

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

**LUIZ GUILHERME VIANNA FRACALOSSI**

**ESTUDO DO FENÔMENO “TRIP SOLIDÁRIO” EM  
ALIMENTADORES DE DISTRIBUIÇÃO COM GERAÇÃO  
BASEADA EM INVERSOR**

VITÓRIA  
2021

LUIZ GUILHERME VIANNA FRACALOSSI

**ESTUDO DO FENÔMENO “TRIP SOLIDÁRIO” EM  
ALIMENTADORES DE DISTRIBUIÇÃO COM GERAÇÃO BASEADA  
EM INVERSOR**

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

Orientador: Prof. Dr. Oureste Elias Batista  
Coorientador: Prof. MSc. Murillo Cobe Vargas

VITÓRIA  
2021

LUIZ GUILHERME VIANNA FRACALOSSI

**ESTUDO DO FENÔMENO “TRIP SOLIDÁRIO” EM  
ALIMENTADORES DE DISTRIBUIÇÃO COM GERAÇÃO BASEADA  
EM INVERSOR**

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

Aprovada em 23 de setembro de 2021.

**COMISSÃO EXAMINADORA:**



---

**Prof. Dr. Oureste Elias Batista**  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador



---

**Prof. MSc. Murillo Cobe Vargas**  
Instituto Federal do Espírito Santo  
Coorientador



---

**Prof. Dr. Augusto César Rueda Medina**  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador



---

**Eng. MSc. Luiz Guilherme Riva Tonini**  
SERENG Engenharia e Consultoria  
Examinador

Aos meus familiares e a minha namorada, que me fizeram acreditar e me apoiaram até o final.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pela oportunidade e pela condição favorável de realizar o curso. Agradeço a minha família, minha grande inspiração, por me apoiar e investir no meu objetivo desde o princípio. Agradeço a minha namorada, o amor da minha vida, por acreditar em mim, mesmo quando eu mesmo não acreditei. Agradeço aos amigos que encontrei ao longo da trajetória, que fizeram ser possível essa conquista.

## RESUMO

A crescente busca por fontes de energia elétrica mais sustentáveis e, conseqüentemente, menos impactantes ao ambiente, alavancou pesquisas e estudos na área dos sistemas elétricos de potência, modernizando a tecnologia existente e as tornando mais atrativas e acessíveis para o consumidor. A viabilização dessa ciência ao usuário possibilitou ao mesmo obter sua própria fonte de energia, deixando de consumir das concessionárias e podendo injetar na rede sua própria parcela. Denominada de geração distribuída (GD), pode essa ter eletrônica de potência na interface gerador-rede, sendo chamados de geração distribuída baseada em inversor, sendo essa responsável por alterar as configurações dos alimentadores de distribuição. A integração em massa de GD ao sistema elétrico de potência (SEP), é responsável pela perda da característica radial do último, visto que o sistema contará com mais de uma fonte ativa de energia, podendo alterar os níveis de corrente de carregamento e o perfil de tensão do circuito, afetando sobretudo a confiabilidade e atuação dos dispositivos de proteção. A nova configuração bilateral da rede e, por conseguinte, a possível falta de dimensionamento e sincronismo da proteção do SEP são responsáveis por situações indesejadas de trabalho, especialmente nas falhas ocorridas no alimentador. Nos casos citados, a presença de dispositivos direcionais nos sistemas de distribuição (SD) pode permitir que a GD seja responsável por alimentar uma falta em ramais ou alimentadores adjacentes da mesma subestação que dispõem de um mesmo ponto em comum, levando à atuação equivocada de outros equipamentos presentes, este fenômeno é denominado *trip* solidário. Dentro de um contexto com grande integração de GD no SEP e diante das novas disposições e características da rede devido à perda da sua natureza radial, este Projeto de Graduação objetiva realizar estudos sobre a operação dos equipamentos de proteção dos SD no cenário mencionado, analisando o fenômeno indesejável de *trip* solidário, seus gatilhos e possíveis metodologias para mitigar o problema. Como resultado, o presente trabalho obteve resultados expressivos na modelagem de alimentadores de distribuição para teste e mostrou que, com a integração de GD na rede, mesmo aquelas baseadas em inversor com limitação de corrente de falta, existe a ocorrência do fenômeno do *Trip* Solidário e uma relação inversamente proporcional com o nível da impedância de falta.

Palavras-Chave: Sistemas Elétricos de Potência, Alimentadores de Energia, Geração Distribuída Fotovoltaica, Sistema de Proteção, *Trip* Solidário.

## ABSTRACT

*The growing search for more sustainable electricity sources and, consequently, less impacting on the environment, leveraged research and studies in the area of electrical power systems, modernizing existing technology and making them more attractive and accessible to the consumer. The feasibility of this science to the user made it possible for them to obtain their own energy source, not consuming from the utilities and being able to inject their own portion into the network. Called distributed generation (GD), it can have power electronics in the generator-grid interface, being called inverter-based distributed generation, which is responsible for changing the configurations of the distribution feeders. The massive integration of GD to the electrical power system (SEP) is responsible for the loss of the radial characteristic of the latter, since the system will have more than one active source of energy, which can change the charging current levels and the profile circuit voltage, mainly affecting the reliability and performance of protection devices. The new bilateral configuration of the network and, therefore, the possible lack of dimensioning and synchronism of the SEP protection are responsible for unwanted work situations, especially in the failures that occur in the feeder. In the cases mentioned, the presence of directional devices in the distribution systems (SD) may allow the DG to be responsible for feeding a fault in adjacent branches or feeders of the same substation that have the same point in common, leading to the mistaken performance of others equipment present, this phenomenon is called sympathetic trip. Within a context with great integration of DG in the SEP and given the new provisions and characteristics of the network due to the loss of its radial nature, this Graduation Project aims to carry out studies on the operation of SD protection equipment in the mentioned scenario, analyzing the undesirable phenomenon of sympathetic trip, its triggers and possible methodologies to mitigate the problem. As result, the present work obtained expressive results in te modeling of distribution feeders for testing and showed that, with the integration of DG in the grid, even those based on inverters whit fault current limitation, there is the occurrence of the phenomenon of Sympathetic Trip and inversely proportional relationship whit the level of the fault impedance.*

Keywords: Electrical Power Systems, Power Feeders, Distributed Generation Photovoltaic, Protection Systems, Sympathetic Trip.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do <i>Trip</i> Solidário.....	15
Figura 2 – Representação de um sistema elétrico de potência .....	19
Figura 3 – Injeção de potência na rede devido à GD.....	20
Figura 4 – Representação esquemática da geração de energia elétrica através do sol .....	21
Figura 5 – Esquemático do sistema de proteção de um alimentador de distribuição .....	22
Figura 6 – Representação IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i> .....	25
Figura 7 – Alimentador 34 <i>Node Test Feeder</i> com filosofia de proteção proposta.....	28
Figura 8 – Alimentador 34NTF com proteção proposta e considerações para análise de <i>trip</i> solidário .....	29

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 – Resultado da simulação do caso 1 para a proteção F2 .....	<b>33</b>
Gráfico 2 – Resultado da simulação do caso 1 para a proteção F7 .....	<b>34</b>
Gráfico 3 – Resultado da simulação do caso 2 para a proteção F2 .....	<b>35</b>
Gráfico 4 – Resultado da simulação do caso 2 para a proteção F7 .....	<b>36</b>
Gráfico 5 – Resultado da simulação do caso 3 para a proteção F2 .....	<b>37</b>
Gráfico 6 – Resultado da simulação do caso 3 para a proteção F7 .....	<b>38</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Corrente nominal dos trechos com proteção 34NTF .....	28
Tabela 2 – Erro relativo (%) das PT entre a modelagem e o relatório técnico do IEEE 34NTF .....	31
Tabela 3 – Erro relativo (%) das LC entre a modelagem e o relatório técnico do IEEE 34NTF .....	32
Tabela 4 – Corrente na proteção F2 para o caso 1 de simulação do 34NTF .....	34
Tabela 5 – Corrente na proteção F7 para o caso 1 de simulação do 34NTF.....	35
Tabela 6 – Corrente na proteção F2 para o caso 2 de simulação do 34NTF .....	36
Tabela 7 – Corrente na proteção F7 para o caso 2 de simulação do 34NTF .....	37
Tabela 8 – Corrente na proteção F2 para o caso 3 de simulação do 34NTF .....	38
Tabela 9 – Corrente na proteção F7 para o caso 3 de simulação do 34NTF.....	38

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

34NTF	IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i>
AD	Alimentadores de Distribuição
DP	Dispositivos de Proteção
GD	Geração Distribuída
GDBI	Geração Distribuída Baseada em Inversor
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
LC	Correntes de Carregamento
PT	Perfil de Tensão

## LISTA DE SÍMBOLOS

$v$	Tensão (V)
$t$	Tempo (s)
$R$	Valor da resistência ( $\Omega$ )
$i$	Corrente (A)
$P$	Potência ativa (w)
$Q$	Potência reativa (VAr)
$L$	Valor da indutância (H)
$C$	Valor da capacitância (F)
$Z$	Valor da impedância ( $\Omega$ )
$B$	Valor da susceptância (S)
$Y$	Valor da admitância (S)
$\omega$	Velocidade angular (rad/s)
$I_{GD}$	Corrente da geração distribuída (A)
$I_{SUB}$	Corrente da subestação (A)
$P_{GD}$	Potência ativa da geração distribuída (W)
$Q_{GD}$	Potência reativa da geração distribuída (VAr)
$P_C$	Potência ativa consumida (W)
$Q_C$	Potência reativa consumida (VAr)
$\Omega$	Ohms
$f$	Frequência (Hz)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Apresentação .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa .....</b>	<b>16</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>17</b>
<b>1.3</b>	<b>Trabalhos Desenvolvidos .....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E SEUS IMPACTOS.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Geração Distribuída .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2</b>	<b>Impactos na Proteção .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3</b>	<b>Desafios na Proteção.....</b>	<b>22</b>
2.3.1	Introdução .....	22
2.3.2	<i>Trip Solidário.....</i>	23
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>24</b>
<b>3.1</b>	<b>Apresentação .....</b>	<b>24</b>
<b>3.2</b>	<b>IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i>.....</b>	<b>24</b>
<b>3.3</b>	<b>Modelagem IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i>.....</b>	<b>25</b>
<b>3.4</b>	<b>Implementação da Filosofia de Proteção.....</b>	<b>27</b>
<b>3.5</b>	<b>Simulações no IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i> .....</b>	<b>28</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>30</b>
<b>4.1</b>	<b>Matriz de Impedâncias IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i> .....</b>	<b>30</b>
<b>4.2</b>	<b>Modelagem IEEE 34 <i>Node Test Feeder</i>.....</b>	<b>31</b>
<b>4.3</b>	<b>Caso 1.....</b>	<b>33</b>
4.3.1	Proteção F2 .....	33
4.3.2	Proteção F7 .....	34
<b>4.4</b>	<b>Caso 2.....</b>	<b>35</b>
4.4.1	Proteção F2 .....	35
4.4.2	Proteção F7 .....	36
<b>4.5</b>	<b>Caso 3.....</b>	<b>37</b>
4.5.1	Proteção F2 .....	37
4.5.2	Proteção F7 .....	38

<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>40</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>42</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação

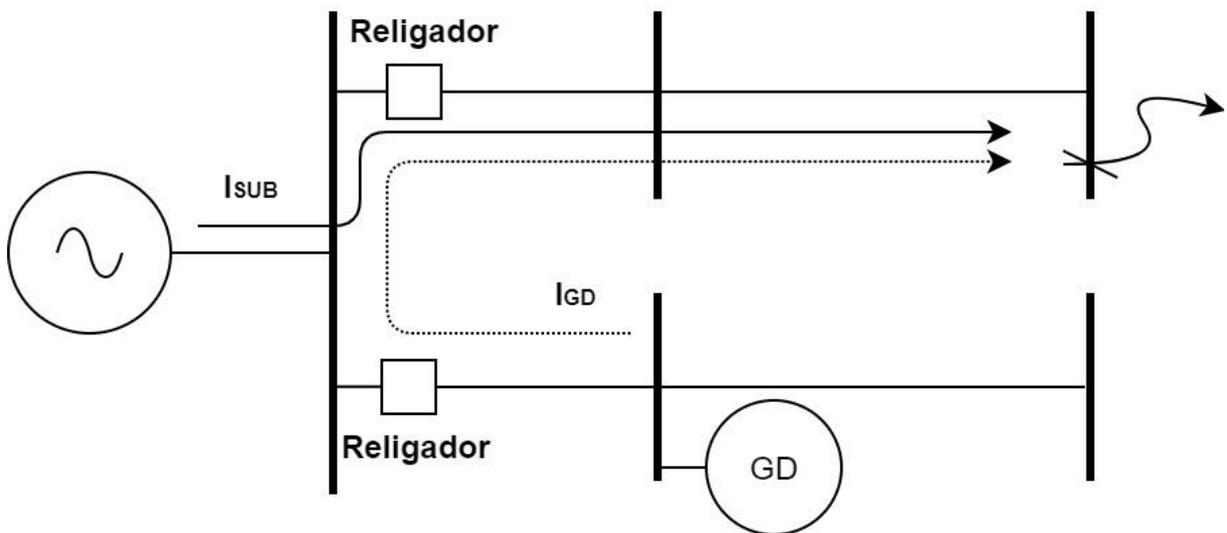
A busca por fontes de energia elétrica que tenham um compromisso com a sustentabilidade ambiental e social, alinhado à disponibilidade da luz solar e a facilidade da instalação de painéis elétricos fotovoltaicos nas edificações, são fatores que alavancam estudos e, conseqüentemente, o desenvolvimento da tecnologia de geração de energia elétrica através do sol (RAJAEI; SALAMA, 2015). O crescimento dessa tecnologia é responsável por viabilizar ao consumidor a produção de energia por meio da sua própria fonte renovável, conhecida como geração distribuída (GD), passando a injetar na rede sua parcela de potência. Contudo, essa prática torna o fluxo de potência bidirecional, podendo assim alterar os parâmetros que são responsáveis, entre outros, pelo dimensionamento dos dispositivos de proteção (DP) presentes nos alimentadores de distribuição (AD) (MATOS; ENCARNAÇÃO, 2015).

Adiante dos benefícios sociais e ambientais, a integração em massa de GD nos AD é responsável, entre outros aspectos, pela diminuição das perdas de energia entre os nós do sistema e, por conseguinte, melhora o perfil de tensão (PT). Por outro lado, a alteração do fluxo de potência nos AD levou esses a uma nova configuração, com novas magnitudes de correntes de carregamento (LC) e correntes de curto circuito (SC), afetando as condições de trabalho dos DP (MENDES et al., 2021). O aumento da complexidade da rede diante da nova configuração pode ser responsável pela atuação indevida dos equipamentos encarregados pela proteção. Isso ocorre devido a esses estarem parametrizados para operar em condições sem GD. Em um cenário com integração em massa de fontes renováveis à rede, uma determinada falta em um ponto qualquer do alimentador pode ser complementada pela GD, podendo elevar os níveis de SC. Além desse fato, a alteração desse parâmetro pode determinar a ação, ou não, de dispositivos como relés, disjuntores ou fusíveis em condições inapropriadas, trazendo transtornos como a interrupção errônea do fornecimento dos serviços propostos pela concessionária de energia elétrica (BATISTA et al., 2013).

Um dos problemas específicos ocorridos em alimentadores de energia com elevada presença de GD, sobretudo a geração distribuída baseada em inversor (GDBI), é a contribuição de corrente dessa nova fonte de energia diante faltas relatadas em ramais adjacentes de uma mesma

subestação que dispõem de um mesmo ponto em comum. Este fato pode levar dispositivos como relés, disjuntores e fusíveis desses ramais paralelos a atuar, de forma equivocada, concomitantemente com os demais, podendo ilhar parte da rede que não apresenta falhas. Esse fenômeno é denominado *trip* solidário (COSTER et al., 2011). Analisando a Figura 1, uma falta localizada na final de um ramal lateral, pode ser alimentada pela GD, alimentando o sistema com uma corrente  $I_{GD}$ , ocasionando uma situação na qual ambos religadores podem atuar, ilhando de forma equivocada o ramal inferior do SD (BLAABJERG et al., 2017).

Figura 1. Representação do *trip* solidário.



Fonte: Produção do próprio autor.

É fato consolidado que, no decorrer dos anos, a GD estar presente nos AD em escalas e proporções cada vez maiores e mais complexas. Visando esse cenário e tendo conhecimento dos possíveis problemas ocasionados por essa fonte de energia nas condições de trabalhos dos DP, é necessário que haja estudos constantes e implementações de projetos de revitalização e readequação da proteção da rede, garantindo a entrega ininterrupta de energia elétrica de forma segura e confiável (MATOS; ENCARNAÇÃO; DONADEL, 2017a). Seguindo essas premissas, este trabalho visa estudar, através de modelagens, simulações e análise de dados, o fenômeno da *trip* solidário, investigando seus estímulos, potenciais fatores intensificadores e modelos para mitigar sua atuação nos AD, buscando condições e embasamentos para propor uma readequação da rede para a configuração presente diante a integração da GDBI.

## 1.2 Justificativa

A viabilização da produção de energia elétrica através do sol, devido ao avanço da tecnologia por trás dessa ciência impulsionada por questões ambientais, é responsável pelo aumento da presença de GD, sobretudo os baseados em inversor, nos AD, a integração crescente dessa fonte à rede instiga alterações nos padrões dos sistemas elétricos, trazendo uma configuração distinta a utilizada na parametrização e dimensionamento dos DP. Anterior à adesão em massa dessa fonte de energia pela sociedade, o sistema elétrico brasileiro enfrentava problemas frequentes no fornecimento de energia elétrica. Dados do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) de 2013 trazem que, em uma média diária, 6 casos afetaram a entrega desse produto para os consumidores (MATOS; ENCARNAÇÃO; DONADEL, 2017b). Alinhados a esses fatores indesejados, a atuação indevida, ou falta de atuação, dos DP em consequência da reconfiguração da rede, pode desencadear um cenário caótico para o consumidor, aumentando o número de casos indesejados e, conseqüentemente, o tempo de interrupções não anunciadas pela concessionária.

Para garantir uma maior confiabilidade na entrega de energia elétrica, assegurando o serviço com o menor número de interrupções e maior segurança diante a sinistros ocorridos na rede, é necessário que o sistema de proteção receba readequações para que esteja estruturado diante as condições reais e atuais dos AD. Prevendo um cenário com elevada integração de GD, condições como o fluxo de potência, correntes de carregamento e curto circuito, além do perfil de tensão, são alteradas, aumentando a complexidade dos alimentadores de energia, sendo necessário uma intervenção de adequação dos DP. Diante da nova configuração da rede, condições problemáticas inexistentes até o momento podem impactar sobre o AD, trazendo conseqüências com proporções desconhecidas. Em decorrência disso, estudos sobre a atuação da GDBI nos sistemas elétricos de potência são fundamentais para prever situações de risco. A modelagem de alimentadores de energia traz a oportunidade de simular e implementar condições reais, analisando possíveis gatilhos e injetores de problemas, buscando métodos para mitigar essas falhas e realizar a readequação nas condições ultrapassadas dos DP.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral analisar modelos para mitigar o fenômeno *trip* solidário nos dispositivos de proteção de ramais laterais dos AD com elevada presença de GDBI.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- I. Modelar e implementar alimentadores de distribuição utilizando o *software* MATLAB e o seu ambiente Simulink.
- II. Analisar, através de simulações, da atuação da GDBI sobre a ocorrência do fenômeno de *trip* solidário.
- III. Propor modelos para a readequação do sistema de proteção nos alimentadores de distribuição com presença de GDBI.

## 1.4 Trabalhos Desenvolvidos

O início das pesquisas sobre os AD e os efeitos causados pela presença da GD, apresentados por esse documento, iniciou-se no segundo semestre de 2018. A relevância dos estudos e sua contribuição ao meio acadêmico proporcionaram publicações e contribuições em trabalhos.

Em 2020, com a consolidação de muitas etapas do processo da pesquisa apresentada por este texto, foi possível realizar a publicação do seguinte artigo científico no Congresso Brasileiro de Automática (CBA):

- **FRACALOSSI, L. G. V.; VARGAS, M. C.; BATISTA, O. E.** Trip solidário em alimentadores de distribuição com geração distribuída. *Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*, v. 2, n. 1, 2020.

Em 2021, após a pesquisa, apresentada por este trabalho, já consolidada devido a publicações em congressos importantes em nível nacional, foi possível realizar a contribuição para a publicação do seguinte trabalho no Electric Power Systems Research, Qualis A1 na área de avaliação Engenharias IV da Capes:

- MATOS, S. P. S.; VARGAS, M. C.; **FRACALOSSI, L. G. V.**; ENCARNAÇÃO, L.F.; BATISTA, O.E. Protection philosophy for distribution grids with high penetration of distributed generation. *In: Electric Power Systems Research*, v. 196, 2021.

No mesmo ano de 2021, também foi aceito o seguinte trabalho na revista *Brazilian Journal of Development*, Qualis B2 na área de avaliação Engenharias IV da Capes:

- **FRACALOSSI, L. G. V.**; BRAGANÇA, T. O.; VARGAS, M. C.; BATISTA, O. E. Trip Solidário no IEEE 34-Node Test Feeder: um Estudo de Caso. *In: Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 5, p. 44179 – 44186, 2021.

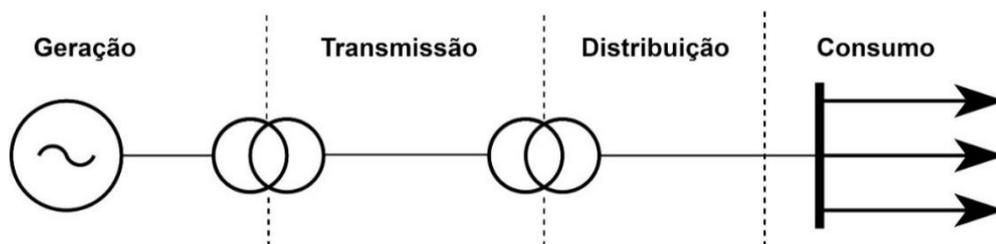
## 2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E SEUS IMPACTOS

### 2.1 Geração Distribuída

A produção de eletricidade e o sistema elétrico de potência evoluiu com o avanço da tecnologia aplicada à engenharia elétrica, passando por transformações de modelos. No início, pequenas centrais geradoras eram responsáveis por abastecer vilarejos e comunidades próximas, sem

conexões ou transmissão para pontos remotos (VARGAS, 2018). Com passar dos anos, o aprimoramento da tecnologia foi responsável pela expansão da capacidade de produção de energia elétrica, contando com centrais mais robustas que alimentavam localidades mais distantes dos centros de produção através de sistemas de transmissão e distribuição, sem necessariamente estar próximos a estes locais (MENDES, 2018). Esse arranjo de produção e transporte de eletricidade passa por etapas que estão representadas, de modo geral, na Figura 2. Uma característica dessa rede é o fluxo de potência unidirecional, fluindo das grandes centrais geradoras até os locais de consumo, sendo responsável, sobretudo, pela filosofia de proteção dos AD.

Figura 2. Representação de um sistema elétrico de potência.



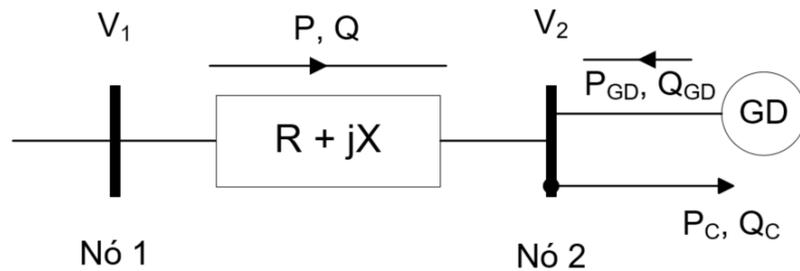
Fonte: Produção do próprio autor.

Contudo, devido à preocupação global com as questões ambientais e de sustentabilidade, novas técnicas para geração de energia elétrica foram impulsionadas. Neste contexto, o termo de GD ganhou notoriedade. Por definição, GD é a produção de energia próximo aos locais de consumo. Nesse aspecto, a disponibilidade do sol e a facilidade de instalação dos painéis fotovoltaicos nas edificações, alinhada às políticas públicas de incentivo, tornaram a produção de energia através do sol a principal fonte de GD em todo mundo (VARGAS; MENDES; BATISTA, 2018a). De maneira geral, este meio de geração renovável proporciona aos consumidores produzirem a própria energia que consumirão, podendo estes injetarem na rede o excedente, obtendo créditos de retorno, em alguns países, alinhando assim condições favoráveis de sustentabilidade, economia e consumo (MENDES, 2018).

A injeção de energia elétrica na rede através da produção por GD pode ser responsável por alterar parâmetros fundamentais nos AD. A Figura 3 mostra que com um maior número de fontes infiltrando sua parcela de potência no sistema a contribuição de eletricidade da subestação é menor, fazendo uma análise desta ocorrência, é possível observar os seguintes fatores:

- O fluxo de potência se altera, tornando-se bidirecional;
- A magnitude das correntes que fluem entre os nós pode diminuir;
- As perdas entre nós podem diminuir;
- O perfil de tensão do sistema pode ser melhorado.

Figura 3. Injeção de potência na rede devido à GD.



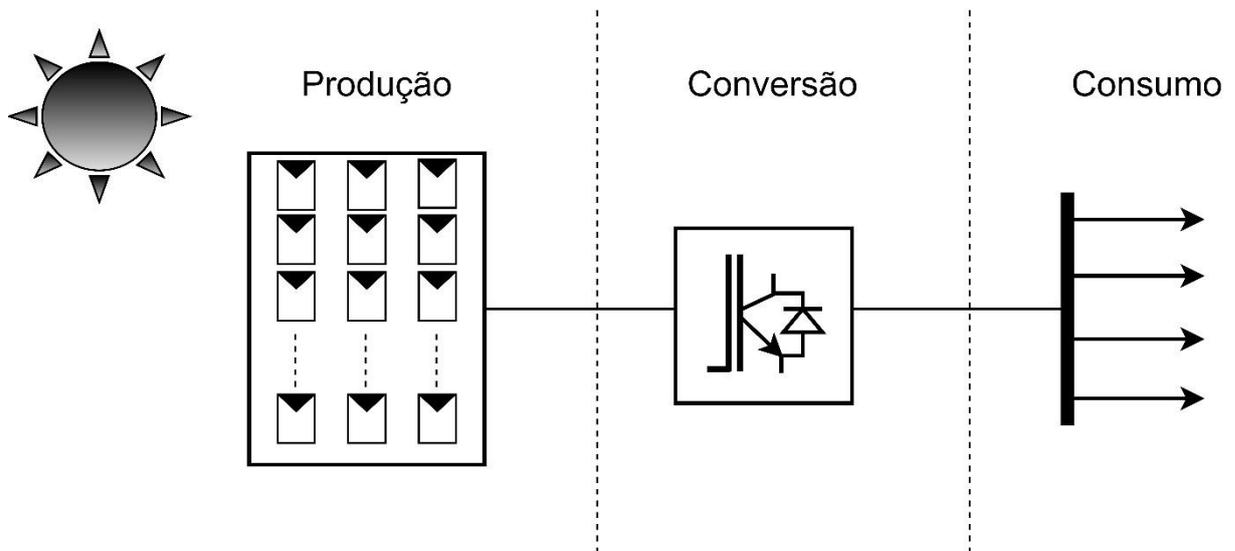
Fonte: Produção do próprio autor.

No Brasil, a energia solar representa mais de 99% de toda GD, sendo a geração residencial responsável por quase 80% desta produção renovável (VARGAS; MENDES; BATISTA, 2018b). Esta tecnologia tem por característica a geração primária de energia elétrica na forma de corrente contínua, sendo necessária a utilização de eletrônica de potência, sobretudo inversores de frequência, para permitir a conexão do gerador com a rede elétrica. A Figura 4 traz um esquemático simplificado das etapas necessárias para a produção de energia elétrica através de painéis solares fotovoltaicos.

Nos geradores fotovoltaicos, os conversores eletrônicos são responsáveis, além de outras coisas, por fazerem a conexão entre a geração de energia elétrica através do sol e a rede de distribuição. Os módulos eletrônicos podem apresentar soluções como:

- Controle de tensão;
- Proteção;
- Monitoramento das condições reais do sistema;
- Melhoria da eficiência final.

Figura 4. Representação esquemática da produção de energia elétrica através do sol.



Fonte: Produção do próprio autor.

Por outro lado, a alta inserção de GDBI nos AD pode trazer complicações na atuação dos DP, pois aqueles apresentam contribuições específicas que não foram abrangidas por estes (COSTER et al., 2011). Estudos realizados por Coster e outros (2011) e Blaabjerge outros (2017) mostram que a conexão de GDBI pode trazer instabilidade à rede, diminuindo a confiabilidade no fornecimento dos serviços das concessionárias.

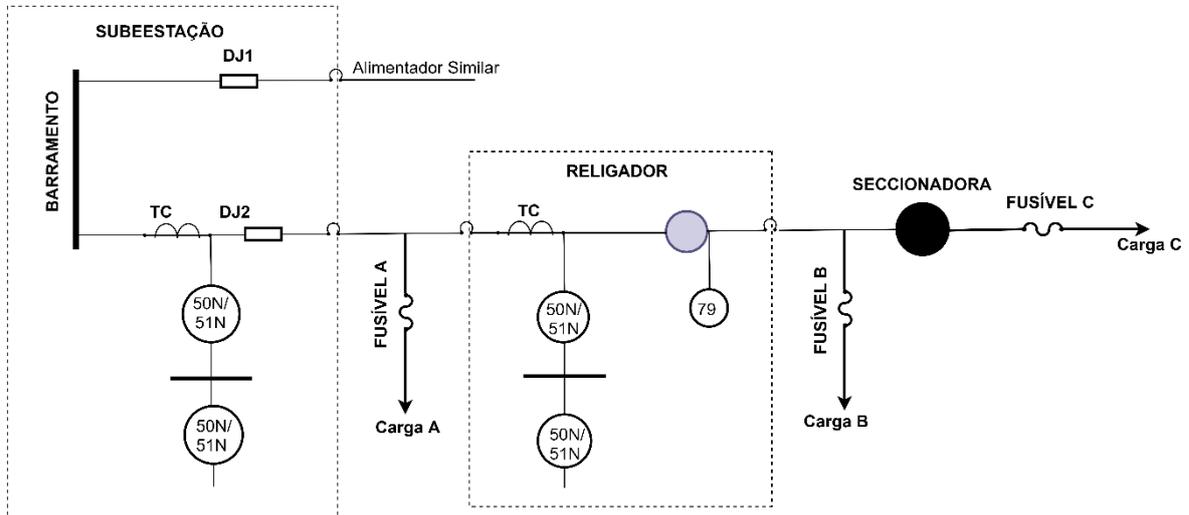
## 2.2 Impactos na Proteção

Para um cenário sem conexão de GD, os AD possuem o fluxo de potência bem definido, tendo a energia fluindo da subestação até as cargas conectadas aos ramais da rede. Nessa configuração, a filosofia de proteção desses alimentadores é baseada em dispositivos que atuam por sobrecorrente e curto-circuito (BLAABJERG et al., 2017). Este último, por exemplo, é classificado entre permanente ou temporário. Sendo permanente, é necessário que haja intervenção da equipe de manutenção para voltar a operação normal da rede. Caso seja temporário, a rede retoma seu funcionamento após um tempo determinado sem a necessidade de atuação humana direta devido aos dispositivos religadores (BITTENCOURT, 2011).

Nos AD, objetiva-se fornecer o serviço de forma contínua e segura, minimizando as interrupções devido a faltas. É indispensável que a filosofia de proteção esteja adequada para as condições atuais de funcionamento, sendo capaz de atuar diante a defeitos, eliminando sua propagação e/ou evitando atuação indevida (VARGAS, 2018). A Figura 5 mostra um

esquemático do sistema de proteção de um AD, no qual é possível identificar cada DP e sua determinada área de atuação.

Figura 5. Esquemático do sistema de proteção de um alimentador de distribuição.



Fonte: Adaptado pelo autor de Bittencourt (2011).

Para um cenário com elevada penetração de GD, o fluxo de potência dos AD é alterado, podendo ser agora bidirecional. Além deste, parâmetros como as correntes de carregamento e de curto-circuito são afetados. Nesse aspecto a filosofia de proteção, que é baseada, entre outras coisas, nas características dessas medidas, sofre alterações, sendo necessário o ajuste e acerto da filosofia do sistema de proteção dos AD, garantindo a confiabilidade necessária no fornecimento de energia elétrica.

## 2.3 Desafios na Proteção

### 2.3.1 Introdução

Os AD são contemplados com filosofias de proteção pautadas nas suas condições reais de funcionamento. A conexão de GDBI, que possui eletrônica de potência na interface gerador-rede, pode apresentar contribuições não padronizadas de parâmetros essenciais, como frequência e tensão. Outra característica particular é a limitação na contribuição das SC entre 1,06 e 2 pu (BLAABJERG et al., 2017).

Estes aspectos ímpares na conexão com os AD podem ser responsáveis por impulsionar e/ou gerar fenômenos adversos para o fornecimento do serviço das concessionárias, sendo eles:

- Problemas no religamento automático;
- Revés na coordenação dos dispositivos de proteção;
- Ilhamento;
- *Trip* solidário.

Cada concessionária de energia apresenta suas exigências para a conexão de GDBI à rede. Porém, o avanço da tecnologia dos conversores inteligentes, painéis fotovoltaicos e os incentivos para a produção sustentável através do sol é mais acelerada que as modificações e correções na filosofia de proteção dos AD (COSTER et al., 2011).

### 2.3.2 *Trip* Solidário

Este fenômeno é resultado das alterações nas condições de funcionamento dos DP devido à inserção de GDBI na rede. Por definição, *trip* solidário (ou falso *trip*) é quando uma falta, em um ponto específico do AD, afeta o funcionamento de equipamentos de proteção em ramais adjacentes de uma mesma subestação que apresentam um mesmo ponto em comum. Este fenômeno pode ser visualizado na Figura 1. Os trabalhos de Coster entre outros (2011) e Blaabjerg entre outros (2017) trazem uma análise do impacto de faltas em distâncias e magnitudes de potências variadas sobre o fenômeno em questão. Em decorrência deste estudo é averiguado que o evento em pauta tem maior potencial em alimentadores longos e quando faltas incidem próximas à subestação (COSTER et al., 2011).

Sabe-se que a tendência é o aumento da presença de fontes renováveis na matriz energética mundial, isso significa uma elevação da representação da geração distribuída. Este fato é o suficiente para mostrar a necessidade de adaptação da filosofia de proteção dos AD. Fenômenos como o de *trip* solidário ainda são poucos explorados em estudos, portanto, não se sabe a dimensão do seu impacto diante da rede e métodos concisos de mitigar este problema (BLAABJERG et al., 2017).

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Apresentação

O Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), sociedade renomada mundialmente no ramo da engenharia, disponibiliza modelos de alimentadores de distribuição para realização de estudos. Tais circuitos apresentam relatórios técnicos que contemplam dados para a modelagem e são comumente utilizados para realização de pesquisas sobre o fluxo de potência com integração de GD. Desse modo, esta pesquisa utiliza o modelo *IEEE 34 Node Test Feeder*.

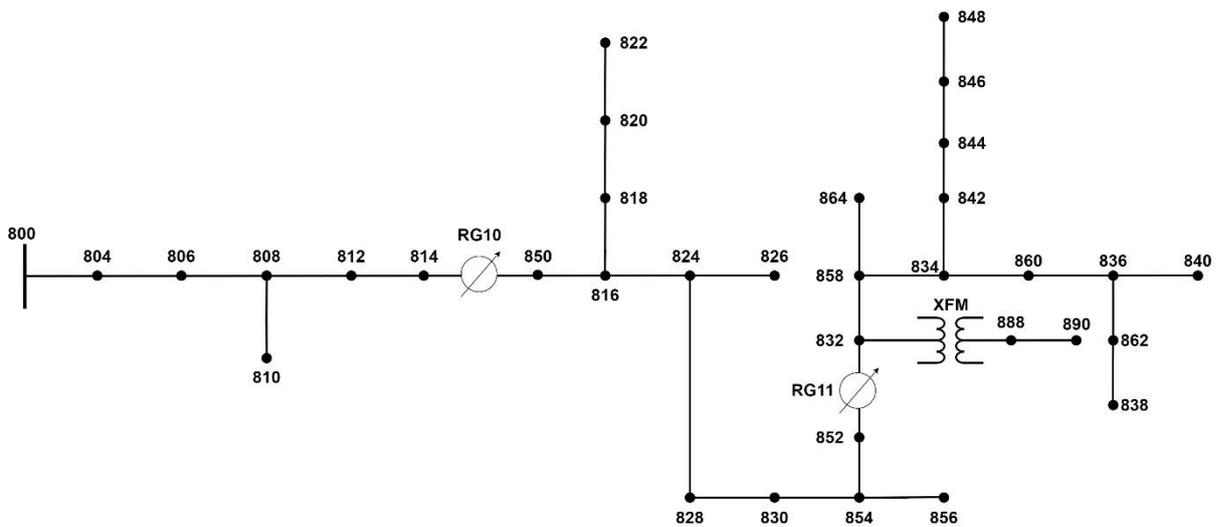
Para o estudo da ocorrência do fenômeno *trip* solidário no alimentador *IEEE 34 Node Test Feeder*, uma metodologia de pesquisa com etapas bem definidas será utilizada, essas etapas são:

- Modelagem do alimentador *IEEE 34 Node Test Feeder* no ambiente Simulink do software MATLAB;
- Validar a modelagem implementada através de simulações testes;
- Propor uma filosofia de proteção ao alimentador *IEEE 34 Node Test Feeder*, visando analisar a ocorrência do *trip* solidário;
- Realizar simulações com inserção de GD em diversos cenários distintos;
- Analisar os resultados encontrados das simulações, buscando evidenciar a ocorrência do *trip* solidário;
- Propor uma readequação da proteção, em caso de ocorrência do fenômeno.

### 3.2 IEEE 34 Node Test Feeder

O alimentador *IEEE 34 Node Test Feeder* (34NTF), trazido pela Figura 6, foi utilizado pela pesquisa para apresentar maior variabilidade e confiança nos resultados. Também foi escolhido tal alimentador, por este já apresentar pesquisas sobre a ocorrência do *trip* solidário com inserção de GD, o que contribui para as análises dos resultados dessa pesquisa (FRACALOSSI et al., 2021).

Figura 6. Representação IEEE 34 Node Test Feeder



Fonte: Adaptado de Fracalossi entre outros (2021).

O alimentador 34NTF é, dentre os demais alimentadores disponibilizados pelo IEEE, ideal para replicar os testes realizados anteriormente em alimentadores menores e menos complexos. O alimentador possui uma extensão considerável e diferentes configurações de cargas, linhas e níveis de alimentação bem variados, trazendo para o estudo uma maior realidade e aumentando a robustez do modelo de proteção proposto para mitigar os efeitos do *trip* solidário. Algumas configurações e características essenciais do 34NTF para a aplicação do estudo estão listadas abaixo:

- Possui elevada extensão: 93,9 quilômetros;
- Possui elevado número de cargas com diferentes configurações: 6 concentradas e 19 distribuídas entre os nós;
- Diferentes níveis de tensão: 24900 volts e 4160 volts;
- Ramais laterais diversificados: 6 braços monofásicos e 2 braços trifásicos;
- Diferentes configurações das linhas de distribuição: 5;
- Possui dois dispositivos para regular a tensão ao longo de todo o sistema.

### 3.3 Modelagem do IEEE 34 Node Test Feeder

A modelagem do 34NTF será baseada nos princípios trazidos por Fracalossi, Vargas e Batista (2020). Obtendo as informações do alimentador em seu relatório técnico, disponibilizado pelo IEEE, restará apenas os parâmetros das linhas de distribuição para todos os dados estarem

conforme os blocos do Simulink para realizar a modelagem. É possível obter tais elementos após realizar as transformações, segundo as Equações (1) e (2):

$$[Z] = [R] + j[X] \quad (1)$$

$$[Y] = [G] + j[B] \quad (2)$$

Através das Equações (1) e (2), obtêm-se a impedância  $[Z]$  e a admitância  $[Y]$  da linha, sendo necessário implementar as Equações (3), (4) e (5) para obter a resistência  $[R]$ , indutância  $[L]$  e capacitância  $[C]$ :

$$[R] = \Re([Z]) \quad (3)$$

$$[L] = \Im([Z]) / (\omega = 2\pi f) \quad (4)$$

$$[C] = \Im([Y]) / (\omega = 2\pi f) \quad (5)$$

Aplicando as Equações (6), (7) e (8), obtêm-se os parâmetros R, L e C na unidade requerida para a modelagem:

$$[R]_{km} = [R] / 1,60934 \quad (6)$$

$$[L]_{km} = [L] / 1,60934 \quad (7)$$

$$[C]_{km} = [C] / 1,60934 \quad (8)$$

Após a obtenção de todos os parâmetros nas devidas para a modelagem, implementou-se considerações no 34NTF com o objetivo de simplificar a modelagem e obter ganho computacional. Tais mudanças foram implementadas:

- Os reguladores de tensão RG10 e RG11, evidenciados pela Figura 6, foram desconsiderados na modelagem. Isso pode causar uma alteração no PT do AD (FRACALOSSI et al., 2021);
- O transformador (XMF) foi considerado ideal;
- As cargas distribuídas foram dispostas, metade no início e metade no final do nó.

### 3.4 Implementação da Filosofia de Proteção

Para analisar a ocorrência do *trip* solidário é necessário propor uma filosofia de proteção para o alimentador 34NTF, objetivando avaliar a ocorrência do *trip* solidário (FRACALOSSI; VARGAS; BATISTA, 2020). Segundo Eletrobrás (1982):

“Chave-Fusível é o dispositivo constituído de um porta-fusível e demais partes destinadas a receber um elo-fusível.

Religador é um dispositivo interruptor automático, que abre e fecha seus contatos repetidas vezes na eventualidade de uma falha do circuito por ele protegido” (ELETROBRÁS, 1982).

Ainda segundo a obra Eletrobrás (1982), existem alguns critérios para determinar qual dispositivo de proteção utilizar em cada parte do alimentador:

“No início de ramais de certa importância que suprem áreas sujeitas a falhas transitórias, cuja probabilidade elevada de interrupção tenha sido constatada através de dados estatísticos: deve, então, ser utilizado o religador ou seccionador.

No início de ramais não abrangidos anteriormente; nesse caso, deve-se usar a chave-fusível.

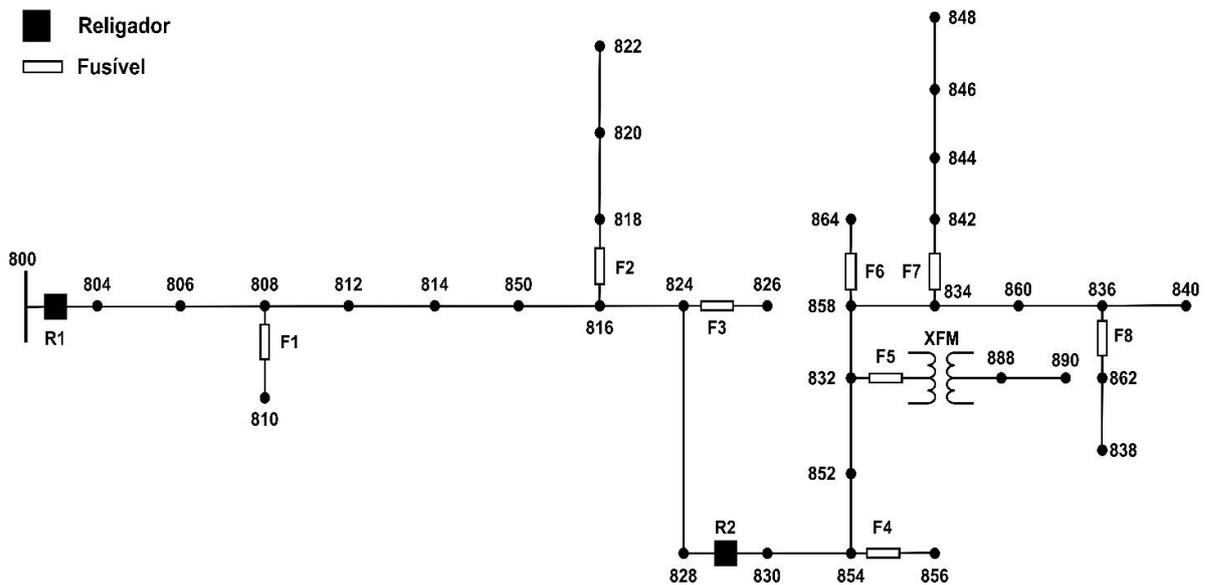
No primário dos transformadores de distribuição; usar chaves-fusíveis” (ELETROBRÁS, 1982).

Diante das considerações, determinou-se tais dispositivos de proteção para o 34NTF:

- No início de ramais de certa importância (Ramal principal - 800 – 804), adotou-se elemento religador automático;
- No início de ramais laterais (808 – 810, 816 – 818, 824 – 826, 854 – 856, 858 – 864, 834 – 842, 836 – 838), impôs-se elemento fusível;
- Devido ao comprimento extenso do 34NTF, adotou-se um religador no meio de sua extensão (828 – 830);
- No primário do transformador de distribuição (832 - XFM), considerou-se chave fusível.

A Figura 7 representa o alimentador 34NTF com as considerações adotadas para a filosofia de proteção, necessária para o estudo do *trip* solidário. A Tabela 1 traz, os valores de corrente nominal em cada trecho do alimentador 34NTF que foi proposto um elemento chave-fusível de proteção, segundo a filosofia adotada. Tais dados são expressos pelo relatório técnico do alimentador.

Figura 7. Alimentador 34 Node Test Feeder com filosofia de proteção proposta.



Fonte: Extraído de Fracalossi entre outros (2021).

Tabela 1. Corrente nominal dos trechos com proteção 34NTF.

Trecho	Proteção	Fase A	Fase B	Fase C
Corrente Nominal (A)				
808 - 810	F1	-	1.22	-
816 - 818	F2	13.02	-	-
824 - 826	F3	-	3.10	-
854 - 856	F4	-	0.31	-
832 - XFM	F5	11.68	11.70	11.61
858 - 864	F6	0.14	-	-
834 - 842	F7	14.75	16.30	15.12
836 - 862	F8	0.00	2.09	0.00

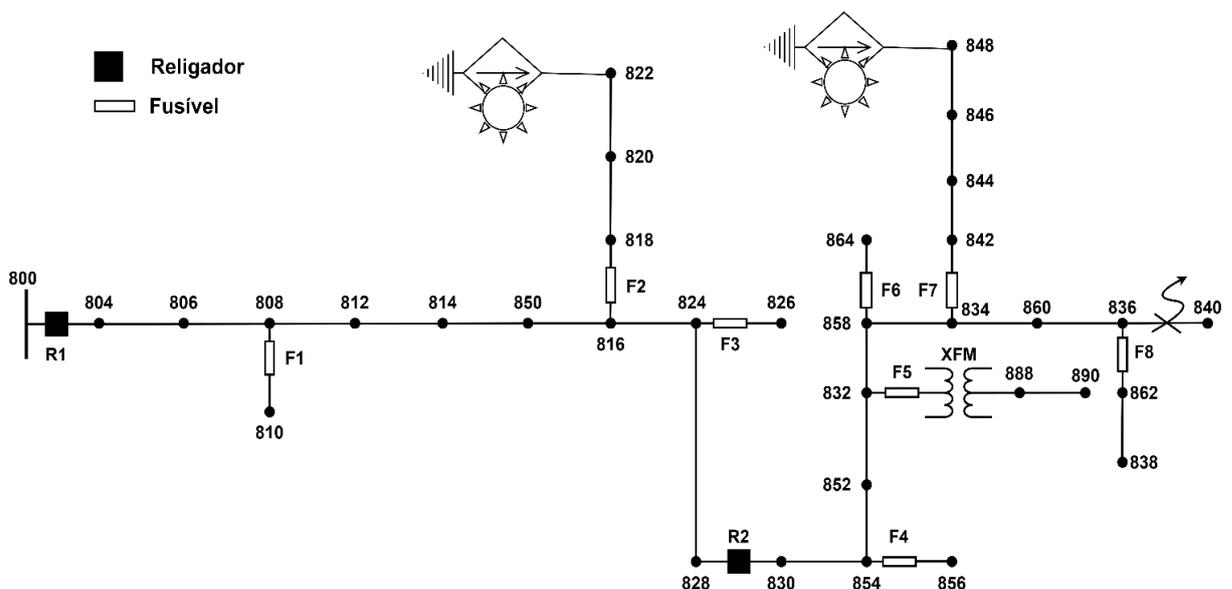
### 3.5 Simulações do IEEE 34 Node Test Feeder

Com a modelagem realizada, segundo a metodologia de Fracalossi, Vargas e Batista (2020), e a implementação de uma filosofia de proteção, segundo os preceitos de Eletrobrás (1982), para a análise do *trip* solidário no 34NTF é necessário realizar simulações de casos considerando a integração de GD. Com isso, tais implementações foram adotadas para observar a ocorrência do fenômeno:

- Um modelo de gerador fotovoltaico, o mesmo utilizado por Vargas, Mendes e Batista (2018a, b), será conectado ao 34NTF em pontos estratégicos;
- Os pontos escolhidos para a conexão de GD foram os nós 822 e 848. Tais conexões estão localizadas em pontos estratégicos do sistema (variadas configurações e distâncias do ponto de falta, além de estarem protegidos por chave fusíveis), em extremidades de ramais laterais e entregam 100% de potência ativa demandada pelo nó;
- Foi considerado, a fim de analisarmos a ocorrência do *trip* solidário, uma falta trifásica no final do alimentador 34NTF, nó 840.
- Foram considerados casos de simulação com diferentes impedâncias de falta para o 34NTF, visando expandir os estudos de Fracalossi, Bragança, Vargas e Batista (2021):
  - Caso 1: Caso com GD e com presença da falta trifásica franca no nó 840;
  - Caso 2: Caso com GD e com presença de falta trifásica com impedância de  $5 \Omega$  no nó 840;
  - Caso 3: Caso com GD e com presença de falta trifásica com impedância de  $10 \Omega$  no nó 840.
- O valor de 150% da corrente nominal do trecho será considerado como suficiente para atuar os dispositivos chaves-fusíveis.

A Figura 8 traz o 34NTF com a proteção e considerações adotadas para análise do *trip* solidário.

Figura 8. Alimentador 34NTF com proteção proposta e considerações para análise de *trip* solidário.



Fonte: Extraído de Fracalossi entre outros (2021).

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Matriz de Impedâncias IEEE 34 Node Test Feeder

No alimentador para testes 34NTF disponibilizado pelo IEEE, a configuração 300 para as linhas de distribuição tem maior presença entre os trechos da rede. Essa configuração apresenta sequência de fase BACN, tendo as seguintes matrizes de impedância e susceptância disponibilizadas pelo seu relatório técnico:

$$[Z] = \begin{bmatrix} 1,3368 + j1,3343 & 0,2101 + j0,5779 & 0,2130 + j0,5015 \\ 0,2101 + j0,5779 & 1,3238 + j1,3569 & 0,2066 + j0,4591 \\ 0,2130 + j0,5015 & 0,2066 + j0,4591 & 1,3294 + j1,3471 \end{bmatrix} \frac{\Omega}{\text{milha}}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} 5,3350 & -1,5313 & -0,9943 \\ -1,5313 & 5,0979 & -0,6212 \\ -0,9943 & -0,6212 & 4,8880 \end{bmatrix} \frac{\mu S}{\text{milha}}$$

Aplicando as Equações (6), (7) e (8), tem-se:

$$[R] = \begin{bmatrix} 0,8307 & 0,1306 & 0,1324 \\ 0,1306 & 0,8226 & 0,1284 \\ 0,1324 & 0,1284 & 0,8261 \end{bmatrix} \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} 2,1992 & 0,9525 & 0,8226 \\ 0,9525 & 2,2365 & 0,7567 \\ 0,8226 & 0,7567 & 2,2203 \end{bmatrix} \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 0,8793 & -0,2524 & -0,1639 \\ -0,2524 & 0,8403 & -0,1024 \\ -0,1639 & -0,1024 & 0,8054 \end{bmatrix} \frac{\Omega}{\text{km}}$$

Semelhante à configuração 300, representada matematicamente através da metodologia, as demais configurações foram obtidas e inseridas no bloco responsável pela simulação das linhas de distribuição no ambiente Simulink.

## 4.2 Modelagem do IEEE 34 Node Test Feeder

As Tabelas 2 e 3 trazem os resultados das simulações do 34NTF modelado, respectivamente, para o perfil de tensão (PT) e as correntes de carregamento (LC) em todos os trechos e nós do alimentador. A análise desse resultado é fundamental para a validação da metodologia imposta para a modelagem, sugerida por Fracalossi, Vargas e Batista (2020).

Tabela 2. Erro relativo (%) das PT entre a modelagem e o relatório técnico do IEEE 34NTF.

Nó	Módulo		Módulo		Módulo	
	A-N	Ângulo	B-N	Ângulo	C-N	Ângulo
800	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
802	0,03	0,01	0,02	0,00	0,04	0,01
806	0,06	0,02	0,03	0,00	0,06	0,01
808	0,53	0,19	0,20	-0,02	0,46	0,11
810	-	-	0,21	-0,02	-	-
812	1,09	0,39	0,42	-0,04	0,95	0,22
814	1,56	0,58	0,60	-0,06	1,35	0,32
850	-5,53	0,58	-2,44	-0,06	1,73	0,32
816	-5,52	0,57	-2,44	-0,06	1,73	0,32
818	-5,52	0,58	-2,45	-0,06	1,72	0,32
820	-5,52	0,57	-	-	-	-
822	-5,51	0,58	-	-	-	-
824	-5,46	0,60	-2,37	-0,07	-1,61	0,35
826	-	-	-2,37	-0,07	-	-
828	-5,45	0,60	-2,36	-0,06	-1,60	0,35
830	-5,32	0,65	-2,22	-0,08	-1,37	0,42
854	-5,32	0,65	-2,22	-0,07	-1,36	0,42
852	-5,06	0,75	-1,94	-0,10	-0,93	0,56
832	-12,19	0,75	-8,25	-0,10	-7,84	0,56
858	-12,20	0,76	-8,25	-0,10	-7,84	0,56
834	-12,21	0,76	-8,25	-0,10	-7,83	0,57
842	-12,21	0,77	-8,25	-0,09	-7,83	0,56
844	-12,22	0,77	-8,25	-0,09	-7,83	0,57
846	-12,21	0,69	-8,25	-0,09	-7,83	0,57
848	-12,22	0,77	-8,25	-0,09	-7,82	0,57
860	-12,21	0,77	-8,26	-0,09	-7,83	0,57
836	-12,21	0,76	-8,25	-0,09	-7,83	0,57
840	-12,22	0,76	-8,26	-0,09	-7,83	0,57
862	-12,21	0,76	-8,25	-0,09	-7,83	0,57
838	-	-	-8,25	-0,09	-	-
864	-12,20	0,76	-	-	-	-
XFM	-12,54	0,63	-8,47	0,01	-8,08	0,51
888	-12,54	0,63	-8,47	0,01	-8,08	0,51
890	-13,72	0,82	-9,22	0,37	-8,11	0,58
856	-	-	-2,22	-0,08	-	-

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 3. Erro relativo (%) das LC entre a modelagem e o relatório técnico do IEEE 34NTF.

Nó	Módulo Ângulo		Módulo Ângulo		Módulo Ângulo	
	A-N	A-N	B-N	B-N	C-N	C-N
800	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
802	0,12	0,04	0,09	-0,03	0,12	0,03
806	0,21	0,06	0,15	-0,04	0,19	0,05
808	1,76	0,52	1,27	-0,38	1,63	0,47
810	-	-	1,27	-0,38	-	-
812	3,67	1,61	2,59	-0,79	3,36	0,96
814	5,27	1,61	3,67	-1,13	4,79	1,38
850	-2,06	1,61	0,53	-1,13	1,61	1,38
816	-2,05	1,61	0,54	-1,13	1,63	1,38
818	-2,05	1,62	-	-	-	-
820	-2,05	1,61	-	-	-	-
822	-2,04	1,61	-	-	-	-
824	-1,46	1,75	1,09	-1,24	2,27	1,53
826	-	-	1,09	-1,24	-	-
828	-1,40	1,76	1,13	-1,25	2,32	1,54
830	-0,17	2,06	2,23	-1,48	3,64	1,85
854	-0,14	2,07	2,26	-1,48	3,67	1,85
852	2,15	2,62	4,26	-1,91	5,99	2,40
832	-5,52	2,62	-2,44	-1,91	-1,41	2,40
858	-5,38	2,66	-2,32	-1,94	-1,27	2,44
834	-5,21	2,70	-2,18	-1,97	-1,10	2,48
842	-5,21	2,71	-2,17	-1,97	-1,10	2,48
844	-5,18	2,71	-2,14	-1,98	-1,07	2,49
846	-5,16	2,63	-2,13	-1,98	-1,05	2,50
848	-5,17	2,72	-2,13	-1,98	-1,05	2,50
860	-5,21	2,71	-2,17	-1,98	-1,10	2,48
836	-5,20	2,70	-2,17	-1,97	-1,09	2,49
840	-5,20	2,70	-2,17	-1,98	-1,09	2,49
862	-5,20	2,70	-2,17	-1,97	-1,09	2,49
838	-	-	-2,16	-1,97	-	-
864	-5,38	2,66	-	-	-	-
XFM	-4,34	4,36	-1,10	-3,35	-0,10	4,03
888	-4,34	4,36	-1,10	-3,35	-0,10	4,03
890	1,35	6,83	3,40	-5,18	5,79	6,23
856	-	-	2,26	-1,48	-	-

Fonte: Produção do próprio autor.

Os resultados da Tabela 2, apresentam os erros relativos percentuais do PT entre o sistema modelado e o relatório técnico, em módulo e ângulo das três fases, na situação de carregamento do sistema. A análise descritiva dos dados mostra que, entre os nós 814 – 850 e 852 – 832, há uma propagação de erro percentual aproximada de 7%. Realizando uma análise diagnóstica dessa situação, pode-se justificar e perceber que os erros refletem à ausência dos reguladores de tensão, RG10 e RG11, presentes no modelo original. De todo modo, os erros percentuais dos ângulos, em ambas as fases, ficaram próximas de 1%.

Tratando das LC, a Tabela 3 traz os resultados de comparação entre as correntes de carregamento do sistema 34NTF modelado e seu relatório técnico. Semelhante ao ocorrido na situação do perfil de tensão, a análise descritiva mostra uma propagação de erros nos pontos entre os nós 814 – 850 e 852 – 832, apresentando aproximadamente uma magnitude de 3%. Como já ocorrido nos resultados da Tabela 2, uma análise diagnóstica traz a evidência que essa propagação está relacionada a ausência dos reguladores de tensão RG10 e RG11.

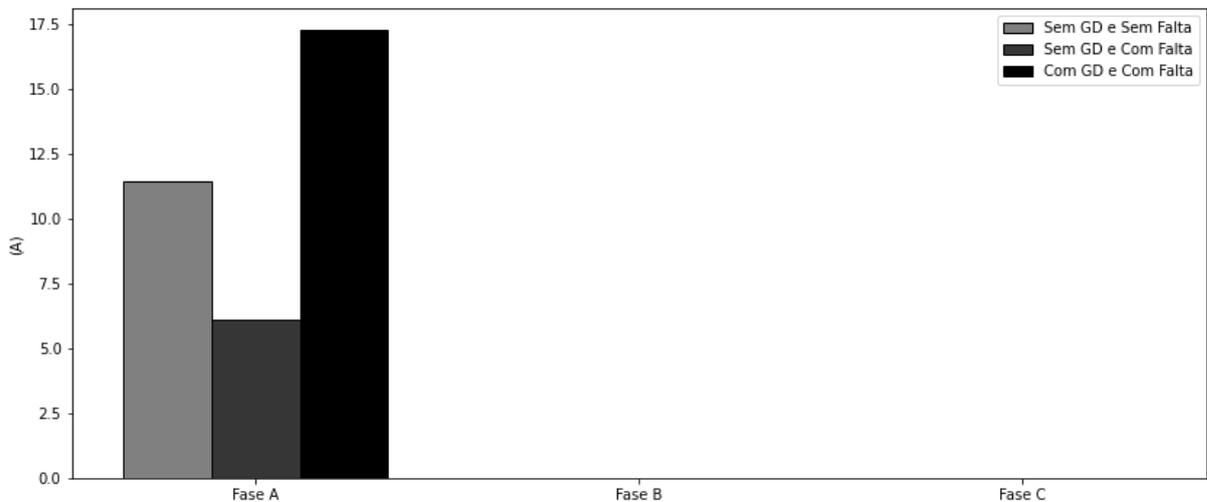
Embora seja notório o impacto das ausências dos reguladores RG10 e RG11, ambos foram suprimidos da modelagem para trazer um ganho computacional. A troca de parte da precisão da modelagem para o ganho computacional obtida é vantajosa, visto que os resultados não foram tão discrepantes e foi possível reduzir significativamente o tempo de simulação dos casos.

### 4.3 Caso 1

#### 4.3.1 Proteção F2

O Gráfico 1 traz o resultado de simulação do caso 1 para a proteção F2. Os valores presentes no gráfico, em Amperes, representam uma combinação de conexão da GD e inserção de falta franca. Essa variedade visa aumentar a qualidade das análises das simulações dos casos.

Gráfico 1. Resultado da simulação do caso 1 para a proteção F2.



Fonte: Produção do próprio autor.

A Tabela 4 apresenta os valores de correntes, em pu, no trecho 816 – 818, onde está presente a proteção F2. Tais valores são referentes ao caso 1 simulado, onde há presença de falta trifásica franca no final do alimentador (840).

Tabela 4. Corrente na proteção F2 para o caso 1 de simulação do 34NTF.

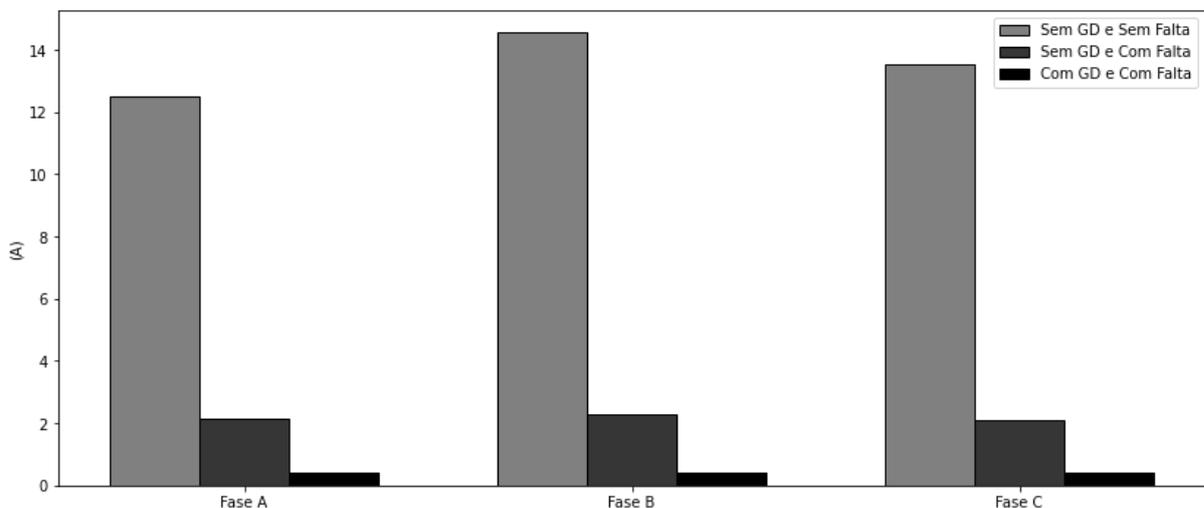
Trecho	Proteção	Fase A	Fase B	Fase C
Corrente (pu)				
816- 818	F2	1,51	-	-

Os resultados da simulação do caso 1, evidenciados pelo Gráfico 1 e pela Tabela 4, são capazes de expressar a influência da GD nas correntes de falta no trecho 816 – 818, onde está localizado a chave-fusível F2. A análise descritiva do Gráfico 1 é capaz de mostrar que, para o caso de falta franca e conexão de GD, a corrente atingiu um valor expressivamente maior em relação a situação sem GD. Adicionando a análise do Gráfico 1 ao estudo da Tabela 4, é possível determinar que, para o caso 1 simulado no trecho 816 – 818, pode ocorrer o fenômeno *trip* solidário, visto que a corrente de falta alcançou valor superior à 1,5 pu da corrente nominal.

#### 4.3.2 Proteção F7

O Gráfico 2 e a Tabela 5 apresentam os resultados da simulação do caso 1 para o trecho 834 – 842, onde está presente a chave-fusível F7.

Gráfico 2. Resultado da simulação do caso 1 para a proteção F7.



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 5. Corrente na proteção F7 para o caso 1 de simulação do 34NTF.

Trecho	Proteção	Fase A	Fase B	Fase C
Corrente (pu)				
834- 842	F7	0,033	0,029	0,030

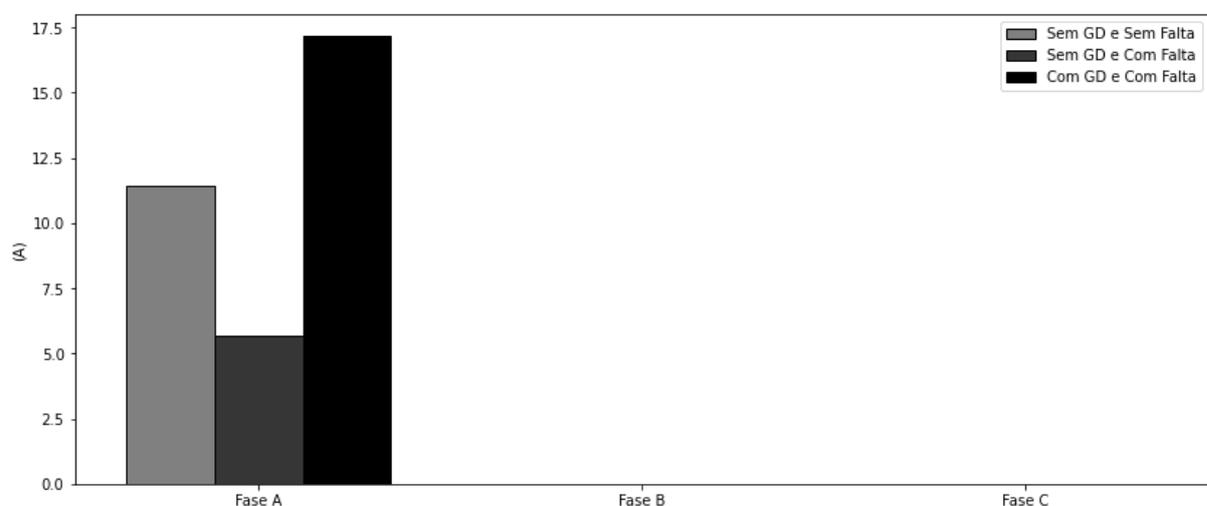
O Gráfico 2, que traz os valores em Amperes de diferentes situações de conexão de GD e falta franca, apresenta valores de corrente bem inferiores em relação ao nominal do trecho e, conseqüentemente, ausência do *trip* solidário. Esse fato pode ser evidenciado pela Tabela 5, que expressa os dados em pu. Essa discrepante redução dos valores de corrente para o caso de conexão de GD e falta franca é devido ao fato que, o modelo de gerador fotovoltaico usado para as simulações, o mesmo proposto por Mendes entre outros (2019) e utilizado por Vargas, Mendes e Batista (2018a, b), apresenta 3 possíveis estados de conexão, sendo um deles, quando a tensão no ponto de acoplamento é inferior à 0,1 pu, de desconexão (MENDES et al., 2019).

#### 4.4 Caso 2

##### 4.4.1 Proteção F2

O Gráfico 3 e a Tabela 6, apresentam os resultados da simulação do caso 2 para o trecho 816 – 818, onde está presente a chave-fusível F2.

Gráfico 3. Resultado da simulação do caso 2 para a proteção F2.



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 6. Corrente na proteção F2 para o caso 2 de simulação do 34NTF.

Trecho	Proteção	Fase A	Fase B	Fase C
Corrente (pu)				
816- 818	F2	1,50	-	-

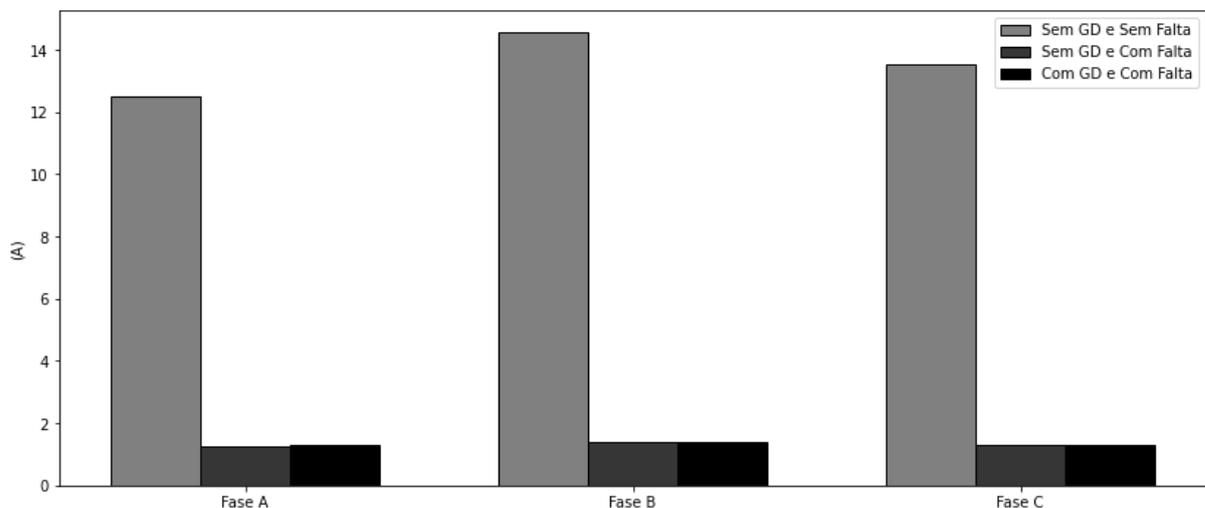
O caso 2 de simulação, que apresenta conexão de GD nos pontos 822 e 848, ramais que contam com a proteção de, respectivamente, F2 e F7, apresenta falta trifásica com  $5 \Omega$  de impedância do final do alimentador (840).

A análise do Gráfico 3 mostra que, para o caso 2, a corrente de falta trifásica com impedância de  $5 \Omega$ , apresentou significativa elevação em relação a corrente nominal do trecho 816 – 818, onde está localizado F2. Essa análise somada ao estudo da Tabela 6, que apresenta o valor da corrente de falta em pu, traz a possibilidade da ocorrência do *trip* solidário, visto que, para o caso em questão, a corrente de falta atingiu 150% da corrente nominal do trecho.

#### 4.4.2 Proteção F7

Para a análise atuação da proteção F7 e a ocorrência do *trip* solidário, o Gráfico 4 e a Tabela 7 trazem os dados da corrente no trecho 834 – 842, onde está localizado a chave-fusível F7, para o caso 2 de simulação. O Gráfico 4 traz os valores em amperes, para diferentes combinações de conexão da GD e falta. A Tabela 7 apresenta os dados em pu.

Gráfico 4. Resultado da simulação do caso 2 para a proteção F7.



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 7. Corrente na proteção F7 para o caso 2 de simulação do 34NTF.

Trecho	Proteção	Fase A	Fase B	Fase C
Corrente (pu)				
834- 842	F7	0,104	0,097	0,096

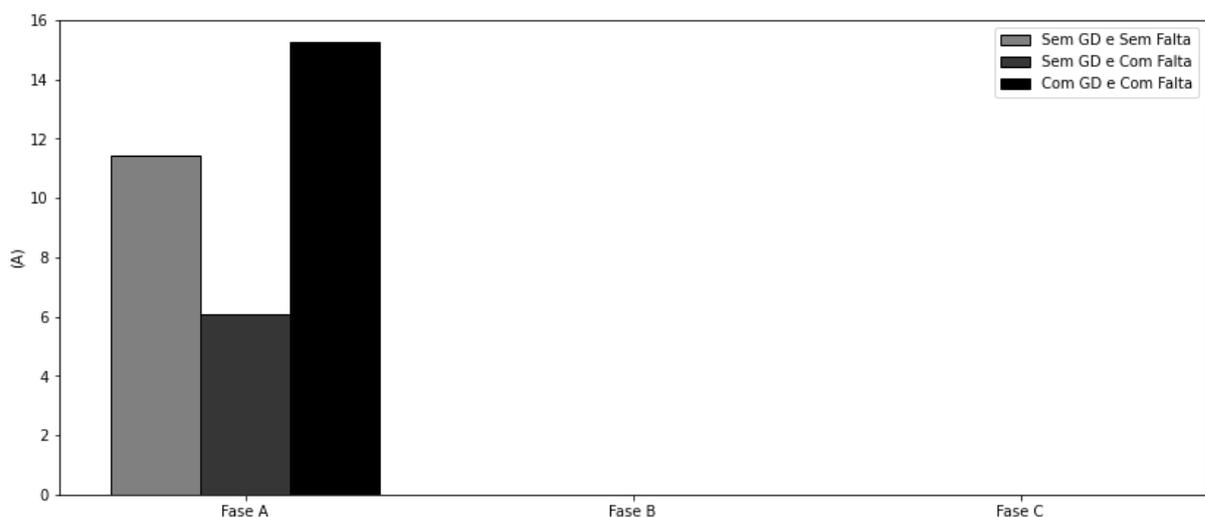
A análise do Gráfico 4, alinhado ao estudo da Tabela 7, mostra que, semelhante ao caso 1 simulado para o trecho 834 – 842, onde está presente a proteção F7, os valores das correntes de simulação com conexão de GD e falta trifásica com impedância de  $5 \Omega$  na extremidade do alimentador (840) se mostraram expressivamente inferiores aos valores nominais. Isso se deve ao fato do modelo de gerador fotovoltaico utilizado para a simulação da GD esteve no modo de desconexão, devido à baixa tensão no ponto de acoplamento (MENDES et al., 2019). Com isso, evidencia-se que para esse trecho no caso 2 de simulação, não há ocorrência do *trip* solidário.

## 4.5 Caso 3

### 4.5.1 Proteção F2

Para esse caso 3 de simulação, além das conexões de GD nos pontos 822 e 848 ramais protegidos os dispositivos chave-fusíveis F2 e F7, respectivamente, também há a presença de falta trifásica com impedância de  $10 \Omega$  no nó 840. O Gráfico 5 e a Tabela 8 mostram os resultados das simulações para o caso 2 no trecho 816 – 818, onde está localizado F2.

Gráfico 5. Resultado da simulação do caso 3 para a proteção F2.



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 8. Corrente na proteção F2 para o caso 3 de simulação do 34NTF.

Trecho	Proteção	Fase A	Fase B	Fase C
Corrente (pu)				
816- 818	F2	1,33	-	-

A análise do Gráfico 5 mostra que, para a situação do caso 3 com presença de GD e falta trifásica com  $10 \Omega$  de impedância, as correntes de falta da proteção F2 superam os valores nominais do trecho. Embora tenha o registro de valores superiores ao nominal, a Tabela 8 traz que a corrente de falta se limitou à 1,33 pu, não ocorrendo o *trip* solidário. Embora não tenha ocorrido o fenômeno, nota-se a contribuição da GD na corrente de falta.

#### 4.5.2 Proteção F7

O Gráfico 6 e a Tabela 9 expressam os resultados referentes ao caso 3 de simulação para o trecho 834 – 842, onde está localizado o dispositivo de proteção F7.

Gráfico 6. Resultado da simulação do caso 3 para a proteção F7.

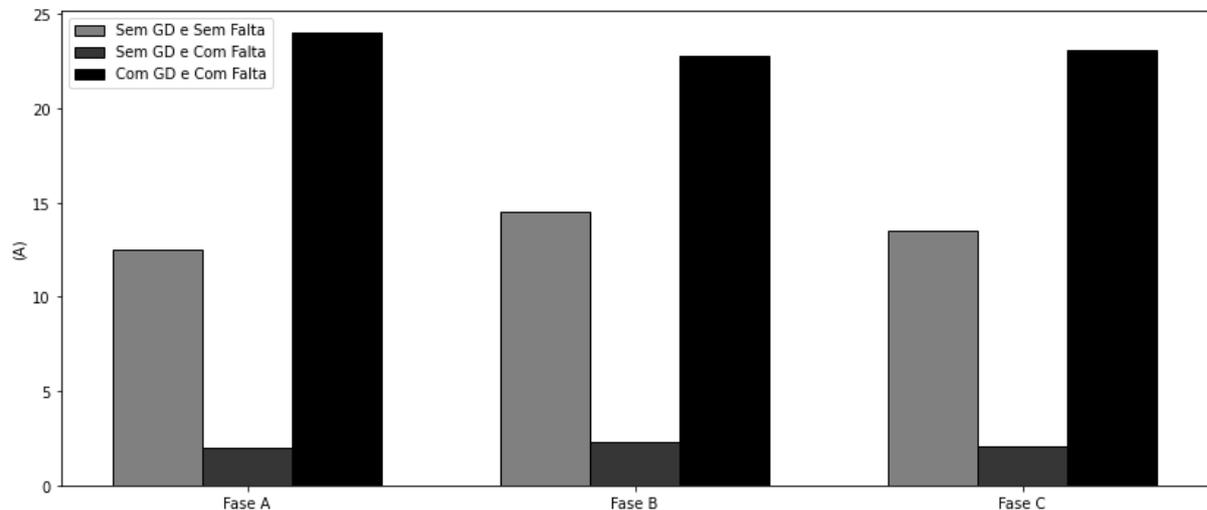


Tabela 9. Corrente na proteção F7 para o caso 3 de simulação do 34NTF.

Trecho	Proteção	Fase A	Fase B	Fase C
Corrente (pu)				
834- 842	F7	1,92	1,57	1,71

O Gráfico 6 mostra que, para a situação do caso 3 de simulação do trecho 834 – 842 com conexão de GD e falta trifásica de  $10 \Omega$  de impedância, as correntes de falta superaram significativamente os valores nominais do trecho. Essa evidência somada a análise da Tabela 9, evidência a ocorrência do fenômeno *trip* solidário, visto que em ambas as fases, as correntes de falta superaram 150% dos valores nominais. Para esse caso de simulação, o modelo de gerador fotovoltaico esteve no modo 1 de conexão, onde se apresentava operando.

## 5 CONCLUSÕES

A alta penetração de GD nos AD afeta diretamente os parâmetros da rede, como o PT, as LC e o fluxo de potência. Indiretamente, a filosofia de proteção é impactada, deixando o sistema refém de fenômenos não previstos em situações de funcionamento sem presença de GD. Um desses eventos é o *trip* solidário, que é a atuação indevida de dispositivos de proteção na presença de faltas.

Para evitar a ocorrência do *trip* solidário nos alimentadores de distribuição, é necessário realizar estudos com simulação de cenários com presença de geração distribuída, sobretudo aquelas que apresentam inversor como interface com a rede. Nesse sentido, essa pesquisa se baseou na modelagem do alimentador de testes IEEE 34 *Node Test Feeder* no ambiente Simulink do *software* Matlab. Tal rede foi selecionada por representar um sistema real e apresentar condições diversificadas para um estudo com alto nível de confiabilidade.

Para o estudo da ocorrência do *trip* solidário, foram implementados 3 casos de simulações no alimentador IEEE 34 *Node Test Feeder* modelado. Tais casos foram planejados para avaliar a influência da GD na ocorrência do fenômeno em questão. Também foram variados os valores de impedância da falta imposta, para avaliar a influência de tal parâmetro nos cenários propostos.

Os resultados dos casos de simulação mostraram que, a modelagem do alimentador IEEE 34 *Node Test Feeder*, mesmo com as considerações impostas, apresentou-se eficaz para o estudo de possíveis fenômenos nos alimentadores de distribuição. Observou-se também que o modelo de gerador fotovoltaico mostrou eficiência ao representar uma geração distribuída, sendo possível realizar estudos confiáveis sobre o *trip* solidário.

Foi possível constatar a presença do *trip* solidário em ambos os casos simulados. Para os casos 1 e 2, observou-se corrente de falta superior à 1,5 pu percorrendo a chave-fusível F2. Para o caso 3 simulado, notou-se corrente de falta trifásica elevada, superior à 1,5, sobre a proteção F7. Levando em consideração o valor de 150% do nominal a condição suficiente para atuação dos dispositivos, conclui-se que, mesmo um gerador baseado em inversor, com limitação de corrente de falta em 2 pu, existe a ocorrência do *trip* solidário nos alimentadores de distribuição

com geração distribuída. Também foi possível concluir a influência da impedância de falta para ocorrência do fenômeno estudado, visto que para maiores valores da impedância de falta, constatou-se menores valores de corrente de falta percorrendo a proteção F2, indicando uma relação inversamente proporcional.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BATISTA, O. E.; FLAUZINO, R. A.; MORAES, L. A.; ARAÚJO, M. A. The faults variability in distribution systems with distributed generation and robustness of smart grids. *In: IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America)*, Sao Paulo, 2013, pp. 1-6.

BITTENCOURT, A. A. **Proteção Adaptativa de Alimentadores de Distribuição de Energia Elétrica Considerando Geração Distribuída**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/94903/292120.pdf>. Acesso em: 28 maio 2019.

BLAABJERG, F. & YANG; YONGHENG & YANG; DONGSHENG & WANG; XIONGFEI. Distributed Power-Generation Systems and Protection. **Proceedings**. *In: IEEE*. 2017. 105. 1-21.

COSTER, E. J.; MYRZIK J. M. A.; KRUIJMER B.; KLING W. L. Integration Issues of Distributed Generation in Distribution Grids. **Proceedings**. *In: IEEE*, vol. 99, no. 1, pp. 28-39, janeiro 2011.

ELETROBRÁS. Proteção dos Sistemas Aéreos de Distribuição. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1982.

FRACALOSSO, L. G. V.; VARGAS, M. C.; BATISTA, O. E. Trip solidário em Alimentadores de Distribuição com Geração Distribuída. *Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*, v. 2, n. 1, 2020.

FRACALOSSO, L. G. V.; BRAGANÇA, T. O.; VARGAS, M. C.; BATISTA, O. E. Trip Solidário no IEEE 34-Node Test Feeder: um Estudo de Caso. *In: Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 5, p. 44179 – 44186, 2021.

MATOS, S. P. S.; ENCARNAÇÃO, L. F. Influence of Distributed Generation in Transmission Lines Protection. *In: IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 9, pp. 2941-2948, setembro. 2015.

MATOS S. P. S.; ENCARNAÇÃO L. F.; DONADEL C. B. Analysis of contribution from solar generators for short circuit in an urban distribution system. *In: IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), Washington, DC, 2017, pp. 1-5.*

MATOS S. P. S.; ENCARNAÇÃO L. F.; DONADEL C. B. Technical review of protection settings considering the influence of distributed generation. *In: IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), Washington, DC, 2017, pp. 1-5.*

MENDES, M. A. **Análise dos Impactos da Alta Inserção de Geração Distribuída Fotovoltaica na Proteção de Sobrecorrente Temporizada.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018. Disponível em: [http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese\\_11415\\_Disserta%E7%E3o%20Mariana%20A.%20Mendes\\_atualizada.pdf](http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese_11415_Disserta%E7%E3o%20Mariana%20A.%20Mendes_atualizada.pdf). Acesso em: 28 maio 2019.

MENDES, M. A.; VARGAS, M. C.; SIMONETTI, D. D. L.; BATISTA, O. E. Load Currents Behavior in Distribution Feeders Dominated by Photovoltaic Distributed Generation. *In: Electric Power Systems Research, vol. 201, dezembro. 2021.*

MENDES, M. A.; VARGAS, M. C.; BATISTA, O. E.; YANG, Y.; BLAABJERG, F. Simplified Single-phase PV Generator Model for Distribution Feeders With High Penetration of Power Electronics-based Systems. *In: 2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), pp. 1-7, dezembro. 2019.*

RAJAEI, N.; SALAMA, M. M. A. Management of Fault Current Contribution of Synchronous DGs Using Inverter-Based DGs. *In: IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 6, pp. 3073-3081, novembro. 2015.*

VARGAS, M. C.; MENDES, M. A.; BATISTA O. E. Faults Location Variability in Power Distribution Networks with High PV Penetration Level. *In: 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), São Paulo, Brazil, 2018, pp. 459-466.*

VARGAS, M. C.; MENDES, M. A.; BATISTA, O. E. Impacts of High PV Penetration on Voltage Profile of Distribution Feeders Under Brazilian Electricity Regulation. *In: 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), São Paulo, Brazil, 2018, pp. 38-44.*

VARGAS, M. C. **Análise dos Impactos das Falhas na Proteção de Sobrecorrente em Redes de Distribuição com Elevada Penetração de Geração Distribuída Fotovoltaica.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018. Disponível em: [http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese\\_12601\\_Dissertacao\\_Murillo20190315-134433.pdf](http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese_12601_Dissertacao_Murillo20190315-134433.pdf). Acesso em: 28 maio 2019.