo era capaz de prevenir falhas relacionadas a sobretensão, sobrecorrente e falha de aterramento.

#### 4.1. RESULTADOS

Tendo a logística base do experimento comprovada, o foco em questão voltou-se para o software SCADA, a ideia em questão foi analisar como funciona sua interação com a bancada SMART GRID, e adicionar um experimento no qual utiliza-se as três falhas simuladas anteriormente. A partir disso, foi observado que sua linguagem de programação base foi desenvolvida em Delphi, com isso, entendeu-se que as variáveis utilizadas por todos os exercícios disponíveis no software são individuais para cada componente utilizado, ou seja, um mesmo componente sempre vai ter o mesmo grupo de variáveis relacionados ao mesmo, independente de que forma ele seja utilizado no circuito proposto.

Assim, o circuito montado e trabalhado na bancada SMART GRID, foi montado dentro do software SCADA, por meio do transporte de suas variáveis presentes em exercícios separados, para um mesmo experimento, tornando assim possível a produção de um novo exercício, no qual está fundamentado em toda teoria e aplicações exercidas anteriormente.

## 5. CONCLUSÕES

A transmissão de energia se torna algo cada vez mais indispensável no cotidiano atual, com o avanço da tecnologia de forma acentuada, a necessidade de se haver energia elétrica de qualidade e principalmente, ter confiança que se pode contar com a mesma a qualquer momento do dia, se tornou fundamental. A partir disso, se tem consciência de que nenhum tipo de sistema existente em todo o mundo está totalmente livre de qualquer adversidade, fatores surpresa ou até mesmo interferência de terceiros, com isso, a importância de um sistema de proteção funcional e mais abrangente para qualquer rede elétrica se justifica.

Os resultados mostram que existe a possibilidade de se obter um sistema de proteção que possa englobar mais de um tipo de falha, podendo assim, facilitar e principalmente aprimorar os mecanismos de proteção atuais. Fenômenos que tendem a gerar falhas de sobretensão, falhas de sobrecorrente, falhas por aterramento ou qualquer outro tipo de falha no sistema elétrico, tendem a ocorrer de maneiras muito variadas, assim, reforça a importância de um sistema de proteção estar adaptado da melhor forma possível a englobar o máximo de possíveis defeitos a uma peça tão fundamental do atual cotidiano mundial.

Embora a bancada SMART GRID seja uma ferramenta indiscutivelmente incrível, no quesito de facilitadora da gerência e elaboração de simulações, o software SCADA acaba tendo sua linguagem de programação base atualmente não muito utilizada pelo meio dos profissionais da área, mesmo sendo um programa direto é feito para ser um facilitador para aqueles que o utilizam, adicionar uma extensão ao mesmo na qual seja “fora” do seu pacote inicial proposto, se torna uma tarefa complexa.

De maneira geral, a proposta foi executada de forma completa, mostrando que é possível a execução de um circuito que seja projetado para simular mais de uma falha, além do fato de que adicionar um novo experimento no software SCADA, tendo como base aqueles que estão presentes no mesmo, se mostrou eficiente.

## REFERÊNCIAS

ABESCO. Potencial de Eficiência Energética no Brasil 2008 – 2016, 09 maio 2017. Disponível em: <<http://www.abesco.com.br/pt/novidade/potencial-de-eficiencia-energetica-no-brasil-2008-2016/>>. Acesso em: 20 janeiro 2023.

ALONSO, M. C.; GARCÍA, F. S.; SILVA, J. P. Programa de Capacitação em Energias Renováveis. **Energia Solar Fotovoltaico**, p. 7, 2013a.

ALONSO, M. C.; GARCIA, F. S.; SILVA, J. P. Programa de Capacitação em Energias Renováveis. **Energia Solar Fotovoltaico**, p. 40, 2013b.

BRASIL. Lei Complementar Nº 7, de 7 de setembro de 1970: Institui o Programa de Integração Social, e dá outras providências. **Presidência da República - Casa Civil**, 1970a. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/LCP/Lcp07.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LCP/Lcp07.htm)>. Acesso em: 25 jan. 2023.

BRASIL. Lei Complementar Nº 8, de 3 de dezembro de 1970: Institui o Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público, e dá outras providências. **Presidência da República - Casa Civil**, 1970b. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/LCP/Lcp08.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LCP/Lcp08.htm)>. Acesso em: 25 jan. 2023.

BRASIL. Lei Complementar Nº 26, de 11 de setembro de 1975: Altera disposições da legislação que regula o Programa de Integração Social (PIS) e o Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público (PASEP). **Presidência da República - Casa Civil**, 1975. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/LCP/Lcp26.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LCP/Lcp26.htm)>. Acesso em: 25 jan. 2023.

BRASIL. Resolução Normativa Nº 414, de 9 de setembro de 2010 - Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada. **ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica**, Brasília, 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>>. Acesso em: 2023 jan. 27.

BRASIL. Resolução Normativa Nº 479, de 3 de abril de 2012 - Altera a Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010, que estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada. **ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica**, Brasília, 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012479.pdf>>. Acesso em: 2023 jan. 27.

BRASIL, A. N. D. E. E. D. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. ANEEL. Brasília, p. 53. 2008a. (978-85-87491-10-7).

COBEI - ABNT Coletânea de Normas - **Proteção de Sistemas Elétricos com Relés**, 1985.

ELGERD, O. I. **Electric Energy Systems Theory: An Introduction McGraw-Hill**, Inc., 1971.



FRANCO ENGENHARIA. Para-raios para aplicação em linhas de transmissão. In: ENGENHARIA, F. **Para-raios para aplicação em redes de distribuição, subestações e linhas de transmissão**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2003. Cap. 8, p. 170 e 171.

FUCHS, R. D. Características Físicas das Linhas de Aéreas de Transmissão. In: \_\_\_\_\_ **Transmissão de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: LTC / EFEI, 1977a. Cap. 2, p. 15 e 16.

General Electric Transformer differential relay with percentage and harmonic restraint Instruction GEH-1816.

HOROWITZ, S. H. e PHADKE A. G. **Power System Relaying Research Studies** Press Ltd., 1999.

LORENZO, D. **Guia Prático - Laboratório de rede elétrica supervisionado - Smart Grid**. De Lorenzo. Rozzano, Itália. 2013.

MASON, C. R. **The Art and Science of Protective Relaying** John Wiley and Sons, Inc., 1956.

NT-150 Proteção de Redes Aéreas de Distribuição - **Sobrecorrente CPFL**, 1993.

PLATT, R. A energia eólica oferece muito para ignorar. **NewScientist**, n. 2900, jan. 2013.

SANTOS, A. **A energia reativa e sua correção**. CENFIM - Centro de Formação Profissional da Indústria Metalúrgica e Metalomecânica. Trofa. 2014.

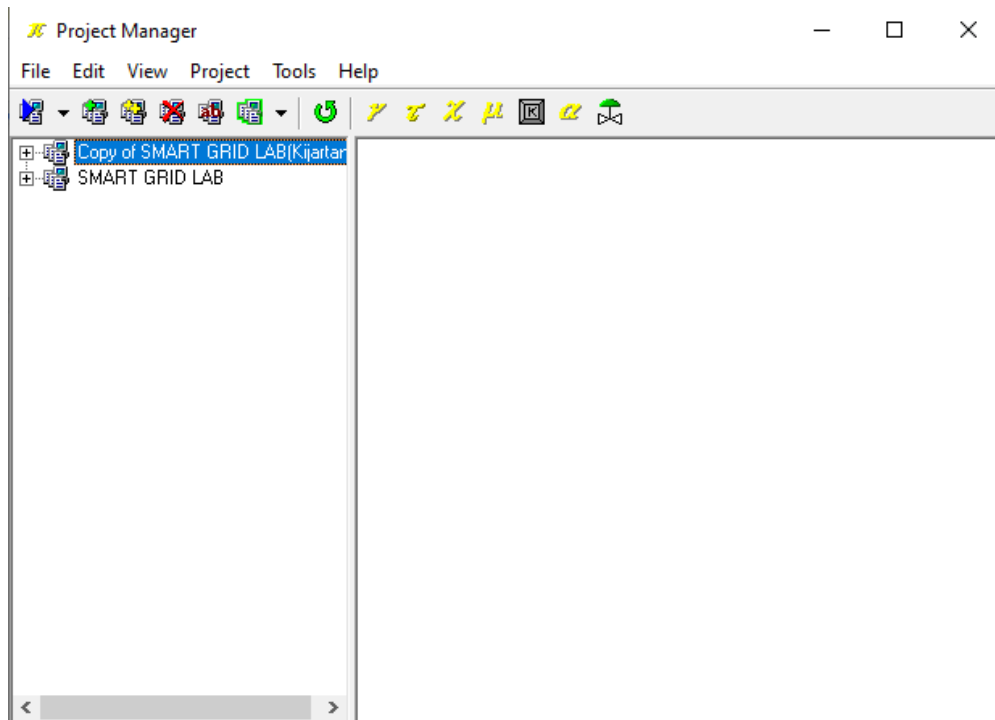
VIANA, A. N. C. et al. **Eficiência Energética - Fundamentos e Aplicações**. Campinas-SP: [s.n.], 2012.

Westinghouse Electrical Transmission and Distribution Reference Book by Central Station Engineers of the Westinghouse Electric Company, 1964.

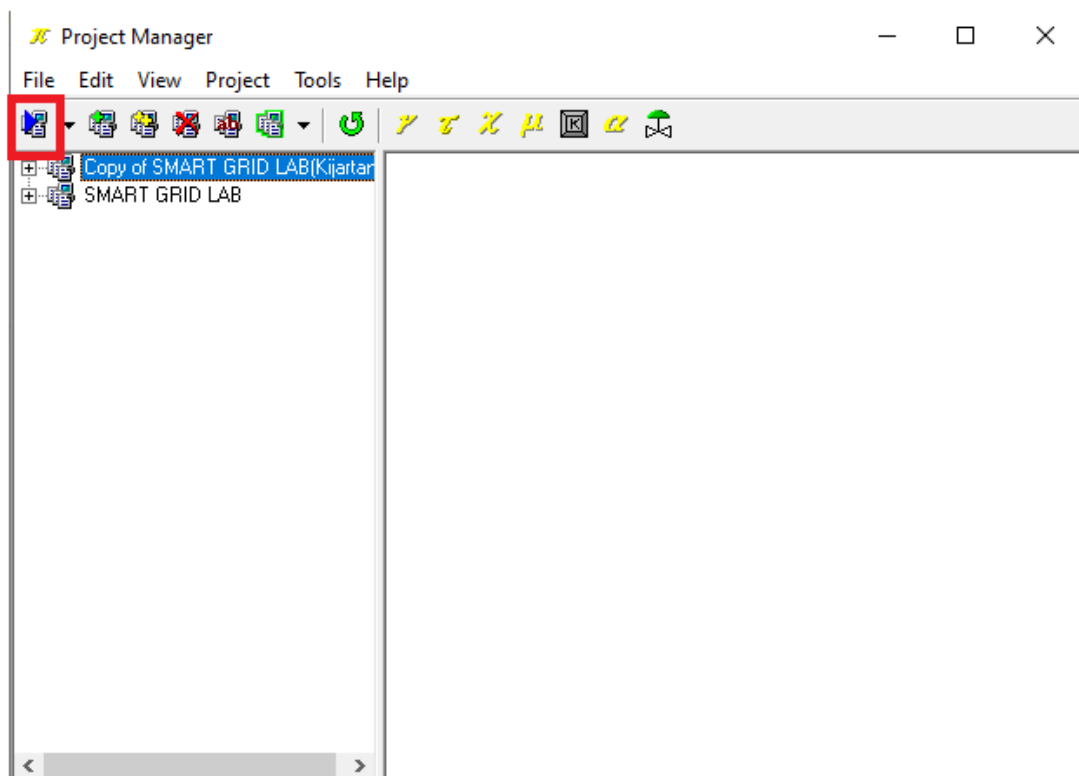
# APÊNDICE A

INTERFACE DESENVOLVIDA PARA EXERCÍCIO NA BANCADA SMART GRID

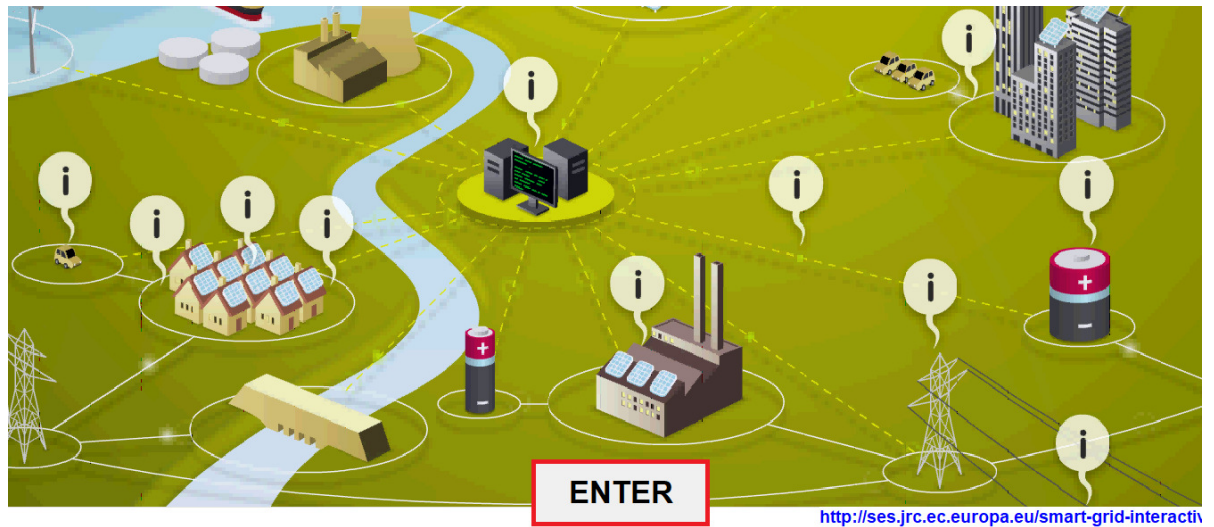
1. Abra o software “Project Manager” e selecione o projeto desejado, dando 1 clique sobre o seu nome.



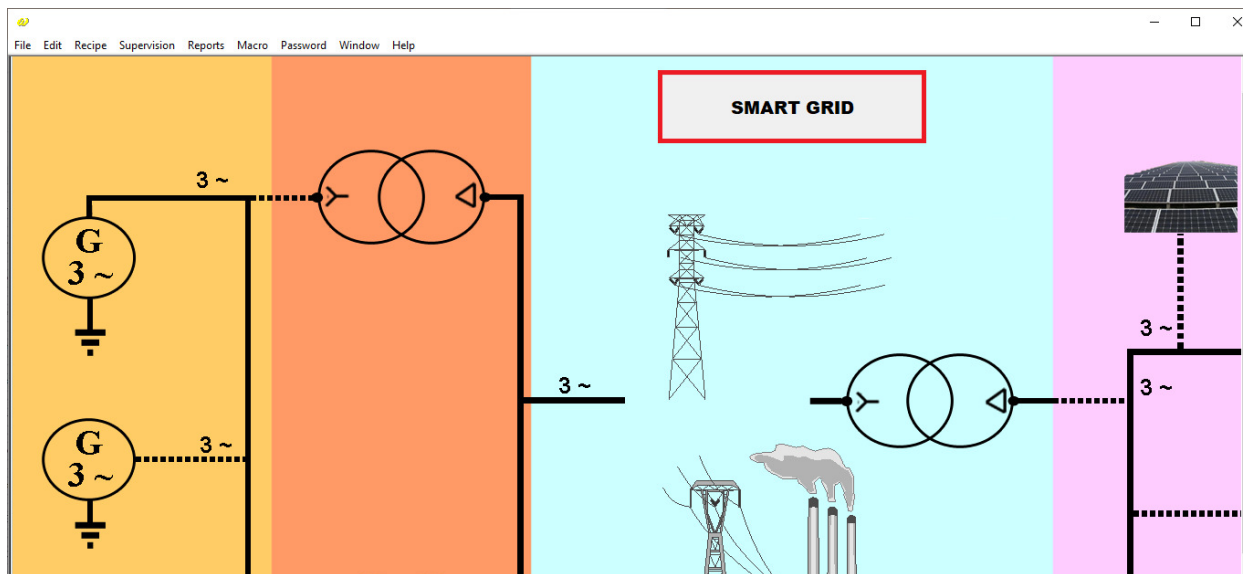
2. Em seguida clique no ícone indicado para iniciar o programa.



3. Ao iniciar o software, clique na opção “ENTER” para acessar a área dos exercícios.



4. Na sequência, clique na opção “SMART GRID”.



5. Entrando no menu dos exercícios, encontre o tópico “Transmission”, e logo em seguida abra o mesmo dando 1 clique sobre ele.

SMART GRID EXERCISE

# DE LORENZO

Engineering Training Solutions

TO KNOW BEFORE TO START		HARDWARE REQUIRED		
INTRODUCTION		HUBRS485F	DL2108T23	DL1017R
INSTALLATION		DL2108TAL_SW	DL1067S	DL1017L
MSCOM MANUAL		DL2108T25	DL10065N	DL1017C
		DL2109T29	DL2108T02	DL1080TT
		DL7901TTS	DL7901TT	DL2108T19
		DL2108T20	DL 9013G	DL 9031

**STAND ALONE**

BUS CONTROL

INSTRUMENTS

MSCOM2 Remember to close SCADA software

**ELECTRICAL POWER**

SECTION1 Hydroelectrical system

SECTION2 Wind system

SECTION3 Photovoltaic system

SECTION4 Transformer

**SECTION5 Transmission**

SECTION6 Smart grid

6. Entrando na parte focada em transmissão, de 1 clique no “EXERCISE11” para abrir o mesmo.

OVERVIEW MSCOM MANUAL HUBRS485F DL7901TT GLOBAL RESET MAIN PANEL

DL2108TAL\_SW DL7901TTS CLOSE PROGRAM

DL1080TT DL2108T02

DL2108T23 DL1017R

DL2109T29 DL1017L

DL2108T19 DL1017C

DL2108T20 DL2108T22

**STAND ALONE**

BUS CONTROL

INSTRUMENTS

MSCOM2 Remember to close SCADA software

**TRANSMISSION LINE** THEORY

EXERCISE1 No load operation EXERCISE7 Meshed network

EXERCISE2 Matched-load EXERCISE8 Transmission line fault to earth

EXERCISE3 Ohmic-inductive load

EXERCISE4 Ohmic-capacitive load

EXERCISE5 Compensation oriented to reduce the loss power

EXERCISE6 Radial network

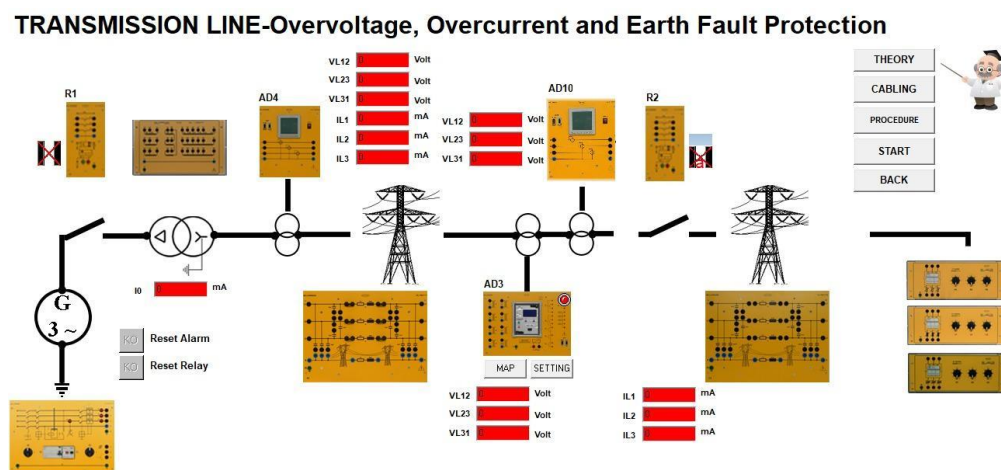
**TRANSMISSION LINE PROTECTION**

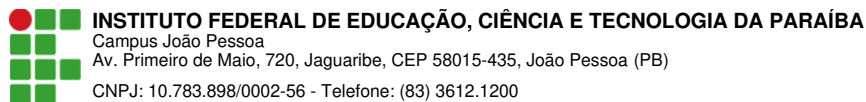
EXERCISE9 Transmission line earth fault protection

EXERCISE10 Transmission line over voltage protection

**EXERCISE11 Transmission Line - Overvoltage, Overcurrent and earth fault protection**

7. Com isso, a parte do software estará pronta para ser conectada à bancada SMART GRID.





## Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

### TCC versão final

**Assunto:** TCC versão final  
**Assinado por:** Kijartan Vasconcelos  
**Tipo do Documento:** Projeto  
**Situação:** Finalizado  
**Nível de Acesso:** Ostensivo (Público)  
**Tipo do Conferência:** Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Kijartan Alencar Barros de Vasconcelos, ALUNO (20161610005) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA**, em 18/04/2023 10:42:41.

Este documento foi armazenado no SUAP em 05/05/2023. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 823784  
Código de Autenticação: 52f8efb4da

