



UNIVERSIDADE FEDERAL
DO ESPÍRITO SANTO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Projeto de Graduação

**Análise da qualidade da energia elétrica em
uma rede com elevada integração de geração
distribuída fotovoltaica**

Mateus Batista de Souza

Vitória – ES

Julho/2019

Mateus Batista de Souza

**Análise da qualidade da energia elétrica em uma rede
com elevada integração de geração distribuída
fotovoltaica**

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

Orientador: Prof. D. Sc. Oureste Elias Batista

Vitória – ES

Julho/2019

Mateus Batista de Souza

**Análise da qualidade da energia elétrica em uma rede
com elevada integração de geração distribuída
fotovoltaica**

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

Aprovada em 05 de Julho de 2019

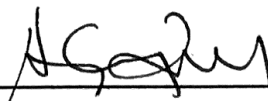
COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. D. Sc. Oureste Elias Batista
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



M. Sc. Murillo Cobe Vargas
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador



Prof. D. Sc. Augusto César Rueda Medina
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Dedico este trabalho a Deus, que me deu tudo o que tenho.

Agradecimentos

Obrigado senhor Deus por me proporcionar uma família estabilizada, uma vida cheia de bênçãos e força de trabalho para sempre exercer minhas funções com excelência e alegria.

"Estou curtindo a minha jornada. Então, se o seu destino é o mesmo que o meu, aproveite os pequenos desvios ao máximo. Algo mais importante do que a coisa que você está caçando pode estar bem ali, ao lado da estrada em que você caminha."

(Ging Freecss)

Resumo

No presente trabalho foram estudadas as implicações de uma elevada interação de geração distribuída fotovoltaica em uma rede do sistema elétrico de distribuição já conhecida. Foram abordadas as análises pertinentes a índices de avaliação da qualidade de energia elétrica, como o fator de potência, o desequilíbrio de tensão e a corrente de neutro. Os dados simulados foram analisados usando os critérios vigentes sobre a qualidade de energia na legislação brasileira para instalações de baixa tensão e com conclusões que abrangem vantagens e desvantagens para o setor elétrico e para o consumidor no que se refere à ganhos econômicos e técnicos da nova topologia proposta para o sistema de energia elétrica.

Palavras-chave: Microgeração. Energia solar. Pannel fotovoltaico. Geração distribuída.

Abstract

According to the new world trends, the concern for the environment emphasizes an incessant search for sustainable conditions of economic development. As the production of electric energy is directly linked to economic development, clean energy alternatives present greater visibility to the conscious consumer, in this way, the study of distributed microgeneration using photovoltaic panel presents itself as a viable and sustainable alternative. Finally, in order to confirm and make feasible the alternative, it is essential to study the quality of the electric energy produced in this new configuration of the grid of the electric power system. Thus, this graduation project uses a theoretical network already known to analyze the effects of the introduction of distributed microgeneration with photovoltaic panels, using computational tools to simulate and evaluate the electric quantities of interest.

Keywords: Microgeneration. Solar energy. Photovoltaic panel. Distributed generation.

Lista de ilustrações

Figura 1 –	Projeção da micro geração de energia solar no Brasil	16
Figura 2 –	Sistema genérico de distribuição de duas barras infinitas	25
Figura 3 –	Sistema genérico de distribuição de duas barras infinitas com GD	26
Figura 4 –	Diagrama unifilar do alimentador teste de 13 nós do IEEE - A13N	27
Figura 5 –	Diagrama unifilar com pontos de aplicação de GDFV	28
Figura 6 –	Modelo monofásico simplificado de painel fotovoltaico adotado	29
Figura 7 –	Circuito trifásico teórico com representação da corrente de neutro em um sistema trifásico	33
Figura 8 –	Representação fasorial das correntes do sistema	33
Figura 9 –	Representação fasorial da soma das correntes do sistema balanceado . .	34
Figura 10 –	Representação fasorial da soma das correntes do sistema desbalanceado	35
Figura 11 –	Evolução do fator de potência no medidor 650 com o aumento da inserção de GDs no sistema	37
Figura 12 –	Evolução do desequilíbrio de tensão no medidor 671 com o aumento da inserção de GDs no sistema	39
Figura 13 –	Evolução do módulo da corrente de neutro no medidor 632 71 com o aumento da inserção de GDs no sistema	41
Figura 14 –	Evolução da fase da corrente de neutro no medidor 632 71 com o au- mento da inserção de GDs no sistema	42

Lista de tabelas

Tabela 1 – Ligação das GDs à rede elétrica	30
Tabela 2 – Exemplos de painéis fotovoltaicos ligados ao alimentador	30
Tabela 3 – Identificação dos medidores atuantes na simulação	31
Tabela 4 – Comparação dos fatores de potência	36
Tabela 5 – Comparação dos desequilíbrios [%]	38
Tabela 6 – Comparação das Correntes de Neutro [A]	40
Tabela 7 – Continuação da comparação das Correntes de Neutro [A]	41
Tabela 8 – Tensões com nenhuma GD ligada	49
Tabela 9 – Correntes com nenhuma GD ligada	50
Tabela 10 – Potências com nenhuma GD ligada	50
Tabela 11 – Tensões com uma GD ligada	51
Tabela 12 – Correntes com uma GD ligada	52
Tabela 13 – Potências com uma GD ligada	52
Tabela 14 – Tensões com duas GDs ligadas	53
Tabela 15 – Correntes com duas GDs ligadas	54
Tabela 16 – Potências com duas GDs ligadas	54
Tabela 17 – Tensões com três GDs ligadas	55
Tabela 18 – Correntes com três GDs ligadas	56
Tabela 19 – Potências com três GDs ligadas	56
Tabela 20 – Tensões com quatro GDs ligadas	57
Tabela 21 – Correntes com quatro GDs ligadas	58
Tabela 22 – Potências com quatro GDs ligadas	58
Tabela 23 – Tensões com cinco GDs ligadas	59
Tabela 24 – Correntes com cinco GDs ligadas	60
Tabela 25 – Potências com cinco GDs ligadas	60
Tabela 26 – Tensões com seis GDs ligadas	61
Tabela 27 – Correntes com seis GDs ligadas	62
Tabela 28 – Potências com seis GDs ligadas	62
Tabela 29 – Tensões com sete GDs ligadas	63
Tabela 30 – Correntes com sete GDs ligadas	64
Tabela 31 – Potências com sete GDs ligadas	64
Tabela 32 – Tensões com oito GDs ligadas	65
Tabela 33 – Correntes com oito GDs ligadas	66
Tabela 34 – Potências com oito GDs ligadas	66
Tabela 35 – Tensões com nove GDs ligadas	67
Tabela 36 – Correntes com nove GDs ligadas	68

Tabela 37 – Potências com nove GDs ligadas	68
--	----

Lista de abreviaturas e siglas

GD	Geração Distribuída
GDFV	Geração Distribuída Fotovoltaica
V	Tensão
I	Corrente
P	Potência Ativa
Q	Potência Reativa
FP	Fator de Potência
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
BT	Baixa Tensão

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Introdução ao Projeto	14
1.2	Objetivos	14
1.3	Justificativa e Motivação	15
2	ELEVADA INTEGRAÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTO-VOLTAICA	17
2.1	Geração Distribuída Fotovoltaica	17
2.2	Impactos da elevada integração de geradores fotovoltaicos para o sistema elétrico de potência	19
2.3	Qualidade da Energia Elétrica	20
2.3.1	Índices de avaliação da qualidade de energia	21
2.3.2	Tensão em Regime Permanente	22
2.3.3	Fator de Potência	23
2.3.4	Desequilíbrio de Tensão	23
2.3.5	Flutuação de Tensão	23
2.3.6	Variação de Frequência	24
2.4	Impactos na qualidade da energia	24
3	METODOLOGIA	27
3.1	Introdução	27
3.2	Posicionamento dos painéis fotovoltaicos	28
3.3	Modelagem dos geradores fotovoltaicos	28
3.4	Simulação	29
3.5	Tratamento dos dados simulados	31
3.6	Método para análise do desequilíbrio de tensão	32
3.7	Método para análise da corrente de neutro	32
4	RESULTADOS	36
4.1	Fator de Potência	36
4.2	Desequilíbrio de tensão	37
4.3	Desequilíbrio de corrente	40
5	CONCLUSÃO	43

REFERÊNCIAS	46
------------------------------	-----------

APÊNDICES	48
------------------	-----------

	APÊNDICE A - RESULTADOS OBTIDOS EM CADA MEDIDOR .	49
A.1	Introdução	49
A.2	Simulação com nenhuma GD ligada	49
A.3	Simulação com uma GD ligada	51
A.4	Simulação com duas GDs ligadas	53
A.5	Simulação com três GDs ligadas	55
A.6	Simulação com quatro GDs ligadas	57
A.7	Simulação com cinco GDs ligadas	59
A.8	Simulação com seis GDs ligadas	61
A.9	Simulação com sete GDs ligadas	63
A.10	Simulação com oito GDs ligadas	65
A.11	Simulação com nove GDs ligadas	67

1 Introdução

1.1 Introdução ao Projeto

O projeto em questão aborda a introdução de geração distribuída na rede, de forma a comparar as grandezas elétricas antes e depois da introdução da mini-geração. A rede de distribuição de energia elétrica, responsável por entregar a energia ao consumidor final do sistema elétrico de potência, assim como qualquer outra prestadora de serviço, deve manter a qualidade do seu produto. Desta forma, a ANEEL, por meio do módulo 8 do PRODIST estabelece os seguintes critérios para indicar a qualidade da energia elétrica: tensão em regime permanente, fator de potência, distorções harmônicas e desequilíbrio de tensão.

Além disso, salienta-se que para que o sistema elétrico de potência mantenha-se operando corretamente com a introdução da geração distribuída, é necessário que o mesmo mantenha os atributos a seguir:

- Conformidade – energia elétrica de acordo com os padrões estabelecidos.
- Flexibilidade - adaptações às mudanças contínuas da topologia.
- Segurança - fornecimento de energia elétrica não deve causar risco aos consumidores.
- Manutenção - ser possível consertar problemas de forma rápida sem comprometer a utilização da rede por muito tempo.

Assim, motivado pelo caráter comercial que o setor elétrico assume na conjuntura infraestrutural, o presente trabalho analisará a qualidade da energia oferecida de acordo com alguns pontos do módulo 8 do PRODIST, além das características dessa nova topologia para um sistema elétrico de potência.

1.2 Objetivos

O objetivo do presente trabalho é analisar e quantificar vantagens e desvantagens do uso de uma nova topologia com fluxo bidirecional de potência na rede de distribuição de energia elétrica. A análise é feita sobre as grandezas elétricas de tensão e corrente, obtidas a partir de medidores, sobre as quais são inseridas métricas para quantificar o desequilíbrio de tensão, o fator de potência e a corrente de neutro. De posse dos resultados, busca-se extrair informações dos dados gerados.

Os objetivos específicos da obra consistem em:

- Avaliar o desbalanço de tensão no sistema.
- Avaliar o fator de potência da rede com geração distribuída.
- Quantificar e acompanhar os valores de corrente de neutro com as modificações na topologia e os impactos na proteção do sistema.
- Qualificar o perfil de potência que é inserido na rede elétrica.
- Comparar os resultados obtidos com os mesmos índices antes da inserção dos geradores na rede.
- Caracterizar e viabilizar o projeto indicando pontos positivos e negativos para as distribuidoras.

1.3 Justificativa e Motivação

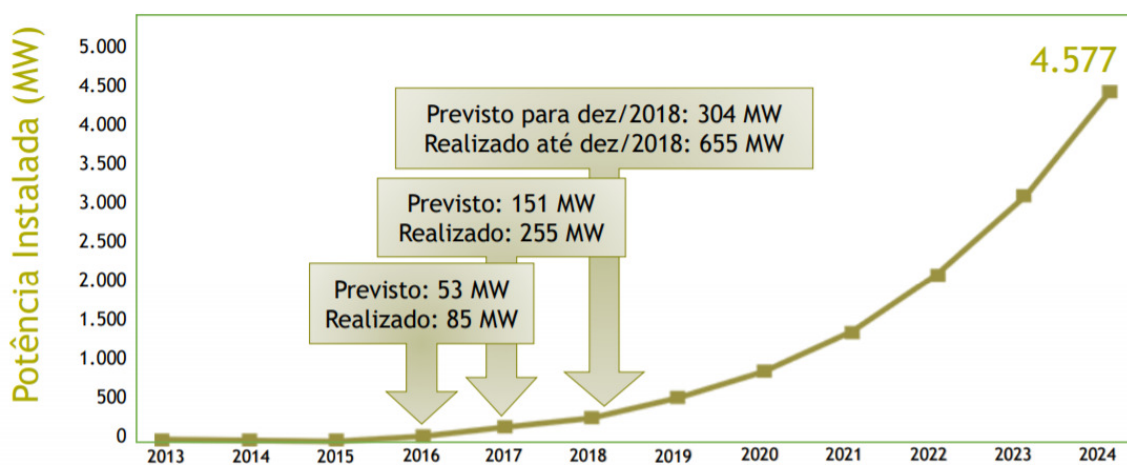
No âmbito das discussões sobre a questão energética, aprofundada pelo cenário internacional de escassez do petróleo e pelas mudanças no clima, ocasionadas pela queima de combustíveis fósseis, surgem pesquisas e estudos técnicos, econômicos e de impactos socioeconômicos e ambientais de empreendimentos de energias alternativas ou renováveis voltados para o desenvolvimento de alternativas na produção de energia, a partir de matéria orgânica de origem animal e vegetal, a biomassa; a partir da força dos ventos, a chamada energia eólica; através da captação da luz do sol, a energia solar, e a partir de pequenas centrais hidroelétricas, as quais atendem a demandas em áreas periféricas ao sistema de transmissão (PACHECO, 2006).

A geração distribuída, associada à energia renovável, foi uma maneira encontrada pelos investidores, empresários e governantes para minimizar a pressão ambientalista e atender o elevado consumo energético mundial sempre crescente. Dessa forma, o principal fator impulsionador da geração distribuída foi a possibilidade de gerar energia elétrica através de fontes renováveis como a eólica e a solar e, adicionalmente, reaproximar a geração do seu consumidor final, principalmente nas áreas industrial e comercial, onde estão localizados os maiores volumes de carga e produção de gases tóxicos ao meio ambiente. Assim, para atender uma demanda mundial cada vez maior, as preocupações ambientais, o lixo radioativo e os alagamentos, pressionaram os órgãos governamentais e os investidores a seguirem uma direção sustentável de forma a limitar o crescimento da geração de energia por combustíveis fósseis e por outras fontes tidas, anteriormente, como renováveis ou mais confiáveis, como é o caso da geração proveniente das hidrelétricas e da energia nuclear, respectivamente (NARUTO, 2017).

Como pode se observar, ao pensar em um país como o Brasil, localizado em zona equatorial, com extenso território populoso, é fácil imaginar o grande potencial que se tem

para micro geração distribuída de energia elétrica usando fontes alternativas. Assim, como dito pelos autores acima citados, a pressão mundial por um desenvolvimento sustentável faz se necessário a um país caracterizado como, em desenvolvimento, a preocupação com as formas as quais esse crescimento econômico acontece. É possível projetar as instalações de micro geração fotovoltaica nas redes brasileiras com o passar dos anos devido à fácil assimilação do povo brasileiro com as novidades tecnológicas e as facilidades naturais do país. Observe a projeção na Figura 1:

Figura 1 – Projeção da micro geração de energia solar no Brasil



Fonte: ANEEL, 2019

Por fim, mesmo com o sistema de distribuição tendendo a ser conservador no que tange às mudanças estruturais, a projeção nos mostra que o consumidor final é bastante receptivo ao novo modelo proposto, no entanto faz-se necessário a análise e o estudo dos pontos positivos e negativos dessa nova configuração para aumentar a abrangência dos setores econômicos com a ideia. O estudo deve se atentar à qualidade da energia elétrica, assim como as implicações na vida cotidiana dos consumidores finais, para, só assim, então definir se é válida a estratégia de implantação da geração distribuída com energia solar fotovoltaica, mesmo com a alta expectativa popular.

2 Elevada Integração de Geração Distribuída Fotovoltaica

2.1 Geração Distribuída Fotovoltaica

A definição de geração distribuída se atem à unidade de produção de energia próximas à unidade consumidora, não importando o tipo de tecnologia utilizada ou a quantidade de energia produzida. A ideia por trás desse tipo de geração é a não necessidade de transmissão de energia em altos níveis de tensão além de colaborar com a causa ambiental, devido a não emissão de gases poluentes para produção de energia, e uma redução nos custos com geração e transmissão de forma concentrada, uma vez que estão próximas às unidades consumidoras. Ao se tratar desse tipo de geração, possuímos dois tipos distintos: o *grid-tie* e o *off-grid*.

Nos sistemas conectados à rede, também conhecidos como *grid-tie*, a energia que é gerada tem dois possíveis caminhos: o consumo diretamente para a carga que está ligada (residência) ou ser injetada na rede de distribuição. Com isso, o gerador fotovoltaico apresenta-se como uma fonte complementar ao sistema elétrico da concessionária reduzindo assim a energia consumida a partir de fontes geradoras concentradas.

O Brasil definiu um sistema de compensação tarifário através da resolução ANEEL nº 687/2015, responsável por atualizar a NR 482/2012, também conhecido como *Net Metering*. Nesta modalidade o medidor bidirecional mede a energia consumida pela unidade proveniente da concessionária ou se há algum excedente do sistema fotovoltaico sendo injetado na rede, também havendo a possibilidade do uso de dois medidores unidirecionais, um para geração e outro para o consumo. Quando a energia gerada é superior ao consumo, o excedente é injetado na rede e são gerados créditos com validade máxima de 60 meses para uma possível compensação. Caso o consumo for maior do que a energia gerada, o micro gerador pagará apenas a diferença ou se utilizará de seus créditos acumulados. A ANEEL instituiu que essa compensação pode ser feita pela unidade ou por outra cadastrada desde que seja atendida pela mesma concessionária e possuindo o mesmo proprietário (SILVA; MOISÉS et al., 2016).

Já o *off-grid* é um sistema sem a necessidade da rede elétrica para suprir ou ajudar no sistema solar fotovoltaico. Este sistema pode ser composto simplesmente por: um painel fotovoltaico alimentando diretamente uma carga com um dispositivo de armazenamento de energia (bateria), um controlador de carga (para regular o carregamento da bateria) e um conversor (um Inversor CC-CA), que fornece a alimentação adequada para cargas. O que caracteriza tal sistema é a presença do dispositivo como única fonte de energia e o uso

de elementos acumuladores (baterias) (MORAES; BARBOSA, 2015).

Os padrões atuais de produção e consumo de energia são baseados nas fontes fósseis, o que gera emissões de poluentes locais, gases de efeito estufa e põem em risco o suprimento de longo prazo no planeta. É preciso mudar esses padrões estimulando as energias renováveis, e, nesse sentido, o Brasil apresenta uma condição bastante favorável em relação ao resto do mundo (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

No caso do Brasil, em particular, a presença de fontes renováveis na matriz energética é significativa, principalmente a hidroeletricidade e a biomassa. Apesar da predominância de fontes renováveis, o governo brasileiro tem defendido, em negociações internacionais, a ampliação de novas fontes renováveis nas matrizes energéticas dos diversos países, de forma que os impactos futuros ao meio ambiente sejam minorados (COSTA; PRATES, 2005).

A maneira organizacional adotada pelo sistema elétrico e obedecida ao longo de sua história consiste em grandes centrais de geração e uma extensa rede de linhas de transmissão e distribuição, conhecida como geração centralizada de energia. Quando a demanda de energia aumenta, a resposta é um aumento da geração, porém quando a demanda excede os limites da capacidade do sistema, a solução adotada é sempre a construção de novas unidades de geração, e por derivação o aumento do transporte e distribuição dessa maior energia comercializada. O questionamento quanto a essa forma de planejar a expansão da oferta de eletricidade do setor elétrico, aliada a introdução no mercado de novas tecnologias que reduzem significativamente o custo da energia produzida, localizadas próximas dos centros de carga, traduz o conceito de GD.

Tendo em vista as necessidades mundiais, as fontes de energia renováveis tem sido muito visadas por parcelas privadas do mercado econômico e também por ações governamentais. O investimento em geração distribuída, em conjunto dessas fontes de energia, encontra-se motivado pela pressão social e governamental, que buscam vias não poluentes e descentralizadas de geração, para tornar o setor elétrico cada vez mais autônomo em relação às variações dos preços de combustíveis fósseis, petróleo e gás natural, e às possíveis faltas no sistema elétrico de potência (FILHO; AZEVEDO, 2016).

O incentivo inicial à GD surgiu nos EUA com as mudanças na legislação, iniciadas pelo *Public Utilities Regulatory Policies Act (PURPA)* em 1978 e ampliadas em 1992 pelo *Energy Policy Act*, com a desregulamentação da geração de energia. A difusão da geração distribuída foi facilitada pelo progresso tecnológico mundial no campo da computação, resultando em controle e processamento de dados mais rápido e mais barato, e no campo das telecomunicações, oferecendo maior rapidez e menor custo na transmissão de maior volume de informação (ENERGÉTICA, 2001).

A partir do exemplo americano, nota-se que é imprescindível o apoio governamental

para o crescimento da geração distribuída, uma vez que, em países onde há o maior número desse tipo de geração ocorre incentivos fiscais e pouca burocracia para a conexão à rede elétrica como forma de encorajar o crescimento da descentralização da geração de energia no país.

Contudo, o setor elétrico possui grandes desafios no que tange a implementação da geração distribuída em grande escala, sendo necessário planos de curto, médio e longo prazo para que sejam analisados os impactos desse tipo de geração para o sistema elétrico de potência, para a sociedade e para a economia em escala nacional e global. Para o sistema elétrico de potência, deve ser necessário estudo sobre as mudanças na infraestrutura como forma de minimizar futuros procedimentos de manutenção e o custo incluso para torna-lo rentável e lucrativo em um curto espaço de tempo. Já para a economia, que reflete no dia a dia da sociedade, é necessária revisão nas normas, procedimentos e tarifas das concessionárias do sistema elétrico, uma vez que independente do tipo de geração adotada, o caráter econômico do setor terá mudanças na precificação devido às mudanças na oferta de energia elétrica.

Por fim, atualmente o setor energético encontra apto a mudanças em suas características estruturais, no entanto é fundamental a discussão imparcial sobre os reais benefícios e malefícios dessa nova topologia, para, só assim, entender quais os reais desafios a serem enfrentados.

2.2 Impactos da elevada integração de geradores fotovoltaicos para o sistema elétrico de potência

A elevada integração de GDs no sistema elétrico gera impactos positivos e negativos para o sistema elétrico. Em um primeiro momento pode-se citar a diminuição do uso da infraestrutura de distribuição e transmissão de energia devido à nova topologia que possibilita a geração próxima ao consumidor. Atrelado ao fato da mudança topológica, há uma importante consideração acerca da eficiência energética do sistema, já que as distâncias de transmissão são minimizadas, as perdas do sistema também são reduzidas. Assim, esse fato indica que em um estado de alta integração de geração distribuída torna o sistema mais eficiente e econômico (MATOS; CATALÃO, 2013).

A independência da geração também promove maior confiabilidade e segurança ao setor elétrico. Como o uso da energia elétrica da geração distribuída fotovoltaica é feita de forma instantânea, sendo apenas o excedente não absorvido pela carga local inserido na rede elétrica, acontece que, no caso de faltas elétricas, o fornecimento de energia é mantido, devido à independência de fornecimento por parte do consumidor. Todavia, mesmo que possível o funcionamento, devido ao princípio do anti-ilhamento, exigido pelo Módulo 3, item 3.7, do PRODIST, as instalações em questão não permitem esse tipo de operação.

As vantagens técnicas associadas à implementação adequada de unidades de geração distribuída abrangem amplas e variadas situações. A melhoria da qualidade da energia disponibilizada aos utilizadores é um dos fatores mais importante neste contexto, tal como a redução das perdas do sistema. Atualmente, para um sistema de energia ser considerado bem desenvolvido, as perdas totais do sistema têm de ser bem inferiores a 10%. No entanto, deve-se ter noção que apenas com uma ótima localização e um dimensionamento adequado das instalações de GD se consegue obter resultados que satisfaçam os objetivos aos quais a integração de GD se propõe a resolver (MATOS; CATALÃO, 2013).

A GD se apresenta como uma forte solução para os problemas enfrentados pelo setor elétrico atualmente, em contrapartida, como citado em (MATOS; CATALÃO, 2013), uma alta inserção de GDFV sem o dimensionamento adequado e preparo do sistema elétrico para absorver-la pode gerar consequências negativas para a rede. Uma primeira problemática diz respeito ao dimensionamento da proteção do sistema, já que, inicialmente se tinha um fluxo unidirecional de potência, no caso de faltas ou valores não usuais de tensão e corrente devido à nova bidirecionalidade, os sistemas de proteção podem atuar em distonia com os fenômenos que se passam pela nova rede (GONÇALVES, 2004).

Importante destacar também que a alta inserção de harmônicos na rede contribui para a piora do perfil de tensão, além de que, por se tratar de geração distribuída com painéis fotovoltaicos, a geração monofásica pode vir a desbalancear as tensões e aumentar as correntes de neutro na rede, demonstrando piora na qualidade da energia e perda de eficiência energética do sistema. Outro fator a se considerar é referente ao fator de potência da rede, visto que, com o aumento da geração de energia, as potências injetadas na rede elétrica devem manter sua conformidade com os níveis já presente de forma a não piorar o fator de potência, já que é um importante indicativo de uso da rede para transporte de potencia real, passível de realizar trabalho, e não o uso do meio para transporte de potência reativa, responsável apenas por magnetizar e desmagnetizar elementos capacitivos e indutivos do sistema.

Por fim, tais fenômenos decorrem do aumento exacerbado da presença de GDFV sem o devido controle e dimensionamento da rede em geral, sendo possível a perda de relevantes valores de energia para os consumidores e danos na infraestrutura do setor de distribuição de energia elétrica.

2.3 Qualidade da Energia Elétrica

A disponibilidade da energia elétrica representa um incremento na qualidade de vida das populações. Em um primeiro momento em que se implanta um sistema de distribuição de energia elétrica, a população local imediatamente passa a constar com inúmeros benefícios, tanto do ponto de vista de maior conforto doméstico como de melhores

possibilidades de emprego e produção (MEHL, 2012).

A preocupação com a qualidade de energia elétrica é decorrente em parte da reformulação que o setor elétrico vem experimentando, para viabilizar a implantação de um mercado consumidor, no qual o produto comercializado passa a ser a própria energia elétrica. Parece evidente que o consumidor prefere adquirir a energia que apresenta parâmetros adequados de qualidade ao custo mais baixo possível. Nesse contexto, as operadoras de sistemas elétricos são estimuladas, tanto pelas agências reguladoras (ANEEL) como pelo próprio mercado, a prestar informações sobre as condições de operação ou fornecer detalhes acerca de eventos ocorridos e que afetaram os consumidores. Esse é um dos papéis do monitoramento e da análise da qualidade de energia elétrica (DECKMANN; POMILIO, 2017).

A qualidade da energia elétrica tem várias definições para descrever o mesmo conjunto de fenômenos que afetam a amplitude e a forma de onda da tensão e corrente. Uma definição é a frequência e severidade dos desvios na amplitude e forma de onda da tensão e da corrente. Outra definição diz que é qualquer problema na tensão, na corrente ou desvio na frequência que resulte em falha ou prejudique a operação dos equipamentos. Uma terceira definição afirma que um sistema elétrico com excelente qualidade da energia elétrica é caracterizado pelo fornecimento de energia em tensão com forma de onda senoidal pura, sem alterações em amplitude e frequência, como se emanasse de uma fonte de potência infinita. Quando se afirma que uma instalação elétrica tem qualidade de energia pobre, significa que a onda da tensão e/ou a onda da corrente elétrica têm suficientes desvios das normas a ponto de prejudicar o funcionamento ou levar à falha de equipamentos. Quando uma instalação elétrica tem boa qualidade de energia, significa que o nível dos desvios das normas é baixo e, portanto, os equipamentos funcionam sem problemas. Uma vez que a sensibilidade varia de um tipo de equipamento para outro, o que pode ser considerado qualidade de energia baixa para um equipamento pode ser aceitável para outro equipamento. Ainda assim, a confiabilidade do sistema de produção é afetada se os desvios em relação aos indicadores das regulamentações não são seguidos (ELOIR, 2016).

Por fim, a qualidade de energia elétrica esta relacionada tanto de forma subjetiva com a finalidade da instalação analisada, quanto em parâmetros gerais de conformidade do produto oferecido. Conclui-se que, a qualidade é avaliada conforme a legislação vigente indica as grandezas analisadas no fornecimento de energia para o bom funcionamento das cargas presentes no ponto de consumo analisado.

2.3.1 Índices de avaliação da qualidade de energia

A eletricidade é comercializada como um produto, de forma que a qualidade deste agrega valor ao que é oferecido ao consumidor, além de reduzir custos adicionais de

manutenção que devem ser fornecidos pelo "produtor".

A qualidade da energia elétrica é um fator dependente dos elementos que participam da sua produção e da forma como são usados, sendo assim, pode ser definido a partir da compatibilidade da fonte de energia com o equipamento elétrico que a utiliza. Em uma abordagem macro, a qualidade da energia elétrica pode ser avaliada a partir do perfil de tensão fornecido e a ausência de interrupção no fornecimento.

A preocupação com a qualidade da energia é algo que deve ser estudado de forma integrada entre gerador e fornecedor de energia, fabricante de equipamentos, projetista das instalações e o usuário da energia elétrica (MARTINHO, 2009).

Como em todos os setores que envolvem as aplicações de energia elétrica, há na eletrônica de potência (ciência que estuda as diferentes técnicas de processamento eletrônico da energia elétrica) o interesse de acompanhar a evolução dos conceitos de qualidade de energia, quais sejam: elevada eficiência (rendimento), reduzido volume (compactação), reduzida interferência eletromagnética (ruídos eletromagnéticos), elevado fator de potência (relação de utilização: Potência ativa(Watts)/Potência aparente(Volt-Ampère), baixa distorção harmônica (formas de ondas de corrente mais próximas da tensão de alimentação senoidal) e reduzido custo. Estes conceitos estão também intimamente vinculados à evolução dos equipamentos que se utilizam de fontes de alimentação, as denominadas fontes chaveadas (presentes em diversos equipamentos industriais, comerciais e residenciais, incluindo-se aí os microcomputadores), e, aos reatores eletrônicos para iluminação fluorescente, dispositivos estes ligados diretamente à rede de corrente alternada (CANESIN, 2001).

Contudo, avaliação da qualidade de energia elétrica, no que diz respeito ao perfil de tensão, pode ser analisada seguindo algumas tendências das grandezas pertencentes ao sistema elétrico que serão descritas nas sub sessões seguintes:

2.3.2 Tensão em Regime Permanente

O perfil de tensão ofertado para o consumidor é importante pois define a qualidade da energia no que diz respeito à confiabilidade e conformidade do sistema elétrico, uma vez que o perfil de tensão não deve apresentar faltas e deve esta conforme a legislação indica. O termo "regime permanente" compreende o intervalo de leitura da tensão em que não ocorrem distúrbios elétricos capazes de inviabilizar a leitura (ANEEL, 2018). No módulo 8 do PRODIST, tem-se que o conjunto de leituras para gerar os indicadores individuais deverá compreender o registro de 1008 leituras válidas, obtidas em intervalos consecutivos de dez minutos cada.

Para a análise da tensão em regime permanente utiliza-se um gráfico semanal com as 1.008 leituras válidas. Em seguida, faz-se uma análise sob a forma de gráfico de

histograma dos registros de tensão por fase.

2.3.3 Fator de Potência

No regime de corrente alternada, há a presença de duas componentes de potência, a ativa que é capaz de realizar trabalho útil e a reativa, que é usada para energizar componentes indutivos e capacitivos no sistema. A partir desse ponto de vista, pode-se referenciar a relação entre as duas potências usando o fator de potência, que é a relação entre a potência ativa do sistema e a potência complexa. Conclui-se então que um alto valor do fator de potência (próximo ao unitário) representa boa saúde para o sistema elétrico, visto que a potência requerida é usada para realizar trabalho ativo (NILSSON; RIEDEL,). De acordo com a ANEEL, o valor do fator de potência para estar em conformidade com as diretrizes de qualidade de energia elétrica é definido no PRODIST módulo 8 como: Para unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 (noventa e dois centésimos) e 1,00 (um) indutivo ou 1,00 (um) e 0,92 (noventa e dois centésimos) capacitivo, de acordo com regulamentação vigente. (ANEEL, 2018) (NILSSON; RIEDEL,).

2.3.4 Desequilíbrio de Tensão

Um sistema elétrico é considerado equilibrado caso as tensões trifásicas apresentem mesmo módulo e são defasadas de 120° . Portanto, caso o sistema apresente diferença entre as tensões, seja em módulo ou em fase previamente explicada, considera-se o mesmo desequilibrado. Todavia, o desequilíbrio é a condição na qual as fases apresentam diferentes valores de tensão tanto em módulo como em fase.

No Brasil, o valor de referência nos barramentos do sistema de distribuição, com exceção da BT, deve ser igual ou inferior a 2%. No entanto, normas internacionais como a EN - 50160 ou a série IEC 1000-3-x estabelecem o limite de 2% para a baixa e a média tensão e 1% para a alta tensão. Esse valor serve para referência do planejamento elétrico em termos de QEE (ROCHA, 2014).

2.3.5 Flutuação de Tensão

A flutuação de tensão é uma variação aleatória, repetitiva ou esporádica, do valor eficaz da tensão. Assim, a determinação da qualidade da tensão de um barramento do sistema de distribuição, quanto à flutuação de tensão, tem por objetivo avaliar o incômodo provocado pelo efeito da cintilação luminosa no consumidor final que tenha seus pontos de iluminação alimentados em baixa tensão (GRANDI, 2016).

2.3.6 Variação de Frequência

Com o desenvolvimento da eletrônica de potência, a introdução de harmônicos na rede esta cada vez mais presente devido ao elevado uso de inversores de frequência. O problema de haver diferentes frequências na rede elétrica é que, há uma poluição da energia transmitida com diferentes sinais que provocam alteração na característica do sinal alternado.

Com isso, como observado, um sinal distorcido é indicador de má qualidade de energia elétrica, uma vez que causa o aumento de reativos e deformação no formato de onda (ZANETTA, 2006).

2.4 Impactos na qualidade da energia

Anteriormente mencionado, o sistema elétrico vigente foi projetado pensando-se no modelo padrão de fluxo de potência unidirecional, onde que, as normas energéticas, regulações e análises foram feitas pensando nesse tipo de topologia.

Não obstante, com a inserção de pontos de geração distribuída na rede, ocorre a possibilidade da mudança de direção do fluxo de potência, onde que há o aparecimento de possíveis problemas para o sistema elétrico como alterações no fluxo de potência, perfil de tensão na rede, valores diferentes de perdas e introdução de harmônico, visto que não foi projetado para operar com essa dupla direcionalidade.

Os benefícios obtidos com a utilização de pontos de geração de energia elétrica próximos aos centros de cargas, atentam-se à aumentar a confiabilidade da energia local, além de atender à demanda dos consumidores próximos.

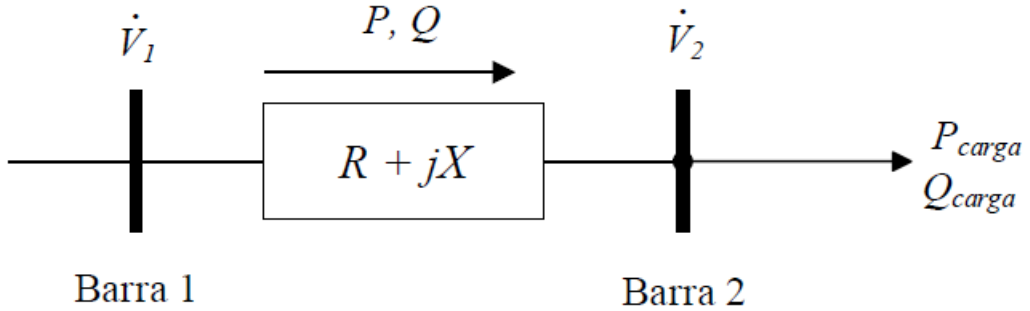
Dependendo da sua localização, potência e modo de operação, a GD pode contribuir para redução das perdas na distribuição de energia e também auxiliar na melhoria do perfil de tensão de alimentadores. Em locais onde o aumento da demanda de energia é superior à taxa de reforço na rede, a integração da GD pode contribuir com o alívio do carregamento do alimentador, postergando o investimento a ser realizado pelo proprietário da rede (VARGAS, 2018).

O perfil de tensão na rede de distribuição é vista a partir da variação nos níveis de tensão que ocorre com o aumento da distancia em relação à subestação mais próxima. Acontece que, com o aumento da distância, se tem um aumento da impedância dos cabos de ligação da rede e com isso, uma queda de tensão a eles relacionada. Todavia, como forma de regular o perfil de tensão, são usados dispositivos ao longo da rede, que, no caso da geração distribuída, pode-se usar pontos de GD com o objetivo de produzirem a mesma função dos dispositivos reguladores comumente utilizados.

Para exemplificar o usas GDs para melhorar o perfil de tensão, considere o sistema

representado em 2, onde duas barras infinitas, *barra1* com tensão \dot{V}_1 e *barra2* com tensão \dot{V}_2 , possuem uma impedância $R + jX$ e há transferência de potência ativa P e potência reativa Q para a carga ligada à *barra2*.

Figura 2 – Sistema genérico de distribuição de duas barras infinitas



Fonte: Adaptado de VARGAS, 2018

A equação 2.1 define o valor de potência transferida em 2.

$$P + jQ = \dot{V}_1 I^* \quad (2.1)$$

Isolando a corrente na equação 2.1, obtemos 2.2:

$$I = \frac{P - jQ}{\dot{V}_1} \quad (2.2)$$

Com 2.2 e usando a Lei de Ohm, reescreve-se a tensão na *barra1* como indicado em 2.3:

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 + \frac{P - jQ}{\dot{V}_1} (R + jX) \quad (2.3)$$

Agora, usando 2.3 reescreve-se a equação em forma das quedas de tensão e expandindo a forma complexa, temos que:

$$\Delta \dot{V} = \dot{V}_1 - \dot{V}_2 = \frac{P - jQ}{\dot{V}_1} (R + jX) \quad (2.4)$$

$$\Delta \dot{V} = \frac{PR + QX}{\dot{V}_1} + j \frac{PX - QR}{\dot{V}_1} \quad (2.5)$$

Usando a equação 2.5 e considerando o defasamento de \dot{V}_1 e \dot{V}_2 muito pequeno, com \dot{V}_1 referenciado em 0° , pode-se assumir que:

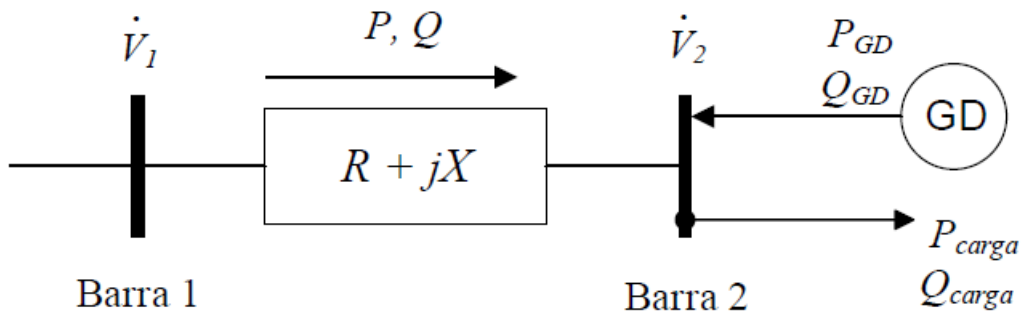
$$\Delta \dot{V} \approx \frac{PR + QX}{\dot{V}_1} \quad (2.6)$$

Agora, considerando \dot{V}_1 como a tensão de base do sistema, conclui-se que:

$$\Delta\dot{V} \approx PR + QX \quad (2.7)$$

Conforme as considerações e a equação 2.7 obtida, analisa-se o caso da figura 3 para reescrever 2.7.

Figura 3 – Sistema genérico de distribuição de duas barras infinitas com GD



Fonte: Adaptado de VARGAS, 2018

Dessa forma, a equação 2.8 descreve o comportamento do sistema, agora com GD:

$$\Delta\dot{V} \approx R(P_{Carga} - P_{GD}) + X(Q_{Carga} - Q_{GD}) \quad (2.8)$$

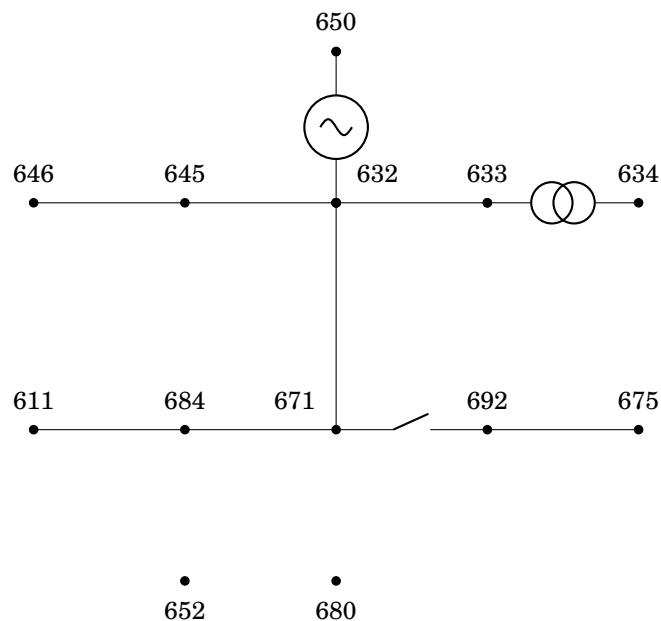
A partir da equação 2.8, é possível concluir que o valor da queda de tensão na linha pode ser regulada com a injeção de potência ativa e reativa pela GD. Outro fato interessante é a capacidade de se mudar as tensões das barras a partir da mudança de sentido do fluxo de potência, de forma que, mostra-se possível controlar as variáveis de corrente, tensão e fator de potência com o uso de pontos de geração distribuída e com controle da potência que fornecem à rede.

3 Metodologia

3.1 Introdução

A partir dos dados fornecidos pela IEEE, foi possível modelar o sistema de treze nós, representado em 4, usando o *software* Matlab e sua ferramenta de simulação, o Simulink, como apresentado em (VARGAS, 2018, p. 120).

Figura 4 – Diagrama unifilar do alimentador teste de 13 nós do IEEE - A13N



Fonte: Adaptado de MENDES, 2018

Com o modelo implementado, simula-se as possibilidades do uso de painéis fotovoltaicos aplicados aos pontos de consumo de energia elétrica, conforme indica a legislação brasileira. O uso da ferramenta computacional possibilita o rearranjo das várias possibilidades de ligação dos painéis e uma análise sistemática das variáveis elétricas para as diferentes combinações da geração distribuída.

Além disso, com os resultados das simulações, é possível verificar de maneira gráfica os impactos da inserção das GD por painéis fotovoltaicos na rede elétrica e quantificar o estudo respaldado pela qualidade das simulações de modelos reais e aplicáveis.

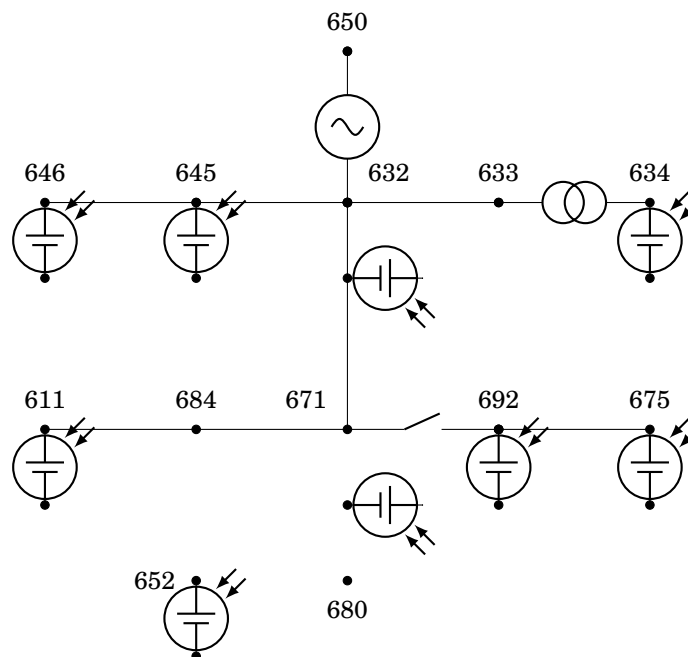
Contudo, nesse capítulo, é informado o processo de modelagem adotado para fornecer os resultados analisados, tanto quanto as ferramentas usadas para as análises do desenvolvimento do presente trabalho. Ressalta-se que, dos índices usados para qualificar a qualidade do sinal, foram abordadas as análises dos fatores de potência em vários pontos

da rede, assim como o desequilíbrio de tensão, uma vez que foram feitas análises estáticas de diversas topologias distintas.

3.2 Posicionamento dos painéis fotovoltaicos

De acordo com a legislação brasileira, os pontos de inserção das GDFV foram concentrados nos pontos onde possuem cargas ligadas a rede, dessa forma resultando em nove nós ligados aos pontos de consumo.

Figura 5 – Diagrama unifilar com pontos de aplicação de GDFV



Fonte: Adaptado de MENDES, 2018

3.3 Modelagem dos geradores fotovoltaicos

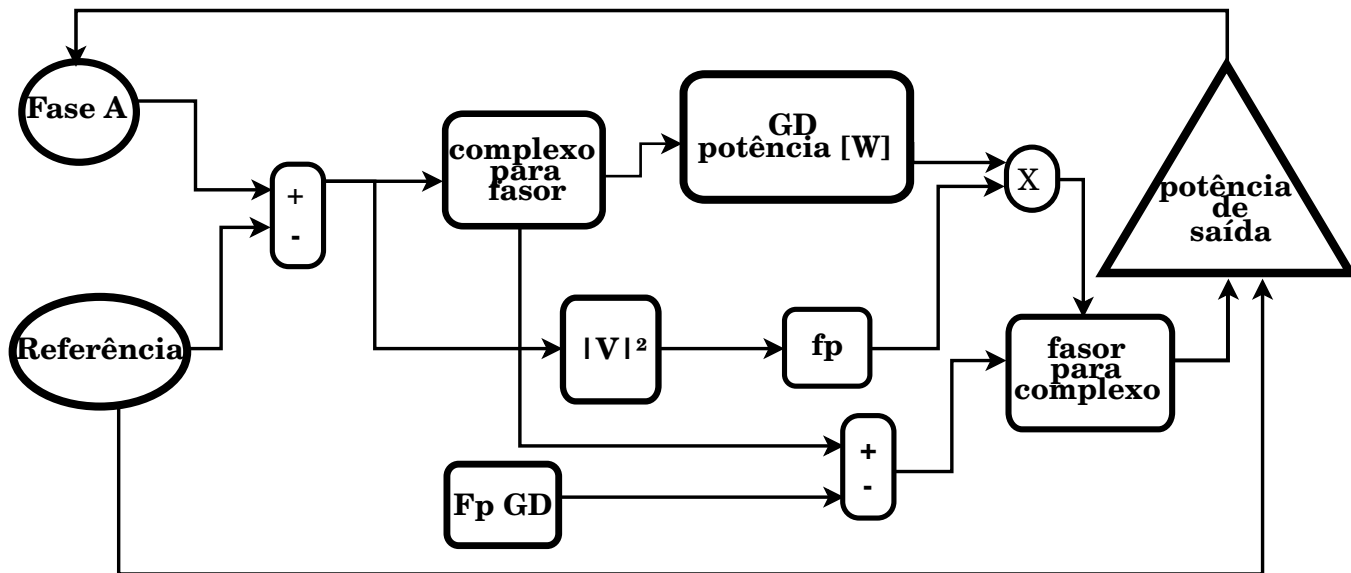
O modelo de painel fotovoltaico pode se concentrar nas características dos conjuntos de módulos, todavia, nesse caso é feita uma análise pautada nas particularidades do arranjo, onde são aplicadas algumas simplificações e aproximações, que, por mais que não sejam fieis ao desempenho dos painéis, ainda assim são modelos úteis para análises econômicas desse tipo de geração.

Há também o modelo baseado nas estruturas dos inversores de frequência, no entanto direciona o interesse da simulação para a introdução da energia gerada à rede elétrica e os impactos dessa conversão CA-CC para a rede.

Contudo, o modelo adotado é mais geral e combina os arranjos fotovoltaicos com os conversores de forma a obter de maneira simplificada um componente capaz de interagir

com fidelidade ao fluxo de potencia da rede e validar a simulação. Visto isso, foi indicado pouco tempo para a simulação e análise dos resultados pontuais, análise estática, até atingir a estabilidade do sistema.

Figura 6 – Modelo monofásico simplificado de painel fotovoltaico adotado



Fonte: Adaptado de VARGAS, 2018

3.4 Simulação

A análise da inserção de geração distribuída com painel fotovoltaico em grandes quantidade foi feita no alimentador em questão, usando o valor máximo de nove painéis em um total de treze nós, devido aos pontos de carga na rede, conforme a legislação brasileira afirma.

Importante destacar que os painéis fotovoltaicos foram alocados de forma a introdução de energia em 1, 2 ou 3 fases, dinamizando ainda mais a estrutura da rede analisada e todos com fator de potência unitário para restringir a análise aos valores de potência ativa na rede. Como é possível observar em 1 na tabela a seguir, foram mapeados a forma a qual cada uma das GD foi conectada a rede.

Outro ponto importante a se destacar é com relação às diferentes possibilidades de ligação. Primeiramente, dependendo da incidência solar sobre os painéis, é possível obter diferentes valores de potência gerada, visto o grande número de possibilidade, o projeto em questão buscou analisar apenas a possibilidade do painel estar inativo ou estar ativo funcionando com a máxima eficiência.

As GDs presentes na rede, no total de 9, podem ser combinadas aleatoriamente gerando um total de 512 possibilidades distintas de utilização de GDFV no alimentador

Tabela 1 – Ligação das GDs à rede elétrica

GD	Nº de ϕ	ϕ s
632	3 ϕ	ABC
634	3 ϕ	ABC
645	1 ϕ	B
646	2 ϕ	BC
671	3 ϕ	ABC
611	1 ϕ	C
652	2 ϕ	AC
692	3 ϕ	ABC
675	3 ϕ	ABC

Fonte: Próprio autor, 2019

de 13 nós. Acontece que, a análise de diversas configurações distintas apresenta uma qualidade muito baixa de informação a ser processada, dificultando o processo de análise de dados por meios gráficos.

Como alternativa para a visualização dos resultados e discussão crítica acerca de mudanças consistentes, foram selecionados 10 exemplos pertinentes à análise, representados em 2, onde 0 indica o estado desligado da GD e 1 indica o estado ligado, assim é possível conferir a forma e ordem a qual as unidades de GDs foram ligadas no sistema:

Tabela 2 – Exemplos de painéis fotovoltaicos ligados ao alimentador

Nó	632	634	645	646	671	611	652	692	675
Estado	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Estado	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Estado	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Estado	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Estado	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Estado	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Estado	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Estado	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Estado	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Estado	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fonte: Próprio autor, 2019

A partir dos 10 casos escolhidos, pode-se ter uma análise criteriosa das grandezas elétricas e os impactos da inserção de GDs no sistema, uma a uma. Dessa forma, é possível comparar os níveis de tensão, corrente, potência ativa, reativa e o fator de potência em todos os ramos da rede. Com isso, a análise é pautada na mudança das variáveis de controle da rede, com a dinâmica de inserção de centros de geração distribuída.

3.5 Tratamento dos dados simulados

A partir do modelo adotado na Figura 5, são obtidos resultados de V e I nas fases do sistema em diferentes configurações de GDs conectadas e desconectadas à rede. Na Tabela 3 estão indicados os pontos onde se encontram os medidores, responsáveis pela coleta de dados.

Tabela 3 – Identificação dos medidores atuantes na simulação

Identificação dos Medidores											
611	636	632	33	632	45	632	71	633	634	645	646
650	652	671		671	92	675		680	684	692	

Fonte: Próprio autor, 2019

A potência complexa em um sistema é definida como:

$$S = VI^* \quad (3.1)$$

A partir da definição, usa-se os valores de tensão e corrente obtidos pelos medidores na Equação (3.2) para se obter a potência trifásica nos pontos medidos.

$$S_{3\phi} = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* \quad (3.2)$$

Além disso, conhecendo a relação apresentada em (3.3), pode-se obter as potências ativa P e reativa Q :

$$S_{3\phi} = P_{3\phi} + jQ_{3\phi} \quad (3.3)$$

Com isso a análise se atenta a avaliar os valores de P e Q para cada uma das configurações de rede com as GDs, a fim de se obter um comparativo relevante para situações diversas.

$$fp = \frac{|P|}{|S|} \quad (3.4)$$

Por fim, de posse da relação (3.4) são obtidos os fatores de potência nos pontos alvos da rede a serem analisados. Ademais, são feitas comparações gráficas a fim de melhorar a qualidade da análise dos dados e tiradas as conclusões pertinentes ao presente trabalho.

3.6 Método para análise do desequilíbrio de tensão

Considerando a teoria de componentes simétricas, reescreve-se o sistema trifásico em três componentes:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_+ \\ V_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Onde:

$$a = e^{j120^\circ} \quad (3.6)$$

Observa-se que as grandezas usadas para a análise são grandezas de linha, logo é necessário transformar os valores de tensão obtidos na simulação, uma vez que os medidores apresentam os valores de tensão de fase. Dessa forma, utiliza-se a relação (3.7) para transformar as tensões:

$$V_L = \sqrt{3}V_\phi \quad (3.7)$$

Com os valores das componentes simétricas, o desequilíbrio é calculado usando a expressão (3.8), de acordo com (ANEEL, 2018):

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \times 100 \quad (3.8)$$

3.7 Método para análise da corrente de neutro

A partir do circuito exemplo representado na Figura 7, nota-se que o cabo neutro é usado como retorno para as correntes I_a , I_b e I_c .

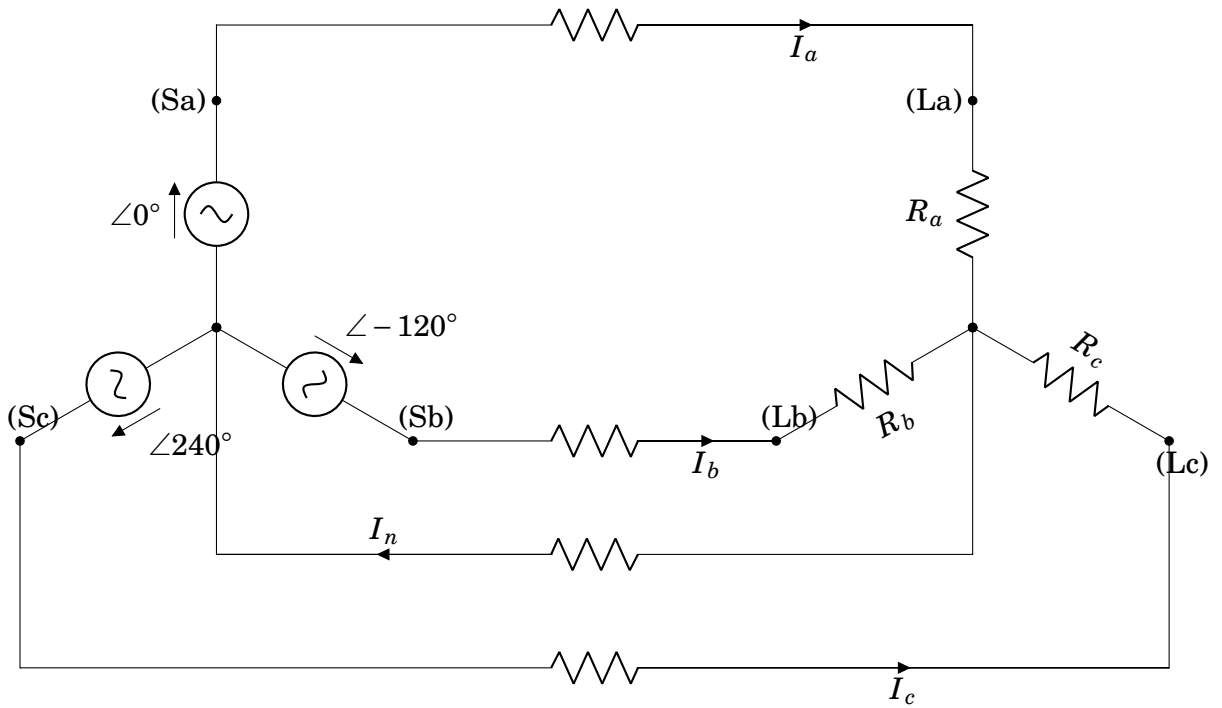
Considerando o sistema trifásico equilibrado, observa-se a representação fasorial das correntes em 8.

Dessa forma, a Equação (3.9) é satisfeita e tem seu resultado fasorial representado em 9:

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (3.9)$$

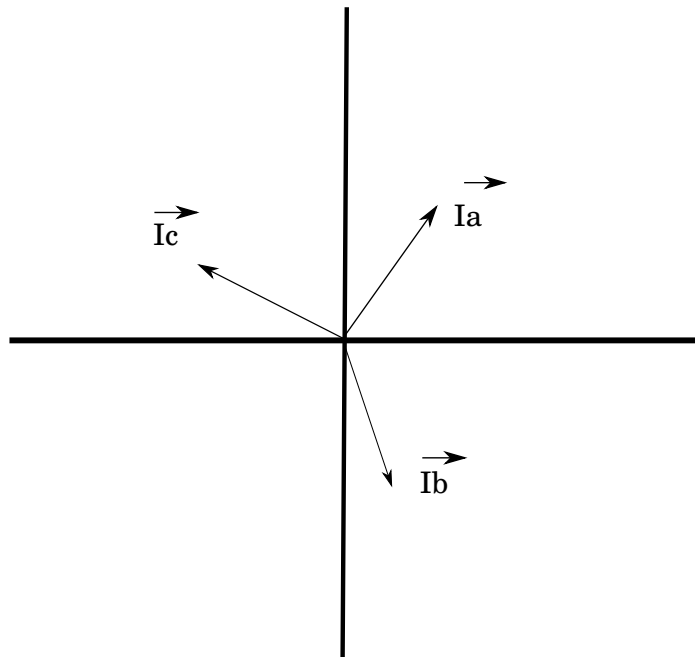
Na Figura 9, é representado um sistema trifásico com as referentes correntes na forma polar, onde que cada uma carrega uma grandeza de módulo e fase. Nota-se que a soma delas em um sistema equilibrado apresenta resultado nulo, uma vez que todas possuem mesmo módulo e estão defasadas de 120° , como representado abaixo.

Figura 7 – Circuito trifásico teórico com representação da corrente de neutro em um sistema trifásico



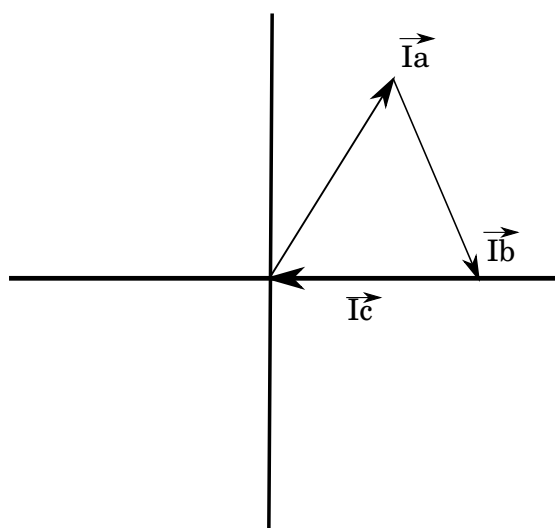
Fonte: Próprio autor, 2019

Figura 8 – Representação fasorial das correntes do sistema



Fonte: Próprio autor, 2019

Figura 9 – Representação fasorial da soma das correntes do sistema balanceado



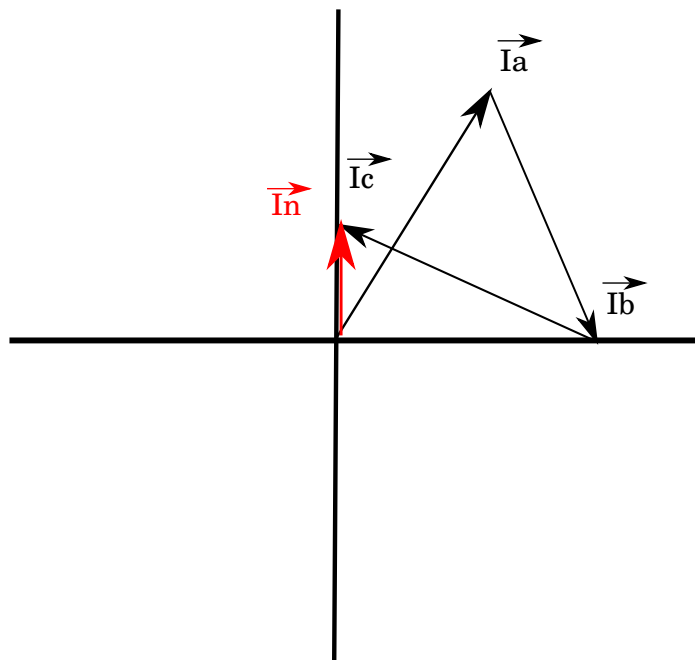
Fonte: Próprio autor, 2019

Todavia, para o caso de um sistema desbalanceado, há uma dissonância nos valores de módulo e fase das correntes trifásicas. Isso implica que, a Equação (3.9) não é mais satisfeita e há a presença de uma corrente residual que retorna à fonte pelo condutor neutro.

$$I_a + I_b + I_c = I_n \quad (3.10)$$

A partir do resultado da Equação (3.10), a figura 10 exemplifica visualmente o aparecimento da corrente de neutro usando a soma vetorial indicada em 3.10.

Figura 10 – Representação fasorial da soma das correntes do sistema desbalanceado



Fonte: Próprio autor, 2019

Com isso, a Equação (3.10) sugere que a corrente de neutro é um importante indicativo de desbalanceio do sistema trifásico, podendo ser um índice de queda na qualidade de energia do sistema.

4 Resultados

4.1 Fator de Potência

A seguir, apresenta-se a Tabela 4 contendo os valores de fator de potência para cada uma das configurações previamente mencionadas e identificadas em cada medidor da rede.

Tabela 4 – Comparação dos fatores de potência

GDs ligadas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
611	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1	1	0.99	0.99
636	0.92	0.91	0.88	0.87	0.86	0.66	0.53	0.47	0.38	0.18
632 33	0.8	0.8	0.11	0.1	0.1	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08
632 45	0.84	0.84	0.84	0.65	0.38	0.38	0.39	0.38	0.38	0.37
632 71	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.82	0.71	0.65	0.53	0.39
633	0.8	0.8	0.11	0.11	0.1	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08
634	0.81	0.81	0.12	0.12	0.12	0.1	0.1	0.1	0.1	0.09
645	0.87	0.87	0.87	0.87	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
646	0.87	0.87	0.87	0.87	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.63
650	0.9	0.89	0.87	0.85	0.84	0.65	0.52	0.47	0.38	0.17
652	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.21	0.24	0.2
671	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.88	0.8	0.75	0.67	0.31
671 92	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
675	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.44
680	0.56	0.57	0.57	0.57	0.58	0.58	0.61	0.59	0.61	0.57
684	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97	0.8	0.96	0.96	0.96
692	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.01

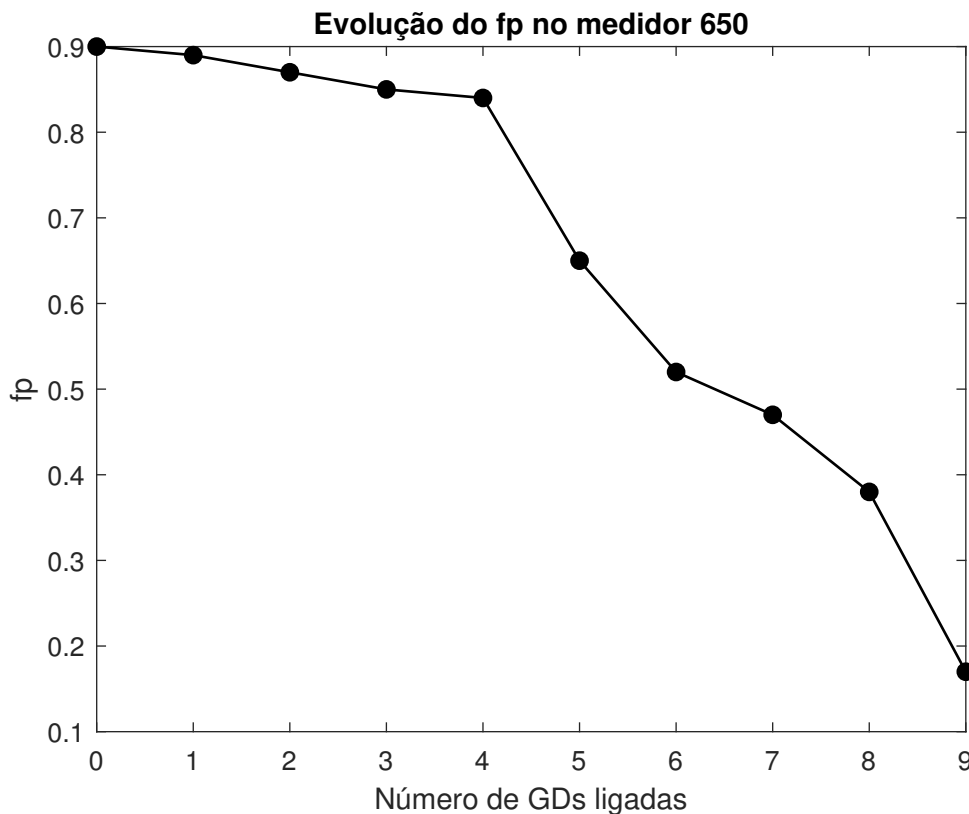
Fonte: Próprio autor, 2019

Como pode-se observar na tabela 4, de uma forma geral, com o aumento da geração de potência ativa acompanhado da inercia dos valores de reativos na rede, houve um fenômeno geral de piora dos fatores de potência nos pontos de medição na rede. Tal fato é explicado devido à configuração bidirecional do novo fluxo de potência, onde que, com a geração de energia próxima às unidades consumidoras, há um decréscimo de potência ativa na medição devido à subtração entre as potências. Por fim, conclui-se que a piora nos valores do fator de potência é devido ao aumento no número de GDs sem o devido preparado e dimensionamento da rede e configuração das pequenas unidades geradoras.

Para exemplificar graficamente as alterações sofridas no fator de potência, destaca-se os resultados do medidor 650, apresentados na Figura 11, onde que é possível ver a queda do fator de potência com o aumento contínuo no número de GDs. Em um primeiro

momento, onde não haviam pontos de GD, o medidor 650 apresentava valores de fp igual a 0,9, no entanto, nota-se uma queda do valor até atingir valor menor do que 0,2, considerado muito baixo para um fator de potência de uma rede de distribuição do sistema elétrico, de acordo com (ANEEL, 2018).

Figura 11 – Evolução do fator de potência no medidor 650 com o aumento da inserção de GDs no sistema



Fonte: Próprio autor, 2019

Por fim, um fator de potência baixo é impactante no que tange a qualidade de energia. Dessa forma, como alternativa para melhora dos índices aferidos, seria a regulação dos valores de reativos que podem ser inseridos na rede através de configurações de inversores que interligam os sistemas de geração fotovoltaicas ao sistema de energia elétrica.

4.2 Desequilíbrio de tensão

A rede elétrica analisada no presente trabalho consta com a presença de focos de GD ligados à uma única fase, à duas fases e à três fases, por conseguinte, é esperado que ocorra alteração no balanceamento de tensão na rede, visto que não há ordem sobre como as GDs devem se conectar - com prioridade de fase ou com geração ligada nas três fases. Portanto, é de se esperar que haja desbalanço entre as tensões do sistema elétrico ou

melhoria nos valores já desbalanceados do sistema. Importante ressaltar que os valores de desequilíbrio nos medidores 611, 632 45, 645, 646 e 684 foram desconsiderados devido à inserção de potência em duas ou apenas uma fase.

Tabela 5 – Comparação dos desequilíbrios [%]

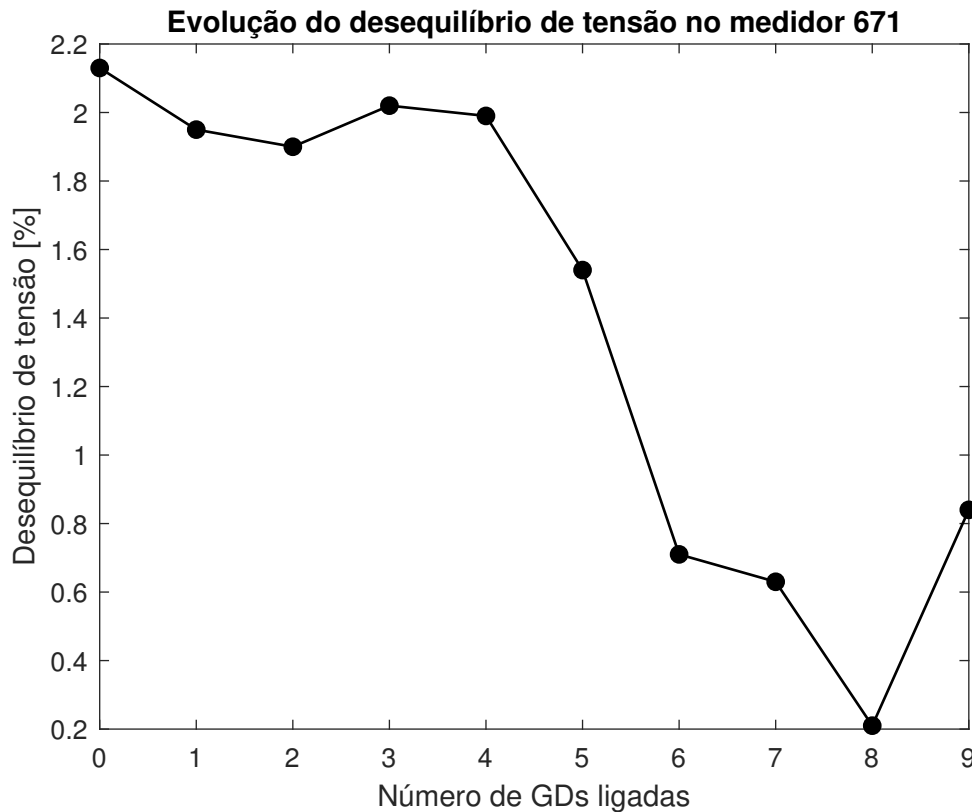
GDs ligadas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
636	1	0.86	0.82	0.89	0.84	0.61	0.16	0.19	0.09	0.59
632 33	1	0.86	0.82	0.89	0.84	0.61	0.16	0.19	0.09	0.59
632 71	1	0.86	0.82	0.89	0.84	0.61	0.16	0.19	0.09	0.59
633	1	0.86	0.82	0.88	0.83	0.6	0.15	0.19	0.1	0.59
634	1.01	0.88	0.89	0.94	0.88	0.66	0.19	0.26	0.12	0.6
650	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
652	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
671	2.13	1.95	1.9	2.02	1.99	1.54	0.71	0.63	0.21	0.84
671 92	2.13	1.95	1.9	2.02	1.99	1.54	0.71	0.63	0.21	0.84
675	2.25	2.07	2.01	2.15	2.12	1.67	0.83	0.76	0.33	0.91
680	2.13	1.95	1.9	2.02	1.99	1.54	0.71	0.63	0.21	0.84
692	2.13	1.95	1.9	2.02	1.99	1.54	0.71	0.63	0.21	0.84

Fonte: Próprio autor, 2019

De posse dos dados da tabela 5, é possível concluir que, de uma forma geral, houve uma diminuição nos valores de desequilíbrio de tensão. Onde havia desequilíbrio superior à 2%, considerado índice ruim para a qualidade de energia do consumidor residencial, foi possível observar diminuição e adequação do desequilíbrio naqueles pontos da rede, além de que, para valores acima de 2% houve também a redução do desequilíbrio, no entanto a mesma não foi suficiente para se adequar ao exigido pela PRODIST.

Outro ponto importante a ser abordado é sobre a aplicação prática do desequilíbrio de tensão para a qualidade de energia, pois o consumidor que utiliza um serviço trifásico deve ter a possibilidade de usar qualquer uma das três fases esperando os mesmos valores de tensão em cada uma das três de forma a não comprometer as atividades as quais ele requiere o uso da energia elétrica. Ademais, nos pontos da rede onde houveram aumento no desequilíbrio de tensão, os mesmo já estavam acima da tolerância de 2%, configurando uma piora no quadro, mas pouco efetiva se comparada à situação posterior. Pode-se concluir que com o aumento do número de GDs os fenômenos observados tendem a se acentuar seguindo o mesmo comportamento inicial de melhora ou piora do indicador.

Figura 12 – Evolução do desequilíbrio de tensão no medidor 671 com o aumento da inserção de GDs no sistema



Fonte: Próprio autor, 2019

O medidor 671 foi representado em 12 devido ao comportamento do seu desequilíbrio com o aumento no número de GDs ligadas à rede elétrica analisada. Primeiramente, é necessário notar que antes da inserção da primeira GD, o desequilíbrio obtido pelo medidor era de 2,2% até que, com o aumento no número de pontos de geração, o mesmo cai para próximo de 0,2% até que sofre um pequeno aumento com a nona GD, todavia, permanece com valores aceitáveis de desequilíbrio, que caracteriza uma melhora geral no quadro da qualidade de energia.

4.3 Desequilíbrio de corrente

Assim como o desequilíbrio de tensão, a corrente residual no sistema também é indicativo de qualidade de energia, uma vez que, em um sistema balanceado a mesma seria nula, a existência de corrente de neutro indica um desbalanceio nos valores das correntes de fase. Com o aumento da inserção de potência no sistema elétrico, as potências de valores distintos, inseridas em fases distintas podem agravar ou sanar os problemas de desbalanceamento de correntes. A partir dos dados das tabelas 6 e 7, pode-se analisar os impactos da geração distribuída com elevada interação na rede elétrica e as consequências para o sistema elétrico.

Tabela 6 – Comparação das Correntes de Neutro [A]

GDs ligadas	0	1	2	3	4
611	92.20/122.46°	92.47/123.14°	92.71/123.37°	92.28/123.36°	92.27/123.59°
636	156.22/22.60°	184.62/8.50°	162.29/10.50°	239.49/27.06°	267.06/23.21°
632 33	23.36/-37.51°	22.53/-38.83°	15.61/-114.32°	17.31/-112.88°	17.62/-114.51°
632 45	121.71/-158.36°	122.06/-158.27°	122.00/-158.01°	72.87/147.54°	45.80/127.10°
632 71	269.28/20.58°	280.65/15.92°	282.09/16.40°	283.56/15.65°	282.35/15.50°
633	23.36/-37.51°	22.53/-38.83°	15.61/-114.32°	17.31/-112.89°	17.62/-114.51°
634	202.52/-37.48°	195.35/-38.80°	135.25/-114.30°	149.94/-112.87°	152.62/-114.49°
645	0.01/-90.01°	0.01/-89.71°	0.01/-89.62°	0.01/-88.47°	34.65/-3.11°
646	0.00/0.00°	0.00/0.00°	0.00/0.00°	0.00/0.00°	34.65/-3.11°
650	156.22/22.60°	184.62/8.50°	162.29/10.50°	239.49/27.06°	267.06/23.21°
652	84.04/-38.86°	83.81/-38.94°	84.09/-38.53°	84.40/-38.79°	84.35/-38.89°
671	259.87/18.72°	255.85/18.73°	257.27/19.19°	258.89/18.42°	257.65/18.26°
671 92	208.63/23.31°	205.38/23.34°	206.53/23.83°	208.05/22.97°	207.08/22.80°
675	253.21/10.59°	250.85/10.49°	251.84/10.95°	253.76/10.47°	253.19/10.32°
680	0.00/-60.85°	0.00/-60.38°	0.00/-60.09°	0.00/-60.07°	0.00/-59.92°
684	29.75/57.57°	28.80/59.45°	29.12/59.49°	28.53/58.18°	28.06/58.61°
692	208.63/23.31°	205.38/23.34°	206.53/23.83°	208.05/22.97°	207.08/22.80°

Fonte: Próprio autor, 2019

Os dados obtidos em 6 e 7 apresentam um comportamento de melhora no perfil da corrente de neutro nos medidores onde a geração fotovoltaica foi usada para reduzir a demanda por potência em uma fase em detrimento de outra. No entanto, no caso onde havia equilíbrio entre fases, a inserção de potência monofásica, culminou em uma piora dos índices da corrente de neutro devido ao agravamento do desbalanceio. Sendo assim, a geração distribuída fotovoltaica sem o devido dimensionamento e organização pode também piorar os valores das correntes residuais em diversos pontos do sistema, assim como pode melhorar seus índices, dependendo de como é ajustada para operar, se em conformidade com o sistema ou de maneira aleatória sendo dada certa liberdade de instalação ao consumidor.

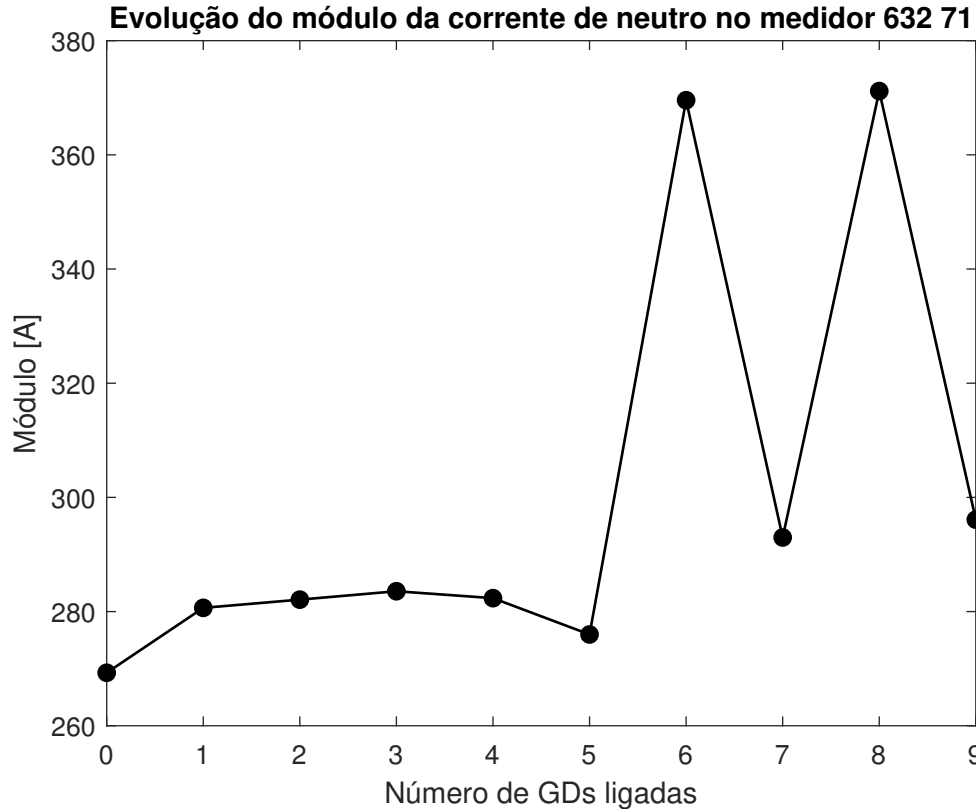
A Figura 14 apresenta um fato interessante com aplicações pertinentes às proteções do sistema elétrico. Pode-se perceber que o sentido da corrente no medidor 632 71 foi alterado, assim, dispositivos de proteção direcionais como disjuntores devem ser

Tabela 7 – Continuação da comparação das Correntes de Neutro [A]

GDs ligadas	5	6	7	8	9
611	93.52/125.48°	115.53/-63.51°	114.09/-64.08°	112.01/-62.89°	104.58/-62.86°
636	261.90/25.17°	333.10/-10.21°	257.96/-10.97°	329.34/-23.33°	247.88/-59.65°
632 33	16.99/-111.03°	16.00/-124.12°	14.92/-119.33°	14.72/-126.55°	10.79/-119.35°
632 45	45.99/128.51°	46.01/128.36°	46.18/127.21°	46.17/127.22°	46.83/123.83°
632 71	275.99/17.16°	369.57/-14.50°	292.98/-16.61°	371.17/-26.68°	296.10/-59.79°
633	16.99/-111.03°	16.00/-124.12°	14.92/-119.33°	14.72/-126.55°	10.79/-119.35°
634	147.09/-111.01°	138.53/-124.07°	129.21/-119.28°	127.51/-126.48°	93.56/-119.27°
645	34.51/-1.99°	35.20/-1.38°	35.12/-1.19°	35.46/-0.93°	35.66/0.16°
646	34.51/-1.99°	35.20/-1.38°	35.12/-1.19°	35.46/-0.92°	35.66/0.17°
650	261.90/25.17°	333.09/-10.21°	257.96/-10.97°	329.34/-23.33°	247.88/-59.65°
652	85.69/-37.22°	83.82/-37.40°	48.44/-104.12°	48.32/-106.03°	48.46/-100.53°
671	251.00/19.85°	342.26/-15.40°	265.75/-18.03°	346.06/-28.70°	284.13/-64.99°
671 92	209.76/24.68°	191.96/25.72°	197.42/27.25°	223.34/-0.05°	96.31/-70.18°
675	256.38/12.12°	242.06/12.00°	245.68/13.37°	238.65/13.26°	58.93/-42.10°
680	0.00/-57.97°	0.00/-56.18°	0.00/-56.28°	0.00/-55.39°	0.00/-54.25°
684	28.09/60.19°	194.30/-52.56°	154.31/-75.72°	150.89/-75.53°	145.93/-74.56°
692	209.76/24.68°	191.96/25.72°	197.42/27.25°	223.34/-0.05°	96.31/-70.18°

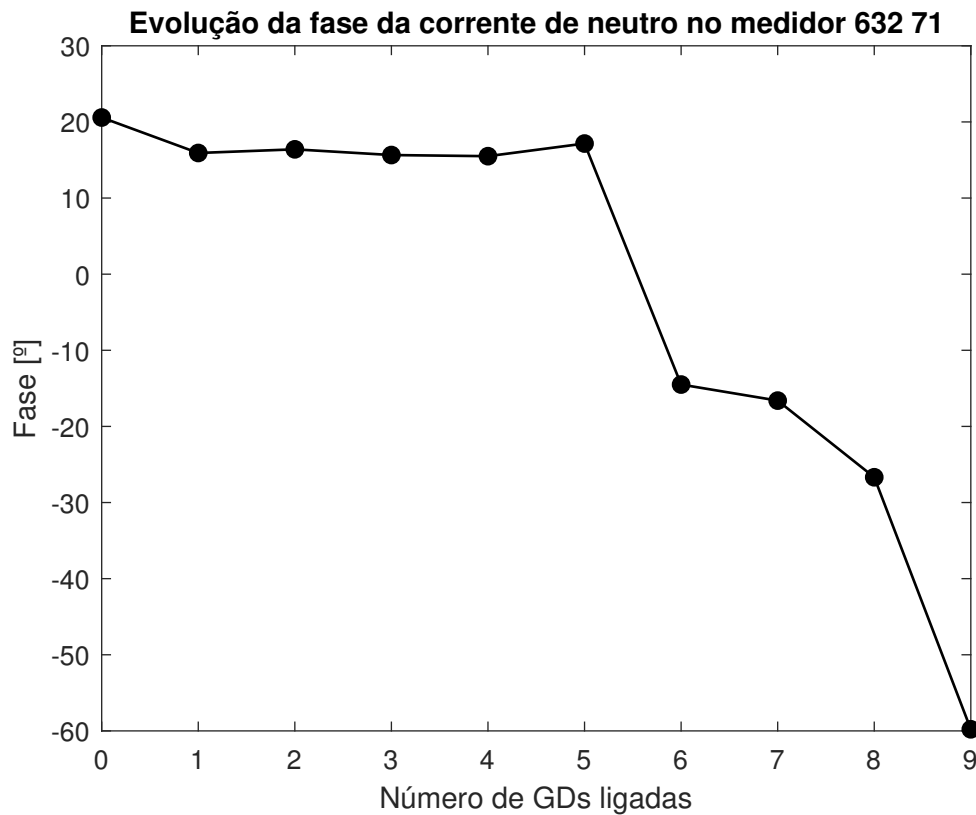
Fonte: Próprio autor, 2019

Figura 13 – Evolução do módulo da corrente de neutro no medidor 632 71 com o aumento da inserção de GDs no sistema



Fonte: Próprio autor, 2019

Figura 14 – Evolução da fase da corrente de neutro no medidor 632 71 com o aumento da inserção de GDs no sistema



Fonte: Próprio autor, 2019

readequados visando permanecerem coerentes às mudanças da topologia da rede.

Para exemplificar a piora na corrente residual em um ponto específico da rede, as figuras 13 e 14 mostram a evolução do valor de I_n no medidor 632 71, sendo representados módulo e fase separadamente. Pode-se observar que houve discreto aumento no módulo, 13, e na defasagem da corrente residual, onde que a mesma foi atrasada, 14. Portanto, o fato demonstra em características gerais como ocorre o aumento do desbalanceio de corrente, tanto em modulo quanto em defasamento.

5 Conclusão

O presente projeto, que busca avaliar a elevada interação de GDs no sistema elétrico, se ateve ao seu propósito fazendo uso de um processo de pesquisa. O processo se inicia adequando um modelo já conhecido de rede à sua modelagem matemática. Com o uso de softwares de simulação, são obtidos resultados simulados e escolhidas as métricas para a análise. Em seguida, o processo se dá pela obtenção de novos dados com base nos já existentes, onde são usadas ferramentas de análise matemática para criar formas visuais de representação dos resultados. Dessa forma, usando gráficos e tabelas, foram dispostos os dados simulados para então analisar os impactos das GDs no sistema elétrico em questão.

Primeiramente, foi possível observar um padrão geral nas mudanças das grandezas analisadas, uma vez que o sistema elétrico funciona em conjunto e as compensações obtidas em um ponto da rede podem ser aproveitadas como forma de compensação por outros pontos interligados. Dessa forma, foi possível observar que, todo o excedente de energia produzido foi utilizado em pontos da rede, onde mesmo sem a presença de um painel fotovoltaico, houve redução do consumo de potência ativa local.

De forma geral, as grandezas analisadas no presente trabalho foram: a potência complexa, a potência ativa, a potência reativa, o fator de potência, o desequilíbrio de tensão e a corrente residual. Assim, como dito anteriormente, os painéis solares usados na simulação foram todos simulados para operar nos padrões ligado e desligado e todos com fator de potência unitário, justificado pela estreita faixa de reativos tolerados no sistema elétrico brasileiro, evitando o pagamento de excesso de reativos inseridos.

A primeira consequência da mudança no fluxo de potência da rede foi a existência de um fluxo de potência bidirecional e com isso, uma dinamização dos valores de medição de acordo com o que está ligado e desligado, a exemplo dos painéis solares. De maneira abrangente, ao se analisar pontos da rede com os painéis ativos e gerando energia, foi possível concluir que há a possibilidade de diminuição da potência ativa consumida naquele ponto da rede, visto que o fluxo bidirecional implica que há uma parcela de potência ativa requerida sendo suprida localmente, ou então essa potência é zerada, devido ao fato de toda a potência exigida pela carga ser suprida pela GD local, ou então, por último, o ponto se tornar um fornecedor de potência ativa ao invés de consumidor, caracterizando uma superprodução local de energia, capaz de suprir a carga e ainda alimentar a rede a qual está conectada.

Ao se analisar os valores da potência reativa, conclui-se que há pequenas alterações com a inserção das GDs, mas de qualquer forma, não há ação expressiva delas que possam

caracterizar como troca de reativos com a rede elétrica, uma vez que foram configuradas para gerar energia com fator de potência unitário.

De posse das conclusões acerca da potência ativa e reativa, fica lógico presumir o comportamento que foi observado em Resultados, referente à potência complexa e ao fator de potência dos pontos analisados. Como há uma grande modificação da potência ativa em comparação à potência reativa, a inserção dos painéis fotovoltaicos piora o fator de potência local da rede, todavia poderia corrigi-lo caso fosse possível controlar a potência fornecida para a rede a fim de possibilitar a troca de reativos entre o consumidor com GD e a rede elétrica. Além disso, como há diminuição da potência ativa pontual, a potência advinda da geração convencional drenada pelas cargas também cai, sendo assim, há uma economia de energia que viabiliza o uso dos painéis fotovoltaicos como alternativa sustentável e econômica para o consumidor que visa a se adequar com o conceito de sustentabilidade no que se refere ao consumo energético.

No que tange o desequilíbrio de tensão na rede e a corrente residual, foi possível concluir que com o aumento do número de pontos com geração distribuída trifásica equilibrada, houve uma melhora geral nos valores de desequilíbrio e da corrente de neutro, uma vez que as fases sobrecarregadas recebem compensação de potência ativa conforme necessário. Por outro lado, ao se analisar os pontos de geração distribuída monofásico e bifásico, é possível observar que, caso não haja controle dos valores requeridos pelas respectivas fases nas quais as GDs estão conectadas, pode-se desbalancear o sistema elétrico e piorar o perfil do fornecimento de energia elétrica, caracterizando uma piora geral na qualidade da energia.

Dispostos dos dados coletados e da abordagem analítica feita em cima das variáveis objetos de estudo, conclui-se que, o atual modelo brasileiro de aplicação de geração distribuída usando painéis fotovoltaicos possui vantagens e desvantagens.

No que diz respeito às vantagens inerentes a essa aplicação, podemos evidenciar a economia geral de energia elétrica pelo consumidor, uma vez que há uma produção local de energia com capacidade de suprir o que é requisitado pelas cargas, menor uso de fontes não renováveis de energia, de certa forma, independência energética de fontes externas vindas da rede elétrica e por último, redução geral nos preços de energia elétrica sem influenciar as distribuidoras, devido ao preço pago pelo uso da infraestrutura da rede que é disponível para interligar os pontos de geração locais.

Não obstante, devido à impossibilidade de troca de reativos com a rede elétrica, uma desvantagem inerente à GD é a diminuição do fator de potência, e, conseqüentemente, piora no uso da rede de energia para transporte de reativos ao invés de potência ativa.

Sobre o desequilíbrio de tensão, é possível usar a geração distribuída para melhorar ou piorar o perfil trifásico do sistema. O que define o resultado da aplicação das GDs sobre

o desequilíbrio é a forma a qual são ligados e desligados os geradores, desde que com o objetivo de sempre equilibrar as fases usando para isso a injeção de potências em uma, duas ou nas três fases. Todavia, pode se usar um algoritmo de redes inteligentes para controlar essa geração de forma a possibilitar melhora nos indicadores de qualidade de energia.

Por fim, de uma forma geral, o problema da queda no fator de potência pode ser resolvido com uma reformulação na regulação inerente à geração distribuída no Brasil, de forma a possibilitar o uso dos pontos de micro geração para corrigir o fatores de potência e fazer compensação de reativos na rede, ao mesmo tempo que produzem potência ativa. Para possibilitar essa melhoria, o uso de algoritmos de previsão de demanda seria crucial para o desenvolvimento de fluxos de potência bidirecionais que seriam responsáveis por controlar o fator de potência ao mesmo tempo que permitem dimensionar a potência ótima a ser injetada na rede. Contudo, essas aplicações são frutos de um projeto futuro que não entra no escopo do presente trabalho.

Referências

- ANEEL. Prodist - módulo 8. *Brasília*, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 22, 23, 32 e 37.
- CANESIN, C. A. Qualidade da energia elétrica, eficiência e racionalização, desperdício versus desconhecimento. *Ilha Solteira: UNESP*, 2001. Citado na página 22.
- COSTA, R. C. d.; PRATES, C. P. T. O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2005. Citado na página 18.
- DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. Avaliação da qualidade da energia elétrica. *available in <http://www.dsce.fee.unicamp.br/antenor/pdf/qualidade/b5.pdf>*, 2017. Citado na página 21.
- ELOIR, R. J. Qualidade da energia elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016. Citado na página 21.
- ENERGÉTICA, I. I. N. D. E. Notas sobre geração distribuída. *Acesso em*, 2001. Citado na página 18.
- FILHO, W. P. B.; AZEVEDO, A. C. S. d. Geração distribuída: vantagens e desvantagens. v. 97, 2016. Citado na página 18.
- GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no brasil. *Estudos avançados*, SciELO Brasil, v. 21, n. 59, p. 7–20, 2007. Citado na página 18.
- GONÇALVES, L. F. Contribuições para o estudo teórico e experimental de sistemas de geração distribuída. 2004. Citado na página 20.
- GRANDI, M. J. S. A. L. Modelo de relatório de qualidade da energia elétrica atendendo aos procedimentos de distribuição (prodist). *Capítulo IX*, 2016. Citado na página 23.
- MARTINHO, E. Distúrbios da energia elétrica. *Editora Erica*, v. 50, 2009. Citado na página 22.
- MATOS, D.; CATALÃO, J. Geração distribuída e os seus impactes no funcionamento da rede elétrica: Parte 2. *Potência*, v. 1, n. 2, p. 3, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- MEHL, E. L. Qualidade da energia elétrica. *UNIVERSIDADE FEDE-RAL DO PARANÁ–UFPR*, 2012. Citado na página 21.
- MORAES, B. C. d. S.; BARBOSA, C. R. P. Projeto de aquecimento solar térmico–fotovoltaico off grid de piscinas. *Engenharia de Energia. Brasília*, 2015. Citado na página 18.
- NARUTO, D. T. Vantagens e desvantagens da geração distribuída e estudo de caso de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica. *Monografia de Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro*, 2017. Citado na página 15.
- NILSSON, J.; RIEDEL, S. *Circuitos Elétricos*. PEARSON BRASIL. ISBN 9788543004785. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=hrpFvgAACAAJ>>. Citado na página 23.

PACHECO, F. Energias renováveis: breves conceitos. *Conjuntura e Planejamento*, v. 149, p. 4–11, 2006. Citado na página 15.

ROCHA, J. E. Desequilíbrio de tensão. *UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná*, 2014. Citado na página 23.

SILVA, H. H.; MOISÉS, A. L. S. et al. Geração fotovoltaica distribuída: Estudo de caso para consumidores residenciais de salvador-ba. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 5, n. 1, 2016. Citado na página 17.

VARGAS, M. C. Análise dos impactos das faltas na proteção de sobrecorrente em redes de distribuição com elevada penetração de geração distribuída fotovoltaica. *Dissertação - Universidade Federal do Espírito Santo Mestrado em Engenharia Elétrica*, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 24, 27 e 49.

ZANETTA, L. *Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência*. Editora Livraria da Física, 2006. ISBN 9788588325418. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=Nyep7l_kBFkC>. Citado na página 24.

Apêndices

APÊNDICE A – Resultados obtidos em cada medidor

A.1 Introdução

Nesse capítulo serão apresentados os dados colhidos referente a cada um dos medidores de cada configuração de GDs conectadas a rede, representados em (VARGAS, 2018, p. 120). São apresentados os dados de potência ativa, potência reativa, potência complexa, correntes trifásicas, tensões trifásicas, desequilíbrio de tensão, fator de potência e corrente de neutro nos ramos em questão.

A.2 Simulação com nenhuma GD ligada

Pode-se observar que a configuração da rede em questão apresenta alguns pontos com alto desequilíbrio de tensão, inclusive com valores fora da norma exigida pela ANEEL no Brasil. Os pontos onde isso ocorre são caracterizados pelo uso de parte do sistema trifásico, sendo assim há evidente desbalanceio do sistema nesses pontos de carga.

Tabela 8 – Tensões com nenhuma GD ligada

	Va	Vb	Vc	Des[%]
611	0,00∠0,00	0.00 ∠ 0.00	3107.23 ∠ 115.75	100
636	3266,27 ∠ -2,32	3358.03 ∠ -121.85	3240.55 ∠ 117.79	1
632 33	3266.27 ∠ -2.32	3358.03 ∠ -121.85	3240.55 ∠ 117.79	1
632 45	0.00 ∠ 0.00	3358.03 ∠ -121.85	3240.55 ∠ 117.79	50.29
632 71	3266.27 ∠ -2.32	3358.03 ∠ -121.85	3240.55 ∠ 117.79	1
633	3256.30 ∠ -2.39	3351.80 ∠ -121.90	3232.35 ∠ 117.80	1
634	366.96 ∠ -3.06	379.60 ∠ -122.38	366.08 ∠ 117.32	1.01
645	0.00 ∠ 0.00	3327.38 ∠ -122.03	3234.51 ∠ 117.82	50.13
646	0.00 ∠ 0.00	3321.85 ∠ -122.11	3227.89 ∠ 117.87	50.04
650	3396.63 ∠ 0.00	3396.63 ∠ -120.00	3396.63 ∠ 120.00	0
652	3143.64 ∠ -4.96	0.00 ∠ 0.00	0.00 ∠ 0.00	100
671	3167.80 ∠ -5.01	3386.28 ∠ -122.57	3119.44 ∠ 116.00	2.13
671 92	3167.80 ∠ -5.01	3386.28 ∠ -122.57	3119.44 ∠ 116.00	2.13
675	3148.24 ∠ -5.25	3393.32 ∠ -122.74	3113.46 ∠ 116.01	2.25
680	3167.80 ∠ -5.01	3386.28 ∠ -122.57	3119.44 ∠ 116.00	2.13
684	3161.47 ∠ -5.04	0.00 ∠ 0.00	3113.33 ∠ 115.90	50.71
692	3167.80 ∠ -5.01	3386.28 ∠ -122.57	3119.44 ∠ 116.00	2.13

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 9 – Correntes com nenhuma GD ligada

	Ia	Ib	Ic	In
611	0.00 ∠ 0.00	0.00 ∠ 0.00	92.20 ∠ 122.46	92.20 ∠ 122.46
636	732.42 ∠ -28.08	583.07 ∠ -141.65	767.84 ∠ 93.33	156.22 ∠ 22.60
632 33	107.30 ∠ -37.59	85.81 ∠ -159.27	82.75 ∠ 80.42	23.36 ∠ -37.51
632 45	0.00 ∠ 0.00	198.77 ∠ -143.50	86.93 ∠ 57.55	121.71 ∠ -158.36
632 71	621.29 ∠ -26.41	283.12 ∠ -134.30	583.43 ∠ 100.53	269.28 ∠ 20.58
633	107.30 ∠ -37.59	85.81 ∠ -159.27	82.76 ∠ 80.42	23.36 ∠ -37.51
634	927.74 ∠ -37.57	741.41 ∠ -159.25	714.99 ∠ 80.45	202.52 ∠ -37.48
645	0.00 ∠ 0.00	86.93 ∠ -122.45	86.93 ∠ 57.55	0.00 ∠ -90.01
646	0.00 ∠ 0.00	86.93 ∠ -122.45	86.93 ∠ 57.55	0.00 ∠ 0.00
650	732.41 ∠ -28.08	583.07 ∠ -141.65	767.84 ∠ 93.34	156.22 ∠ 22.60
652	84.04 ∠ -38.86	0.00 ∠ 0.00	0.00 ∠ 0.00	84.04 ∠ -38.86
671	637.48 ∠ -26.52	261.50 ∠ -132.19	581.19 ∠ 104.82	259.87 ∠ 18.72
671 92	341.07 ∠ -19.46	77.37 ∠ -64.01	312.19 ∠ 121.67	208.63 ∠ 23.31
675	264.75 ∠ -4.07	91.56 ∠ -58.65	156.65 ∠ 113.64	253.21 ∠ 10.59
680	0.00 ∠ -60.85	0.00 ∠ 0.00	0.00 ∠ 0.00	0.00 ∠ -60.85
684	84.01 ∠ -38.84	0.00 ∠ 0.00	92.20 ∠ 122.46	29.75 ∠ 57.57
692	307.19 ∠ -8.21	77.37 ∠ -64.01	244.60 ∠ 126.75	208.63 ∠ 23.31

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 10 – Potências com nenhuma GD ligada

	S	P	Q	fp
611	286.49 ∠ 6.71	284.53	33.48	0.99
636	6832.21 ∠ -23.58	6261.68	-2733.22	0.92
632 33	906.66 ∠ -36.57	728.13	-540.23	0.8
632 45	904.89 ∠ -32.84	760.25	-490.75	0.84
632 71	4855.65 ∠ -19.16	4586.57	-1593.96	0.94
633	904.38 ∠ -36.53	726.67	-538.38	0.8
634	883.45 ∠ -35.96	715.09	-518.78	0.81
645	494.41 ∠ -29.87	428.72	-246.26	0.87
646	493.20 ∠ -29.85	427.76	-245.49	0.87
650	7068.82 ∠ -25.76	6366.28	-3072.25	0.9
652	264.18 ∠ -33.90	219.29	-147.33	0.83
671	4697.01 ∠ -15.31	4530.42	-1239.84	0.96
671 92	2152.67 ∠ 1.34	2152.08	50.3	1
675	1482.39 ∠ 10.75	1456.38	276.47	0.98
680	0.00 ∠ -55.84	0	0	0.56
684	518.78 ∠ -12.80	505.89	-114.92	0.98
692	1883.84 ∠ 9.52	1857.89	311.61	0.99

Fonte: Próprio autor, 2019

A.3 Simulação com uma GD ligada

A GD ligada nessa simulação é a de número 632. Nesse caso pode-se perceber uma redução generalizada no desequilíbrio dos pontos trifásicos da rede com a inserção da GD. Todavia, nos pontos bifásicos e monofásicos, é observado discreto aumento no desequilíbrio se comparado com a situação anterior, sem GD ligada à rede.

Tabela 11 – Tensões com uma GD ligada

	Va	Vb	Vc	Des(%)
611	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	3116.41 \angle 116.43	100
636	3260.58 \angle -2.37	3367.69 \angle -121.76	3246.84 \angle 118.23	0.86
632 33	3260.58 \angle -2.37	3367.69 \angle -121.76	3246.84 \angle 118.23	0.86
632 45	0.00 \angle 0.00	3367.69 \angle -121.76	3246.84 \angle 118.23	50.03
632 71	3260.58 \angle -2.37	3367.69 \angle -121.76	3246.84 \angle 118.23	0.86
633	3250.65 \angle -2.44	3361.39 \angle -121.82	3238.66 \angle 118.23	0.86
634	366.32 \angle -3.11	380.69 \angle -122.29	366.79 \angle 117.75	0.88
645	0.00 \angle 0.00	3336.98 \angle -121.95	3240.80 \angle 118.25	49.86
646	0.00 \angle 0.00	3331.47 \angle -122.02	3234.18 \angle 118.30	49.77
650	3396.63 \angle 0.00	3396.63 \angle -120.00	3396.63 \angle 120.00	0
652	3135.20 \angle -5.04	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	100
671	3159.29 \angle -5.09	3400.69 \angle -122.44	3128.63 \angle 116.68	1.95
671 92	3159.29 \angle -5.09	3400.69 \angle -122.44	3128.63 \angle 116.68	1.95
675	3139.82 \angle -5.33	3407.66 \angle -122.61	3122.70 \angle 116.69	2.07
680	3159.29 \angle -5.09	3400.69 \angle -122.44	3128.63 \angle 116.68	1.95
684	3152.98 \angle -5.11	0.00 \angle 0.00	3122.53 \angle 116.58	51.28
692	3159.29 \angle -5.09	3400.69 \angle -122.44	3128.63 \angle 116.68	1.95

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 12 – Correntes com uma GD ligada

	Ia	Ib	Ic	In
611	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	92.47 \angle 123.14	92.47 \angle 123.14
636	722.74 \angle -28.46	547.11 \angle -142.79	702.71 \angle 91.39	184.62 \angle 8.50
632 33	107.12 \angle -37.64	86.06 \angle -159.19	82.92 \angle 80.86	22.53 \angle -38.83
632 45	0.00 \angle 0.00	199.08 \angle -143.37	86.99 \angle 57.80	122.06 \angle -158.27
632 71	616.44 \angle -26.61	264.38 \angle -134.80	548.99 \angle 99.96	280.65 \angle 15.92
633	107.12 \angle -37.64	86.06 \angle -159.19	82.92 \angle 80.86	22.53 \angle -38.83
634	926.13 \angle -37.61	743.53 \angle -159.16	716.39 \angle 80.88	195.35 \angle -38.80
645	0.00 \angle 0.00	86.99 \angle -122.21	86.99 \angle 57.79	0.00 \angle -89.71
646	0.00 \angle 0.00	86.99 \angle -122.21	86.99 \angle 57.79	0.00 \angle 0.00
650	722.73 \angle -28.46	547.11 \angle -142.79	702.71 \angle 91.39	184.62 \angle 8.50
652	83.81 \angle -38.94	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	83.81 \angle -38.94
671	637.84 \angle -26.53	261.66 \angle -131.83	582.72 \angle 105.31	255.85 \angle 18.73
671 92	341.30 \angle -19.50	77.72 \angle -63.99	313.48 \angle 122.24	205.38 \angle 23.34
675	264.05 \angle -4.15	91.94 \angle -58.52	157.12 \angle 114.32	250.85 \angle 10.49
680	0.00 \angle -60.38	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle -60.38
684	83.79 \angle -38.91	0.00 \angle 0.00	92.47 \angle 123.14	28.80 \angle 59.45
692	307.03 \angle -8.23	77.72 \angle -63.99	245.80 \angle 127.43	205.38 \angle 23.34

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 13 – Potências com uma GD ligada

	S	P	Q	fp
611	288.19 \angle 6.71	286.21	33.67	0.99
636	6474.63 \angle -24.91	5872.18	-2727.34	0.91
632 33	908.14 \angle -36.58	729.29	-541.17	0.8
632 45	907.90 \angle -32.85	762.72	-492.48	0.84
632 71	4669.92 \angle -19.84	4392.72	-1584.99	0.94
633	905.86 \angle -36.54	727.82	-539.32	0.8
634	884.90 \angle -35.96	716.22	-519.69	0.81
645	495.07 \angle -29.87	429.29	-246.58	0.87
646	493.85 \angle -29.85	428.32	-245.82	0.87
650	6693.29 \angle -26.94	5966.94	-3032.45	0.89
652	262.77 \angle -33.90	218.11	-146.54	0.83
671	4707.47 \angle -15.29	4540.94	-1241	0.96
671 92	2159.40 \angle 1.39	2158.77	52.26	1
675	1482.40 \angle 10.83	1455.98	278.63	0.98
680	0.00 \angle -55.28	0	0	0.57
684	519.05 \angle -12.68	506.39	-113.93	0.98
692	1888.88 \angle 9.62	1862.33	315.57	0.99

Fonte: Próprio autor, 2019

A.4 Simulação com duas GDs ligadas

Nessa sessão é simulado o sistema com as GDs 632 e 634 ligadas. Como foram ligadas duas GDs trifásicas, ocorreu uma redução geral nos pontos trifásicos no que diz respeito ao desequilíbrio de tensão, todavia o mesmo fenômeno não foi observado nos pontos monofásicos e bifásicos, uma vez que ocorre sobrecarga de algumas fases em detrimento de outras por conta da nova configuração da rede.

Tabela 14 – Tensões com duas GDs ligadas

	Va	Vb	Vc	Des(%)
611	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	3124.47 \angle 116.66	100
636	3271.31 \angle -1.97	3365.98 \angle -121.50	3255.31 \angle 118.46	0.82
632 33	3271.31 \angle -1.97	3365.98 \angle -121.50	3255.31 \angle 118.46	0.82
632 45	0.00 \angle 0.00	3365.98 \angle -121.50	3255.31 \angle 118.46	50.05
632 71	3271.31 \angle -1.97	3365.98 \angle -121.50	3255.31 \angle 118.46	0.82
633	3266.80 \angle -1.89	3362.08 \angle -121.47	3252.98 \angle 118.54	0.82
634	372.41 \angle -1.37	383.88 \angle -121.10	371.63 \angle 118.96	0.89
645	0.00 \angle 0.00	3335.28 \angle -121.69	3249.25 \angle 118.49	49.88
646	0.00 \angle 0.00	3329.76 \angle -121.76	3242.62 \angle 118.53	49.79
650	3396.63 \angle 0.00	3396.63 \angle -120.00	3396.63 \angle 120.00	0
652	3145.58 \angle -4.64	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	100
671	3169.76 \angle -4.69	3399.11 \angle -122.18	3136.72 \angle 116.91	1.9
671 92	3169.76 \angle -4.69	3399.11 \angle -122.18	3136.72 \angle 116.91	1.9
675	3150.22 \angle -4.92	3406.12 \angle -122.35	3130.75 \angle 116.92	2.01
680	3169.76 \angle -4.69	3399.11 \angle -122.18	3136.72 \angle 116.91	1.9
684	3163.42 \angle -4.71	0.00 \angle 0.00	3130.60 \angle 116.81	51.15
692	3169.76 \angle -4.69	3399.11 \angle -122.18	3136.72 \angle 116.91	1.9

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 15 – Correntes com duas GDs ligadas

	Ia	Ib	Ic	In
611	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	92.71 \angle 123.37	92.71 \angle 123.37
636	639.44 \angle -31.88	482.03 \angle -145.53	640.26 \angle 88.75	162.29 \angle 10.50
632 33	62.45 \angle -100.06	52.17 \angle 145.90	50.96 \angle 20.69	15.61 \angle -114.32
632 45	0.00 \angle 0.00	199.09 \angle -143.07	87.09 \angle 58.09	122.00 \angle -158.01
632 71	618.12 \angle -26.25	264.70 \angle -134.57	550.39 \angle 100.26	282.09 \angle 16.40
633	62.45 \angle -100.06	52.17 \angle 145.90	50.97 \angle 20.69	15.61 \angle -114.32
634	539.88 \angle -100.26	450.58 \angle 145.67	440.34 \angle 20.46	135.25 \angle -114.30
645	0.00 \angle 0.00	87.09 \angle -121.91	87.09 \angle 58.09	0.00 \angle -89.62
646	0.00 \angle 0.00	87.09 \angle -121.91	87.09 \angle 58.09	0.00 \angle 0.00
650	639.43 \angle -31.88	482.03 \angle -145.53	640.25 \angle 88.75	162.29 \angle 10.50
652	84.09 \angle -38.53	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	84.09 \angle -38.53
671	639.52 \angle -26.17	262.00 \angle -131.60	584.08 \angle 105.60	257.27 \angle 19.19
671 92	342.21 \angle -19.12	77.64 \angle -63.72	314.29 \angle 122.48	206.53 \angle 23.83
675	264.92 \angle -3.74	91.90 \angle -58.25	157.52 \angle 114.55	251.84 \angle 10.95
680	0.00 \angle -60.09	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle -60.09
684	84.07 \angle -38.51	0.00 \angle 0.00	92.71 \angle 123.37	29.12 \angle 59.49
692	307.92 \angle -7.86	77.64 \angle -63.72	246.43 \angle 127.63	206.53 \angle 23.83

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 16 – Potências com duas GDs ligadas

	S	P	Q	fp
611	289.68 \angle 6.71	287.69	33.85	0.99
636	5792.58 \angle -28.19	5105.39	-2736.59	0.88
632 33	545.27 \angle -96.23	-59.14	-542.05	0.11
632 45	908.63 \angle -32.84	763.38	-492.81	0.84
632 71	4691.71 \angle -19.84	4413.1	-1592.68	0.94
633	544.68 \angle -96.29	-59.67	-541.4	0.11
634	537.13 \angle -96.95	-65.02	-533.18	0.12
645	496.21 \angle -29.87	430.28	-247.15	0.87
646	494.99 \angle -29.85	429.32	-246.39	0.87
650	5977.22 \angle -29.91	5181.01	-2980.67	0.87
652	264.51 \angle -33.90	219.56	-147.51	0.83
671	4728.89 \angle -15.30	4561.36	-1247.54	0.96
671 92	2170.35 \angle 1.33	2169.77	50.43	1
675	1490.12 \angle 10.77	1463.89	278.38	0.98
680	0.00 \angle -55.40	0	0	0.57
684	522.10 \angle -12.69	509.34	-114.74	0.98
692	1898.37 \angle 9.55	1872.08	314.85	0.99

Fonte: Próprio autor, 2019

A.5 Simulação com três GDs ligadas

A simulação foi realizada com as GDs 632, 634 e 645 ligadas.

A nova GD ligada ao sistema, por estar conectada apenas à fase B provoca um efeito geral de desbalanceio em todas as tensões do sistema, tornando a característica geral da rede piorada devido à utilização não equilibrada de uma fase em detrimento das outras, no presente caso, a fase B.

Tabela 17 – Tensões com três GDs ligadas

	Va	Vb	Vc	Des(%)
611	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	3109.77 \angle 116.65	100
636	3283.24 \angle -2.23	3379.83 \angle -120.86	3240.39 \angle 118.44	0.89
632 33	3283.24 \angle -2.23	3379.83 \angle -120.86	3240.39 \angle 118.44	0.89
632 45	0.00 \angle 0.00	3379.83 \angle -120.86	3240.39 \angle 118.44	50.56
632 71	3283.24 \angle -2.23	3379.83 \angle -120.86	3240.39 \angle 118.44	0.89
633	3278.60 \angle -2.15	3375.88 \angle -120.83	3238.17 \angle 118.52	0.88
634	373.72 \angle -1.63	385.43 \angle -120.47	369.96 \angle 118.95	0.94
645	0.00 \angle 0.00	3361.48 \angle -120.83	3229.55 \angle 118.46	50.57
646	0.00 \angle 0.00	3355.88 \angle -120.90	3222.87 \angle 118.50	50.48
650	3396.63 \angle 0.00	3396.63 \angle -120.00	3396.63 \angle 120.00	0
652	3157.06 \angle -4.90	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	100
671	3181.34 \angle -4.95	3413.39 \angle -121.55	3121.96 \angle 116.89	2.02
671 92	3181.34 \angle -4.95	3413.39 \angle -121.55	3121.96 \angle 116.89	2.02
675	3161.70 \angle -5.19	3420.36 \angle -121.72	3116.09 \angle 116.91	2.15
680	3181.34 \angle -4.95	3413.39 \angle -121.55	3121.96 \angle 116.89	2.02
684	3174.96 \angle -4.97	0.00 \angle 0.00	3115.88 \angle 116.79	51.34
692	3181.34 \angle -4.95	3413.39 \angle -121.55	3121.96 \angle 116.89	2.02

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 18 – Correntes com três GDs ligadas

	Ia	Ib	Ic	In
611	0.00 ∠ 0.00	0.00 ∠ 0.00	92.28 ∠ 123.36	92.28 ∠ 123.36
636	641.33 ∠ -31.94	394.83 ∠ -151.09	639.27 ∠ 88.69	239.49 ∠ 27.06
632 33	62.57 ∠ -99.69	52.35 ∠ 147.16	50.84 ∠ 19.94	17.31 ∠ -112.88
632 45	0.00 ∠ 0.00	113.18 ∠ -161.78	87.57 ∠ 58.29	72.87 ∠ 147.54
632 71	619.49 ∠ -26.33	264.78 ∠ -134.22	549.75 ∠ 100.22	283.56 ∠ 15.65
633	62.57 ∠ -99.69	52.35 ∠ 147.16	50.84 ∠ 19.94	17.31 ∠ -112.89
634	540.88 ∠ -99.89	452.14 ∠ 146.94	439.27 ∠ 19.70	149.94 ∠ -112.87
645	0.00 ∠ 0.00	87.57 ∠ -121.71	87.57 ∠ 58.29	0.00 ∠ -88.47
646	0.00 ∠ 0.00	87.57 ∠ -121.71	87.57 ∠ 58.29	0.00 ∠ 0.00
650	641.32 ∠ -31.94	394.83 ∠ -151.09	639.27 ∠ 88.69	239.49 ∠ 27.06
652	84.40 ∠ -38.79	0.00 ∠ 0.00	0.00 ∠ 0.00	84.40 ∠ -38.79
671	640.70 ∠ -26.24	261.87 ∠ -131.25	583.35 ∠ 105.55	258.89 ∠ 18.42
671 92	343.14 ∠ -19.23	78.08 ∠ -62.95	312.70 ∠ 122.49	208.05 ∠ 22.97
675	265.89 ∠ -4.01	92.28 ∠ -57.63	156.79 ∠ 114.54	253.76 ∠ 10.47
680	0.00 ∠ -60.07	0.00 ∠ 0.00	0.00 ∠ 0.00	0.00 ∠ -60.07
684	84.37 ∠ -38.77	0.00 ∠ 0.00	92.28 ∠ 123.36	28.53 ∠ 58.18
692	308.68 ∠ -8.01	78.08 ∠ -62.95	244.80 ∠ 127.68	208.05 ∠ 22.97

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 19 – Potências com três GDs ligadas

	S	P	Q	fp
611	286.96 ∠ 6.71	284.99	33.53	0.99
636	5511.55 ∠ -29.85	4780.19	-2743.52	0.87
632 33	546.43 ∠ -96.00	-57.15	-543.44	0.1
632 45	657.15 ∠ -49.10	430.3	-496.68	0.65
632 71	4698.20 ∠ -19.84	4419.33	-1594.55	0.94
633	545.83 ∠ -96.07	-57.67	-542.78	0.11
634	538.24 ∠ -96.73	-63.04	-534.54	0.12
645	501.69 ∠ -29.87	435.03	-249.88	0.87
646	500.45 ∠ -29.85	434.05	-249.11	0.87
650	5690.66 ∠ -31.50	4852.12	-2973.3	0.85
652	266.44 ∠ -33.90	221.16	-148.59	0.83
671	4733.58 ∠ -15.30	4565.83	-1249	0.96
671 92	2168.99 ∠ 1.41	2168.33	53.34	1
675	1493.21 ∠ 10.85	1466.52	281.06	0.98
680	0.00 ∠ -55.12	0	0	0.57
684	521.34 ∠ -12.87	508.25	-116.13	0.97
692	1897.09 ∠ 9.65	1870.22	318.13	0.99

Fonte: Próprio autor, 2019

A.6 Simulação com quatro GDs ligadas

GDs ligadas: 632, 634, 645 e 646.

Com a nova GD ligada a rede, de forma geral há melhora nos desequilíbrios de tensão se comparada à situação anterior onde haviam 3 GDs ligadas, sendo uma delas monofásica. Acontece que, a GD 646 ligada e gerando energia para as fases B e C, há de certa forma uma compensação na fase C em comparação com a sobrecarga que ocorreu na fase B devido à GD 645, porém é importante ressaltar que em características gerais, a presença de GDs monofásicas e bifásicas piorou o perfil de tensão quando em comparação ao sistema com a presença de apenas GDs trifásicas.

Tabela 20 – Tensões com quatro GDs ligadas

	Va	Vb	Vc	Des(%)
611	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	3109.72 \angle 116.88	100
636	3281.62 \angle -2.32	3387.40 \angle -120.72	3240.18 \angle 118.66	0.84
632 33	3281.62 \angle -2.32	3387.40 \angle -120.72	3240.18 \angle 118.66	0.84
632 45	0.00 \angle 0.00	3387.40 \angle -120.72	3240.18 \angle 118.66	50.5
632 71	3281.62 \angle -2.32	3387.40 \angle -120.72	3240.18 \angle 118.66	0.84
633	3277.00 \angle -2.25	3383.40 \angle -120.69	3237.98 \angle 118.74	0.83
634	373.54 \angle -1.73	386.28 \angle -120.33	369.94 \angle 119.18	0.88
645	0.00 \angle 0.00	3374.15 \angle -120.64	3232.22 \angle 118.76	50.49
646	0.00 \angle 0.00	3371.68 \angle -120.68	3227.26 \angle 118.85	50.39
650	3396.63 \angle 0.00	3396.63 \angle -120.00	3396.63 \angle 120.00	0
652	3155.45 \angle -4.99	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	100
671	3179.73 \angle -5.05	3420.92 \angle -121.42	3121.89 \angle 117.12	1.99
671 92	3179.73 \angle -5.05	3420.92 \angle -121.42	3121.89 \angle 117.12	1.99
675	3160.10 \angle -5.28	3427.84 \angle -121.59	3116.06 \angle 117.13	2.12
680	3179.73 \angle -5.05	3420.92 \angle -121.42	3121.89 \angle 117.12	1.99
684	3173.35 \angle -5.07	0.00 \angle 0.00	3115.82 \angle 117.02	51.58
692	3179.73 \angle -5.05	3420.92 \angle -121.42	3121.89 \angle 117.12	1.99

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 21 – Correntes com quatro GDs ligadas

	Ia	Ib	Ic	In
611	0.00 ∠ 0.00	0.00 ∠ 0.00	92.27 ∠ 123.59	92.27 ∠ 123.59
636	641.36 ∠ -31.98	367.16 ∠ -153.54	609.32 ∠ 87.16	267.06 ∠ 23.21
632 33	62.55 ∠ -99.87	52.46 ∠ 147.64	50.83 ∠ 20.15	17.62 ∠ -114.51
632 45	0.00 ∠ 0.00	90.95 ∠ -175.51	76.68 ∠ 34.70	45.80 ∠ 127.10
632 71	619.68 ∠ -26.37	264.87 ∠ -134.05	550.07 ∠ 100.36	282.35 ∠ 15.50
633	62.55 ∠ -99.87	52.46 ∠ 147.64	50.84 ∠ 20.15	17.62 ∠ -114.51
634	540.74 ∠ -100.07	453.02 ∠ 147.42	439.26 ∠ 19.91	152.62 ∠ -114.49
645	0.00 ∠ 0.00	53.68 ∠ -121.99	76.68 ∠ 34.70	34.65 ∠ -3.11
646	0.00 ∠ 0.00	53.68 ∠ -121.99	76.68 ∠ 34.70	34.65 ∠ -3.11
650	641.36 ∠ -31.98	367.15 ∠ -153.54	609.31 ∠ 87.16	267.06 ∠ 23.21
652	84.35 ∠ -38.89	0.00 ∠ 0.00	0.00 ∠ 0.00	84.35 ∠ -38.89
671	640.93 ∠ -26.28	261.87 ∠ -131.08	583.63 ∠ 105.70	257.65 ∠ 18.26
671 92	343.33 ∠ -19.29	78.28 ∠ -62.83	312.81 ∠ 122.68	207.08 ∠ 22.80
675	265.75 ∠ -4.10	92.49 ∠ -57.50	156.78 ∠ 114.76	253.19 ∠ 10.32
680	0.00 ∠ -59.92	0.00 ∠ 0.00	0.00 ∠ 0.00	0.00 ∠ -59.92
684	84.33 ∠ -38.87	0.00 ∠ 0.00	92.27 ∠ 123.59	28.06 ∠ 58.61
692	308.70 ∠ -8.06	78.28 ∠ -62.83	244.90 ∠ 127.92	207.08 ∠ 22.80

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 22 – Potências com quatro GDs ligadas

	S	P	Q	fp
611	286.95 ∠ 6.71	284.98	33.53	0.99
636	5321.46 ∠ -31.08	4557.52	-2747.17	0.86
632 33	546.92 ∠ -95.92	-56.43	-544	0.1
632 45	538.78 ∠ -67.78	203.78	-498.76	0.38
632 71	4701.18 ∠ -19.84	4422.19	-1595.41	0.94
633	546.32 ∠ -95.98	-56.95	-543.34	0.1
634	538.71 ∠ -96.64	-62.32	-535.09	0.12
645	325.01 ∠ -50.50	206.73	-250.78	0.64
646	324.28 ∠ -50.53	206.15	-250.31	0.64
650	5494.85 ∠ -32.66	4626.22	-2965.04	0.84
652	266.17 ∠ -33.90	220.94	-148.44	0.83
671	4736.42 ∠ -15.29	4568.73	-1249.15	0.96
671 92	2170.34 ∠ 1.44	2169.65	54.65	1
675	1493.19 ∠ 10.90	1466.27	282.28	0.98
680	0.00 ∠ -54.87	0	0	0.58
684	521.08 ∠ -12.86	508.01	-115.98	0.97
692	1897.96 ∠ 9.71	1870.77	320.13	0.99

Fonte: Próprio autor, 2019

A.7 Simulação com cinco GDs ligadas

Na presente simulação as GDs 632, 634, 645, 646 e 671 estavam ligadas.

A GD 671 insere potência trifásica a rede e melhora totalmente o desequilíbrio de tensão no sistema, quando comparado aos casos anteriores, dessa forma pode-se levantar a hipótese que, o aumento no número de GDs trifásicas conectadas a rede tende a melhorar as características das tensões trifásicas em relação ao desequilíbrio. É importante ressaltar que, a piora nos índices de desequilíbrio ocorreram apenas nos medidores 645 e 632 45, visto que ambos apresentam a fase A aterrada e dessa forma, a medição sempre apresentará alto desequilíbrio, devido a forma construtiva da rede nesse ponto. Pode-se dizer que há um desbalanceio intrínseco devido ao uso do ponto da rede pelo consumidor, onde que não há forma de compensação para o evento por meio da fase A do sistema.

Tabela 23 – Tensões com cinco GDs ligadas

	Va	Vb	Vc	Des(%)
611	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	3151.68 \angle 118.77	100
636	3308.43 \angle -1.53	3394.12 \angle -119.85	3261.93 \angle 119.56	0.61
632 33	3308.43 \angle -1.53	3394.12 \angle -119.85	3261.93 \angle 119.56	0.61
632 45	0.00 \angle 0.00	3394.12 \angle -119.85	3261.93 \angle 119.56	50.47
632 71	3308.43 \angle -1.53	3394.12 \angle -119.85	3261.93 \angle 119.56	0.61
633	3303.70 \angle -1.46	3390.13 \angle -119.82	3259.61 \angle 119.64	0.6
634	376.52 \angle -0.96	387.04 \angle -119.46	372.37 \angle 120.06	0.66
645	0.00 \angle 0.00	3380.75 \angle -119.77	3253.91 \angle 119.66	50.46
646	0.00 \angle 0.00	3378.26 \angle -119.81	3248.90 \angle 119.75	50.36
650	3396.63 \angle 0.00	3396.63 \angle -120.00	3396.63 \angle 120.00	0
652	3205.38 \angle -3.32	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	100
671	3230.05 \angle -3.37	3433.85 \angle -119.68	3164.01 \angle 119.01	1.54
671 92	3230.05 \angle -3.37	3433.85 \angle -119.68	3164.01 \angle 119.01	1.54
675	3210.14 \angle -3.61	3440.86 \angle -119.85	3158.11 \angle 119.02	1.67
680	3230.05 \angle -3.37	3433.85 \angle -119.68	3164.01 \angle 119.01	1.54
684	3223.56 \angle -3.40	0.00 \angle 0.00	3157.87 \angle 118.91	51.75
692	3230.05 \angle -3.37	3433.85 \angle -119.68	3164.01 \angle 119.01	1.54

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 24 – Correntes com cinco GDs ligadas

	Ia	Ib	Ic	In
611	0.00 ∠ 0.00	0.00 ∠ 0.00	93.52 ∠ 125.48	93.52 ∠ 125.48
636	452.07 ∠ -44.06	215.27 ∠ 174.26	423.52 ∠ 72.64	261.90 ∠ 25.17
632 33	62.84 ∠ -97.69	52.55 ∠ 148.82	51.02 ∠ 22.12	16.99 ∠ -111.03
632 45	0.00 ∠ 0.00	91.43 ∠ -174.22	76.99 ∠ 35.95	45.99 ∠ 128.51
632 71	416.43 ∠ -36.76	68.62 ∠ -178.27	332.76 ∠ 90.23	275.99 ∠ 17.16
633	62.85 ∠ -97.69	52.55 ∠ 148.82	51.03 ∠ 22.12	16.99 ∠ -111.03
634	543.25 ∠ -97.88	453.82 ∠ 148.60	440.85 ∠ 21.89	147.09 ∠ -111.01
645	0.00 ∠ 0.00	54.11 ∠ -120.97	77.00 ∠ 35.95	34.51 ∠ -1.99
646	0.00 ∠ 0.00	54.11 ∠ -120.97	77.00 ∠ 35.95	34.51 ∠ -1.99
650	452.07 ∠ -44.06	215.26 ∠ 174.26	423.52 ∠ 72.64	261.90 ∠ 25.17
652	85.69 ∠ -37.22	0.00 ∠ 0.00	0.00 ∠ 0.00	85.69 ∠ -37.22
671	437.20 ∠ -36.05	56.82 ∠ -171.24	356.47 ∠ 99.89	251.00 ∠ 19.85
671 92	348.88 ∠ -17.60	78.40 ∠ -61.14	317.53 ∠ 124.48	209.76 ∠ 24.68
675	269.96 ∠ -2.43	92.84 ∠ -55.76	158.90 ∠ 116.65	256.38 ∠ 12.12
680	0.00 ∠ -57.97	0.00 ∠ 0.00	0.00 ∠ 0.00	0.00 ∠ -57.97
684	85.66 ∠ -37.19	0.00 ∠ 0.00	93.52 ∠ 125.48	28.09 ∠ 60.19
692	313.55 ∠ -6.40	78.40 ∠ -61.14	248.54 ∠ 129.72	209.76 ∠ 24.68

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 25 – Potências com cinco GDs ligadas

	S	P	Q	fp
611	294.75 ∠ 6.71	292.73	34.44	0.99
636	3565.90 ∠ -48.90	2344.27	-2687.01	0.66
632 33	552.15 ∠ -94.99	-47.99	-550.06	0.09
632 45	543.49 ∠ -67.42	208.72	-501.81	0.38
632 71	2671.62 ∠ -34.81	2193.62	-1524.99	0.82
633	551.54 ∠ -95.05	-48.52	-549.4	0.09
634	543.77 ∠ -95.69	-53.94	-541.09	0.1
645	328.91 ∠ -50.24	210.34	-252.86	0.64
646	328.17 ∠ -50.27	209.76	-252.38	0.64
650	3668.13 ∠ -49.58	2378.39	-2792.57	0.65
652	274.66 ∠ -33.90	227.98	-153.18	0.83
671	2700.73 ∠ -28.40	2375.69	-1284.54	0.88
671 92	2233.43 ∠ 1.24	2232.9	48.46	1
675	1533.99 ∠ 10.69	1507.39	284.46	0.98
680	0.00 ∠ -54.59	0	0	0.58
684	536.42 ∠ -12.91	522.86	-119.83	0.97
692	1951.35 ∠ 9.51	1924.54	322.36	0.99

Fonte: Próprio autor, 2019

A.8 Simulação com seis GDs ligadas

GDs 632, 634, 645, 646, 671 e 611 ligadas.

A GD 611 é monofásica e está ligada a fase C. Ela comprova a hipótese de que é possível usar pontos de microgeração para melhorar o perfil da rede. Observa-se que há uma melhora geral nos valores de desequilíbrio de tensão nos medidores, uma vez que a fase C estava sendo mais requisitada em comparação às demais, visto que há pontos de geração da fase B e da fase B e C, logo a fase C estava sobrecarregada em comparação a B. Com a geração na fase C, agora conectada a rede, ocorre uma redução no desequilíbrio de tensão, visto que as fases estão em maior equilíbrio agora.

Tabela 26 – Tensões com seis GDs ligadas

	Va	Vb	Vc	Des(%)
611	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	3233.75 \angle 122.06	100
636	3276.56 \angle -1.59	3412.89 \angle -120.29	3286.73 \angle 120.88	0.16
632 33	3276.56 \angle -1.59	3412.89 \angle -120.29	3286.73 \angle 120.88	0.16
632 45	0.00 \angle 0.00	3412.89 \angle -120.29	3286.73 \angle 120.88	49.14
632 71	3276.56 \angle -1.59	3412.89 \angle -120.29	3286.73 \angle 120.88	0.16
633	3272.14 \angle -1.51	3408.72 \angle -120.26	3284.33 \angle 120.95	0.15
634	373.00 \angle -0.99	389.12 \angle -119.91	375.15 \angle 121.36	0.19
645	0.00 \angle 0.00	3399.48 \angle -120.21	3278.72 \angle 120.97	49.13
646	0.00 \angle 0.00	3397.08 \angle -120.26	3273.75 \angle 121.07	49.02
650	3396.63 \angle 0.00	3396.63 \angle -120.00	3396.63 \angle 120.00	0
652	3135.62 \angle -3.51	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	100
671	3165.57 \angle -3.54	3472.13 \angle -120.55	3214.63 \angle 121.74	0.71
671 92	3165.57 \angle -3.54	3472.13 \angle -120.55	3214.63 \angle 121.74	0.71
675	3146.29 \angle -3.78	3478.89 \angle -120.72	3208.83 \angle 121.74	0.83
680	3165.57 \angle -3.54	3472.13 \angle -120.55	3214.63 \angle 121.74	0.71
684	3153.40 \angle -3.58	0.00 \angle 0.00	3224.21 \angle 121.92	54.17
692	3165.57 \angle -3.54	3472.13 \angle -120.55	3214.63 \angle 121.74	0.71

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 27 – Correntes com seis GDs ligadas

	Ia	Ib	Ic	In
611	0.00 ∠ 0.00	0.00 ∠ 0.00	115.53 ∠ -63.51	115.53 ∠ -63.51
636	443.92 ∠ -44.90	211.77 ∠ 176.13	328.75 ∠ 46.89	333.10 ∠ -10.21
632 33	62.50 ∠ -99.39	52.82 ∠ 149.20	51.26 ∠ 24.64	16.00 ∠ -124.12
632 45	0.00 ∠ 0.00	91.29 ∠ -173.75	77.36 ∠ 36.49	46.01 ∠ 128.36
632 71	409.40 ∠ -37.43	65.90 ∠ -172.75	191.64 ∠ 59.22	369.57 ∠ -14.50
633	62.50 ∠ -99.39	52.82 ∠ 149.20	51.27 ∠ 24.64	16.00 ∠ -124.12
634	540.33 ∠ -99.59	456.09 ∠ 148.99	442.88 ∠ 24.41	138.53 ∠ -124.07
645	0.00 ∠ 0.00	54.08 ∠ -119.96	77.36 ∠ 36.49	35.20 ∠ -1.38
646	0.00 ∠ 0.00	54.08 ∠ -119.96	77.36 ∠ 36.49	35.20 ∠ -1.38
650	443.91 ∠ -44.90	211.77 ∠ 176.13	328.74 ∠ 46.89	333.09 ∠ -10.21
652	83.82 ∠ -37.40	0.00 ∠ 0.00	0.00 ∠ 0.00	83.82 ∠ -37.40
671	431.14 ∠ -36.54	54.57 ∠ -164.36	184.13 ∠ 78.68	342.26 ∠ -15.40
671 92	347.49 ∠ -17.77	79.30 ∠ -62.73	324.46 ∠ 126.79	191.96 ∠ 25.72
675	264.59 ∠ -2.60	93.86 ∠ -56.62	161.45 ∠ 119.37	242.06 ∠ 12.00
680	0.00 ∠ -56.18	0.00 ∠ 0.00	0.00 ∠ 0.00	0.00 ∠ -56.18
684	83.80 ∠ -37.38	0.00 ∠ 0.00	115.53 ∠ -63.51	194.30 ∠ -52.56
692	310.80 ∠ -6.46	79.30 ∠ -62.73	255.51 ∠ 132.38	191.96 ∠ 25.72

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 28 – Potências com seis GDs ligadas

	S	P	Q	fp
611	373.59 ∠ 174.43	-371.83	36.26	1
636	3165.05 ∠ -57.98	1678.07	-2683.59	0.53
632 33	552.69 ∠ -94.95	-47.71	-550.63	0.09
632 45	545.55 ∠ -67.32	210.37	-503.36	0.39
632 71	2150.78 ∠ -44.90	1523.41	-1518.26	0.71
633	552.08 ∠ -95.01	-48.23	-549.97	0.09
634	544.29 ∠ -95.66	-53.66	-541.64	0.1
645	326.64 ∠ -50.39	208.24	-251.66	0.64
646	325.90 ∠ -50.42	207.66	-251.18	0.64
650	3262.16 ∠ -58.40	1709.32	-2778.47	0.52
652	262.84 ∠ -33.90	218.17	-146.58	0.83
671	2138.23 ∠ -36.72	1713.85	-1278.58	0.8
671 92	2252.50 ∠ 1.39	2251.84	54.56	1
675	1520.41 ∠ 10.98	1492.6	289.47	0.98
680	0.00 ∠ -52.64	0	0	0.61
684	188.04 ∠ -143.54	-151.23	-111.76	0.8
692	1965.14 ∠ 9.81	1936.43	334.72	0.99

Fonte: Próprio autor, 2019

A.9 Simulação com sete GDs ligadas

Nessa simulação as GDs 632, 634, 645, 646, 671, 611 e 652 estavam ligadas.

Devido à GD 652 gerar energia para as fases A e C apenas, há uma contribuição para o desbalanceio das fases no sistema, todavia em alguns pontos de sobrecarga da fase A ou C, é evidente que há uma diminuição no desequilíbrio.

Tabela 29 – Tensões com sete GDs ligadas

	Va	Vb	Vc	Des(%)
611	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	3249.20 \angle 121.59	100
636	3288.41 \angle -1.11	3398.38 \angle -120.30	3293.94 \angle 120.67	0.19
632 33	3288.41 \angle -1.11	3398.38 \angle -120.30	3293.94 \angle 120.67	0.19
632 45	0.00 \angle 0.00	3398.38 \angle -120.30	3293.94 \angle 120.67	49.29
632 71	3288.41 \angle -1.11	3398.38 \angle -120.30	3293.94 \angle 120.67	0.19
633	3283.92 \angle -1.03	3394.32 \angle -120.27	3291.46 \angle 120.74	0.19
634	374.32 \angle -0.52	387.51 \angle -119.91	375.95 \angle 121.15	0.26
645	0.00 \angle 0.00	3385.13 \angle -120.22	3285.87 \angle 120.76	49.27
646	0.00 \angle 0.00	3382.74 \angle -120.26	3280.88 \angle 120.86	49.17
650	3396.63 \angle 0.00	3396.63 \angle -120.00	3396.63 \angle 120.00	0
652	3179.86 \angle -2.27	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	100
671	3187.71 \angle -2.53	3442.44 \angle -120.58	3229.14 \angle 121.30	0.63
671 92	3187.71 \angle -2.53	3442.44 \angle -120.58	3229.14 \angle 121.30	0.63
675	3168.26 \angle -2.76	3449.39 \angle -120.75	3223.13 \angle 121.31	0.76
680	3187.71 \angle -2.53	3442.44 \angle -120.58	3229.14 \angle 121.30	0.63
684	3181.53 \angle -2.45	0.00 \angle 0.00	3239.78 \angle 121.45	52.96
692	3187.71 \angle -2.53	3442.44 \angle -120.58	3229.14 \angle 121.30	0.63

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 30 – Correntes com sete GDs ligadas

	Ia	Ib	Ic	In
611	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	114.09 \angle -64.08	114.09 \angle -64.08
636	392.26 \angle -51.81	210.37 \angle 175.22	327.05 \angle 47.64	257.96 \angle -10.97
632 33	62.62 \angle -98.30	52.61 \angle 148.56	51.34 \angle 24.78	14.92 \angle -119.33
632 45	0.00 \angle 0.00	90.44 \angle -174.15	77.23 \angle 36.56	46.18 \angle 127.21
632 71	350.37 \angle -44.03	65.42 \angle -174.46	190.79 \angle 60.50	292.98 \angle -16.61
633	62.62 \angle -98.30	52.61 \angle 148.56	51.34 \angle 24.78	14.92 \angle -119.33
634	541.36 \angle -98.49	454.32 \angle 148.34	443.50 \angle 24.55	129.21 \angle -119.28
645	0.00 \angle 0.00	53.93 \angle -119.95	77.23 \angle 36.56	35.12 \angle -1.19
646	0.00 \angle 0.00	53.93 \angle -119.95	77.24 \angle 36.56	35.12 \angle -1.19
650	392.25 \angle -51.81	210.37 \angle 175.22	327.05 \angle 47.64	257.96 \angle -10.97
652	48.44 \angle -104.12	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	48.44 \angle -104.12
671	371.19 \angle -42.65	54.13 \angle -166.13	185.05 \angle 79.96	265.75 \angle -18.03
671 92	348.25 \angle -16.97	78.42 \angle -62.72	325.51 \angle 126.48	197.42 \angle 27.25
675	266.44 \angle -1.58	93.07 \angle -56.65	162.17 \angle 118.94	245.68 \angle 13.37
680	0.00 \angle -56.28	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle -56.28
684	48.40 \angle -104.13	0.00 \angle 0.00	114.09 \angle -64.08	154.31 \angle -75.72
692	312.14 \angle -5.65	78.42 \angle -62.72	256.27 \angle 131.87	197.42 \angle 27.25

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 31 – Potências com sete GDs ligadas

	S	P	Q	fp
611	370.69 \angle 174.33	-368.88	36.61	1
636	3036.62 \angle -61.70	1439.41	-2673.79	0.47
632 33	553.24 \angle -94.84	-46.68	-551.27	0.08
632 45	542.44 \angle -67.52	207.43	-501.21	0.38
632 71	1983.77 \angle -49.57	1286.62	-1509.95	0.65
633	552.63 \angle -94.90	-47.21	-550.61	0.09
634	544.83 \angle -95.54	-52.63	-542.28	0.1
645	326.59 \angle -50.40	208.2	-251.63	0.64
646	325.86 \angle -50.42	207.62	-251.15	0.64
650	3117.76 \angle -61.98	1464.82	-2752.22	0.47
652	154.03 \angle -101.85	-31.63	-150.75	0.21
671	1966.42 \angle -41.01	1483.85	-1290.36	0.75
671 92	2265.95 \angle 1.17	2265.47	46.43	1
675	1533.12 \angle 10.70	1506.48	284.56	0.98
680	0.00 \angle -53.75	0	0	0.59
684	415.34 \angle -163.90	-399.05	-115.18	0.96
692	1977.70 \angle 9.49	1950.63	326.09	0.99

Fonte: Próprio autor, 2019

A.10 Simulação com oito GDs ligadas

A simulação ocorreu com as GDs 632, 634, 645, 646, 671, 611, 652 e 692 ativadas.

A nova GD ativada, a GD 692, gera energia para as 3 fases do sistema. Como já mencionado anteriormente, é possível verificar que há melhora generalizada dos valores de desequilíbrio de tensão na rede com o aumento da microgeração em pontos equilibrados.

Tabela 32 – Tensões com oito GDs ligadas

	Va	Vb	Vc	Des(%)
611	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	3271.62 \angle 122.92	100
636	3272.94 \angle -1.15	3408.26 \angle -120.51	3304.51 \angle 121.32	0.09
632 33	3272.94 \angle -1.15	3408.26 \angle -120.51	3304.51 \angle 121.32	0.09
632 45	0.00 \angle 0.00	3408.26 \angle -120.51	3304.51 \angle 121.32	48.63
632 71	3272.94 \angle -1.15	3408.26 \angle -120.51	3304.51 \angle 121.32	0.09
633	3268.60 \angle -1.07	3404.11 \angle -120.48	3302.00 \angle 121.39	0.1
634	372.61 \angle -0.54	388.61 \angle -120.13	377.13 \angle 121.79	0.12
645	0.00 \angle 0.00	3394.99 \angle -120.43	3296.46 \angle 121.42	48.62
646	0.00 \angle 0.00	3392.64 \angle -120.48	3291.49 \angle 121.51	48.52
650	3396.63 \angle 0.00	3396.63 \angle -120.00	3396.63 \angle 120.00	0
652	3149.12 \angle -2.36	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	100
671	3156.42 \angle -2.63	3462.74 \angle -120.99	3251.83 \angle 122.64	0.21
671 92	3156.42 \angle -2.63	3462.74 \angle -120.99	3251.83 \angle 122.64	0.21
675	3137.28 \angle -2.86	3469.56 \angle -121.15	3245.88 \angle 122.64	0.33
680	3156.42 \angle -2.63	3462.74 \angle -120.99	3251.83 \angle 122.64	0.21
684	3150.46 \angle -2.55	0.00 \angle 0.00	3262.34 \angle 122.79	54.06
692	3156.42 \angle -2.63	3462.74 \angle -120.99	3251.83 \angle 122.64	0.21

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 33 – Correntes com oito GDs ligadas

	Ia	Ib	Ic	In
611	0.00 ∠ 0.00	0.00 ∠ 0.00	112.01 ∠ -62.89	112.01 ∠ -62.89
636	388.24 ∠ -52.42	208.84 ∠ 176.17	319.00 ∠ 30.79	329.34 ∠ -23.33
632 33	62.47 ∠ -99.14	52.75 ∠ 148.78	51.45 ∠ 25.94	14.72 ∠ -126.55
632 45	0.00 ∠ 0.00	90.41 ∠ -173.91	77.39 ∠ 36.80	46.17 ∠ 127.22
632 71	346.71 ∠ -44.54	64.31 ∠ -171.61	171.28 ∠ 30.11	371.17 ∠ -26.68
633	62.47 ∠ -99.14	52.75 ∠ 148.78	51.45 ∠ 25.94	14.72 ∠ -126.55
634	540.03 ∠ -99.34	455.52 ∠ 148.57	444.46 ∠ 25.71	127.51 ∠ -126.48
645	0.00 ∠ 0.00	53.91 ∠ -119.46	77.40 ∠ 36.80	35.46 ∠ -0.93
646	0.00 ∠ 0.00	53.91 ∠ -119.46	77.40 ∠ 36.80	35.46 ∠ -0.92
650	388.23 ∠ -52.42	208.83 ∠ 176.17	318.99 ∠ 30.79	329.34 ∠ -23.33
652	48.32 ∠ -106.03	0.00 ∠ 0.00	0.00 ∠ 0.00	48.32 ∠ -106.03
671	367.88 ∠ -43.04	53.29 ∠ -162.60	132.25 ∠ 49.70	346.06 ∠ -28.70
671 92	347.61 ∠ -17.05	78.93 ∠ -63.48	224.74 ∠ 129.93	223.34 ∠ -0.05
675	263.83 ∠ -1.68	93.61 ∠ -57.06	163.32 ∠ 120.27	238.65 ∠ 13.26
680	0.00 ∠ -55.39	0.00 ∠ 0.00	0.00 ∠ 0.00	0.00 ∠ -55.39
684	48.28 ∠ -106.04	0.00 ∠ 0.00	112.01 ∠ -62.89	150.89 ∠ -75.53
692	310.81 ∠ -5.69	78.93 ∠ -63.48	157.89 ∠ 140.13	223.34 ∠ -0.05

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 34 – Potências com oito GDs ligadas

	S	P	Q	fp
611	366.45 ∠ 174.19	-364.57	37.11	0.99
636	2900.10 ∠ -67.61	1104.78	-2681.42	0.38
632 33	553.45 ∠ -94.83	-46.61	-551.49	0.08
632 45	543.40 ∠ -67.48	208.16	-501.95	0.38
632 71	1789.27 ∠ -57.92	950.25	-1516.08	0.53
633	552.85 ∠ -94.89	-47.14	-550.83	0.09
634	545.04 ∠ -95.53	-52.56	-542.5	0.1
645	325.25 ∠ -50.48	206.95	-250.92	0.64
646	324.51 ∠ -50.51	206.37	-250.44	0.64
650	2987.84 ∠ -67.73	1132.07	-2765.07	0.38
652	152.15 ∠ -103.67	-35.95	-147.85	0.24
671	1724.34 ∠ -48.25	1148.21	-1286.45	0.67
671 92	1935.02 ∠ 1.48	1934.37	49.9	1
675	1526.38 ∠ 10.85	1499.1	287.3	0.98
680	0.00 ∠ -52.76	0	0	0.61
684	414.45 ∠ -164.36	-399.1	-111.74	0.96
692	1650.04 ∠ 11.63	1616.18	332.52	0.98

Fonte: Próprio autor, 2019

A.11 Simulação com nove GDs ligadas

GDs 632, 634, 645, 646, 671, 611, 652, 692 e 675 ligadas.

Assim como na situação anterior, a GD 675, também trifásica, melhora o caracter geral do perfil de desequilíbrio do sistema analisado.

Tabela 35 – Tensões com nove GDs ligadas

	Va	Vb	Vc	Des(%)
611	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	3353.63 \angle 123.53	100
636	3291.24 \angle 0.52	3376.38 \angle -120.70	3344.75 \angle 121.65	0.59
632 33	3291.24 \angle 0.52	3376.38 \angle -120.70	3344.75 \angle 121.65	0.59
632 45	0.00 \angle 0.00	3376.38 \angle -120.70	3344.75 \angle 121.65	48.23
632 71	3291.24 \angle 0.52	3376.38 \angle -120.70	3344.75 \angle 121.65	0.59
633	3286.88 \angle 0.59	3372.46 \angle -120.66	3341.92 \angle 121.71	0.59
634	374.65 \angle 1.11	385.05 \angle -120.30	381.62 \angle 122.09	0.6
645	0.00 \angle 0.00	3363.56 \angle -120.62	3336.51 \angle 121.74	48.22
646	0.00 \angle 0.00	3361.28 \angle -120.66	3331.51 \angle 121.83	48.12
650	3396.63 \angle 0.00	3396.63 \angle -120.00	3396.63 \angle 120.00	0
652	3183.15 \angle 1.13	0.00 \angle 0.00	0.00 \angle 0.00	100
671	3190.79 \angle 0.86	3397.56 \angle -121.41	3334.95 \angle 123.27	0.84
671 92	3190.79 \angle 0.86	3397.56 \angle -121.41	3334.95 \angle 123.27	0.84
675	3191.21 \angle 0.90	3400.39 \angle -121.50	3336.64 \angle 123.30	0.91
680	3190.79 \angle 0.86	3397.56 \angle -121.41	3334.95 \angle 123.27	0.84
684	3184.86 \angle 0.94	0.00 \angle 0.00	3344.89 \angle 123.40	51.91
692	3190.79 \angle 0.86	3397.56 \angle -121.41	3334.95 \angle 123.27	0.84

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 36 – Correntes com nove GDs ligadas

	Ia	Ib	Ic	In
611	0.00 / 0.00	0.00 / 0.00	104.58 / -62.86	104.58 / -62.86
636	310.19 / -98.11	188.10 / 163.85	352.06 / 6.66	247.88 / -59.65
632 33	62.65 / -96.51	52.31 / 147.18	51.91 / 28.15	10.79 / -119.35
632 45	0.00 / 0.00	87.73 / -174.68	77.25 / 37.52	46.83 / 123.83
632 71	244.70 / -98.55	47.77 / 146.70	228.84 / -10.10	296.10 / -59.79
633	62.66 / -96.51	52.31 / 147.18	51.92 / 28.15	10.79 / -119.35
634	541.63 / -96.71	451.75 / 146.96	448.40 / 27.92	93.56 / -119.27
645	0.00 / 0.00	53.48 / -118.63	77.25 / 37.52	35.66 / 0.16
646	0.00 / 0.00	53.48 / -118.63	77.26 / 37.52	35.66 / 0.17
650	310.18 / -98.11	188.09 / 163.85	352.05 / 6.66	247.88 / -59.65
652	48.46 / -100.53	0.00 / 0.00	0.00 / 0.00	48.46 / -100.53
671	250.54 / -93.28	33.61 / 145.49	164.29 / -9.25	284.13 / -64.99
671 92	96.64 / -67.87	64.57 / -32.84	67.20 / 149.67	96.31 / -70.18
675	36.07 / 172.08	82.53 / -31.56	9.23 / -7.96	58.93 / -42.10
680	0.00 / -54.25	0.00 / 0.00	0.00 / 0.00	0.00 / -54.25
684	48.41 / -100.54	0.00 / 0.00	104.58 / -62.86	145.93 / -74.56
692	21.78 / -59.69	64.57 / -32.84	49.15 / -131.55	96.31 / -70.18

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 37 – Potências com nove GDs ligadas

	S	P	Q	fp
611	350.73 / 173.62	-348.56	39	0.99
636	2735.84 / -100.34	-491.04	-2691.41	0.18
632 33	556.07 / -94.37	-42.4	-554.46	0.08
632 45	535.58 / -68.00	200.61	-496.59	0.37
632 71	1657.65 / -112.86	-643.87	-1527.49	0.39
633	555.47 / -94.43	-42.93	-553.81	0.08
634	547.58 / -95.07	-48.37	-545.44	0.09
645	323.91 / -50.57	205.71	-250.2	0.64
646	323.18 / -50.60	205.13	-249.73	0.63
650	2800.88 / -99.65	-469.41	-2761.26	0.17
652	154.24 / -101.66	-31.17	-151.06	0.2
671	1385.01 / -108.27	-434.3	-1315.16	0.31
671 92	319.60 / 5.67	318.04	31.57	1
675	305.92 / 115.93	-133.77	275.12	0.44
680	0.00 / -55.12	0	0	0.57
684	394.92 / -163.38	-378.42	-112.94	0.96
692	316.99 / 90.59	-3.28	316.98	0.01

Fonte: Próprio autor, 2019