



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA
PARAÍBA - CAMPUS JOÃO PESSOA
CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ANÁLISE DA POTÊNCIA ATIVA INJETADA NA
REDE DE DISTRIBUIÇÃO PELA GERAÇÃO
DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA EM UM
ALIMENTADOR DE 10 BARRAS**

ALMIR DA SILVA SANTOS

João Pessoa
2022

ALMIR DA SILVA SANTOS

ANÁLISE DA POTÊNCIA ATIVA INJETADA NA REDE DE
DISTRIBUIÇÃO PELA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
FOTOVOLTAICA EM UM ALIMENTADOR DE 10 BARRAS

**Trabalho de Conclusão de Curso sub-
metido à Instituto Federal da Paraíba,
Campus João Pessoa, como requisito
necessário para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Elétrica**

João Pessoa, Agosto de 2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *campus* João Pessoa

S237a Santos, Almir da Silva.

Análise da potência ativa injetada na rede de distribuição pela geração distribuída fotovoltaica em um alimentador de 10 barras / Almir da Silva Santos. - 2022.

28 f. : il.

TCC (Graduação - Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação da Paraíba / Unidade Acadêmica de Processos Industriais, 2022.

Orientação : Prof^ª D.ra Diana Moreno Nobre.

1. Geração distribuída. 2. Energia solar fotovoltaica. 3. Rede de distribuição de energia. 4. Energias renováveis. I. Título.

CDU 621.3.05(043)

Lucrecia Camilo de Lima
Bibliotecária - CRB 15/132

INSTITUTO FEDERAL DA PARAÍBA

ALMIR DA SILVA SANTOS

Esta Monografia foi julgada adequada para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, sendo aprovada em sua forma final pela banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 DIANA MORENO NOBRE
Data: 07/02/2023 09:33:53-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Orientadora: Profa. Dra. Diana Moreno
Nobre - IFPB

Documento assinado digitalmente
 FRANKLIN MARTINS PEREIRA PAMPLONA
Data: 06/02/2023 23:18:46-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Co-orientador Prof. Dr. Franklin Martins
Pereira Pamplona
Instituto Federal da Paraíba - IFPB

Documento assinado digitalmente
 WALMERAN JOSE TRINDADE JUNIOR
Data: 07/02/2023 14:26:15-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Walmeran Jose Trindade Junior
Instituto Federal da Paraíba - IFPB

João Pessoa, Agosto de 2022

Dedico este trabalho a Deus, por sempre ser meu amparo em momentos difíceis. Dedico a minha mãe Severina Ferreira da Silva Santos e ao meu pai José Arnaldo dos Santos por sempre serem meu suporte e me incentivarem na minha jornada, aos meus irmãos Angélica, Acácio, Ângela, Adriano e Aline, que são para mim exemplos de dedicação. Os quais também sempre acompanharam e me deram suporte dentro do curso. Dedico também a Brenda Alexia por ser uma pessoa especial em minha vida.

Agradecimentos

Agradeço a Professor Franklin Pamplona pela gentileza ao me ensinar com tanto carinho e empenho.

Agradeço a todos aos professores do IFPB por serem grandes influenciadores na minha formação, em especial ao Professor Walter Fialho, Professor Laurivan e Professora Diana Nobre.

Aos meus colegas e amigos de sala de aula, com quem tive momentos de muito aprendizado.

Resumo

Neste trabalho é analisado o impacto da geração distribuída em uma rede de 10 barras, alocando 10%, 25%, 50,% e 75% da carga das barras com a geração distribuída. Onde são mensuradas as perdas de potência ativa no sistema de distribuição e as tensões em cada barra, para isso foi utilizado o software *Octave* com a ferramenta *MatPower* para a simulação. Quanto aos resultados, o que se observa é que a geração distribuída contribui para a melhora do sistema de distribuição melhorando níveis de tensão e diminuindo perdas no sistema.

Palavras-chave: Geração Distribuída, Energia Solar Fotovoltaica, Rede de distribuição.

Abstract

In this work, the impact of distributed generation in a 10-bus network is analyzed, allocating 10%, 25%, 50.% and 75% of the bus load with distributed generation. Where the active power losses in the distribution system and the voltages in each bus are measured, the software *Octave* with the tool *MatPower* was used for the simulation. As for the results, what is observed is that distributed generation contributes to the improvement of the distribution system by improving voltage levels and reducing losses in the system.

Keywords:Distributed Generation, Energisa Solar Photovoltaic, Distribution network.

Lista de ilustrações

Figura 1	Ú	Imagem de módulos fotovoltaicos instalados sobre residência	15
Figura 2	Ú	Efeito Fotovoltaico em uma célula.....	15
Figura 3	Ú	Célula Fotovoltaica.....	16
Figura 4	Ú	Composição de um módulo fotovoltaico.....	17
Figura 5	Ú	Diagrama de Fluxo de Potência.....	20
Figura 6	Ú	Tensão nas Barras	23
Figura 7	Ú	Perdas de Potência ativa nas Barras	24

Lista de tabelas

Tabela 1	Ũ	Composição de perdas técnicas.....	17
Tabela 2	Ũ	Valores das potências ativas e reativas de cargas das barras.....	21
Tabela 3	Ũ	Valores de resistência e reatâncias.....	21
Tabela 4	Ũ	Tensão em PU nas Barras e Perda de potência ativa.....	22
Tabela 5	Ũ	Tensões em pu nas Barras	22
Tabela 6	Ũ	Perdas de Potência Ativa nas Barras	23

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Formulação do Problema	11
1.2	Justificativa	11
1.3	Objetivos Gerais	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	Geração Distribuída	13
2.2	Energias Renováveis	14
2.2.1	Energia Solar Fotovoltaica	14
2.3	Perdas em Sistemas Elétricos de Potência	17
2.4	Fluxo de Potência	18
2.5	<i>Matpower</i>	18
3	MÉTODOS E RESULTADOS	20
3.1	Análise da inserção de GD na barras	22
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	25
	REFERÊNCIAS	26
	ANEXOS	27

1 Introdução

Em 17 de abril de 2012 entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 e posteriormente sua revisão, a REN 687/2015, trazendo vários benefícios ao consumidor brasileiro que gerasse sua própria energia principalmente de fontes renováveis ou cogeração de mini e microgeradores. Foi concedido aos consumidores que geram a própria energia o direito de se conectar a rede da distribuidora local, abater valores da sua fatura de energia, caso o consumo da unidade geradora seja menor que a geração, são concedidos créditos para abater nas faturas de energia.

Uma das fontes renováveis mais disponíveis em nosso planeta é a energia solar, que se destaca como uma fonte abundante, sustentável e com reduzido impacto sobre o meio ambiente (JUNIOR et al., 2014). Segundo Pereira et al. (2017), incide diariamente no Brasil um potencial de geração elétrica entre 4,4 kWh/m² a 5.4 kWh/m². Com destaque para a região Nordeste onde se concentram os maiores índices. A Alemanha que já liderou o mercado de energia Fotovoltaica no mundo, tem na sua parte mais ensolarada um índice de radiação solar 40% a menos que a região menos ensolarada brasileira.

1.1 Formulação do Problema

Com os incentivos da geração distribuída (GD), a inserção da geração fotovoltaica se torna atrativa para o consumidor. Sua modularidade e facilidade ao se adaptar aos mais variados telhados ou estruturas de solo, torna ainda mais vantajosa a escolha. Com isso, vêm ocorrendo o crescimento de centrais geradoras fotovoltaicas diretamente conectada ao sistema de distribuição de energia elétrica, que vem modificando o cenário a operação da rede distribuição das grandes usinas e tem sua geração de forma concentrada.

Portanto, torna-se necessário um estudo da integração da geração distribuída (GD) com a rede de distribuição de energia, com o intuito de verificar se a GD tem influência positiva no desempenho da rede de distribuição.

1.2 Justificativa

A geração distribuída pode alterar um dos aspectos mais usuais da rede: o sentido unidirecional do fluxo de potência, desde a subestação de distribuição (fonte) até os consumidores (carga). Com a inserção da GD esse aspecto pode mudar, pois unidades que anteriormente só consumiam energia, agora também podem injetar o excedente de sua geração na rede, invertendo o fluxo de potência e podendo alterar o perfil de tensão dos

barramentos (GONÇALVES; BALLERINI; FREITAS, 2016).

Levando em consideração a qualidade da energia, é de grande importância fazer um estudo da potência ativa proveniente dos consumidores que possuem GD e analisar sua influência nos parâmetros de qualidade da rede, com relação ao montante de energia injetada no sistema.

1.3 Objetivos Gerais

Modelar e simular a influência de alocações de unidades de GD em uma rede de distribuição radial, de forma que se possa avaliar os efeitos da potência ativa injetada pela GD, nos parâmetros de qualidade da rede de distribuição sobre potência ativa e tensão.

São objetivos específicos deste trabalho:

- Realizar a modelagem de um sistema de distribuição em regime permanente;
- Utilizar software *Octave* com a ferramenta *MatPower* para simular a inserção de GD solar fotovoltaica no sistema;
- Estudar e avaliar o comportamento do fluxo de potência, tensão nas barras e das perdas de energia no sistema de distribuição, depois da conexão de unidades geradoras fotovoltaicas.

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo capítulos são apresentados, de forma sucinta, os conceitos fundamentais necessários ao entendimento do estudo desenvolvido, com destaque para: geração distribuída, energia renováveis, perdas no sistema elétrico, fluxo de potência e sobre o software *Matpower*.

2.1 Geração Distribuída

A geração distribuída no Brasil, primeiramente foi definida pela Artigo 14º do Decreto Lei nº 5.163 de 2004, onde se diz: "Considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de: I - Hidrelétrica com capacidade instalada superior a 30 MW; e II - termoeletrica, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a 75% ".

Porém em 2012, com o lançamento da Resolução Normativa 482 pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), a geração distribuída foi caracterizada como uma central geradora de energia elétrica, dividida em micro e minigeração distribuída.

Para se caracterizar como uma microgeração a potência instalada deve ser menor ou igual a 75 kW e utilizar fontes renováveis de energia elétrica ou cogeração qualificada. Para se caracterizar como minigeração distribuída a potência instalada deve ser superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para demais fontes renováveis de energia elétrica ou cogeração qualificada. Ambas conectadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

Também podemos considerar que a geração distribuída é uma planta de geração de pequeno porte, estrategicamente localizada próxima ao centro de carga ou aos consumidores, proporcionando vantagens e suporte para as redes de distribuição existentes. A GD tem como intuito o uso integrado ou isolado de recursos modulares de pequeno porte por concessionárias, consumidores e terceiros em aplicações que beneficiam o sistema elétrico e/ou consumidores específicos.

Esta geração mais próxima da carga ou dos consumidores facilita a diminuição de perdas associadas ao transporte existente na forma convencional, além de, diversificar as tecnologias empregadas na produção de energia, podendo gerar escolhas a partir de fatores, como por exemplo, o requerimento específico ou a disponibilidade dos recursos energéticos locais. Portanto, pode-se inferir que

a GD é uma denominação genérica de um tipo de geração elétrica diferente da centralizada por ocorrer em locais que não seriam instaladas usinas geradoras convencionais, aumentando assim, a distribuição geográfica da geração de energia elétrica da região.(BORÉM; VASCONCELOS, 2017)

A geração distribuída se mostrou, ao longo dos anos, eficiente e economicamente viável por apresentar aumento da potência disponível sem alteração da estrutura já existente do sistema. Com a inserção da geração distribuída, a rede alterou seu aspecto unidirecional no sentido do fluxo de potência, sendo possível inserir potência à rede com a geração pontual de energia. Apesar das vantagens oferecidas pela geração distribuída, tanto no âmbito econômico quanto ambiental, sua inserção na distribuição pode acarretar alterações na operação do sistema. Uma dessas situações é o aumento do nível de tensão nos barramentos. (GONÇALVES; BALLERINI; FREITAS, 2016)

2.2 Energias Renováveis

As fontes renováveis de energia são aquelas oriundas de recursos naturais encontrados em abundância na natureza ou que se renovam com facilidade, como sol, vento, chuva, marés e energia geotérmica.

Outra característica comumente associada às fontes renováveis é que são formas limpas de geração de energia, ou seja, não poluem o meio ambiente. Isso não é completamente verdade em todos os casos, pois a geração de energia a partir da biomassa, por exemplo, produz alguns resíduos prejudiciais à atmosfera, embora em escala bem menor que os combustíveis derivados do petróleo.

2.2.1 Energia Solar Fotovoltaica

A geração distribuída hoje é predominada por sistemas solares fotovoltaicos. Sua modularidade e a facilidade de ser instalada em residências e comércios contribuem para isso. Estima-se que 99,9% de todas as conexões de micro e minigeração distribuída são da fonte solar fotovoltaica (ABSOLAR, 2021). Em outubro de 2016, o Brasil teve 98,5% de conexões por fonte solar fotovoltaica, sendo 94% em residências e comércios (ABSOLAR, 2021). Dessa forma, o presente trabalho tem o foco na geração distribuída solar fotovoltaica.

A configuração modular da geração distribuída solar fotovoltaica permite que o sistema atenda desde pequenas residências até escalas industriais, permitindo várias configurações de produção de energia e números de painéis, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 ũ Imagem de módulos fotovoltaicos instalados sobre residência

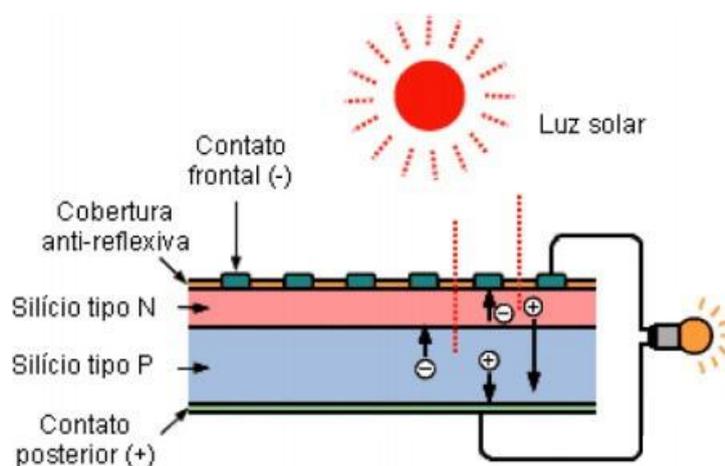


Fonte: Autor,2021

O grande desafio da geração distribuída solar fotovoltaica é sua intermitência, ou seja, a geração não pode ser fornecida continuamente, devido que a presença da luz solar, que incide sobre uma área não pode ser controlada, e podem ter variações abruptas na sua geração elétrica.

Seu funcionamento é através de células que apresentam o efeito fotovoltaico, como mostra a Figura 2, no qual, por meio da absorção da luz é provocada uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semiconductor.

Figura 2 ũ Efeito Fotovoltaico em uma célula



Fonte: (SOLAR, 2016)

Na Figura 3 está ilustrada uma célula fotovoltaica, que consiste basicamente em um díodo de grande área, um substrato de material semiconductor onde é criado um campo

elétrico interno permanente (chamado junção pn) (BRITO; SILVA, 2006).

O material mais utilizado nas células fotovoltaicas é o silício cristalino. As razões da escolha estão associadas às características únicas deste material, e por ser abundante no planeta, cerca de 30%, no conjunto de elementos que constituem a crosta terrestre) (BRITO; SILVA, 2006). A utilização do semicondutor na produção de eletricidade é necessário realizar o processo conhecido como dopagem, ou seja, adição de impurezas químicas para elevar, de forma controlada, um semicondutor à condição de condutor.

A dopagem ocorre com a introdução de átomos de boro e fósforo em cada metade de um pedaço de silício, formando o que se chama junção pn. Os elétrons livres do lado n (fósforo), onde há excesso, passam ao lado p (boro), onde há buracos a serem preenchidos. Desse modo, há um acúmulo de elétrons no lado p, tornando essa região negativamente carregada, e uma redução de elétrons no lado n, tornando-a eletricamente positiva. As cargas aprisionadas originam um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons do lado n para o lado p.

A luz é composta por partículas denominadas fótons. Se a junção pn for exposta a fótons com energia maior que o gap e numa região onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, gerando uma corrente através da junção. Seu deslocamento dá origem a uma diferença de potencial, ou seja, o efeito fotovoltaico. Conectando-se as extremidades do pedaço de silício a um condutor, haverá circulação de elétrons.

Figura 3 – Célula Fotovoltaica.

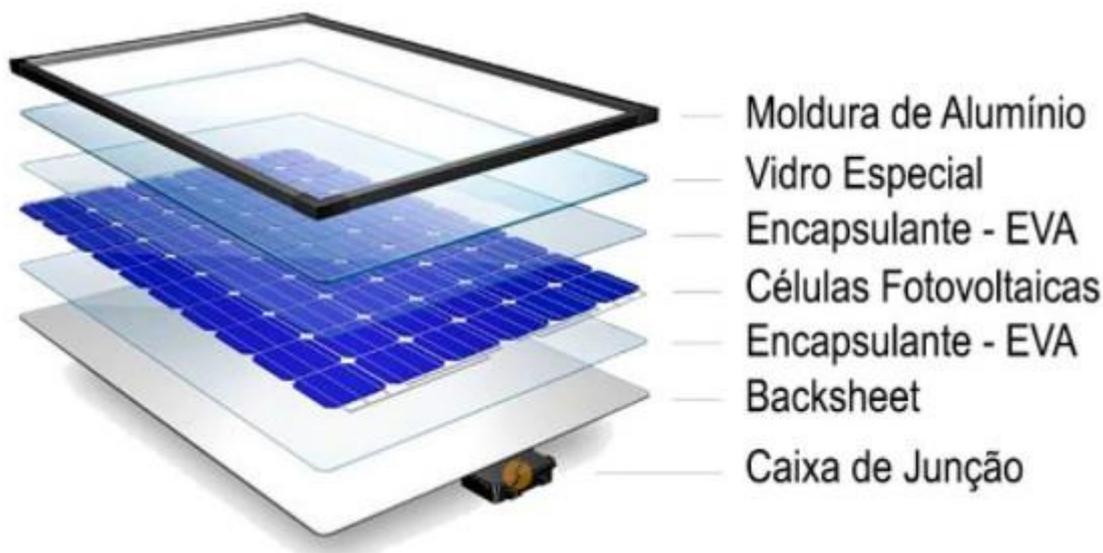


Fonte: (SOLAR, 2016)

Para que a utilização da célula seja viável pois ela não excede, no geral 3W, é preciso formar um módulo fotovoltaico, que são os conjuntos de células agrupadas formando um conjunto de maior potência. E, para se tornar comercial e duradouro os módulos tem várias camadas como ilustrado na Figura 4. Com isso, podemos associar os módulos tanto em série quanto em paralelo para formar os arranjos de geração com tensão e corrente desejadas.

A geração é feita em corrente contínua, portanto, no geral é necessário o uso de um inversor para transformá-la em corrente alternada, que assim pode ser utilizada normalmente em aplicações convencionais.

Figura 4 Ú Composição de um módulo fotovoltaico



Fonte: (ABSOLAR, 2021)

2.3 Perdas em Sistemas Elétricos de Potência

As perdas no sistema elétrico de potência (SEP) representam uma grande influência no valor de faturamento advindo da comercialização da energia. Na Tabela 1 podemos verificar as parcelas que mais contribuem para o total de energia desperdiçada tais como os transformadores de distribuição e a rede primária. O componente de segmento Outros são os ramais de ligação, medidores de energia, capacitores, reguladores de tensão, corrente de fuga em isoladores e para-raios, além de eventuais conexões.

Tabela 1 Ú Composição de perdas técnicas

Segmento	Percentual de Perdas Técnicas	Percentual do Total de Energia
Sistema de Alta Tensão	16 - 25	1,5 - 2
Subestação de Distribuição	9 - 17	0,5 - 1,0
Rede Primária	15 - 30	0,5 - 2,5
Transformador de Distribuição	15 - 55	1 - 2
Rede Secundaria	3 - 30	0,1 - 2
Outros	8,5 -23	0,45 - 1,4

Fonte: (ZULPO, 2014)

Segundo (ZULPO, 2014) conforme citado em (TOLMASQUIM; GUERREIRO et al., 2011), em 2010 o consumo de energia elétrica ficou em torno de 450 TWh e a projeção para 2020 é de 730 TWh, considerando isso, a perda com energia primária é entre 0,5 a 2,5%, estimando um custo financeiro associado a um preço de 115,00 R\$/MWh. Desta forma, temos uma perda financeira que fica na ordem de 260 a 1300 milhões de reais considerando somente as perdas de potência ativa em redes primárias (ZULPO, 2014). E com esses valores é possível perceber que qualquer diminuição na perda de energia há um grande ganho econômico.

2.4 Fluxo de Potência

Neste trabalho, a simulação da rede e a análise da influência da GD nos parâmetros de qualidade da energia são obtidos por meio de estudo com fluxo de potência. A análise de fluxo de potência em redes elétricas consiste basicamente na determinação do estado da rede, a distribuição dos fluxos e das injeções de potências ativa e reativa nas barras, dentre outras grandezas de interesse.

Para se resolver o problema de fluxo de potência, faz-se necessário aplicar um método de cálculo iterativo. Os métodos clássicos são os métodos de Gauss-Seidel, Newton-Raphson e seus derivados. Todos esses métodos possuem como base a simples busca por raízes de um sistema de equações não lineares. Na análise de fluxo de potência são utilizados programas que auxiliam no estudo aquisição e interpretação dos dados.

Assim, considerando a análise de fluxos de potência, é possível maximizar o aproveitamento de potência, incluindo até mesmo a geração distribuída. Para o estudo do fluxo de potência foi utilizada a ferramenta Matpower no GNU Octave, que é um software que engloba uma série de ferramentas voltadas para a área de cálculo e simulações nas áreas da física, matemática e engenharia. Esse software foi utilizado no presente trabalho pela facilidade de se desenvolver uma programação para leitura e exibição dos resultados gerados, além de ser de uso gratuito.

2.5 *Matpower*

O *Matpower* é um pacote gratuito de arquivos tipo M-files para resolução de problemas de fluxo de potência e problemas de otimização. O programa tem o intuito de ser uma ferramenta de simulação para pesquisadores e educadores pela sua fácil maneira de ser utilizada. Foi concebido para ter o melhor desempenho possível mantendo o código simples de se entender e modificar.

O *Matpower* foi inicialmente desenvolvido por Ray D. Zimmerman, Calos E. Murillo Sánchez e Deqian Gan of PSerc na Cornell University sob a direção de Robert

J.Thomas. (ZIMMERMAN; MURILLO-SÁNCHEZ; THOMAS, 2010)

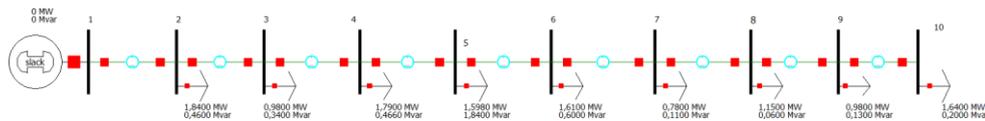
O *Matpower* oferece algumas opções de algoritmos para calcular fluxo de potência. A utilização de cada um deles está condicionada ao tipo de sistema estudado e ao grau de confiabilidade desejada. O método newton com matriz Jacobiana completa é o método padrão do algoritmo utilizado pelo *Matpower* para resolver questões de fluxo de potência. Também existe outras alternativas são método de Gauss-Seidel e a solução DC.

3 Métodos e Resultados

As redes de distribuição usualmente são projetadas para receber a energia elétrica das centrais de geração e distribuí-las para os consumidores (SOLAR, 2016), operando em uma topologia radial, por isso este presente trabalho irá utilizar um alimentador com essa topologia.

O alimentador radial com 10 barras foi retirado de (MONTICELLI, 1983), cujo diagrama unifilar é apresentado na Figura 5, e possui as seguintes configurações: 1 Barra de Geração / Slack, 9 barras de cargas e 9 linhas de distribuição. Trata-se de um alimentador de distribuição de energia elétrica com linhas e cargas equilibradas e será utilizado como sistema-base.

Figura 5 Ú Diagrama de Fluxo de Potência



Fonte: Autor, 2022

A barra 1 simboliza o barramento de saída da subestação e possui um tensão nominal de 13,8 kV. As linhas e cargas, com as características apresentada nas Tabelas 2 e 3, tem impedâncias bem heterogêneas, além disso, tem-se uma relação baixa de X/R , características de sistemas de distribuição.

Na Tabela 2 estão os dados das potência ativa e reativa nominal das cargas nas barras.

Na Tabela 3 estão os dados dos valores das resistências, reatância das linhas de distribuição.

Para conectar unidades de GD nas barras do sistema de distribuição, o sistema pode operar com dois tipos de geração, as duas possibilidades segundo (KAGAN et al., 2003) é representar as unidades de GD com potências ativas e reativas injetadas como cargas negativas ou representar cada unidade sabendo a potência ativa e a tensão como se fosse uma barra de geração.

Para a realização desse estudo foi feito alocações de unidades de GD em todas as barras. Utilizando o pacote Matpower, foram efetuados os estudos de fluxo de potência. O método utilizado pelo *MATPOWER* para encontrar a solução para o fluxo de potência da rede é o de Método de Newton.

Tabela 2 Ū Valores das potências ativas e reativas de cargas das barras

Barra	P(W)	Q(Var)
1	-	-
2	1840	460
3	980	370
4	1790	446
5	1598	1840
6	1610	600
7	780	110
8	1150	60
9	980	130
10	1640	200

FONTE: (LODDI, 2010)

Tabela 3 Ū Valores de resistência e reatâncias

De/Para	R em pu	X em pu
1 - 2	0,0233	0,078
2 - 3	0,0026	0,1144
3 - 4	0,1411	0,2278
4 - 5	0,132	0,115
5 - 6	0,3749	0,3266
6 - 7	0,1711	0,1491
7 - 8	0,3885	0,22
8 - 9	0,9065	0,5134
9 - 10	1,0101	0,5721

FONTE: (LODDI, 2010)

As perdas no alimentador em teste foram obtidas em todas as situações de simulações realizadas com o pacote do *OCTAVE*, o *MATPOWER*. Para tanto, uma vez carregado o arquivo com os dados do alimentador em teste, o comando `runpf` retorna valores de módulo e ângulo das tensões, potências ativa e reativa e perdas, o script utilizado esta ANEXO 1.

Foi considerada a GD como uma carga negativa, pois, segundo (GUEDES, 2013) a GD modelada como carga negativa consegue suprir a carga onde é conectada e fornecer o excedente para o sistema, se for o caso. Neste trabalho como considerou-se apenas o tipo de GD solar fotovoltaica conectada a rede, simulou-se a geração como sendo um fonte que só gera potência ativa para rede.

Na Tabela 4 são apresentados os resultado obtido a simulação do sistema de 10 barras no *MATPOWER*, sem inserção de GD na barras, que coincidem com os valores apresentados nos estudos de são citados em (LODDI, 2010) e (GUEDES, 2013).

Com isso, observa-se que o menor valor tensão em pu encontra-se na barra 10 e

a maior perda de potência ativa no trecho entre as barras 5 e 6, a tensão média desse sistema é de 0,92 pu e a soma das perdas resulta 0,784 MW.

Tabela 4 Ú Tensão em PU nas Barras e Perda de potência ativa

Barra	Tensão em pu	Perdas Ativas (MW)
2	0,993	0,047
3	0,987	0,004
4	0,963	0,177
5	0,948	0,114
6	0,917	0,190
7	0,907	0,048
8	0,889	0,076
9	0,859	0,088
10	0,837	0,390

FONTE: Autor, 2022

3.1 Análise da inserção de GD na barras

Foram realizadas simulações da inserção de GD com alocação de 10%, 25%, 50% e 75% do valor nominal da carga de cada barra com GD. Obtendo os valores de tensão e de perdas de potência ativa e posteriormente agrupando os resultados para uma comparação com os resultados sem a inserção de GD.

A apresentação da comparação dos resultados está resumida na Tabela 5 e a Figura 6 nas quais se pode observar que todas as barras apresentam uma melhoria em relação a nível de tensão sem GD. Pode-se verificar também que as barras que estão mais no final do alimentador como as barras 7, 8 e 9 conseguem um melhor ganho de nível de tensão em relação as cargas que estão próximas da subestação.

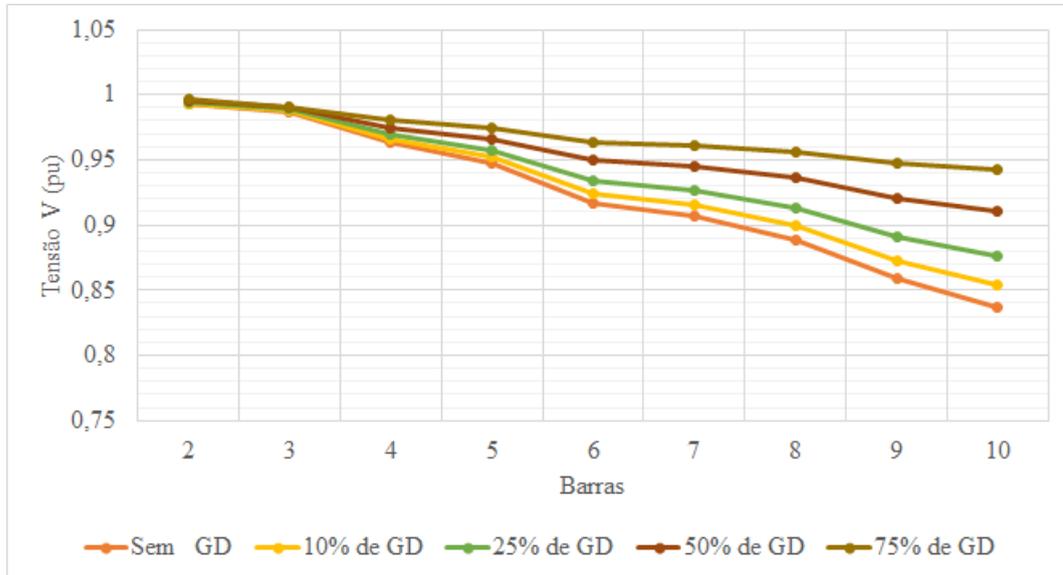
Tabela 5 Ú Tensões em pu nas Barras

Barra	Tensão (pu)				
	Sem GD	10% de GD	25% de GD	50% de GD	75% de GD
2	0,993	0,993	0,994	0,995	0,996
3	0,987	0,988	0,989	0,990	0,991
4	0,963	0,966	0,970	0,975	0,980
5	0,948	0,952	0,957	0,966	0,974
6	0,917	0,924	0,934	0,950	0,964
7	0,907	0,915	0,927	0,945	0,961
8	0,889	0,899	0,913	0,936	0,956
9	0,859	0,872	0,891	0,921	0,948
10	0,837	0,854	0,876	0,910	0,943

Fonte: Autor, 2021

Na Tabela 6 e no gráfico ilustrado pela Figura 7 é possível notar a diminuição de perdas de potência ativa com aumento da penetração de GD, diminuindo cerca de 90% quando se é conectado 75% de GD nas barras.

Figura 6 ũ Tensão nas Barras



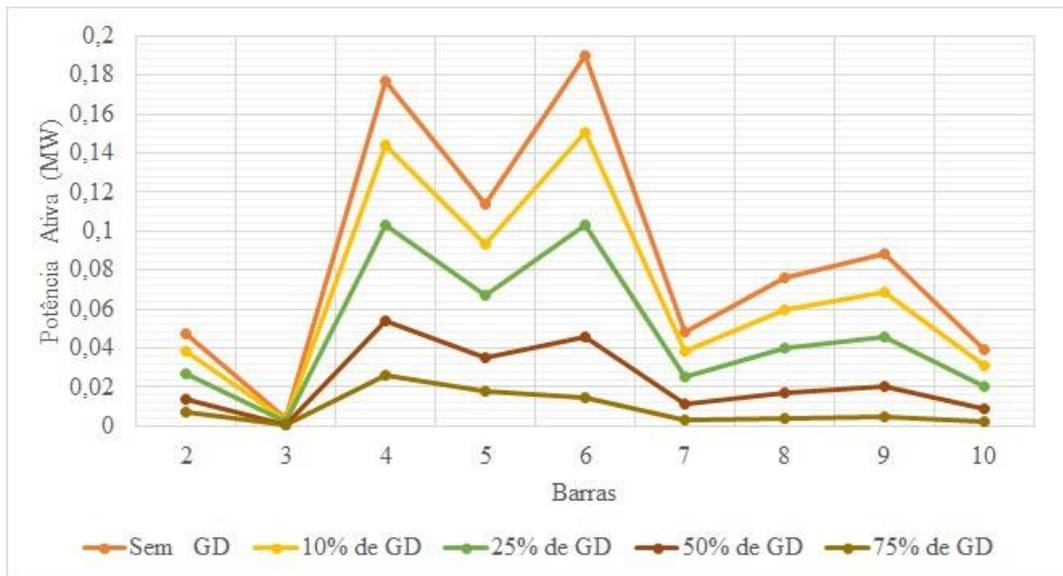
Fonte: Autor, 2022

Tabela 6 ũ Perdas de Potência Ativa nas Barras

Barra	Perdas P (MW)				
	Sem GD	10% de GD	25% de GD	50% de GD	75% de GD
2	0,047	0,038	0,027	0,014	0,007
3	0,004	0,003	0,002	0,001	0,001
4	0,177	0,144	0,103	0,054	0,026
5	0,114	0,093	0,067	0,035	0,018
6	0,190	0,151	0,103	0,046	0,015
7	0,048	0,038	0,025	0,011	0,003
8	0,076	0,060	0,040	0,017	0,004
9	0,088	0,069	0,046	0,020	0,005
10	0,039	0,031	0,020	0,009	0,002

Fonte: Autor, 2022

Figura 7 ũ Perdas de Potência ativa nas Barras



Fonte: Autor, 2022

4 Considerações Finais

A geração distribuída fotovoltaica se mostrou como um grande benefício tanto econômico, quanto ambiental. Propiciando seus benefícios como fonte renovável e um ponto forte para a matriz energética brasileira. Seu crescimento constante gera a necessidade de avaliar o comportamento da sua inserção no sistema elétrico de potência.

Nos cenários que foram avaliados, os níveis de tensão mostraram uma melhora com aumento da geração distribuída fotovoltaica nos barramentos, impactando positivamente o sistema em qualquer ponto que for alocada, e podemos conferir que mais longe do alimentador foi obtido o melhor ganho percentualmente. O que nos permite inferir que alocar GD no final de alimentadores melhora a qualidade de energia. A inserção de GD em barras próximos as subestação, por sua vez, não trazem tantos benefícios ao sistema.

As perdas de potência ativa também foram minimizadas com o aumento da geração distribuída, é possível perceber as melhorias que podem ser geradas na rede através da geração descentralizada, melhorando a qualidade de energia.

A realização deste estudo pode trazer mais discussões para ser debatidas em trabalhos futuros, entre eles, cita-se:

- Um modelo proposto para encontrar a melhor barra do alimentador para atribuição de GD;
- O estudo do impacto financeiro das alocações de GD, de modo a contemplar todos os custos de projeto e instalação;
- E as constatações em alimentadores mais complexos.

Referências

- ABSOLAR. *Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo*. 2021. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 16 junho 2021. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 17.
- BORÉM, L. E. d. P. L. M.; VASCONCELOS, R. A. d. Análise do impacto da geração distribuída na estabilidade transitória. 2017. Citado na página 14.
- BRITO, M. C.; SILVA, J. A. Energia fotovoltaica: conversão de energia solar em electricidade. *Faculdade de ciências da Universidade de Lisboa*, 2006. Citado na página 16.
- GONÇALVES, R.; BALLERINI, B. F.; FREITAS, E. L. de. Influência da geração distribuída em redes de distribuição de energia elétrica. In: *Brazilian Technology Symposium. Anais*. [S.l.: s.n.], 2016. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 14.
- GUEDES, L. d. M. Alocação de unidades de geração distribuída considerando perdas e aspectos econômicos. 2013. Citado na página 21.
- JUNIOR, M. R. d. C. P. et al. Alocação otimizada de centrais solares fotovoltaicas no sistema de distribuição do oeste do estado da Paraíba. Universidade Federal da Paraíba, 2014. Citado na página 11.
- KAGAN, N. et al. Avaliação técnico-econômica da viabilidade de projetos de geração distribuída. In: *II CITENEL-Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica*. [S.l.: s.n.], 2003. Citado na página 20.
- LODDI, T. Cálculo de fluxo de potência unificado em sistemas de transmissão e redes de distribuição através do método de newton desacoplado rápido com rotação de eixos. 2010. Citado na página 21.
- MONTICELLI, A. J. *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. [S.l.]: E. Blucher, 1983. Citado na página 20.
- SOLAR, P. de E. Disponível em:< [http://www. greenpeace. org/brasil](http://www.greenpeace.org/brasil)>. Acesso em: mai, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 15, 16 e 20.
- TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A. et al. Projeção da demanda de energia elétrica: para os próximos 10 anos:(2012-2021): nota técnica dea 16/11. In: EPE. [S.l.], 2011. Citado na página 18.
- ZIMMERMAN, R. D.; MURILLO-SÁNCHEZ, C. E.; THOMAS, R. J. Matpower: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education. *IEEE Transactions on power systems*, IEEE, v. 26, n. 1, p. 12-19, 2010. Citado na página 19.
- ZULPO, R. S. Alocação otimizada de geração distribuída em redes de distribuição. 2014. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

Anexos

ANEXO 1: SCRIPT UTILIZADO PARA SIMULAÇÃO

```

function mpc = case9

A = 13.8; B = 1;

%% bus data % bus; typePdQdGsBsareaV mV abaseKV zoneV maxV minmpc.bus =
[130000110A11.20.8; 21(1.84*B)0.4600110A11.20.8; 31(0.98*B)0.3700110A11.20.8; 41(1.79*
B)0.44600110A11.20.8; 51(1.598*B)1.8400110A11.20.8; 61(1.61*B)0.60000110A11.20.8; 71(0.78*
B)0.1100110A11.20.8; 81(1.15*B)0.0600110A11.20.8; 91(0.98*B)0.1300110A11.20.8; 101(1.64*
B)0.200110A11.20.8; ];

%% generator data % bus Pg Qg Qmax Qmin Vg mBase status Pmax Pmin
Pc1 Pc2 Qc1min Qc1max Qc2min Qc2max rampagrramph0ramp30rampqapf mpc.gen = [100300 -
300110012501000000000000];

%% branch data % fbus tbus r x b rateA rateB rateC ratio angle status angmin
angmax mpc.branch = [ 1 2 0.0233 0.078 0.0 250 250 250 0 0 1 -360 360; 2 3 0.0026 0.1144
0.0 250 250 250 0 0 1 -360 360; 3 4 0.1411 0.2278 0.0 150 150 150 0 0 1 -360 360; 4 5 0.132
0.115 0.0 300 300 300 0 0 1 -360 360; 5 6 0.3749 0.3266 0.0 150 150 150 0 0 1 -360 360; 6
7 0.1711 0.1491 0.0 250 250 250 0 0 1 -360 360; 7 8 0.3885 0.22 0.0 250 250 250 0 0 1 -360
360; 8 9 0.9065 0.5134 0.0 250 250 250 0 0 1 -360 360; 9 10 1.0101 0.5721 0.0 250 250 250
0 0 1 -360 360; ];

```