

BRUNA SILVA PRATES

**Estudo de caso sobre os impactos na qualidade de energia da distribuidora
causados pela conexão de uma central geradora em minigeração distribuída na
área de concessão da Enel Distribuição SP**

São Paulo
2019

BRUNA SILVA PRATES

**Estudo de caso sobre os impactos na qualidade de energia da distribuidora
causados pela conexão de uma central geradora em minigeração distribuída
na área de concessão da Enel Distribuição SP**

Monografia

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como forma de avaliação do Curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Orientador: Prof. MSc. Álvaro Nakano

São Paulo

2019

FICHA DE APROVAÇÃO

Nome: **PRATES, Bruna Silva**

Título: **Estudo de caso sobre os impactos na qualidade de energia da distribuidora causados pela conexão de uma central geradora em minigeração distribuída na área de concessão da Enel Distribuição SP**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. MSc. Álvaro Nakano

Instituição: Escola Politécnica da USP

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. José Roberto Simões Moreira

Instituição: Escola Politécnica da USP

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. Claudio Roberto F. Pacheco

Instituição: Escola Politécnica da USP

Julgamento: _____ Assinatura: _____

BRUNA SILVA PRATES

**Estudo de caso sobre os impactos na qualidade de energia da distribuidora
causados pela conexão de uma central geradora em minigeração distribuída
na área de concessão da Enel Distribuição SP**

Monografia

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como forma de avaliação do Curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Área de concentração: Geração Distribuída de Energia

Orientador: Prof. MSc. Álvaro Nakano

São Paulo

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na publicação

PRATES, BRUNA

Estudo de caso sobre os impactos na qualidade de energia da distribuidora causados pela conexão de uma central geradora em minigeração distribuída na área de concessão da Enel Distribuição SP / B. PRATES -- São Paulo, 2019.

59 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.Geração Distribuída 2.Minigeração 3.Parâmetros de Tensão 4.Impactos na Rede de Distribuição 5.Qualidade de energia I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais e a todos que acreditaram
que a conclusão deste trabalho seria possível.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre estar presente em minha vida e por me ajudar na conclusão desta monografia.

Agradeço principalmente aos meus pais, Liordaque e Maria de Lourdes, pelo amor e apoio incondicional, não medindo esforços para que eu concluísse mais esta etapa da minha vida profissional.

Aos Professores do curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética, que contribuíram para o meu desenvolvimento intelectual.

Ao Professor MSc. Álvaro Nakano por todo apoio, atenção e disponibilidade durante o processo de orientação.

Aos amigos da Enel Distribuição São Paulo, Wheslei De Paula Ribeiro, Sidval Lima de Barros e Rodolpho Nogueira De Sousa pela ajuda sincera e pela troca de conhecimentos técnicos, ideias, correções e incentivos durante todo o desenvolvimento desta monografia.

EPIÍGRAFE

“Determinação, coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso. Se estamos possuídos por uma inabalável determinação conseguiremos superá-los. Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho.”

(Dalai Lama)

RESUMO

PRATES, BRUNA SILVA. Estudo de caso sobre os impactos na qualidade de energia da distribuidora causados pela conexão de uma central geradora em minigeração distribuída na área de concessão da Enel Distribuição São Paulo. 2019.58f. Trabalho de avaliação (Curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) – Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

Os incentivos a geração distribuída se justificam principalmente pelo baixo impacto ambiental, pela diversificação da matriz de energia elétrica e pelos benefícios da produção de energia elétrica mais próxima ao consumidor. Entretanto, o paralelismo das unidades de geração distribuída ao sistema elétrico, pode gerar impactos na rede de distribuição no que diz respeito à qualidade da energia. Sendo assim, este trabalho analisa os impactos na qualidade de energia da rede de distribuição de média tensão (13,8kV) da concessionária Enel Distribuição São Paulo na região de Santana do Parnaíba, causado pela conexão de uma central geradora com potência de 4,27 MW. Como um estudo inicial sobre o assunto, o conteúdo deste trabalho se limitou aos parâmetros de tensão, e suas funções de proteção relacionadas. O desenvolvimento se baseou nas características do perfil de consumo do acessante, bem como nos registros de grandezas elétricas medidos na rede de distribuição por um período de aproximadamente um mês, e obtidos por meio do programa computacional Shappire, via interface gráfica do Elspec Investigator. As conclusões neste estudo de caso possibilitaram visualizar os impactos ocasionados da geração distribuída, no que tange a tensão, na rede de distribuição da concessionária, e visa contribuir no planejamento das concessionárias no sentido de mitigar tais problemas e preservar a qualidade da energia da rede.

Palavras-chave: Geração Distribuída. Minigeração. Parâmetros de Tensão. Impactos na Rede de Distribuição. Qualidade de energia.

ABSTRACT

PRATES, BRUNA SILVA. *Case study about the impacts on energy quality of the electric power grid caused by the connection of a distributed minigeneration plant located in the concession area of Enel Distribuição São Paulo*. 2019.58f. Evaluation work (specialization course in renewable energy, Energy Efficiency and Distributed Generation) - Continuing Education Program of the Escola Politécnica of Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

The incentives for distributed generation are justified mainly by the low environmental impact, diversification of the electric power supply matrix and benefits from electricity generation closer to the consumer. However, the parallelism of the distributed generation units to the electric power system may generate impacts on the electric distribution grid related to the quality of energy. Therefore, this paper analyzes the impacts on the medium voltage distribution grid (13.8kV) located on the Enel Distribuição São Paulo area in Santana do Parnaíba, caused by the connection of a 4,27 MW power generating plant. As an initial study on the subject, the content of this work was limited to the voltage parameters and their related protection functions. The development was based on the characteristics of the consumption profile of the generating plant, as well as in the records of electrical quantities measured in the distribution grid in a period of approximately one month and obtained from the Shappire software and the graphic interface of the Elspec Investigator. The conclusions in this case study made it possible to visualize the impacts of the distributed generation, in terms of voltage, in the distribution grid of the power company and aims to contribute to the power company in order to mitigate such problems and to preserve the quality of the grid energy power.

Keywords: *Distributed generation. Minigeneration. Voltage Parameters. Impacts on the Distribution Grid. Power Quality.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 Estrutura Básica do Sistema Elétrico	21
Figura 4.2 Esquema de uma subestação	23
Figura 4.3 Diagrama Unifilar do Religador Automático	25
Figura 4.4 Gráfico da quantidade anual de conexões GD.....	26
Figura 4.5 Processamento do biogás desde a captação até a conexão com a rede de distribuição	27
4.6 Fusíveis e seus componentes	30
Figura 4.7 Fluxo esquemático da produção de resíduo pela sociedade até a conexão com a rede de distribuição	31
Figura 4.8 Localização da central geradora	35
Figura 4.9 Perfil da demanda contratada e energia injetada da unidade consumidora geradora.....	36
Figura 4.10 Diagrama da central geradora.....	37
Figura 4.11 Diagrama Unifilar Simplificado da conexão da geração	38
Figura 4.12 Medição no ponto de conexão do cliente - Primeiro Cenário	40
Figura 4.13 Medição no ponto de conexão do cliente - Segundo Cenário	43
Figura 4.14 Medição no ponto de conexão do cliente - Terceiro Cenário	45
Figura 5.1 Gráfico dos percentuais máximos e mínimos de desequilíbrio de tensão	48
Figura 5.2 Gráfico Nível de Tensão no momento de operação da central geradora .	49
Figura 5.3 Gráfico dos valores mínimos e máximos de frequência	51
Figura 5.4 Fator de Potência - Primeiro Cenário	52
Figura 5.5 Fator de Potência - Segundo Cenário	52
Figura 5.6 Fator de Potência - Terceiro Cenário	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1kV e inferior a 69kV	32
Tabela 4.2 Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)	33
Tabela 5.1 Percentuais máximos e mínimos de desequilíbrio de tensão	47
Tabela 5.2 Nível de Tensão no momento de operação da central geradora.....	49
Tabela 5.3 Valores mínimos e máximos de frequência.....	51

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 4.1 Fator de Potência.....	33
Equação 4.2 Cálculo desequilíbrio de tensão	34

LISTA DE SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

AT - Alta Tensão

BT - Baixa Tensão

CA - Corrente Alternada

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

ETD – Estação Transformadora de Distribuição

GC - Geração Centralizada

GD - Geração Distribuída

GWh - Gigawatts-hora

KW - Quilowatts

MT - Média Tensão

MW - Megawatts

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

RA – Religador Automático

RSU – Resíduo Sólido Urbano

UCs - Unidades Consumidoras

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVO GERAL	19
2.1	Objetivos Específicos	19
3	METODOLOGIA	20
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
4.1	Conceitos Fundamentais.....	21
4.1.1	Funcionamento do Sistema Elétrico	21
4.1.1.1	Subestação	23
4.1.1.2	Rede primária.....	24
4.1.1.3	Rede secundária	24
4.1.1.4	Religadores Automáticos	24
4.1.2	Geração Distribuída.....	25
4.1.3	Usina de Biogás.....	26
4.1.4	Demanda de energia	27
4.1.5	Demanda contratada	28
4.1.6	Subestação de Entrada de Energia	28
4.1.6.1	Transformadores de Corrente	28
4.1.6.2	Transformadores de Tensão	28
4.1.6.3	Chaves seccionadoras.....	29
4.1.6.4	Relés.....	29
4.1.6.5	Disjuntores	29
4.1.6.6	Fusível.....	30
4.1.6.7	Transformadores.....	30
4.1.7	Conexão da Usina de Biogás com a Rede de Distribuição	31

4.1.8	Padrões de Qualidade da Energia Elétrica.....	32
4.2	Estudo de Caso.....	34
4.2.1	Localização.....	35
4.2.2	Composição do sistema	36
4.2.3	Análise das Medições.....	39
4.2.3.1	Primeiro cenário	39
4.2.3.2	Segundo cenário	42
4.2.3.3	Terceiro cenário	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1	Desequilíbrio de Tensão	47
5.2	Tensão em regime permanente	48
5.3	Frequência	50
5.4	Fator de Potência.....	51
6	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1 INTRODUÇÃO

A geração distribuída (GD) ou comumente também chamada de geração descentralizada, pode ser definida como uma fonte de geração para consumo próprio ou conectada diretamente na rede de distribuição (ACKERMANN; GÖRAN; SÖDER, 2001).

O fato de o consumidor conectar-se com a rede de distribuição, consumindo a energia gerada localmente, promove a garantia de suprimento de energia. Entretanto, a grande maioria dos consumidores finais da energia proveniente da GD, são os próprios consumidores mais próximos. Apesar desta fonte de geração de energia, proporcionar a conexão às redes de distribuição de energia, é errôneo afirmar que elas se encontram interligadas ao Sistema de Energia Elétrica, pois sua operação não depende das regras de despacho do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (WRIGHT; CARVALHO; SPERS, 2009).

Conforme Balanço Energético Nacional 2018, ano base 2017, divulgado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) a micro e minigeração distribuída atingiu 359,15 Gigawatts-hora (GWh) com uma potência instalada de 246,1 Megawatts (MW).

Dentre as vantagens da GD, se destacam a postergação de investimentos em expansão nos sistemas de distribuição e transmissão; o baixo impacto ambiental e a diversificação da matriz energética (BARBOSA; AZEVEDO, 2013). No âmbito das desvantagens, destacam-se o aumento da complexidade de operação da rede, pois o fluxo de energia então será bidirecional e a necessidade de alteração dos procedimentos das distribuidoras para operar, controlar e proteger a rede, devido à dificuldade de controlar a tensão no período de carga leve, a distorção harmônica, que poderá ser elevada e os níveis de curto-circuito das redes são alterados a (BARBOSA *et al.*, 2015). Os itens referenciados como impasses, podem interferir na qualidade da energia da rede, concebendo um desafio para prever e eliminar falhas.

As concessionárias de energia devem atender aos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), que tem por finalidade, garantir que os sistemas de distribuição operem com segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade. O módulo 8 do PRODIST - Qualidade da

energia especifica limites como tensão, fator de potência e frequência, de modo a assegurar os indicadores previamente estabelecidos.

Os problemas relacionados à qualidade da energia, especificamente relacionados à tensão, foram analisados neste trabalho com base em um estudo de caso de uma indústria, localizada na região de Santana de Parnaíba, com exportação máxima de 4,27 MW para a rede de distribuição de energia de média tensão (13,8kV) pertencente à área de concessão da Enel Distribuição de São Paulo, onde foi possível notar os impactos nos níveis das grandezas envolvidas ocasionados pela conexão da unidade geradora.

Para viabilizar a análise do estudo de caso desta monografia, foi utilizada a medição realizada na unidade consumidora geradora, compreendida entre o período de dezembro de 2016 e janeiro de 2017, através do software Shappire, via interface gráfica do Elspec Investigator.

2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo analisar os impactos na qualidade de energia da distribuidora, especificamente em tensão, causados pela conexão de uma central geradora, localizada na região de Santana de Parnaíba, com exportação máxima de 4,27 MW para a rede de distribuição de energia de média tensão (13,8kV) pertencente à área de concessão da Enel Distribuição São Paulo.

2.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste presente trabalho englobam:

- Avaliar os impactos na qualidade de energia da distribuidora, causados pela conexão de uma central geradora de minigeração distribuída, com geração máxima de 4,27 MW, localizada na região de Santana de Parnaíba, pertencente à área de concessão da Enel Distribuição São Paulo.
- Analisar os indicadores de qualidade da energia elétrica segundo o Módulo 8 do PRODIST: tensão em regime permanente, desequilíbrio de tensão, frequência e fator de potência.
- Analisar as medições da unidade geradora, realizadas durante o período de um mês, através do software Shappire, via interface gráfica do Elspec Investigator.
- Explanar sobre as possibilidades de ações para mitigar os eventuais problemas ocasionados em função da conexão de unidades consumidoras geradoras à rede de energia elétrica, dentro da abrangência deste trabalho.

3 METODOLOGIA

A etapa de preparação desta monografia foi desenvolvida conforme a seguinte metodologia:

- Estudo das regulamentações e normas técnicas que abrangem a minigeração distribuída: Módulo 3 do PRODIST; Módulo 8 do PRODIST e Resolução Normativa nº 687/2015 (revisão da Resolução Normativa nº 482/2012) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), além da consulta a Norma Técnica 6.012 - Requisitos Mínimos para Interligação de Microgeração e Minigeração Distribuída com a Rede de Distribuição da Enel Distribuição São Paulo com Paralelismo Permanente Através do Uso de Inversores - Consumidores de Alta, Média e Baixa Tensão da Enel Distribuição São Paulo (antiga Eletropaulo).
- Estudo de caso de uma indústria, localizada na região de Santana de Parnaíba, com exportação máxima de 4,27 MW para a rede de distribuição de energia elétrica de média tensão (13,8kV) pertencente à área de concessão da Enel Distribuição São Paulo, possibilitando acompanhar e analisar o impacto da injeção de energia excedente desta conexão de minigeração distribuída na rede de distribuição de energia elétrica.
- Análise crítica das medições realizadas na unidade consumidora geradora, pelo período de um mês, através do software Shappire, via interface gráfica do Elspec Investigator.
- Discursar sobre as conclusões obtidas através da análise do estudo de caso, sugerindo pesquisas e trabalhos futuros, que possam mitigar esses impactos na rede de distribuição de energia elétrica de média tensão (13,8kV).

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo desta revisão bibliográfica é contribuir para as construções teóricas, de modo a explanar sobre o funcionamento do sistema elétrico, bem como o funcionamento da geração distribuída, especificamente a minigeração, elencando os parâmetros elétricos que podem ser afetados devido à conexão desta central geradora na rede de distribuição de energia elétrica.

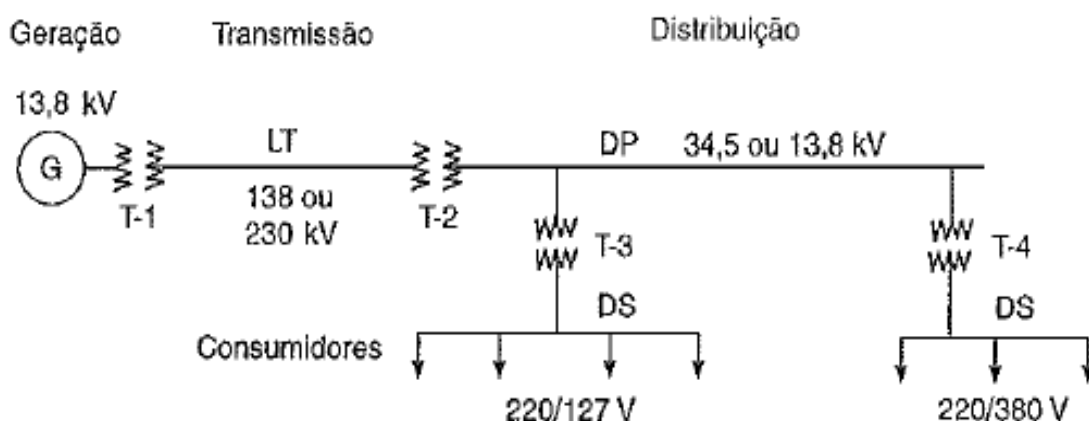
4.1 Conceitos Fundamentais

Neste capítulo, são abordados os conceitos fundamentais para análise do estudo de caso sobre os impactos na qualidade de energia da distribuidora causados pela conexão de uma central geradora em minigeração distribuída na área de concessão da Enel Distribuição São Paulo.

4.1.1 Funcionamento do Sistema Elétrico

O sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, compõe a estrutura básica do sistema elétrico (CREDER, 2007), conforme figura 4.1:

Figura 4.1 Estrutura Básica do Sistema Elétrico



Fonte: Creder (2007)

Onde:

G= Gerador de energia

T-1= Transformador elevador

LT= Linha de transmissão

T-2= Transformador abaixador (Subestação)

DP= Distribuição Primária (Rede primária)

T-3= Transformador de Distribuição indicado para instalações residenciais e comerciais

T-4= Transformador de Distribuição indicado para instalações industriais

DS= Distribuição secundária (Rede secundária)

A geração é o segmento responsável pela conversão de diversas fontes de energia primária em energia elétrica. Nos casos onde a localização da usina elétrica, se encontra distante da carga, a geração é denominada Geração Centralizada (GC), sendo necessária neste caso, a conexão às linhas de transmissão, que tem por finalidade interligar as usinas elétricas de geração aos grandes centros de consumo (REIS, 2017).

A distribuição é o setor responsável por receber a energia das empresas de transmissão e distribuí-las para os centros consumidores residenciais, comerciais e industriais (ABRADEE, 2018), com níveis de tensão de distribuição padronizados pelo PRODIST módulo 1 - Introdução e módulo 3 - Acesso ao Sistema de Distribuição:

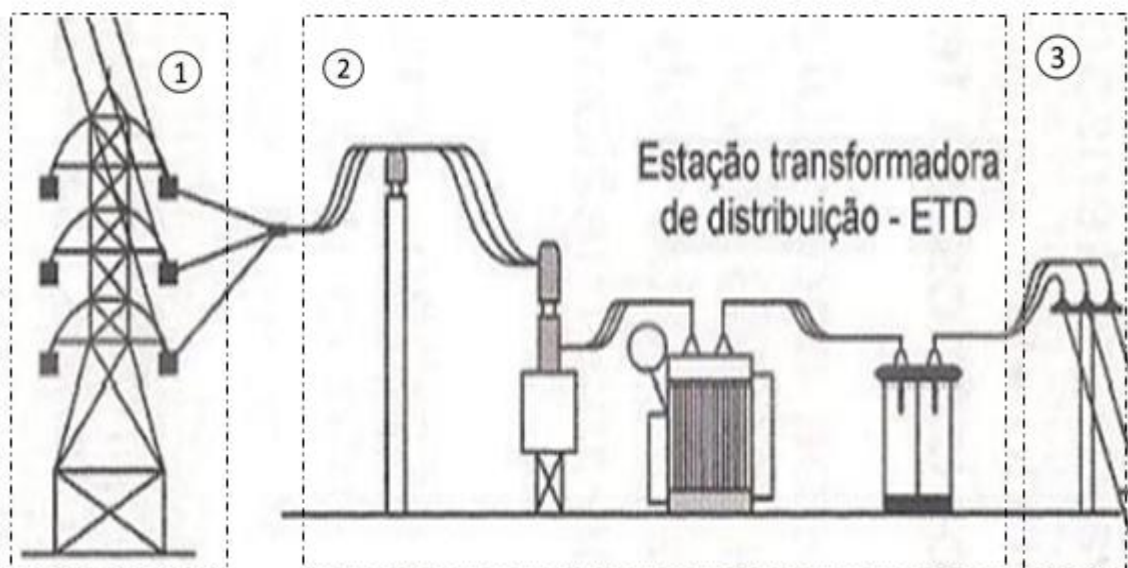
- Alta Tensão (AT): Tensão entre fases cujo valor eficaz é inferior a 230 kV e igual ou superior a 69 kV. Com valores padronizados de 138 kV e 69 kV;
- Média Tensão (MT): Tensão entre fases cujo valor eficaz é superior a 1 kV e inferior a 69 kV. Com valores padronizados em 34,5 kV e 13,8 kV;
- Baixa Tensão (BT): Tensão entre fases cujo valor eficaz é igual ou inferior a 1 kV. Com padronização no sistema trifásico de 380 V/220 V e 220 V/127 V e no sistema monofásico de 240 V/220 V e 120 V/127 V.

Este segmento é composto por subestações, rede primária, rede secundária, transformadores, religadores, dentre outros equipamentos. Os elementos envolvidos nesta revisão bibliográfica e no estudo de caso são detalhados a seguir:

4.1.1.1 Subestação

As subestações ou Estações Transformadoras de Distribuição (ETD) são responsáveis pela recepção da energia elétrica proveniente das linhas de transmissão (230kV) ou subtransmissão (69kV, 88kV e 138kV) e pelo rebaixamento do nível de tensão aos valores de média tensão (ABRADEE, 2018), conforme figura 4.2:

Figura 4.2 Esquema de uma subestação



Fonte: Adaptado IFES (2013)

O item 1 da figura 4.2 ilustra o esquema da conexão da linha de transmissão com a ETD, que tem por finalidade reduzir a tensão recebida através da linha de transmissão, conforme destacado no item 2, utilizando transformadores rebaixadores, para então se conectar a rede de distribuição conforme item 3.

4.1.1.2 Rede primária

1.1.A rede primária é composta por conjuntos de alimentadores urbanos de distribuição e seus ramais, que atendem aos consumidores primários e aos transformadores de distribuição, podendo ser aérea ou subterrânea (REIS, 2017). Os consumidores primários são caracterizados por: unidades consumidoras individuais, onde a carga total instalada é superior a 75 kW ou a demanda a ser contratada pelo interessado for igual ou inferior a 2.500 kW. Para demanda contratada superior a 2.500kW, o atendimento será em tensão primária de distribuição igual ou superior a 69 kV (ENEL DISTRIBUIÇÃO SÃO PAULO, 2011).

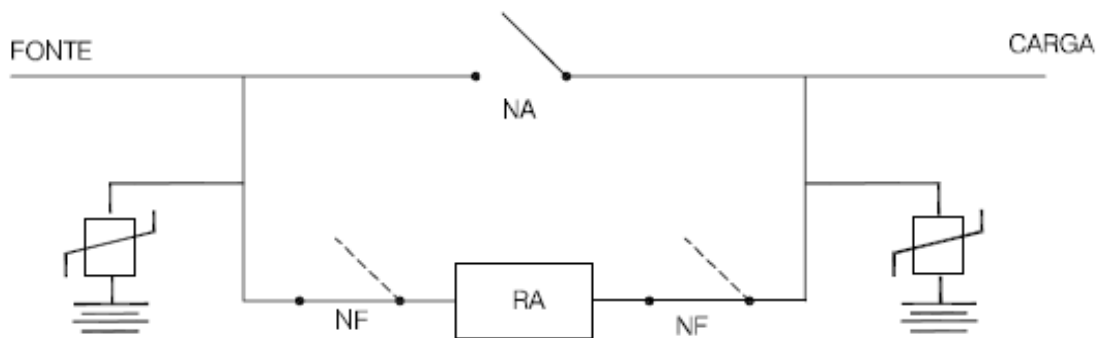
4.1.1.3 Rede secundária

A rede de distribuição secundária é responsável pela recepção de tensão rebaixada (entre 123V até 240V) pelos transformadores, com o intuito de percorrer pequenos trechos de rede para efetivar a conexão dos consumidores de baixa tensão (ABRADEE, 2018).

4.1.1.4 Religadores Automáticos

Os religadores automáticos (RA) são equipamentos de proteção contra sobrecorrentes utilizados em circuitos primários aéreos de distribuição, operando quando detecta correntes de curto-circuito, desligando e religando automaticamente os circuitos (ENEL DISTRIBUIÇÃO SÃO PAULO, 2000). A figura 4.3 ilustra o diagrama unifilar do religador:

Figura 4.3 Diagrama Unifilar do Religador Automático



Fonte: Enel Distribuição São Paulo (2000)

Quando o religador percebe uma condição de sobrecorrente, a circulação dessa corrente é interrompida pela abertura de seus contatos, indicados como NF conforme figura 4.3, sendo mantidos abertos durante o tempo de religamento, após o qual se fecham automaticamente para reenergização da linha. Se, no momento do fechamento dos contatos, a corrente persistir, a sequência abertura/fechamento é repetida até três vezes consecutivas e, após a quarta abertura, os contatos ficam abertos e travados. O novo fechamento só poderá ser realizado manualmente (ENEL DISTRIBUIÇÃO SÃO PAULO, 2004).

4.1.2 Geração Distribuída

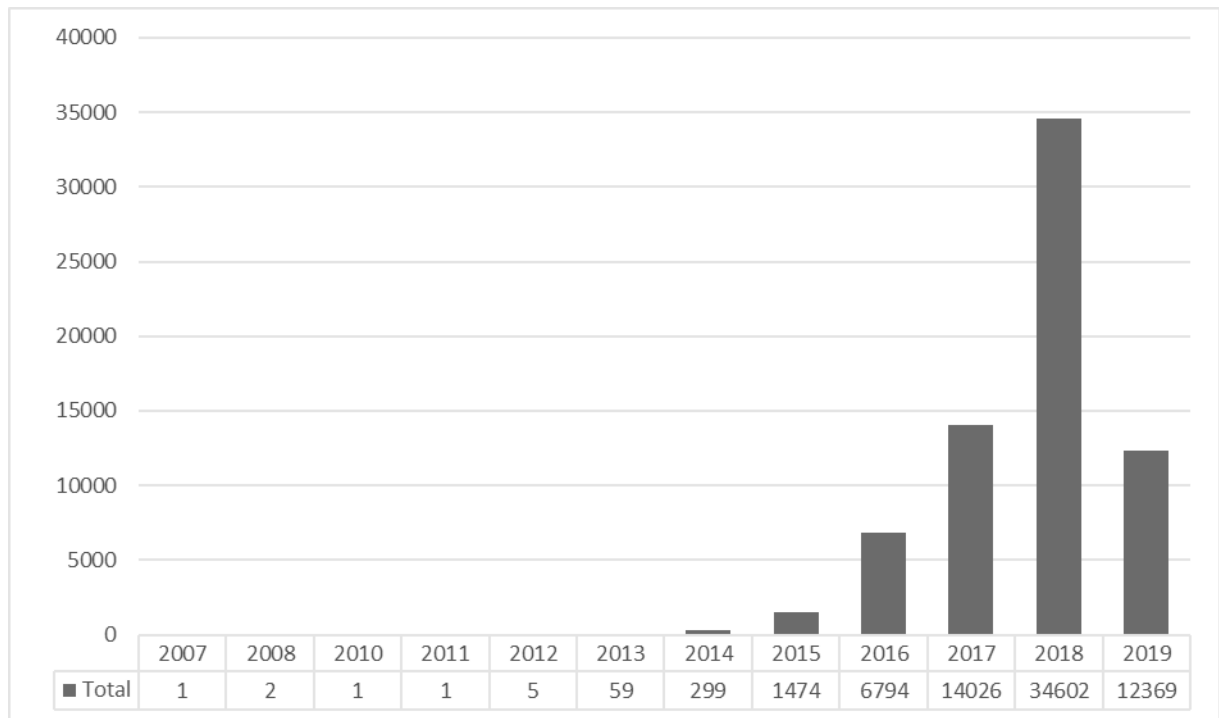
Há várias definições para a geração distribuída, porém segundo o Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE), geração distribuída é a geração de energia elétrica produzida próxima aos consumidores finais, independente da fonte energética ou da potência gerada.

Conforme Resolução Normativa N°687 da ANEEL, a geração distribuída pode ser classificada em microgeração distribuída, central geradora com potência instalada até 75 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.

Em consulta aos dados fornecidos pela ANEEL, pode-se observar após a publicação da resolução N°687, o número de solicitações de conexões de geração

distribuída está em crescente expansão por todo o país, conforme ilustrado pelo gráfico a seguir:

Figura 4.4 Gráfico da quantidade anual de conexões GD



Fonte: Adaptado da ANEEL (2019)

4.1.3 Usina de Biogás

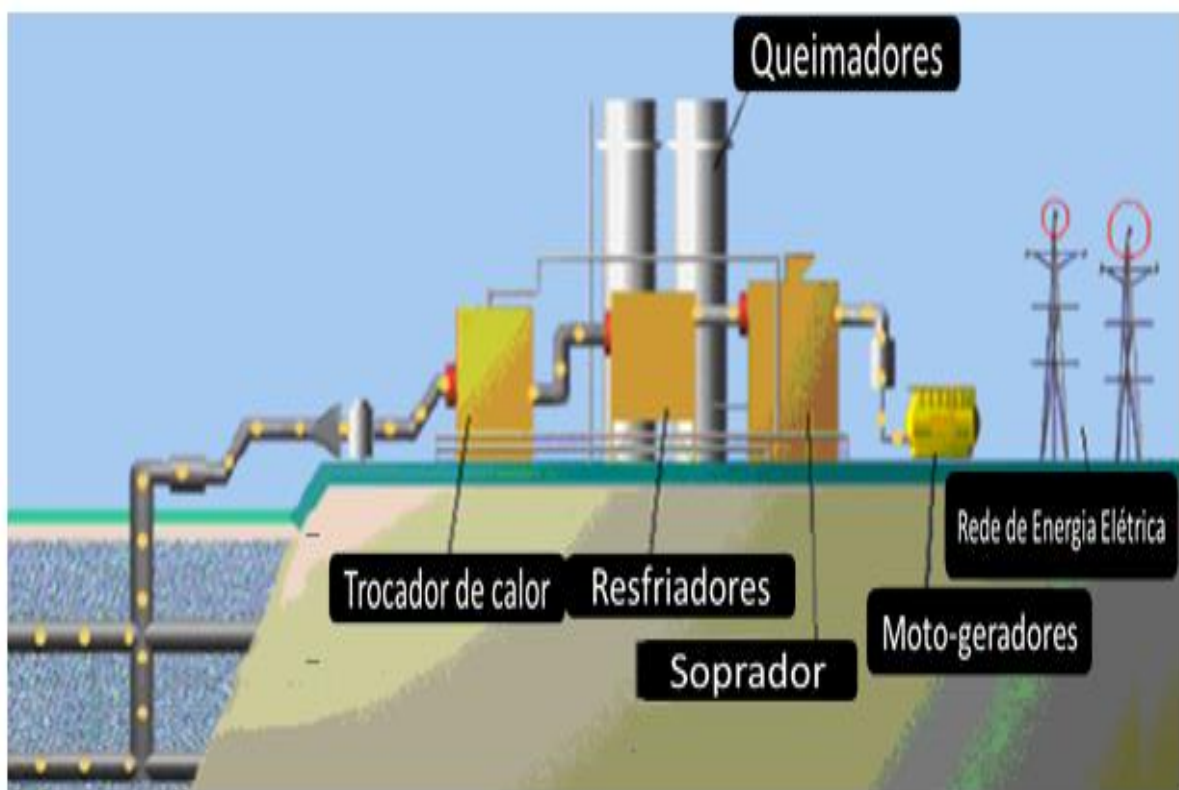
O biogás é obtido a partir da biomassa contida em dejetos e em esgotos, que passa naturalmente do estado sólido para o gasoso por meio da ação de microrganismos que decompõem a matéria orgânica em um ambiente anaeróbico (CETESB, 2019).

A utilização do lixo para produção de energia permite o uso deste gás, além da redução do volume dos dejetos em estado sólido. A geração de energia por esta fonte permite a redução dos gases causadores do efeito estufa e contribui para o combate à poluição do solo e dos lençóis freáticos (CCEE, 2019). A captação do biogás ocorre através dos drenos existentes até o coletor. A sucção é realizada pelos sopradores, fazendo com o que gás se encaminhe para os trocadores de calor e resfriadores (chiller), realizando a retirada da umidade e a pré-filtragem para então

seguir para o queimador de gás ou seguir para a geração de energia através do moto-gerador, conforme ilustração da figura 4.5 (JUSTI; MOLITERNO, 2008).

Pela Resolução Normativa nº 390/2009 da ANEEL, qualquer distribuidora de energia elétrica pode fazer chamadas públicas para comprar eletricidade produzida por biodigestores, os produtores poderão enviar a eletricidade para a linha de distribuição, em vez de somente consumir.

Figura 4.5 Processamento do biogás desde a captação até a conexão com a rede de distribuição



Fonte: JUSTI, MOLITERNO (2008)

4.1.4 Demanda de energia

É o resultado da divisão da média das potências elétricas solicitadas ao sistema elétrico pelo intervalo de tempo de medição (ANEEL , 2019).

4.1.5 Demanda contratada

É o valor da demanda obrigatória e continuamente disponibilizada pela concessionária, conforme valor e período de vigência do contrato. O valor contratado pelo consumidor deve ser pago à distribuidora, seja ou não utilizado durante o período de faturamento (ANEEL, 2019).

4.1.6 Subestação de Entrada de Energia

Comumente também chamada de cabine primária, é o padrão de entrada de energia para os consumidores atendidos em tensão primária de distribuição, destinado a alojar a medição e a proteção da unidade consumidora (ENEL DISTRIBUIÇÃO SÃO PAULO, 2011).

Os componentes que compõe a cabine são os transformadores, transformadores de corrente, transformadores de tensão, relés, chaves seccionadoras com fusível e disjuntores que serão explicados nos próximos tópicos:

4.1.6.1 Transformadores de Corrente

Transformador de corrente é um dispositivo que fornece correntes suficientemente reduzidas no circuito secundário e isoladas do circuito primário, de forma a possibilitar o seu uso por equipamentos de medição, controle e proteção (SANTOS, 2011).

4.1.6.2 Transformadores de Tensão

Transformador de tensão é um dispositivo usado principalmente para sistemas de medição de tensão elétrica, sendo capaz de reduzir a tensão do circuito para níveis compatíveis com a máxima suportável pelos instrumentos de medição (SANTOS, 2011).

4.1.6.3 Chaves seccionadoras

Chave seccionadora ou chave faca é um dispositivo destinado manobras e desligamento de distribuição primária. São instaladas em pontos estratégicos visando seccionar a rede para minimizar os efeitos das interrupções programadas ou não, estabelecer seccionamento visível em equipamentos como religadores automáticos (FILHO, 2002).

4.1.6.4 Relés

São dispositivos responsáveis pela garantia da qualidade de fornecimento de energia e da integridade de operação dos circuitos e equipamentos que vêm em seguida. As proteções podem ser classificadas na sua forma de sensibilização: pelas grandezas elétricas primárias e pelas grandezas secundárias. As grandezas elétricas são levadas aos dispositivos, então a proteção atua sobre os dispositivos de manobras dos equipamentos (FILHO, 2002).

Os relés de proteção podem ser primários (acionados diretamente pela corrente do circuito) e secundários (acionados pela imagem da corrente do circuito). O uso de transformadores de corrente é o caso típico do segundo tipo citado. A velocidade de atuação dessas proteções, assim como os níveis de sensibilidade, é definida pelos ajustes do equipamento, e seu monitoramento deve ser efetuado periodicamente como princípio de garantia da proteção das suas instalações e de seus operadores (FILHO, 2002).

4.1.6.5 Disjuntores

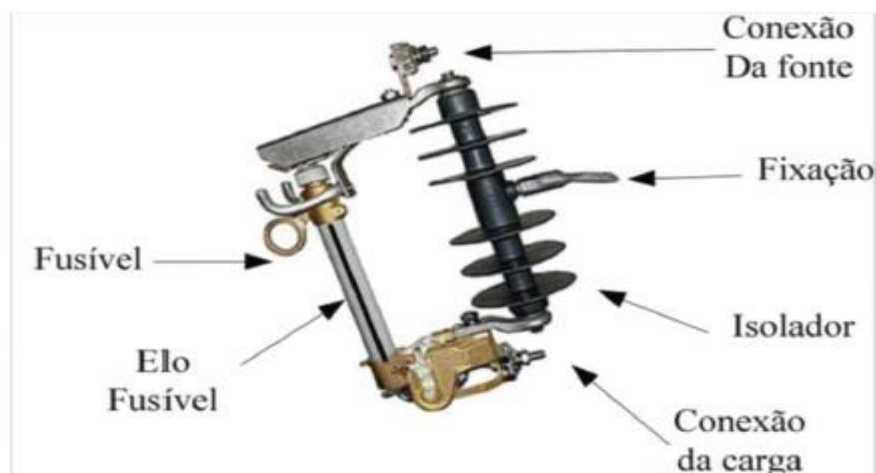
São equipamentos responsáveis pelas manobras de sistema, interrompendo ou restabelecendo a carga dos circuitos ou da instalação geral. Essas manobras são por conta de operação ou proteção contra defeitos. Estão sempre associados aos relés, pois caso contrário não passaria de simples poder de interrupção (FILHO, 2002).

Podem ter como seu meio isolante óleo, ar, vácuo, ou ainda gás hexafluoreto de enxofre (SF₆). Por serem de atuação muito rápida, possuem dispositivos de acúmulo de energia tipo mola, ou pistões para promover a mudança de estado de seus contatos (FILHO, 2002).

4.1.6.6 Fusível

Fusíveis são dispositivos de proteção, empregados para proteção contra curto-circuito e sobrecarga (FILHO, 2017). A figura 4.6 ilustra os componentes do fusível:

4.6 Fusíveis e seus componentes



Fonte: FILHO (2017)

Os fusíveis são constituídos por um condutor de seção reduzida (elo fusível) em relação aos condutores da instalação, montados em uma base de material isolante (FILHO, 2017).

4.1.6.7 Transformadores

Os transformadores são equipamentos responsáveis pela transformação de energia elétrica sob a forma de corrente alternada (CA), nas subestações de entrada

de energia, são utilizados para reduzir a tensão da rede primária, para a utilização da unidade consumidora em baixa tensão (FILHO, 2017).

4.1.7 Conexão da Usina de Biogás com a Rede de Distribuição

A geração de energia elétrica proveniente dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) é uma ótima alternativa, pois contribui para a redução do espaço necessário à deposição dos resíduos e como redutor de emissões de gases de efeito estufa (ARCADIS Tetraplan, 2010).

A principal dificuldade de implantação dos projetos de geração de energia em aterros sanitários é que, geralmente, os aterros são instalados longe dos centros urbanos, inviabilizando o projeto devido ao alto custo de instalação da transmissão desta energia para subestações de distribuição de energia (ARCADIS Tetraplan, 2010).

A central geradora em análise neste estudo de caso, é conectada diretamente à rede de distribuição, conforme figura 4.7:

Figura 4.7 Fluxo esquemático da produção de resíduo pela sociedade até a conexão com a rede de distribuição



Fonte: Própria autora

A figura 4.7 ilustra todo o processo de geração de energia em aterros sanitários, desde a produção dos resíduos até a conexão com a rede de distribuição.

A análise principal deste estudo de caso, será baseada na última etapa deste processo, que é a conexão desta central geradora com a rede de distribuição de energia elétrica.

4.1.8 Padrões de Qualidade da Energia Elétrica

O módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica do PRODIST, tem por finalidade padronizar os parâmetros de operação segura, garantindo a confiabilidade e continuidade do sistema elétrico. Os parâmetros relevantes para avaliação, perante o estudo de caso, conforme o PRODIST são:

- Tensão em regime permanente: estabelece os limites adequados para os níveis de tensão adotados pelas concessionárias:

Tabela 4.1 Pontos de conexão em Tensão Nominal superior a 1kV e inferior a 69kV

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

Fonte: PRODIST (2018)

Conforme tabela 4.1, para a tensão de atendimento ser classificada como adequada (TA), por exemplo, para uma tensão de referência de 13,2kV, os valores de tensão devem ser iguais ou superiores a 12,27 kV e menor ou igual a 13,86 kV. Para a classificação de precária, os valores devem estar na faixa de 11,88 kV e inferiores a 13,86 kV, por fim para a classificação crítica, os valores devem ser inferiores 11,88 kV ou superiores a 13,86kV.

- Fator de potência: deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00, tanto indutivo como capacitivo. O cálculo do fator de potência é obtido pela formula abaixo, onde P e Q são potência ativa e reativa, respectivamente:

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}; \quad (\text{Eq. 4.1})$$

- Harmônicos: são distorções nas formas de onda da tensão e corrente em relação à onda senoidal da frequência fundamental. Os valores de referência das distorções harmônicas totais estão listados na tabela 4.2:

Tabela 4.2 Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT _{95%}	10,0%	8,0%	5,0%
DTT _{p95%}	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _{i95%}	7,5%	6,0%	4,0%
DTT _{395%}	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: PRODIST (2018)

A tabela 4.2 apresenta o valor do indicador de distorção harmônica total de tensão (DTT%) que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas. Para o indicador DTT_{95%} os valores de tensão devem se enquadrar em 8%, por exemplo, para uma tensão nominal de 13,2 kV. Considerando a mesma tensão nominal, para o indicador de distorção harmônica total de tensão para os componentes pares não múltiplos de três (DTT_p), os valores de tensão devem se enquadrar em 2%, assim como, para o indicador de distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de três (DTT_i), os valores devem se enquadrar em 6%. Para o indicador de distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de três (DTT₃), os valores de tensão devem se enquadrar em 5%.

- Desequilíbrio de tensão: é a alteração dos padrões trifásicos do sistema. A porcentagem de desequilíbrio de tensão é calculada pela equação abaixo, com valor de referência igual ou inferior a 2%:

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} 100 \quad (\text{Eq. 4.1.82})$$

Onde:

V_- e V_+ são as magnitudes das tensões de sequência negativa e positiva, respectivamente.

- Flutuação de tensão: é uma variação irregular (aleatória) do valor eficaz da tensão, que causa o efeito de cintilação luminosa em determinados aparelhos utilizados pelos consumidores alimentados em baixa tensão;

- Variações de tensão de curta duração: são irregularidades (desvios) significativas no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo. Os afundamentos e elevações de tensão são tratados separadamente;

- Variação de frequência: para existir o equilíbrio carga-oferta, o sistema de distribuição deve operar em regime permanente dentro dos limites de 59,9 Hz e 60,1 Hz.

4.2 Estudo de Caso

A metodologia do estudo de caso possibilita disponibilizar respostas para as perguntas que surgem a partir dos fenômenos contidos no âmbito da vida real, sendo uma boa aplicação para analisar condições contextuais pertinentes ao fenômeno estudado (YIN, 2005).

O estudo de caso desta monografia corresponde à análise crítica das medições realizadas na unidade consumidora geradora, compreendida entre o

período de dezembro de 2016 e janeiro de 2017, através do software Shappire, via interface gráfica do Elspec Investigator.

4.2.1 Localização

O empreendimento estudado nesta monografia é uma indústria localizada no Estado de São Paulo, na região de Santana de Parnaíba conforme figura 4.8, que utiliza o biogás produzido pela biomassa de resíduo sólido urbano, como combustível para a geração de energia excedente.

Figura 4.8 Localização da central geradora



Fonte: Google Maps (2019)

4.2.2 Composição do sistema

Com o intuito de usufruir dos créditos do sistema de compensação de energia elétrica, a empresa promoveu a instalação de uma central geradora com potência nominal para exportação de 4,27 MW, se qualificando como minigeração distribuída conforme Resolução Normativa N°786 da ANEEL.

A demanda contratada pela unidade consumidora geradora é 4,078MW para ponta e fora de ponta, conforme figura 4.9 que ilustra a demanda contratada do cliente, em paralelo com a demanda injetada na rede de distribuição no período da análise do estudo de caso:

Figura 4.9 Perfil da demanda contratada e energia injetada da unidade consumidora geradora

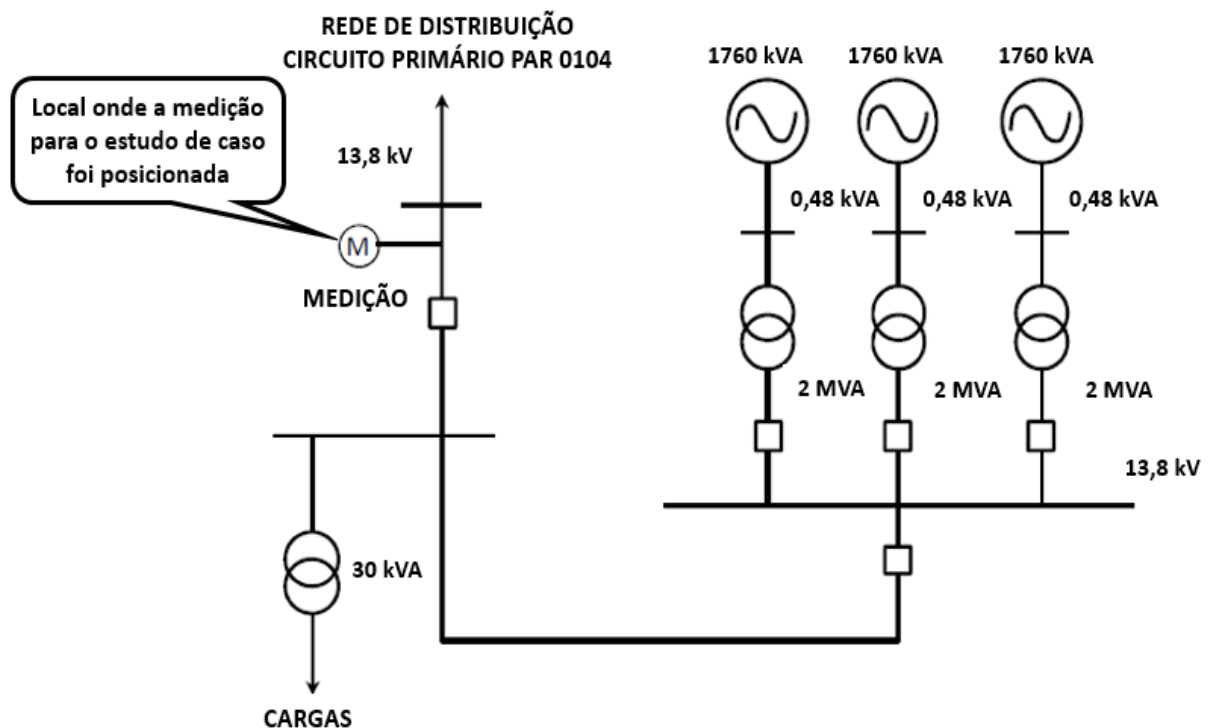


Fonte: Própria autora com dados do SGE (2019)

De acordo com o § 1º do art. 4º da Resolução Normativa nº 482/2012 e inciso LX, art. 2º da Resolução Normativa nº 414/2010, a potência instalada da minigeração distribuída limita-se à potência que o sistema elétrico da distribuidora deve dispor para atender aos equipamentos elétricos da unidade consumidora. A potência nominal da central geradora é superior à demanda contratada, o que é conflitante com a norma vigente. Entretanto, devido às perdas elétricas no sistema de geração de energia da unidade consumidora, pode-se observar que durante o período de medição, em nenhum momento a potência da geração ultrapassou a demanda contratada.

A central geradora em análise está em operação oficialmente desde junho de 2016, sendo composta por 3 geradores de 1,426 KW, totalizando uma potência nominal total de 4,27 MW, de acordo com a figura 4.10.

Figura 4.10 Diagrama da central geradora



Fonte: Própria Autora

Legenda:



Gerador



Transformador



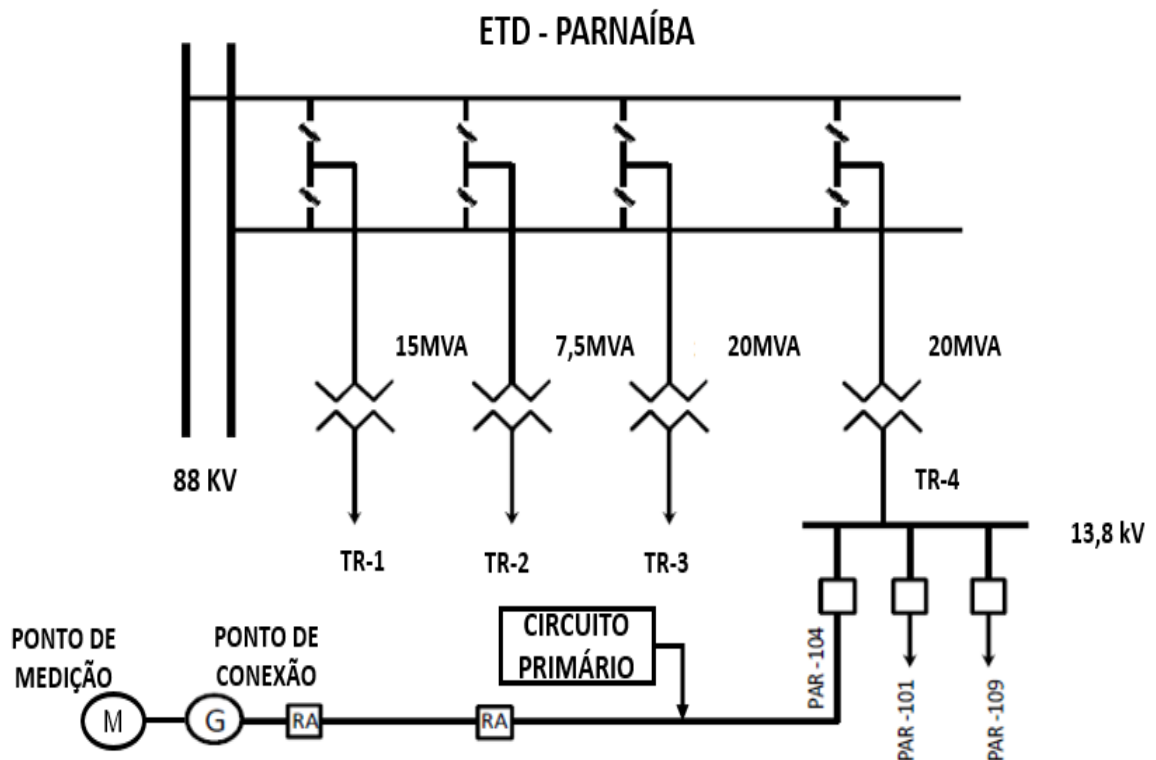
Medição



Proteção

O acessante está conectado na Estação Transformadora de Distribuição (ETD) Parnaíba, sendo alimentada pelo circuito PAR-0104, conforme diagrama unifilar simplificado ilustrado na figura 4.11 que caracteriza o ponto de conexão onde a medição de faturamento foi instalada:

Figura 4.11 Diagrama Unifilar Simplificado da conexão da geração



Fonte: Adaptado de Enel Distribuição São Paulo (2019)

A extensão do circuito primário PAR-0104 é de aproximadamente 30 Km, sendo composto por 91% de consumidores residenciais, 6% de consumidores comerciais e 1% de consumidores industriais. Há apenas o acessante deste estudo de caso, conectado neste circuito classificado como geração distribuída.

4.2.3 Análise das Medições

A unidade consumidora em questão foi monitorada no ponto de medição do acessante durante o período de dezembro de 2016 e janeiro de 2017, através do software Sapphire via interface gráfica do Investigator.

O sistema de medição é monitorado instantaneamente ciclo a ciclo, por meio do software Sapphire, registrando em memória de massa as grandezas e fornecendo dados sobre os parâmetros de tensão, corrente, frequência e potência. A interface gráfica ilustra as variações dos parâmetros medidos relacionados à qualidade de energia.

Durante o período de medição foi observado que ocorreram fenômenos de flutuação da tensão e variação de tensão de curta duração, porém em nenhum destes eventos foram ocasionados pela conexão ou o acionamento da geração do cliente. Os pontos críticos de qualidade de energia da medição, que se destacaram foram os referentes ao parâmetro da tensão, que foram analisados em dias específicos, onde a compreensão dos dados medidos foi evidenciada.

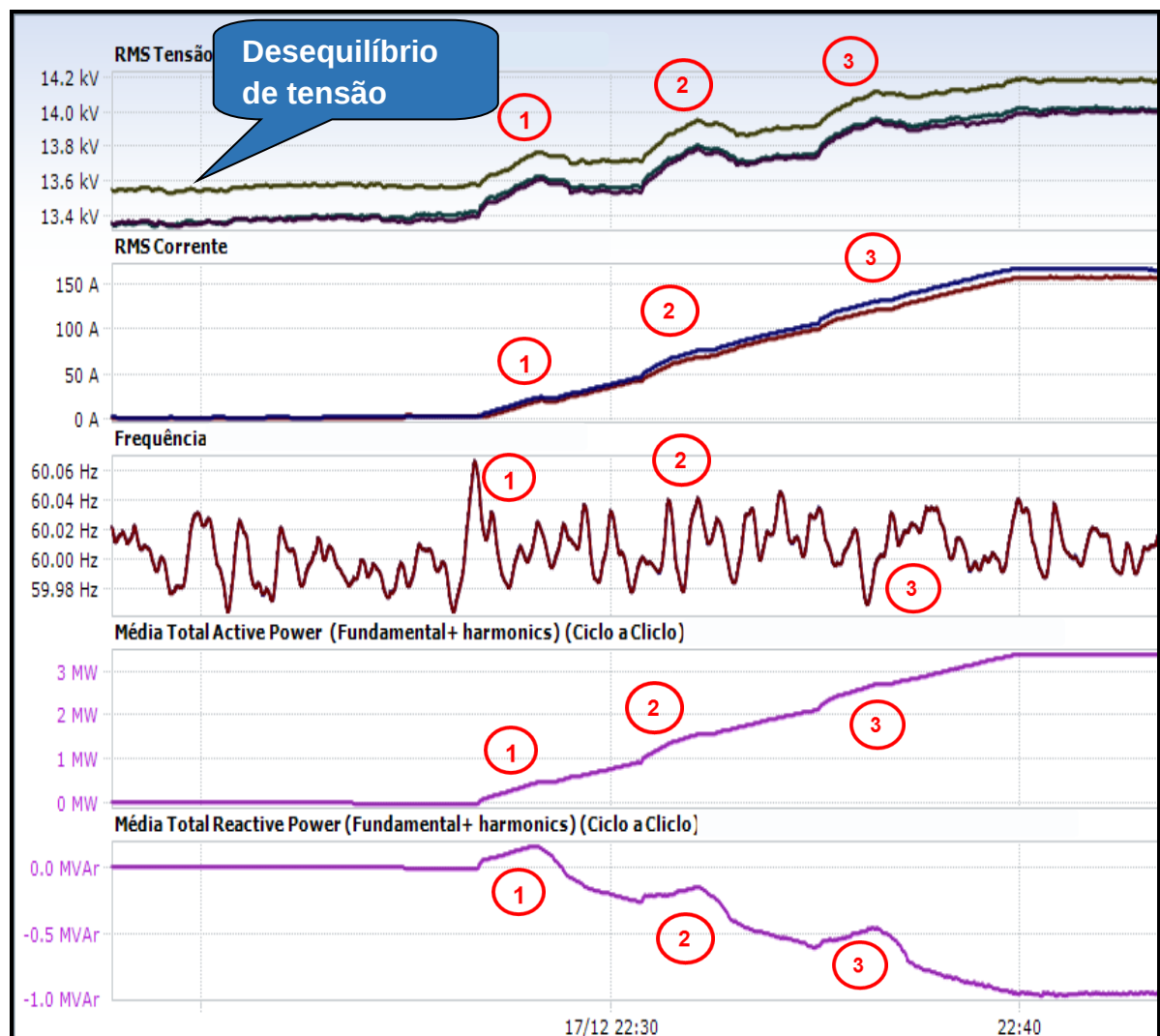
Através da extração dos dados obtidos na medição, foi possível destacar três cenários para a realização do estudo de caso, visando o comportamento do nível da tensão no momento de operação da central geradora.

4.2.3.1 Primeiro cenário

O primeiro cenário evidencia o momento em que a central geradora é reconectada a rede de distribuição, ilustrando nitidamente o comportamento da tensão. Este evento ocorreu no dia 17 de dezembro de 2016, onde houve um desligamento programado, para realização de obras no circuito primário PAR 0104. Para efetivar o desligamento, foi necessário desconectar um religador automático

instalado na rede aérea primária, seccionando trechos que deveriam ser desligados, afetando o atendimento de aproximadamente 788 consumidores, incluindo a unidade consumidora em questão. No momento em que o circuito primário é reestabelecido e a central geradora é conectada novamente à rede de distribuição iniciando o acionamento de todos os geradores, um por vez, retomando o processo de exportação de energia para a rede de distribuição novamente, é possível notar com nitidez que a cada gerador acionado, o nível tensão é elevado, chegando muito próximo ao valor de 14,2 kV, conforme figura 4.12:

Figura 4.12 Medição no ponto de conexão do cliente - Primeiro Cenário



Fonte: Investigator (2019)

O desequilíbrio de tensão foi oriundo do desequilíbrio de carga na rede de distribuição, prioritariamente é a própria carga ao longo do circuito PAR 0104, que está desbalanceada entre as fases primárias.

A figura 4.12 ilustra o momento do regime de desligamento do consumidor após a falta na rede de distribuição e o início do processo da reconexão do acessante, sendo possível avaliar que a central geradora é desligada, durante o momento que há falta na rede de distribuição, atendendo ao item 4 – Proteção da Norma Técnica – 6.012 Requisitos Mínimos para Interligação de Microgeração e Minigeração Distribuída, que prevê o desligamento da geração própria através do inversor e isolando a geração própria da rede de no máximo 2 segundos.

A NT – 6.012 também assegura que o inversor deve garantir o sincronismo da geração com a rede, evitando o ilhamento de geradores conectados ao sistema elétrico da Enel Distribuição São Paulo, pois não será permitido em hipótese alguma ao consumidor, energizar a rede da Enel Distribuição São Paulo, que estiver fora de operação, responsabilizando totalmente o consumidor tanto civilmente, quanto criminalmente.

No campo de potência reativa é possível visualizar o momento em que os três geradores do acessante são acionados, pois para o pleno funcionamento do gerador, é demandada certa quantidade de energia reativa para magnetizar as bobinas de saída deste equipamento, efetuando a criação do fluxo magnético. Quando os valores de potência reativa são negativos, representa a potência consumida pelo gerador, concluindo-se que a central geradora está em funcionamento (GALLARDO, 2005).

O instante descrito com o número 1 na figura 4.12 representa o acionamento do primeiro gerador, onde é possível verificar a elevação do nível da tensão eficaz, de aproximadamente 13,2 kV chegando a atingir aproximadamente 13,6 kV. Neste momento também é possível verificar que a potência ativa e corrente do consumidor se elevam gradualmente, conforme o consumidor retoma o acesso à rede de distribuição. O valor referente à frequência ultrapassa o valor de 60,06 Hertz (Hz) no instante em que o gerador é acionado.

O instante marcado com o número 2 na figura 4.12 ilustra o momento em que o segundo gerador é acionado, elevando ainda mais a tensão em relação ao

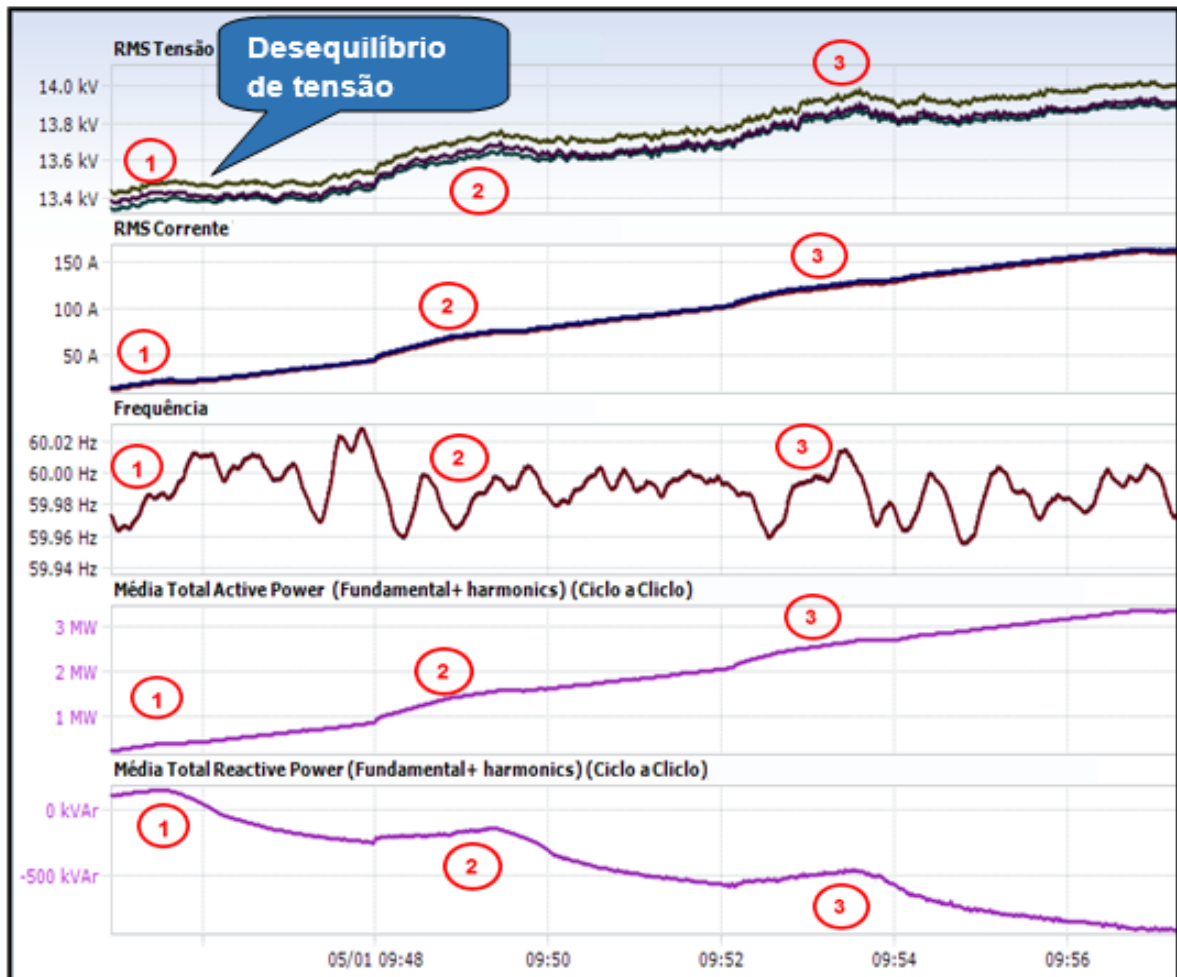
primeiro gerador acionado. Os valores de tensão eficaz se elevam chegando muito próximo ao valor de 13,8 kV. O comportamento da potência ativa e corrente se mantém crescendo gradualmente e o valor de frequência reduz para 60,04 Hz no momento em que o segundo gerador foi acionado.

O instante denominado com o número 3 na figura 4.12 ilustra o momento em que o terceiro gerador é acionado, elevando ainda mais a tensão em relação aos acionamentos anteriores, visto que a tensão atinge o valor de aproximadamente 14 kV. Os valores de corrente e potência ativa permanecem crescendo gradualmente, conforme consumo do cliente e o valor de frequência após o acionamento deste último gerador atinge o valor um pouco inferior a 59,98 Hz.

4.2.3.2 Segundo cenário

O segundo cenário possui outro evento interessante de ser avaliado, que ocorreu no dia 05 de janeiro de 2017, onde aconteceu o desligamento do religador automático instalado na rede aérea primária especificamente para proteção ao consumidor, por motivos de necessidade de manutenção no equipamento existente. Nota-se que após o reestabelecimento da rede de distribuição, a central geradora conectada ao sistema, reinicia seu processo de geração de energia própria e os níveis de tensão se elevaram proporcionalmente aos acionamentos dos geradores, condizente com a figura 4.13:

Figura 4.13 Medição no ponto de conexão do cliente - Segundo Cenário



Fonte: Investigator (2019)

O instante marcado com o número 1 na figura 4.13 ilustra o momento em que o primeiro gerador é acionado, onde é perceptível a elevação de tensão, se aproximando ao valor de 13,5 kV. O perfil comportamental da potência ativa e corrente se estabelece se elevando gradualmente e o valor de frequência se eleva pouco, atingindo o valor de aproximadamente 59,99 Hz.

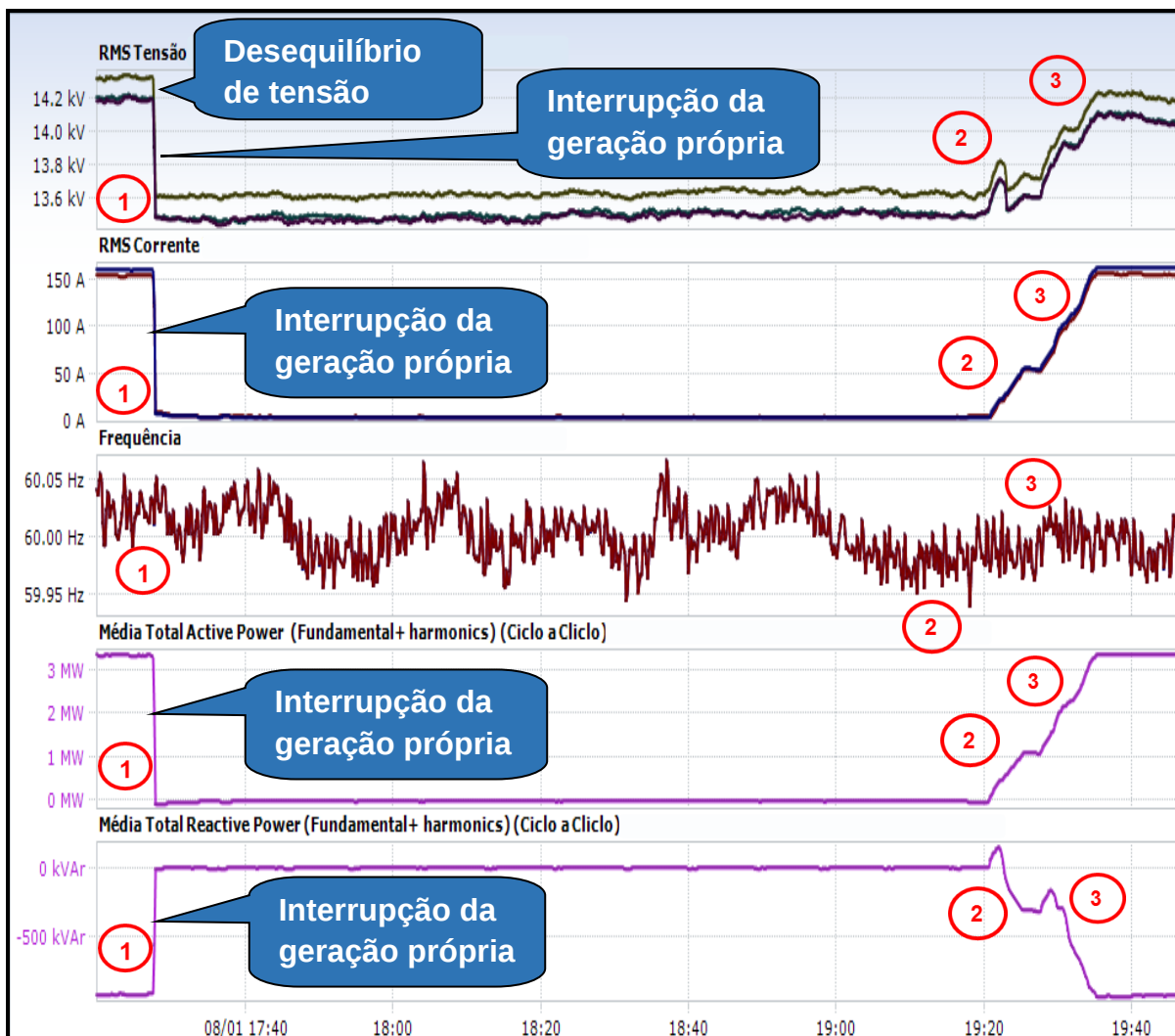
Para o momento descrito com o número 2 na figura 4.13, pode-se observar que ao ser acionado o segundo gerador o nível de tensão aumenta chegando próximo ao valor de 13,7 kV. O comportamento da corrente e potência ativa permanecem de acordo as medições anteriores pois se elevam, porém gradualmente, conforme consumo do cliente. Para o valor de frequência se mantém próximo a 60 Hz.

O instante destacado com o número 3 na figura 4.13 demonstra o momento em que o último gerador é acionado, sendo possível notar o padrão do comportamento da tensão, visto que os valores de tensão aumentam após o funcionamento do gerador, atingindo o valor de 14 kV. O perfil da potência ativa e corrente se mantém se elevando gradualmente e já para o valor de frequência se estabelece a 60 Hz, no instante do acionamento do equipamento de geração.

4.2.3.3 Terceiro cenário

Por fim, o terceiro cenário ocorreu no dia 08 de janeiro de 2017, onde é fácil perceber que no momento em que o cliente está exportando energia para a rede, o nível de tensão ultrapassa o valor de 14 kV, permanecendo com este mesmo valor durante todo o período que a central geradora estava operando. No instante em que o processo de geração de energia própria é interrompido, o nível de tensão é reduzido chegando a ficar abaixo de 13,6 kV, voltando a se elevar somente quando os geradores do acessante retomam sua operação, conforme figura 4.14:

Figura 4.14 Medição no ponto de conexão do cliente - Terceiro Cenário



Fonte: Investigator (2019)

Mais uma vez é possível notar o desequilíbrio da tensão no circuito primário PAR 0104, devido ao desequilíbrio das cargas ao longo da rede, ocasionando o desbalanceamento de fases.

Neste cenário é possível observar que no instante que há a interrupção da geração própria, onde os geradores são desativados, o nível de tensão diminui bruscamente, passando de 14,2 kV para 13,5 kV, conforme marcação do número 1. No mesmo instante marcado com o número 1, nota-se que a corrente e a potência ativa são interrompidas completamente, pois internamente houve uma parada para manutenção, seccionando assim o consumo do cliente. O valor de frequência fica em torno de 60 Hz.

O momento em há marcação do número 2 ilustra o retorno do acionamento de um dos geradores, e no mesmo tempo o nível de tensão passa de aproximadamente 13,5 kV para 13,8 kV. Com o retorno das atividades da unidade consumidora, os valores de potência ativa e corrente passam a se elevar devido ao consumo do acessante. O valor de frequência chega a 59,95 Hz.

O instante da marcação do número 3 ilustra o acionamento de mais um dos geradores, onde novamente é possível observar que o nível de tensão passa de aproximadamente 13,8 kV para 14,2 kV, valor esse antes do desligamento dos equipamentos. Os comportamentos da potência ativa e corrente se elevam gradualmente e o valor de frequência se mantém próximo a 60,02 Hz.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a análise dos parâmetros apresentados nos três cenários, foram relacionados os parâmetros medidos aos padrões do módulo 8 do PRODIST – Qualidade da Energia.

5.1 Desequilíbrio de Tensão

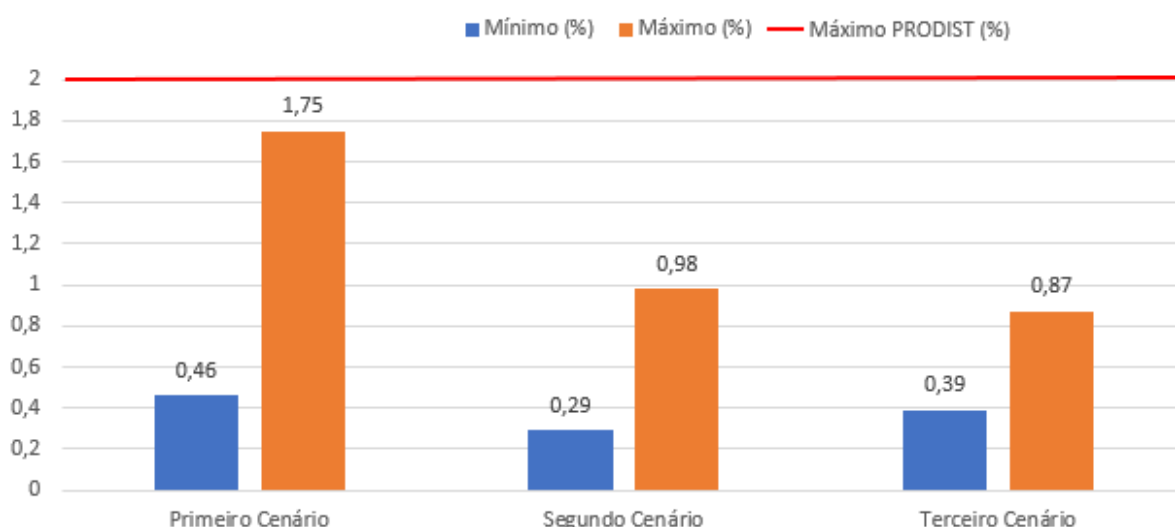
Nos três cenários apresentados, observa-se que há desequilíbrio de tensão no circuito primário ao qual o acessante está conectado. Para o período das medições do primeiro, segundo e terceiro cenário, os valores percentuais de desequilíbrio de tensão nunca ultrapassaram os 2%, valor este de referência de acordo com o módulo 8 do PRODIST. A tabela 5.1 apresenta os valores percentuais máximos e mínimos de desequilíbrio de tensão para os três cenários:

Tabela 5.1 Percentuais máximos e mínimos de desequilíbrio de tensão

Percentual de Desequilíbrio de Tensão	Mínimo (%)	Máximo (%)
Primeiro Cenário	0,46	1,75
Segundo Cenário	0,29	0,98
Terceiro Cenário	0,39	0,87

Fonte: Adaptado de Sapphire (2019)

Figura 5.1 Gráfico dos percentuais máximos e mínimos de desequilíbrio de tensão



Fonte: Adaptado de Sapphire (2019)

Conforme tabela 5.1 e figura 5.1 pode-se observar que os valores de desequilíbrio de tensão estão dentro dos padrões. Ressaltando que este desequilíbrio de tensão não foi ocasionado devido à conexão da minigeração analisada neste estudo de caso, mas sim devido ao desbalanceamento das fases primárias.

5.2 Tensão em regime permanente

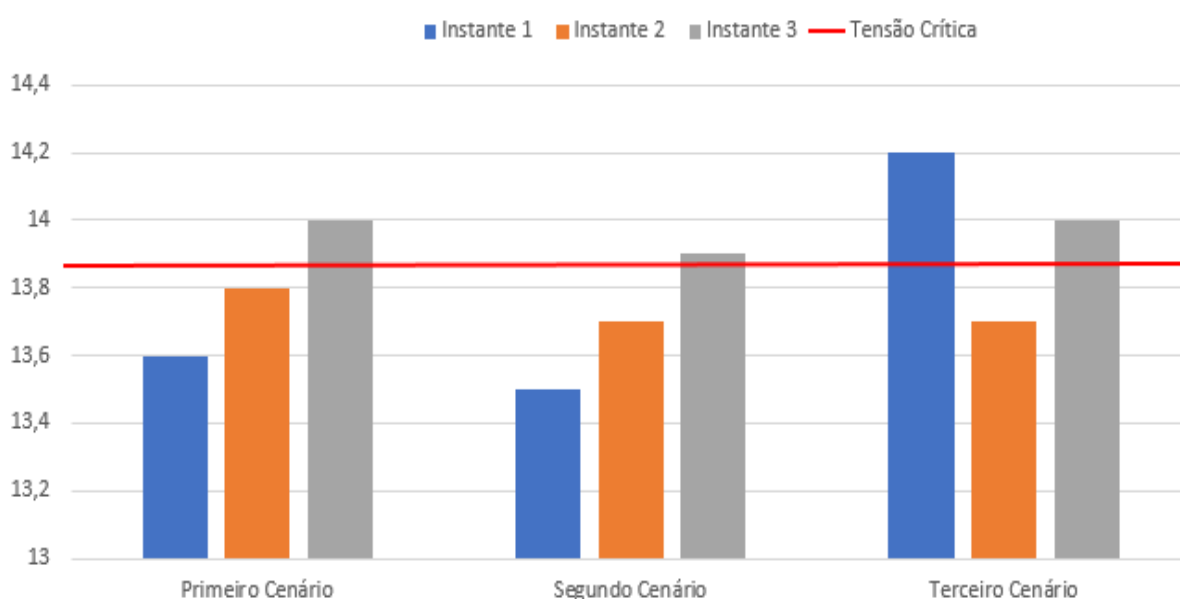
Nos três cenários apresentados observa-se que no instante que a central geradora inicia sua operação o nível de tensão no ponto de conexão se eleva.

O módulo 8 do PRODIST indica os limites de tensão de atendimento, podendo ser classificada como adequada, precária ou crítica. A tabela 5.2 apresenta os valores de tensão no momento de análise em que a geração própria está conectada à rede de distribuição para os três cenários:

Tabela 5.2 Nível de Tensão no momento de operação da central geradora

Nível de Tensão no momento de operação da central geradora	Instante 1 (kV)	Instante 2 (kV)	Instante 3 (kV)
Primeiro Cenário	13,6	13,8	14
Segundo Cenário	13,5	13,7	13,9
Terceiro Cenário	14,2	13,7	14

Fonte: Adaptado de Sapphire, (2019)

Figura 5.2 Gráfico Nível de Tensão no momento de operação da central geradora

Fonte: Adaptado de Sapphire (2019)

O instante 1 considera o acionamento do primeiro gerador, o instante 2 considera o acionamento do segundo gerador e o instante 3 considera o acionamento do terceiro gerador.

Conforme figura 5.2, no primeiro e segundo cenários para o instante 1 e 2 o nível de tensão de atendimento pode ser classificado como adequada. Entretanto para o instante 3 o nível de tensão pode ser classificado como crítico, pois ultrapassa o valor de 13,86 kV. Já para o terceiro cenário para o instante 1 e 3 o nível de tensão de atendimento pode ser classificado como crítico. Porém para o instante 2 o nível de tensão pode ser classificado como adequado, pois não ultrapassa o valor de 13,86 kV.

Conclui-se, portanto, que a conexão da central geradora em minigeração com a rede de distribuição pode afetar o nível adequado de tensão. Esta elevação de tensão no ponto de conexão pode ocorrer devido à inversão do sentido do fluxo de potência, ocasionado pela conexão da geração distribuída, que se comporta como uma pequena usina injetando a energia excedente à rede elétrica, que inicialmente foi projetada para o fluxo de energia unidirecional (SHAYANI, 2010).

Os equipamentos de proteção instalados na rede de distribuição devem ser eficientes garantindo a confiabilidade, seletividade e a coordenação entre os equipamentos de proteção dispostos na rede. Diante do exposto neste estudo de caso, foi possível identificar que o nível de tensão no ponto de conexão do cliente, em determinados momentos, se elevou chegando a ultrapassar 14Kv. Neste período de elevação de tensão, a proteção da cabine primária do cliente deveria ter atuado, pois a mesma deve ser graduada ajustando os parâmetros do relé analisador de tensão para os valores de sobretensão e sub tensão desejados, pois esses ajustes são de responsabilidade do acessante. O equipamento de proteção instalado na rede de distribuição, o religador automático (RA) está ajustado para os parâmetros de corrente, o qual não foi caracterizado como sobrecorrente no ponto de conexão, não exigindo atuação deste equipamento (ENEL DISTRIBUIÇÃO SÃO PAULO, 2004).

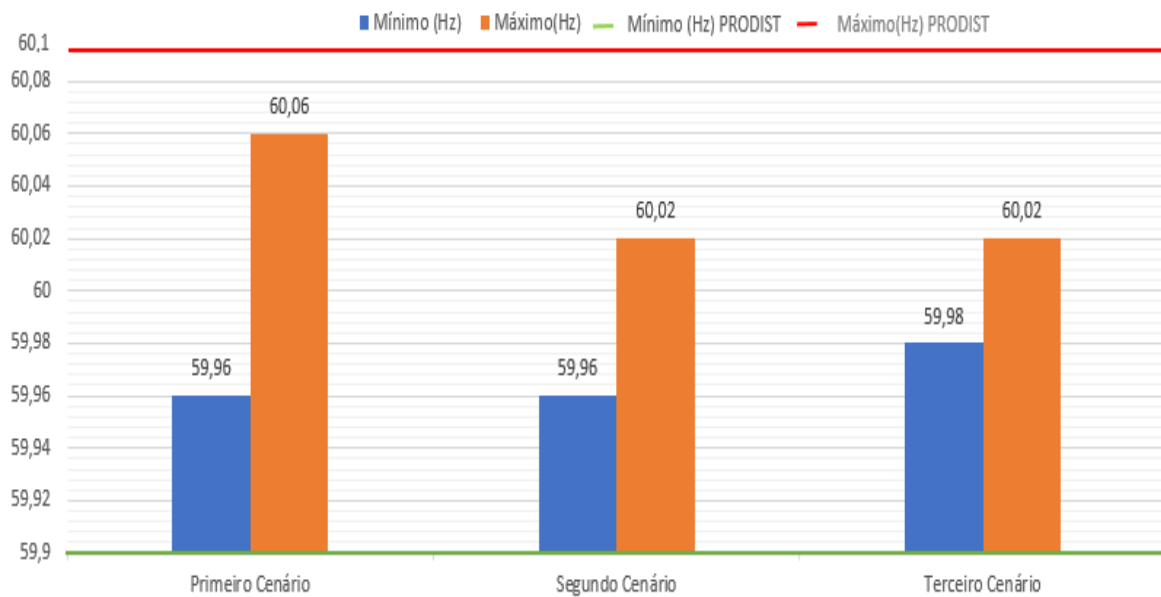
5.3 Frequência

A variação de frequência é observada nos três cenários avaliados. Conforme o módulo 8 do PRODIST para operação em regime permanente, o valor da frequência deverá estar dentro dos limites de 59,9 Hz e 60,1 Hz. A tabela 5.3 apresenta os valores mínimo e máximo de frequência no momento de análise para os três cenários:

Tabela 5.3 Valores mínimos e máximos de frequência

Frequência	Mínimo (Hz)	Máximo (Hz)
Primeiro Cenário	59,96	60,06
Segundo Cenário	59,95	60,02
Terceiro Cenário	59,94	60,06

Fonte: Adaptado de Sapphire, (2019)

Figura 5.3 Gráfico dos valores mínimos e máximos de frequência

Fonte: Adaptado de Sapphire (2019)

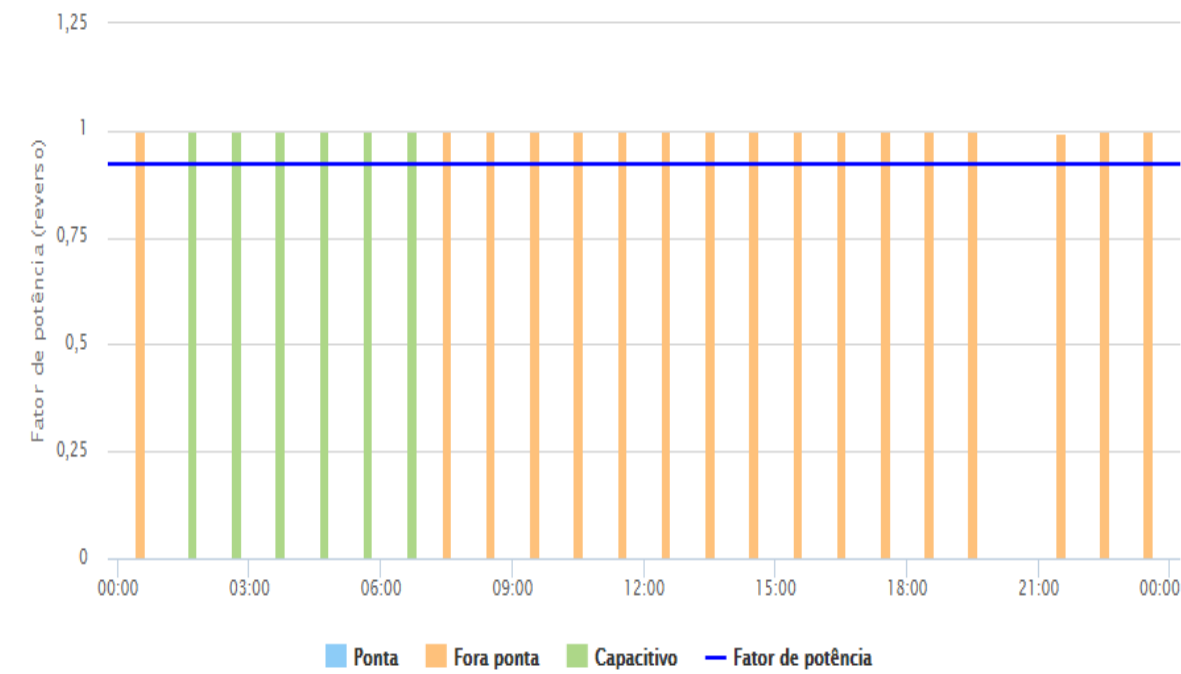
De acordo com a tabela 5.3 e figura 5.3 em nenhum momento dos três cenários estudados, os limites de valores de frequência foram ultrapassados, conforme o PRODIST. Portanto conclui-se que a conexão deste caso de minigeração com a rede de distribuição não interfere nos valores padronizados de frequência.

5.4 Fator de Potência

Conforme o PRODIST, o fator de potência deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00, tanto indutivo como capacitivo. Através do software de Gerenciamento

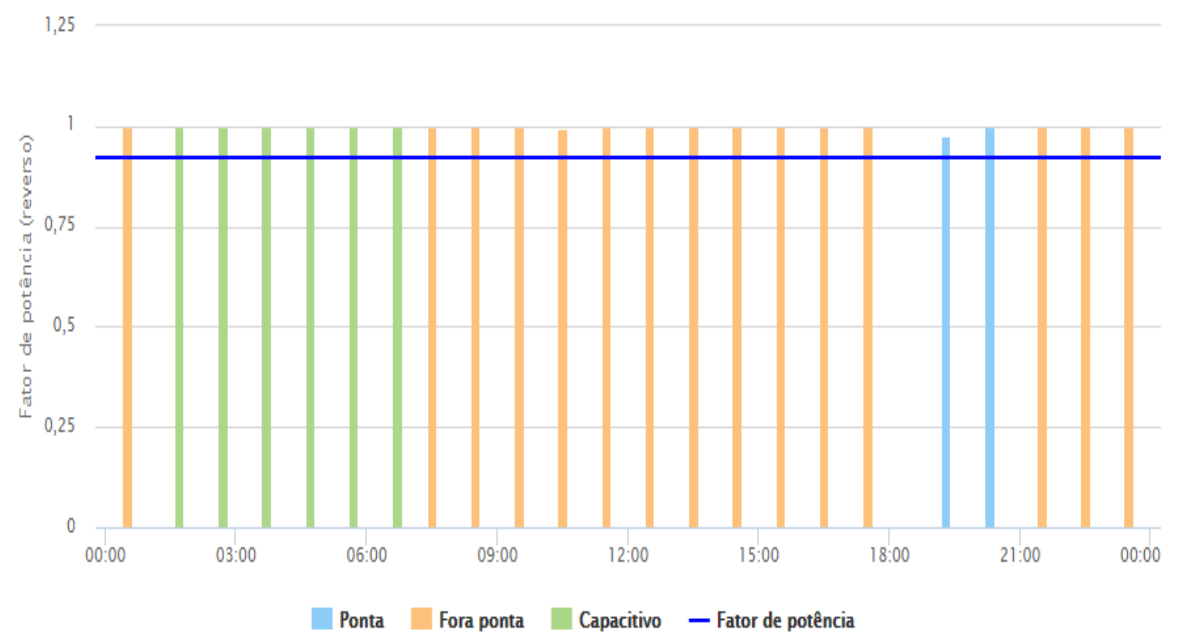
de Energia (SGE), foi possível analisar os dados de fator de potência para os três cenários conforme ilustração das figuras 5.4, 5.5 e 5.6:

Figura 5.4 Fator de Potência - Primeiro Cenário



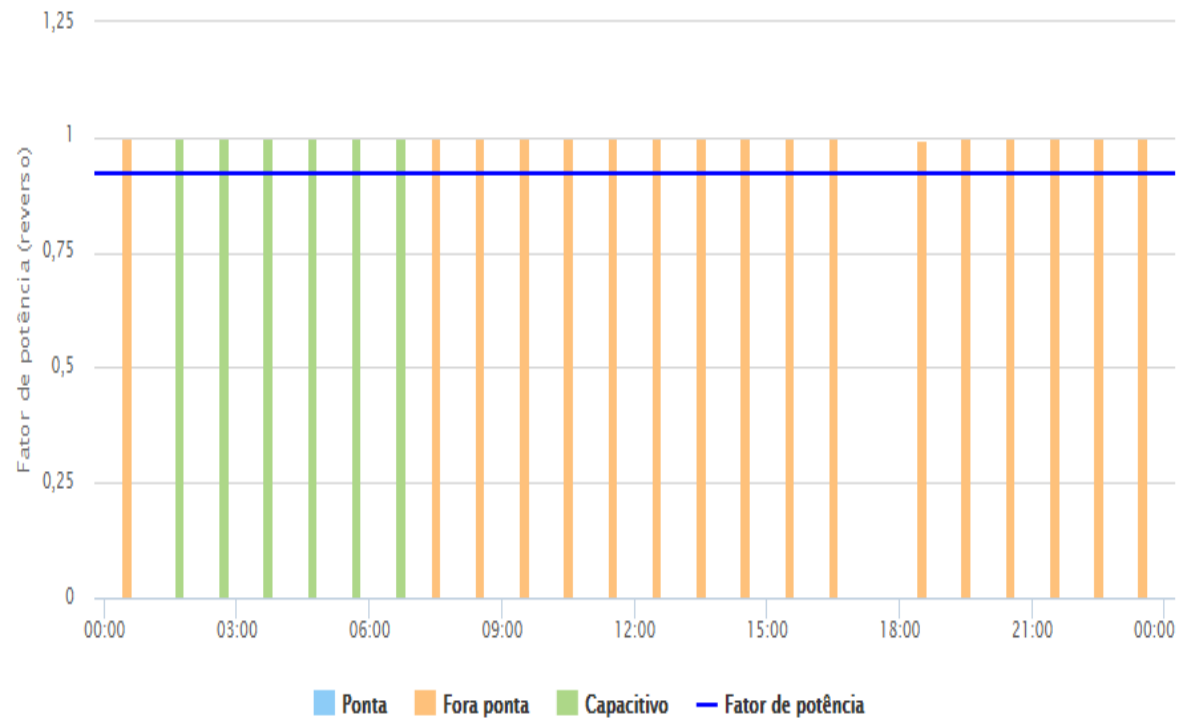
Fonte: Própria autora com dados do SGE (2019)

Figura 5.5 Fator de Potência - Segundo Cenário



Fonte: Própria autora com dados do SGE (2019)

Figura 5.6 Fator de Potência - Terceiro Cenário



Fonte: Própria autora com dados do SGE (2019)

Conforme as figuras 5.4, 5.5 e 5.6 em nenhum dos três cenários estudados, o fator de potência ultrapassou o limite estabelecido pelo PRODIST, mantendo o padrão da qualidade de energia referente a este parâmetro.

6 CONCLUSÃO

A realização deste estudo de caso que teve por finalidade, analisar os impactos da conexão de uma central geradora em minigeração distribuída na rede de distribuição de energia elétrica, mostrou-se importante para o entendimento do comportamento da tensão perante esta inserção de energia ao sistema elétrico.

Optou-se pela análise dos pontos críticos da qualidade de energia elétrica indicados no período da medição ocasionados pela conexão deste específico acessante, referente ao parâmetro da tensão, evidenciando três cenários para a realização do estudo de caso, para avaliação do comportamento do nível da tensão no momento de operação da central geradora.

Ao realizar as comparações dos parâmetros analisados nos três cenários com o módulo 8 do PRODIST – Qualidade da energia, observou-se claramente que o único parâmetro afetado pela conexão desta minigeração distribuída em estudo, foi o aumento do nível da tensão no ponto de conexão do cliente com a rede de distribuição de energia elétrica. Em todo o momento que a central geradora de energia esteve em operação, o nível de tensão se elevou e em determinados momentos chegou a se enquadrar como nível de tensão crítica. Atribui-se esta elevação de tensão no ponto de conexão, a inversão do sentido do fluxo de potência, ocasionado pela conexão da geração distribuída, que se comporta como uma pequena usina injetando a energia excedente à rede elétrica, que inicialmente foi projetada para o fluxo de energia unidirecional.

Este tipo de problema, elevação de tensão, pode ocasionar danos aos transformadores instalados na rede; devido aos ajustes de tapes, complexidade na parametrização dos equipamentos de proteção da rede; pois curtos-circuitos e sobrecargas são supridos por várias fontes, dificultando a detecção de anomalias (PEPERMANS *et al.*, 2005; MARTINEZ; MARTIN, 2007); danos aos consumidores conectados próximos a este acessante, principalmente do ponto de vista de queima de específicos equipamentos, comprometendo o funcionamento de cargas sensíveis, pois são expostos a uma tensão acima do seu limite de fabricação (Dugan *et al.*, 2002).

Como medidas de mitigação podemos citar reforços, por parte da concessionária, nas medições e ajustes nos equipamentos de proteção, limitação automática de tensão e mudança de tape sob carga nos transformadores de distribuição (CAPPELLE *et al.*, 2011; STETZ *et al.*, 2013).

Conclui-se então, que a presença da conexão da minigeração distribuída provocou no estudo de caso apresentado, distúrbios no nível de tensão na rede de distribuição de energia elétrica, afetando os índices da qualidade da energia, destacando o aumento da complexidade da análise das solicitações de geração distribuída previamente, a dificuldade do planejamento do sistema elétrico, em prever o comportamento do circuito primário ao qual a geração distribuída será interligada, ressaltando a necessidade de investimentos na automatização de ferramentas e programas computacionais de planejamento do sistema, bem como o gerenciamento deste perfil de consumidor.

Este estudo de caso mostrou o impacto com foco em um dos parâmetros elétricos da rede, a tensão. Como sugestão de trabalhos futuros no âmbito da análise dos impactos da conexão de minigeração na rede de distribuição, pode-se propor a avaliação de outros parâmetros elétricos em clientes já conectados à rede de distribuição, bem como estender esta análise para acessantes com outras fontes de geração, como por exemplo, fotovoltaica ou eólica, ampliando as análises de outros tipos de problemas que possam surgir em função da configuração da conexão rede-gerador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMANN, T.; GÖRAN, A.; SÖDER, L. **Distributed generation: a definition**. Electric Power Systems Research, Elsevier Science, Oxford, UK, v.57, n.3, p. 195-204, 2001.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica**. Cadernos Temáticos ANEEL, 2 ed, Brasília, DF, Mai. 2016. Disponível em: <
<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14913578/Caderno+tematico+Micro+e+Minigera%C3%A7%C3%A3o+Distribuida+-+2+edicao/716e8bb2-83b8-48e9-b4c8-a66d7f655161>>. Acesso em 08 fev. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 1 – Introdução**. rev 10, 26 Dez. 2018. Disponível em:
<http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo1_Revis%C3%A3o10/f6c63d9a-62e9-af35-591e-5fb020b84c13>. Acesso em: 08 fev. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição**. rev 7, 01 Jun. 2017. Disponível em:
< http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/PRODIST-M%C3%B3dulo3_Revis%C3%A3o7/ebfa9546-09c2-4fe5-a5a2-ac8430cbca99 >. Acesso em: 08 fev. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. rev 10, 01 Jan. 2018. Disponível em:
<http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8-Revis%C3%A3o_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9>. Acesso em: 08 fev. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Glossário**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/glossario>>. Acesso em: 23 mar. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Unidades Consumidoras com Geração Distribuída**. 2019. Disponível em:
< <http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/VerGD.asp>>. Acesso em: 23 mar. 2019.

ARCADIS Tetraplan. **Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável**. 2010. Disponível em:
<http://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao10012011033201.pdf>. Acesso em 23 mai.2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA (ABRADEE). **A distribuição de energia**. Brasília, 2018. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia>>. Acesso em: 23 mar. 2019.

BARBOSA, P. S. F.; LEONE FILHO, M. A.; PRADO JR., F. A.; PIRES, J. R. C. **Um modelo de simulação do sistema elétrico nacional com presença de geração de renováveis intermitentes: impactos operacionais, regulatórios e custos**. Anais do XXIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Foz do Iguaçu, 2015.

BARBOSA, W.P.F.; AZEVEDO, A.C.S. Geração distribuída: Vantagens e Desvantagens. In: II Simpósio de Estudos e Pesquisas em Ciências Ambientais na Amazônia, 2013. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mudnacaclimatica/2014/artigo_gd.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2019.

BRASIL. **Resolução Normativa no. 390 de 15 de Setembro de 2009**. Estabelece os requisitos necessários à outorga de autorização para exploração e alteração da capacidade instalada de usinas termelétricas e de outras fontes alternativas de energia, os procedimentos para registro de centrais geradoras com capacidade instalada reduzida e dá outras providências. ANEEL, Brasília, DF. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2009390.pdf>>.

BRASIL. **Resolução Normativa no. 414 de 9 de Setembro de 2010**. Estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica de forma atualizada e consolidada. ANEEL, Brasília, DF. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414comp.pdf>>.

BRASIL. **Resolução Normativa no. 482 de 17 de Abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. ANEEL, Brasília, DF. Disponível em: <www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>.

BRASIL. **Resolução Normativa no. 687 de 24 de Novembro de 2015**. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST.. ANEEL, Brasília, DF. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>.

CÂMARA COMERCIALIZADORA DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE). **Biogás**. Fontes. São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/fontes?_adf.ctrl-state=tlpjtz8p_1&_afLoop=809610654702204#!%40%40%3F_afLoop%3D809610654702204%26_adf.ctrl-state%3Dtlpjtz8p_5>. Acesso em: 23 mar. 2019.

CAPPELLE, J. et al. **Introducing small storage capacity at residential PV installations to prevent overvoltages**. Smart Grid Communications. IEEE International Conference on. 2011.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Biogás**. São Paulo, 2019. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/biogas/>>. Acesso em: 23 mar. 2019.

CREDER, H. **Instalações Elétricas**. 15 ed - Rio de Janeiro: LTC, 2007.

Dugan, R.C.; McGranaghan, M.F.; Santoso, S.; Beaty, H.W. **Electrical Power Systems Quality**. 2 Ed. EUA:McGraw-Hill. 2002.

ENEL DISTRIBUIÇÃO SÃO PAULO. **Padrão Técnico da Distribuição 4001 – Rede de Distribuição Aérea Urbana – 15kV**. São Paulo, 2000. Disponível em: <<http://twixar.me/Jsjn>>. Acesso em 23 mar. 2019.

ENEL DISTRIBUIÇÃO SÃO PAULO. **Norma Técnica 3001 - Proteção de Redes de Distribuição Aérea Primária**. São Paulo, 2004. Disponível em: <<https://www.eneldistribuicaoosp.com.br/Padroes%20Normas%20Tecnicas%20Espec/ND-3001.pdf>>. Acesso em 23 mar. 2019.

ENEL DISTRIBUIÇÃO SÃO PAULO. **Livro de instruções gerais de Média Tensão: Solicitação de fornecimento – Fornecimento de energia elétrica em tensão primária de distribuição**. São Paulo, 2011. Disponível em: <<https://www.eneldistribuicaoosp.com.br/Paginas/LIG-MT-2011.aspx>>. Acesso em 23 mar. 2019.

ENEL DISTRIBUIÇÃO SÃO PAULO. **NOTA TÉCNICA 6.012 - Requisitos mínimos para interligação de microgeração e minigeração distribuída com a rede de distribuição da Enel distribuição São Paulo com paralelismo permanente através do uso de inversores – consumidores de alta, média e baixa tensão**. São Paulo, 2019. Disponível em: <<https://www.eneldistribuicaoosp.com.br/Padroes%20Normas%20Tecnicas%20Espec/NT%206.012-5.pdf>>. Acesso em 23 mar. 2019.

FILHO, J. M. **Instalações Elétricas Industriais**. 6 ed. – São Paulo: LTC, 2002.

FILHO, J. M. **Instalações Elétricas Industriais**. 9 ed. – São Paulo: LTC, 2017.

GALLARDO, J. A. M. **Impacto de geradores síncronos no desempenho de regime permanente de sistemas de distribuição de energia elétrica**. Campinas, 2005. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/259450/1/MoranGallardo_JesusArmando_M.pdf>. Acesso em 23 mai. 2019.

INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO (IFES). **Subestações elétricas**. Apostila, Espírito Santo. 2013.

JUSTI, M.; MOLITERNO, M. **Geração de Energia Elétrica por meio de biogás extraído do aterro sanitário bandeirantes e o mecanismo de desenvolvimento limpo como indutor de investimentos socioambientais**. São Paulo, 2008.

Disponível em:

<<http://www.iee.usp.br/sites/default/files/Juliana%20Gon%C3%A7alves%20Justi%20et%20al.pdf>>. Acesso em 20 mar. 2019.

MARTINEZ, J.A.M.; MARTIN J.A. **Distributed Generation Impact on Voltage Sags in Distribution Networks**. International Conference on Electrical Power Quality and Utilization, p. 1-6. 2007.

PEPERMANS, G.; DRIESEN, J.; HAESELDONCKX, D.; BELMANS, R.; D'HAESELEER, W. **Distributed generation: definition, benefits and issues**. Energy Policy vol. 33, p. 787–798. 2005.

Power quality logger & Power quality solutions (ELSPEC). Disponível em: <<https://www.elspec-ltd.com/>>. Acesso em 23 mar. 2019.

REIS, L. B. d. **Geração de Energia Elétrica**. 3 ed – São Paulo: Manole, 2017.

SANTOS, E. M. d., 2011. **Métodos para correção das distorções da forma de onda secundária causadas pela saturação de transformadores de corrente para serviço de proteção**. Santa Maria, 2011. Disponível em:

<<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8489/SANTOS%2c%20EDUARDO%20MACHADO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em 20 mar. 2019.

SHAYANI, R. A. **Método para determinação do limite de penetração da geração distribuída fotovoltaica em redes radiais de distribuição**. Brasília, 2010.

Disponível em:

<http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/7117/1/2010_RafaelAmaralShayani.pdf>.

Acesso em 23 mai. 2019.

SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA (SGE). Disponível em:

< <https://sge.eletropaulo.com.br/>>. Acesso em: 23 mar. 2019.

STETZ, T. *et al.* **Improved Low Voltage Grid-Integration of Photovoltaic Systems in Germany**. Power and Energy Society General Meeting. 2013.

WRIGHT, J.; CARVALHO, D.; SPERS, R. **Tecnologias disruptivas de geração distribuída e seus impactos futuros sobre empresas de energia**. INMR - Innovation & Management Review, v.6, n.1, p. 108-125, 2009.

YIN, R. K. **Estudo de Caso: planejamento e método**. 5 ed - Porto Alegre: Bookman, 2005.