

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**RODRIGO SEIFERT**

**RELÉ AUTOALIMENTADO EM PROTEÇÃO DE SUBESTAÇÕES UNITÁRIAS  
DISTRIBUÍDAS DE GERAÇÃO CENTRALIZADA**

**CURITIBA**

**2022**

**RODRIGO SEIFERT**

**RELÉ AUTOALIMENTADO EM PROTEÇÃO DE SUBESTAÇÕES UNITÁRIAS  
DISTRIBUÍDAS DE GERAÇÃO CENTRALIZADA**

**Self-supplied protection relay for unitary substation at centralized generation**

Dissertação de mestrado apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, do Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador(a): Prof. Dr. Paulo Cícero Fritzen

**CURITIBA**

**2022**



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

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

23/02/2022 17:49

-



**Ministério da Educação**  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Curitiba**



RODRIGO SEIFERT

**RELÉ AUTOALIMENTADO EM PROTEÇÃO DE SUBESTAÇÕES UNITÁRIAS DISTRIBUÍDAS DE GERAÇÃO CENTRALIZADA**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Automação E Sistemas De Energia.

Data de aprovação: 23 de Fevereiro de 2022

Prof Paulo Cicero Fritzen, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Eduardo Machado Dos Santos, Doutorado - Fundação Universidade Federal do Pampa - Unipampa (Unipampa)

Prof Thiago De Paula Machado Bazzo, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 23/02/2022.

[https://sistemas2.utfpr.edu.br/dpls/sistema/aluno01/mpCADEDocsAssinar.pcTelaAssinaturaDoc?p\\_pesscodnr=8056&p\\_cadedocpescodnr=23695...](https://sistemas2.utfpr.edu.br/dpls/sistema/aluno01/mpCADEDocsAssinar.pcTelaAssinaturaDoc?p_pesscodnr=8056&p_cadedocpescodnr=23695...)

Dedico este trabalho à minha esposa Lisandrea,  
meus filhos Manuela e Rafael que entenderam  
minha necessidade de incrementar conhecimentos,  
me permitindo aplicar horas da família à este  
crescimento pessoal.

## **AGRADECIMENTOS**

A vida é como um trem que vai parando de estação em estação. A cada parada, pessoas entram e pessoas saem desta enorme composição chamada minha vida, da qual sou o maquinista e conferente.

Certamente com todos tive a oportunidade de conversar e intercambiar conhecimentos, nem todos deixaram seu bilhete de embarque para meu controle, alguns tomaram a atenção especial e me deixaram o seu comprovante de embarque, outros permanecem na viagem da minha vida.

Da minha posição na locomotiva vejo alguns passageiros os quais destaco, porém, agradeço a todos que me auxiliaram direta ou indiretamente a chegar a mais uma estação, a do crescimento pessoal.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Cícero Fritzen, pela disponibilidade, sabedoria e serenidade com que me ajudou a redirecionar o trem.

Aos professores da UTFPR que me deram o prazer de participar de momentos de transferência de conhecimento, como um passeio guiado pelo saber.

À coordenação do Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia, da UTFPR.

Enfim, a todos os que, por algum motivo, contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

O mercado Brasileiro de geração Fotovoltaica centralizada demanda uma redução nos custos dos equipamentos, sem perder a segurança e a continuidade de operação. Para atender a esta solicitação dos fabricantes de subestações unitária pré fabricadas é necessário a aplicação de relés que garantam a proteção dos equipamentos conectados em média tensão independente de tensão auxiliar. Este trabalho estuda a aplicação de relés autoalimentados com painéis de média tensão, verificando, por meio de ensaio o funcionamento do relé autoalimentado, assim como sua aplicabilidade em uma usina de geração centralizada, comprovando a adequada aplicabilidade destes relés.

**Palavras-chave:** geração de energia fotovoltaica; relés de proteção, inversores elétricos.

## ABSTRACT

The Brazilian market for centralized photovoltaic generation demands an equipment costs reduction, without losing operational safety and continuity. To meet this request, from prefabricated unitary substations manufacturers, is necessary to apply relays that guarantee the protection, of the equipment connected in medium voltage, regardless of the auxiliary voltage. This document present the study of self-powered relay application with medium voltage switchgear, verifying, through testing, the functioning of the self-powered relay, as well as its applicability in a centralized generation plant.

**Keywords:** photovoltaic power generation; protective relays; electric inverters.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema Elétrico de Potência .....	13
Figura 2 - Skid.....	16
Figura 3 - UFV Pirapora com destaque para SE principal e PCS .....	16
Figura 4 - Gerald Pearson, Daryl Chapin, e Calvin Fuller .....	19
Figura 5 - Cenários futuros da energia.....	20
Figura 6 - PCS com 2 inversores .....	27
Figura 7 - Eletrocentro com transformador encapsulado a vácuo .....	28
Figura 8 - SKID solar com 1 inversor.....	29
Figura 9 - Unifilar exemplo de cascadeamento de PCS .....	29
Figura 10 - AIS x GIS apresentados na mesma escala .....	31
Figura 11 - Terminação de cabo desconectável DIN 400 .....	33
Figura 12 - Esquema do IED autoalimentado.....	39
Figura 13 - Atuador para RAA. ....	41
Figura 14 - Representação elétrica do TC.....	43
Figura 15 - Sistema de teste proposto .....	49
Figura 16 - Mala de Teste Omicron utilizada no ensaio .....	54
Figura 17 - Teste " chão de fábrica " do relé autoalimentado .....	55
Figura 18 – Detalhe dos pontos de atuação função 51 .....	58
Figura 19 - Detalhe dos pontos de atuação função 50.....	60



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Evolução da capacidade anual de fotovoltaica instalada anual.....	21
Gráfico 2 -Evolução da fonte Solar Fotovoltaicas no Brasil.....	23
Gráfico 3 - Energia Fotovoltaica no mercado regulado do Brasil.....	24
Gráfico 4 - Característica dielétrica do SF6 .....	31
Gráfico 5 -Corrente de curto-circuito em gerador de indução .....	35
Gráfico 6 - Corrente na saída do inversor fotovoltaico durante uma falta .....	36
Gráfico 7 - Tensão nos terminais dos inversores da central geradora .....	37
Gráfico 8 - Curva de saturação do TC .....	44
Gráfico 9 - Forma de onda do TC saturado.....	46
Gráfico 10 - Tempo de atuação dependente da tensão do atuador e curto .....	50
Gráfico 11 - Função 51 com alimentação externa (RAAF) .....	57
Gráfico 12 - Função 51 auto alimentado (RAAF) .....	58
Gráfico 13 - - Função 50 alimentação externa (RAAF) .....	59
Gráfico 14 - Função 50 autoalimentado (RAAF) .....	59
Gráfico 15 - Coordenograma da UFV em estudo .....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo de dimensões PMT AIS e GIS .....	30
Tabela 2 - Correntes mínimas de alimentação dos RAA.....	40
Tabela 3 - Correntes mínimas para comunicação .....	41
Tabela 4 - Dados do relé auxiliar usado no ensaio .....	49
Tabela 5 - Dados do Relé Fanox em teste .....	50
Tabela 6 - Tabela de seleção dos TCs do relé Fanox em teste .....	51
Tabela 7 - Parâmetros das funções 50/51 e 50/51N.....	52
Tabela 8 - Correntes injetadas no RAAF .....	53
Tabela 9 - Resultado das injeções de corrente no RAAF .....	60

## LISTA DE SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais S.A.
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GC	Geração Centralizada
IRENA	Agência Internacional de Energias Renováveis
MME	Ministério de Minas e Energia
MT	Média Tensão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico do brasileiro
ONU	Organização das Nações Unidas
PMT	Painel de Média Tensão
PRODEEM	Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios
SECI	Subestação Compacta Integrada
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
UFV	Usina Fotovoltaica

## LISTA DE ACRÔNIMOS

AIS	Painel de Média Tensão isolado a AR
CAPEX	Custos de Investimentos
FRT	Manutenção da corrente durante a falta - Fault Ride Through
GIS	Painel de Média Tensão isolado a gás SF6
Icc	Corrente de curto-circuito
OPEX	Custos de Operação
PCS	Subestação Conversora de Potência – Power Conversion Substation
PPC	Sistema de Controle dos Geradores da Usina - Power Plant Controller
RAA	Relés de Proteção Autoalimentados
SKID	Chassis Metálico para suportar equipamentos
SOTF	Inicialização do relé durante uma falta - Switch On to Fault
String	Série de Módulos Fotovoltaicos
UPS	Sistema de Energia Ininterrupto

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 MOTIVAÇÃO .....	14
1.2 ESTUDO .....	16
1.3 OBJETIVOS .....	17
1.3.1 Objetivo Geral .....	17
1.3.2 Objetivos Específicos .....	17
1.4 CONTRIBUIÇÃO .....	17
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	18
<b>2 CONTEXTUALIZAÇÃO</b> .....	<b>19</b>
2.1 PARTICIPAÇÃO DO BRASIL .....	21
2.2 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NO BRASIL .....	22
2.2.1 Origem da Energia Fotovoltaica no Brasil .....	22
2.2.2 Projetos e Futuro .....	24
2.3 INFLUÊNCIA DA DG NO SEP .....	24
2.4 CONSIDERAÇÕES .....	25
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA</b> .....	<b>26</b>
3.1 COMPOSIÇÃO DE UMA GC .....	26
3.2 EXECUÇÃO MECÂNICA DA PCS .....	28
3.3 PAINÉIS DE MÉDIA TENSÃO (PMT) .....	29
3.4 PAINÉIS DE MÉDIA TENSÃO EM SF6 (PMT GIS) .....	30
3.5 INVERSOR DE FREQUÊNCIA DURANTE O CURTO-CIRCUITO .....	35
3.6 RELÉ AUTOALIMENTADO .....	38
3.6.1 Funcionamento do RAA .....	39
3.7 TRANSFORMADOR DE CORRENTE .....	42
3.8 CONSIDERAÇÕES .....	46
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>47</b>
4.1 PROBLEMA EM ESTUDO E SISTEMA PROPOSTO .....	47
4.1.1 Garantia de Proteção .....	47
4.1.2 Sistema Proposto .....	48
4.2 MATERIAIS E MÉTODOS .....	48
4.3 ENSAIO .....	52
4.4 CONSIDERAÇÕES .....	55
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>56</b>
5.1 ENSAIO RAAF .....	56
5.2 CONSIDERAÇÕES .....	61
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	<b>62</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>64</b>

## 1 INTRODUÇÃO

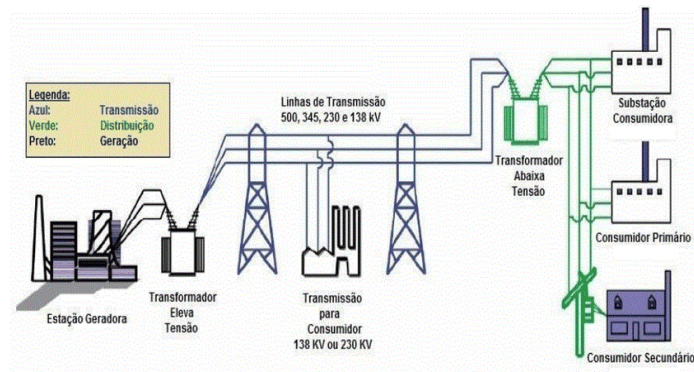
“Convencionou-se a chamar Sistema Elétrico de Potência (SEP) ao conjunto de infraestruturas responsáveis pela Geração, Transmissão e Distribuição” (NETTO, 2008).

A figura 1 exemplifica o SEP onde a Transmissão conecta as usinas de Geração ao sistema de Distribuição e a outros sistemas de importação de exportação de energia. A Distribuição conecta os diversos consumidores ao sistema de Transmissão realizando as adequações de tensão cabíveis (STEVENSON JR, 1975)

A geração de energia elétrica no Brasil foi constituída a partir da produção hidrelétrica, consolidando um parque gerador que aproveitou as grandes quantidades de águas interiores (bacias e rios) que o país possui, sob controle estatal a partir da década de 1950, perdurando até meados da década de 1990, quando no governo do presidente Fernando Henrique Cardoso, foram alteradas as leis de concessões e o setor elétrico foi aberto ao setor privado via privatizações (LEME, 2018).

Este sistema interconectado não apenas permite a manutenção do suprimento de energia elétrica nos seus diversos pontos de consumo em diferentes níveis de tensão, como também o torna mais robusto para manutenção dos padrões de nível de tensões e frequência. Em contrapartida o sistema também contribui para alimentar faltas que possam ocorrer em seus diversos pontos, inclusive nas usinas fotovoltaicas.

**Figura 1 - Sistema Elétrico de Potência**



**Fonte: (SILVA, AMÉRICO, et al., 2017)**

O grande apelo social por energias limpas para suprir cargas elétricas é uma demanda mundial e no Brasil não é diferente. O mercado fotovoltaico brasileiro tem

experimentado um crescimento vertiginoso nos últimos anos, não somente nas instalações de micro e minigeração, com capacidade de até 5MVA para solares, que atingiram patamares de 7GW em 2021, como também nas instalações de grande porte, denominadas de Geração Centralizada (GC), com usinas fotovoltaicas com dezenas e centenas de MVA, já acumulando 3,8 GW no mesmo período (ABSOLAR, 2021).

Este crescimento vertiginoso só não se apresentou ainda maior, dado a crise econômica vivenciada pelo Brasil no final da década de 2010 e gerada pela pandemia do Covid-19. Contrapondo-se a estes fatores, a energia fotovoltaica vem em seguidos leilões de energia, promovidos pelo governo Brasileiro, batendo recordes de redução de custo, os quais fomentam a necessidade de equipamentos e soluções de engenharia mais racionais e econômicas possíveis, reduzindo os custos de investimentos (CAPEX) dos empreendimentos em um primeiro momento, porém sem incorrer em prejuízo aos custos de operação (OPEX) da usinas fotovoltaicas (VELOSO; SILVA JR, 2021).

Nesta esteira de melhor aproveitamento de recursos observa-se um crescimento na potência a ser entregue por estas usinas GC no sistema elétrico, com maiores capacidade de transformação (SUN; QIN, 2016) e conseqüente maior nível de Corrente de curto-circuito (Icc) nas instalações. Porém com menor impacto no SEP, se comparado com a mesma potência entregue por geração descentralizada (KHATI; SABRI, 2021), impacto este ainda não significativo no Brasil.

Este crescimento na Icc e potência das usinas fotovoltaicas de GC impactam na definição dos Transformadores de Corrente, nos relés associados e na alimentação destes relés, nos diminutos painéis de média tensão, com tecnologia de isolamento plena em SF6. A análise de uma garantia de funcionamento do relé de proteção no quesito alimentação auxiliar dos relés é o alvo deste trabalho.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

A construção de empreendimentos fotovoltaicos de grande porte, é caracterizada pela intensa aplicação de capital em um curto cronograma de obras, devendo compatibilizar os desenvolvimentos técnicos e projeções de custo dos

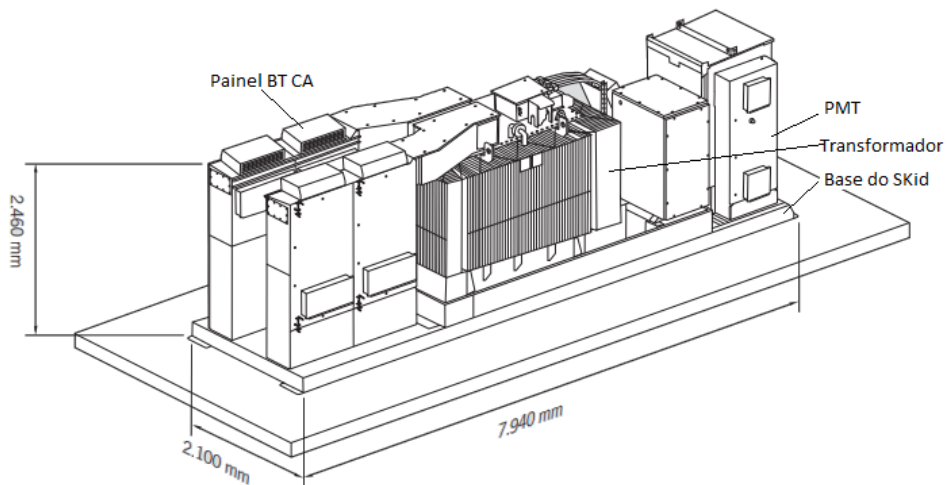
componentes principais (GUARNIERI, 2017). A utilização de soluções pré-fabricadas segue em processo de consolidação no segmento elétrico brasileiro em virtude de suas diversas vantagens de modularização, montagem e testes em fábrica. Acelerando a instalação e energização das subestações em campo, onde os prazos são curtos e a disponibilidade de mão de obra qualificada pode ser reduzida (GESUALDI, 2015), podendo a solução ser aplicada mesmo em Alta Tensão como bem ilustrado em Assis *et al.*, (2019) onde a aplicação para a concessionária de energia do estado de Minas Gerais de subestação metálicas pré-fabricadas é apresentada.

Indubitavelmente o mais icônico elemento da subestação unitária fotovoltaica é o inversor, se solução de inversor central, ou o conjunto destes na solução por linhas (String). Porém outros equipamentos compõe a subestação unitária, a exemplo do transformador elevador para média tensão (MT) e os dispositivos de proteção e controle embarcados no painel de média tensão (PMT). Este conjunto de equipamentos se abrigados em uma caixa metálica serão denominados de Eletrocentro, ou se executados em versão de uso externo e fixados sob uma base metálica serão denominados de SKID (GESUALDI, 2015). Independente do modelo construtivo adotado este conjunto de equipamentos é denominado Power Conversion Substation (PCS), a figura 2 apresenta uma PCS no modelo SKID, onde a compactação demanda a utilização de PMT compacto, de uso externo, o que favorece o emprego de PMT isolados em gás SF<sub>6</sub>, como será futuramente apresentado.

As usinas de GC ocupam grandes extensões territoriais, a exemplo da usina fotovoltaica (UFV) Pirapora 300MW, mostrada na figura 3, no estado de Minas Gerais, composto por 10 usinas de 30MW ocupando uma área de 800 hectares, conforme informado no Plano de Controle Ambiental elaborado na data de início de implantação da UFV (PRETI, 2016). As distâncias envolvidas são elevadas, o que torna inviável alimentar com tensão auxiliar da subestação, de conexão da UFV ao SEP, as diversas PCSs que compõe a GC. Ainda na figura 3, a PCS destacada se encontra a 4700m em linha reta da subestação coletora, distância incompatível para um ramal de tensão auxiliar em baixa tensão, sendo econômica e tecnicamente inviável.

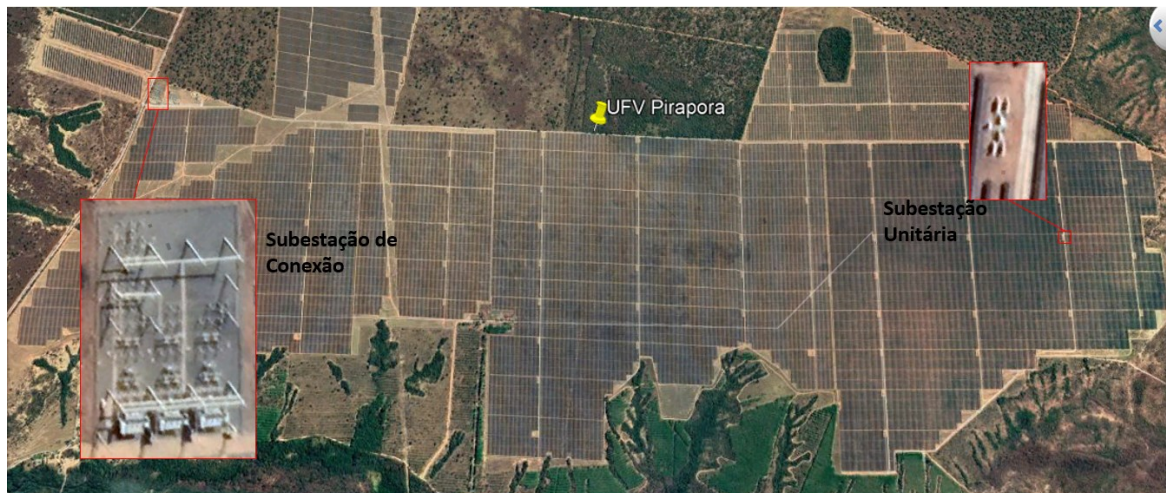


**Figura 2 - Skid**



Fonte: adaptado de Ingecom SUN, Ingeteam Power Technology, S.A.

**Figura 3 - UFV Pirapora com destaque para SE principal e PCS**



Fonte Google Earth

## 1.2 ESTUDO

Dado ao acima exposto, o suprimento de tensão auxiliar para alimentação do relé de proteção da PCS, que poderia ser suprido pelo retificador/inversor e banco de baterias da subestação de conexão, deve ser originado de sistema de energia ininterrupto (UPS) (RUFATO JR., 2006), existente nos inversores centralizados ou nos painéis de baixa tensão na hipótese de uso de inversores *string*. Esta tensão alimentará sistemas de comunicação da PCS e principalmente o relé de proteção.

O presente trabalho visa validar a utilização de relés autoalimentados (RAA) na PCS como forma de mitigar o tempo de falha de MT na PCS na eventualidade de não haver tensão auxiliar, em virtude de defeito do equipamento responsável por fornecê-la ou por falha humana (SHUGUANG; QIULAN; WENSHENG, 2011).

Os dimensionamentos de condutores, transformadores de corrente e demais equipamentos inerentes a uma UFV, não fazem parte deste estudo, assim como possível ensaio de cabos, transformadores de corrente ou painéis.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo geral validar a aplicação de RAA para proteção de PCS em usinas fotovoltaicas (UFV).

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Estudo do funcionamento do relé autoalimentado;
- Simulação de comando de atuação do RAA na condição Alimentado e Autoalimentado;
- Verificar se as especificações propostas pelo fabricante do RAA são atendidas;
- Analisar e avaliar as condições de atuação do RAA em ambas as condições de alimentação; e
- Validar a utilização de RAA em UFV.

### 1.4 CONTRIBUIÇÃO

Como apresentado no item 1.1, o Inversor de Frequência é o componente mais observado nos sistemas fotovoltaicos, dividindo a atenção com os módulos fotovoltaicos. Porém, cabe ao disjuntor de MT a proteção do sistema de mesma tensão que conecta esta geração ao SEP. Instalações de Alta e Média Tensão

usualmente tem seus relés de proteção dependentes de serviços de energia auxiliar por meio de bancos de baterias em instalações de maior porte (PALAFOX, 2003) ou pequenas UPS em sistemas industriais de menor porte. Ainda que o RAA seja um equipamento bem difundido e aplicado nas redes de distribuição subterrâneas, na Europa e em alguns países da América do Sul é pouco difundido no Brasil com poucas referências bibliográficas para proteção em soluções de energias renováveis (GARCÍA, LUJÁN e MASOLLER, 2005).

Este trabalho apresenta um estudo dos componentes de uma PCS, delineando a necessidade de utilização do RAA. Por meio de ensaio, demonstra a aplicabilidade do RAA, para proteção dos conjunto transformador e inversor na PCS.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este Capítulo mostrou que o segmento de fotovoltaicas em geração centralizada envolve grandes investimentos e áreas ocupadas, que conflitam com as usuais topologias de sistemas usuais de proteção alimentados por banco de baterias instalado na casa de comando da subestação. No Capítulo seguinte, Capítulo 2, será realizada uma contextualização abordando a necessidade mundial de convergir à energias renováveis e dos termos geração distribuída e geração centralizada, seguindo ao Capítulo 3 que fará a fundamentação teórica dos equipamentos que compõe um PCS usada em GC, destacando o PMT aplicado e sua tecnologia, com o objetivo de reforçar o motivo de utilização de RAA. A característica dos inversores fotovoltaicos durante faltas no circuito CA é revisada e uma breve explanação sobre definição dos transformadores de corrente (TC), lembrando não ser o alvo deste trabalho o estudo de curto-circuito de uma UFV. No Capítulo 4 é apresentada metodologia do ensaio e seus resultados. Cabe Capítulo 5 a análise dos resultados do ensaio e verificação da aplicabilidade do RAA em uma UFV. Finalmente o Capítulo 6, apresenta a conclusão do trabalho com sugestões de próximos estudos.

## 2 CONTEXTUALIZAÇÃO

A demanda por uma solução para substituir as pouco confiáveis baterias secas, usada pela Bell Telecom para sistemas de telefonia, impulsionou no início da década de 1950 os trabalhos de Daryl Chapin, Gerald Pearson e Calvin Fuller, figura 4, no desenvolvimento de células fotovoltaicas, culminando em 25 de abril de 1954 com sua apresentação ao mercado (PERLIN, 2003).

**Figura 4 - Gerald Pearson, Daryl Chapin, e Calvin Fuller**



fonte: PERLIN, 2003

Embora este desenvolvimento tenha recebido uma aplicação pouco usual no seu início, dado ao seu elevado custo, equipando satélites espaciais segundo WILLEKE e RÄUBER (2012), é na atualidade um dos motores da geração de energia vislumbrada para o futuro, que busca por alternativas mais limpas de energia, em um mercado com demanda crescente de energia para conforto, processos produtivos e transporte da população (BOHM, 2000).

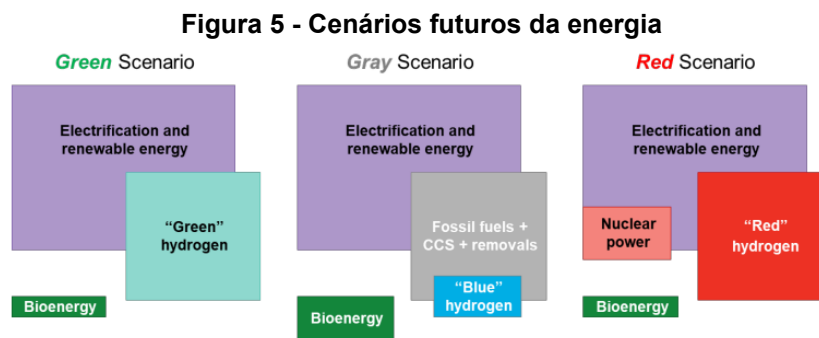
Em dezembro de 2015, na COP21, em Paris diversos países, incluindo o Brasil, acordaram em reduzir as emissões de gases de efeito estufa, limitando o aumento médio de temperatura global a 2°C, quando comparado a níveis pré-industriais (ONU, 2015).

Diversas entidades, incluindo empresas do setor financeiro e petroquímicas, orientam o desenvolvimento de seus projetos para um cenário que atenda o acordo de Paris. Recentemente a empresa Bloomberg Finance LP (BLOOMBERG FINANCE L.P, 2021), publicou seu relatório apresentando três cenários para a geração de energia até 2050, data na qual se espera atingir o equilíbrio de emissões

e recuperação de gases de efeito estufa, denominado de net-zero, conforme mostrado na figura 5.

Neste relatório são criados três cenários com distintas condições de composição da matriz energética para o futuro, sendo estes:

- Cenário Verde - apresenta uma condição de eletricidade limpa com a utilização de hidrogênio retirado da água por eletrolise alimentada por usinas solares e eólicas, aplicando-o a indústria e transporte pesado, denominado *green-hydrogen*.
- Cenário cinza – prediz um futuro com sistemas de captura de carbono pós combustão com produção de hidrogênio por gás natural para aplicações não estacionárias, porém continua com previsão de energias renováveis.
- Cenário vermelho – segue o caminho do cenário verde, porém com a aplicação de pequenas centrais nucleares para produção de hidrogênio, denominado *red hydrogen*.

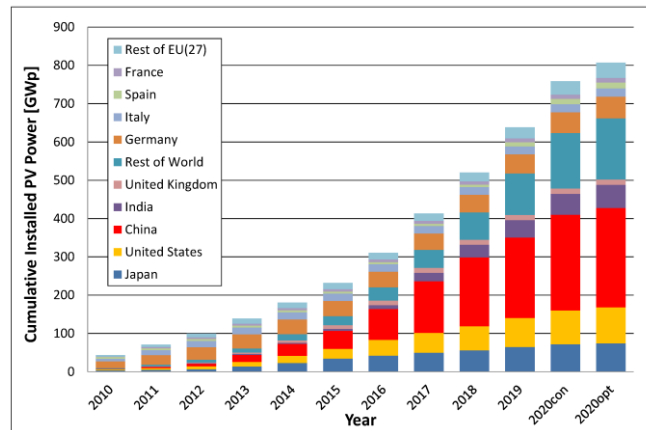


fonte: BLOOMBERG FINANCE L.P 2021

Estes cenários preveem o aumento do uso das energias renováveis, sendo referendados no relatório *Scenario Comparisons Benchmarking Key Indicators for Clean Energy Transitions* da Agencia Internacional de Energias Renováveis (IRENA) publicado em agosto de 2021 (CARVAJAL *et al.*, 2021).

Este aumento das energias renováveis pode ser observado no gráfico 1, que ilustra o crescimento exponencial da capacidade de geração fotovoltaica instalada no mundo.

**Gráfico 1 - Evolução da capacidade anual de fotovoltaica instalada anual**



fonte (JÄGER-WALDAU, 2020)

## 2.1 PARTICIPAÇÃO DO BRASIL

O Brasil se destaca de vários outros países por ser um dos com a maior participação de energias renováveis na sua matriz energética, onde mais de 60% das fontes que suprem o consumo de energia do Brasil são provenientes de energias renováveis, destacando o baixo percentual em fontes de energia nuclear. Esta condição é devida a alta participação de fontes de energia hídrica que representa 63,93% do total gerado (KORZENIEWICZ, 2021).

O bom desempenho do Brasil em fontes renováveis não o desobriga de participar do esforço mundial em pró do meio ambiente, no Acordo de Paris durante a COP 21, o compromisso assumido pelo Brasil prevê a redução de 37% das emissões de gases de efeito estufa até 2025 e uma redução de 43% até 2030, considerando o ano base de 2005 (NEHRING *et al.*, 2021). Com visão no segmento de energias renováveis deve ocorrer a expansão da participação de fontes, excluindo a hidráulica, de 28% para 33% até 2030 (BRASIL, 2015).

## 2.2 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NO BRASIL

### 2.2.1 Origem da Energia Fotovoltaica no Brasil

O estudo sobre o fenômeno fotovoltaico inicia no Brasil em 1974 com uma tese de mestrado sobre células de silício segundo (FERREIRA, 1993), permanecendo as aplicações quase em sua totalidade restrita à pesquisas até 2012.

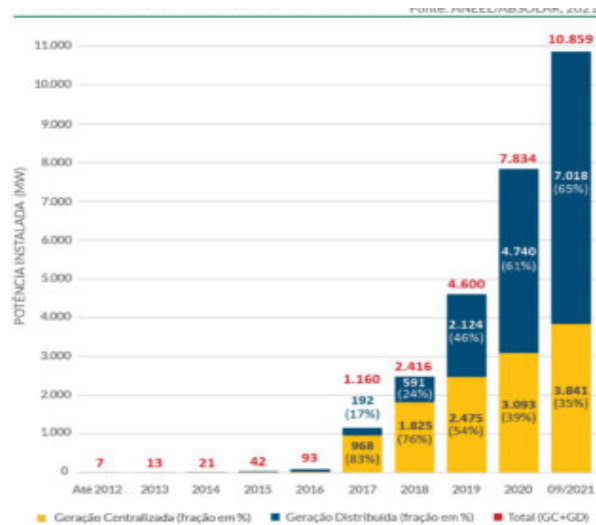
O lançamento da Resolução 482/2012 da ANEEL, constitui um importante marco regulatório para as definições de modelo de acesso das centrais geradoras de energia elétrica ao SEP, do sistema de compensação de energia elétrica, de estipular a forma de como se realizar a medição de energia consumida ou fornecida à rede e das responsabilidades em caso de danos ao sistema elétrico (VEIGA *et al.*, 2020). A resolução também define microgeração e minigeração, denominadas Geração distribuída (GD), a partir dos limites de potência instalada, como segue:

- Microgeração Distribuída: Central geradora de energia elétrica cuja potência instalada é de até 75 kW e os custos para a adequação do sistema de medição são de responsabilidade da concessionária.
- Minigeração Distribuída: Central geradora de energia elétrica cuja potência instalada é superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW, ou 3MW para hidráulicas, sendo os custos para a adequação do sistema de medição de responsabilidade do consumidor.

Três anos após a RN 482/2012 ter sido aprovada, o Brasil contava com apenas 478 sistemas fotovoltaicos instalados (GOMES *et al.*, 2018), com a atualização deste regulamento em novembro de 2015, na Resolução Normativa nº 687/2015, os créditos de energia gerada passaram a ser válidos por 60 meses, na unidade geradora ou em outra unidade do mesmo consumidor, denominado “autoconsumo remoto” (ANEEL, 2015). Adicionalmente neste mesmo ano foi editado o convenio ICMS 16, que permitia isenção de ICMS sobre energia elétrica que retornava da concessionária ao consumidor (GOMES *et al.*, 2018).

Tais novidades são de grande impacto no desenvolvimento da GD, como podemos observar na gráfico 2, onde a potência instalada em tem um crescimento exponencial, mantendo-o firme mesmo com a desvalorização do Real frente ao Dólar, iniciada em 2018 e acentuada em 2020.

**Gráfico 2 -Evolução da fonte Solar Fotovoltaicas no Brasil**



fonte: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/> (outubro de 2021)

Esta perda de poder aquisitivo do Real, para compra de módulos e inversores, é compensada pela redução dos valores destes componentes no mercado internacional, os módulos fotovoltaicos tiveram uma redução de preço em 32% enquanto inversores reduziram 18% no mesmo período (ZHANG, 2020).

Outro reflexo desta redução de custos dos equipamentos, é percebida no valor de venda da energia nos leilões promovidos pelo governo federal. Leilões que são o ponto de partida para as grandes usinas fotovoltaicas denominadas de geração centralizada (GC).

Este declínio dos valores dos componentes não é perceptível apenas no exterior mas também no mercado brasileiro, como bem observado no Plano Decenal de Expansão de Energia 2029, da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), pertencente ao Ministério de Minas e Energia (MME) (EPE, 2019).

Para Os leilões de energia fotovoltaica, promovidos pelo ministério de minas e energia, são o ponto de partida para as grandes usinas fotovoltaicas, denominadas de geração centralizada (GC). Usinas estas idealizadas em

A tecnologia solar fotovoltaica vem apresentando uma queda dos preços no Brasil com uma velocidade surpreendentemente alta, o que pôde ser observado nos últimos leilões, representando uma redução prevista de 30% no CAPEX de uma UFV.

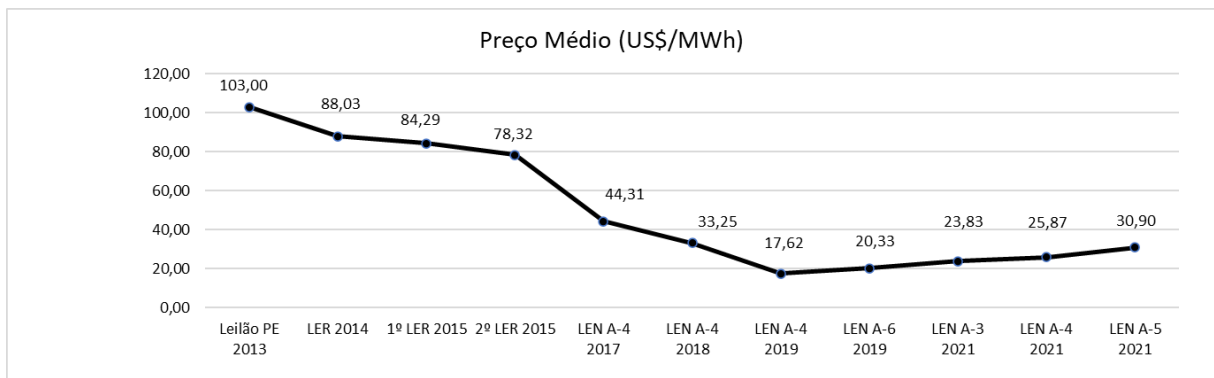


### 2.2.2 Projetos e Futuro

Os projetos de GC têm participado dos leilões de energia do mercado regulado promovido pelo Governo Federal desde o ano de 2013. No último leilão estudado, o A-5/2021, dos 1.694 projetos cadastrados com 93.856 MW de capacidade instalada, as usinas eólicas e fotovoltaica foram as que apresentaram os maiores números de projetos, com 690 e 835 cada, respectivamente, com significativa redução do valor do MWh como demonstrado no gráfico 3.

O relatório da EPE publicado em 2021, segue na mesma linha do anterior, confirmando a fotovoltaica como importante fonte para a matriz energética do Brasil, atualmente com mais de 2.000 MW de capacidade de GC em operação. Este relatório já considera a viabilidade da operação conjunta da eólica e da fotovoltaica, capturando os efeitos da dispersão espacial e complementariedades diárias, esta operação conjunta é denominada de hibridização (EPE, 2021).

**Gráfico 3 - Energia Fotovoltaica no mercado regulado do Brasil**



fonte: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/> (outubro de 2021)

### 2.3 INFLUÊNCIA DA DG NO SEP

Sistemas com alta penetração de GD já foram alvo de estudo de diversos trabalhos e amplamente publicados (ALBOAOUH; MOHAGHEGHI, 2020). O tema apresenta relevância pois a variabilidade da potência injetada, dada a condição de insolação ou vento, assim como da bidirecionalidade do fluxo nas instalações que também são consumidoras ocasiona dificuldade de manutenção dos padrões de rede. Na Europa, em países como Irlanda, Dinamarca e Alemanha, o percentual da produção de eletricidade a partir de fontes renováveis em um ano, ultrapassaram os 20%, como resultado os níveis de injeção de potência podem ser muito elevados, a

exemplo de Portugal, onde se chegou a 100% do suprimento ser de renováveis, em determinados momentos, podendo ameaçar a estabilidade elétrica do SEP (BAYRAM, 2019).

Vale ressaltar que tais estudos além de numerosos, comparam as variações da GD causadas por nuvens como conexão e desconexão de grandes cargas industriais, também apresentam que os inversores não contribuem sensivelmente para o aumento do nível de curto (BARAN *et al.*, 2012).

## 2.4 CONSIDERAÇÕES

Neste capítulo, foi apresentada a necessidade mundial de redução de gases de efeito estufa, bem como o fato do Brasil participar deste desafio global. Mostrou-se que o mercado mundial proporciona e se beneficia da redução de custos dos equipamentos, observando que o aumento da participação da fotovoltaica GD dificulta a manutenção dos padrões de rede. Foi diferenciado geração distribuída (GD), com suas duas subcategorias, da geração centralizada (GC) bem como evidenciado que a GC demanda uma conexão mais robusta com o SEP e que esta pode ser compartilhada com a eólica ou outras fontes.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

#### 3.1 COMPOSIÇÃO DE UMA GC

Para compor uma UFV é necessária uma grande extensão territorial que comportará os diversos módulos fotovoltaicos e outros diversos equipamentos, como exemplificado por Lumbrelas *et al.*(2020).

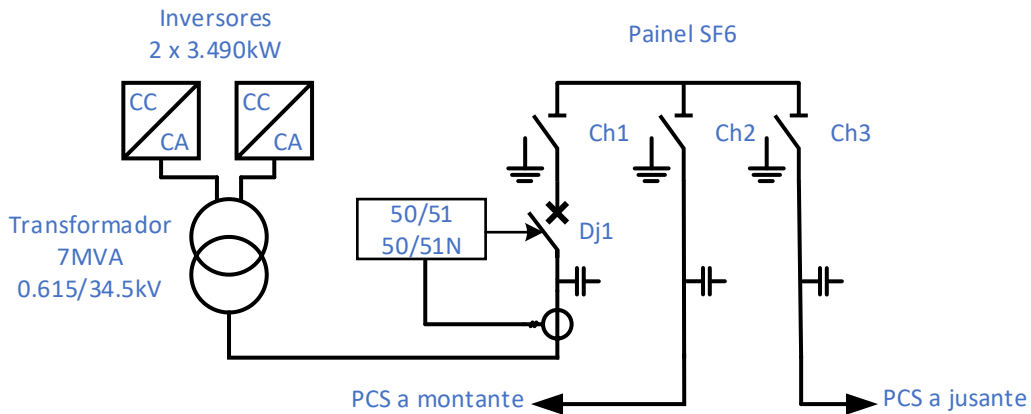
A definição da arquitetura de uma GC em sua grande maioria passa por uma análise de CAPEX e OPEX muito cuidadosa, que somado a valores dos equipamentos, principalmente o conjunto inversor, delinearão o modelo a ser implementado, com inversor central ou distribuídos, denominados de *string inverter*, que contempla diversos inversores de menor potência. Também, entram na definição da arquitetura da GC os módulos fotovoltaicos com suas características e os sistemas de *tracker*, equipamento que rotaciona os módulos conforme o giro da terra (VOGEL, 2016). Na data deste trabalho, o autor observa que, ressalvada uma excelente oferta comercial para *string inverter*, a grande maioria dos GCs em construção está aplicando inversores centrais, dominados por fabricantes Chineses, não viabilizando a participação de alemães e mesmo espanhóis que até recentemente eram muito presentes no segmento.

Observada esta tendência de mercado, boa parte dos investimentos de GC correntes no Brasil são configuradas como mostrado na Figura 6, um conjunto de módulos fotovoltaicos é conectado em série a uma caixa concentradora, denominada *string box*, que associada a outras iguais, alimentam a uma ou mais entradas CC de um inversor. Se definida a arquitetura para *string inverter*, serão aplicados diversos inversores com potências de centenas de quilowatts (kW). Na opção de inversor central, um ou dois inversores de alguns megawatts (MW). O inversor será o responsável por alimentar o transformador elevador, de baixa frequência e alta potência, em baixa tensão. A relação de transformação será definida pela característica do inversor e tensão de rede interna da GC (LOUTAN *et al.*, 2017).

O transformador por sua vez conecta-se a um PMT que alimentará a rede coletora interna da GC, este conjunto de equipamentos que configura uma

subestação elevadora unitária, comumente denominada de PCS. A construção da PCS pode ser abrigada, em eletrocentros, ou de uso externo, montada sobre um chassi denominado de SKID.

**Figura 6 - PCS com 2 inversores**



Fonte: o autor

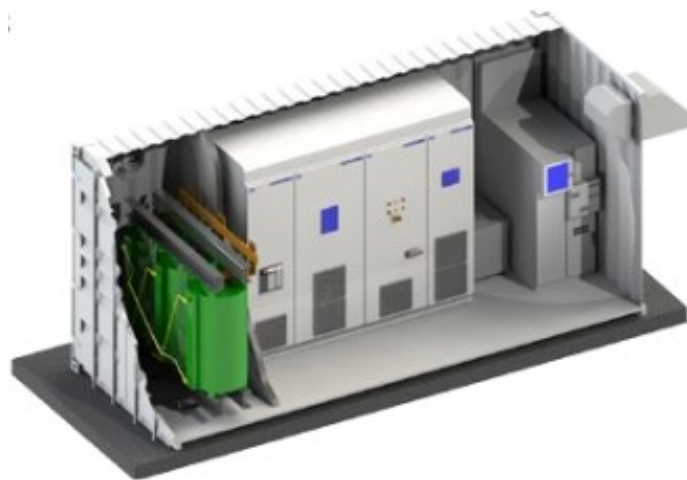
Para a rede coletora da UFV, não raramente é verificado um circuito em média tensão com distancias de quilômetros, como anteriormente mostrado na figura 3 do Capítulo 1. Observado este distanciamento, entre as PCS e a subestação elevadora de conexão ao SEP, é economicamente aconselhado utilizar a maior tensão possível nas redes coletoras. Adicionalmente as redes coletoras devem ser o mais protegidas possível para evitar danos, bem como evitar que gerem sombreamento nos módulos fotovoltaicos. Portanto, é raro o emprego de religadores em poste e redes aéreas, sendo utilizados painéis de média tensão e redes subterrâneas com cabos isolados. Ainda visando o menor CAPEX possível, utiliza-se quase na totalidade dos parques a tensão de 34,5 kV, normatizada no Brasil, o que coloca a necessidade de instalação de chaves e disjuntores com esta tensão de isolamento nos PCSs empregados no parque.

Embora as UFVs demandem muita área, a PCS deve ser o mais compacta possível para facilitar o transporte, reduzir a demanda de obra civil em campo e apresentar equipamentos confiáveis e de baixa manutenção, mantendo a continuidade de serviço e baixo OPEX.

### 3.2 EXECUÇÃO MECÂNICA DA PCS

A execução em eletrocentro é mostrada na figura 7, constituído de uma caixa metálica autoportante e içável com os componentes nela instalados. Em geral aplica-se um container naval, no qual se instalam o painel de baixa tensão em CC, o inversor de frequência, o transformador elevador e o PMT, além de outros equipamentos acessórios para comunicação e controle da PCS. Neste modelo de construção deve ser observado a necessidade de refrigeração do inversor a exemplo do estudado por Yoshino *et al.*(2012).

**Figura 7 - Eletrocentro com transformador encapsulado a vácuo**



**Fonte : Catalogo WEG - ESW – Eletrocentro Solar**

Na execução em SKID, mostrada na figura 8, os equipamentos devem ser desenvolvidos para uso externo e são montados sob um chassi metálico, o qual tem não apenas a função de suportar mecanicamente os equipamentos quando da movimentação vertical para colocação na base, como também para servir de bacia de contenção do óleo isolante do transformador. Esta solução em montagem SKID representa uma prática comum na indústria mineira, que tem a necessidade de deslocar a subestação com o avanço da exploração. Na concessionária de energia elétrica do estado de Minas Gerais (CEMIG), este conceito foi extrapolado para o 138kV com a criação de um modelo de Subestação denominado de Subestação Compacta Integrada (SECI), ainda conforme Assis *et al.*(2019) no quadriênio tarifário de 2018 a 2022, a CEMIG deverá implantar 55 novas subestações, o modelo SECI irá representar cerca 65% destes novos empreendimentos.

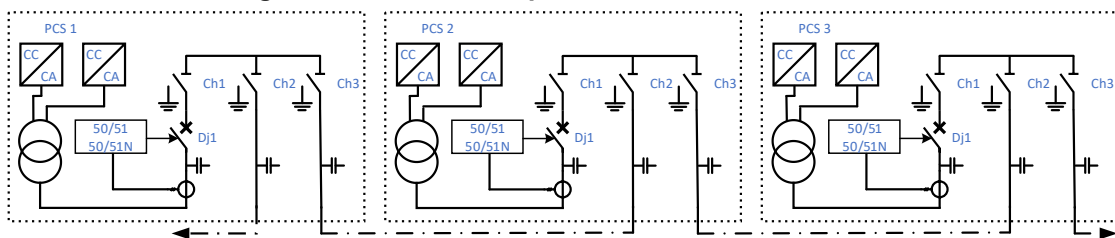
**Figura 8 - SKID solar com 1 inversor**



fonte: <https://www.energymagazine.com.au/new-solar-power-skids-for-the-australian-market/>

Independente da aplicação ser em eletrocentro ou SKID o unifilar da PCS é composto por um PMT que se conecta a outra PCS, uma série destas, à subestação elevadora para conexão ao SEP, conforme figura 9.

**Figura 9 - Unifilar exemplo de cascadeamento de PCS**



Fonte: o Autor

### 3.3 PAINÉIS DE MÉDIA TENSÃO (PMT)

As tecnologias comercialmente ativas para painéis de isolamento em 34,5 kV são a isolação a Ar (AIS), gás SF6 (GIS), sólida e Ar seco sob Pressão, denominada de Clean Air. O PMT de isolação solida e PMT Clean Air apresentam valor superior aos AIS e GIS, o que os impede de serem usuais em instalações nas quais o baixo CAPEX é primordial.

Painéis AIS são de construção mecânica menos onerosa no quesito estrutura fabril, pois não demandam de sala limpa e câmara a vácuo para sua montagem. Porém apresentam um dimensional muito superior ao do GIS.

Na Tabela 1, estão exemplificados as dimensões e área ocupada por um conjunto típico aplicado em PCS de fotovoltaicas, composto por duas seccionadoras sob carga e um disjuntor, sendo uma seccionadora para o cabo que advém do PCS

ã montante, uma seccionadora para o cabo que vai ao PCS à jusante e o disjuntor que protege o transformador elevador de tensão, a exemplo do unifilar mostrado na figura 9.

A figura 10 mostra uma única coluna de PMT AIS em vista frontal e corte lateral na parte superior da figura e uma única coluna PMT GIS em vista frontal e vista lateral na parte inferior da figura, ambas na mesma escala. As medidas apresentadas na Tabela 1 são para conjunto de 3 colunas, para formar o unifilar do PMT apresentado na figura 6. A aplicação de AIS de uso externo acarretaria na construção de uma estrutura extremamente grande e pesada para servir de SKID, e adicionalmente obrigaria a aplicação de transporte rodoviário especial, segundo Resolução CONTRAN nº 210 de /2006, dado a largura do conjunto, gerando em aumento do CAPEX.

**Tabela 1- Comparativo de dimensões PMT AIS e GIS**

Isolação	Largura (mm)	Altura (mm)	Profundidade (mm)	Área (m <sup>2</sup> )
SF6	1305	1923	936	1,2
Ar	3600	2600	3060	11,0

Fonte: Catálogos da Empresa Lucy Electric

### 3.4 PAINÉIS DE MÉDIA TENSÃO EM SF6 (PMT GIS)

Para obter uma menor distância entre partes energizadas em MT no interior do painel, com a conseqüente redução de volume ocupado, aplica-se o gás SF6, hexafluoreto de enxofre, que é utilizado por sua alta rigidez dielétrica devido à alta eletronegatividade do flúor, capturando os elétrons livres, formando íons pesados com baixa mobilidade. Portanto, a probabilidade de falha dielétrica e remoção de elétrons do gás sob o campo elétrico é reduzida. Além disso, o comportamento térmico do SF6 é muito estável devido à forma simétrica de suas moléculas com um átomo de enxofre no centro e seis átomos de flúor nos cantos da molécula. Adicionalmente, o SF6 tem uma alta taxa de regeneração de sua estrutura. Devido ao baixo coeficiente adiabático, o aumento da pressão como resultado da expansão térmica após quebras dielétricas é menor do que com outros gases e dielétricos líquidos (BABAEI; SIADA, 2017).





alguns subprodutos contaminantes são formados em pequena quantidade. Em subestações de alta tensão uma peneira especial é aplicada para filtrar parte destes contaminantes, obrigando uma manutenção decenal. No PMT GIS, utilizam-se disjuntores com ampolas a vácuo onde ocorre o arco elétrico na abertura do curto-circuito, desobrigando o equipamento da referida manutenção.

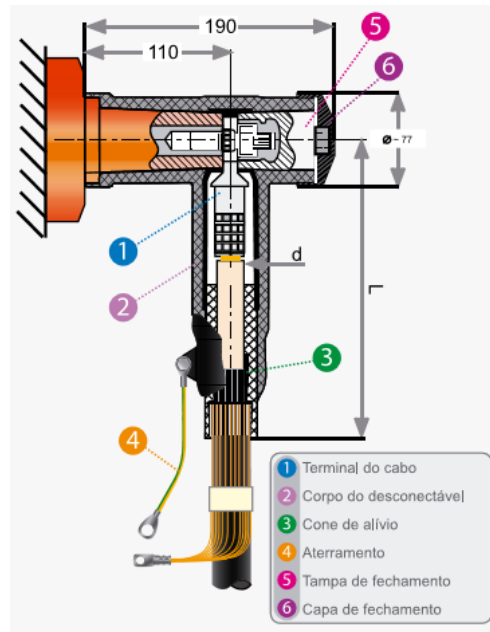
A combinação de vapor d'água e SF<sub>6</sub> em decomposição possibilita a formação de ligações corrosivas como ácido fluorídrico, que causa alterações prejudiciais das superfícies de contato e de isoladores. Essas partículas são movidas pelo campo elétrico para regiões de maior potencial, depositando-se ao longo da superfície dos isoladores, podendo ocasionar ruptura do dielétrico (PURNOMOADI; MOR; SMIT, 2020).

Dado a estas características, o PMT GIS é construído com um tanque de aço inoxidável, garantindo robustez e maior vida útil ao tanque e conseqüentemente ao painel. Com a responsabilidade de manter o ambiente em SF<sub>6</sub>, o tanque também abriga em seu interior os equipamentos de manobra, como chaves e disjuntores, tendo em seu exterior o mecanismo de acionamento, contatos auxiliares e demais componentes passíveis de manutenção. O que se busca neste sistema construtivo é tornar isento de manutenção os componentes internos ao tanque. Cabe observar que o mesmo não ocorre em subestações de alta tensão isoladas em SF<sub>6</sub>, pois há abertura de arco elétrico no SF<sub>6</sub>.

Para garantir a perfeita estanqueidade e isenção de umidade dentro dos tanques de SF<sub>6</sub>, a construção em fábrica é feita em ambiente controlado de baixa umidade, após montagem dos equipamentos internos ao tanque, ensaios mecânicos são realizados e os tanques são lacrados. As únicas interfaces com o ambiente externo são os eixos de manobra devidamente vedados por gaxetas e as buchas de passagem para conexão de cabos. Após a selagem do tanque, este é enviado a uma câmara a vácuo. Esta etapa é utilizada para secagem e teste de vedação do tanque, pois é feito vácuo no interior e exterior do tanque, desta forma garante-se a secagem do interior e evita-se a implosão do tanque com o vácuo externo a este. O tanque é carregado com gás Hélio que, dado a suas propriedades, é facilmente detectável, permitindo verificar a estanqueidade do tanque e por ter nível de energia completo não reage com os componentes internos do tanque. Após a verificação de estanqueidade o Hélio é retirado e o SF<sub>6</sub> é inserido no tanque, com a pressão determinada pelo projeto do painel PMT GIS.

A compactação no interior do tanque, condiciona que as interfaces elétricas externas do tanque seguem as mesmas condições de distanciamento, o que obriga a utilização de terminações de cabos totalmente isoladas, conseqüentemente não há partes energizadas expostas, o que leva à aplicação de terminações desconectáveis seguindo o padrão DIN 400 – EN50181, mostrada na figura 11.

**Figura 11 - Terminação de cabo desconectável DIN 400**



Fonte: Elos Eletrotécnica

Por não apresentarem partes energizadas expostas e grande proximidade dos condutores, a utilização de Transformadores de Corrente (TC) em bloco não é possível, o que demanda a aplicação de transformadores de corrente toroidais circundando os cabos de MT. Estes cabos são providos de uma malha aterrada. Por serem envolventes ao cabo isolado e aterrado, os TCs aplicados podem ter nível de isolamento de baixa tensão (BT).

Como anteriormente exposto, a proximidade dos condutores e compactação do PMT GIS demanda atenção no dimensionamento mecânico dos TCs, pois diâmetros elevados podem impedir a montagem mesmo em condição de defasagem em relação ao piso do PMT GIS.

O aspecto construtivo de não apresentar partes energizadas expostas também impacta na instalação de Transformadores de Potencial (TP), que somente é possível mediante adição de buchas de passagem do tanque, próprias para a instalação dos mesmos. Portanto, funções de proteção que demandam amostra de tensão e alimentação de serviços auxiliares tornam-se mais difíceis, orientando para

a utilização de relés autoalimentados como será discutido mais adiante deste trabalho.

Dado aos aspectos construtivos dos equipamentos principais estarem dentro de um tanque selado e sem acesso ao operador e equipe de manutenção, os requerimentos para o PMT GIS são superiores aos de um PMT AIS, dentre os quais se destaca:

- O PMT deve ser totalmente montado e testado em fábrica;
- Expectativa de vida útil de 25 anos;
- Mecanismo autolubrificante;
- Mínima ação de limpeza requerida;
- Resistente à corrosão; e
- Alta taxa de disponibilidade.

Para atingir tais requisitos, alguns cuidados devem ser tomados, como a utilização de disjuntores com ampolas a vácuo, excluindo-se a necessidade de manutenção nas mesmas, pois o número de partes móveis é reduzido a um único componente. O desenho correto dos contatos internos da ampola garante que no momento da abertura destes contatos, ocorra uma difusão do arco interno em diversos pequenos arcos de menor intensidade, gerando uma nuvem do material condutor que volta ao contato na passagem da corrente por zero, evitando assim a criação de um ponto de sacrifício nos contatos da ampola (JOHNSON, 2020).

O mecanismo de abertura do disjuntor externo ao tanque e os componentes internos devem ser projetados e construídos com materiais leves e projetados para abertura com atuadores de baixo consumo de energia dado ao uso de RAA (UZEL *et al.*, 2019).

Após a montagem, os PMT GIS assim como outros PMT devem ser ensaiados em fábrica seguindo a NBR IEC 62.271-200.

A IEC também prevê uma taxa de vazamento anual aceitável de SF<sub>6</sub> de 0,1% que deve ser atendida pelos fabricantes, ressaltando a ocorrência de arco interno aos tanques de aço inox, quando ocorre a abertura da válvula de escape de gases na parte inferior do tanque e do PMT GIS. Para monitorar a presença de SF<sub>6</sub> no interior do tanque é instalado um manômetro no seu frontal, em muitos casos com um contato de alarme para baixa pressão e em geral sem indicação numérica, somente com faixa de cores indicando a possibilidade ou não de operação.

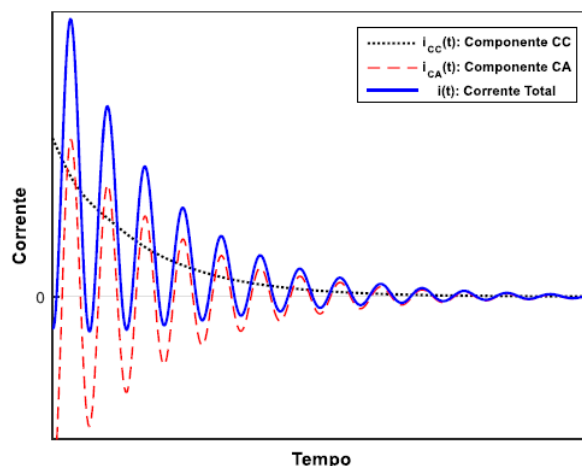
A compactação anteriormente apresentada, adicionalmente influencia no tamanho da caixa de comando dos PMT GIS. A quantidade de componentes possíveis de serem instalados é menor, também o dimensional do relé de proteção a ser usado deve ser observado durante a fase de projeto mecânico. Relés de proteção com corpo muito profundo, pode impedir o movimento de abertura da porta, da caixa de baixa tensão.

### 3.5 INVERSOR DE FREQUÊNCIA DURANTE O CURTO-CIRCUITO

Tradicionalmente, enxergamos o SEP, com a geração elétrica proveniente de um conjugado mecânico de uma turbina ou motor, conectados mecanicamente ao rotor do gerador síncrono. Durante o regime, o campo magnético resultante no estator gira na mesma velocidade que o campo induzido pela excitatriz nos enrolamentos do rotor, mantendo constante a frequência, a tensão e a corrente para uma carga constante.

Quando da ocorrência de um curto-circuito, nos primeiros ciclos, denominado de sub-transitório, as correntes de armadura aumentam, podendo chegar a 10 vezes a corrente nominal, distorcendo o fluxo da máquina síncrona. No gráfico 5 está exemplificado a forma de onda da corrente com o efeito gerado pela componente CC, dado a característica indutiva do Gerador (CHAPMAN, 2013).

**Gráfico 5 -Corrente de curto-circuito em gerador de indução**



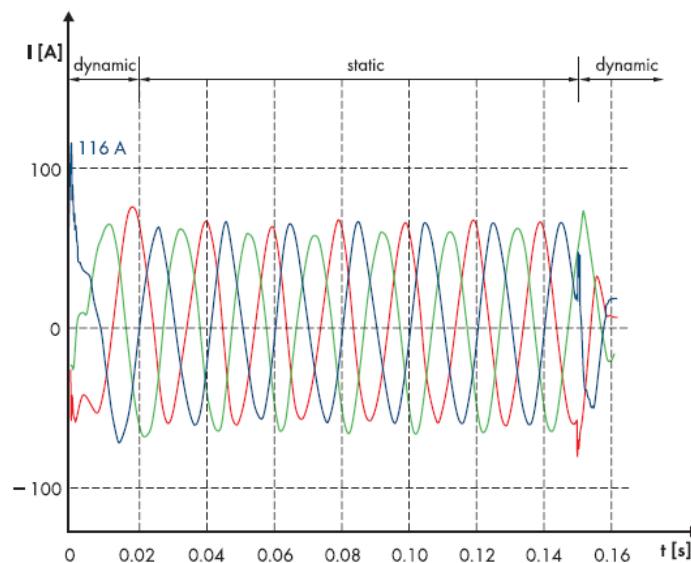
Fonte: (TRUJILLO, 2017)

Diferentemente do acima exposto e de forma simplificada, a geração de energia fotovoltaica é fruto da conexão elétrica de módulos fotovoltaicos e inversores de frequência, constituídos em geral por um conversor CC/CC ligado em série a um

conversor CC/CA, cabendo ao primeiro o controle da energia proveniente dos módulos fotovoltaicos, objetivando extrair a máxima potência. O segundo responde pela geração da forma senoidal de saída do inversor. Portanto, não há a componente de inércia mecânica, o respectivo campo magnético girante como nos geradores síncronos e a característica indutiva presente no Gerador Síncrono. Dado ao exposto, o controle da corrente de saída do inversor de frequência é delegado a capacidade de corrente dos semicondutores e seu controle associado, limitando a potência máxima do inversor à corrente admissível pelos semicondutores. Podemos assumir que a contribuição de curto não excede ao dobro da corrente nominal, assemelhando se muito mais a uma corrente de sobrecarga e não a uma corrente de curto-circuito (SIDHU; BEJMERT, 2011).

Como pode ser visto no gráfico 6, no instante da falha,  $T=0$ , há uma reação imediata do inversor com um pico de corrente de curta duração que é causado pelo filtro de saída. Posteriormente, o inversor controla a corrente o mais rápido possível para evitar que o inversor sofra uma sobrecarga térmica (SMA, 2021).

**Gráfico 6 - Corrente na saída do inversor fotovoltaico durante uma falha**



**Fonte: (SMA, 2021)**

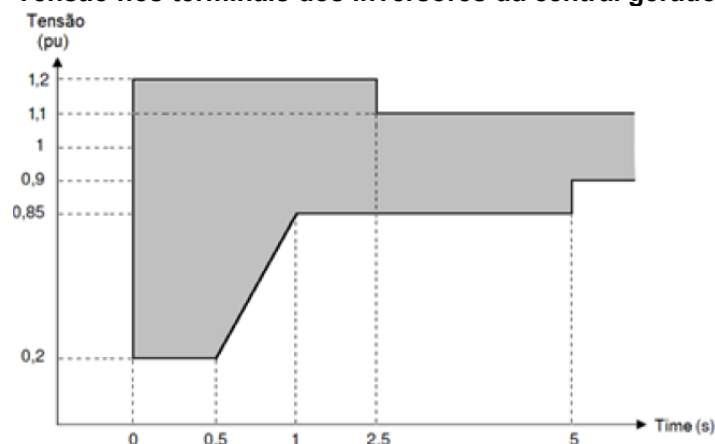
O Operador Nacional do Sistema Elétrico do brasileiro (ONS) é órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN). Dentro de suas atribuições, o ONS publica procedimentos de rede a serem seguidos. Do compendio publicado o submódulo 2.10, intitulados requisitos técnicos mínimos para

a conexão às instalações de transmissão, apresenta em seu capítulo 5 os requisitos técnicos mínimos para conexão de centrais geradores eólicas e fotovoltaicas ao SIN.

Os itens 5.7 e 5.8 determinam que, em ocorrendo variações temporárias de tensão em uma ou mais fases no ponto de conexão da central geradora eólica ou fotovoltaica, às instalações sob responsabilidade de agente de transmissão ou de distribuição, decorrentes de distúrbios na Rede Básica, a central geradora deve continuar operando (sem desconexão) se a tensão nos terminais dos aereos geradores ou inversores permanecer dentro da região indicada na figura 19, independentemente do distúrbio ser provocado por rejeição de carga, defeitos simétricos ou assimétricos, devendo ser atendida pela tensão da fase que sofrer maior variação. Quando de variações transitórias de tensão, conforme mostrado no gráfico 7, a GC deve dar suporte a manutenção de tensão à rede, injetando corrente reativa adicional para tensões de sequência positiva inferiores a 85% em até 30ms após a detecção de falta e absorvendo corrente reativa adicional de sequência positiva para tensões acima de 110%. (ONS, 2021).

Esta condição de resposta do inversor fotovoltaico à manutenção ou não de corrente nominal durante a falta e denominado *fault ride through* (FRT), nas quais o inversor pode cortar totalmente ou manter a corrente nominal, em função da parametrização do mesmo, conseqüentemente a injeção de corrente de inversores fotovoltaicos difere da resposta dos geradores síncronos (NEUMANN; ERLICH, 2012).

**Gráfico 7 - Tensão nos terminais dos inversores da central geradora**



Fonte: (ONS,2021).

### 3.6 RELÉ AUTOALIMENTADO

De acordo com Bernardes (2018) um sistema de proteção é um conjunto de elementos desempenhando suas funções, com o intuito de eliminar a falta o mais rápido possível. Define-se o relé como um dispositivo que oferece proteção a um SEP em diversas maneiras: sobrecorrente, sobre e sub tensão, sub frequência e outras anomalias.

Os componentes de um sistema de proteção têm recebido uma visível evolução técnica, tanto para satisfazer aos novos padrões da Transmissão, bem como da Distribuição de energia. Porém no campo da proteção o desenvolvimento foi mais acentuado. Os antigos relés de sobrecorrente com disco de indução eletromecânico foram por muitos anos primordiais para a proteção de sistemas, com seu funcionamento semelhante a um medidor de watts / hora. Estes permaneceram praticamente inalterados até o surgimento dos relés estáticos, analógicos nas décadas de 1960 e 1970, que emulavam as características do relé de eletromecânico. Os desenvolvedores destes equipamentos rapidamente perceberam que, os relés estáticos, não deveriam ter as limitações dos eletromecânicos, evoluindo para os relés estáticos com micro processadores, já no início da década de 1980. (BAKER *et al.*, 1997)

Os primeiros relés autoalimentados RAA datam do início da década de 1990 por uma necessidade das concessionárias Italiana e Francesa de não mais utilizar fusíveis na proteção de transformadores e dispensar o uso de tensão auxiliar, porém sem o retrocesso do uso dos relés primários a óleo (BIASSE; CHALLOT; TOBIAS, 2009).

Dada a necessidade de redução de custo de operação do parque fotovoltaico e das distâncias envolvidas, empregam-se relés autoalimentado (RAA), visando a garantia de proteção do transformador elevador mesmo com ausência de tensão auxiliar proveniente de um UPS, que poderá estar inoperante por diversos motivos, os quais não nos cabe estudar no presente.

O RAA utiliza a energia proveniente dos transformadores de corrente para alimentar sua eletrônica interna, bem como prover energia para bobina ou disparador de abertura do disjuntor. Conseqüentemente, o desenho dos RAA deve observar várias condicionantes associadas para garantir a adequada medição e sensibilidade, evitando comando de abertura indevido ou o não comando quando

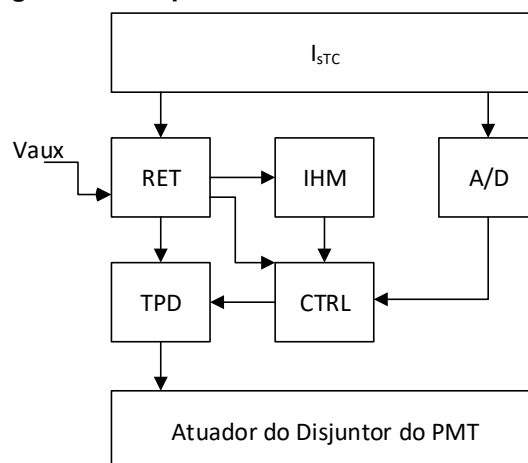
devido. Partindo desta premissa, o RAA requer um mínimo de tempo e de corrente de fase para sua energização, após as quais as medições e funções de proteção associadas podem ser garantidas.

### 3.6.1 Funcionamento do RAA

Os RAA em geral permitem uma dupla alimentação, a autoalimentada, proveniente dos TCs ao qual está conectado e uma externa, a exemplo dos demais reles de proteção existentes do mercado.

O funcionamento esquemático de um RAA é mostrado na figura 12. Na condição de autoalimentado a corrente que alimenta a carga é refletida no secundário do Transformador de Corrente ( $I_{sTC}$ ), o qual alimenta o retificador (RET) interno do relé de proteção, bem como o circuito conversor analógico digital de medição (A/D). A informação proveniente do circuito A/D é enviada ao controlador (CTRL) que é responsável por comparar a corrente medida no secundário do TC com a parametrizada no RAA. Caso esta apresente característica compatível para comando de Tripping, o CTRL informa ao mecanismo interno de Tripping (TPD) que comande a abertura do disjuntor (DJ). A alimentação de todos estes componentes é feita pelo RET que se alimenta do secundário do TC. Portanto, quanto maior for a corrente no TC mais segura é a alimentação dos circuitos. Outras funcionalidades são também alimentadas pelo RET como a interface com o usuário (IHM) (JEFFERIES, 2011).

**Figura 12 - Esquema do IED autoalimentado**



Fonte: adaptado de Schneider Electric USA / United States Patent US 9,887,530 B2



Quando alimentado externamente, o processo é muito similar, diferindo que o retificador recebe alimentação de outra fonte que não os TCs, por entrada específica em seu hardware (Vaux).

A condição mais crítica para proteção do circuito de MT, ocorre durante uma energização sob falta, com o RAA sem alimentação externa. Esta condição é conhecida como *Switch On to Fault* (SOTF), é caracterizada pela necessidade de uma rápida inicialização do relé obtendo sua alimentação pelo secundário dos TCs.

Nesta condição será necessário que os microprocessadores executem o processamento do firmware intrínseco, o que mesmo com processadores de elevada velocidade (*clock*), demandará um período de tempo. Em ocorrendo uma falha neste período o RAA deve ter eletrônica e lógica interna apta a reduzir o SOTF e enviar sinal de *Tripping*. Obviamente, a opção de uma dupla alimentação pode garantir que o RAA esteja pronto para *Tripping* no momento da energização do circuito de MT. Devemos também observar que para alimentação do relé pelo TC é necessário um mínimo de corrente proveniente do TC, conforme demonstrado na tabela 2. A energia obtida dos TCs não apenas deverá alimentar os circuitos internos, como também carregar o capacitor que alimentará o disparador do disjuntor do PMT.

A tabela 2 apresenta três diferentes relés de dois fabricantes, a corrente mínima para energização do RAA e os tempos de SOTF de cada um destes relés, na condição de alimentação pelos TCs de forma trifásica e para uma tensão de saída de 24Vcc. O tempo de resposta será analisado mais a diante neste trabalho.

**Tabela 2 - Correntes mínimas de alimentação dos RAA**

Relé	I mínima 1Φ	I mínima 3Φ	SOTF (1,5 x I <sub>n</sub> / 24V)	Sobrecarga Térmica (1s)	Fabricante
SIA-B TC Próprio	0,8 x I <sub>n</sub>	0,4 x I <sub>n</sub>	250 ms	70 x I <sub>n</sub>	Fanox
SIA-B TC Standard	0,16 x I <sub>n</sub>	0,075 x I <sub>n</sub>	57,2 ms	100 x I <sub>n</sub>	Fanox
SPR10	0,2 x I <sub>n</sub>	0,08 x I <sub>n</sub>	100 ms	100 x I <sub>n</sub>	Thytronic

**Fonte Catálogos dos Fabricantes**

Todos os RAA aqui estudados apresentam comunicação USB frontal e RS485 traseira no protocolo Modbus e o modelo da Fanox, adicionalmente, permite DNP3 na porta traseira. A porta de comunicação frontal pode ser usada como fonte de energia para o RAA, motivo pelo qual ensaio de SOTF não pode ser feito com o computador conectado ao RAA, pois resultaria em uma medição errada. Deve-se

lembrar que o mesmo RET que alimenta o circuito responsável por tomada de decisão de trip é responsável por suprir de energia à porta de comunicação quando da condição de autoalimentado. A tabela 3 indica as correntes mínimas para existência de comunicação traseira nesta condição.

**Tabela 3 - Correntes mínimas para comunicação**

Relé	I mínima 1Φ	I mínima 2Φ	I mínima 3Φ	Fabricante
SIA-B	0,360 x In	0,180 x In	0,120 x In	Fanox
SPR10	0,200 x In	0,100 x In	0,080 x In	Thytronic

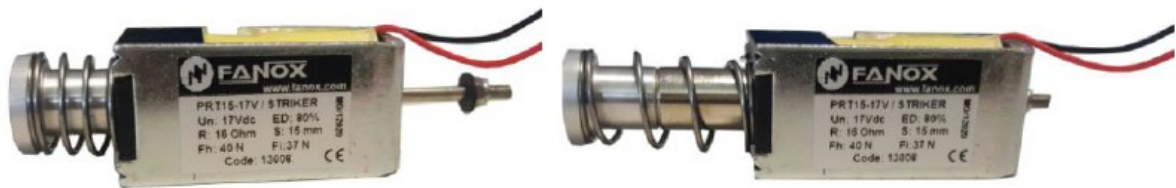
**Fonte Catálogos dos Fabricantes**

O manual do modelo da Thytronic informa que durante o *trip* a porta de comunicação não funcionará. Nos modelos da FANOX, os manuais não informam, porém, em consulta ao fabricante, o mesmo informou que a mesma não funciona durante o *trip*, pois a energia é drenada para garantir a carga do capacitor de trip.

Esta condição de ausência de comunicação durante o *trip*, será futuramente comentada no final do trabalho.

O comando de *Triping* do RAA para o disjuntor do PMT, ao contrário dos reles com alimentação externa, não é feito por bobina de abertura e sim por atuadores, como o mostrado na figura 13, com a mola pressionada antes da atuação, a esquerda da figura, e após liberação da mola, a direita da figura.

**Figura 13 - Atuador para RAA.**



**Fonte: Manual do relé Fanox SIA-B**

O atuador recebe um pulso do RAA, proveniente do capacitor interno, este pulso libera o embolo do atuador, que está mantendo a mola do atuador pressionada. Portanto, o atuador só estará disponível para um novo disparo após a compressão da mola, que ocorre simultaneamente ao fechamento dos contatos principais do disjuntor, diferentemente de uma bobina de abertura de disjuntores com ciclo de religamento mais rápidos. Em uma PCS, assim como em redes

urbanas subterrâneas, não se aplica religamento automático, motivo pelo qual o RAA não precisa contar com função ANSI 79 e o disjuntor com um ciclo equivalente.

### 3.7 TRANSFORMADOR DE CORRENTE

Os transformadores de corrente, independentemente da tensão aplicada, devem isolar eletricamente do circuito primário os equipamentos conectados em seu secundário, fornecendo uma corrente em nível adequado a tais equipamentos e uma forma de onda proporcional a do primário.

Durante a definição dos TCs a serem aplicados nas soluções fotovoltaicas, é usual a simplificação do cálculo dos TCs, levando-se em consideração apenas a corrente nominal do equipamento a ser protegido, conforme a Equação 1.

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \times V_n} \quad (1)$$

Onde:

$I_n$  - Corrente nominal da carga

$V_n$  - tensão nominal da Carga

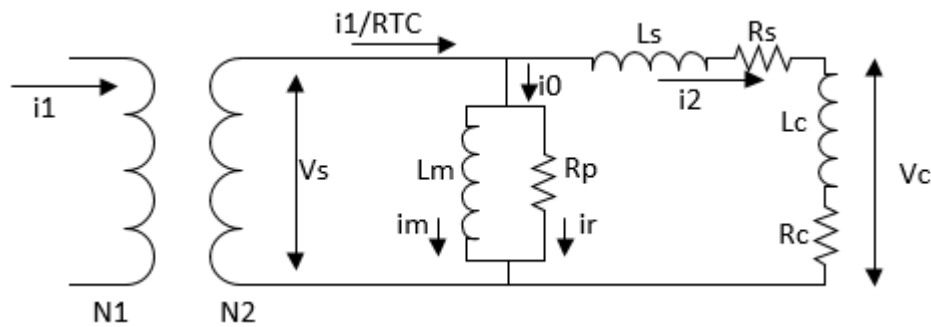
$P_n$  - Potência nominal da carga

Da Equação 1, define-se a corrente nominal da carga, que simplificada pode ser usada para a definição dos TCs a serem aplicados. Devemos observar, que o PMT não está exposto apenas à contribuição de curto-circuito proveniente do conjunto transformador elevador e inversor de frequência. Como anteriormente mostrado, o inversor contribui muito pouco ou ainda nada contribui, dado a sua eletrônica que interrompe o fornecimento de potência durante a falta. Porém, os demais inversores e o SEP conectado a esta rede tendem a contribuir ao fornecimento de correntes de curto-circuito.

O que se observa no mercado brasileiro é um aumento nas potências das usinas fotovoltaicas, com um conseqüente aumento do número de inversores e um maior nível de curto apresentado nos cálculos de curto-circuito, facilmente chegando a 25kA em 34,5kV.

Para melhor entendimento do efeito do aumento da corrente de curto-circuito no secundário dos TCs, deve-se observá-lo como um circuito de resistências e reatâncias, que é mostrado na figura 14.

Figura 14 - Representação elétrica do TC



Fonte: o Autor

Onde:

$V_s$  – tensão no secundário do TC

$i_1/RTC$  - é a corrente primária refletida no secundário pela relação de transformação

$i_0$  - Corrente do ramo de magnetização

$L_m$  - Reatância do núcleo

$R_p$  - Resistência do núcleo

$i_m$  - Corrente de magnetização do núcleo

$i_r$  - Corrente de perdas por foucault e histerese

$i_2$  – corrente secundária do TC

$L_s$  – Reatância do secundário

$R_s$  – Resistência do enrolamento secundário

$L_c$  – Reatância da carga do TC

$R_c$  – Resistência da carga do TC

$V_s$  - Tensão do secundário do TC

$V_c$  - Tensão nos terminais do TC

A corrente de excitação é composta pela Corrente de magnetização e perdas no núcleo, conforme a Equação 2.

$$i_0 = i_m + i_r \quad (2)$$

Onde:

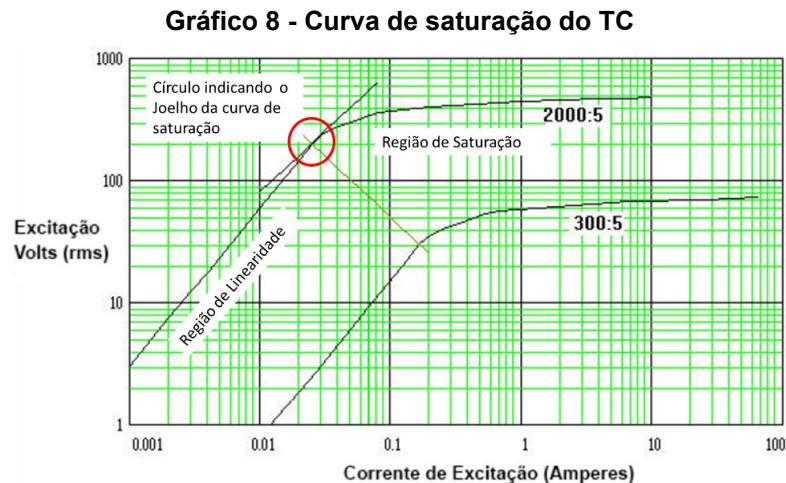
$i_m$  – Corrente de magnetização

$i_r$  – Corrente de perdas no núcleo

A reatância de magnetização do núcleo é dividida em duas regiões de atuação. Na primeira, tem-se uma região linear onde prevalece uma relação de proporcionalidade entre a corrente de magnetização e a tensão Vs. A linearidade estende-se de zero até a tensão limite do joelho da curva de saturação, onde se inicia a segunda região, definida como região de saturação do núcleo do TC, na qual a linearidade é perdida, conforme gráfico 8.

Observa-se uma acentuada redução da impedância Lm de magnetização com o conseqüente aumento da corrente de magnetização im. Esta redução da impedância de magnetização é motivada pela redução da disponibilidade dos domínios magnéticos do núcleo, limitados pela relação máxima do fluxo que pode atravessar a seção do núcleo sem que este sature (SILVA, 2014).

Por norma, na região de linearidade do TC de medição, o mesmo deve manter, o erro máximo especificado em até 4 vezes a corrente nominal, este fator é denominado de Fator de Segurança. Os TCs de proteção devem garantir o erro máximo especificado até 30 vezes a corrente nominal e este fator é chamado de Fator limite de exatidão (ABNT , 2021).



A Equação 3 permite determina a corrente primaria do TC em função da corrente de Curto Circuito e Fator limite de exatidão do TC a ser empregado no PMT.

$$I_p = \frac{I_{cc}}{F_{IE}} \quad (3)$$

Onde:

$I_p$  - Corrente primária do TC

$I_{cc}$  - Corrente de curto circuito máxima

$F_{le}$  - Fator limite de exatidão

Como padrão de mercado nos PMT, aplica-se TCs de proteção com Fator limite de exatidão de 20. A norma NBR 6856 prevê como padrão 5, 10, 15, 20 e 30.

Para definição dos TC, não se pode levar em consideração apenas o fator de exatidão. É necessário verificar se a tensão induzida no secundário pelo conjunto de impedâncias associadas, relé e os condutores devem ter seus dados considerados. A tensão de saturação do TC, denominada Força eletromotriz limite de exatidão para proteção, não deve ser ultrapassada, a Equação 4 apresenta o cálculo da mesma.

$$E_{le} = F_{le} \times I_s \times \sqrt{(R_c + R_{tc})^2 + (X_c + X_{tc})^2} \quad (4)$$

Onde:

$E_{le}$ =Força eletromotriz limite de exatidão

$F_{le}$ =Fator limite de exatidão

$I_s$ =Corrente no secundário do TC

$R_{tc}$ =Resistência Corrigida a 75°C

$R_c$ =Resistência da carga nominal

$X_{tc}$ =Reatância do enrolamento secundário

$X_c$ =Reatância da carga nominal

Portanto se a Força eletromotriz no limite de exatidão calculada for igual ou menor que a tensão de saturação do TC, dada pela Equação 5, o critério está atendido

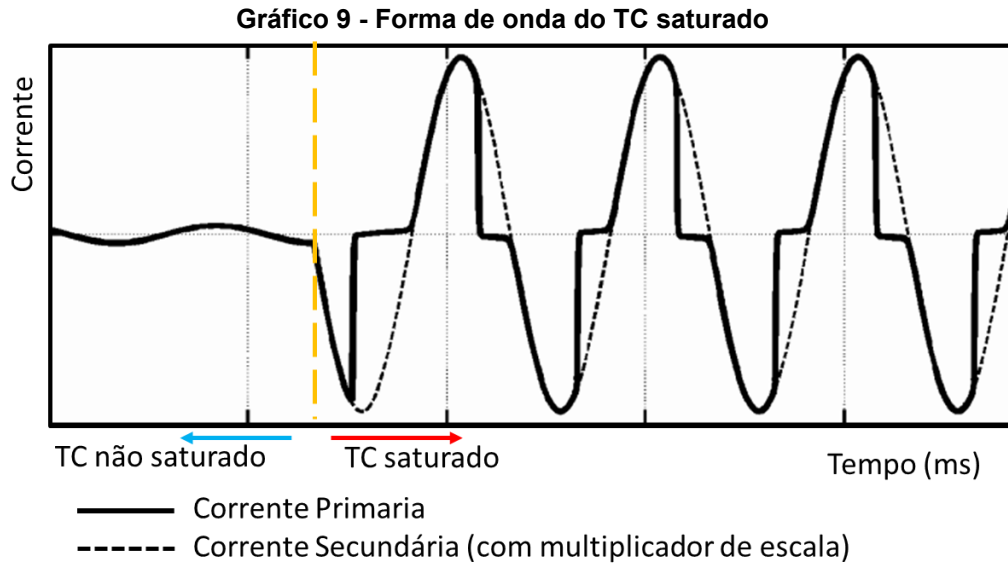
$$V_{sat} = I_s \times F_{le} \times Z_{burden} \quad (5)$$

Onde:

$V_{sat}$  - Tensão de saturação do TC para o fator limite de exatidão

$Z_{burden}$  - Impedância do TC, dado de tabela da norma

Caso o critério não seja atendido, o TC entra na região de saturação e a forma de onda no secundário não refletirá a forma de onda do primário, como mostrado no gráfico 9.



Fonte: Adaptado de (AJAEI *et al.*, 2011)

### 3.8 CONSIDERAÇÕES

Neste capítulo, apresentou-se uma revisão teórica dos equipamentos utilizados em uma PCS, com foco na compactação e redução de custos de CAPEX e Opex da UFV.

A construção mecânica da PCS foi abordada exemplificando os modelos Eletrocentro e SKID. O PMT GIS foi comparado como PMT AIS, explicada a sua utilização dado a compactação e inexistência de partes energizadas expostas. Como consequência da impossibilidade de instalação de Transformadores de Potencial com baixo custo no PMT, também foi apresentado o RAA e seu funcionamento. Foi abordada a definição do TC a ser empregado e a reduzida contribuição do Inversor de frequência, durante uma falta, assemelhando se a uma sobrecarga e não a uma corrente de curto-circuito.

O transformador de potência utilizado na PCS, não foi trabalhado no capítulo, pois o mesmo pouco difere de outras aplicações.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 PROBLEMA EM ESTUDO E SISTEMA PROPOSTO

#### 4.1.1 Garantia de Proteção

O valor de CAPEX dos projetos de GC tem diminuído, conseqüentemente a pressão dos investidores por menores custos é maior a cada dia. Adicionalmente, deve-se levar em consideração que as distâncias envolvidas na GC são elevadas o que torna inviável um alimentador de BT com tensão de serviço auxiliar, conectando a subestação elevadora de conexão ao SEP até as diversas PCSs com seus respectivos relés de proteção.

Os enrolamentos de baixa tensão, do transformador de potência da PCS, também supre um pequeno transformador de serviço auxiliar, responsável por manter energizado tanto o relé de proteção como os equipamentos do sistema de controle dos inversores, denominado de *Power Plant Controller* (PPC). Adicionalmente há um UPS dentro painel de baixa tensão de serviços auxiliares do PCS, para garantir energia aos sistemas de controle e proteção da PCS.

A dúvida apresentada pelos montadores de PCS é de como garantir proteção em caso de falta deste serviço auxiliar presente na PCS. Buscando viabilizar um sistema de retaguarda, sugeriu-se a aplicação de relés com dupla alimentação, sendo uma proveniente da fonte de serviço auxiliar do PCS e, como retaguarda, a corrente gerada pelo curto nos TCs dos cabos de média tensão. Esta topologia visa garantir a proteção do transformador por uma corrente de curto suprida pelo SEP e outros inversores, uma vez que, como apresentado, a contribuição direta do inversor é muito pequena. Adicionalmente como visto na figura 9, o disjuntor não protege os cabos de MT que interligam as várias PCSs e estes a subestação. Portanto busca-se proteger os cabos de média que conectam o PMT ao transformador, bem como o próprio transformador e equipamentos conectados a sua baixa tensão, de corrente de curto suprida pelo SEP e demais PCSs.



#### 4.1.2 Sistema Proposto

A solução apresentada aos fabricantes de PCS é a utilização de RAA para proteção do conjunto pelo disjuntor do PMT GIS a montante do transformador, conforme anteriormente exposto. Assim foi realizado o ensaio do RAA simulando a montagem aplicada no PMT GIS, figura 24, usando um relé auxiliar como disparador do disjuntor. Os parâmetros configurados no RAA foram retirados do estudo de curto circuito e seletividade de uma UFV de GC com potência total de 114MVA. As PCSs desta UFV são construídas com dois inversores centrais, conectadas a um transformador de 7MVA, com 34,5 KV na média tensão, como mostrado na figura 9.

#### 4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

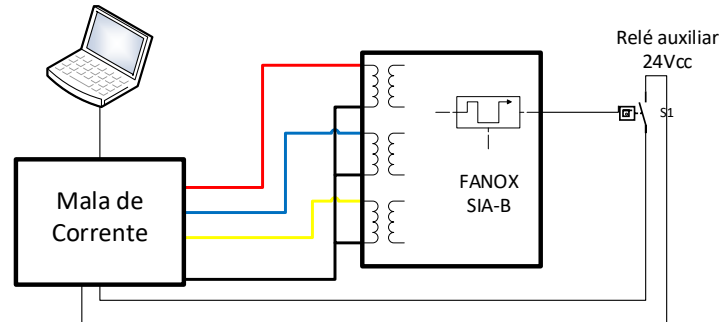
No Capítulo em que se apresenta a motivação deste trabalho, foi identificada a necessidade de garantir uma retaguarda na alimentação do relé de proteção da PCS. A solução identificada é a aplicação do RAA. O que se busca neste Capítulo é discriminar o procedimento de ensaio realizado e sua arquitetura com o RAA do fabricante Fanox modelo SAI-B de TCs próprios (RAAF), com o intuito de comprovar em ensaio a operação do RAAF e comparar com informações de manual do relé autoalimentado do fabricante Fanox modelo SAI-B de TCs standard e Thytronic modelo SPR10 (RAAT), disponível no mercado brasileiro.

Para a simulação foi elaborado o circuito esquemático demonstrado na figura 15, utilizado um RAAF de TCs próprios, similar ao aplicado na PCS, uma mala de teste para simular a corrente de falta no secundário dos TCs e de um relé auxiliar na condição de disparador do disjuntor.

Para injeção de corrente de forma controlada foi utilizada uma mala de teste Omicron CMC 356, cedida e operada por funcionários da empresa Artech, dado ao elevado custo deste equipamento. O ensaio foi realizado durante o intervalo dos Testes de Aceitação em Fábrica de um sistema de proteção e controle, que esta empresa estava fornecendo à Eletrosul Centrais Elétricas, motivo pelo qual o ensaio foi realizado em “chão de fábrica” e não em laboratório.

Na arquitetura da figura 15, pode ser observado que a mala de teste injeta corrente no RAAF simulando o secundário dos TCs de proteção. O relé tem em seus contatos de trip associado a um relé auxiliar.

**Figura 15 - Sistema de teste proposto**



**Fonte: o Autor**

Independentemente da condição de autoalimentado ou com alimentação externa o RAAF escolhido tem seu sistema de trip pela descarga de um capacitor na bobina de um disparador externo. Portanto, para podermos sinalizar à mala de teste que o RAAF enviou o trip ao disjuntor, o disparador foi substituído por um relé auxiliar, eliminando desta forma o erro humano de fechar um contato, ou de cronometrar.

Como o relé utilizado não dispõe de entradas para sincronismo por GPS por meio cabos metálicos ou via protocolo (CORNA, 2015), optou-se por fazer a medição dos tempos pela mala de testes, evitando assim a necessidade de adicionar um oscilógrafo ou outro relé para trabalhar como oscilógrafo, ambos equipamentos não disponíveis para este ensaio. O acréscimo de tempo devido a atuação do contato do relé auxiliar é de 10ms conforme dados do fabricante do relé auxiliar, mostrados na tabela 4. O relé auxiliar escolhido tem sua bobina de baixo consumo e construída para 24Vcc, mesma tensão ajustada no RAAF para disparo do atuador.

**Tabela 4 - Dados do relé auxiliar usado no ensaio**

Fabricante	Modelo	Tensão da Bobina	Tempo de fechamento
Finder	46.52.9.024.0040	24Vcc	10ms

**Fonte: catálogo do Fabricante**

A tensão de 24Vcc foi escolhida por ser a mais próxima dos padrões usados no Brasil dentro das opções disponíveis no relé, as quais podem ser ajustadas dentro das opções 12, 17, 22 e 24Vcc.

Nos manuais do fabricante Fanox para o RAAF com TCs próprios usado, tabela 5, e para o RAA com TC padrão, apresentam a curva do tempo de atuação do RAA em função da corrente que circula pelos TCs e da tensão parametrizada para o atuador. No gráfico 10 foram combinadas as curvas do RAAF em ensaio, identificado com TCP, e da versão de TC Standard, identificado no gráfico 10 com TCS.

**Tabela 5 - Dados do Relé Fanox em teste**

Fabricante	Modelo	Tensão de alimentação	Funções de proteção	Comunicação	Entradas e saídas
Fanox	SIA B 000B0010AA	230Vca + Autoalimentado + Bateria para comissionamento	50/51 + 50/51N	USB frontal (Modbus RTU)	Trip Externo e Alimentação do atuador

Fonte: Manual do relé

**Gráfico 10 - Tempo de atuação dependente da tensão do atuador e curto**



Fonte: Manuais dos reles Fanox SIA-B

Observa-se que diferentes tensões de atuação do disparador, são possíveis por menores ou maiores tempos de carga do capacitor interno. Capacitor este que é alimentado pelo RET do RAA com correntes provenientes dos TCs. Portanto, um

curto trifásico libera mais energia para o relé do que um monofásico, permitindo assim uma carga mais rápida, com consequente disparo.

Como anteriormente descrito, o ensaio foi feito em um intervalo de Teste de Aceitação em Fábrica, o que não permitiu realizar várias aplicações e montar um gráfico próprio, porém certificar o funcionamento do relé em ambas as condições de alimentação assim como do tempo de disparo do RAAF na condição SOTF.

O relé permite duas tabelas de ajuste, porém somente uma foi utilizada por simplificação. Como também citado, o relé do ensaio é para TCs próprios. Portanto o RAAF tem ajustado uma tabela interna de relações pré determinadas de TCs. Esta solução visa reduzir tempo de rearranjo em sistemas de distribuição urbana subterrânea, aplicação original deste tipo de PMT GIS e RAA. A tabela 6 apresenta as opções de TCs a serem configuradas no RAAF em função da corrente nominal. Para a aplicação foi escolhido CT064-5, por apresentar corrente nominal mais próxima de 250A.

**Tabela 6 - Tabela de seleção dos TCs do relé Fanox em teste**

<b>Corrente do sistema</b>	<b>Corrente nominal</b>	<b>Modelo do TC</b>	<b>Relação de transformação</b>
8 - 28 A	3 - 33 A	CT008-5	7,2/0,075
16 - 56 A	6 - 65 A	CT016-5	14,4/0,075
32- 112 A	12 - 130 A	CT032-5	28,8/0,075
64 - 224 A	25 - 260 A	CT064-5	57,6/0,075
128 - 448 A	51 - 520 A	CT128-5	115,2/0,075
256 - 896 A	102 - 1040 A	CT256-5	230,4/0,075

**Fonte: Manual do relé**

O RAAF permite ajuste pelo frontal, com uso de senha de acesso ou por software via porta USB frontal. Neste ponto, faz-se interessante uma observação: a porta frontal USB também é passível de ser fonte de energia para o RAAF. Portanto, o ensaio de SOTF, com o RAAF autoalimentado, não deve ser executado com a conexão relé computador estabelecida.

Os parâmetros ajustados no relé, como anteriormente descrito, foram retirados de um estudo de coordenação e seletividade, aplicado a uma UFV existente. Os parâmetros são apresentados na tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros das funções 50/51 e 50/51N

Grupo de ajuste	Ajuste relativo a função	Descrição do ajuste	Valor
1	50	Habilitado	sim
1	50	Tap	10
1	50	Tempo de operação	0,02
1	51	Habilitado	sim
1	51	Curva	IEC Normal Inversa
1	51	Dial (k)	0,07
1	51	Tap	1,04
1	51	Tempo de operação	0,2
1	50 N	Habilitado	sim
1	50 N	Tap	0,27
1	50 N	Tempo de operação	0,05
1	51 N	Habilitado	não
1	51 N	Curva	IEC Extrema Inversa
1	51 N	Dial	1,25
1	51 N	Tap	0,5
1	51 N	Tempo de operação	0,2
2	50	Habilitado	não
2	51	Habilitado	não
2	50 N	Habilitado	não
2	51 N	Habilitado	não

Fonte: Dados parametrizados no relé pelo autor

#### 4.3 ENSAIO

Observada a equação da curva IEC normalmente inversa, já simplificada, abaixo mostrada, equação 6, temos:

$$t = k \cdot \frac{0,14}{\left(\frac{I_{med}}{I_{trip}}\right)^{0,02} - 1} \quad (6)$$

Onde:

t - Tempo de atuação

k - Multiplicador de tempo, definido em 0,07, (estudo de seletividade)

I<sub>med</sub> - Corrente medida pelo relé, injetada pela mala de teste

I<sub>trip</sub> - Corrente de *trip*, definido em 232,96 A

Para os ensaios foram injetadas correntes nos enrolamentos dos TCs internos do RAAF, respeitando a relação de transformação do TC escolhido, aplicado na equação 7.

$$Rt = \frac{57,6}{0,075} = 768$$

$$I_{med} = 768 \times I_{inj} \quad (7)$$

Onde:

$I_{med}$  - Corrente medida pelo relé referenciada o primário do TC

$I_{inj}$  - Corrente injetada pela mala de teste

Portanto, 100 mA injetados pela mala de teste, substituindo na equação 7, será percebido pelo RAAF como 76,8 A no primário do TC.

Com o objetivo de termos comando de trip, por sobre corrente e curto circuito, foram injetadas correntes nos enrolamentos do RAAF em amplitude compatível como estudo de seletividade e parâmetros ajustados no relé. Isolando a corrente a ser injetada e substituindo a corrente de trip temporizada de 232,96 A e na equação 7, obtém-se:

$$I_{inj} = \frac{I_{med}}{768}$$

$$I_{51} = \frac{232,96A}{768} = 0,3033 A$$

Portanto, a corrente a ser injetada, para trip por sobre corrente deve ser maior que 0,3033 A. Para o trip por curto circuito, função instantânea o relé foi ajustado para 10 In. O relé ajustado no RAAF tem In de 224A, portanto a corrente a ser substituída na equação 7 é de 2240A.

$$I_{50} = \frac{2240A}{768} = 2,9166 A$$

A tabela apresenta os valores injetados pela mala e como deveriam ser medidos pelo RAAF, ficando para o próximo capítulo a análise dos mesmos.

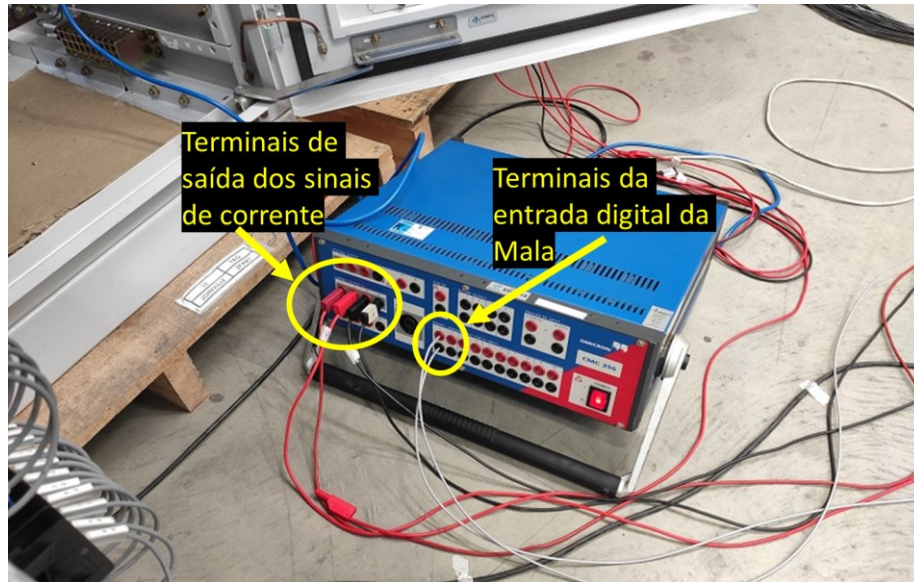
**Tabela 8 - Correntes injetadas no RAAF**

Grandeza/característica	Sobrecorrente		Curto-Circuito	
Condição de alimentação	230Vca	auto	230Vca	auto
$I_{inj}$ (A)	0,3478	0,3478	3,034	3,034
$I_{inj} \times RT$ (A)	267,1104	267,1104	2330,112	2330,112

Fonte: o autor

A figura 16, apresenta a mala de injeção de corrente, identifica os terminais de saída da corrente, que circula da mala ao relé, e a entrada binária, que é curto circuitada pelo relé auxiliar, interrompendo o cronometro interno da mala Omicron.

**Figura 16 - Mala de Teste Omicron utilizada no ensaio**

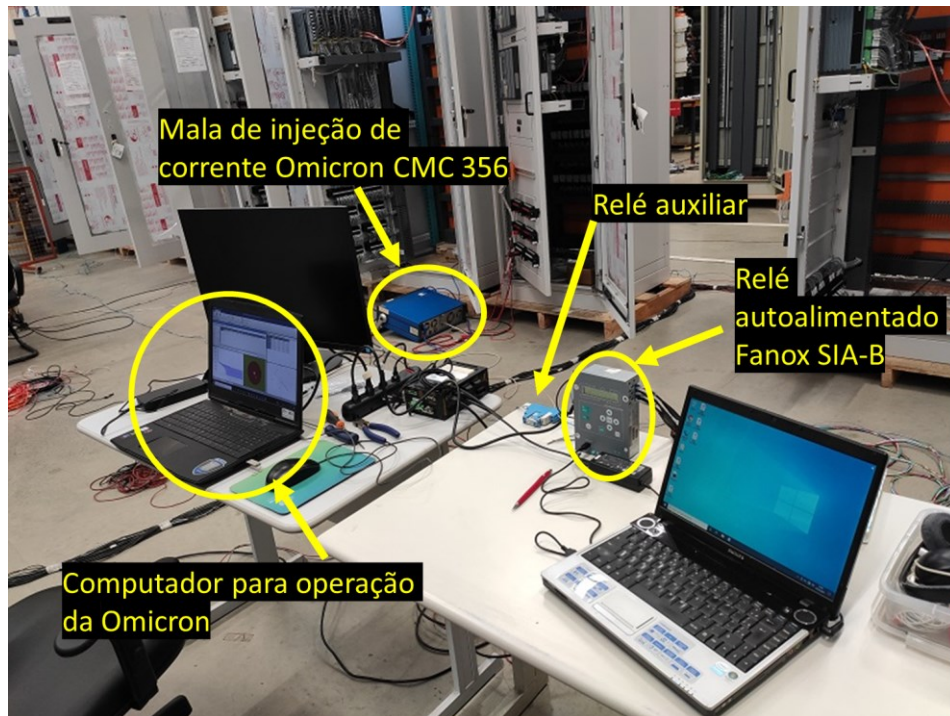


**Fonte: o Autor**

Na figura 17, estão evidenciados o relé autoalimentado FANOX SIA-B, com o relé auxiliar da marca Finder sendo acionado por um trem de pulsos do RAAF. Também destacado o computador que foi utilizado como interface homem máquina com a mala de injeção de corrente Omicron, além da própria mala.

Durante o ensaio, foi observado que o relé envia uma série de pulsos ao atuador de abertura do disjuntor, mostrado na figura 13 e neste ensaio substituído pelo relé auxiliar. Tal condição é aplicada pois o atuador ao contrário de uma bobina de abertura de disjuntor de média tensão, não é um solenoide e sim uma mola pré-carregada que é liberada ao receber um pulso externo. Esta característica de atuação, embora sutil, deve ser observada para evitar a aplicação errônea de bobinas de disparo com RAA. Bobinas convencionais apresentam uma corrente muito elevada e impossível de ser suprida pelo RAA. Adicionalmente a aplicação do disparado como bobina de abertura remota, pode ser prejudicial a vida útil do atuador, pois a permanência de tensão em seus terminais pode antecipar a falha do mesmo.

**Figura 17 - Teste " chão de fábrica " do relé autoalimentado**



Fonte: o Autor

#### 4.4 CONSIDERAÇÕES

Neste Capítulo, foi exibida a arquitetura do ensaio e apresentado os parâmetros ajustados no RAAF, para ensaio e comprovação da operação do relé para PCS. Explicadas as condições de ensaio e a simulação do disparador por um relé auxiliar, com o intuito de excluir o erro humano. No Capítulo seguinte, serão apresentados os valores obtidos, pela mala de teste e os calculados para o RAAF, bem como uma comparação, entre os relés mencionados com os dados fornecidos pelos fabricantes.



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A simulação neste estudo não tem como função verificar se os parâmetros ajustados são corretos para proteção de uma PCS de GC, pois a definição dos parâmetros é resultado dos cálculos e estudos, elaborados pelo engenheiro electricista, para um determinado unifilar e equipamentos. A simulação que se segue, tem por objetivo verificar se o RAA opera adequadamente, na condição de autoalimentado e alimentação externa, servindo a condição de autoalimentado como retaguarda para proteção do conjunto PCS.

### 5.1 ENSAIO RAAF

Conforme descrito no Capítulo anterior, a mala de teste injetou corrente nos enrolamentos dos TCs internos do RAAF, como mostrado na figura 15, simulando o secundário dos TCs do PMT GIS, observando-se a relação de transformação apresentada no manual do RAAF para o TC064-5 que é de 768.

Conforme descrito no Capítulo 4, restrições de tempo para utilização da mala de injeção de corrente, não permitiram um grande número de medições ou mesmo a repetição das que se seguem.

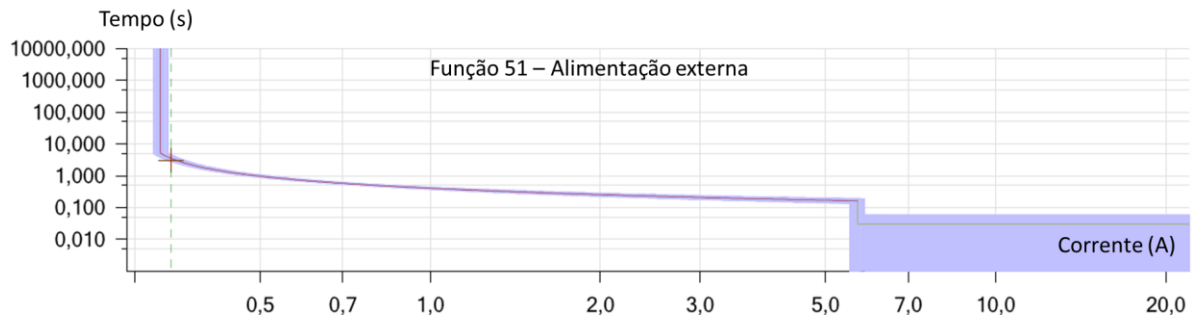
As medições evidenciam que ocorreram desvios no tempo de comando de abertura do medido para o calculado. Desvios estes que mereceriam uma série de reensaios, para verificar a repetição, e mesmo a possibilidade de oscilografar estas injeções de corrente e comando de abertura, com equipamento externo próprio, eximindo-se possível erro de leitura da mala.

O objetivo do teste era verificar a operação do relé nas condições de alimentação externa, comparando com a autoalimentado, na opção de sobre corrente temporizada e de sobre corrente instantânea e sem uma corrente de pré falta.

O gráfico 11 apresenta o ensaio de sobrecorrente temporizada para o RAAF na condição de alimentação externa de 230Vca. Na condição de alimentação externa, os processadores, conversores e demais blocos da eletrônica do relé, já estão operativos quando da injeção de corrente, portanto o RAAF deve operar como

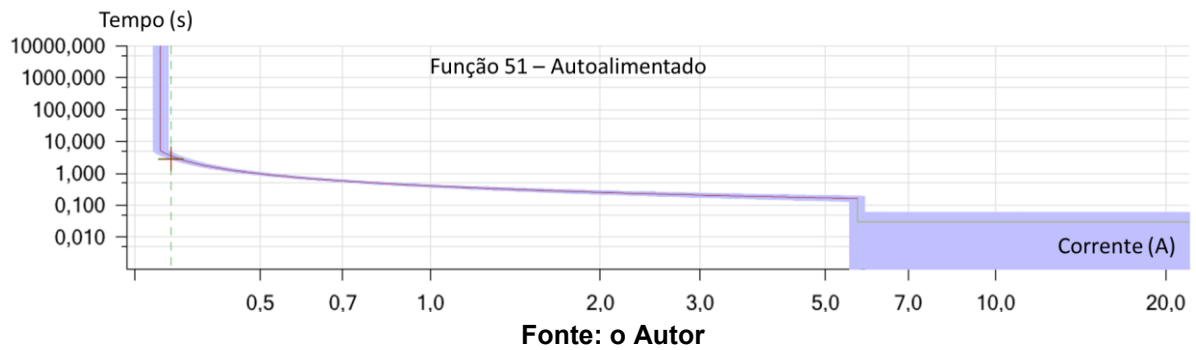
um relé de sobre corrente padrão. A corrente injetada, pela mala de testes, foi de 0,3478A, que deveria ser medida pelo relé como 267,11A de acordo com a equação 7. O valor medido pelo relé foi de 271,04A, o que representa um erro de 1,5% na medição e uma atuação 350ms mais rápida que o desejado.

**Gráfico 11 - Função 51 com alimentação externa (RAAF)**

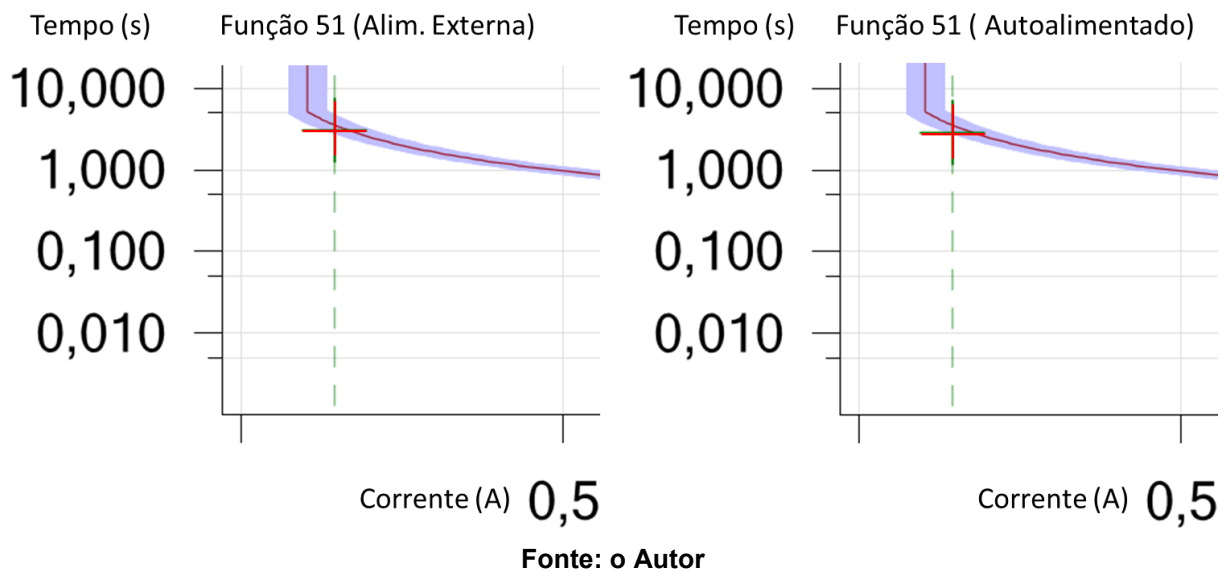


O gráfico 12 apresenta a curva de sobre corrente temporizada medida pela mala de teste para o RAAF na condição de autoalimentado. Neste ensaio o relé estava sem alimentação externa e sem uma corrente pré falta, portanto seus circuitos internos estavam desligados. Devemos observar, que a corrente injetada estava abaixo dos  $0,4 I_n$ , conforme tabela 2. O relé é desenvolvido para TCs próprios que apresentam uma faixa de trabalho de grande amplitude, conforme tabela 6. Portanto, devem ser preparados para operar em  $0,4 I_n$ , da faixa mais baixa de corrente primaria, considerando o piro caso. Conseqüentemente o relé pode operar com valores de corrente secundaria de 0,3 A, para TCs de 1A, dado a perdas no TC e cabos. Outro detalhe informado pelo fabricante, também observado neste ensaio, é que o RAAF na condição autoalimentado, apresenta um valor medido superior ao da condição de alimentação externa, para uma mesmo valor de corrente injetada em seus enrolamentos. A corrente injetada, em ambas as situações, foi de 0,3478A que aplicada a equação 7 resulta em 267,11A. Na condição de autoalimentado o relé indicou 281,34A.

Deve ser observado, que o tempo ajustado para abertura, por sobre corrente temporizada é superior ao tempo de inicialização dos componentes internos, conseqüentemente a condição se SOTF do relé não gera atraso no comando de trip.

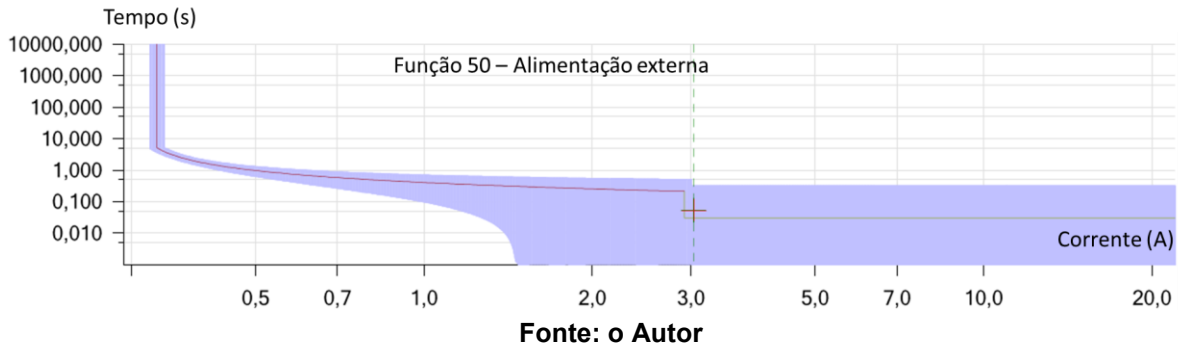
**Gráfico 12 - Função 51 auto alimentado (RAAF)**

A mala de teste indica nos gráficos o ponto de comando do relé, ponto este indicado nos gráficos 11 e 12, porém evidenciados na figura 18. A diferença de tempo de atuação, nas duas condições de alimentação, é melhor percebida na tabela 9.

**Figura 18 – Detalhe dos pontos de atuação função 51**

O gráfico 13 apresenta o RAAF operando na proteção de sobrecorrente instantânea na condição de alimentação externa 230 Vca, assim como descrito anteriormente, a inexistência de corrente pré falta, não impactou no comando de trip do relé, pois a alimentação externa permite que os circuitos internos do relé operem antes da falta. O erro observado, no tempo medido pela mala, já descontado o atraso de relé auxiliar foi de 22ms, com uma corrente medida de 2286,14A.

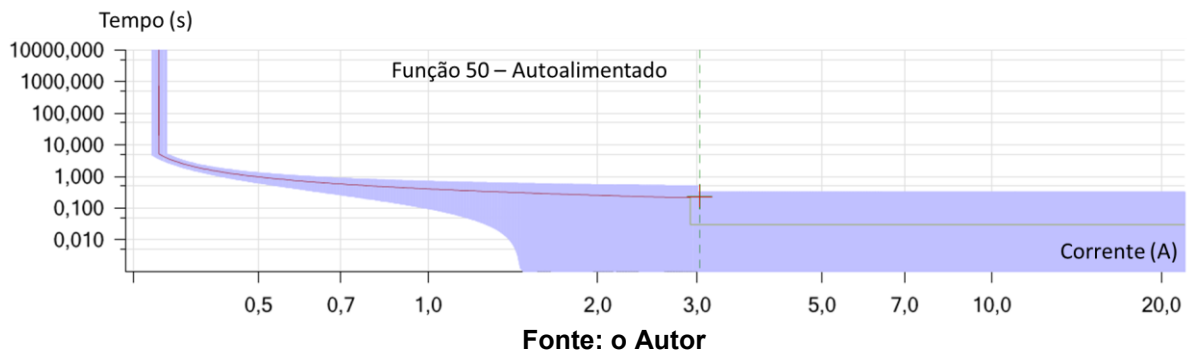
**Gráfico 13 - - Função 50 alimentação externa (RAAF)**



O gráfico 14 apresenta o ensaio de sobre corrente instantanea, com o relé autoalimentado. A corrente injetada pela mala de teste, foi a mesma da condição de alimentação externa, 3,034A, que aplicada na equação 7 resulta em 2330,11A.

A exemplo do ocorrido na medição de sobrecorrente temporizada, o RAAF mede uma corrente superior na condição de autoalimentado se comparada com a alimentação externa.

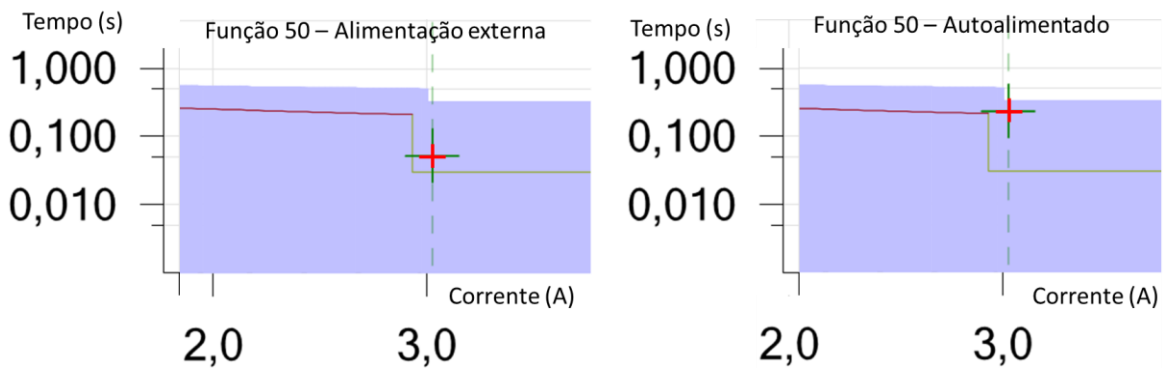
**Gráfico 14 - Função 50 autoalimentado (RAAF)**



Neste ensaio o efeito do tempo de inicialização dos circuitos internos, SOTF, devido a não existencia de uma corrente pré falta, é observavel. Adicionalmente, o relé deve carregar o capacitor interno para disparo do Atuador. Consultando o Grafico da figura 25, observamos que o RAAF , para uma corrente de 3 In trifasica, levará 220ms para disponibilizar os 24V necessários, para o trip no atuador de mesma tensão. Consultando a tabela 9, observaremos que o tempo ajustado, no qual se retira o atraso do relé auxiliar foi de 220,9ms, medido pela mala de teste.

Com o objetivo de melhor visualização, a figura 19, apresenta o detalhe do ponto de atuação das duas condições de ensaio de sobre corrente instantanea.

**Figura 19 - Detalhe dos pontos de atuação função 50**



Fonte: o Autor

**Tabela 9 - Resultado das injeções de corrente no RAAF**

Grandeza/característica	Sobre corrente		Curto-Circuito	
	230Vca	auto	230Vca	auto
Condição de alimentação	230Vca	auto	230Vca	auto
$I_{inj}$ (A)	0,3478	0,3478	3,034	3,034
$I_{inj} \times RT$ (A)	267,1104	267,1104	2330,112	2330,112
$I_{med}$ (A)	271,04	281,34	2.286,14	2.314,37
T (IEC N inv) 51P calculada (seg)	3,23	2,59		
Instantâneo 50P (seg)			0,02	0,02
$t_{mala}$ (seg)	3,036	2,846	0,052	0,2309
$t_{rele\ auxiliar}$ (seg)	0,01	0,01	0,01	0,01
$t_{ajustado} = T_{mala} - t_{rele\ auxiliar}$ (seg)	3,026	2,836	0,042	0,2209

Fonte: o Autor

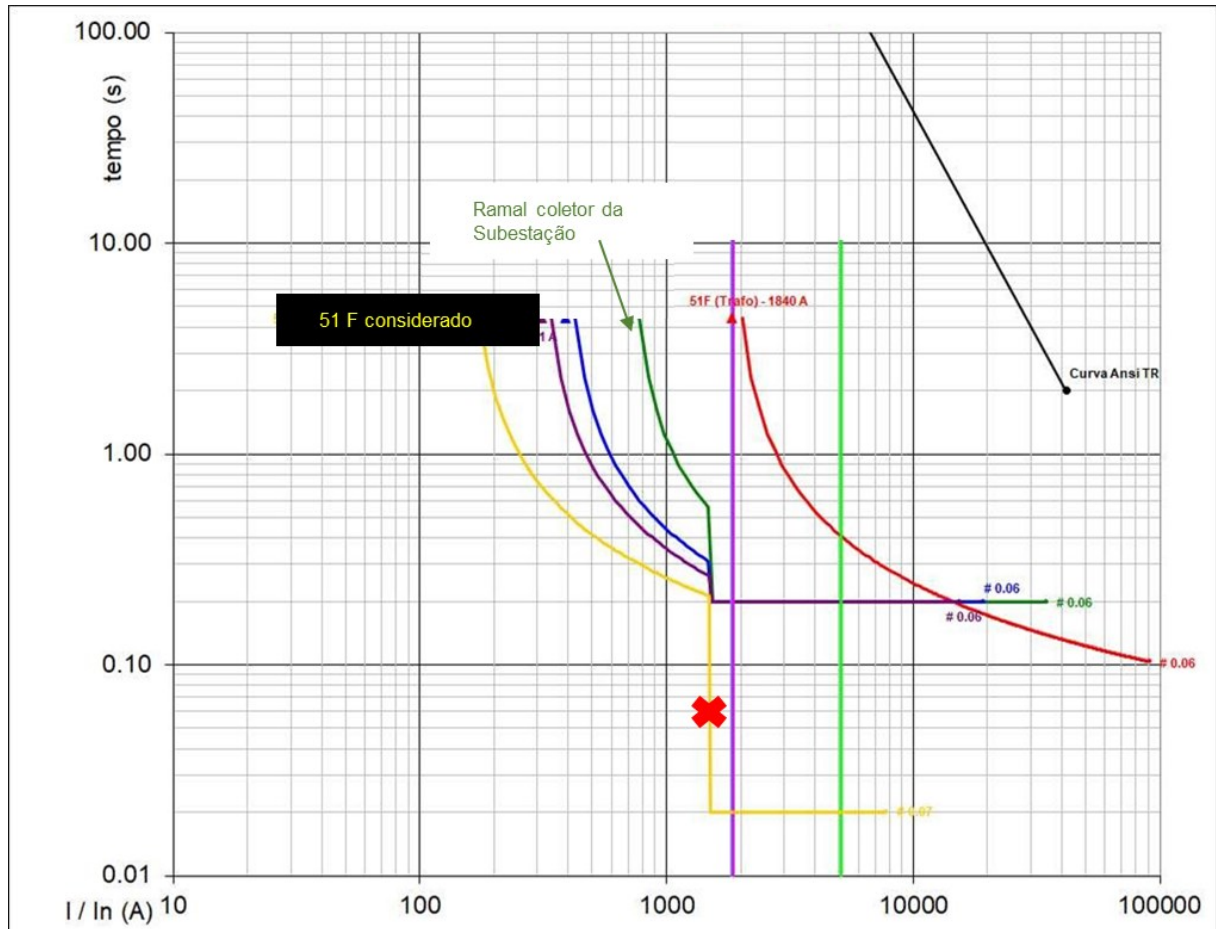
Nas aplicações de UFV, como já apresentado, a busca por um CAPEX baixo, além da improvável necessidade da rápida reconfiguração da corrente nominal do circuito, aplica-se RAA com TC standard. Observando-se a tabela 2, para o RAA com TC standard o SOTF de  $1,5 I_n$  é de 57,2ms, muito inferior ao do RAAF.

Aplicando-se no coordenograma, da UFV que serviu de base de parametros, podemos observar, conforme gráfico 15, que o ponto de atuação, na condição de sobre corrente instantanea com auto alimentação, é anterior ao comando de trip do ramal coletor na qual a PCS está conectada.

Para melhor entendimento, a curva do RAA está plotada em amarelo e a curva do ramal coletor em verde escuro, o ponto de atuação por SOTF em vermelho. As demais PCS estão com suas curvas ploradas em roxo e azul. A curva em

amarelo foi escolhida para exemplo, pois apresenta uma condição mais crítica de SOTF se comparada as demais PCS.

**Gráfico 15 - Coordenograma da UFV em estudo**



Fonte: o Autor

## 5.2 CONSIDERAÇÕES

Neste Capítulo, foram mostradas as curvas dos ensaios, tabelados valores obtidos e discutindo-se os resultados. Apresentou-se o coordenograma da UFV que serviu de base de dados para a simulação, assim como foi evidenciada a atuação do RAA dentro do desejado. No Capítulo 6 será apresentada a conclusão do estudo.

## 6 CONCLUSÕES

O RAAF ensaiado quando da condição de alimentado externamente atuou dentro da faixa desejada com um pequeno atraso, para sobrecorrente temporizada como para instantânea, atendendo a expectativa de resposta dos valores ajustados para atuação.

Quando da condição de autoalimentado e em atuação de sobre corrente temporizada o relé tem seu SOTF próximo da curva ajustada, apresentando uma resposta mais rápida que na condição de alimentação externa.

Na condição de curto o RAAF atua após o tempo definido, porém dentro do tempo de SOTF especificado pelo fabricante para a tensão do disparador previamente especificado, lembrando que um relé auxiliar rápido foi usado em substituição ao disparador.

O atraso observado no disparo pelo SOTF foi de 220 ms o que coincide com o valor espelhado no gráfico 10. O comando de trip com atraso é indubitavelmente melhor que o não comando de trip, porém observa-se que este atraso impede uma boa seletividade, além de ser um esforço adicional ao equipamento sob falta.

Como anteriormente apresentado, dificilmente ocorre a necessidade reconfiguração de uma PCS, pois implicaria na troca do transformador de potência, o que representa o segundo maior custo de construção de uma PCS, perdendo apenas para os inversores centrais. Obviamente em PCS com inversores String o transformador é o maior custo. Conseqüentemente, não se aplicam RAA com TCs próprios e sim com TCs standard, o que representa um menor custo, aliado a um menor tempo de SOTF, conforme tabela 2.

Como é possível observar, no coordenograma do gráfico 15, a aplicação do Rele Autoalimentado ,com TCs standard, apresenta a vantagem da retaguarda da autoalimentação, evidenciando a sua correta utilização no segmento de fotovoltaicas de geração centralizada, bem como nas distribuídas onde é cabível proteção em média tensão.

Mesmo não sendo alvo do presente estudo as capacidades de comunicação dos RAA, ressalta-se que os equipamentos estudados não apresentam comunicação durante o comando de trip na condição de autoalimentado, o que impede a implementação de seletividade lógica direta pelo relé, em um sistema

radial com disjuntores protegendo o cabo que conecta uma PCS a outra, em função do tipo de falta e localização da mesma, com o estudado em (DEDÈ *et al.*, 2014). Tal funcionalidade seria possível com a adição da função de proteção 67 e comunicação em IEC 61850 com GOOSE, bem como manutenção da comunicação na condição de autoalimentado.

Estudos com RAA no segmento de distribuição urbana (BAKER *et al.*, 1997) subterrânea, com emprego de PMT GIS (BIASSE; CHALLOT; TOBIAS, 2009) de uso não submersível são conhecidos e formaram o base para este trabalho. Certamente o presente estudo não é inédito ao tratar de RAA no segmento fotovoltaico. Porém, o tema poderia ser mais explorado por outros interessados, pois é muito reduzida a literatura com este viés de aplicação do RAA. Dado ao exposto, futuros trabalhos poderiam abordar técnicas de seletividade lógica valendo-se de RAA, com combinação deste com remotas, em GC de fotovoltaicas ou mesmo uma comparação entre o RAA e relés com IEC 61850 no segmento fotovoltaico de GC.



## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6856**: Transformador de Corrente - Especificação e ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**. São Paulo: ABSOLAR, 2021. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico>. Acesso em: 30 set. 2021.

AJAEI, F.B *et al.* Compensation of the Current-Transformer Saturation Effects for Digital Relays, **IEEE Transaction on power deliver**, [s.l.], v. 26, n. 4, p. 2531-2540, 2011. DOI:10.1109/TPWRD.2011.2161622 Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5989885> Acesso em: 8 set. 2021

ALBOAOUH, K.A.; MOHAGHEGHI, S. Impact of Rooftop Photovoltaics on the Distribution System. **Journal of Renewable Energy**, [s.l.], v. 2020, p. 1- 23, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/4831434> Acesso em: 12 out. 2021

ANEEL. Ministério de Minas e Energia. **Resolução normativa N° 687**, Geração Distribuída. Brasília, 2015. Disponível em : <https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>. Acesso em: 14 de out. 2021

ASSIS, S. D. C. et al. Subestação compacta integrada - SECI, um padrão estratégico de sucesso para expansão dos sistema elétrico da CEMIG *In*: Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica, 25, 2019. Belo Horizonte. **Anais**, Belo Horizonte, [s.n.], 2019, p. 1 - 9. Disponível em <http://www.bvr.com.br/snptee/xxvsnptee/public/GSE/4314.pdf>. Acesso em 05 out. 2021

BABAEI, M. ; SIADA, A. A. Monitoring of SF6 Degradation in GIS Using Frequency Response Analysis. **Instrumentation and Detectors**, [s.l.], p. 5, 2017. DOI:<https://doi.org/10.48550/arXiv.1703.00513> Acesso em: 15 jun. 2021

BAKER, D. et al. Application considerations of static overcurrent relays: a working group report. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [s.l.], v. 6, n. 3, p. 1493-1500, 1997. DOI: 10.1109/28.649961. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/649961>. Acesso em: 14 dez. 2021

BARAN, M. *et al.* Accommodating High PV Penetration on Distribution Feeders, **IEEE Transactions on Smart Grid**, [s.l.], v. 3, p. 1039-1046, 2012. DOI: 10.1109/TSG.2012.2190759. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6204237> Acesso em: 05 Dez. 2021.

BAYRAM, S. Demand-Side Management for PV Grid Integration. In: Polo, J., Martín-Pomares, L., Sanfilippo, A., **Solar Resources Mapping**, 1, [s.l.], Springer-Verlag, 2019, v.1, p. 313-325. DOI:10.1007/978-3-319-97484-2\_13 Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-97484-2\\_13](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-97484-2_13) Acesso em 15 dez. 2020

BENMOUYAL, G.; ROBERTS, ; ZOCHOLL, S. E. Seleção de TCs para Otimização do Desempenho dos Relés. **SEL Journal of Reliable Power**, [s.l.], 2016, 10p. Disponível em: [https://www.academia.edu/download/47941762/6027\\_Selecao\\_de\\_TC\\_s\\_para\\_Otimizacao\\_do\\_Desempenho\\_dos\\_Reles.pdf](https://www.academia.edu/download/47941762/6027_Selecao_de_TC_s_para_Otimizacao_do_Desempenho_dos_Reles.pdf) Acesso em: 15 nov. 2020

BIASSE, J. M.; CHALLOT, Y.; TOBIAS, J. Circuit-breaker RMU improves MV/LV transformer protection. *In: International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, 20, 2009, Praga, **Proceedings**, Praga, IEEE, 2009. p. 4. DOI: 10.1049/cp.2009.0678. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5255871> Acesso em 15 Out. 2021

BLOOMBERG FINANCE L.P. **New Energy Outlook - Executive Summary**: 2021. Nova Iorque [s.n.], 2021. 16 p. Disponível em: <https://assets.bbhub.io/professional/sites/24/NEO-Executive-Summary-2021.pdf> Acesso em: 02 dez. 2021

BOHM, V.. Creating Incentives for Environmentally Enhancing Technological Change: Lessons From 30 Years of U.S. Energy Technology Policy. **Technological Forecasting and Social Change**, Amsterdam, 2000, v. 65,n. 2, p.125 – 148. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(00\)00076-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(00)00076-7) Acesso em 05 Out. 2021

BRASIL. Ministerio do Meio Ambiente. **21st Conference of the parties to the United Nations framework on climate change and 11th Conference of the parties serving as meeting of the parties to the Kyoto protocol**. Brasília . MMA. p. 18. 2015. Disponível em : <http://redd.mma.gov.br/images/central-de-midia/pdf/artigos/factsheet-cop21.pdf> Acesso em 06 Out. 2021

CARVAJAL, P. *et al.* Benchmarking Scenario Comparisons: Key indicators for the clean energy transition. **International Renewable Energy Agency, European Commission's Joint Research Centre**. Abu Dhabi e Bruchelas, p. 1 - 112. 2021. (ISBN 978-92-9260-359-5). Disponível em: [https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Sep/IRENA\\_JRC\\_Benchmarking\\_Scenario\\_Comparisons\\_2021.pdf](https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Sep/IRENA_JRC_Benchmarking_Scenario_Comparisons_2021.pdf) Acesso em: 08 Set. 2021

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: Mc Graw Hill, v. 1, 2013. ISBN ISBN 0073529540/9780073529547.

CORNA, R. F. **Uso da IEEE 1588 e do SDN para aplicação da norma IEC61805-9-2: substituição de sinais analógicos por LAN em subestações de energia elétrica**,

2015, Monografia (especialista em Teleinformática e Redes de Computadores), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2015. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/19983> Acesso em: 04 Agosto 2021

DEDÈ, et al. IEC 61850-based logic selectivity scheme for the MV distribution network. *In: International Workshop on Applied Measurements for Power Systems, 2014, [s.l.], Proceedings, [s.l.], IEEE, 2014, p. 1 - 5.* Disponível em: doi: 10.1109/AMPS.2014.6947715 Acesso em : 14 Jul. 2021

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Ministério de Minas e Energia. **Plano decenal de expansão de energia 2029**. EPE. Rio de Janeiro, p. 393. 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-423/topico-482/03%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Centralizada%20de%20Energia%20El%C3%A9trica.pdf> Acesso em 02 Jan. 2022

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Ministério de Minas e Energia. **Plano decenal de expansão de energia 2030**. EPE. Rio de Janeiro. p. 453. 2021. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/PDE%202030\\_RevisaoPosCP\\_rv2.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/PDE%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf). Acesso em: 02 Jan. 2022

FERREIRA, M. J. G. **Inserção da energia solar fotovoltaica no Brasil**, 1993, Dissertação (mestrado em energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. DOI: 10.11606/D.86.1993.tde-05122011-141720. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-05122011-141720/publico/MariaJulita.PDF> Acessado em: 15 nov. 2021

GARCÍA, L.; LUJÁN, J.; MASOLLER, S. Tableros de media tensión en contenedores. *In: Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas 5, 2005, Montevideo, Proceedings, Montevideo, UR. FING, 2005. p. 1-4.* Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12008/21181> Acesso em 15 Jan. 2021

GESUALDI, M. E. R. Eletrocentros e sistema integrado de automação. *In. Seminário de Automação e TI Industrial, 19, Rio de Janeiro, 2015, Anais, Rio de Janeiro, ABM, 2015, p. 274-282.* Disponível em: 10.5151/2237-0234-26986 Acesso em: 02 Jul. 2021

GOMES, V. P. et al. Technical-economic analysis for the integration of PV systems in Brazil considering policy and regulatory issues. **Energy Policy**, [s.l.],v. 115, 2018, p.199-206. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421518300156>. Acesso em: 25 Set. 2021

GUARNIERI, M. V. **Usinas solares fotovoltaicas com seguimento em um eixo no Brasil: aspectos da construção, custos e expectativa de desempenho**, 2017, Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa

Catarina, Florianópolis, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/189002> Acesso em: 15 Jul. 2021

JEFFERIES, K. **System and method for monitoring current drawn by a protected load in a self-powered electronic protection device**. Schneider Electric USA Inc. US 8,854,032 B2, 12 Janeiro 2011. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US8854032> Acesso em: 22 Agosto. 2021

JOHNSON, W.. **Metamaterial applications for vibration and wave propagation in 1D elastic rods**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Georgia Institute of Technology. Atlanta, 2020. Disponível em <http://hdl.handle.net/1853/64097> Acesso em 23 Jul. 2021

KHATI, T.; SABRI, L. Grid Impact Assessment of Centralized and Decentralized Photovoltaic-Based Distribution Generation: A Case Study of Power Distribution Network with High Renewable Energy Penetration. **Mathematical problems in engineering**, Londres, v. 2021, 2021, p.16. DOI: 10.1155/2021/5430089. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2021/5430089> Acesso em: 15 Dez. 2021

KORZENIEWICZ, M. B. D. V. **Análise da matriz energética brasileira e a participação das energias renováveis a partir das políticas ambientais energéticas**, 2021, Dissertação ( Mestrado em Economia do Desenvolvimento) Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021. Disponível em: [http://tede2.pucrs.br/tede2/bitstream/tede/9825/2/MARIZA%20\\_BETHANYA\\_DALLA\\_VECCHIA\\_KORZENIEWICZ\\_DIS.pdf](http://tede2.pucrs.br/tede2/bitstream/tede/9825/2/MARIZA%20_BETHANYA_DALLA_VECCHIA_KORZENIEWICZ_DIS.pdf) Acesso em 15 Dez. 2021

LEME, A. A. O setor elétrico brasileiro entre as transformações contemporâneas: o caso da crise elétrica em 2001. **Crítica e Sociedade: Revista de Cultura Política**, Uberlândia, v. 8, 2018, p. 4 - 34,. ISSN 2237-0579. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/342598907> Acessado em: 14 Jul. 2021

LOUTAN, *et al.* Demonstration of Essential Reliability Services by a 300-MW Solar Photovoltaic Power Plant. **National renewable energy laboratory**, Golden, 2017, p. 67. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/67799.pdf> Acesso em: 8 Set. 2021

LUMBRERAS, D. *et al.* Novel three-phase topology for cascaded multilevel medium-voltage conversion systems in large-scale PV plants. *In: Workshop on Control and Modeling for Power Electronics*, 21, 2021, [s.l.], Proceedings, [s.l.],:IEEE, 2020. p. 1 - 8. DOI: 10.1109/COMPEL49091.2020.9265706 Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9265706> Acesso em: 12 Out. 2021

NEHRING, R. *et al.* COP26 Futures We Want - Brazil Country Profile. **Cambridge open engage**, [s.l.], 2021. Disponível em: <https://www.cambridge.org/engage/coe/article-details/617fe0cb7a002142c142472e> Acesso em 15 nov. 2021.

NETTO, U. C. **Aplicações de controle e supervisão distribuídas em subestações de energia elétrica através do uso de relés digitais de proteção**, 2008, Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica) Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-16042008-144037/publico/Ulisses.pdf> Acesso em: 10 mai. 2021

NEUMANN, T. ; ERLICH, I.; Short Circuit Current Contribution of a Photovoltaic Power Plant. *In: Power Plant and Power System Control Symposium*, 8, 2012, [s.l.]. **Proceedings**, [s.l.] Elsevier B.V. 2012. p. 343-348. Disponível em: <https://doi.org/10.3182/20120902-4-FR-2032.00061> Acesso em 15 nov. 2021

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. **Submódulo 2.10** - Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão. Brasília, p. 33. 2021. Disponível em: [https://apps08.ons.org.br/ONS.Sintegre.Proxy/ecmprsite/ecmfragmentsdocuments/Subm%C3%B3dulo%202.10-RQ\\_2021.08.docx\\_f72e315f-74a1-4c83-b601-d92d605fd0e6.pdf](https://apps08.ons.org.br/ONS.Sintegre.Proxy/ecmprsite/ecmfragmentsdocuments/Subm%C3%B3dulo%202.10-RQ_2021.08.docx_f72e315f-74a1-4c83-b601-d92d605fd0e6.pdf) Acesso em: 12 out. 2021

ONU. **The Paris agreement**. Paris, 2015, Disponível em : <https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement> Acesso em: 3 abr. 2020.

PALAFIX, S. Economical Self-Powered Transformer Protection. *In: International Energy Transmission and Distribution Conference & Exhibition*. 7, **Proceedings**, Adelaide, Waldron Smith Management, 2003. p. 1106 - 1119. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.587.7892&rep=rep1&type=pdf> Acesso em: 27 jan. 2021

PERLIN,. Silicon Solar Cell Turns 50. *In: World Conference on PV Energy Conversion*, 3, **Proceedings**,. Golden, [s.n.], 2003, 4 p. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/33947.pdf> Acesso em: 02 jan. 2022

PRETI, F. A. PLANO DE CONTROLE AMBIENTAL - PCA - USINA SOLAR PIRAPORA 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10. **Anjo Azul consultoria ambiental**. Votuporanga, 2016, p. 1 - 129. Disponível em: <http://siam.mg.gov.br/siam/lc/2017/0134920170012017/2168882017.pdf> Acesso em: 14 jun. 2021

PURNOMODI, P.; MOR, R.; SMIT,. Spacer flashover in Gas Insulated Switchgear (GIS) with humid SF6 under different electrical stresses. **International journal of electrical power & energy systems**, [s.l.], 2020,v. 116,. 9p. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105559> Acesso em: 4 jan. 2021

RUFATO JR., E. **Viabilidade técnica e econômica da modernização do sistema de proteção da distribuição**, 2006, Dissertação (mestrado em sistemas de potência), Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006. Disponível em:

[https://www.researchgate.net/profile/Eloi-Rufato/publication/35412024\\_Viabilidade\\_tecnica\\_e\\_economica\\_da\\_modernizacao\\_do\\_sistema\\_de\\_protecao\\_da\\_distribuicao/links/57485e1a08aec86c2fbd6294/Viabilidade-tecnica-e-economica-da-modernizacao-do-sistema-de-protecao-da-distribuicao.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Eloi-Rufato/publication/35412024_Viabilidade_tecnica_e_economica_da_modernizacao_do_sistema_de_protecao_da_distribuicao/links/57485e1a08aec86c2fbd6294/Viabilidade-tecnica-e-economica-da-modernizacao-do-sistema-de-protecao-da-distribuicao.pdf) Acesso em: 10 ago. 2021

SHUGUANG, L.; QIULAN, K.; WENSHENG, S. Design of self-powered digital over-current protector. *In: International Conference on Electrical and Control Engineering, 2011, Proceedings, Yichang, IEEE, 2011, p. 1047-1050. DOI: 10.1109/ICECENG.2011.6057959. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6057959* Acesso em: 10 out. 2021

SIDHU, T. S.; BEJMERT,. Short-circuit current contribution from large scale PV power plant in the context of distribution power system protection performance. *In: Conference on Renewable Power Generation, 2011, Proceedings, Edinburgh, IET, 2011. p. 6, DOI: 10.1049/cp.2011.0153 Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6136102* Acesso em: 22 ago. 2021

SILVA, L. *et al.* **Tutorial do programa Anarede com base em configurações do sistema elétrico de potência.** [s.l.], [s.n.], 2017. ISBN 9781521367094. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/317229699\\_TUTORIAL\\_DO\\_PROGRAMA\\_ANAREDE\\_COM\\_BASE\\_EM\\_CONFIGURACOES\\_DO\\_SISTEMA\\_ELETRICO\\_DE\\_POTENCIA](https://www.researchgate.net/publication/317229699_TUTORIAL_DO_PROGRAMA_ANAREDE_COM_BASE_EM_CONFIGURACOES_DO_SISTEMA_ELETRICO_DE_POTENCIA) Acesso em: 23 dez. 2021

SILVA, P.. **Investigação sobre os efeitos da saturação em transformadores de corrente de proteção**, 2014, Monografia (Engenharia de Sistemas Elétricos de Potência), Universidade Federal de Minas. Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-9XSK7J> Acesso em: 27 jan. 2020

SMA. **Technical Information short-circuit currents information on short-circuit currents of SMA PV inverters.** SMA Solar Technology AG. Niestetal, p. 6. 2021. Disponível em: <https://files.sma.de/downloads/lscpv-TI-en-20.pdf> Acesso em: 5 nov. 2021

STEVENSON JR, W. D. **Elements of power system analysis.** 3<sup>a</sup>. ed. Tokyo: McGraw- Hill, 1975.

SUN, B.; YU, Y.; QIN, C. Should China focus on the distributed development of wind and solar photovoltaic power generation? A comparative study. **Applied energy**, [s.l.], v. 185, p. 1 – 19, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.004> Acesso em: 17 jun. 2021

THEOLEYRE,. **MV breaking techniques**, Cahier technique no. 193, Paris, Schneider Electric, 1999, p. 1-36, Disponível em: <https://www.se.com/ww/en/download/document/CT193/> Acesso em: 03 jun. 2021.

TRUJILLO, K. R. B. **Modelos simplificados de geradores distribuídos para estudos de cálculo de curto-circuito**. 2017, Dissertação( mestrado em engenharia elétrica) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017. Disponível em: [https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/CAMP\\_412e3d8c7906ba1db507e850a53032d7](https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/CAMP_412e3d8c7906ba1db507e850a53032d7) Acesso em: 15 ago. 2020

UZEL, S. *et al.* 17.5kV 630A SF6 Gas Insulated Outdoor Type Compact RMU Design For Smart Grid Applications. *In: International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair, 7, Proceedings*, 2019, Istanbul: IEEE. 2019. p. 238-241. DOI: 10.1109/SGCF.2019.8782394 Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8782394> Acesso em: 15 nov. 2021

VEIGA, *et al.* O impacto econômico das propostas de revisão da resolução 482/2012 da ANEEL para os prossumidores de geração dsitribuida. *In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, Anais*, Fortaleza, Associação Brasileira de Energia Solar, 2020. p. 2 – 7, Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/985> Acesso em 11 nov. 2021

VELOSO, K. P. R.; TEIXEIRA, W. C.; DA SILVA JR, D. C. Energia Fotovoltaica: legislação e incentivos pelo mundo e como impactam o Brasil. **Caderno de estudos da engenharia elétrica**, v. 3, 2021, p. 1 – 31. Disponível em: <<https://seer.uniacademia.edu.br/index.php/eletrica/article/view/2960>>.

VOGEL,. **A quantitative comparison of central inverters and string inverters in utility-scale solar systems in north america**. Schneider Electric. [s.l.], 2016, p. 11.

WILLEKE, G. P.; RÄUBER, A. On The History of Terrestrial PV Development: With a Focus on Germany. **Semiconductors and semimetals**, [s.l.], v. 87, P 8 – 47, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-388419-0.00003-0>>.

YOSHINO, T. *et al.* MW-range PCS for efficient operation of large PV plants — High efficiency and less maintenance works, *In: International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, 3, Aalborg, 2012, Proceedings*, [s.l.] IEEE, 2012. p. 249-253, DOI: 10.1109/PEDG.2012.6254009, Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6254009> Acessado em: 27 set. 2021

ZHANG, J. Solar PV Market Research and Industry Competition Report. *In: Asia Conference on Geological Research and Environmental Technology, 2020, 2020, Kamakura City, Proceedings*, [s.l.], 2020, p. 1-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/632/3/032047> Acessado em: 25 set. 2021