

# DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE INJEÇÃO DE CORRENTE CONTÍNUA PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTA À TERRA EM PLANTA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Marcelo Licorini<sup>1</sup> (CUCR)

Thiago Prado de Campos<sup>2</sup> (CUCR)

## RESUMO

*A alimentação em corrente contínua (CC) é utilizada como fonte de controle e proteção de equipamentos em usinas, subestações, plantas petrolíferas e de aplicações críticas industriais. A falta a terra no sistema CC pode, dependendo do arranjo elétrico, prejudicar a operação de uma proteção conforme projetada tornando-a sem operação para detectar falhas assim como o controle dos sistemas de energia de corrente alternada (CA), além de expor ao risco os profissionais de operação e manutenção. Na grande maioria dos sistemas de alimentação CC estes não são aterrados, o sistema é concebido assim para que na primeira falta a terra ocorra apenas um alarme para que a equipe de manutenção localize o problema, mas com uma segunda falta a terra o sistema todo de alimentação CC poderá desligar, causando colapso na planta. Este artigo tem o objetivo de discutir as metodologias existentes e a técnica proposta para detecção de faltas à terra em sistema CC com a injeção de uma corrente sem a necessidade de intervenção, com limitadores de corrente e pulsos alternados entre o polo positivo e negativo, tornando possível localizar a falta a terra em campo com um alicate amperímetro, devido a conhecer previamente o valor da falta/fuga e a característica de tempo do pulso de corrente no sistema CC. Nos testes em bancada o circuito eletrônico injetor de CC apresentou resultados satisfatórios conforme projeto e expectativas, considera-se muito promissor a aplicação deste na eficiência da localização de falta à terra.*

**Palavras-chave:** Faltas à terra. Serviço auxiliar CC. Sistema de energia elétrica. Instrumentação eletrônica.

## ABSTRACT

*Direct current (DC) power is used as a source of control and protection for equipment in power plants, substations, oil plants and for critical industrial applications. The ground fault in the DC system can, depending on the electrical arrangement, impair the operation of a protection as designed making it without operation to detect failures as well as the control of alternating current (AC) power systems, in addition to exposing to risk operation and maintenance professionals. In the vast majority of DC power systems these are not grounded, the system is designed so that in the first fault the ground only occurs an alarm for the maintenance team to locate the problem, but with a second fault the ground the entire system. DC power may turn off, causing the plant to collapse. This article aims to discuss the existing methodologies and the proposed technique for detecting ground faults in the DC system with the injection of a current without the need for intervention, with current limiters and alternating pulses between the positive and negative pole, making it is possible to locate the ground fault in the field with a clamp meter, due to knowing in advance the fault / leakage value and the time characteristic of the current pulse in the DC system. In bench tests, the electronic DC injector circuit showed*

---

<sup>1</sup> eng-marcelolicorini@camporeal.edu.br – Graduando em Engenharia Elétrica – Centro Universitário Campo Real

<sup>2</sup> prof-thiagoprado@camporeal.edu.br – Engenheiro Eletricista – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Campus Pato Branco.

*satisfactory results according to the project and expectations, its application in the efficiency of the ground fault location is considered very promising.*

**Keywords:** *Ground faults. CC auxiliary service. Electric power system. Electronic Instrumentation*

## **1 INTRODUÇÃO**

*O sistema auxiliar de corrente contínua (CC) possui um papel crítico nas unidades de geração de energia elétrica (UGE) e subestações de energia elétrica (SE), sendo a fonte de alimentação segura do sistema de controle, proteção e equipamentos. Manter o sistema CC confiável é o principal requisito para o funcionamento correto de relés, circuitos de comando, controle e proteção, sinalização, transdutores e alarmes que são responsáveis pela operação, controle e proteção das UGEs e SEs (CANÇADO, 2009).*

*Este sistema é tipicamente não aterrado ou de alta impedância a terra, os polos de tensão positivo e negativo não são aterrados em nenhum ponto da planta. O aterramento não intencional também conhecido como falta à terra de um dos polos CC resulta em um desequilíbrio de tensão de alimentação e com uma evolução pode ser tornar um curto-circuito com uma segunda falta à terra de um dos polos, levando a um colapso da alimentação CC dos equipamentos, podendo ainda, ocasionar dependendo da localização da falta, o desligamento de emergência da UGE ou SE por falta de alimentação CC. A primeira falta à terra é um sinal de alerta para as equipes de operação e manutenção, devendo ser iniciado o mais breve a investigação para localização e solução antes que ocorra a segunda falta a terra (CARVALHO, 2016).*

*Segundo Carvalho (2016), a localização de faltas à terra em sistema auxiliar CC é um desafio mesmo nos dias de hoje. Nas UGEs e SEs nem sempre é possível desligar os equipamentos a qualquer momento para a localização da falta à terra, a única informação normalmente disponível é a sinalização de alarme e identificação do polo, mas não há identificação do circuito ou região onde está ocorrendo a falta. Em uma UGE e SE de grande porte em alguns casos trata-se de quilômetros de cabos e grandes distâncias entre áreas como vertedouros, comportas, casa de força, torres e transformadores, dificultando ainda mais a localização do problema.*

*O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um circuito eletrônico que insere nos polos negativo e positivo do sistema auxiliar CC uma forma de modulação de corrente conhecida sendo possível ser identificada ao longo do circuito que está com a falta à terra, não se apresentando nos demais circuitos. Está técnica pode facilitar a localização da falta, evitando desta forma, o desligamento desnecessário das plantas para resolução do problema.*

*O circuito eletrônico proposto deve também ser simples, de fácil utilização mas confiável para ser utilizado em campo pelos profissionais para a injeção de CC e a ferramenta de localização é o alicate amperímetro de alta sensibilidade, que normalmente as empresas geralmente possuem, para medição de correntes CC/CA de baixa intensidade.*

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 SISTEMAS AUXILIARES DE CC**

*Em toda UGE ou SE de transmissão e também em plantas críticas existe um sistema auxiliar CC para alimentação dos instrumentos e equipamentos essenciais, este sistema*

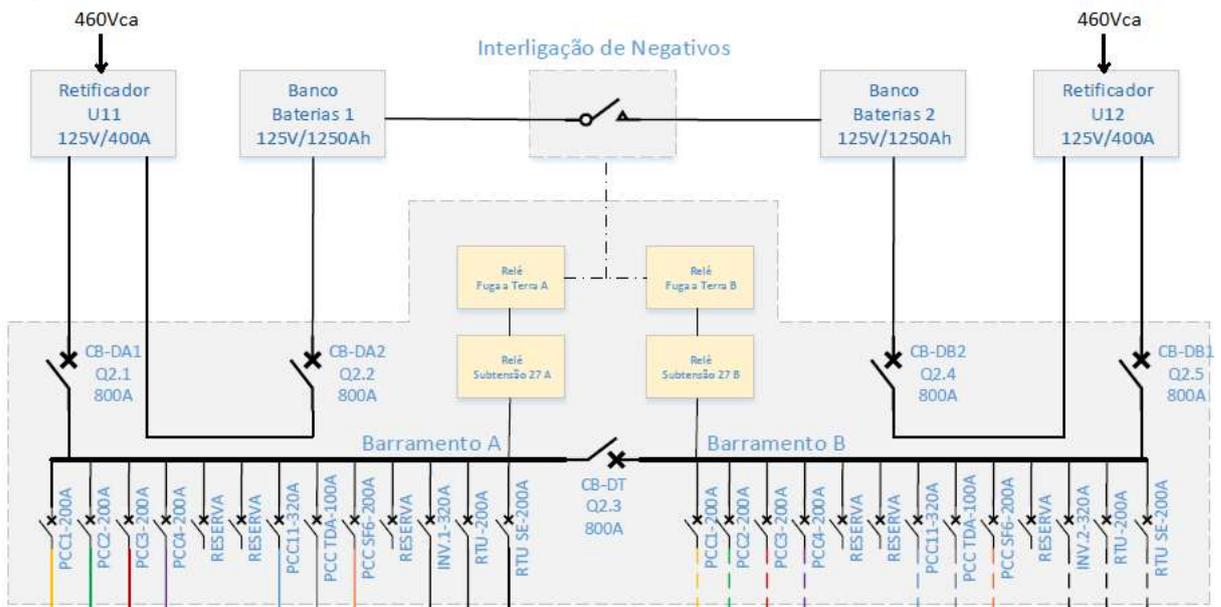
normalmente é projetado com redundâncias de fonte, painel e demais componentes para garantir a confiabilidade do fornecimento da alimentação (FILHO, 2020).

As cargas alimentadas por este sistema compreendem desde relés de controle e proteção, bobinas de disjuntores, sinalizações, sistemas supervisórios, conversores CC/CC e CC/CA e em algumas plantas como usinas hidráulicas de energia (UHE) as bombas de lubrificação de mancais dos geradores (CARVALHO, 2016).

### 2.1.1 Visão geral do sistema CC

A Figura 1 mostra o diagrama esquemático de um sistema CC típico. Este sistema normalmente é composto por retificador/carregador de baterias, banco de baterias, sistema de proteção, painéis de distribuição e as cargas. Para maior segurança do sistema existe redundância dos retificadores/carregadores, banco de baterias e em alguns casos a redundância inclui ainda o painel de distribuição, operando em paralelo, mas cada um deles é dimensionado para suportar toda a carga individualmente (FILHO, 2020).

Figura 1 – Unifilar sistema auxiliar CC



Fonte: Dados da pesquisa (2020)

A tensão do sistema auxiliar CC pode ser de 12, 24, 48, 60, 125 ou 250 V, depende do projeto do sistema, tamanho da planta e da quantidade de cargas que é necessário alimentar (CARVALHO, 2016).

### 2.1.2 Retificador/Carregador de baterias

Para o projeto do retificador/carregador deve ser considerado a capacidade de fornecimento de tensão e corrente para recarregar o banco de baterias após um evento de descarga e ao mesmo tempo alimentar todas as cargas contínuas do sistema. No projeto deste equipamento, deve ser considerado também as cargas intermitentes levando em consideração a pior situação de carga (FILHO, 2020).

O retificador/carregador de baterias deve ser dimensionado para atender toda a demanda de carga e recarregar o banco de baterias normalmente de 8 a 24 horas após um evento de descarga. Os equipamentos modernos incluem recursos de proteção e monitoramento em tempo real e sinalização na sala de operação da planta, informando e alarmando qualquer anormalidade no equipamento ou no sistema, dentre os principais recursos: alarme de subtensão, sobretensão e sobrecorrente, detecção de falta à terra e medições de tensão e corrente (THOMPSON, 2007).

Figura 2 – Retificador/carregador 125Vcc



Fonte: Provolt Tecnologia Eletrônica Ltda (2020)

### 2.1.3 Banco de baterias

O banco de baterias é formado pela associação série de vários elementos que fornecem cada um deles a tensão de aproximadamente 2,15 V. Com esta é possível obter a tensão desejada que normalmente para a aplicação de telecomunicação é de 48 V, e para sistemas auxiliares CC de UGEs e SEs tipicamente é de 125 V no Brasil, esse valor depende da carga total do sistema ou padrão que a planta adota (FILHO, 2020).

Para o estudo deste artigo foi escolhido a tensão de 125 Vcc nominal (Figura 3), pois é o nível de tensão mais utilizado nas UHEs, devido a maior compatibilidade de alimentação dos relés de controle, proteção, bobinas de relés e demais equipamentos.

Figura 3 – Banco de baterias de 60 elementos, 125Vcc/1250Ah.



Fonte: Dados da pesquisa (2020)

As baterias podem ter diferentes aspectos construtivos, os tipos mais utilizados nas UGEs são as Chumbo-ácidas (ventiladas) devido a sua robustez, mas normalmente é necessário um ambiente exclusivo com controle de temperatura e ventilação, devido a geração de gases nocivos. As baterias seladas (VRLA) são mais utilizadas em SEs, pois devido ao seu aspecto construtivo permitem ser instaladas próximo as cargas, não necessitando de sala exclusiva (FILHO, 2020).

#### 2.1.4 Painel de distribuição de CC

Na Figura 4 é mostrado um painel projetado para baixa tensão constituído de disjuntores de entrada que alimenta os barramentos, disjuntores termomagnéticos para as cargas, medição, proteção e sinalização (FILHO, 2020).

*Componentes elétricos de um painel de distribuição de CC*

- Barramento;
- Amperímetros;
- Voltímetros;
- Disjuntores termomagnéticos;
- Acessórios (shunts, bornes, chaves de seleção, botoeiras, etc)
- Relés de proteção e medição.

Figura 4 – Painel de distribuição de CC



Fonte: HZpainéis. Disponível em: <https://hzpaineis.com.br/qa-cc/>

As principais cargas que são alimentadas pelo painel de distribuição nas UGEs como nas SEs são (SUBESTAÇÕES, 2019):

- Sistema digital de automação;
- Sistemas de telecomunicações;
- Bobinas de disparo de disjuntores e seccionadoras de potência;
- Dispositivos de controle e proteção (relés, CLPs, transdutores, sinalizações);
- Iluminação de emergência da casa de força e pátio.

## 2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS CARGAS

Segundo Carvalho (2016), a classificação das cargas dos serviços auxiliares tanto CA ou CC é de acordo com seu grau de importância necessária para sua alimentação, ou seja, é considerado o tempo que cada carga consegue ficar ausente do sistema sem causar prejuízo a operação da planta. No Quadro 1 segue a classificação.

Quadro 1 – Classificação das cargas.

| <b>Tipos de cargas</b> | <b>Descrição</b>   |
|------------------------|--|
| <i>Essenciais</i>      | <i>Estas admitem interrupções de curta duração (poucos minutos), geralmente são alimentadas em CA mas de uma fonte confiável. Tipicamente são os retificadores/carregadores de baterias, registradores de perturbações, circuito da proteção contra incêndio, motores de carregamento das molas ou pressão de disjuntores e seccionadoras</i>                                  |
| <i>Não essenciais</i>  | <i>Admitem interrupções da alimentação por tempo prolongado, normalmente são alimentadas em CA, são elas: Aquecimento e iluminação de painéis, sistema de iluminação e tomadas predial, sistema de ar-condicionado, maquinário de oficinas.</i>  |
| <i>Permanentes</i>     | <i>Estas não podem sofrer interrupção da sua alimentação, são alimentadas em CC, desempenham funções importantes e que sua falha por falta de alimentação ocasionará uma interrupção parcial ou total da operação da planta. Fazem parte destas cargas os relés de automação e proteção, sinalizações e alarmes de operação, sistemas de medição, sistema de supervisorio.</i> |
| <i>Emergenciais</i>    | <i>São as relacionadas com a iluminação de emergência, para manter um mínimo de nível de iluminamento que permite a continuidade na operação, visualização de sinalizações e alarmes dos equipamentos, normalmente são cargas alimentadas em CA, porém com a sua falta automaticamente são transferidas para alimentação CC.</i>   |

Fonte: Adaptado de CARVALHO, 2016

## 2.3 TIPOS DE ATERRAMENTO

A função do aterramento é proteger as pessoas e equipamentos elétricos e garantir o bom funcionamento dos circuitos. Existe variações nos tipos de aterramento conforme a aplicação, para melhor proteção.

A norma NBR 5410 (2008) traz todos os detalhes dos tipos de sistemas de aterramento e como toda norma deve ser atendida nos projetos de instalação elétricas. O não atendimento

*a norma pode colocar em risco as pessoas e os equipamentos elétricos ou ainda proporcional mau funcionamento de circuitos elétricos.*

*Na norma está previsto três esquemas de aterramento: TN, TT e IT. Segue a simbologia.*

*1° Letra – Indica a alimentação em relação à terra:*

*T – Um ponto diretamente aterrado;*

*I – Nenhum ponto aterrado ou aterramento por impedância.*

*2° Letra – Situação das massas da instalação em relação à terra:*

*T – Massa diretamente aterrada;*

*N – Massa ligada ao ponto de alimentação aterrado normalmente o neutro;*

*I – Massa isolada, não aterrada.*

*Outras Letras: Referente ao condutor neutro e de proteção:*

*S – Condutores distintos para a função de neutro (N) e proteção (PE);*

*C – Mesmo condutor para a função de neutro e proteção (PEN).*

### *2.3.1 Esquema TN*

*Este esquema possui um ponto de alimentação diretamente aterrado, a massa é ligada a esse ponto pelo condutor de proteção, existem três variantes de acordo com a disposição do condutor neutro e de proteção.*

*TN-S: Os condutores de neutro (N) e de proteção (PE) separados;*

*TN-C: O mesmo condutor faz a função de neutro e de proteção (PEN);*

*TN-C-S: Na mesma instalação utiliza-se os esquemas TN-S e TN-C.*

### *2.3.2 Esquema TT*

*Nesse esquema normalmente o secundário de alimentação do transformador é diretamente aterrado com eletrodo independente das massas das cargas, as cargas protegidas devem ser ligadas a um ponto único, para evitar o surgimento de tensões de passo.*

*É recomendado o uso deste esquema onde a fonte de alimentação está distante da carga.*

### *2.3.3 Esquema IT*

*Para tensões CA é um sistema que foi abandonado, por problemas de tensões transitórias que podem ocorrer em grandes instalações, mas em sistema CC é o esquema mais utilizado, pois possibilita que na primeira falta à terra seja gerado apenas um alarme, permitindo que seja iniciado a localização da falta à terra e corrigido e somente na segunda falta à terra o sistema é desligado conforme o item 5.1.2.2.4.4-b da norma (NBR 5410, 2008).*

## 2.4 FALTAS À TERRA EM SISTEMA CC

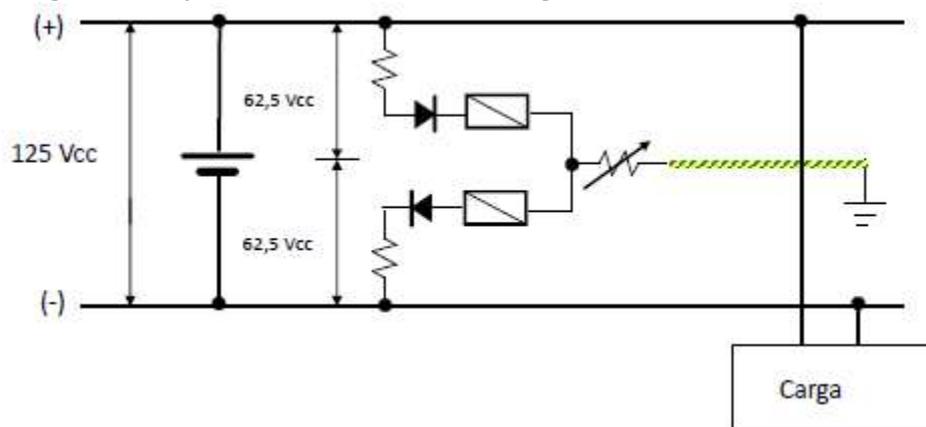
Nos circuitos CC, um desequilíbrio da resistência do polo positivo e ou negativo para a terra, provocado por cargas não intencionais adicionadas ao circuito entre um dos polos com a terra é caracterizado de falta à terra. A origem destas cargas podem ser diversas, de forma acidental com uma conexão errada de um cabo ou uma degradação natural de equipamentos elétricos ou qualquer outro componente do circuito (LEITÃO, 2010).

Tipicamente nas UGEs e SEs é utilizado o sistema IT isolado entre os polos positivo e negativo com a terra, esse método apresenta vantagens comparado a sistemas com baixa impedância ou de alta impedância a terra (CARVALHO, 2016).

O primeiro surgimento de falta à terra não representa um problema imediato para o sistema CC, mas a localização e correção do problema deve ser iniciado imediatamente antes que ocorra a segunda falta à terra que poderá colocar o sistema CC em colapso (ARAÚJO, 2004).

Um relé típico de indicação de falta à terra pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 – Diagrama simplificado de relé de sinalização de falta à terra



Fonte: (RDI BENDER, 2015)

Este relé em condições normais, sem falta à terra as bobinas não ficam excitadas, sendo assim não há sinalização, mas quando presente uma falta à terra, ocorre o aumento da corrente circulando pela bobina, ao atingir o valor de excitação sinaliza a falta à terra (RDI BENDER, 2015).

Na norma NBR 5410 (2008) não é encontrado o valor mínimo de resistência de isolamento entre o polo positivo ou negativo à terra, este valor de referência é encontrado na norma DIN 57510 (VDE 0510):1977-01 – Specifications for electric storage batteries and battery plants (German) (RDI BENDER, 2015). No Quadro 2 pode ser observado os valores de resistência de isolamento conforme a tensão nominal do sistema CC.

Quadro 2 – Referência de isolamento recomendado pela norma.

| Norma | Tensão Nominal | Valor de isolamento recomendado |
|-------|----------------|---------------------------------|
|-------|----------------|---------------------------------|

|                                     |        | $\Omega / V$ | $k\Omega$ |
|-------------------------------------|--------|--------------|-----------|
| <b>DIN 57510 (VDE 0510):1977-01</b> | DC 24  | 100          | 3         |
|                                     | DC 48  | 100          | 5         |
|                                     | DC 72  | 100          | 8         |
|                                     | DC 96  | 100          | 10        |
|                                     | DC 110 | 100          | 12        |

Fonte: Adaptado de RDI BENDER, 2015

A norma NBR 5410 (2008) traz no item 5.1.2.2.4.4-c uma fórmula para definir se é imperativo o seccionamento automático na primeira falta à terra ou não conforme a Equação (1).

$$R_A \cdot I_d \leq U_L \quad (1)$$

Onde:

$R_A$  : Resistência do eletrodo de aterramento em ohms;

$I_d$  : Corrente de falta em amperes;

$U_L$  : Tensão de contato limite.

No anexo C da referida norma encontra-se os valores de tensão de contato limite conforme as influências externas que podem caracterizar em situações 1, 2 ou 3, que conforme a tabela C.2 da norma no caso das UGEs e SEs se enquadram em  $U_L = 120V$ .

#### 2.4.1 Tipos de falta à terra

Segundo Carvalho (2016), conhecer os diferentes tipos de falta à terra é importante para compreender melhor o cenário e escolha do melhor método para localização da falta à terra. As faltas se dividem em quatro tipos, conforme Quadro 3.

Quadro 3 – Tipos de falta à terra

| Tipos de falta | Descrição  |
|----------------|--|
| Intermitente   | Com duração relativamente longa (> 5 min.), podem ser em períodos fixos ou aleatórios.   |
| Contínua       | Neste tipo a falta não desaparece, permanece no mesmo nível ou altera ao longo do tempo, este tipo é a mais fácil de ser localizado. |
| Pulsos         | São faltas em forma de pulsos de pequena duração, tempo entre 0,5 a 5 minutos, com intervalos fixos ou aleatórios.                   |
| Spikes         | São faltas muito curtas, de duração entre 0,01 até 5 minutos, com intervalos fixos ou aleatórios.                                    |

Fonte: (CARVALHO, 2016)

#### 2.5 MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTA À TERRA

Conforme descrito por Marrero (2000), existe vários métodos para localização da falta a terra em um sistema CC, conforme Quadro 4.

Quadro 4 – Métodos de localização de falta à terra

| <b>Método</b>                    | <b>Descrição</b>   |
|----------------------------------|--|
| <i>Medição de tensão</i>         | <i>Esse método consistem na medição de tensão dos polos em relação ao terra, na presença da falta a terra surge um desequilíbrio de tensão que é mostrado nos voltímetros, este método não informa a localização da falta a terra, é necessário desprender de muito tempo para localização do ponto da falta a terra é mais utilizado como um indicador que existe uma falta a terra no sistema CC.</i>  |
| <i>Desligamento de circuitos</i> | <i>Consiste em desligar de forma ordenada e monitorada circuitos que são possíveis serem desligados que não afetam a operação da UGE ou SE, porém nem todos os circuitos poderão ser desligados sem causar uma falha na operação da planta, os transientes gerados pela abertura e fechamento de disjuntores para tentar localizar a falta a terra pode gerar transientes causando falhas em equipamentos de automação e proteção da planta. Este método é simples, porém muitas vezes não é eficaz na localização da falta a terra devido estar em algum circuito que não pode ser desligado sem uma programação prévia com o operador nacional do sistema (ONS).</i> |
| <i>Injeção de sinal de CA</i>    | <i>A injeção de um sinal CA entre o polo que apresenta a falta e o terra faz com que todo o caminho da falta esteja com este sinal CA presente, sendo detectável por meio de amperímetros com o auxílio de osciloscópio para leitura do sinal. Em sistemas CC onde apresenta alta capacitância parasita e interferências eletromagnéticas este método não é eficiente, podendo gerar falsas leituras. Se aplicado um sinal CA de grande amplitude pode causar interferência na operação de relés alimentados pelo sistema CC.</i>  |
| <i>Injeção de sinal CC</i>       | <i>Similar a injeção de CA, este método injeta uma corrente CC oriunda de fonte externa ou da mesma fonte, de forma a circular entre o polo e o terra onde existe a falta à terra, podendo ser reconhecido por meio de medições de corrente pelos circuitos do sistema. Tanto para este método como para o de injeção de CA é necessário alto conhecimento dos circuitos e do serviço, devido ao seu risco de interferência na operação dos equipamentos alimentados.</i>  |
| <i>Análise de eventos</i>        | <i>Nas plantas UGEs e SEs quando existe um sistema registrador de eventos (RDP) com base de tempo de referência única é possível por meio da análise dos dados comparando o momento da sinalização da falta à terra com os eventos no mesmo tempo para identificar a localização da falta a terra, este método é eficaz quando a planta tem registro de forma detalhada de todos os circuitos alimentados.</i>   |

Fonte: (MARRERO, 2000)

Ainda segundo Marrero (2000), deve se ter muito cuidado com a injeção de sinal tanto CA ou CC, pois estes sinais em grande amplitude podem danificar, sensibilizar ou operar relés de forma inadvertida, causando falha na operação de geradores ou linhas de transmissão das plantas.

### 3 METODOLOGIA

A pesquisa é de natureza quantitativa e caráter original, as informações coletadas de experiências reproduzidas em laboratório do fenômeno “falta à terra” ajudam a entender e propiciam o desenvolvimento da ferramenta para facilitar a manutenção na UGE do sistema de alimentação de corrente contínua.

Os dados apresentados no Quadro 6, de corrente e resistência elétrica comparado com os cálculos e as experiências ajudam a explicar a falta à terra, fenômeno explorado neste trabalho que pode ocorrer de forma indevida nas instalações que utilizam tensão CC para alimentação de instrumentos e equipamentos cruciais para operação da planta.

No presente trabalho, será apresentado uma metodologia para implementação de um circuito injetor de corrente CC, utilizado para localização de falta a terra em plantas de geração de energia elétrica, além de métodos de medição de corrente para detecção da falta.

O método consiste na implementação de um protótipo, de um circuito eletrônico cuja a função é gerar e injetar no circuito um determinado sinal elétrico, ao mesmo tempo em que se realizam medições no circuito CC por meio de instrumento de medição.

Para a realização dos experimentos utilizou-se de instrumentos como: fonte de alimentação 125Vcc, alicate amperímetro e multímetro para coleta de medições de tensão corrente e resistência. Também foram utilizados componentes eletrônicos, como resistores, capacitores, relés e componentes integrados.

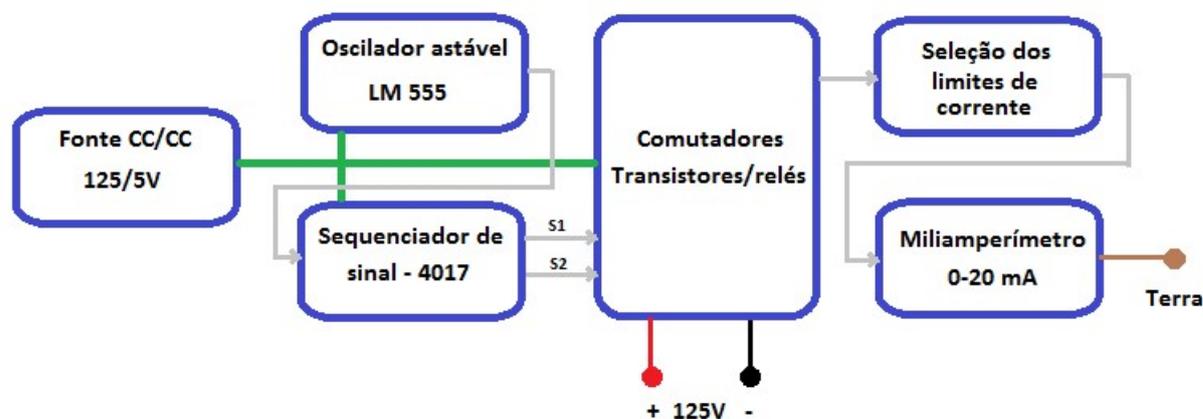
## 4 DESENVOLVIMENTO

### 4.1 INJETOR DE CORRENTE CC

O circuito desenvolvido para injeção de corrente CC é apresentado em blocos na Figura 6, algumas características importantes em seu desenvolvimento foram levadas em consideração:

- Injeção de corrente CC de forma alternada criando uma assinatura para o sinal;
- Chave de seleção de limites de corrente da injeção CC;
- Desenvolvido com componentes discretos, de fácil aquisição e manutenção.
- Medição do sinal injetado deverá ser realizado com alicate amperímetro CC de alta sensibilidade, ferramenta comum a manutenção dos equipamentos eletroeletrônicos.

Figura 6 – Diagrama em blocos do injetor de CC



Fonte: Dados da pesquisa (2020)

*Descrição do funcionamento dos blocos do injetor de CC.*

**- Fonte CC/CC:** *Módulo power supply que converte a tensão 125Vcc em 5Vcc para os componentes eletrônicos, apresenta característica importante de suportar tensão de entrada CA ou CC entre 90 a 260V. modelo utilizado Tenstar TSP-05, 5Vdc/3W conforme Figura 7.*

*Figura 7 – Power supply Tenstar TSP-05*



Fonte: <http://www.openelectronics.eu/TSP-05-AC-DC-220V-to-5V-mini-power-supply-module>

**- Oscilador Astável:** *O circuito oscilador pode ser observado na Figura 8, tem como componente principal o circuito integrado 555 na configuração astável, por meio da Equação (2) e (3) foi calculado o tempo de nível alto (T1) e baixo (T2) em aproximadamente 6 segundos (CIPELLI, 2007).*

$$T1 = 0,693 \cdot C1 \cdot (R1 + R2) \quad (2)$$

$$T2 = 0,693 \cdot C1 \cdot R2 \quad (3)$$

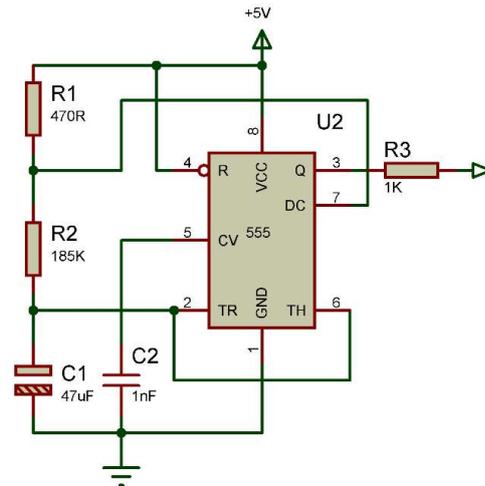
*Aplicando as equações (2) e (3) para obter o tempo aproximados de 6 segundos.*

$$T1 = 0,693 \cdot 47 \times 10^{-6} \cdot (470 + 185.000) \Rightarrow T1 = 6,04 \text{ Segundos (nível alto)} \quad (4)$$

$$T2 = 0,693 \cdot 47 \times 10^{-6} \cdot 185.000 \Rightarrow T2 = 6,02 \text{ Segundos (nível baixo)} \quad (5)$$

*Na Figura 8, pode-se observar o circuito onde se aplica as equações acima descritas.*

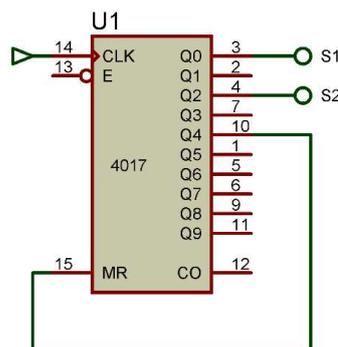
*Figura 8 – Circuito oscilador astável.*



Fonte: Dados da pesquisa (2020)

- **Sequenciador de sinal:** O circuito integrado CMOS 4017 (contador/decodificador) é componente principal deste bloco (BRAGA, 2017), sendo responsável em realizar uma sequência de nível baixo/alto para a etapa do comutador por meio das saídas 0 e 2, como neste projeto há necessidade de um tempo entre os sinais alto do comutador, as saídas 1 e 3 não são ligadas a nenhum componente, apenas participam do sequenciamento. O sinal de “clock” é oriundo da etapa anterior, o oscilador. Esta etapa do sequenciador pode ser observada na Figura 9, as saídas utilizadas para a próxima etapa foram nomeadas de S1 e S2.

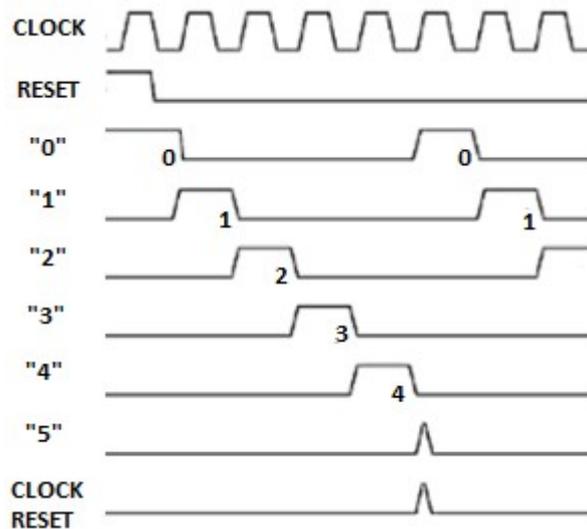
Figura 9 – Circuito sequenciador



Fonte: Dados da pesquisa (2020)

O sequenciador tem seu reset no momento em que a saída Q4 é levada ao nível alto pelo “clock”, reiniciando a sequência. O sequenciamento pode ser visto na Figura 10.

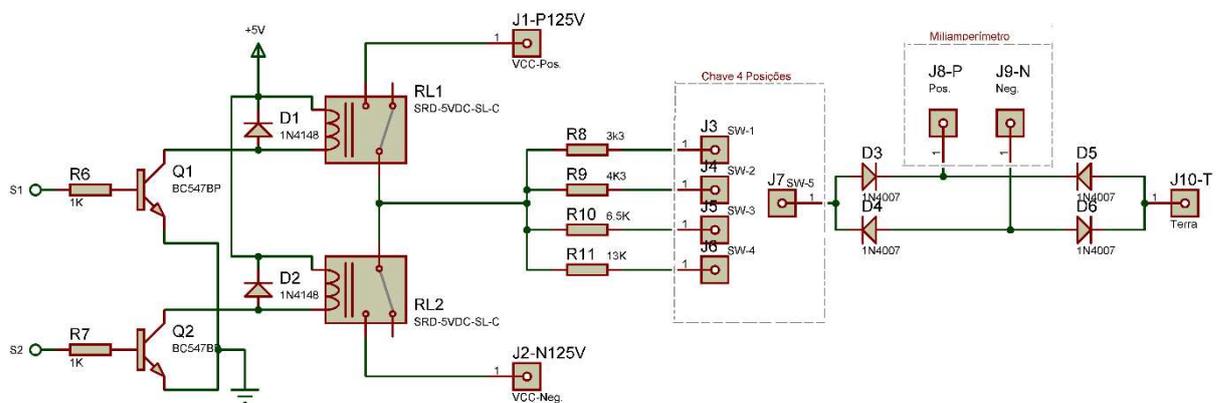
Figura 10 – Sequenciamento das saídas do CMOS 4017.



Fonte: Adaptado de BRAGA 2017

- **Comutadores, limitadores e miliamperímetro:** Nesta etapa é realizada a injeção de corrente contínua por meio de transistores que recebem o sinal do sequenciador e controlam os relés, este circuito completo está demonstrado na Figura 11.

Figura 11 – Circuito comutador, chave seletora e miliamperímetro.



Fonte: Dados da pesquisa (2020)

Nesta etapa os transistores recebem o nível alto do sequenciador, como trabalham na configuração de saturado, se comporta como uma chave, controlando o relé, ligando e desligando conforme a seqüência determinada pela etapa do CMOS 4017.

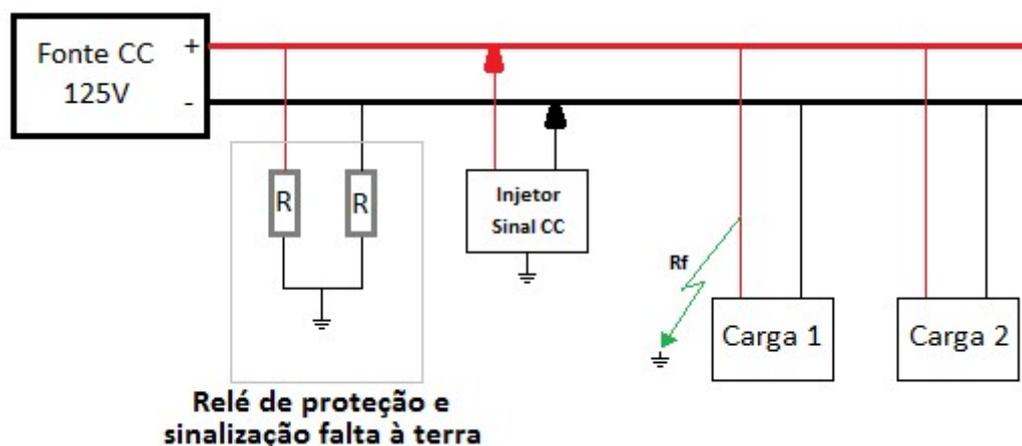
Os relés são usados para proporcionar um isolamento entre o circuito eletrônico e a alimentação 125V, pois os circuitos integrados trabalham com 5V.

A chave seletora é de 4 posições, sendo os terminais destas do J3 ao J7, este último é o terminal comum da chave. Esta chave tem a função de selecionar o resistor que entrará em série com a falta a terra conforme mencionado no item 2.4 podendo assumir valores entre 0Ω (curto-circuito) ou centenas de kΩ, existe a necessidade de ter escalas para obter o ajuste adequado para não ocorrer interferência nos relés e equipamentos alimentados pelo 125Vcc.

## 4.2 MÉTODO PROPOSTO

O método proposto para o protótipo de localização de falta à terra é a injeção de corrente contínua com o circuito descrito no item 3.1, este sinal injetado tem uma características, o sinal de corrente alterna entre os polos a cada 6 segundos, que ao ser detectada em qualquer ponto do circuito CC seja identificado sem sombra de dúvida que por esse circuito medido está passando a falta à terra. A Figura 12 apresenta um diagrama funcional simplificado típico do sistema CC com o injetor de sinal CC conectado entre os polos positivo e negativo e o terra, assim como a indicação de falta à terra no polo positivo da carga 1.

Figura 12 – diagrama funcional simplificado do sistema CC.



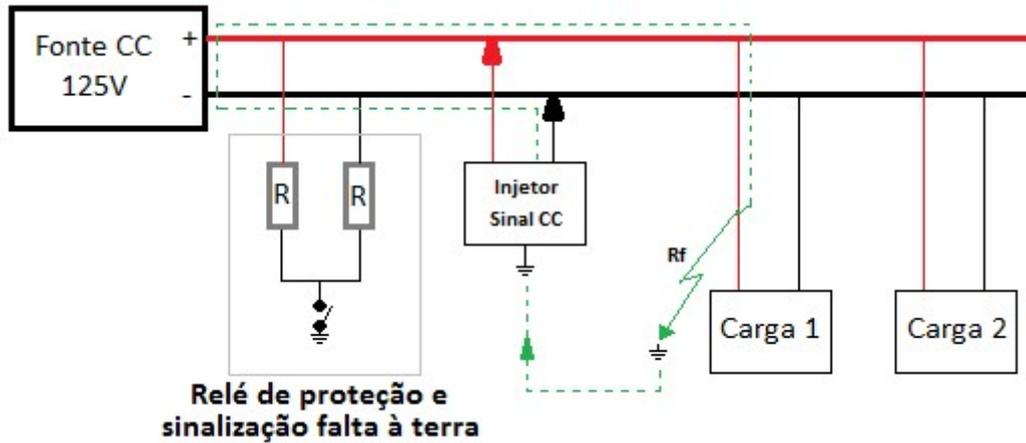
Fonte: Dados da pesquisa (2020)

O relé de proteção, que tem a função de monitoramento da resistência de isolamento dos polos contra o terra devido a sua característica com alta resistência faz surgir uma tensão equilibrada entre polo positivo e o terra e o polo negativa e o terra de 62,5 Vcc, ou seja metade do valor da fonte de alimentação, isso em condições normais de operação, mas com a existência de uma falta à terra no sistema a tensão entre os polos e o terra desequilibra dependendo da impedância ( $R_f$ ) de falta a terra (ARAÚJO, 2004).

A tensão desequilibrada em relação à terra estará presente em todo o sistema CC, tanto nos circuitos sem problema como o que apresenta a falta à terra, devido a esta característica não é possível apenas com a medição de tensão encontrar o circuito ou ponto em que está ocorrendo a falta à terra.

O sinal CC que será injetado no sistema de alimentação tem característica definida e conhecida pelo profissional que irá utilizar o equipamento, a corrente injetada circulará por toda a extensão do caminho da falta a terra, conforme Figura 13.

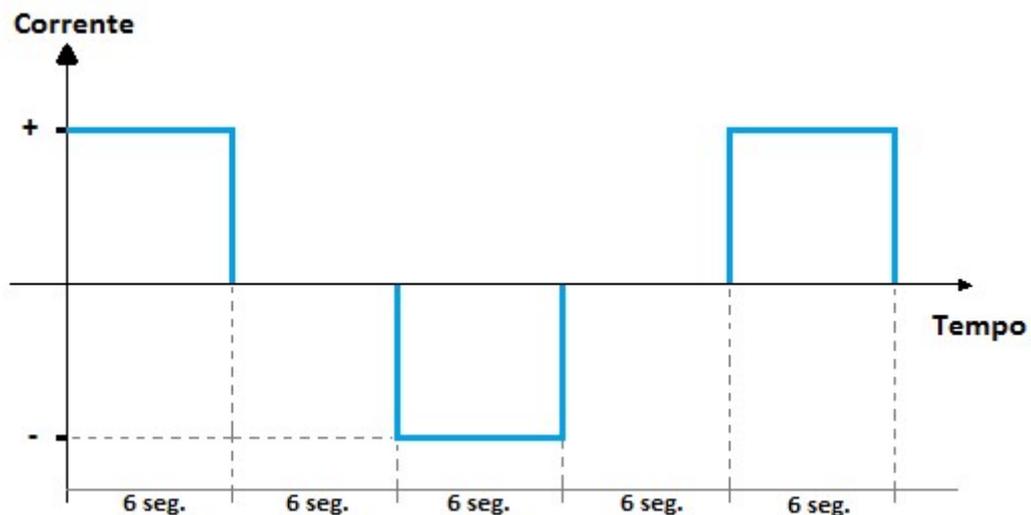
Figura 13 – Diagrama com presença de falta à terra positiva (linha tracejada).



Fonte: Dados da pesquisa (2020)

O sinal injetado ao longo do caminho da falta a terra tem o período definido de aproximadamente 6 segundos com a forma de onda da Figura 14.

Figura 14 – Sinal de corrente CC injetado no circuito.



Fonte: Dados da pesquisa (2020)

#### 4.2.1 Limites de Corrente

Um cuidado importante é não injetar uma corrente suficiente para energizar relé ou equipamentos alimentados, pois dependendo do ponto de falta a terra, a corrente em excesso pode causar operações indevidas, que são tão graves como a própria falta a terra (MARRERO, 2000).

Para o injetores de sinal foi calculado resistores para limitar a corrente levando em consideração o pior caso, que é quando a falta à terra tem impedância ( $R_f$ ) zero, ou seja, há um curto circuito de um dos polos com o terra.

O cálculo é realizado por meio da equação lei de ohm (MARKUS, 2011) conforme Equação (6).

$$V = R \cdot I \quad (6)$$

Onde:

$V$  : Tensão, diferença de potencial elétrico;

$R$  : Resistência elétrica, medida em ohms;

$I$  : Intensidade da corrente elétrica, medida em ampère.

No Quadro 5, temos os valores limitadores de corrente do injetor de CC, o sistema normalmente tem a tensão nominal 125Vcc, mas na saída da fonte esta tensão é um pouco maior, aproximadamente 130,2 Vcc, no cálculo é levado em consideração o maior valor.

Quadro 5 – Valores do limite de corrente.

| Posição da chave | Tensão máxima | Resistência limitadora | Corrente máxima |
|------------------|---------------|------------------------|-----------------|
| 1                | 130,2 V       | 13.000 $\Omega$        | $\cong 10$ mA   |
| 2                |               | 6.500 $\Omega$         | $\cong 20$ mA   |
| 3                |               | 4.300 $\Omega$         | $\cong 30$ mA   |
| 4                |               | 3.300 $\Omega$         | $\cong 40$ mA   |

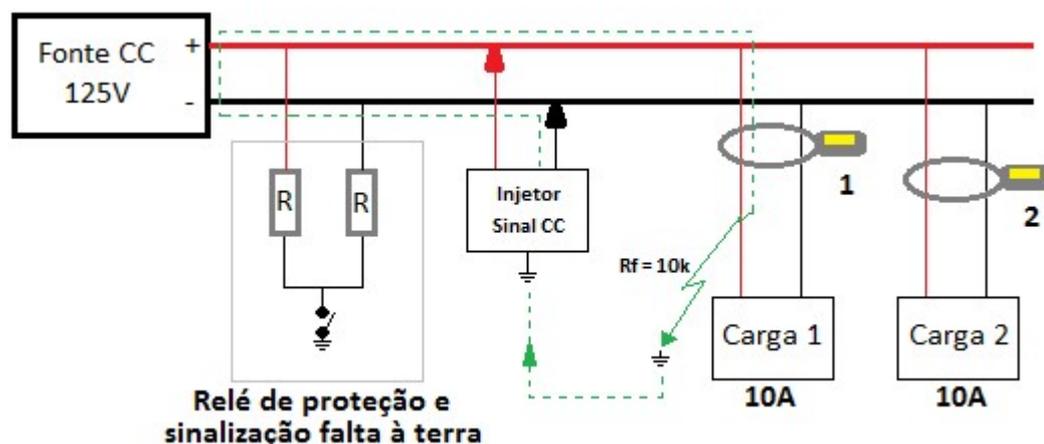
Fonte: Dados da pesquisa (2020)

No injetor de sinal está previsto um miliamperímetro com fundo de escala de 20 mA, para melhor precisão da corrente injetada, assim como um instrumento no apoio para seleção mais adequada do limite de corrente a ser injetado.

#### 4.2.2 Localização da falta à terra

Para a localização da falta terra ao longo de todo o circuito de alimentação CC é utilizado um instrumento, o alicate amperímetro de alta sensibilidade de corrente, na Figura 15 é mostrado a medição no circuito com falta à terra e no circuito sem falta.

Figura 15 – Diagrama simplificado de localização da falta a terra.



Fonte: Dados da pesquisa (2020)

No alicate amperímetro 2 o valor medido será 0 A, pois a corrente que entra na carga é a mesma que sai.

No alicate amperímetro 1 o valor medido é diferente de 0 A, pois temos uma falta a terra no lado da carga 1, com a Equação (4), calculamos o valor da corrente neste circuito da falta a terra para as 4 posições da chave limitadora de corrente, conforme Quadro 4.

Quadro 6 – Calculo corrente de falta com o injetor com base na Equação 4.

| Posição chave | Tensão máxima | Resistência limitadora ( $\Omega$ ) | Rf ( $\Omega$ ) | Corrente |
|---------------|---------------|-------------------------------------|-----------------|----------|
| 1             | 130,20 V      | 13.000                              | 10.000          | 5,66 mA  |
| 2             |               | 6.500                               |                 | 7,89 mA  |
| 3             |               | 4.300                               |                 | 9,10 mA  |
| 4             |               | 3.300                               |                 | 9,78 mA  |

Fonte: Dados da pesquisa (2020)

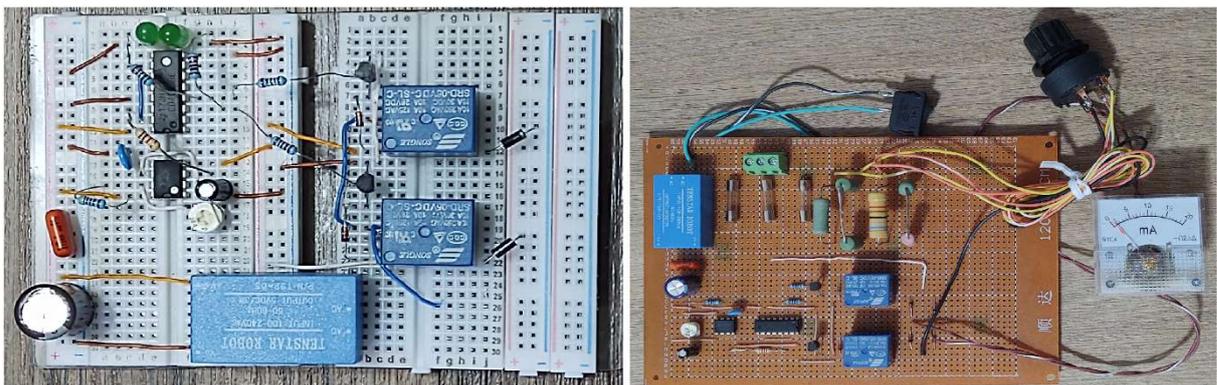
No display do alicate amperímetro 1 será observado os valores de corrente conforme a posição da chave limitadora, mas esse valor somente será mostrado quando o injetor estiver injetando no polo negativo, conforme mostrado na Figura 15, pois é nessa situação que teremos o circuito de falta a terra fechado, circulando corrente, com a característica do tempo de aplicação da corrente de 6 segundos, o profissional de sabendo dessa informação observando o alicate amperímetro por um período observará a variação da corrente entre o calculado e 0 A.

## 5 DISCUSSÕES E RESULTADOS

### 5.1 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

A Figura 16 no lado esquerdo mostra a primeira montagem do protótipo do injetor de CC em protoboard de contatos e a do lado direito a montagem em PCB do tipo universal com os componentes soldados que proporciona maior confiabilidade e menor falha por mal contato durante os testes no laboratório.

Figura 16 – Protótipo do injetor de CC



Fonte: Dados da pesquisa (2020)

Na Figura 16 do lado direito é possível observar a presença no protótipo do miliamperímetro analógico com fundo de escala de 20 mA, como o valor de injeção de corrente contínua nos circuitos não deve exceder os 10 mA, este instrumento é adequado para a medição de corrente.

Na mesma imagem também é visível a chave de 5 posições, sendo que uma das posições não seleciona nenhum dos contatos, mantém o circuito aberto, e as demais posições selecionam os resistores limitadores conforme mostrado na Figura 11 e explicações no item 3.2.1.

Neste protótipo também foi acrescentado como medida de segurança contra eventuais curto-circuitos fusíveis de vidro de 1A, no polo positivo, negativo e terra.

Os resistores limitadores, devido aos valores calculados alguns não serem valores comerciais, foi utilizado resistores de valores próximos ou associação de resistores para o protótipo, conforme Quadro 7.

Quadro 7 – Resistores limitadores utilizado

| Posição da chave | Resistores Calculados | Valores reais dos resistores utilizados ( $\Omega$ ) | Resistência total ( $\Omega$ ) |
|------------------|-----------------------|--|--------------------------------|
| 0                | Circuito aberto       |  | $\infty$                       |
| 1                | 13.000                | 11.880 + 1040  | 12.920                         |
| 2                | 6.500                 | 6.810  | 6.810                          |
| 3                | 4.300                 | 3.280 + 1.050  | 4.330                          |
| 4                | 3.300                 | 3.340  | 3.340                          |

Fonte: Dados da pesquisa (2020)

## 5.2 TESTES E ENSAIOS EM BANCADA

Realizado testes básicos no protótipo para comparar os valores de corrente indicados no miliamperímetro analógico com a medição por um multímetro de referência (Fluke 87 III) e também se são condizentes com os cálculos do Quadro 7, No Quadro 8 foi realizado o ensaio com o valor do  $R_f$  de  $0\Omega$ , ou seja, curto circuito entre um dos polos com o terra.

Quadro 8 – Comparativo  $R_f = 0\Omega$  com os valores calculados.

| Posição da chave | Corrente calculada | Multímetro Fluke | Miliamperímetro analógico |
|------------------|--------------------|------------------|---------------------------|
| 1                | 9,67 mA            | 9,88 mA          | 10 mA                     |
| 2                | 18,35 mA           | 18,73 mA         | 19 mA                     |
| 3                | 28,86 mA           | 29,24 mA         | Fundo de escala           |
| 4                | 37,42 mA           | 38,03 mA         | Fundo de escala           |

Fonte: Dados da pesquisa (2020)

*Para o ensaio acima foi utilizado o multímetro para o comparativo ao invés de alicate amperímetro devido a faixa de valores serem mais adequadas e de maior precisão.*

*O miliamperímetro analógico do protótipo não consegue definir o valor da casa decimal, porém o seu objetivo é apenas mostrar um valor aproximado da corrente de falta injetada mais a impedância de falta ( $R_f$ ), para que seja conhecido seu valor como referência na busca pela localização da falta à terra com o alicate amperímetro, que será o instrumento utilizado para identificar o circuito que faz parte do caminho da falta à terra pela planta.*

*Com o valor da corrente de falta à terra conhecida (miliamperímetro) junto com os pulsos de aproximadamente 6 segundos, isso traz uma característica reconhecível para o profissional que terá que localizar a origem do defeito da falta à terra na planta.*

## **6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS**

### **6.1 CONCLUSÃO**

*De acordo com os testes realizado em bancada, os resultados se apresentaram favoráveis tendo em vista as características previstas no protótipo, tornando possível a detecção de falta à terra em sistemas de alimentação de corrente contínua de UGEs e em outras plantas que tem similaridade do sistema de alimentação apresentando.*

*Desde os primeiros estudos sobre o tema havia a previsão de realizar testes em campo do protótipo, em uma planta de geração de energia elétrica, porém com o surgimento da pandemia COVID-19, diversas medidas de segurança foram implementadas na planta, como revezamento de equipes, execução apenas de atividades importantes (preventivas e corretivas) e os estudos estão aguardando a normalização das rotinas de manutenção para poderem ser retomadas, com estes imprevisto não foi possível a realização dos testes em campo, apenas dos testes de bancada.*

### **6.2 TRABALHOS FUTUROS**

*Para trabalhos futuros sugere-se efetuar testes em campo na planta UHE para possíveis necessidades de ajuste nos valores dos resistores limitadores de corrente, para refinar as faixas dos limites de corrente.*

*O desenvolvimento de um protótipo para ser instalado em pontos estratégicos do sistema CC da planta, que tenha capacidade de identificar a corrente de falta injetada no sistema irá automatizar o processo de localização de falta à terra na planta, proporcionando maior agilidade para a manutenção do sistema.*

## **REFERÊNCIAS**

**ARAÚJO, Fábio Ornellas de. Detecção de Falta à Terra no Serviço Auxiliar em Corrente Contínua das Subestações de Energia Elétrica. 2004. 83 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.**

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410:2004. Instalações Elétricas de Baixa Tensão. Rio de Janeiro, versão corrigida 2008.**

BRAGA, Newton C. **O Circuito Integrado 4017**. 1. ed. Editora Newton C. Braga. São Paulo, 2017.

CANÇADO, A. B. et al. **Confiabilidade e Economia em Sistemas de Serviços Auxiliares Técnicos de PCHs**. 2009. Disponível em: <https://www.osestoreletrico.com.br/confiabilidade-e-economia-em-sistemas-de-servicos-auxiliares-tecnicos-de-pchs/>. Acesso em: 04 set. 2020.

CARVALHO, Daniel Pereira de. **Projeto e implementação de um sistema de detecção de faltas à terra em serviços auxiliares em corrente contínua**. 2016. 91 f. Tese (pós-graduação) – UFU. Uberlândia, 2016.

CIPELLI, Antonio Marco Vicari, SANDRINI, João, MARKUS, Otávio. **Teoria e Desenvolvimento de Projetos de Circuitos Eletrônicos**. 23. ed. Editora Érica. São Paulo, 2007.

FILHO, João Mamede. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. 2. ed. Rio de Janeiro. LTC, 2020.

LEITÃO, Raimundo R. B. **Fuga à Terra DC: uma abordagem do uso de rede de sensores sem fio no sensoriamento de falhas**. 2010. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Ceará. Fortaleza, 2010.

MARKUS, Otávio. **Circuitos elétricos: corrente contínua e corrente alternada: teoria e exercícios**. 9. Ed. São Paulo. Érica, 2011.

MARRERO, José A. **Understand ground fault detection and isolation in DC systems**. 2000 Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, WA, 2000, pp. 1707-1711 vol. 3, doi: 10.1109/PESS.2000.868787.

RDI BENDER. **Inteligência em segurança elétrica**. 2015. Disponível em: <https://www.institutodeengenharia.org.br/site/wp-content/uploads/2017/10/argnot10127.pdf>. Acesso em: 20 set. 2020.

SILVA, Sérgio F. de P. **Esquemas de Aterramento**. Disponível em: [http://www.joinville.ifsc.edu.br/~luis.nodari/Aterramento%20el%C3%A9trico/Esquemas de Aterramento.pdf](http://www.joinville.ifsc.edu.br/~luis.nodari/Aterramento%20el%C3%A9trico/Esquemas%20de%20Aterramento.pdf). Acesso em 19 set. 2020.

SUBESTAÇÕES de energia: definições, conceitos e aplicações. 1. ed. Aprender Elétrica. 2019. 154p. Disponível em: <https://aprenderelétrica.com.br/>. Acesso em: 12 set. 2020.

THOMPSON, Michael J.; WILSON, David. **Auxiliary DC Control Power System Design for Substations**. In: Protective Relay Engineers, 2007. 60th Annual Conference for Protective Relay Engineers, Atlanta, 2007.

**TERMO DE APROVAÇÃO**

**MÉTODO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTA À TERRA  
APLICADO EM UMA PLANTA DE GERAÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA**

**MARCELO LICORINI**

*TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO APRESENTADO AO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DO CENTRO UNIVERSITÁRIO CAMPO REAL, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA ELÉTRICA, CONSIDERADO APROVADO PELA BANCA EXAMINADORA E AVALIADO COMO NOTA: 9,0 EM SUA DEFESA PÚBLICA.*

---

**ORIENTADOR: ENG. THIAGO PRADO DE CAMPOS**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO CAMPO REAL**

---

**MEMBRO DA BANCA: ENG. CARLOS ROBERTO BORSATO**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO CAMPO REAL**

---

**MEMBRO DA BANCA: ENG. DANIEL PRADO DE CAMPOS**

**UTFPR CAMPOS APUCARANA**