

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
ESPECIALIZAÇÃO EM FONTES RENOVÁVEIS:
GERAÇÃO, OPERAÇÃO E INTEGRAÇÃO

GLEISTON BIANCH ANDRADE

**Estudo de Caso Sobre Comportamento de uma Minigeração em um
Circuito com Cargas Desequilibradas**

Belo Horizonte
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
ESPECIALIZAÇÃO EM FONTES RENOVÁVEIS:
GERAÇÃO, OPERAÇÃO E INTEGRAÇÃO

GLEISTON BIANCH ANDRADE

**Estudo de Caso Sobre Comportamento de uma Minigeração em um
Circuito com Cargas Desequilibradas**

Monografia submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora da Especialização em Fontes Renováveis, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Certificado de Especialista em Fontes Renováveis.

Orientador: Prof. Sidelmo M. Silva

Belo Horizonte
2019

GLEISTON BIANCH ANDRADE

**Estudo de Caso Sobre Comportamento de uma Minigeração em um
Circuito com Cargas Desequilibradas**

Monografia submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora da Especialização em Fontes Renováveis, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Certificado de Especialista em Fontes Renováveis.

Orientador: Prof. Sidelmo M. Silva

Belo Horizonte, 06 de dezembro de 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Nome do Orientador

Sidelmo M. Silva

Prof. Nome do Relator

Wallace do Couto Boaventura



ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DO ALUNO GLEISTON BIANCH ANDRADE

Realizou-se, no dia 06 de dezembro de 2019, às 13:00 horas, Sala 2305 - 2o. andar - bloco 1 - Escola de Engenharia, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de monografia, intitulada *Estudo de Caso Sobre Comportamento de uma Minigeração em um Circuito com Cargas Desequilibradas*, apresentada por GLEISTON BIANCH ANDRADE, número de registro 2018707820, graduado no curso de ENGENHARIA ELÉTRICA, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em FONTES RENOVÁVEIS - GERAÇÃO, OPERAÇÃO E INTEGRAÇÃO, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Sidelmo Magalhaes Silva - Orientador (Universidade Federal de Minas Gerais), Prof(a). Wallace do Couto Boaventura (UFMG).

A Comissão considerou a monografia:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.
Belo Horizonte, 06 de dezembro de 2019.


Prof(a). Sidelmo Magalhaes Silva (Doutor)


Prof(a). Wallace do Couto Boaventura (Doutor)


Secretaria do Curso de Especialização em
Fontes Renováveis - Geração, Operação
e Integração

CIP – CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Andrade, Gleiston Bianch
Estudo de Caso Sobre Comportamento de uma Minigeração em um
Circuito com Cargas Desequilibradas / Gleiston Bianch. – 2019.
Orientador: Prof. Sidelmo M. Silva
Monografia (Especialização) – Universidade Federal de Minas
Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Belo
Horizonte, BR – MG 2019.
1.Geração distribuída. 2.Sistema elétrico de Texto 3.Cargas
desequilibradas 4.Coordenação da proteção. I Andrade, Gleiston
Bianch. II. Silva, Sidelmo M. III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Reitor: Sandra Goulart Almeida

Vice-Reitor: Alessandro Fernandes Moreira

Pró-Reitor de Pós-Graduação: Fábio Alves da Silva Junior

Coordenador do Programa de Pós-Graduação: Luís Antônio Aguirre

RESUMO

A exploração de fontes renováveis interligadas ao sistema elétrico de potência, denominada de geração distribuída, tem se mostrado um mercado cada vez mais interessante, com boa rentabilidade, subsídios governamentais e com fundamento em conceitos de sustentabilidade. Nos últimos anos o Brasil vivenciou um crescimento expressivo do número de unidades consumidoras conectadas ao sistema elétrico de distribuição e gerando sua própria energia. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL regulamenta o acesso de produtores de energia ao sistema de distribuição através do Módulo 3 do PRODIST, para conexões de baixa, média e alta tensão. A popularização da Geração Distribuída e sua conexão em um sistema de distribuição convencional, que normalmente é baseado no fornecimento de energia num único sentido, ou seja, da fonte para a carga, trouxe consigo mudanças na forma de enxergar o sistema elétrico, na sua operação e manutenção, por consequência na percepção dos clientes sobre a qualidade do serviço prestado. Um constante debate sobre o uso racional e seguro se faz necessário, pois estamos diante de uma nova realidade, que tem provocado alterações no negócio de distribuição de energia, tanto na forma de planejamento da expansão quanto na operação em tempo real. A ANEEL tem conduzido vários debates em relação a esse tema, com objetivo de promover o uso racional, a segurança dos clientes e trabalhadores que interagem com o sistema elétrico de potência. Outro aspecto também debatido diz respeito ao equilíbrio econômico das distribuidoras. Muitas empresas têm alegado perda de receita e em alguns casos, o aumento dos custos com operação e manutenção. Este estudo apresenta os impactos de conexão de uma nova fonte de potência em um circuito trifásico de média tensão, com cargas desequilibradas, os reflexos na qualidade do fornecimento da energia elétrica para o próprio cliente bem como as soluções implantadas, que envolveram desde a coordenação da proteção, reequilíbrio dos circuitos à instalação de um reator de aterramento.

Palavras-chave: Geração distribuída; Sistema elétrico; Cargas desequilibradas; Coordenação da proteção.

ABSTRACT

The exploration of renewable sources interconnected with the electric power system, called distributed generation, shows an increasingly interesting market, with good profitability, managed subsidies and based on sustainability concepts. Currently in Brazil, there has been a significant growth in the number of consumer units connected to the electricity distribution system and generating their own energy. The National Electric Energy Agency - ANEEL regulates the access of energy producers to the distribution system through PRODIST Module 3, for low, medium and high voltage connections. The popularization of distributed generation and its connection to a conventional distribution system, which is usually based on one-way power supply (from the source to the load) has brought with it changes in the way the electrical system is viewed in its operation and maintenance, consequently in the perception of customers about the quality of the service provided. It's necessary to debate constantly about the rational and safe use because we're facing a new reality which has caused changes in the energy distribution business, both in planning expansion and in real time operations. The ANEEL has been debating a lot on this topic with the purpose of promoting rational use and the safety of customers and workers who interact with the electric power system. Another aspect discussed are the concerns on the economic balance of the distributors. Many companies have claimed lost revenue and in some cases increased operating and maintenance costs. This study presents the impacts of connecting a new power supply to a three-phase medium voltage circuit with unbalanced loads, the impact on the quality of the electricity supply to the customer as well as the solutions implemented involving the coordination of protection, rebalancing the circuits to the installation of a grounding reactor.

Keywords: Distributed generation; Electrical system; Unbalanced loads; Coordination of protection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama dos ativos de distribuição.....	13
Figura 2 Carecterística do Alimentador 4.....	14
Figura 3 - Vista de operação alimentador 4.....	15
Figura 4 Chave Fusível de Distribuição	17
Figura 5 - Curvas características de fusão tempo x corrente dos elos fusíveis tipo K	18
Figura 6 Elo Fusível	19
Figura 7 - disjuntor 138 kV	20
Figura 8 - Religador trifásico.....	21
Figura 9 - Religador monofásico microprocessado.....	22
Figura 10 - Seccionalizador redes de distribuição.....	23
Figura 11 - Reguladores de tensão	24
Figura 12 Gerador diesel	26
Figura 13 Instalação 2º disjuntor	26
Figura 14 Vista aérea instalação	27
Figura 15 Coordenograma	30
Figura 16 Faseamento do alimentador	31
Figura 17 Medição Correntes ponto conexão da GD	32
Figura 18 Alteração faseamento circuitos monofásicos	33
Figura 19 Curva mensal da quantidade interrupções.....	35
Figura 20 Instalação reator aterramento	36
Figura 21 Mapa da geração distribuída	42
Figura 22 Múltiplas unidades consumidoras abastecidas pelo mesmo sistema	44
Figura 23 Sistema Fotovoltaico fora do ponto de consumo	45
Figura 24 Autoconsumo remoto	46
Figura 25 Evolução da quantidade conexões GD.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Parâmetros de proteção.....	29
Tabela 2 Medição Circuito Antes Reequilíbrio.....	33
Tabela 3 Medição Após alteração faseamento	34
Tabela 4 Dimensionamento do reator de aterramento.....	36
Tabela 5 Unidades Consumidoras com Geração Distribuídas	46

Sumário

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	12
3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO LOCAL	13
4 PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA	16
4.1 CHAVE FUSÍVEL/ELO FUSÍVEL	16
4.1.1 ELO FUSÍVEL TIPO H.....	19
4.1.2 ELO FUSÍVEL TIPO K E T.....	19
4.2 DISJUNTORES	20
4.3 RELIGADORES TRIFÁSICOS E MONOFÁSICOS	21
4.4 SECCIONALIZADORES	22
4.5 REGULADORES DE TENSÃO	23
5 DESCRIÇÃO DO ESTUDO DO CASO	25
5.1 HISTÓRICO PROBLEMA	31
5.1.1 CIRCUITO TRIFÁSICO DESEQUILIBRADO.....	31
5.2 INTERRUPÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA AO LONGO DO CIRCUITO	34
5.3 SOLUÇÕES APLICADAS	35
7 CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS	39
APÊNDICES	41
1. DADOS GERAIS SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	41
2. EMPREENDIMENTO COM MÚLTIPLAS UNIDADES CONSUMIDORAS.....	43
3. GERAÇÃO COMPARTILHADA	44
4. AUTOCONSUMO REMOTO	45
5. EVOLUÇÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	46

1 INTRODUÇÃO

Tudo começou com a descoberta da eletricidade por um filósofo grego chamado de Tales de Mileto que ao esfregar um âmbar em um pedaço de pele de carneiro, observou que pedaços de palhas e fragmentos de madeira começaram a ser atraídas pelo próprio âmbar. Muito tempo se passou e em outubro de 1752, Benjamin Franklin empinando uma pipa durante uma tempestade, fez o experimento que marcou a história de eletricidade.

O sistema elétrico como o conhecemos hoje, não possui mais que 100 anos. Durante todo esse período, além da evolução tecnológica dos transformadores, condutores e demais equipamentos, pouca coisa mudou em termos de estrutura.

Ao se falar em estrutura do sistema elétrico, da geração até o ponto de consumo, se faz necessário um sistema de transmissão e distribuição capaz de realizar o transporte da energia elétrica gerada, até as casas e indústrias, isso com o mínimo de perdas possíveis. Neste contexto, destaca-se um caminho único, em que o fluxo de potência flui das fontes geradoras até os pontos de consumo.

O crescimento das fontes renováveis aliada a possibilidade de geração de energia diretamente no ponto de consumo, tem consigo importantes alterações na forma de operar o sistema elétrico, principalmente pela possibilidade de disponibilização da energia excedente para o sistema elétrico.

Neste cenário, com mais de uma fonte de injeção de potência no sistema elétrico, manter a qualidade do fornecimento de energia elétrica em patamares adequados tem proporcionado novos desafios aos especialistas de operação e manutenção do sistema elétrico, fazendo com que a busca de soluções para a mitigação dos impactos negativos seja constante.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho será descrever os impactos da conexão de uma fonte geradora externa a um alimentador de distribuição predominantemente rural e com cargas desequilibradas, seus impactos no sistema elétrico de potência, inclusive para a própria unidade microgeradora.

Com base nos resultados obtidos, esta monografia poderá propor alterações na topologia do alimentador, nos ajustes dos equipamentos de proteção e controle de tensão, de forma que a reduzir os impactos para a operação do sistema elétrico, utilizando de forma benéfica esta nova fonte injetora de energia no sistema.

A metodologia empregada será baseada em pesquisas de casos semelhantes, normas PRODIST da ANEEL, normas internas da CEMIG, dados reais de um alimentador e seus componentes de uma geração distribuída conectada ao sistema e as soluções adotadas.

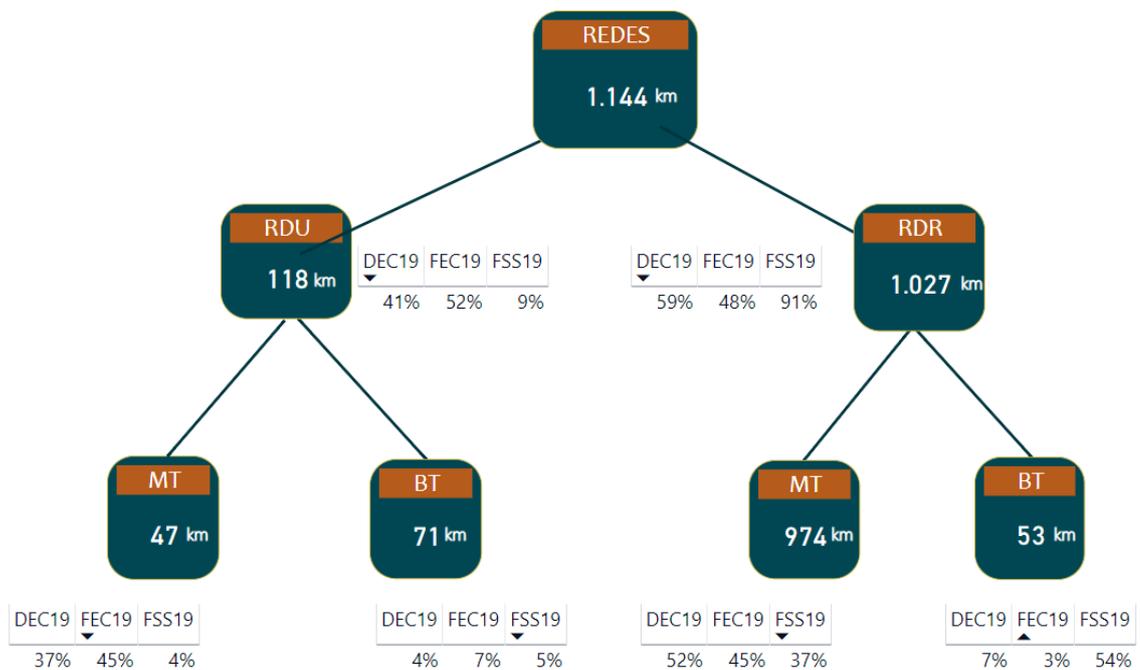
Com este trabalho espera-se descrever com o máximo de detalhes todos os aspectos vivenciados, soluções estudadas e aplicadas para equacionar as alterações ocorridas quando uma fonte externa é conectada em paralelo ao sistema elétrico de distribuição.

3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO LOCAL

A subestação em questão está localizada na região da Mantiqueira, composta de um transformador de 10 MVA e 4 saídas de alimentadores de média tensão, 13,8 kV fase-fase, trifásico a 4 fios, cuja extensão total se aproxima a 1.144 quilômetros de rede, sendo 10% em área urbanas e 90 % em áreas rurais, conforme ilustrado na Figura 1.

As redes de distribuição trifásicas e monofásicas de média tensão possuem o neutro comum, contínuo, multi e solidamente aterrado, na subestação e ao longo de todo o sistema de distribuição. O sistema de distribuição de média tensão deriva do secundário dos transformadores trifásicos das subestações rebaixadoras, conectados em estrela aterrada. Na figura 1 está representado o diagrama dos ativos de distribuição, como podemos observar a seguir.

Figura 1 - Diagrama dos ativos de distribuição



Fonte: Acervo do autor.

O Alimentador de número 4 possui uma extensão de 389 quilômetros, responsável por atendimento as cargas urbanas e rurais da região, sendo: 13 km em áreas urbanizadas e 376 km, em áreas rurais, conforme ilustrado na Figura 2. Um fato a se destacar é que a maior parte da rede rural é composta por derivações monofásicas cujo dispositivo de proteção é uma chave fusível.

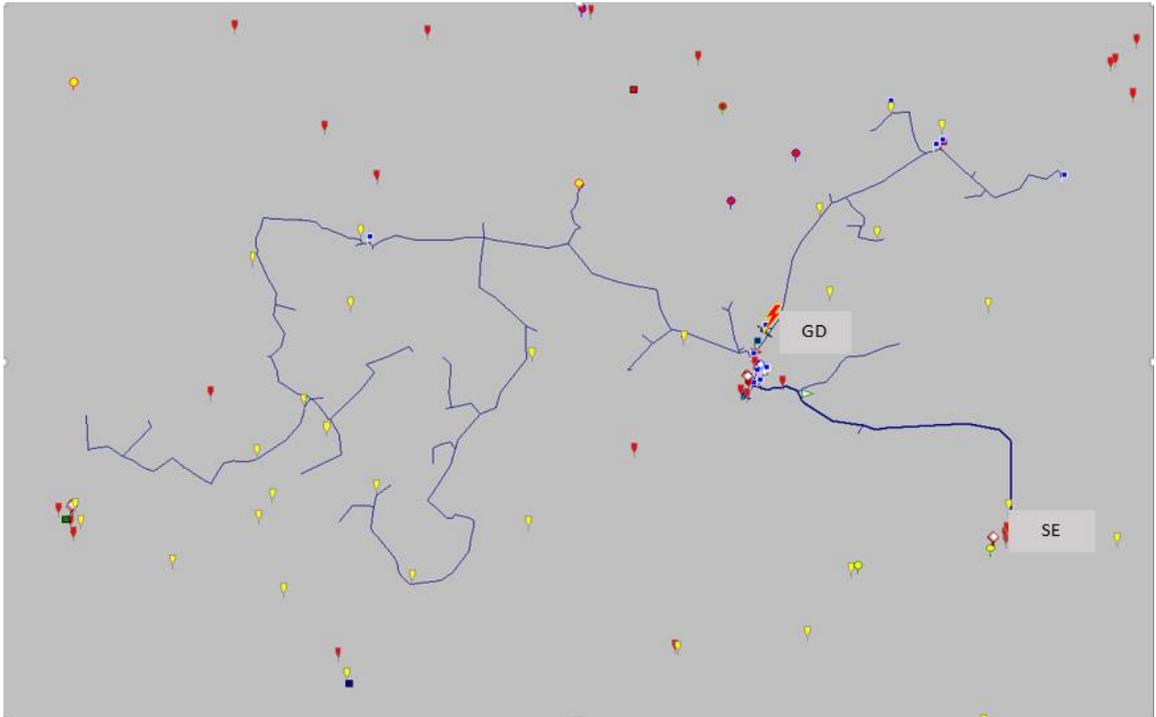
Figura 2 Característica do Alimentador 4

Dados Gerais		Extensão por Tipo de Rede (Km)			
Comprimento Total	389,48 Km	Rede Urbana		Rede Rural	
Comprimento do Tronco	12,33 Km	Convencional	8,51	Convencional	374,86
Comprimento dos Ramais	377,15 Km	Protegida	5,54	Protegida	0,10
Número de Trafos	758	Isolada	0,42	Isolada	0,0
Demanda Total	2749 kVA	Subterrânea	0,0	Subterrânea	0,0
Perdas Totais	5,5 %				
Número de Equipamentos				Carga Instalada (kVA)	
Reguladores	2	Capacitores	1	Distribuída	3066
Religadores	14	Seccion.	1	Rural	6469
CH Fusível	134	CH Tripolares	0	Concentrada	2100
CH Unipolares	40	CH Trip. - CR	0	Total	11635
Auto-Trafo	0	Pt Trafo 34,5kV	0		
				Número de Clientes	
				Secundários	2400
				Rurais	1099
				Primários	4
				Total	3503
Equipamentos com capacidade de interrupção ultrapassada				153991	
Ok					

Fonte: Gdis – gestão da distribuição (2019).

Apesar de uma grande extensão de rede, esse alimentador é responsável pelo fornecimento de energia elétrica a apenas 3.503 clientes sendo 2.400 clientes em área urbana, 1.099 em áreas rurais e ainda 4 clientes atendidos em média tensão, sendo um deles uma unidade consumidora com sistema fotovoltaico instalado, foco do tema deste trabalho. A Figura 3, mostra a vista da operação do alimentador 4.

Figura 3 - Vista de operação alimentador 4



Fonte: Gdis – gestão da distribuição (2019).

Na vista de operação do alimentador, é possível identificar a subestação, o local de instalação da GD, bem como uma noção de extensão do alimentador.

4 PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

A seguir será abordado os principais equipamentos de proteção e regulação de tensão utilizada em Redes de Distribuição.

- Chave fusível unipolar e repetidora com proteção por elo fusível;
- Disjuntores e relés;
- Religadores trifásicos e monofásicos;
- Seccionalizadores;
- Regulador de tensão;

4.1 CHAVE FUSÍVEL/ELO FUSÍVEL

Uma chave-fusível é um dispositivo de seccionamento e proteção de circuitos, de baixo custo, consistindo de: porta fusível, base para a porta fusível e o elemento responsável pela proteção do circuito, o elo-fusível.

Características construtivas: Tensão Nominal, Corrente Nominal, Nível Básico de Isolamento (NBI) ou Tensão suportável de Impulso (TSI) e Capacidade de Interrupção (I_{cc}).

Cartucho (Porta-fusível): É revestido internamente por uma fibra óssea ou vulcanizada. A queima dessa parte do revestimento é que dá origem à geração de gases desionizantes, principalmente hidrogênio e monóxido de carbono.

Elo-fusível: É a parte responsável pela sensibilidade do conjunto, ou seja, define a relação tempo x corrente de atuação.

A chave fusível ilustrada na Figura 4 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, é o dispositivo mais empregado em saídas de ramais, devido ao seu baixo custo. Elas são padronizadas para 100 Amperes de capacidade nominal e os cartuchos devem ter capacidade de interrupção superior à máxima corrente de curto-circuito simétrico disponível no ponto de instalação. Normalmente usam-se cartuchos com capacidade de interrupção de 10 kA assimétrico (7,1kA simétrico).

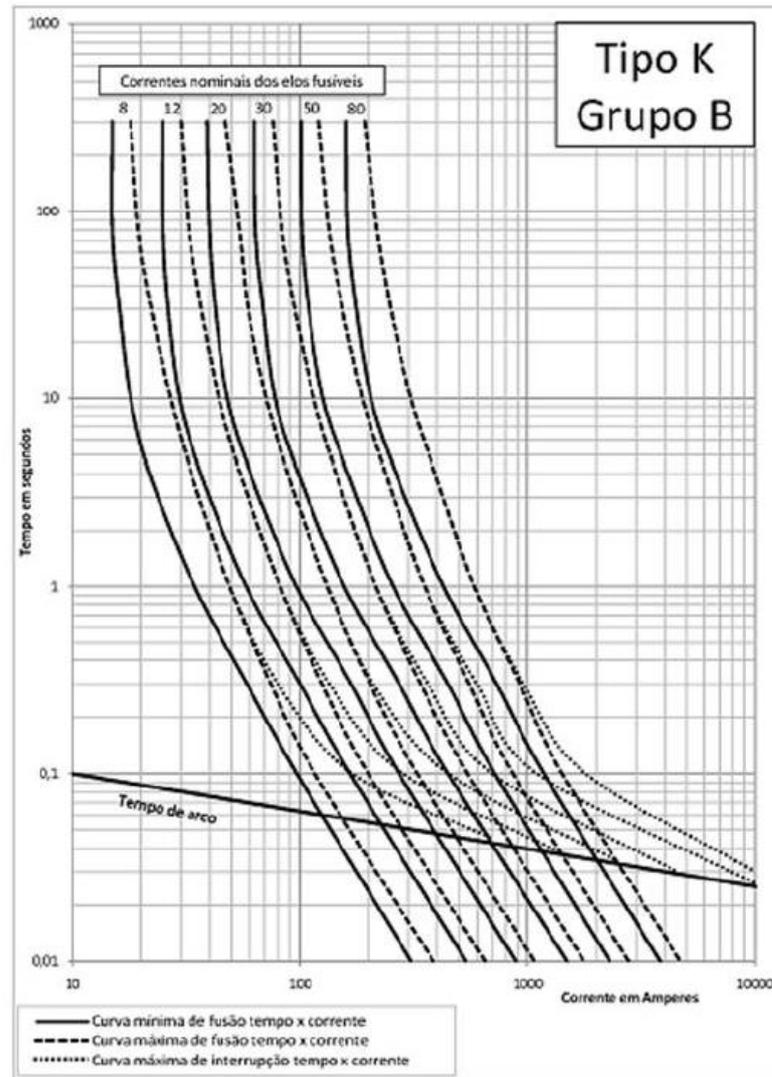
Figura 4 Chave Fusível de Distribuição



Fonte: Maurizio (2019).

Os elos fusíveis mais empregados nas chaves fusíveis são do tipo H, K e T, e as curvas tempo x corrente de interrupção estão definidas conforme a ABNT NBR 7282:2011. A Figura 5 demonstra as curvas de fusão tempo versus corrente elétrica dos elos tipo K, do grupo B.

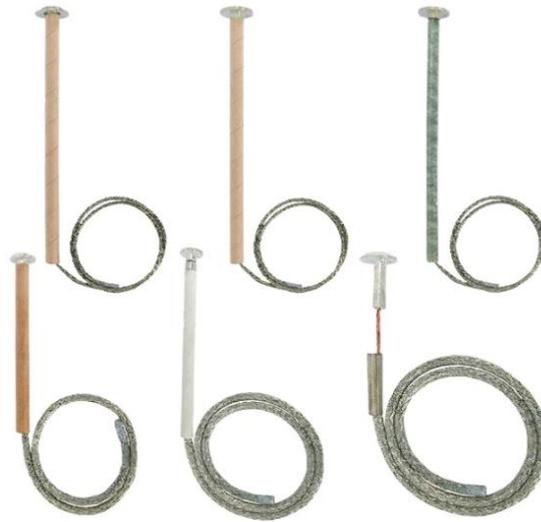
Figura 5 - Curvas características de fusão tempo x corrente dos elos fusíveis tipo K



Fonte: ND 4.15 - Cemig (2019).

A Figura 6 ilustra um elo fusível empregado na proteção de sistemas de distribuição são diferenciados segundo suas características de relação tempo versus corrente elétrica.

Figura 6 Elo Fusível



Fonte: Tecfuse (2019).

O elo fusível é composto do elemento fusível que é protegido por um invólucro de papel, cujo objetivo é auxiliar na extinção do arco elétrico no momento da ruptura, além de direcionar os gases para parte externa da porta fusível.

4.1.1 ELO FUSÍVEL TIPO H

Os elos fusíveis do tipo H são considerados de alto surto, de ação lenta para surtos de corrente, como por exemplo a corrente transitória de magnetização de transformadores. São fabricados somente para pequenas correntes nominais. Geralmente, são usados para proteger transformadores de pequenas potências e pequenos bancos de capacitores.

4.1.2 ELO FUSÍVEL TIPO K E T

Os elos fusíveis do tipo K e T são elos empregados nas derivações de Rede de Distribuição. Os elos tipo K têm características de fusão mais rápidas e os do tipo T características mais lentas. Admitem sobrecarga de até 1,5 vezes os seus valores nominais e

tem sua fusão a partir de 2,0 vezes os seus valores nominais. Os elos tipo K e T tem variação de 6 A até 200 A. Conforme os grupos abaixo:

- **Preferenciais:** 6, 10, 15, 25, 40, 65, 100, 140 e 200 A
- **Não-preferenciais:** 8, 12, 20, 30, 50 e 80 A.

4.2 DISJUNTORES

Um disjuntor é um dispositivo mecânico de manobra, capaz de estabelecer, conduzir e interromper corrente elétrica em condições normais de circuito e curto circuito, como demonstrado na Figura 7. Os disjuntores podem ser parametrizados via relé para atuação semelhante à de um religador, realizando religamentos automáticos e eliminação de falhas transitórias.

Figura 7 - disjuntor 138 kV



Fonte: Acervo do autor.

É importante observar que o formato das buchas e as saias do componente isolante, que no caso acima se trata de porcelana, tem por finalidade de evitar a formação de filetes contínuos de água mitigando o risco de passagem elétrica por tensão de contornamento.

4.3 RELIGADORES TRIFÁSICOS E MONOFÁSICOS

Religadores automáticos são equipamentos de interrupção de corrente elétrica dotados de uma determinada capacidade de repetição em operação de abertura e fechamento de um circuito, durante a ocorrência de um defeito.

Os religadores trifásicos são destinados a proteção de circuitos trifásicos, onde é necessário que tanto o seccionamento, quanto o religamento sejam de forma tripolar simultâneo. A chave ou mecanismo de abertura do circuito possui as buchas de entradas e saídas simétricas. A Figura 8 ilustra o conjunto religador e relé de comando.

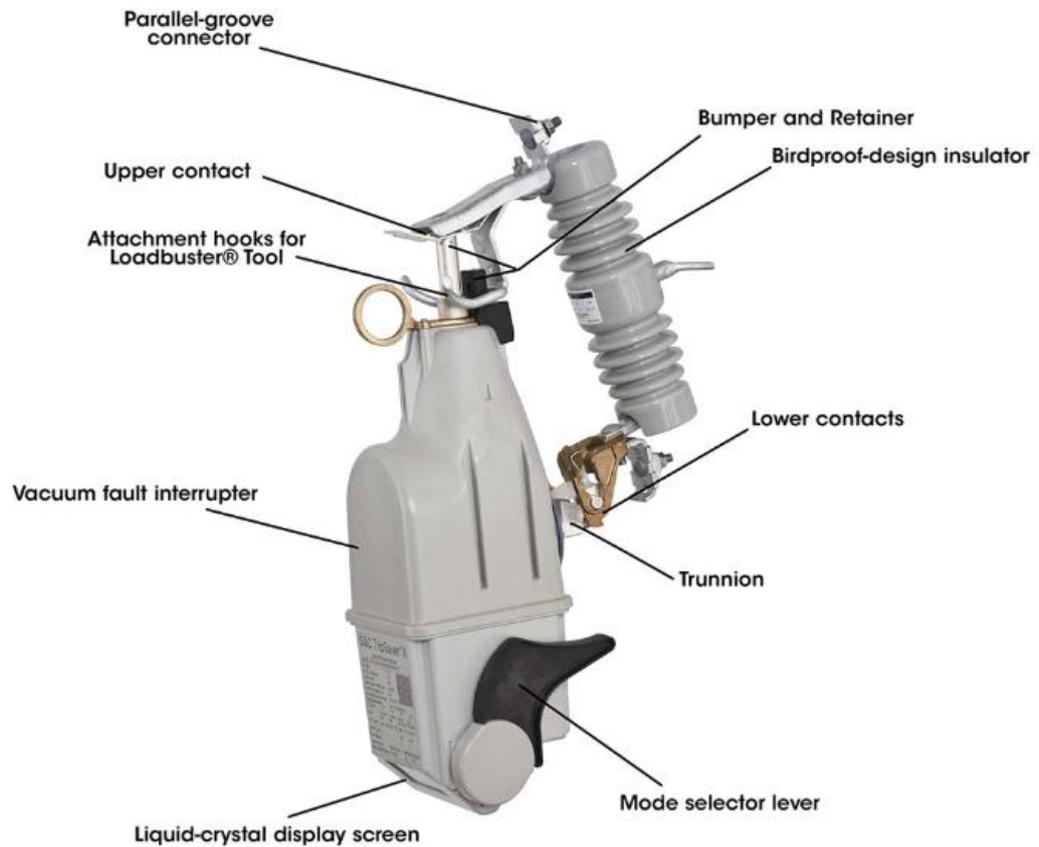
Figura 8 - Religador trifásico



Fonte: Noja (2019).

Os religadores monofásicos são destinados a proteção de circuitos monofásicos, podendo ser utilizado em circuitos trifásicos desde que suas cargas sejam monofásicas. Neste caso, utiliza-se um equipamento por fase. Observa-se que na Figura 9 o religador monofásico cujo modelo utiliza a mesma base de uma chave fusível.

Figura 9 - Religador monofásico microprocessado



Fonte: S&C (2019).

Diferentemente do religador trifásico, o do religador monofásico microprocessado possui todo o circuito eletrônico e câmara de extinção de arco elétrico acoplados.

4.4 SECCIONALIZADORES

Visualmente muito semelhante a um religador mostrado na Figura 8, o seccionalizador, representado na Figura 10, é um equipamento utilizado para proteção de sistemas elétricos de potência, que funciona em série com um religador, ou seja, não possui capacidade de interromper a corrente de curto.

Figura 10 - Seccionalizador redes de distribuição



Fonte: Acervo do autor.

O Seccionalizador abre seus contatos quando o circuito é desenergizado pelo religador a montante. A operação de abertura do seccionizador acontece durante o tempo morto entre os religamentos.

4.5 REGULADORES DE TENSÃO

Com princípio de funcionamento similar a um autotransformador, o regulador de tensão de média tensão é um equipamento instalado em redes de distribuição e subestações que tem por finalidade a manutenção da tensão de saída de um circuito elétrico, mantendo-a constante independente da tensão de entrada.

Com atuação monofásica, cada regulador de tensão regula sua própria fase. Desta forma, as ligações que utilizam 1, 2 ou 3 tanques, conforme a configuração do circuito, monofásico ou trifásico conforme a Figura 11.

Figura 11 - Reguladores de tensão



Fonte: TSEA (2019).

Entre as buchas de entrada e saída dos reguladores de tensão é necessária a instalação de um dispositivo de proteção contra surtos de tensão, limitando a diferença de potencial entre os circuitos de entrada e saída do equipamento.

5 DESCRIÇÃO DO ESTUDO DO CASO

Trata-se de um sistema fotovoltaico com potência nominal 473,025 kWp em c.c. e 399 kVA em c.a., constituído por 1785 módulos fotovoltaicos de 265 Wp e 15 inversores trifásicos. Os módulos foram instalados sobre o telhado da empresa.

Em função da potência do sistema fotovoltaico, foi necessário a utilização de transformador de acoplamento exclusivo, conforme disposto na Norma de Distribuição N.D.

5.31 - Requisitos para a conexão de Acessantes Produtores de Energia Elétrica ao Sistema de Distribuição Cemig – Conexão em Média Tensão.

A N.D 5.31 estabelece que os geradores da central geradora de energia devem ser interligados ao sistema de distribuição da Cemig D através de um ou mais transformadores de acoplamento, cuja potência é definida em função dos requisitos do acessante para a interligação. Por questões de compatibilidade da proteção do sistema elétrico os transformadores de acoplamento devem ser realizados através de disjuntor ou religador com função de religamento fora de serviço.

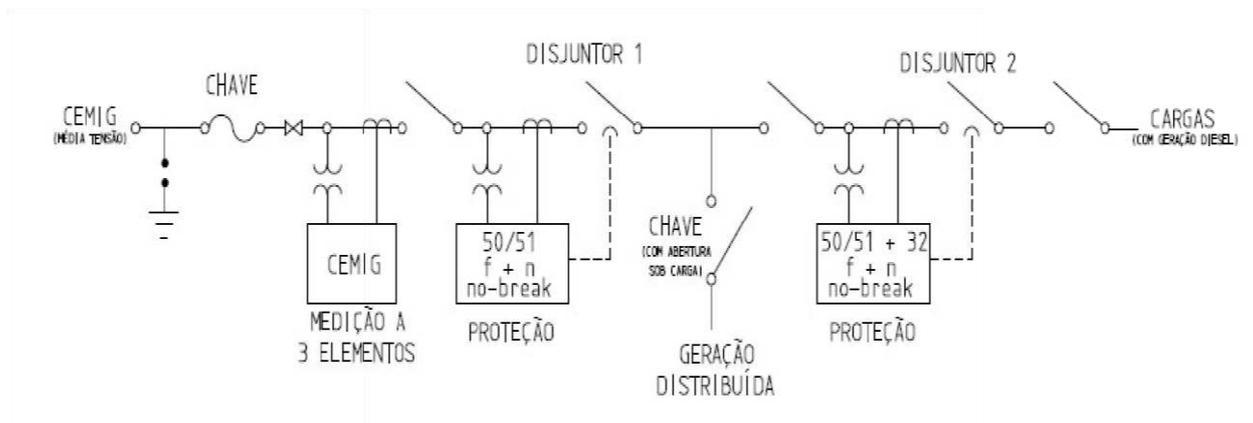
A unidade consumidora já possuía um Gerador Diesel, conforme ilustrado na Figura 12, para utilização em horário de ponta e/ou emergências. Para atendimento a norma N.D. 5.31 foi necessário a instalação de um segundo disjuntor de média tensão com objetivo de garantir que o sistema fotovoltaico não fosse afetado pela proteção do relé 32 de fluxo de potência, conforme a Figura 13, que mostra a localização do conjunto de medições, fonte Cemig e as cargas, além das proteções e chaves seccionadoras do sistema de geração distribuída e gerador diesel.

Figura 12 Gerador diesel



Fonte: Acervo do autor.

Figura 13 Instalação 2º disjuntor



Fonte: Acervo do autor.

O sistema fotovoltaico é conectado à rede de média tensão através da rede interna da empresa e de um transformador a seco de 500 kVA protegida por um disjuntor a vácuo e relé digital instalados na Sala Elétrica UFV. A Sala Elétrica é conectada a Cabine de Entrada através de ramal aéreo, conforme a Figura 14.

Figura 14 Vista aérea instalação



Fonte: Acervo do autor.

A seguir seguem os detalhes do ponto de conexão:

- Corrente de Curto Circuito trifásica – ICC igual a 604 A.
- Corrente de Curto Circuito monofásica, fase terra igual a 406 A.
- Tensão de fornecimento 13,8 kV.
- Demanda contratada de 400kVA.
- Fator de potência mínimo de 0,92.

Adotou-se como referência a corrente de 18,19A, conforme a demanda contratada e a equação abaixo:

$$In = 400 \frac{1}{(3^{1/3} * 13,8 * 0,92)}$$

Equação 1

A corrente de pick-up de fase considerada foi 5% superior a nominal, ou seja, 19,1 A e a pick-up de neutro 33% da pick-up de fase, 6,3 A.

Ajustes do Relé de Proteção:

- Proteção de sobre corrente instantânea: 50 e 50N.
- Proteção de sobrecorrente temporizada: 51 e 51N.

A Tabela 1 demonstra quais os parâmetros de proteção foram utilizados. O dial de tempo (dt) de 0,7s foi selecionado de forma a se obter a coordenação da proteção e temporização adequada para curto-circuito, permitindo a energização do transformador, bem como a cobertura do ponto ANSI do menor transformador.

Tabela 1 Parâmetros de proteção

UNIDADE	Parâmetro	Descritivo	Ajuste no Relé
UNIDADE	RTC	Relação do Transformador de Corrente de Proteção	10
	I (51)	Corrente de partida da unidade de tempo dependente fase	19,10
UNIDADE DE FASE	Curva	Tipo de curva de operação da unidade de fase	EI
	DT	Dial de Tempo da unidade de fase	0,7
	I Def.	Corrente definida da unidade de tempo independente fase	MÁXIMO
	T Def.	Tempo da unidade independente de fase	MÁXIMO
	I (50)	Corrente da unidade instantânea de fase	405,09
UNIDADE DE NEUTRO	I (51N)	Corrente de partida da unidade de tempo dependente neutro	6,30
	Curva	Tipo de curva de operação da unidade de neutro	EI
	DT	Dial de Tempo da unidade de neutro	0,7
	I Def.	Corrente definida da unidade de tempo independente neutro	MÁXIMO
	T Def.	Tempo da unidade independente de neutro	MÁXIMO
	I (50N)	Corrente da unidade instantânea de neutro	133,68

Fonte: Acervo do autor.

O tempo de atuação teórico de 0,125s foi obtido através da equação:

$$T = Kxdt \frac{1}{(M^a - 1)}$$

Equação 2

Onde:

T= Tempo de atuação.

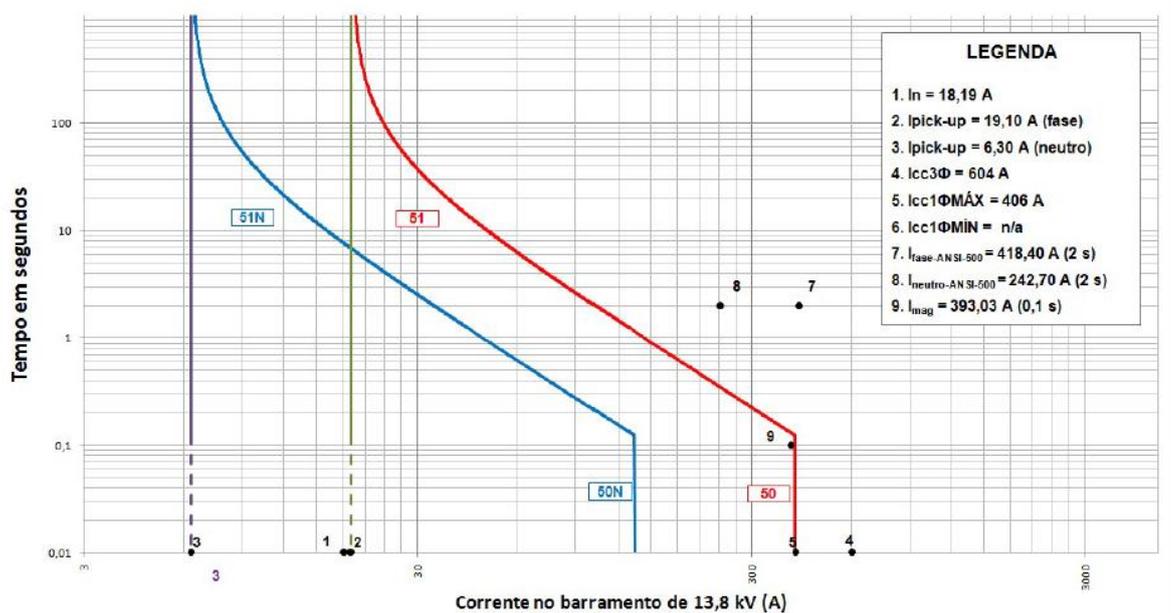
K= 80 (curva EI).

a= 2 (cirva EI).

M= Múltiplo de corrente de atuação, ou seja, a corrente de entrada dividia pela corrente de saída.

Corrente instantânea de fase 1,03 maior que a corrente de magnetização e a corrente de neutro 33% da corrente da corrente de magnetização.

Figura 15 Coordenograma



Fonte: Acervo do autor.

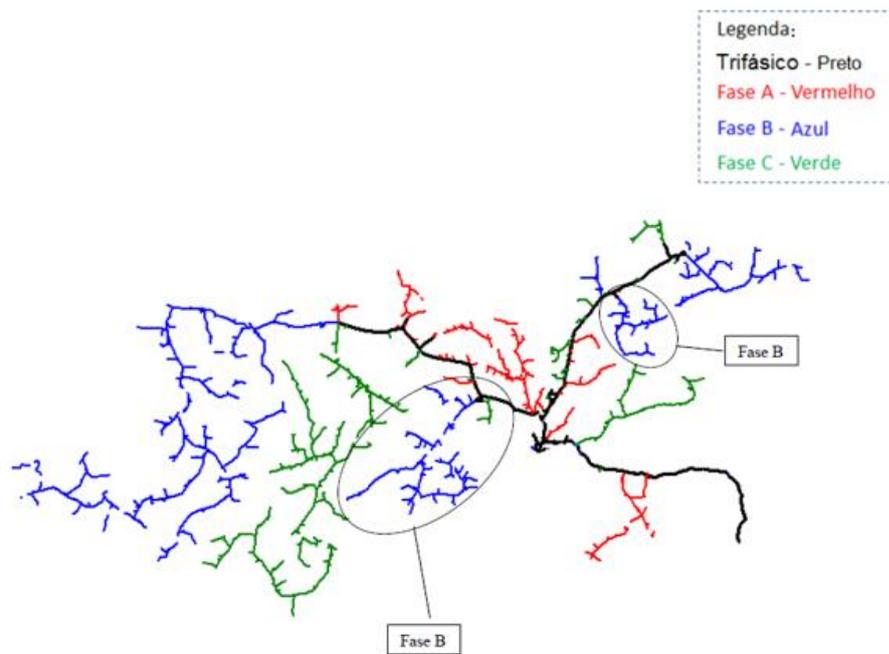
O coordenograma demonstra o tempo de atuação em relação a corrente no barramento de 13.8 kV.

5.1 HISTÓRICO PROBLEMA

5.1.1 CIRCUITO TRIFÁSICO DESEQUILIBRADO

No final do segundo semestre do ano de 2016 a GD foi conectada ao sistema elétrico de potência. Conforme demonstra a Figura 16, observa-se a distribuição das derivações monofásicas ao longo de toda a extensão do alimentador, sendo a fase A na cor vermelha, a B na cor azul, C na cor verde e preta o circuito trifásico. É notável a quantidade de circuitos monofásicos, cores azul, verde e vermelho.

Figura 16 Faseamento do alimentador



Fonte: Acervo do autor.

Logo nas primeiras semanas após a conexão da GD ao sistema elétrico observou-se um elevado número de operações do religador de proteção da GD via função 51N – sobrecorrente temporizada de neutro.

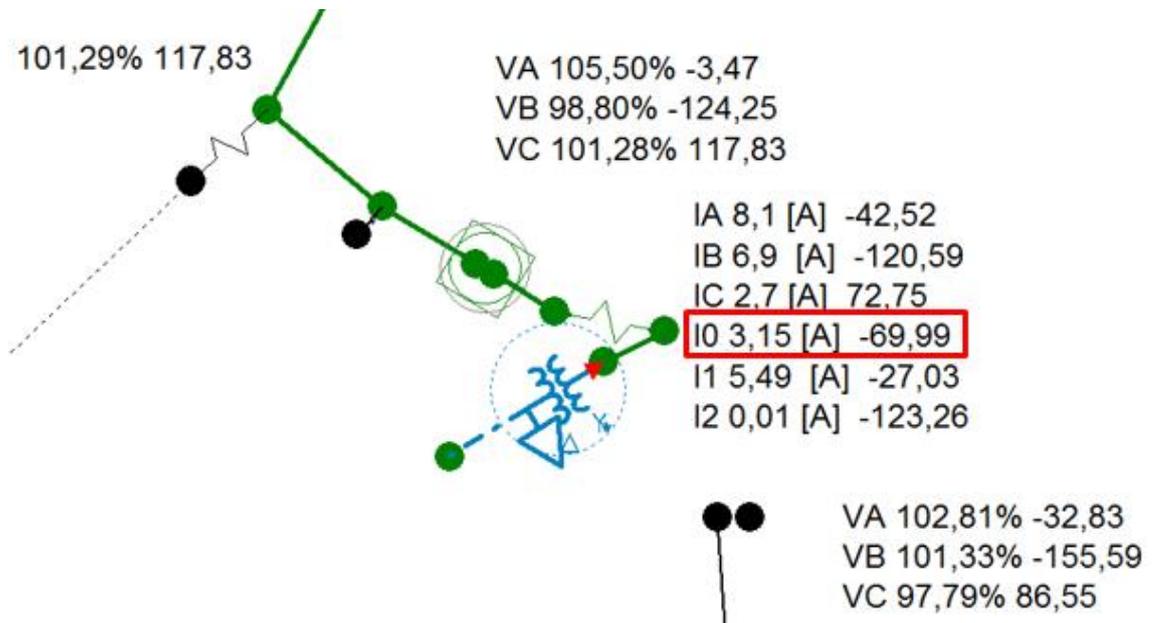
As análises demonstraram que na condição de desequilíbrio em que o sistema operava normalmente, não era possível com a inserção de uma nova fonte de potência no meio do alimentador.

As medições realizadas demonstram uma circulação de corrente em I_0 de 3,15 A, conforme ilustrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Figura 17, portanto a corrente de neutro de $3 \times I_A = 9,45$ A, para um pick-up de neutro de 6,30 A. Por esse motivo, a proteção da GD estava operando constantemente devido a circulação da corrente de neutro superior ao limite estabelecido.

A presença de cargas desequilibradas e uma nova fonte de injeção de potência no circuito, fez com que a corrente de desequilíbrio que antes retornava exclusivamente para a subestação, agora, também fluía, através do transformador de acoplamento, por um novo caminho, onde essa corrente se dividia entra a fonte primária, a subestação e a GD.

A circulação dessa corrente de desequilíbrio pelo transformador do acessante pode diminuir sua capacidade de descarregamento, ou ainda, reduzir sua vida útil, já que este será submetido sucessivamente a valores elevados de corrente em função de sua contribuição para a maioria das faltas no sistema com envolvimento de terra.

Figura 17 Medição Correntes ponto conexão da GD



Fonte: Acervo do autor.

As medições coletadas ao longo do circuito, demonstram conforme a Tabela 2, havia uma considerável circulação de corrente de neutro, isso, devido a predominância de ramais monofásicos no circuito.

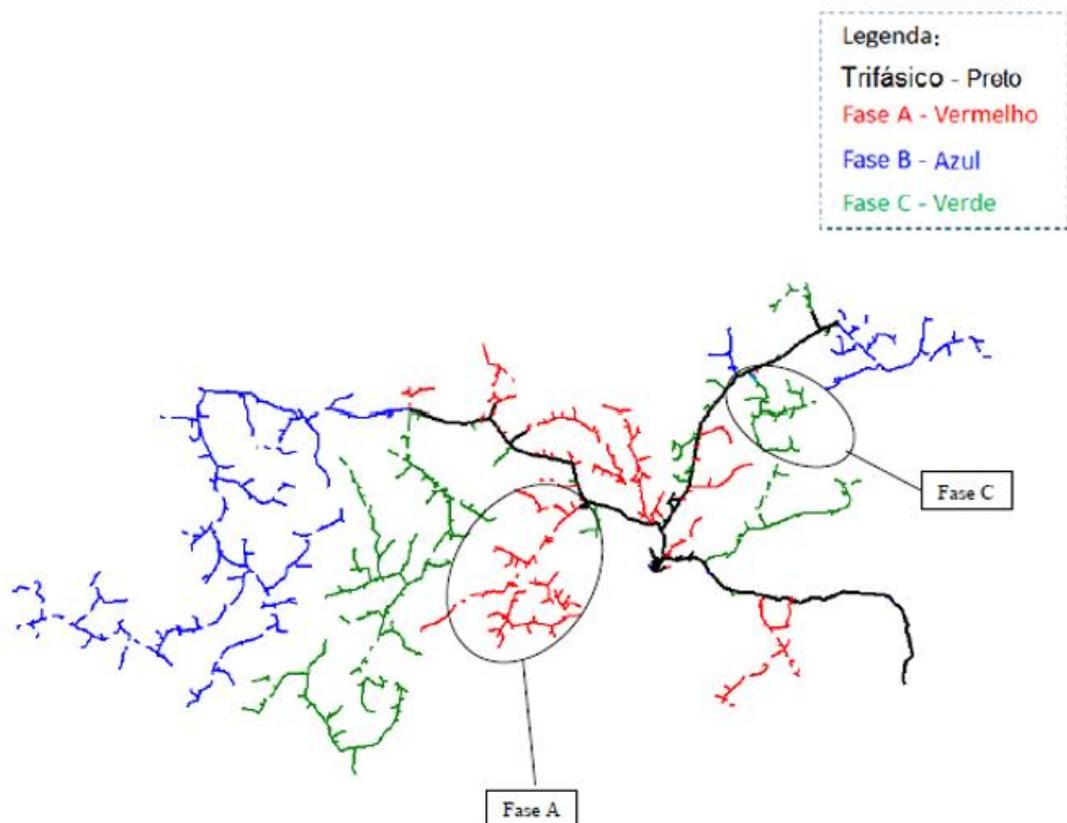
Tabela 2 Medição Circuito Antes Reequilíbrio

Equipamento	FASE			Neutro
	A	B	C	
DSV07	155	165	153	18
295045	142	161	147	24
74810	11	28	11	19

Fonte: Acervo do autor.

Para reduzir o nível de desequilíbrio se fez necessário o remanejamento de alguns circuitos monofásicos entre as fases, sendo um circuito da fase B para fase C e outro, da fase B para a fase A, aliviando o carregamento da fase B, conforme a Figura 18.

Figura 18 Alteração faseamento circuitos monofásicos



Fonte: Acervo do autor.

A alteração das fases dos circuitos monofásicos reduziu a corrente de neutro conforme a Tabela 3 Medição Após alteração faseamento Tabela 3, solucionando os problemas de operação da GD em função da característica original do circuito.

Tabela 3 Medição Após alteração faseamento

Equipamento	FASE A	FASE B	FASE C	Neutro
DSV07	160	156	157	3,6
295045	147	152	151	4,6
74810	16	23	11	10,4

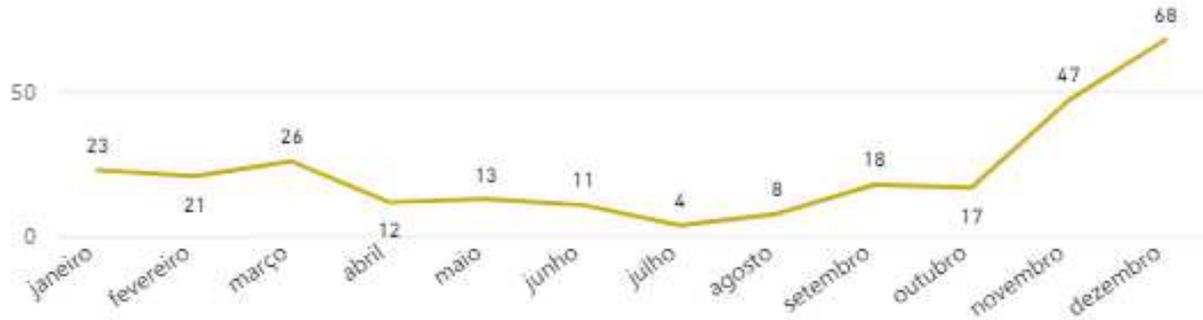
Fonte: Acervo do autor.

Há de se observar que mesmo com a redução do nível de desequilíbrio dos circuitos, ainda há a circulação da corrente de neutro, isso, em função das características das cargas instaladas no local.

5.2 INTERRUPÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA AO LONGO DO CIRCUITO

Com o início do período chuvoso, é natural o aumento do número de falhas no sistema elétrico em função das intempéries adversas ao sistema elétrico de potência, tais como descargas atmosféricas, ventos e chuvas, conforme Figura 19 .

Figura 19 Curva mensal da quantidade interrupções



Fonte: Acervo do autor.

Em condições normais de operação do sistema elétrico local, a GD não apresentava mais problemas em relação ao nível de corrente de neutro, todavia, a situação mudava sempre que havia a operação de alguma proteção de um ramal monofásico.

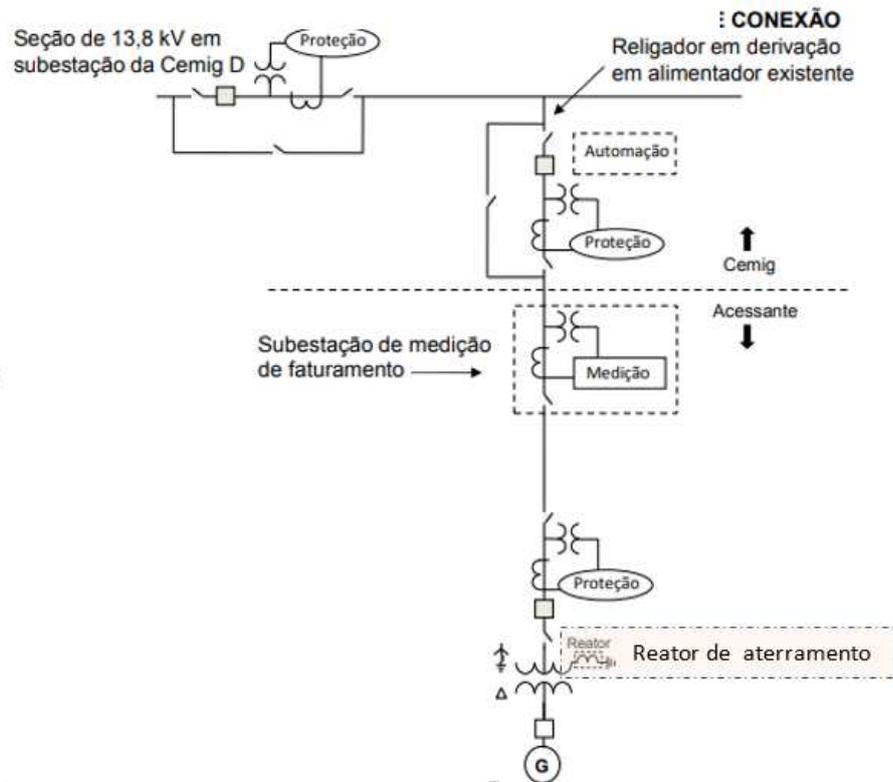
No caso de interrupção do fornecimento de energia em um dos ramos monofásico, a condição de circulação de corrente de neutro era alterada o que ocasionava na operação da proteção de GD pela proteção 51N.

Para mitigar a parada da GD por esse motivo, foi necessário alterar o ajuste de neutro da proteção da GD para 25 A até que uma solução definitiva fosse estudada e implementada.

5.3 SOLUÇÕES APLICADAS

Inicialmente foi estudada a utilização de um resistor de aterramento com objetivo de limitar a circulação de corrente de neutro proveniente do sistema elétrico para a GD, todavia foi adotada a utilização de um reator de aterramento para reduzir a circulação de corrente de neutro pelo sistema conforme mostrado na Figura 20.

Figura 20 Instalação reator aterramento



Fonte: Acervo do autor.

A Tabela 4 apresenta as principais características para dimensionamento de um reator de aterramento.

Tabela 4 Dimensionamento do reator de aterramento

Potência da geração e do transformador de acoplamento (kVA)	Dados do reator de aterramento (ligado no neutro do transformador de acoplamento)		
	Xreator (ohms)	Ineutral (A) Regime Permanente	Ineutral (A) Curta duração (10s)
<= 500	50,8	6,3	126
501 - 1000	25,4	12,6	251
1001 - 2000	12,7	25,1	502
2001 - 3000	8,5	37,7	753
3001 - 4000	7,1	50,2	1004
4001 - 5000	5,7	62,8	1255

A instalação do reator de aterramento reduziu o problema de circulação da corrente de neutro pelo circuito e permitiu o reajuste da proteção para condição inicial, eliminando as faltas motivadas pelas cargas desequilibradas.

Após a instalação do Reator não houve mais interrupções por circulação de corrente de neutro.

Para tanto, a utilização do reator de aterramento para casos onde há cargas desequilibradas é uma importante opção na mitigação as interferências entre os sistemas.

7 CONCLUSÃO

Levando-se em consideração todos os aspectos abordados ao longo do trabalho, a expansão do número de unidades consumidoras gerando sua própria energia, a potência dos sistemas tem promovido alterações na forma de fazer gestão do sistema elétrico.

A inserção de novas fontes de potência ao longo do sistema elétrico que possuem cargas desequilibradas exige cuidados para que não haja degradação do serviço prestado.

Para a redução do desequilíbrio das cargas podem ser adotados várias soluções, que vão desde o remanejamento de ramais monofásicos entre as fases do sistema trifásico, até mesmo a conversão desses circuitos para sistemas trifásicos. Neste contexto, observa-se que esse aspecto deve ser considerado no momento de se expandir o sistema de distribuição, evitando a utilização de circuitos monofásicos em áreas com alto potencial de construção de GDs.

Em relação à exposição do sistema de distribuição de energia, compostos quase que em sua totalidade de redes aéreas, as condições climáticas e sua influência na sazonalidade das falhas, que se acentuam nos períodos chuvosos, a utilização de proteções unipolares como as chaves fusíveis em ramais trifásicos também deve ser ponto de atenção, uma vez que a operação unipolar acentua ou mesmo cria uma situação de desequilíbrio das cargas.

A utilização de reatores de aterramento tem se mostrado uma solução interessante para os casos mais complexos, proporcionando, de certa forma, uma solução para reduzir esse problema, numa melhor relação de custo e benefício.

Por fim, a reorganização do sistema elétrico visando adequá-lo à inserção crescente de fontes de geração distribuída faz parte do processo evolutivo do setor, que deve buscar formas de minimizar seus impactos negativos e antecipar os problemas futuros, de forma não ocorra precarização dos índices de qualidade de energia.

REFERÊNCIAS

- AMDRO, Blog. Matriz Energética e o impacto ambiental, 2019. Disponível em: <<http://amdرو.blogspot.com/>>. Acesso em: 03 de set. de 2019.
- ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Geração Distribuída, Micro e Minigeração Distribuídas. ANEEL, 2018. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida/>>. Acesso em: 03 de set. de 2019.
- ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Resolução Normativa nº 482. ANEEL, 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 03 de set. de 2019.
- ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Resolução Normativa nº687. ANEEL, 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 05 de set. de 2019.
- ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Unidades consumidoras com geração distribuída. ANEEL, 2018. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp>. Acesso em: 03 de set. de 2019.
- BLUESOL, Energia Solar. Geração de Energia Solar: 3 Modalidades Que Você Talvez Não Conheça, 2018. Disponível em: <<https://blog.bluesol.com.br/geracao-de-energia-solar-3-modalidades/>>. Acesso em: 05 de set. de 2019.
- CEMIG. Norma de Distribuição N.D. 4.15 - Proteção de Sobrecorrentes do Sistema de Distribuição de Média Tensão da Cemig. Cemig, 2019. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Clientes/Documents/nd_4_15_000001p.pdf>. Acesso em: 10 de set. de 2019.
- CEMIG. Norma de Distribuição N.D. 5.31 - Requisitos para a conexão de Acessantes Produtores de Energia Elétrica ao Sistema de Distribuição Cemig – Conexão em Média Tensão. Cemig, 2019, Disponível em: <<https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Clientes/Documents/Normas%20T%C3%A9cnicas/ND.5.31.pdf>>. Acesso em: 10 de set. de 2019.
- GDIS, Gemini. Remoto Cemig, 2019. Disponível em: <<http://gemini-remoto/Citrix/cemigWeb/>>. Acesso em: 09 de out. de 2019.
- FONTES, Ruy. Geração Distribuída da ANEEL Avança com Energia Solar Fotovoltaica. BlueSol, Energia solar, 2018. Disponível em: <<https://blog.bluesol.com.br/geracao-distribuida-da-aneel/>>. Acesso em: 09 de out. de 2019.
- MAURIZIO. Equipamentos de qualidade, 2019. Disponível em: <<http://www.maurizio.com.br/>>. Acesso em: 23 de out. de 2019.
- PORTAL SOLAR. História da energia solar: como tudo começou, 2016. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/historia-da-energia-solar-como-tudo-comecou.html>>. Acesso em: 09 de out. de 2019.

POWER, Noja. O religador mais seguro do mundo, 2019. Disponível em: <<https://www.nojapower.com.br/>>. Acesso em: 09 de out. de 2019.

S&C. Eletric Company. Disponível em: <<https://www.sandc.com/>>. Acesso em: 09 de out. de 2019.

TECFUSE. Tecnologia por um fio, 2019. Disponível em: <<http://www.tecfuse.com.br/>>. Acesso em: 09 de out. de 2019.

TSEA, Energy. Solução Completa. Disponível em: <https://www.tseaenergia.com.br>. Acesso em: 15 de out. de 2019.

APÊNDICES

1. DADOS GERAIS SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Desde 17 de abril de 2012, quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada, inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade. Trata-se da micro e da minigeração distribuídas de energia elétrica.

Predominantemente baseada em fontes de energia renováveis, as principais fontes utilizadas na geração distribuída são:

A Energia Solar Fotovoltaica: é a energia obtida pela transformação da radiação solar diretamente em energia elétrica solar por meio das células fotovoltaicas, as quais compõem os módulos, ou placas fotovoltaicas, que ficam expostos a luz do sol.

A Energia Solar Heliotérmica ou Energia Solar Térmica Concentrada: Essa tecnologia, restrita ao segmento de geração centralizada devido ao tamanho do projeto demandando, utiliza um grande número de espelhos coletores que refletem, de forma concentrada, a luz do sol a um ponto específico de uma grande torre central, aquecendo a altas temperaturas materiais específicos que com sua expansão ou vaporização, movimentam turbinas que geram a energia elétrica.

Energia Eólica: é a energia obtida através da força dos ventos, na qual hélices com duas ou três pás são fixadas no topo de altas torres e são giram conforme a intensidade dos ventos, gerando energia através da força motriz gerada nas turbinas. Essa tecnologia, que também permite a geração pelo próprio consumidor através de micro torres eólicas, é de uso mais restrito devido à sua menor disponibilidade.

A Energia Hídrica: é a fonte mais utilizada ainda no Brasil, através das grandes usinas hidrelétricas espalhadas pelo país. A geração de energia nessa tecnologia acontece graças a movimentação de grandes turbinas pela força das águas que são represadas dos rios e liberadas conforme a necessidade de geração.

A Biomassa: é a geração através da queima de materiais orgânicos, como o bagaço da cana-de-açúcar, mais comum no Brasil, ou também o álcool, madeira, palha de arroz, óleos vegetais, entre outros. Embora a queima desses materiais libere gases poluentes na atmosfera, ela é considerada uma forma limpa de geração devido ao fato dessa quantidade de CO₂ ser absorvida no cultivo desses materiais, zerando os impactos ambientais.

A Figura 21 demonstra o mecanismo de funcionamento da geração distribuída de energia e interfaces entre a geração, distribuição e consumo.

Figura 21 Mapa da geração distribuída



Fonte: Bluesol (2019).

A partir de março de 2016, através da Resolução Normativa 685, é permitido o uso de qualquer fonte renovável, além da cogeração qualificada, denominando-se microgeração distribuída a central geradora com potência instalada até 75 quilowatts (kW) e minigeração distribuída aquela com potência acima de 75 kW e menor ou igual a 5 MW, conectadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

Microgeração é o sistema gerador de energia elétrica através de fontes renováveis, com potência instalada inferior ou igual a 75 kW (quilowatts), enquanto a minigeração é o sistema gerador de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW (para fonte hídrica) e menor ou igual a 5 MW para as demais fontes renováveis (Solar, eólica, biomassa e cogeração qualificada).

Entre as várias melhorias trazidas pelas novas regras, que entraram em vigor em 1 de março de 2016 destacam-se:

- Diminuição da potência máxima de microgeração (sistemas menores, como residências) de 100kW para 75 kW para se adequar a baixa tensão e ampliação da potência máxima de minigeração (pequenas e médias usinas) de 1 MW para 5 MW;
- Aumento na data de validade dos créditos energéticos, ou seja, a energia excedente produzida através da geração de energia solar, e que é direcionada como empréstimo à rede da concessionária, poderá ser utilizada por até 60 meses (5 anos);
- Redução no prazo da solicitação de acesso para: 34 dias (microgeração) e 49 dias (minigeração) distribuída, desde que não haja nenhuma adequação ou pendência, além da padronização e melhoria do processo da solicitação;
- O custo da troca do medidor para microgeração fica por conta da concessionária e o custo para minigeração fica por conta do acessante (que faz a solicitação de acesso), devendo esse ressarcir a distribuidora;
- Definição de 3 modalidades de geração de energia para o sistema de compensação de energia elétrica. Conheça abaixo

2. EMPREENDIMENTO COM MÚLTIPLAS UNIDADES CONSUMIDORAS

Essa modalidade é caracterizada pela utilização da energia elétrica de forma independente, na qual cada fração com uso individualizado é constituída por uma unidade consumidora.

As instalações para atendimento das áreas de uso comum constituem uma unidade consumidora distinta, de responsabilidade do condomínio, da administração ou do proprietário do empreendimento, com microgeração ou minigeração distribuída.

Também é necessário que as unidades consumidoras estejam localizadas em uma mesma propriedade ou em propriedades contíguas, sendo vedada a utilização de vias públicas, de passagem aérea ou subterrânea e de propriedades de terceiros não integrantes do empreendimento.

Um bom exemplo são moradores de prédios residenciais ou comerciais (empreendimentos verticais com múltiplas unidades consumidoras) que instalam um sistema fotovoltaico no telhado da cobertura ou no estacionamento conforme ilustrado na Figura 22, gerando energia solar para os apartamentos ou salas comerciais e área comum).

Figura 22 Múltiplas unidades consumidoras abastecidas pelo mesmo sistema



Fonte: Bluesol (2018).

É observado na Figura 22, a instalação de placas fotovoltaicas na cobertura de um prédio com o objetivo de gerar energia elétrica para múltiplas unidades consumidoras residentes no edifício.

3. GERAÇÃO COMPARTILHADA

A geração compartilhada é caracterizada pela reunião de consumidores, dentro da mesma área de concessão ou permissão, por meio de consórcio ou cooperativa, composta por pessoa física ou jurídica, que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada, como por exemplo moradores de um prédio residencial, comercial ou grupo de lojistas, os quais não tem área para instalar um sistema fotovoltaico para a geração de energia solar em todos os apartamentos, casas, salas ou lojas, e instalam um sistema num terreno em local distinto (como uma sítio na zona rural, por exemplo) e a energia será compensada nas devidas unidades consumidoras dos apartamentos. A Figura 23 mostra um sistema fotovoltaico fora do ponto de consumo.

Figura 23 Sistema Fotovoltaico fora do ponto de consumo



Fonte: AMDRO (2019).

A instalação desse sistema em áreas rurais tem sido muito comum em função da disponibilidade de área e pouco sombreamento.

4. AUTOCONSUMO REMOTO

Por fim, essa modalidade de geração de energia solar é caracterizada por unidades consumidoras de titularidade de uma mesma Pessoa Jurídica, incluídas matriz e filial, ou Pessoa Física, que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras, dentro da mesma área de concessão ou permissão, nas quais a energia excedente será compensada, como ilustra na Figura 24.

Figura 24 Autoconsumo remoto



Fonte: Bluesol (2018).

O esquema ilustra a situação onde o consumidor instala o sistema solar fotovoltaico em uma local diferente do ponto de consumo, desde que ambos os imóveis sejam de sua propriedade.

5. EVOLUÇÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

De acordo com a Aneel (ANEEL, 2019) havia em 09/2019, 116.206 unidades consumidoras com geração distribuída, sendo a energia solar fotovoltaica a de maior quantidade e de potência instalada. A Tabela 5 apresenta os quantitativos conforme a modalidade de geração.

Tabela 5 Unidades Consumidoras com Geração Distribuídas

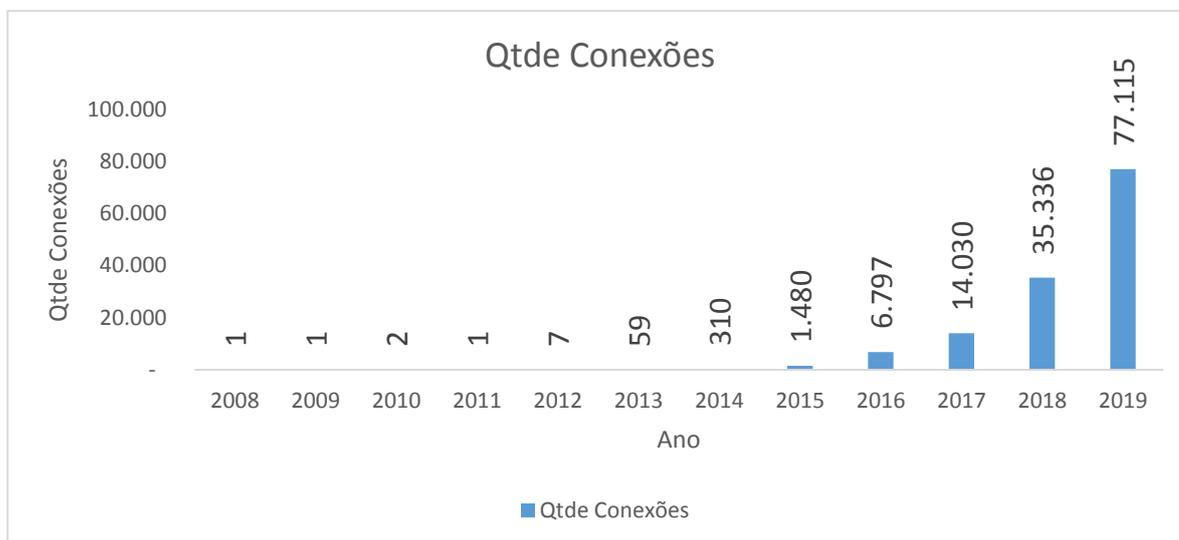
UNIDADES CONSUMIDORAS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA			
Tipo	Quantidade	Quantidade de UCs que recebem os créditos	Potência Instalada (kW)
CGH	94	7.703	88.822,60
EOL	60	104	10.360,86
UFV	115.874	145.790	1.261.338,19
UTE	178	3.942	49.048,34

Fonte: ANEEL (2018).

A evolução da quantidade de conexões está diretamente ligada com as alterações das resoluções ocorridas nos últimos anos, resultando em uma conexão em 2007 para 58.282 em 09/10/2019

(ANEEL, Agencial Nacional Energia Elétrica, 2019). A seguir a Figura 25 demonstra a evolução anual do número de conexões realizadas.

Figura 25 Evolução da quantidade conexões GD



Fonte: ANEEL (2018).

A evolução do número de conexões demonstra uma forte tendência de crescimento futuro, que pode ser potencializada pelo aquecimento da economia.