

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**ADRIANO ROMÃO FRANCISCO**

**TESTE DAS FUNÇÕES DE PROTEÇÃO DO RELÉ 7UM62  
DA SIEMENS EM MANUTENÇÃO PREVENTIVA NA PCH  
MUCURI**

VITÓRIA  
2024

ADRIANO ROMÃO FRANCISCO

**TESTE DAS FUNÇÕES DE PROTEÇÃO DO RELÉ 7UM62 DA  
SIEMENS EM MANUTENÇÃO PREVENTIVA NA PCH MUCURI**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Adriano Romão Francisco**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Dr. Oureste Elias Batista

VITÓRIA  
2024

ADRIANO ROMÃO FRANCISCO

**TESTE DAS FUNÇÕES DE PROTEÇÃO DO RELÉ 7UM62 DA  
SIEMENS EM MANUTENÇÃO PREVENTIVA NA PCH MUCURI**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Adriano Romão Francisco**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em *(dia)* de *(mês)* de *(ano)*.

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Dr. Oureste Elias Batista**  
UFES  
Orientador

---

**Dra. Tiara Rodrigues Smarssaro de Freitas**  
UFES  
Examinador

---

**Dr. Luiz Guilherme Riva Tonini**  
UNESA  
Examinador

A todos estudantes que pensaram em desistir.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha esposa Lorenza Pretti pela paciência e companheirismo em toda essa trajetória, mas principalmente pelas palavras e atitudes de incentivo quando nem eu mesmo acreditava ser capaz de concluir esta etapa importantíssima da vida.

Agradeço também aos meus pais, Rubens e Fátima, e minhas irmãs, Tatiana e Rubiana, que me deram suporte para que, mesmo eu sendo o mais novo, fosse o primeiro a cursar ensino superior.

Agradeço ainda aos meus colegas de trabalho, em especial Victor Medeiros e Thiago Olimpio, que ensinaram ao curioso cara da automação sobre proteção de subestações me abrindo caminho e conhecimento para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram direta e indiretamente com minha formação acadêmica através de gestos ou palavras de incentivo. Tais contribuições foram fundamentais e me deram forças para continuar em momentos difíceis.

## **RESUMO**

Relés de proteção estão inseridos em diversas plantas de energia pelo mundo e são projetados para atuar primordialmente em situações críticas que requerem ação rápida e assertiva. Desta forma, faz-se necessário sua utilização em Pequenas Centrais Hidrelétricas afim de proteger equipamentos tais como: transformadores, geradores, serviços auxiliares, entre outros. Apesar da funcionalidade inicial do relé ser garantida pelo fabricante, para manter a confiabilidade do sistema, são programadas manutenções preventivas confirmando assim que os relés estejam em pleno funcionamento durante toda sua vida útil. Este estudo tem por objetivo testar as funções de proteção do relé 7UM62 da Siemens destinado à proteção de geradores presente na planta da Pequena Central Hidrelétrica Mucuri, localizada no estado de Minas Gerais. Para o desenvolvimento deste trabalho executa-se uma rotina de testes e coleta-se os resultados dos mesmos para análise. Ao final espera-se avaliar se as funções de proteção responderam positivamente aos testes realizados concluindo assim se o relé de proteção está apto para continuar desempenhando o papel para o qual foi projetado.

Palavras-chave: Relé de proteção. Função de proteção. Gerador. Manutenção preventiva.

## **ABSTRACT**

Protection relays are installed in various power plants worldwide and are designed to operate primarily in critical situations that require rapid and accurate action. Therefore, their use in Small Hydroelectric Plants is necessary to protect equipment such as transformers, generators, auxiliary services, among others. To maintain system reliability, preventive maintenance is scheduled, allowing the relays to remain fully functional throughout their service life. This study aims to test the protection functions of the Siemens 7UM62 relay intended for generator protection at the Mucuri Small Hydroelectric Plant, located in the state of Minas Gerais. For the development of this work, a testing routine is performed, and the results are collected for analysis. In the end, it is expected to assess whether the protection functions responded positively to the tests conducted, thus concluding whether the protection relay is fit to continue performing the role for which it was designed.

**Keywords:** Protection relay. Protection function. Generator. Preventive maintenance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - PCHs na matriz elétrica brasileira.....	17
Figura 2 - Relé Siemens 7UM62 .....	19
Figura 3 - Configuração rampa de sobretensão .....	25
Figura 4 - Ajustes de sobretensão do relé.....	26
Figura 5 - Curva teste de <i>pick-up</i> .....	27
Figura 6 - Ajustes de subtensão .....	28
Figura 7 - Tempo de atuação após detecção de subtensão .....	28
Figura 8 - Ajustes da proteção de frequência .....	29
Figura 9 - Rampa de subfrequência nível 1 .....	30
Figura 10 - Rampa de subfrequência nível 2 .....	30
Figura 11 - Rampa de sobrefrequência nível 1 .....	31
Figura 12 - Rampa de sobrefrequência de nível 2 .....	32
Figura 13 - Injeção pré-falta e falta de potência reversa .....	33
Figura 14 - Atuação temporizada após detecção de potência reversa .....	34
Figura 15 - Ajustes de energização indevida.....	34
Figura 16 - Valores de injeção para teste de energização indevida.....	35
Figura 17 - Atuação do elemento de sobrecorrente para energização indevida .....	36
Figura 18 - Ajuste da temporização de perda de excitação .....	36
Figura 19 - Validação da função perda de excitação.....	37
Figura 20 - Ajustes função de proteção 51V .....	38
Figura 21 - Configuração dos parâmetros de sobrecorrente de tempo inverso .....	38
Figura 22 - Resultado do teste de proteção da função 51V .....	39
Figura 23 - Localização dos disparos na curva característica resultante .....	39
Figura 24 - Ajustes de sobrecorrente instantânea.....	40
Figura 25 - Resultado do teste para os disparos efetuados e suas respectivas localizações no gráfico $I \times t$ .....	40
Figura 26 - Ajustes para sobrecorrente com selo de subtensão .....	41
Figura 27 - Conclusão do teste de sobrecorrente com selo de subtensão .....	42
Figura 28 - Ajustes da função de proteção de falta à terra sensível .....	43
Figura 29 - Visualização dos testes aprovados .....	43
Figura 30 - Ajustes da função de proteção de sobrecarga .....	43
Figura 31 - Injeção da corrente de sobrecarga.....	44

Figura 32 - Ajustes da função de proteção ANSI 46 .....	45
Figura 33 - Injeções de pré-falta e corrente de sequência negativa.....	45
Figura 34 - Ajustes proteção diferencial.....	46
Figura 35 - Curva característica da proteção diferencial .....	47
Figura 36 - Diferentes pontos de busca entre os valores do ajuste de diferencial .....	47
Figura 37 - Curva característica resultante com a localização dos pontos testados .....	48
Figura 38 - Área externa PCH Mucuri .....	51
Figura 39 - Conjunto de unidades geradoras .....	52
Figura 40 - Relé de proteção analisado 7UM62 do gerador G2 .....	53
Figura 41 - Estabelecendo comunicação com o relé de proteção .....	54
Figura 42 - Teste de proteção em andamento .....	55

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Tabela ANSI.....	20
-----------------------------	----

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
LED	<i>Light Emissor Diode</i>
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
TC	Transformador de Corrente

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V_{FF}$	Tensão fase-fase (V)
$V_{FN}$	Tensão fase-neutro (V)
S	Potência aparente (VA)
I	Corrente (A)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1	Justificativa .....	14
1.2	Objetivos.....	15
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>17</b>
3.1	Pequenas Centrais Hidrelétricas.....	17
3.2	Manutenção preventiva.....	18
3.3	Geradores .....	18
3.4	Relés de proteção .....	18
3.4.1	Siemens 7UM62 .....	19
3.4.2	Funções de proteção .....	20
3.4.2.1	Sobrecorrente.....	20
3.4.2.2	Sobretensão.....	21
3.4.2.3	Potência reversa.....	21
3.4.2.4	Energização indevida.....	21
3.4.2.5	Perda de excitação .....	21
3.4.2.6	Sobrecarga .....	22
3.4.2.7	Sequência negativa .....	22
3.4.2.8	Subtensão.....	22
3.4.2.9	Proteção de frequência .....	22
3.4.2.10	Diferencial .....	23
3.4.3	Ajustes do relé .....	23
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>25</b>
4.1	Sobretensão .....	25
4.2	Subtensão.....	27
4.3	Proteção de frequência.....	29
4.4	Potência reversa .....	32
4.5	Energização indevida .....	34
4.6	Perda de excitação .....	36
4.7	Sobrecorrente.....	37

4.7.1 Sobrecorrente de tempo inverso .....	37
4.7.2 Sobrecorrente instantânea.....	39
4.7.3 Sobrecorrente com selo de tensão .....	41
4.7.4 Sobrecorrente de neutro (falta a terra sensitiva).....	42
<b>4.8 Sobrecarga.....</b>	<b>43</b>
<b>4.9 Sequência negativa .....</b>	<b>45</b>
<b>4.10 Diferencial .....</b>	<b>46</b>
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>49</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>50</b>
<b>APÊNDICE A – IMAGENS DA ATIVIDADE NA PCH .....</b>	<b>51</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Justificativa

Os relés de proteção são aplicados em Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) por diversos motivos, sendo sua principal função garantir a segurança operacional e a integridade dos equipamentos elétricos envolvidos na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

Os mesmos são essenciais para proteger os equipamentos críticos das PCHs, como turbinas, geradores, transformadores e sistemas elétricos, contra condições anormais, como sobrecargas, curtos-circuitos e falhas de terra.

Ao detectar e isolar rapidamente falhas elétricas, os relés de proteção contribuem para manter a segurança operacional da PCH, minimizando o risco de danos aos equipamentos e garantindo um ambiente de trabalho seguro para os operadores (Eletrobras, 2015), além de trabalharem na manutenção da continuidade do fornecimento de energia elétrica, ao evitar a propagação de falhas no sistema elétrico e reduzir o tempo de indisponibilidade dos equipamentos.

Além disso, a aplicação de relés de proteção em PCHs é necessária para garantir a conformidade com normas e regulamentos específicos do setor elétrico, que estabelecem requisitos mínimos de segurança e proteção para instalações de geração de energia. (ANEEL, 2020)

Para atestar o bom funcionamento do relé de proteção, é necessário realizar uma série de testes e procedimentos de verificação. Que consiste em aferir se todas as funções de proteção e controle do relé estão operando corretamente. Isso pode ser feito simulando condições de falha e verificando se o relé responde conforme o esperado. Testar a sensibilidade do relé para garantir que ele detecte corretamente eventos anormais, como sobrecargas, curtos-circuitos e falhas de terra. Verificar se os valores de *pick-up* (ativação) e os tempos de operação do relé estão dentro das especificações. Isso pode ser feito aplicando correntes ou tensões de teste e registrando o tempo necessário para o relé atuar.

Portanto, a aplicação de relés de proteção em PCHs é fundamental para garantir a segurança, confiabilidade e eficiência operacional dessas instalações de geração de energia hidrelétrica, protegendo os equipamentos e garantindo o fornecimento contínuo de energia elétrica de forma segura e confiável e, para que essa garantia ocorra, se faz necessária a manutenção preventiva dos relés de proteção.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é atestar funcionamento do relé 7UM62 da Siemens presente na PCH Mucuri através de testes funcionais e levantamento de suas curvas de proteção.

Para alcançar o objetivo geral pode-se estabelecer alguns objetivos específicos. São eles:

- Elaboração do documento de testes OMICRON também conhecido como “macro”.
- Levantamento dos ajustes e curvas características do relé de proteção.

## **2 METODOLOGIA**

Esta pesquisa é de natureza aplicada, ou seja, procura produzir conhecimentos que facilitem a prática no campo de testes e manutenção preventiva no setor de proteção, dirigidos à solução de possíveis problemas encontrados na comunicação e atuação dos relés de proteção. No que diz respeito ao objetivo, esta se trata de uma pesquisa explicativa, uma vez que se desenvolve com base no estudo das funções de proteção do relé 7UM62 e busca explicar, ao submetê-lo à testes de injeção, como está o funcionamento de tais proteções do relé na PCH. O procedimento técnico para o desenvolvimento deste trabalho será um estudo de caso, embora o relé e suas respectivas proteções possam ser usados com ajustes semelhantes em outros empreendimentos, nos atentaremos aos ajustes aplicados na PCH Mucuri.

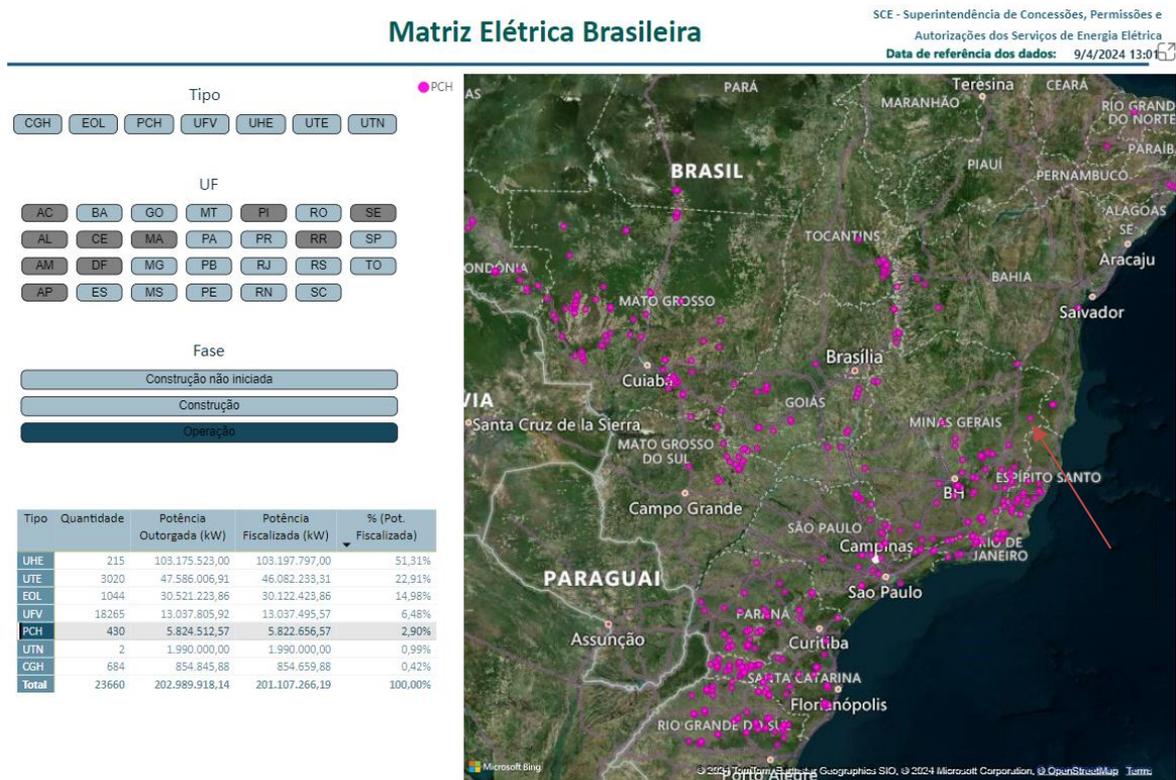
### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Pequenas Centrais Hidrelétricas

A hidroeletricidade é uma tecnologia madura e confiável que tem sido a principal fonte do sistema elétrico brasileiro, sendo o tipo de potência que ocupa mais da metade da matriz elétrica instalada, isso se dá devido à sua competitividade econômica, além de ser uma fonte de geração renovável (Silva et. al, 2018).

Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) são aproveitamentos hidrelétricos com potência instalada superior a 5000 kW e igual ou inferior a 30000 kW (ANEEL, 2023). Atualmente, segundo a ANEEL, existem 430 pequenas centrais hidrelétricas em operação no Brasil. Tais empreendimentos representam 2,9% da matriz elétrica brasileira, como vê-se na Figura 1.

Figura 1 - PCHs na matriz elétrica brasileira



Fonte: ANEEL (2024)

Nota: CGH: Central Geradora Hidrelétrica; EOL: Eólica; UFV: Usina Fotovoltaica; UHE: Usina Hidrelétrica; UTE: Usina termelétrica; UTN: Usina Termonuclear.

Nota: a seta vermelha indica a localização da PCH Mucuri.

A PCH Mucuri localiza-se no município de Carlos Chagas no estado de Minas Gerais e conta com capacidade máxima de geração de 22500 kW tendo entrado em operação em 10 de maio de 2013.

### **3.2 Manutenção preventiva**

Segundo a NBR 5674, a manutenção preventiva é:

caracterizada por serviços cuja realização seja programada com antecedência, priorizando as solicitações dos usuários, estimativas da durabilidade esperada dos sistemas, elementos ou componentes das edificações em uso, gravidade e urgência, e relatórios de verificações periódicas sobre o seu estado de degradação (ABNT, 2012).

Sendo assim, faz-se necessária a realização de manutenções preventivas em pequenas centrais hidrelétricas a fim de garantir seu pleno funcionamento. Desta forma é programada, de tempos em tempos, a parada dos geradores e desenergização da subestação de energia da geração e da linha de transmissão para a realização da manutenção em todos os equipamentos (geradores, transformadores, disjuntores, relés de proteção, etc).

A NBR 5462 respalda a manutenção em relés de proteção uma vez que trata da confiabilidade e da mantabilidade do sistema. A confiabilidade é definida pela capacidade que um dispositivo possui de desempenhar a função para a qual foi projetado sob condições especificadas dentro de determinado período de tempo (ABNT,1994).

### **3.3 Geradores**

Os geradores são máquinas rotativas capazes de converter potência mecânica em potência elétrica. Eles estão presentes no sistema elétrico de potência como a fonte geradora, sendo assim fundamentais, contudo, estão propensos a diversos tipos de falhas, divididas em quatro categorias, sendo elas: falhas construtivas e de materiais, como falha nos materiais isolantes e não isolantes; falhas de origem externa, como perda de sincronismo ou de excitação; falhas de origem interna, como curto circuito no rotor ou estator; e falhas originadas nos equipamentos agregados, como curto circuito nos transformadores de corrente ou de potencial (Mamede, 2013).

### **3.4 Relés de proteção**

Os relés de proteção são dispositivos com a função de proteger o sistema elétrico de condições consideradas anormais, como sobrecarga e curto-circuito, promovendo o seccionamento do

trecho através da abertura de disjuntores fazendo com que tais anomalias sejam extintas o mais rápido possível e não se propaguem para o restante do sistema. A história dos relés de proteção é muito vasta desde seu surgimento com os relés eletromecânicos baseados em bobinas, contatos fixos e móveis até os relés digitais gerenciados por microprocessadores embarcados. Com o avanço da tecnologia os relés digitais exercem outras funções além da proteção do sistema, como medição, controle, comunicação, etc (Mamede, 2013).

### 3.4.1 Siemens 7UM62

Os relés utilizados para proteger os geradores da PCH Mucuri são do modelo 7UM62 fabricado pela Siemens. Esses relés fazem parte da família SIPROTEC 4 e possuem as funções de proteção necessárias tanto para geradores como para proteção de motores e transformadores. Na Figura 2 pode-se observar que em sua interface frontal há uma tela seguida de setas para navegação, LEDs indicadores configuráveis e botões pré-configurados, além disso conta com uma porta serial para comunicação entre o *software* de configuração e o relé.

Figura 2 - Relé Siemens 7UM62



Fonte: Siemens, 2024

### 3.4.2 Funções de proteção

Funções de proteção são aquelas que monitoram o sistema em busca de faltas e tem atuação rápida o suficiente para extinguir falhas antes que haja danificação dos equipamentos. Elas são caracterizadas por um código numérico elaborado pela instituição estadunidense American National Standards Institute (ANSI) responsável pela padronização de diversos segmentos. Os relés podem ser fabricados para atender uma única função de proteção, porém, atualmente, devido a evolução tecnológica, os relés normalmente são produzidos para atuar na ocorrência de diferentes eventos. Vê-se no Quadro 1 as funções de proteção seguidas dos seus respectivos códigos numéricos presentes neste trabalho.

Quadro 1 - Tabela ANSI

Tabela ANSI	
Relé de subtensão	27
Relé direcional de potência	32
Relé de perda de excitação ou relé de perda de campo	40
Relé de reversão ou desbalanceamento de corrente	46
Relé térmico	49
Relé de sobrecorrente instantâneo	50
Relé de sobrecorrente temporizado	51
Relé de sobrecorrente com restrição de tensão	51V
Relé de sobretensão	59
Relé detetor de terra	64
Relé de frequência (sub ou sobre)	81
Relé de proteção diferencial	87

Fonte: próprio autor

#### 3.4.2.1 Sobrecorrente (50/51)

A proteção de sobrecorrente em geradores síncronos é um sistema de segurança que monitora e responde a correntes elétricas anormais que excedem os limites especificados. Essa proteção

é essencial para evitar danos ao gerador síncrono e ao sistema elétrico como um todo em casos de curtos-circuitos ou falhas no sistema de controle. Quando uma corrente excessiva é detectada, a proteção de sobrecorrente atua para desligar o gerador ou abrir os dispositivos de proteção apropriados, interrompendo assim o fluxo de corrente e prevenindo danos.

#### **3.4.2.2 Sobretensão (59)**

A função de proteção de sobretensão protege, como o nome sugere, contra o aumento inadmissível da tensão. Ela pode ser configurada para atuar de forma instantânea ou temporizada, a depender do nível de sobretensão detectado, isso porque, para sobretensões mais baixas, existe a possibilidade do regulador de tensão atuar e levar a tensão a sua faixa nominal novamente.

O transformador de potencial (TP) é um dispositivo desenvolvido para enviar o sinal de tensão para instrumentos de medição, controle e proteção (Santos; Fernandes Júnior, 2009). Dessa forma, os TPs são elementos redutores de tensão, pois convertem uma tensão elevada em um valor mais baixo e seguro para os relés de proteção.

#### **3.4.2.3 Potência reversa (32R)**

A função de proteção de potência reversa é usada para evitar a motorização do gerador, isto é, quando o fluxo de potência flui em um sentido não desejado, fazendo o gerador consumir energia da rede. As lâminas da turbina sobreaquecem nessa condição.

#### **3.4.2.4 Energização indevida (50, 27)**

A função de energização indevida protege contra a energização acidental quando o gerador se encontra parado ou em processo de parada. A energização de uma máquina em estado estacionário é equivalente à conexão a um resistor de baixa resistência. O gerador parte com um alto escorregamento como uma máquina assíncrona, induzindo altas correntes dentro do rotor podendo vir a danificá-lo.

#### **3.4.2.5 Perda de excitação (40)**

A função de proteção de perda de excitação, também conhecida como perda de campo ou subexcitação,

protege uma máquina síncrona de operação assíncrona no evento de uma excitação com falta ou regulagem e do sobreaquecimento local do rotor. Além disso, ela evita riscos à estabilidade da rede pela subexcitação de grandes máquinas síncronas. (Siemens, 2010)

A perda de campo pode se dar devido a um curto-circuito ou circuito aberto no circuito de campo, falha na excitação, erro de operação ou em caso de perda dos serviços auxiliares.

#### **3.4.2.6 Sobrecarga (49)**

A proteção de sobrecarga térmica previne que os enrolamentos do estator da máquina sofram com superaquecimento. Essa função de proteção funciona a partir do cálculo da temperatura interna dos enrolamentos por meio da somatória contínua das perdas em joule e da dissipação térmica do gerador.

Cabe ressaltar que a função de sobrecarga está relacionada com a capacidade térmica da máquina e pode ser monitorada através de um dispositivo termorresistivo conhecido como RTD (*Resistance Temperature Detector*, traduzido para o português como Detector Resistivo de Temperatura).

#### **3.4.2.7 Sequência negativa (46)**

A proteção de sequência negativa é conhecida como proteção de carga desbalanceada. Esse desbalanceamento cria uma componente de sequência negativa que, por sua vez, induz correntes no rotor com o dobro da frequência nominal, essas correntes parasitas produzem também um sobreaquecimento no rotor (Mamede, 2013).

#### **3.4.2.8 Subtensão (27)**

Curtos-circuitos bipolares ou faltas à terra podem causar quedas de tensão, ao detectar essa queda a função de proteção de subtensão atua, evitando assim estados operacionais inadmissíveis bem como possível perda de estabilidade.

#### **3.4.2.9 Proteção de frequência (81)**

A função de proteção de frequência busca anormalidades fora de uma faixa de frequência considerada admissível. A frequência de um determinado sistema com geradores pode aumentar caso ocorra por exemplo, uma perda de grandes cargas, acelerando assim a rotação de geradores síncronos. O decréscimo na frequência do sistema pode ser observado quando o mesmo sofrer de um aumento na demanda de potência real. Ambas as proteções (sobrefrequência e subfrequência) podem ser acionadas também por um mau funcionamento do controle de velocidade ou de frequência do gerador.

### 3.4.2.10 Diferencial (87G)

A finalidade da proteção diferencial de corrente em geradores é minimizar os danos internos à máquina decorrentes de falhas bifásicas e falhas à terra. Sua implementação segue princípios semelhantes aos aplicados em transformadores de potência. No entanto, a eficácia da proteção diferencial depende crucialmente do sistema de aterramento do neutro do gerador.

A proteção diferencial aplicada aos geradores utiliza um relé diferencial percentual, que faz uma comparação entre as correntes secundárias dos transformadores de corrente (TCs) situados no lado do neutro e as correntes secundárias das mesmas fases dos TCs localizados na saída do gerador. Essa região delimitada pelos TCs é denominada área diferencial. Em condições normais de operação, sem falhas, a corrente que entra no gerador é igual à que sai. Contudo, quando ocorre uma falha dentro da área diferencial, a corrente de falha flui apenas por um dos TCs, resultando em uma corrente diferencial que aciona o relé, levando-o a operar. (Mamede, 2013)

### 3.4.3 Ajustes do relé

Antes de um relé de proteção entrar em operação em uma planta é necessário que o mesmo passe pelos processos comumente chamados de estudo de seletividade e parametrização.

Para que o relé de proteção seja parametrizado, é necessário que haja uma etapa anterior nomeada estudo de seletividade, no qual seu objetivo maior “é determinar os ajustes dos aparelhos de proteção, de forma que, na ocorrência de um curto-circuito, opere apenas o aparelho mais próximo da falta, isolando a menor porção do sistema elétrico, no menor tempo possível e ainda protegendo os aparelhos e o sistema” (Mardegan, 2011).

Concluído o estudo de seletividade, etapa de parametrização consiste em transpor para o relé uma série de parâmetros de monitoramento do relé também conhecidos como ajustes de proteção. Esses parâmetros são definidos por estudos de engenharia que definem os valores para cada componente da função de proteção a fim de proteger os equipamentos e também manter a coordenação e seletividade das proteções. Em um projeto com vários equipamentos a serem protegidos há, por conseguinte, diversos relés. Cada dispositivo fica responsável por proteger determinado trecho ou equipamento, determinando assim, sua zona principal. Quando ocorre uma falta deseja-se que o dispositivo de proteção mais próximo ao local desta falta efetue o disparo seccionando assim o circuito e protegendo o equipamento de danos provenientes dela. Este fenômeno é conhecido por seletividade. Uma falta pode sensibilizar mais de um relé, neste

caso, todos relés sensibilizados efetuariam disparos para abrir seus respectivos circuitos, podendo vir a seccionar trechos não afetados pela falta. Em virtude disto temporiza-se algumas funções de proteção baseados nos estudos de seletividade, ou seja, relés mais distantes da falta tem a sua atuação retardada para que o relé mais próximo tenha tempo suficiente de se sensibilizar e atuar, porém, caso este relé venha a falhar na sua atuação, a temporização permite que outro dispositivo, atuando como proteção de segunda linha ou retaguarda, continue sensibilizado e atue. Esse conceito de retardo na proteção chama-se coordenação cronométrica, onde alinham-se as proteções principais e de retaguarda.

Os ajustes então nada mais são que os tempos definitos para a temporização, os valores limítrofes para sensibilização e disparo, as grandezas nominais, entre outras variáveis, a serem adicionados no relé.

## 4 RESULTADOS

A mala de testes utilizada foi a CMC 356 da OMICRON. Para otimização dos testes de proteção elaborou-se a macro de testes a partir do arquivo PTL, *Protection Testing Library*, que é um template predefinido de testes elaborados para diversos modelos de relés de diferentes fabricantes que simula falhas no sistema. A macro de testes é uma configuração prévia de testes com uma sequência definida e com os valores a serem injetados pela CMC 356. Essa configuração prévia serve exclusivamente para otimização do tempo de parada da usina, uma vez que os testes podem ser montados durante a execução da manutenção preventiva. Porém, para que seja obtido o menor tempo de execução, elaborou-se esse arquivo chamado de macro de testes, que consiste no compilado, em um único arquivo, de todos os testes a serem executados.

A macro de testes apresentada foi elaborada exclusivamente para o presente trabalho.

### 4.1 Sobretensão (59)

Para realizar o teste de sobretensão foi escolhida e aplicada uma rampa de 66,00 V a 78,00 V, com incremento de 1,00 V a cada 5,00 s, totalizando treze passos, como vê-se na Figura 3.

Os valores foram determinados com base em uma escolha de projeto, já que a única necessidade seria ultrapassar o valor de  $V_{FF1}$ .

Figura 3 - Configuração rampa de sobretensão



Fonte: Próprio autor

Os valores de tensão contidos no ajuste do relé, como vê-se na Figura 4, são fase-fase e os valores de tensão descritos no *software* da OMICRON são por fase-terra, desta forma tem-se:

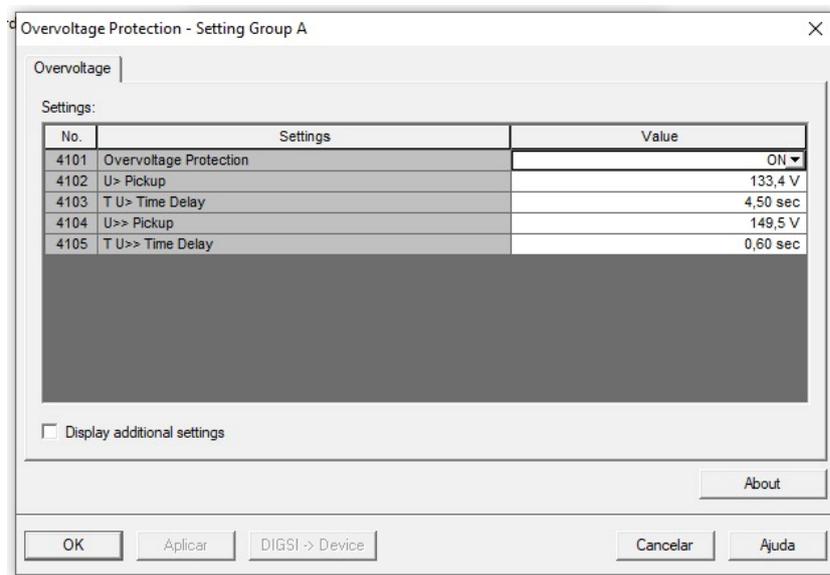
$$V_{FF} = \sqrt{3} \cdot V_{FN}$$

$$V_{FF1} = \frac{133,4}{\sqrt{3}} = 77,02 \text{ V}$$

$$V_{FF2} = \frac{149,5}{\sqrt{3}} = 86,31 \text{ V}$$

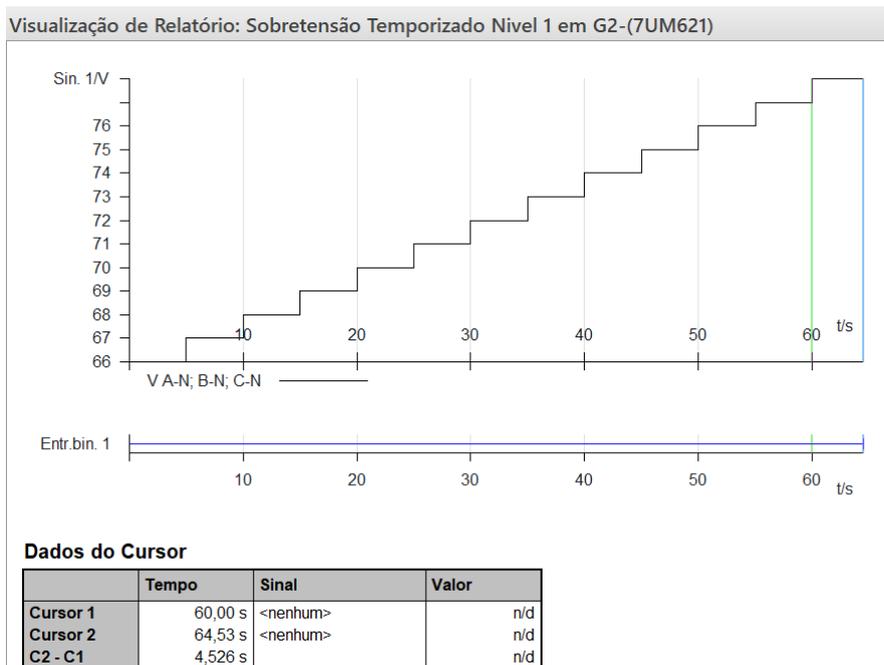
O relé entende desta forma, que existe uma sobretensão nos valores entre 77,02 V e 86,31 V, porém há uma temporização de 4,50 s para que o regulador possa ter tempo de atuar. Caso a sobretensão persista o relé envia então um comando de abertura para o disjuntor. Na hipótese de uma tensão superior a 86,31 V, a temporização seria de 0,60 s.

Figura 4 - Ajustes de sobretensão do relé



Fonte: próprio autor

Observa-se na Figura 5 que ao superar o valor de 77,02 V o relé aguarda os 4,50 segundos da temporização e após 0,026 segundos a injeção da mala é interrompida, validando o teste de sobretensão.

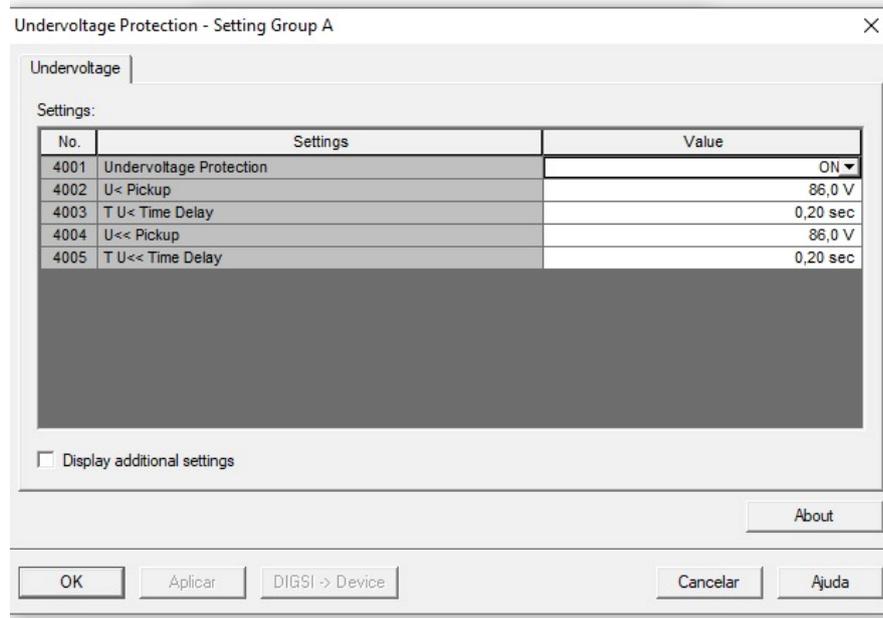
Figura 5 - Curva teste de *pick-up*

Fonte: próprio autor

## 4.2 Subtensão (27)

Uma queda de tensão pode ser simulada injetando determinado valor de tensão acima do ajuste e realizando o seu decréscimo em uma rampa. Na Figura 6 pode-se ver que o ajuste de subtensão escolhido foi 86,00 V com temporização de 0,20 segundos. Embora seja possível determinar dois níveis de subtensão no relé, na PCH Mucuri utiliza-se somente um nível, deixando dessa forma o ajuste do segundo nível igual ao do primeiro.

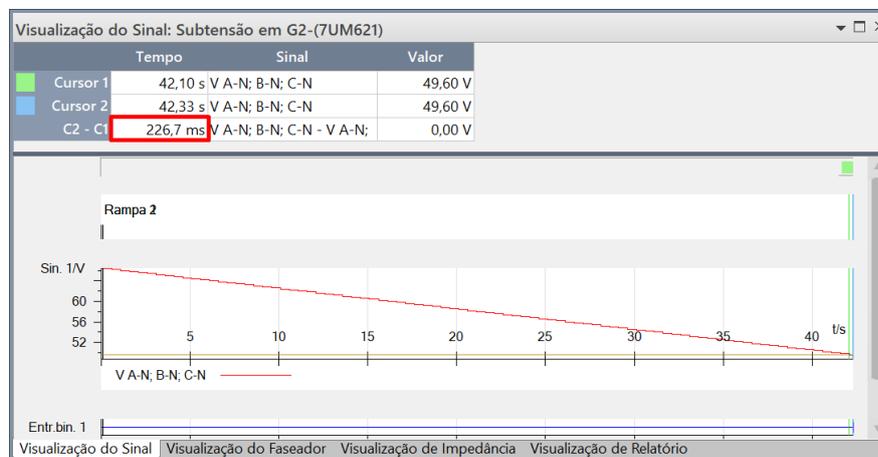
Figura 6 - Ajustes de subtensão



Fonte: próprio autor

A tensão de 86,00 V fase-fase é equivalente a 49,60 V fase-neutro, desta forma, aplicou-se, no teste de subtensão, uma rampa de 66,40 V com decréscimo de 200 mV a cada 500 ms. Ao detectar a queda de tensão inadmissível, o relé atuou, parando a injeção da mala de testes após o período de temporização. Nota-se que o tempo entre a detecção e a parada é de 226,7 ms, ou seja, a mala permaneceu injetando durante 26,7 ms após a temporização, como observa-se na Figura 7. Isto se dá devido à presença de componentes físicos tais como cabos e bornes e o tempo de resposta do relé de proteção, em uma atuação real deve-se levar em consideração tanto o tempo de resposta do relé de proteção, quanto o tempo de operação do disjuntor.

Figura 7 - Tempo de atuação após detecção de subtensão



Fonte: próprio autor

A partir dessas informações concluiu-se que a função de proteção de subtensão está funcionando corretamente.

### 4.3 Proteção de frequência (81)

O teste da função de proteção de frequência está dividido em quatro etapas. Avalia-se tanto a subfrequência quanto a sobrefrequência. Observa-se na Figura 8 os ajustes dos valores de *pick-up* e as temporizações para cada uma das etapas.

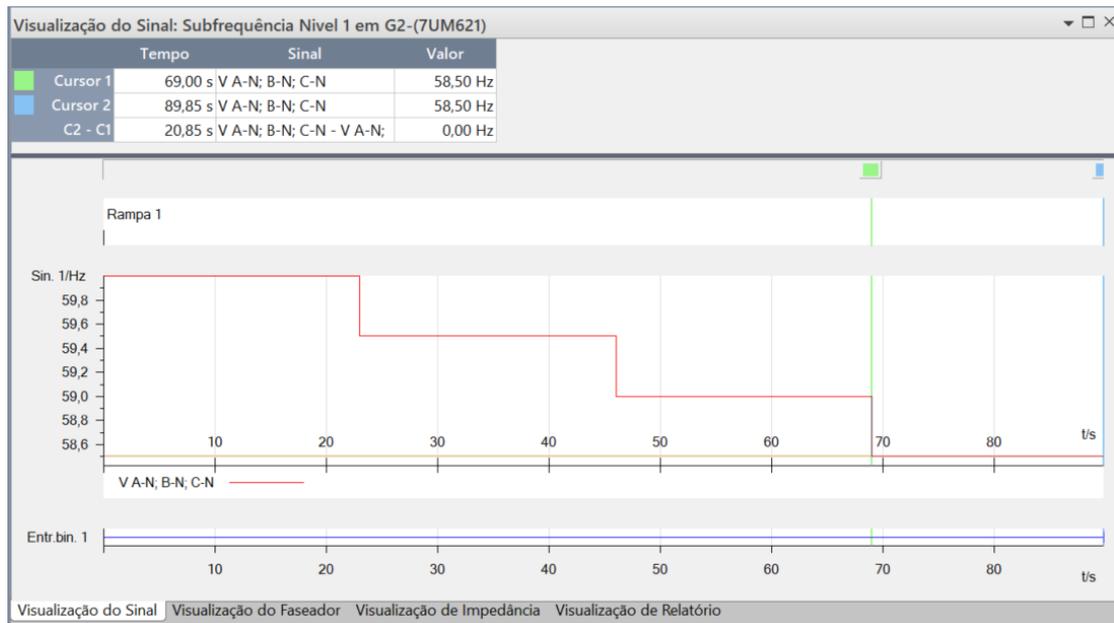
Figura 8 - Ajustes da proteção de frequência

No.	Settings	Value
4201	Over / Under Frequency Protection	ON ▾
4203	f1 Pickup	63,00 Hz
4204	T f1 Time Delay	10,00 sec
4206	f2 Pickup	66,00 Hz
4207	T f2 Time Delay	0,50 sec
4209	f3 Pickup	58,50 Hz
4210	T f3 Time Delay	20,00 sec
4212	f4 Pickup	56,50 Hz
4213	T f4 Time Delay	0,50 sec
4214	Handling of Threshold Stage f4	Freq. prot. stage automatic
4215	Minimum Required Voltage for Operation	75,0 V

Fonte: próprio autor

Primeiramente foi injetada uma rampa com 60,00 Hz de frequência sendo decrescida de 500 mHz a cada 23,00 s, logo, ao detectar o *pick-up* de 58,50 Hz, a proteção atuou após a temporização de 20,00 s como observa-se na Figura 9.

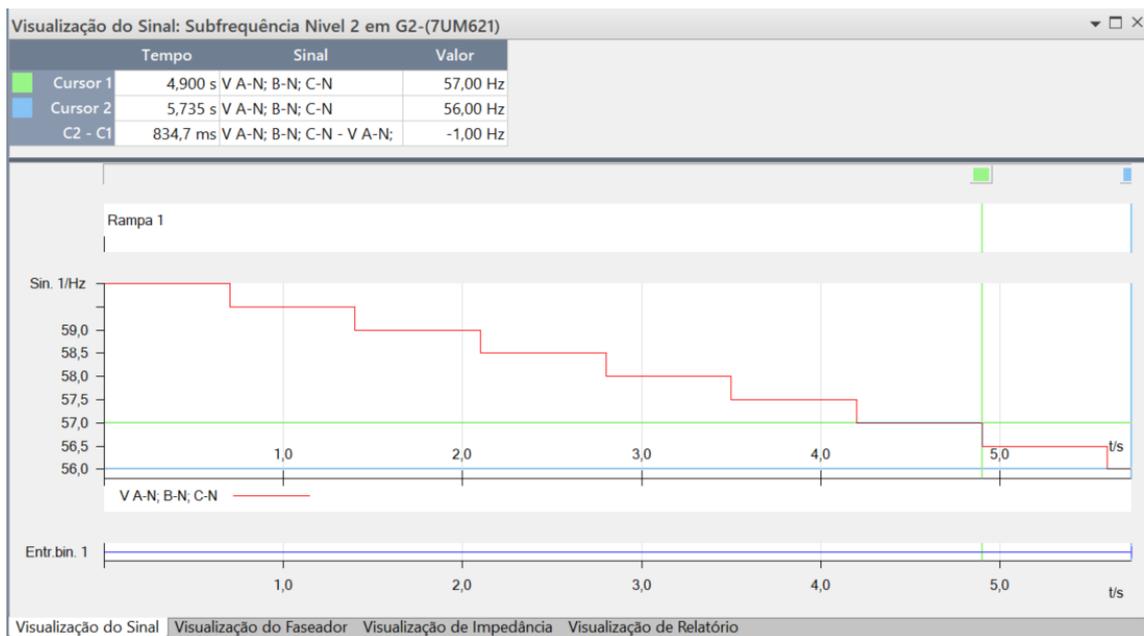
Figura 9 - Rampa de subfrequência nível 1



Fonte: próprio autor

Após a conclusão do teste de subfrequência de nível 1 foi injetada a mesma rampa de 60,00 Hz decrescida de 500 mHz, porém, a cada 700 ms. Desta forma a proteção de nível 1 não atua devido a sua temporização, a atuação da proteção de nível 2 acontece, por sua vez, quando o valor de 56,50 Hz é ultrapassado como vê-se na Figura 10.

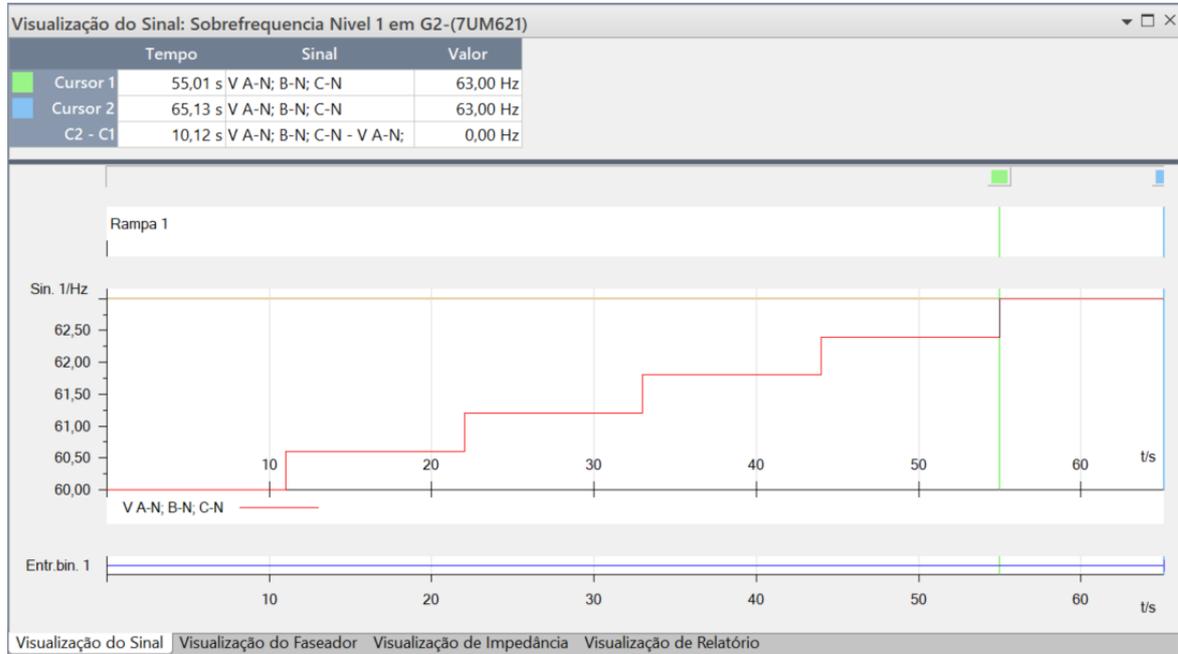
Figura 10 - Rampa de subfrequência nível 2



Fonte: próprio autor

A função de proteção de sobrefrequência é testada através de uma rampa de 60,00 Hz de frequência acrescida de 600 mHz a cada 11,00 s. Observa-se na Figura 11 que após superar 63,00 Hz a proteção atua parando a injeção da mala de testes.

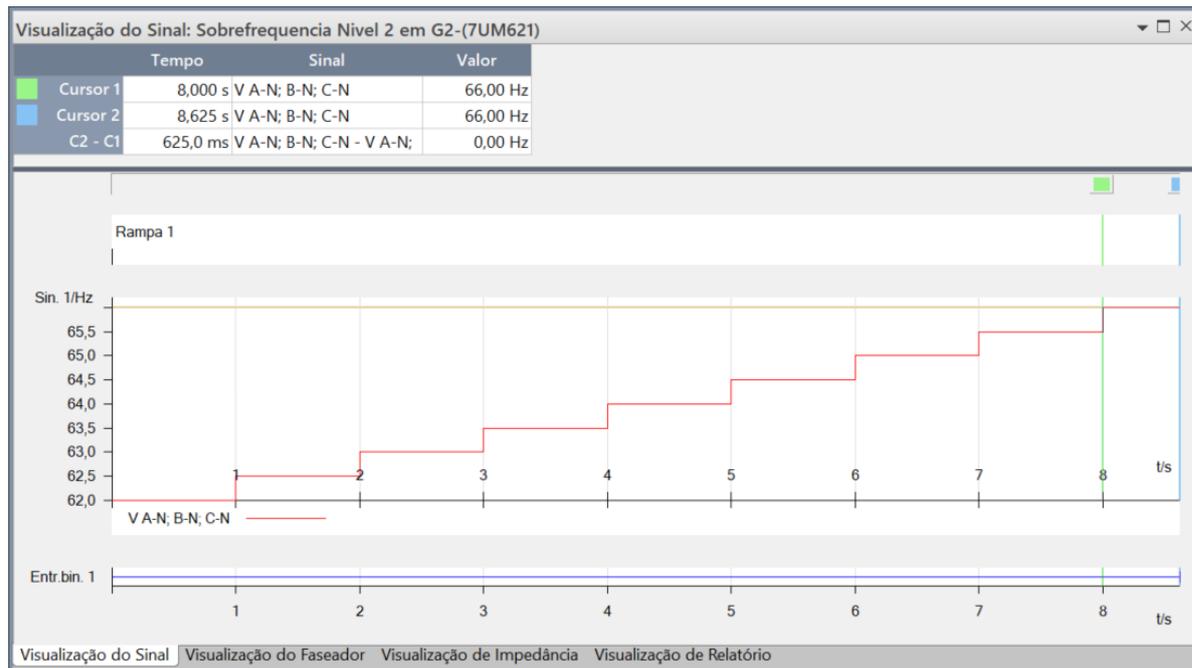
Figura 11 - Rampa de sobrefrequência nível 1



Fonte: próprio autor

Para o teste de sobrefrequência de nível 2 utilizou-se uma rampa de 60,00 Hz acrescida de 500 mHz a cada 1,00 s. O teste foi validado quando a proteção atuou executando a parada de injeção ao detectar valor superior ao *pick-up* de 66,00 Hz como vê-se na Figura 12.

Figura 12 - Rampa de sobrefrequência de nível 2



Fonte: próprio autor

Após a realização destas quatro etapas de testes pode-se atestar que a função de proteção de frequência está apta a proteger o gerador contra eventos de sub e sobrefrequência.

#### 4.4 Potência reversa (32R)

O ajuste de *pick-up* da potência reversa é de -0,60% da potência nominal. A tensão fase-fase nominal ajustada no relé é de 115,00 V e a corrente nominal de 5,00 A, desta forma temos que:

$$S_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N = \sqrt{3} \cdot 115 \cdot 5 = 995,92 \text{ VA}$$

Logo, 0,60% de  $S_N$  é 5,98 VA. Desta forma, para que a proteção atue basta que o valor da potência seja superior e negativo. Para isso preparou-se uma pré-falta de tensão nominal e 2,00 A por 3,00 s. Passado esse tempo injetou-se a mesma tensão nominal, porém, com uma corrente de 150 mA tombada em 180° em todas as fases como observa-se na Figura 13.

Figura 13 - Injeção pré-falta e falta de potência reversa

**Ajustes do teste**

Estado	Estado Normal	Potência Reversa
V A-N	66,40 V 0,00 ° 60,000 Hz	66,40 V 0,00 ° 60,000 Hz
V B-N	66,40 V -120,00 ° 60,000 Hz	66,40 V -120,00 ° 60,000 Hz
V C-N	66,40 V 120,00 ° 60,000 Hz	66,40 V 120,00 ° 60,000 Hz
I A	2,000 A 0,00 ° 60,000 Hz	150,0 mA 180,00 ° 60,000 Hz
I B	2,000 A -120,00 ° 60,000 Hz	150,0 mA 60,00 ° 60,000 Hz
I C	2,000 A 120,00 ° 60,000 Hz	150,0 mA -60,00 ° 60,000 Hz
Tempo máx. do estado	3,000 s	40,00 s

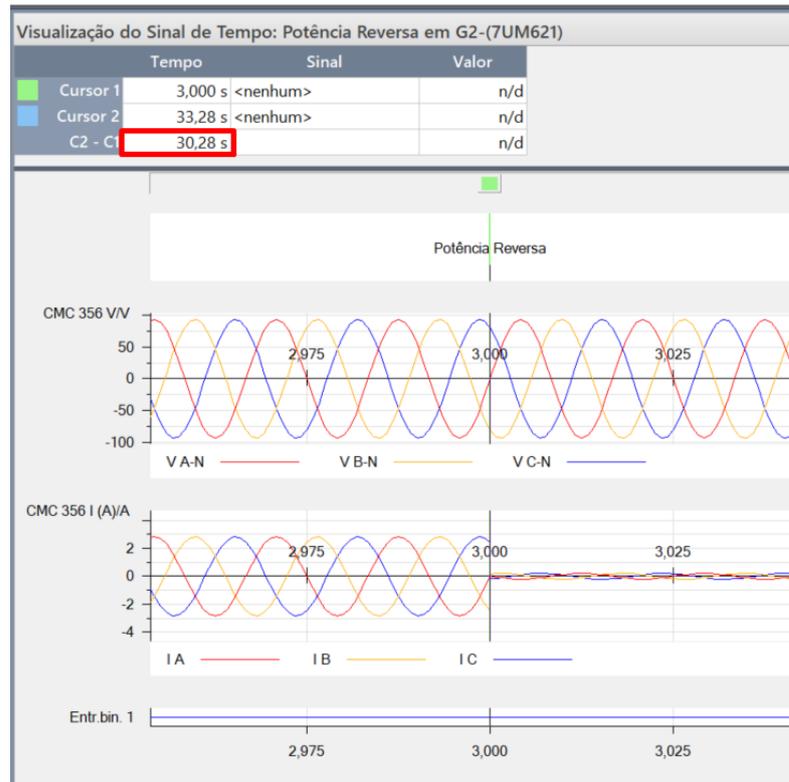
Fonte: próprio autor

Calcula-se então:

$$S_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N = \sqrt{3} \cdot 115 \cdot 0,15 = 29,87 \text{ VA}$$

Como o valor calculado é maior que os 0,60% do ajuste, após uma temporização de 30,00 s selecionada no relé, a proteção de potência reversa atua, como vê-se na Figura 14.

Figura 14 - Atuação temporizada após detecção de potência reversa



Fonte: próprio autor

Assim, atesta-se o funcionamento da função de proteção de potência reversa.

#### 4.5 Energização indevida (50, 27)

A função de proteção de energização indevida é uma combinação do elemento de sobrecorrente instantâneo e do elemento de subtensão como vê-se na Figura 15.

Figura 15 - Ajustes de energização indevida

No.	Settings	Value
7101	Inadvertent Energisation	ON
7102	I Stage Pickup	2,5 A
7103	Release Threshold U1<	69,0 V
7104	Pickup Time Delay T U1<	5,00 sec
7105	Drop Out Time Delay T U1<	1,00 sec

Display additional settings

Fonte: próprio autor

Os elementos monitoram a operação do gerador quando o mesmo ainda não atingiu as condições nominais e também o monitoram na condição operacional 0. O elemento de subtensão está ajustado para 60,00% da tensão nominal, caso a tensão permaneça abaixo deste valor (69,00 V) por mais de 5,00 s, a proteção de energização indevida atua. Já o elemento de sobrecorrente está ajustado para um trip instantâneo ao detectar correntes acima de 2,50 A antes de entrar em operação nas condições nominais. Quando atinge a operação nominal a função é desabilitada.

Na Figura 16 entende-se que o elemento de subtensão não superará os 5,00 s do ajuste, uma vez que o elemento de sobrecorrente irá atuar instantaneamente após os 3,00 s chamados no teste de “Estado Normal”.

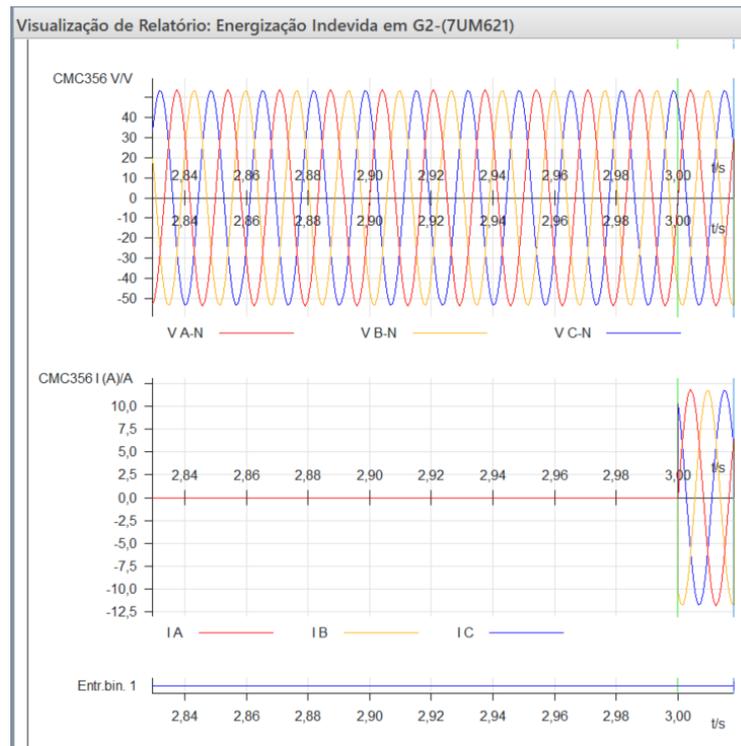
Figura 16 - Valores de injeção para teste de energização indevida

<b>Ajustes do teste</b>		
<b>Estado</b>	<b>Estado Normal</b>	<b>Energização Indevida</b>
<b>V A-N</b>	38,00 V 0,00 ° 60,000 Hz	38,00 V 0,00 ° 60,000 Hz
<b>V B-N</b>	38,00 V -120,00 ° 60,000 Hz	38,00 V -120,00 ° 60,000 Hz
<b>V C-N</b>	38,00 V 120,00 ° 60,000 Hz	38,00 V 120,00 ° 60,000 Hz
<b>I A</b>	0,00 A 0,00 ° 60,000 Hz	8,400 A 0,00 ° 60,000 Hz
<b>I B</b>	0,00 A -120,00 ° 60,000 Hz	8,400 A -120,00 ° 60,000 Hz
<b>I C</b>	0,00 A 120,00 ° 60,000 Hz	8,400 A 120,00 ° 60,000 Hz
<b>Tempo máx. do estado</b>	3,000 s	30,00 s

Fonte: próprio autor

Atesta-se o funcionamento correto da função de proteção de energização indevida como vê-se na Figura 17.

Figura 17 - Atuação do elemento de sobrecorrente para energização indevida

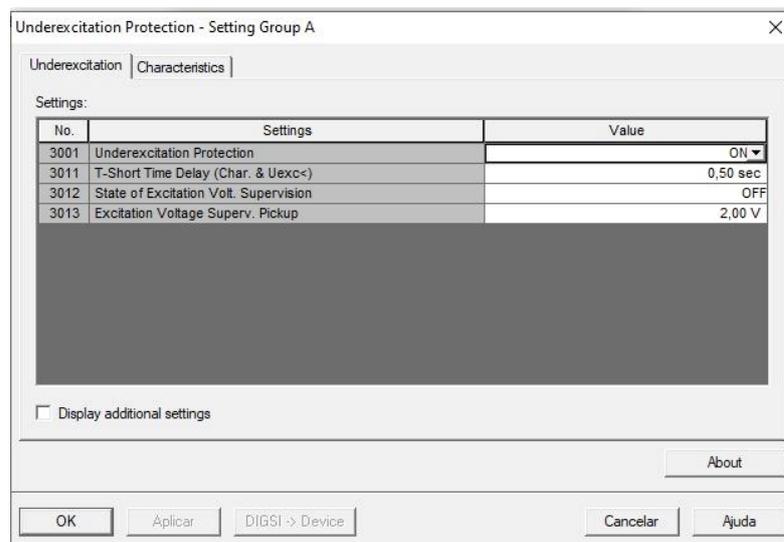


Fonte: próprio autor

#### 4.6 Perda de excitação (40)

Para o teste de perda de excitação, ajustou-se que a função de proteção atuaria depois de uma temporização de 0,50 s após detectar perda de excitação, como pode-se ver na Figura 18.

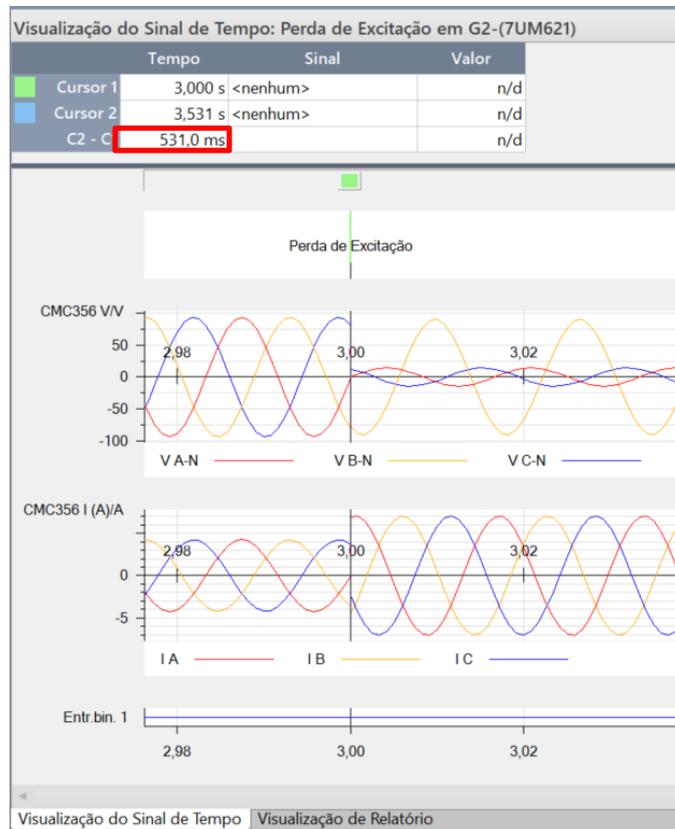
Figura 18 - Ajuste da temporização de perda de excitação



Fonte: próprio autor

Na Figura 19 observa-se a injeção de condições nominais durante 3,00 s, após esse período injetou-se uma condição de perda de excitação e a função atuou após a temporização ajustada.

Figura 19 - Validação da função perda de excitação



Fonte: próprio autor

## 4.7 Sobrecorrente

### 4.7.1 Sobrecorrente de tempo inverso (51V)

A função de proteção de sobrecorrente de tempo inverso (ANSI 51V) é utilizada como uma medida de proteção de backup contra curto-circuito, a proteção diferencial atua como função principal no gerador da PCH Mucuri. Os ajustes utilizados na função de proteção mencionada podem ser observados na Figura 20.

Figura 20 - Ajustes função de proteção 51V

Inverse O/C Time Protection - Setting Group A		
IDMT		
Settings:		
No.	Settings	Value
1401	Inverse O/C Time Protection Ip	ON
1402	Ip Pickup	0,60 A
1404	TIME DIAL: TD	4,50
1406	ANSI Curve	Inverse
1407	Voltage Influence	Voltage controlled
1408	U< Threshold for Release Ip	86,3 V

Fonte: próprio autor

A partir das características dos ajustes determinados por estudos de proteção configura-se os parâmetros para realização do teste como mostra a Figura 21. Esta configuração determina uma curva característica com faixas de tolerância.

Figura 21 - Configuração dos parâmetros de sobrecorrente de tempo inverso

Parâmetros da proteção de sobrecorrente

Parâmetros do Relé Elementos

Tipo de elemento selecionado: Fase (1 Elemento / 1 Ativo)

Ativo	Nome do Elemento	Característica de disparo	I Pick-up	Absoluto	Tempo	Relação de	Direção
<input checked="" type="checkbox"/>	51V Fase	ANSI NI	0,130 Iref	650,0 mA	4,500	0,950	Para frente

Definir Característica do Elemento Definir Comportamento Direcional do Elemento Ver Característica Resultante

Característica

Nome: ANSI NI

$$t(s) = \frac{A \cdot Td + K1}{M^P \cdot Q} + B \cdot Td + K2$$

M = Iteste/Ipickup  
Td = Índice de Tempo

A: 8,934 s B: 179,7 ms  
P: 2,094 Q: 1,000  
K1: 0,00 s K2: 0,00 s

I pick-up: 0,130 Iref Índice de tempo: 4,500

Limites de faixa

Ativo

I mín: 0,000 Iref t mín: 0,00 s  
I máx: +∞ Iref t máx: +∞ s

Característica reset

Off  
 Tempo definido tr: 1,000 s  
 Tempo inverso R: 13,50 s  
T: 2,000

$$tr(s) = \frac{R \cdot Td}{1 - M^T}$$

Salvar Como Definido pelo Usuário

Fonte: próprio autor

Realiza-se então disparos com valores de corrente definidos, para cada disparo há um tempo de atuação determinado pela curva característica configurada. Para aprovação do teste todos os

disparos efetuados precisam constar na curva característica ou então dentro da faixa de tolerância. Observa-se na Figura 22 que todos os disparos se encontram dentro da faixa de tolerância.

Figura 22 - Resultado do teste de proteção da função 51V

Visualização de Relatório: Sobrecorrente 51V em G2-(7UM621)

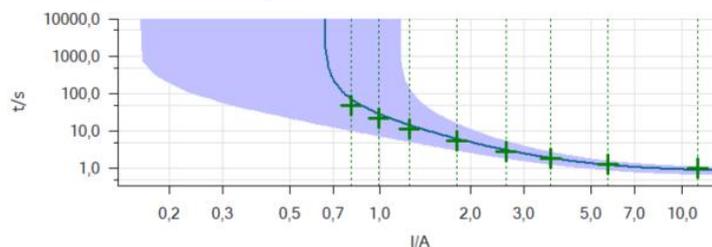
**Resultados de Teste Curtos:**

Tipo	Relativo A	Fator	Magnitude	Ângulo	tnom	tatual	Desvio	Sobrecarga	Resultado
L1-L2-L3	51V Fase	1,236	803,6 mA	-75,00 °	72,70 s	47,90 s	-34,11 %	Não	Aprovado
L1-L2-L3	51V Fase	1,520	988,2 mA	-75,00 °	29,45 s	22,73 s	-22,82 %	Não	Aprovado
L1-L2-L3	51V Fase	1,928	1,253 A	-75,00 °	14,42 s	11,80 s	-18,15 %	Não	Aprovado
L1-L2-L3	51V Fase	2,769	1,800 A	-75,00 °	6,216 s	5,444 s	-12,42 %	Não	Aprovado
L1-L2-L3	51V Fase	4,017	2,611 A	-75,00 °	3,121 s	2,903 s	-6,993 %	Não	Aprovado
L1-L2-L3	51V Fase	5,650	3,673 A	-75,00 °	1,908 s	1,884 s	-1,270 %	Não	Aprovado
L1-L2-L3	51V Fase	8,727	5,673 A	-75,00 °	1,244 s	1,335 s	7,305 %	Não	Aprovado
L1-L2-L3	51V Fase	17,40	11,31 A	-75,00 °	910,3 ms	1,054 s	15,80 %	Não	Aprovado

Fonte: próprio autor

Na Figura 23 vê-se graficamente a curva característica bem como os disparos efetuados dentro da faixa de aprovação.

Figura 23 - Localização dos disparos na curva característica resultante



**Estado do teste:**  
 8 de 8 pontos testados.  
 8 pontos aprovados.  
 0 pontos reprovados.

**Teste aprovado**

Fonte: próprio autor

#### 4.7.2 Sobrecorrente instantânea (50)

O teste da função de proteção de sobrecorrente instantânea funciona de forma semelhante com a descrita na função de proteção de sobrecorrente com tempo inverso, porém, como ela não possui temporização variável com o valor de corrente, cada disparo acima do ajuste respeita a temporização de 0,10 s como vê-se na Figura 24.

Figura 24 - Ajustes de sobrecorrente instantânea

No.	Settings	Value
1301	Overcurrent Time Protection I>>	ON
1302	I>> Pickup	3,86 A
1303	T I>> Time Delay	0,10 sec
1304	Phase Direction	Reverse
1305	Line Angle	60 °

Fonte: próprio autor

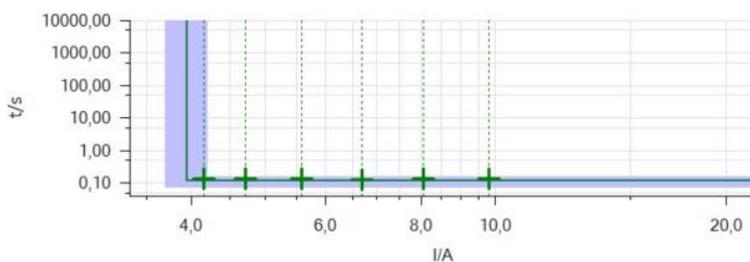
Na Figura 25 observa-se o resultado do teste de proteção para cada disparo efetuado bem como sua localização na curva. Nota-se que todos os pontos na curva possuem o mesmo valor no eixo Y, como era de se esperar, uma vez que, para esta função de proteção, qualquer valor de corrente acima de 3,86 A, deve atuar com a mesma temporização.

Figura 25 - Resultado do teste para os disparos efetuados e suas respectivas localizações no gráfico I x t

Visualização de Relatório: Sobrecorrente 50 em G2-(7UM621)

#### Resultados de Teste Curtos:

Tipo	Relativo A	Fator	Magnitude	Ângulo	tnom	tatual	Desvio	Sobrecarga	Resultado
L1-L2-L3	Sobrecorrente 50	1,053	4,158 A	n/d	120,0 ms	136,6 ms	13,83 %	Não	Aprovado
L1-L2-L3	Sobrecorrente 50	1,194	4,716 A	n/d	120,0 ms	134,9 ms	12,42 %	Não	Aprovado
L1-L2-L3	Sobrecorrente 50	1,412	5,578 A	n/d	120,0 ms	134,6 ms	12,17 %	Não	Aprovado
L1-L2-L3	Sobrecorrente 50	1,695	6,696 A	n/d	120,0 ms	126,6 ms	5,500 %	Não	Aprovado
L1-L2-L3	Sobrecorrente 50	2,040	8,057 A	n/d	120,0 ms	136,5 ms	13,75 %	Não	Aprovado
L1-L2-L3	Sobrecorrente 50	2,485	9,816 A	n/d	120,0 ms	134,7 ms	12,25 %	Não	Aprovado



#### Estado do teste:

6 de 6 pontos testados.  
6 pontos aprovados.  
0 pontos reprovados.

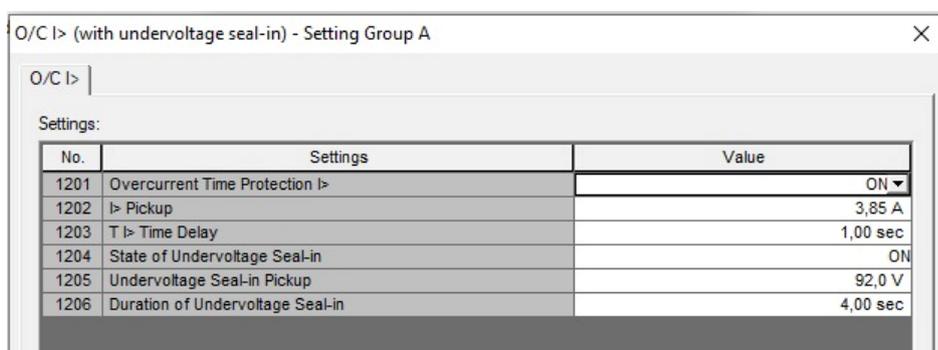
Teste aprovado

Fonte: próprio autor

### 4.7.3 Sobrecorrente com selo de tensão (51)

Esta função de proteção funciona com um elemento de sobrecorrente e um selo de subtensão. Ela permite que o *pick-up* ultrapassado e que retorna a uma condição normal na presença de subtensão, ajustado para um valor abaixo da mais baixa tensão admissível fase-fase durante a operação, permaneça selado pelo tempo determinado no ajuste de duração da subtensão. Para casos em a temporização exceda o ajuste sem retorno para a condição inicial, o *pick-up* é mantido normalmente. Os ajustes para esta função de proteção podem ser vistos na Figura 26.

Figura 26 - Ajustes para sobrecorrente com selo de subtensão

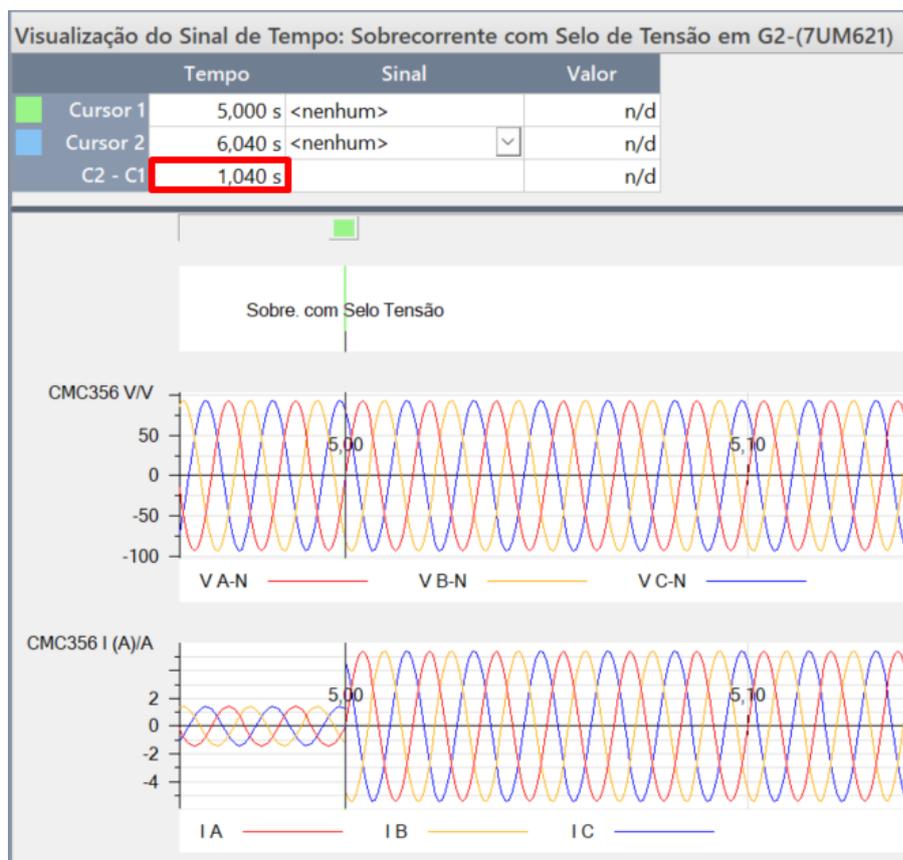


No.	Settings	Value
1201	Overcurrent Time Protection I>	ON
1202	I> Pickup	3,85 A
1203	T I> Time Delay	1,00 sec
1204	State of Undervoltage Seal-in	ON
1205	Undervoltage Seal-in Pickup	92,0 V
1206	Duration of Undervoltage Seal-in	4,00 sec

Fonte: próprio autor

Vê-se na Figura 27 que havia uma injeção em condição normal e após 5,00 s iniciou-se uma injeção com valor de corrente além do permitido pelo ajuste, que em caso real seccionaria o circuito após o período de 1,00 s.

Figura 27 - Conclusão do teste de sobrecorrente com selo de subtensão

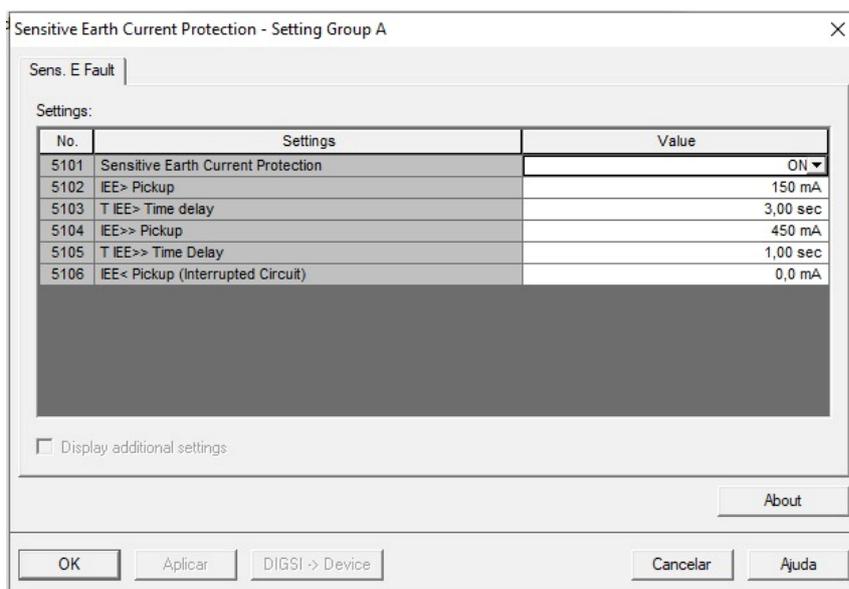


Fonte: próprio autor

#### 4.7.4 Sobrecorrente de neutro (falta a terra sensitiva) (51N)

A proteção de corrente à terra sensitiva pode ser usada para detectar faltas à terra tanto no estator quanto no enrolamento do rotor do gerador. Pode-se observar na Figura 28 os valores de *pick-up* e temporização ajustados no relé.

Figura 28 - Ajustes da função de proteção de falta à terra sensitiva



Fonte: próprio autor

Para atestar seu funcionamento realizou-se disparos para ambos os ajustes (150 mA e 450 mA) e observou-se a atuação de acordo com as respectivas temporizações como vê-se na Figura 29. Nota-se que I#1 é equivalente ao ajuste de 150 mA e I#2 ao ajuste de 450 mA.

Figura 29 - Visualização dos testes aprovados

Visualização de Relatório: Sobrecorrente Neutro em G2-(7UM621)

**Resultados de Teste Curtos:**

Tipo	Relativo A	Fator	Magnitude	Ângulo	tnom	tatual	Desvio	Sobrecarga	Resultado
L1-E	I#1	1,229	184,3 mA	-60,00 °	3,000 s	3,190 s	6,317 %	Não	Aprovado
L1-E	I#1	1,750	262,4 mA	-60,00 °	3,000 s	3,186 s	6,183 %	Não	Aprovado
L1-E	I#1	2,559	383,9 mA	-60,00 °	3,000 s	3,185 s	6,170 %	Não	Aprovado
L1-E	I#2	1,231	553,9 mA	-60,00 °	1,000 s	1,177 s	17,67 %	Não	Aprovado
L1-E	I#2	1,628	732,7 mA	-60,00 °	1,000 s	1,178 s	17,77 %	Não	Aprovado
L1-E	I#2	2,038	917,2 mA	-60,00 °	1,000 s	1,180 s	17,99 %	Não	Aprovado

Fonte: próprio autor

#### 4.8 Sobrecarga (49)

A função de proteção de sobrecarga está atrelada a capacidade térmica do gerador. Desta forma, quando a corrente máxima permitida para sobrecarga é superada, inicia-se a temporização baseada na característica térmica da máquina. Vê-se na Figura 30 o fator K responsável pelo cálculo da corrente máxima permitida.

Figura 30 - Ajustes da função de proteção de sobrecarga

Thermal Overload Protection - Setting Group A		
Them Overload   Temp. Input		
Settings:		
No.	Settings	Value
1601	Thermal Overload Protection	ON
1602	K-Factor	0,62
1603	Thermal Time Constant	600 sec
1604	Thermal Alarm Stage	91 %

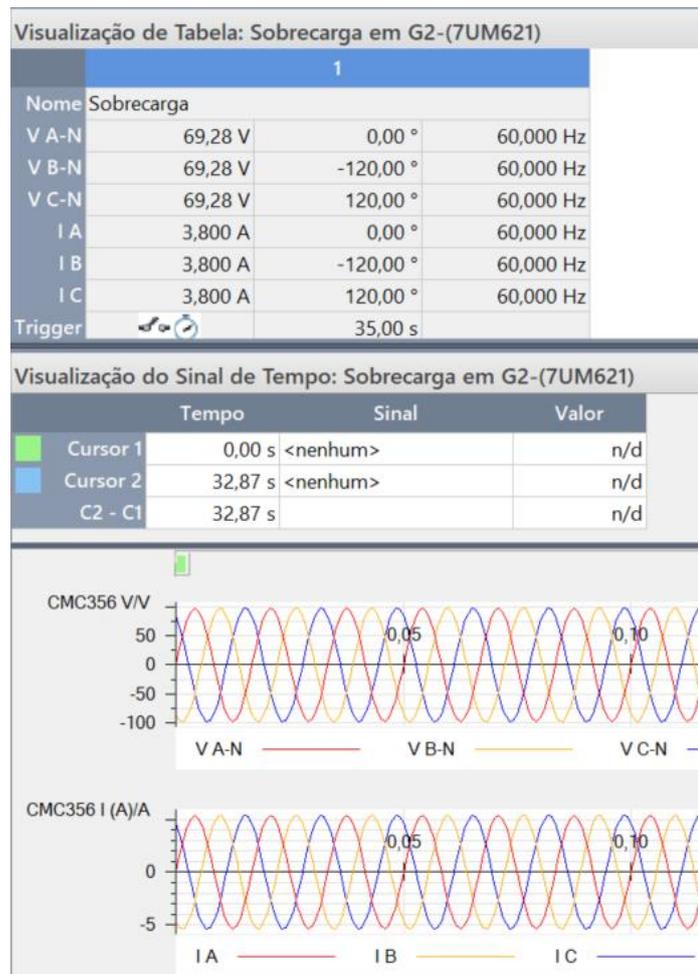
Fonte: próprio autor

O cálculo dessa corrente máxima permitida dá-se pela seguinte equação:

$$I_{max} = k \cdot I_N = 0,62 \cdot 5 = 3,1 A$$

Observa-se então na Figura 31 uma injeção superior a máxima permitida, caracterizando uma sobrecarga. Para este teste em específico a constante de tempo foi alterada para 30,00 s. Após a detecção de sobrecarga, a temporização é aguardada e, em seguida, é efetuado o disparo do trip onde a mala de injeção é parada finalizando o teste e atestando o funcionamento correto da função de proteção.

Figura 31 - Injeção da corrente de sobrecarga



Fonte: próprio autor

#### 4.9 Sequência negativa (46)

A corrente de *pick-up* para a função de proteção de sequência negativa está ajustada para 60,00% da corrente nominal, como observa-se na Figura 32. Desta forma,  $I_2 = 0,6 \cdot 5 = 3 \text{ A}$ .

Figura 32 - Ajustes da função de proteção ANSI 46

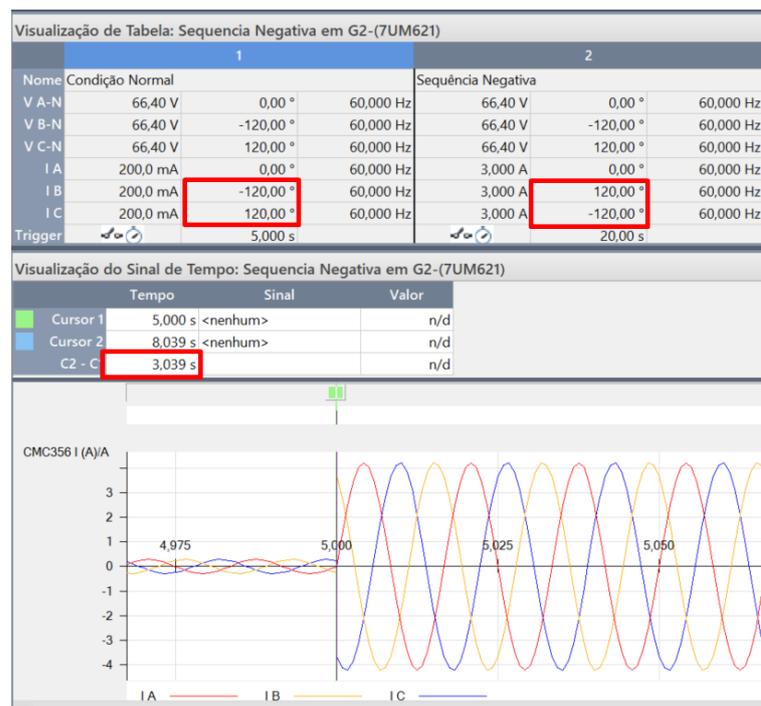
Unbalance Load (Negative Sequence) - Setting Group A

No.	Settings	Value
1701	Unbalance Load Protection	ON
1702	Continously Permissible Current I2	5,9 %
1703	Warning Stage Time Delay	20,00 sec
1704	Negativ Sequence Factor K	14,0 sec
1705	Time for Cooling Down	4000 sec
1706	I2>> Pickup	60 %
1707	T I2>> Time Delay	3,00 sec

Fonte: próprio autor

Observa-se na Figura 33 uma pré-falta inicial com sequência positiva durante 5,00 s simulando uma condição normal, após esse período, o valor de  $I_2$  foi a 60,00% da nominal e os ângulos das fases B e C foram tombados, simulando uma falta de sequência negativa. Após a temporização parametrizada no ajuste de 3,00 s, o relé efetuou o disparo e parou a mala de injeção.

Figura 33 - Injeções de pré-falta e corrente de sequência negativa



Fonte: próprio autor

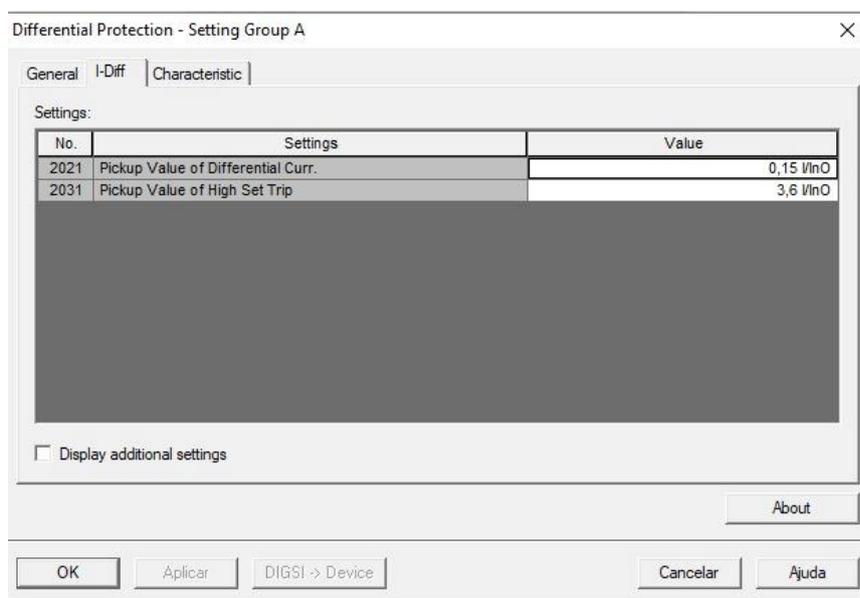
Atesta-se o pleno funcionamento da função de proteção de sequência negativa.

#### 4.10 Diferencial (87)

A função de proteção diferencial é testada efetuando uma busca com valores de corrente definidos a partir da corrente nominal e verificando a localização destes pontos na curva característica, de forma semelhante ao teste de sobrecorrente.

Os ajustes de *pick-up* vistos na Figura 34 são definidos pelo estudo de proteção da planta, a partir desses ajustes configura-se o teste de proteção da OMICRON no módulo *Diff Operating Characteristic*.

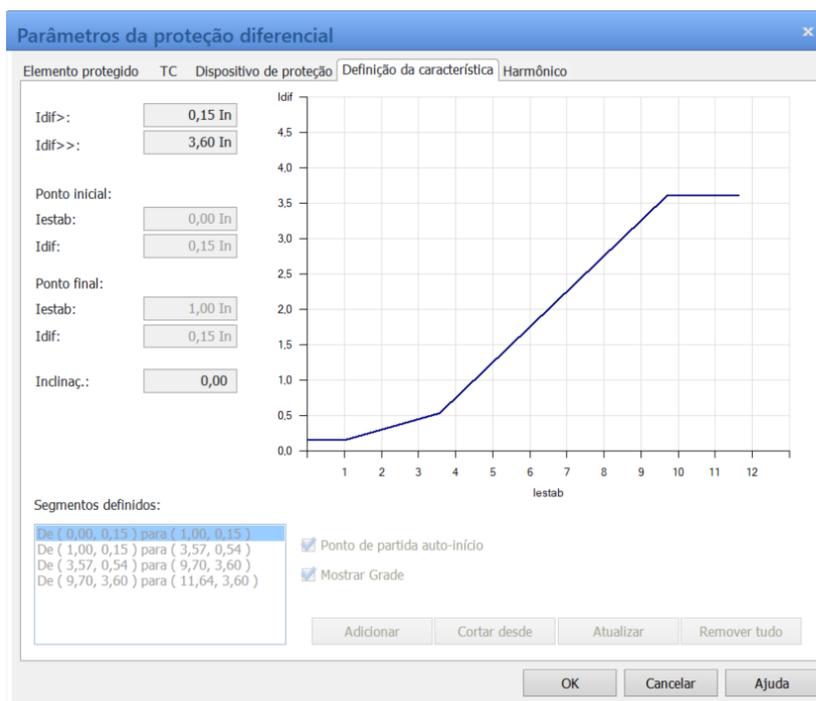
Figura 34 - Ajustes proteção diferencial



Fonte: próprio autor

Gera-se no *software* uma curva característica de operação da função de proteção a partir dos parâmetros de diferencial, como observa-se na Figura 35.

Figura 35 - Curva característica da proteção diferencial



Fonte: próprio autor

A curva característica é uma relação entre a corrente de restrição (ou estabilização) e a corrente diferencial. Essa corrente de restrição é uma corrente adicional considerada pelo relé para aumentar a sua estabilidade durante condições transitórias ou anormais que não são falhas reais. Para que haja aprovação no teste, os pontos de busca precisam estar sobre a curva característica ou dentro de uma faixa de tolerância. Pode-se ver na Figura 36 os pontos testados.

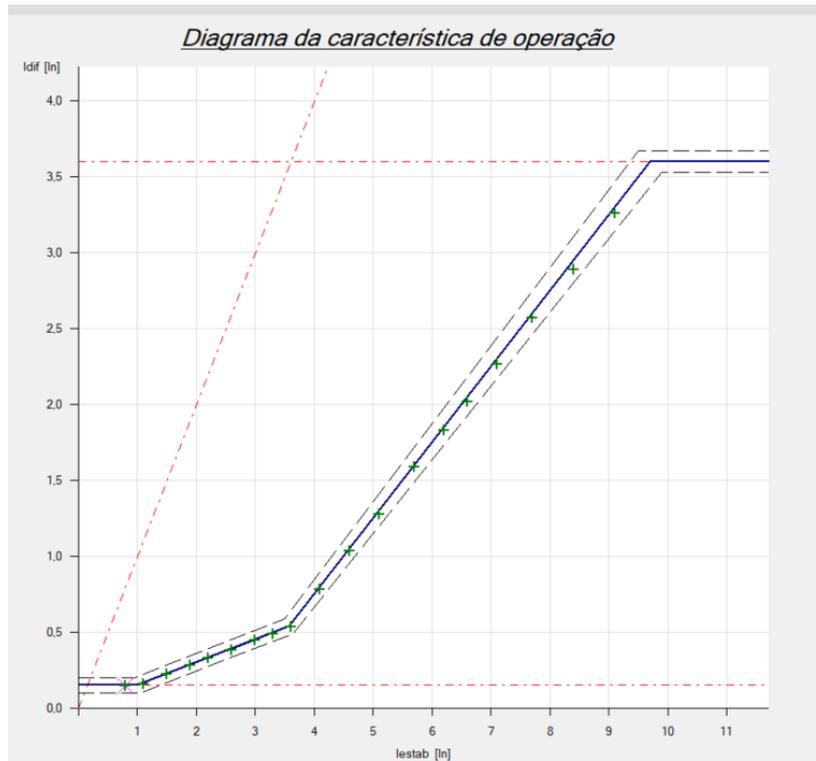
Figura 36 - Diferentes pontos de busca entre os valores do ajuste de diferencial

Iestab	Idif Nominal	Idif real	Desv (%)	Desv (abs)	Teste de verificação	Estado	Resultado
0,80 In	0,150 In	0,147 In	-2,08 %	-0,0031 In		Testado	Aprovado
1,10 In	0,165 In	0,162 In	-2,18 %	-0,0036 In		Testado	Aprovado
1,50 In	0,226 In	0,222 In	-1,59 %	-0,0036 In		Testado	Aprovado
1,90 In	0,287 In	0,283 In	-1,26 %	-0,0036 In		Testado	Aprovado
2,20 In	0,332 In	0,329 In	-1,08 %	-0,0036 In		Testado	Aprovado
2,60 In	0,393 In	0,382 In	-2,76 %	-0,0108 In		Testado	Aprovado
3,00 In	0,454 In	0,450 In	-0,81 %	-0,0037 In		Testado	Aprovado
3,30 In	0,499 In	0,488 In	-2,25 %	-0,0112 In		Testado	Aprovado
3,60 In	0,555 In	0,533 In	-4,01 %	-0,0222 In		Testado	Aprovado
4,10 In	0,805 In	0,784 In	-2,49 %	-0,0201 In		Testado	Aprovado
4,60 In	1,054 In	1,033 In	-2,04 %	-0,0215 In		Testado	Aprovado
5,10 In	1,304 In	1,274 In	-2,27 %	-0,0295 In		Testado	Aprovado
5,70 In	1,603 In	1,586 In	-1,10 %	-0,0177 In		Testado	Aprovado
6,20 In	1,853 In	1,827 In	-1,41 %	-0,0262 In		Testado	Aprovado
6,60 In	2,053 In	2,017 In	-1,71 %	-0,0352 In		Testado	Aprovado
7,10 In	2,302 In	2,265 In	-1,61 %	-0,0370 In		Testado	Aprovado
7,70 In	2,602 In	2,571 In	-1,17 %	-0,0305 In		Testado	Aprovado
8,40 In	2,951 In	2,891 In	-2,05 %	-0,0605 In		Testado	Aprovado
9,10 In	3,300 In	3,256 In	-1,35 %	-0,0445 In		Testado	Aprovado

Fonte: próprio autor

Na Figura 37 vê-se a curva característica resultante com a localização dos pontos testados presentes dentro da faixa de tolerância delimitada pelas linhas tracejadas no entorno da curva. Desta forma, pode-se afirmar que a função de proteção diferencial está em bom funcionamento.

Figura 37 - Curva característica resultante com a localização dos pontos testados



Fonte: próprio autor

## 6 CONCLUSÃO

A proposta deste trabalho foi testar as funções de proteção do relé 7UM62 da Siemens presente na planta da PCH Mucuri. Para testá-las, o relé foi submetido a uma série de injeções de corrente e tensão com valores que pudessem sensibilizar suas funções de proteção, uma por vez, para garantir o funcionamento de cada uma delas, individualmente.

O gerador utilizado para os testes foi o G2, pois foi encontrado um problema na porta de comunicação do gerador G1, que apresentava conexão intermitente, impedindo que o teste fosse realizado neste gerador de forma ininterrupta.

Os resultados demonstraram que todas as funções de proteção do gerador G2 atuaram conforme esperado, dentro das faixas de tolerância estabelecidas. Os testes confirmaram que os ajustes e parâmetros configurados nos relés, baseados em estudos de proteção, são eficazes para detectar e atuar em condições anormais, garantindo a segurança e a estabilidade do sistema elétrico.

É importante salientar que o gerador possui outras funções de proteção além das apresentadas neste trabalho que foram testadas e aprovadas, porém, por falta de informações dos estudos de proteção que contemplavam tais funções, não foi possível realizar uma análise completa e explicativa das razões pelas quais o teste foi aprovado. Desta forma, optou-se por não incluí-las.

Embora o trabalho se trate de um estudo de caso específico à PCH Mucuri, há uma série de outros relés de proteção, de diferentes fabricantes, capazes de proteger outros tipos de elementos. Na própria planta da usina há relés dedicados a proteção de transformadores, linhas de transmissão e serviços auxiliares. A aplicação de testes para as funções de proteção destes relés e sua devida documentação por si só já constitui material interessante para trabalhos futuros.

O acesso a planta foi permitido durante o período do trabalho, pois o autor principal atuava como funcionário da empresa durante todo o período do estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 5674: Manutenção de Edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2012

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). (2020). Resolução Normativa nº 694, de 28 de maio de 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/biblioteca/normas-regulamentacoes#/detalhe/7656?publico-alvo=consumidores-geracao-distribuicao-transmissao&categoria=normas-normativos&assunto=normas-resolucoes>>. Acesso em: [20/03/2024].

Eletrobras. (2015). Manual de Subestações Elétricas. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/elb/data/Pages/LUMIS63D5C23DPTBRIE.htm>>. Acesso em: [20/03/2024].

Mamede Filho, João - Proteção de sistemas elétricos de potência /João Mamede Filho, Daniel Ribeiro Mamede. - [Reimpr.]. - Rio de Janeiro: LTC, 2013.

Mardegan, C.. Capítulo XVII – A seletividade. Revista digital – O Setor Elétrico. Ed. 64, Maio, 2011. Disponível em: [https://www.osetoelettrico.com.br/wp-content/uploads/2011/06/Ed64\\_fasc\\_seletividade\\_cap17.pdf](https://www.osetoelettrico.com.br/wp-content/uploads/2011/06/Ed64_fasc_seletividade_cap17.pdf). Acesso em: [25/07/2024].

Santos, A. K. X.; Fernandes Júnior, D.. Análise do comportamento de transformadores de potencial capacitivos frente a sobretensões transitórias em sistemas elétricos de potência. 2009.

SIEMENS. Proteção Multifunção de Máquina 7UM62. SIEMENS, 2010.

Silva, L. R. J. R.; Shayani, R. A.; De Oliveira, M. A. G.. Análise comparativa das fontes de energia solar fotovoltaica, hidrelétrica e termelétrica, com levantamento de custos ambientais. In: Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS. 2018.

## APÊNDICE A – IMAGENS DA ATIVIDADE NA PCH

Figura 38 - Área externa PCH Mucuri



Fonte: próprio autor

Figura 39 - Conjunto de unidades geradoras



Fonte: próprio autor

Figura 40 - Relé de proteção analisado 7UM62 do gerador G2



Fonte: próprio autor

Figura 41 - Estabelecendo comunicação com o relé de proteção



Fonte: próprio autor

Figura 42 - Teste de proteção em andamento



Fonte: próprio autor