



**BRUNA ELIZABETH NOGUEIRA**

**ALOCÇÃO ÓTIMA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA  
VISANDO A REDUÇÃO DA PERDA DE POTÊNCIA ATIVA**

**LAVRAS-MG  
2019**

**BRUNA ELIZABETH NOGUEIRA**

**ALOCAÇÃO ÓTIMA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA VISANDO A REDUÇÃO DA  
PERDA DE POTÊNCIA ATIVA**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Curso de Engenharia de Controle e Automação para obtenção do título de Bacharel.

Prof. Me. Paulo Vitor Grillo de Souza  
Orientador

**LAVRAS-MG  
2019**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço todo amor e apoio de meus pais, Sérgio e Rosângela. Sem vocês, nada teria se concretizado. À minha irmã, Jéssica, por ter sido meu exemplo ao longo desses anos. Aos meus queridos avós, Júlio e Almerinda (in memoriam), por terem sido a base da minha criação e por todo carinho. Ao meu namorado, Gustavo, por ser meu porto seguro. Com você, sei que nunca estarei sozinha.

Aos professores do departamento de Engenharia de Controle e Automação por compartilharem comigo experiências e conhecimento para meu crescimento profissional. Agradeço, em especial, Paulo Vitor, por todo apoio e orientação para que este trabalho se concretizasse. Aos amigos e funcionários do departamento. Levarei comigo todos os momentos ali vividos.

Minha imensa gratidão à Deus, pela oportunidade de alcançar mais este objetivo em minha vida.

## RESUMO

Para que os sistemas de distribuição supram o aumento da demanda por energia elétrica, a utilização de ferramentas computacionais para planejamento da expansão dos mesmos torna-se essencial. Neste cenário, o cálculo do fluxo de potência auxilia na identificação dos pontos críticos do sistema, permitindo a resolução de problemas e o melhoramento do desempenho das redes. A inserção de fontes renováveis na matriz energética reduz impactos econômicos e ambientais, além de gerar maior confiabilidade aos consumidores durante o abastecimento devido a diversificação das fontes. Sendo assim, este trabalho propõe um método para alocação de geração distribuída em um ponto ótimo da rede de distribuição, a fim de minimizar perdas de potência ativa. A metodologia proposta foi testada em um sistema de distribuição de 33 barras disponibilizado pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) e aborda o método da soma de potências pelo processo de varredura direta e inversa, o qual objetiva a resolução do fluxo de carga em redes elétricas puramente radiais através de etapas iterativas. Os resultados deste trabalho apontam o método aplicado como robusto e com implementação simplificada, comprovando a eficiência computacional do processo para determinação do estado em redes radiais com alocação ótima de uma geração distribuída no sistema. Além disso, confirma a melhoria nos sistemas de distribuição de energia elétrica pela diminuição da perda de potência ativa, tornando-os mais confiáveis, econômicos e eficientes.

**Palavras-chave:** Fluxo de Potência. Geração Distribuída. Otimização de Sistemas. Redes de Distribuição. Método da Soma de Potência.

## ABSTRACT

In order for distribution systems to meet the increasing demand for electricity, the use of computational tools to plan their expansion becomes essential. In this scenario, the calculation of the power flow assists in the identification of the critical points of the system, allowing the resolution of problems and the improvement of the performance of the networks. The insertion of renewable sources in the energy matrix decreases economic and environmental impacts, as well as generating greater reliability to the consumers during the supply due to the diversification of the sources. Thus, this paper proposes a method to allocate distributed generation at an optimal point of the distribution network, in order to minimize active power losses. The proposed methodology was tested in a 33-bar distribution system provided by the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) and addresses the power summation method by the forward backward sweep process, which aims to solve the load flow in purely radial electrical networks through iterative steps. The results of this paper point out the applied method as robust and with simplified implementation, proving the computational efficiency of the process to determine the state in radial networks with optimal allocation of a distributed generation in the system. In addition, it confirms the improvement in power distribution systems by decrease the loss of active power, making them more reliable, economical and efficient.

**Keywords:** Power Flow. Distributed Generation. Optimization of Systems. Distribution Networks. Power Sum Method.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema elétrico de potência.....	14
Figura 2: Fluxograma do Método de Varredura direta e inversa .....	2.4
Figura 3: Sistema de distribuição simples. ....	24
Figura 4: Topologia do sistema teste 33 barras. ....	28
Figura 5: Perda de potência ativa no sistema sem alocação de geração distribuída.....	39
Figura 6: Perda de potência ativa no sistema com alocação de geração distribuída. ....	39
Figura 7: Perfil de tensão do sistema sem alocação de geração distribuída.....	40
Figura 8: Perfil de tensão do sistema com alocação de geração distribuída.....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fontes de Energia Exploradas no Brasil.....	17
Tabela 2: Unidades consumidoras com GD no Brasil.....	20
Tabela 3: Valores definidos para o sistema de 33 barras.....	29
Tabela 4: Resultados para potências ativa e reativa acumuladas e tensões no ramo.....	32
Tabela 5: Resultado para perda de potências ativa e reativa no sistema.....	34
Tabela 6: Resultados obtidos para o LSF no sistema.....	36
Tabela 7: Valores para perda de potências ativa e reativa após inserção de GD.....	38
Tabela 8: Situação da Tensão de Atendimento para tensão nominal entre 1 kV e 69 kV.	41
Tabela 9: Classificação das barras do sistema teste antes e após alocação de GD .....	42

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- IEEE – Instituto de Engenheiros, Eletricistas e Eletrônicos;
- ABRADEE – Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica;
- GD – Geração Distribuída;
- LSF – Fator de Sensibilidade à Perda;
- GRG – Método do Gradiente Reduzido Generalizado;
- SEP – Sistema Elétrico de Potência;
- SDR – Superintendência de Regulação dos Serviços de Distribuição;
- MCH – Micro-centrais hidrelétricas;
- PO – Pesquisa Operacional;
- V – Volts;
- W – Watts;
- VAr – Volt-ampere reativo;
- N – Número total de nós;
- $P_{ac1}$  – Potência ativa total acumulada no nó 1;
- $Q_{ac1}$  – Potência reativa total acumulada no nó 1;
- $P_i$  – Potência ativa demandada no nó  $i$ ;
- $Q_i$  – Potência reativa demandada no nó  $i$ ;
- $LP_i$  – Perda de potência ativa total no ramo  $i$ ;
- $QP_i$  – Perda de potência reativa total no ramo  $i$ ;
- $P_{aci}$  – Potência ativa acumulada no nó  $i$ ;
- $Q_{aci}$  – Potência reativa acumulada no nó  $i$ ;
- $j$  – Nós imediatamente a jusante do nó  $i$ ;
- $R_i$  – Resistência no nó  $i$ ;
- $X_i$  – Reatância indutiva no nó  $i$ ;
- $V_i$  – Módulo da tensão no  $i$ ;
- $P_{máx}$  – Potência máxima a ser alocada.



## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	9
2.	OBJETIVOS.....	11
2.1	Objetivo Geral.....	11
2.2	Objetivos Específicos.....	11
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
3.1	Sistema elétrico de potência.....	12
3.1.1	Fluxo de potência.....	13
3.1.2	Sistema de distribuição de energia.....	14
3.1.3	Fontes de energia elétrica.....	15
3.2	Geração distribuída.....	17
3.2.1	Tecnologias disponíveis.....	17
3.2.2	Alocação ótima da geração distribuída.....	190
3.2.3	Vantagens e desvantagens da geração distribuída.....	20
3.3	Otimização de Sistemas.....	21
3.3.1	Método de varredura direta e inversa.....	22
3.3.2	Formulação para o método da Soma das Potências.....	23
3.3.2.1	Cálculo para potências acumuladas no sistema.....	23
3.3.2.2	Cálculo para perda de potências no sistema.....	25
3.3.2.3	Cálculo para as tensões no sistema.....	25
3.3.3	Modelagem de sistemas.....	25
3.3.4	Softwares para otimização de sistemas.....	26
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
4.1	Sistema teste IEEE de 33 barras.....	27
4.2	Metodologia de otimização proposta.....	29
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
6	CONCLUSÃO.....	42
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	44

## 1. INTRODUÇÃO

Devido à expansão populacional e ao desenvolvimento tecnológico, o consumo de energia elétrica vem aumentando progressivamente. Estima-se que em 2013 o consumo de energia elétrica direto da rede foi igual a 463 TWh e a projeção para o este consumo em 2050 é de aproximadamente 1465 TWh (EPE, 2016). Sendo assim, para que os sistemas elétricos de potência supram esta demanda, faz-se necessário o desenvolvimento de novas linhas de transmissão; a construção de unidades de geração e a projeção de novas redes de distribuição de energia. Para que essa demanda seja atendida, controlar a qualidade da energia distribuída e desenvolver a rápida e precisa manutenção destes sistemas, passa a ser uma difícil tarefa a ser realizada (ARAÚJO et al., 2015).

Esta expansão no setor elétrico gera impactos ambientais, sociais e econômicos. Portanto, minimizar as perdas de potência ativa nas linhas de distribuição por meio da otimização do sistema viabiliza o ponto ótimo de operação do mesmo, reduzindo impactos econômicos e ambientais. O estudo sobre o fluxo de potência consegue determinar o estado de operação de um sistema de distribuição de energia elétrica.

Durante as últimas décadas, o fluxo de potência tornou-se um importante instrumento para o planejamento e operação de sistemas de energia elétrica. Desta maneira, é possível obter informações a respeito do estado de operação do sistema em regime permanente, determinando se o mesmo encontra-se dentro dos limites estabelecidos em normas técnicas e desenvolver testes prévios para situações reais adversas na rede. Além disso, através da análise do fluxo de potência, é possível identificar novos investimentos para expansão de demanda de carga, atendendo maiores números de consumidores (PUGER, 2013).

A Geração Distribuída (GD) implantada nesses sistemas de distribuição de energia tem a finalidade de atender conceitos voltados para a sustentabilidade através da inserção de fontes renováveis na matriz energética, e para o emprego de novas tecnologias, reduzindo os custos operacionais. Segundo Olade (2011), a alocação de geração distribuída nas redes de energia elétrica acarreta diversas vantagens, uma vez que a inserção próxima ao centro de carga reduz as perdas referentes a transportes de energia elétrica e diversifica as tecnologias requeridas para produzir energia, possibilitando a escolha adequada referente à carga e aos recursos energéticos disponíveis em cada localização.

A otimização de sistemas é aplicada nas ciências exata e administrativa, a fim de solucionar problemas para reduzir custos ou maximizar uma produção. Neste projeto, a otimização será utilizada visando diminuir custos de operações na distribuição de energia elétrica através da alocação de GD, baseando-se no caso teste de 33 barras disponibilizado pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE).

Para auxiliar na otimização deste sistema, o método da soma das potências foi utilizado neste trabalho. O mesmo representa uma das vertentes do método da varredura inversa/direta, sendo um algoritmo computacional que objetiva a resolução do fluxo de carga em redes elétricas puramente radiais. O processo deste método consiste em etapas iterativas, convergindo assim que a diferença de tensão entre duas iterações sucessivas apresentar resultado menor do que uma tolerância pré-definida.

Segundo Simone (2012), este algoritmo é usualmente utilizado nos métodos elaborados para tratamentos do problema de restabelecimento de energia em redes de distribuição radiais. O método de varredura inversa/direta é recomendado por apresentar robustez, facilidade de implementação e por aumentar a eficiência computacional ao determinar o estado da rede, uma vez que o mesmo considera as características radiais do sistema.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

A partir da análise do problema proposto e de posse do modelo matemático que descreve o sistema, propõe-se o desenvolvimento e implementação de um algoritmo de otimização que minimize as perdas de potência ativa nas redes de energia durante a distribuição, através da inserção de geração distribuída em um sistema de 33 barras.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos foram divididos de acordo com a ordem de execução do projeto:

- Analisar o sistema de 33 barras a partir de dados fornecidos pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos;
- Desenvolver um modelo matemático para descrevê-lo, de modo a minimizar a perda de potência ativa, respeitando as restrições do conjunto;
- Implementar algoritmo de otimização a fim de obter o ponto ótimo de alocação da GD através do método de soma de potências;
- Realizar a simulação no sistema de 33 barras para testar o algoritmo proposto e avaliar os resultados.

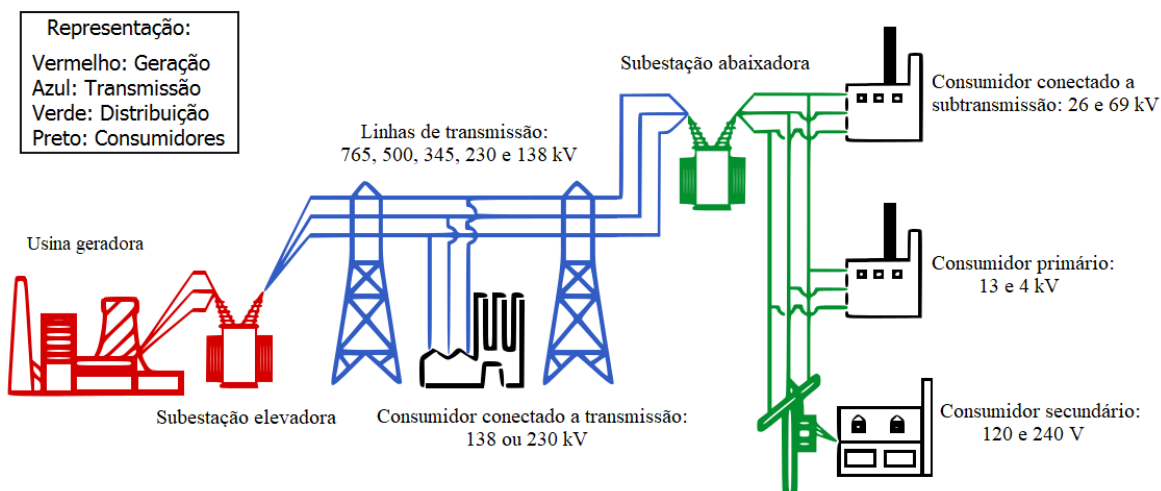
### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Sistema elétrico de potência

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) representa um conjunto de equipamentos que operam com objetivo de fornecer energia elétrica aos consumidores, respeitando padrões de qualidade, segurança e fatores econômicos, além de visar o menor impacto ambiental possível (TORTELLI, 2009). Segundo Gomes (2012), os requisitos que os SEPs devem atender são: continuidade para garantir energia elétrica ao consumidor sempre que necessário; conformidade no fornecimento de energia, respeitando os padrões estabelecidos; flexibilidade para adaptação de mudanças contínuas na topologia da rede; segurança aos consumidores e operários, além de garantir rápida manutenção do sistema. Ainda segundo o autor, é necessária contínua operação, controle e planejamento do processo, por meio de análise do fluxo de potência e da consequente otimização da rede para que estas conformidades sejam atendidas.

Este sistema elétrico se divide em três grandes grupos: geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. O sistema de geração é o responsável pela produção de energia, sendo formado pelo conjunto de unidades geradoras e equipamentos correlatos que convertem uma fonte primária de energia em energia elétrica. As fontes de energia elétrica convencionais são as usinas hidrelétricas com potência acima de 30 MW, as usinas termelétricas movidas a carvão mineral, óleo combustível, gás natural e as usinas nucleares. As fontes alternativas são, em grande parte, energia solar fotovoltaica, usinas eólicas, pequenas centrais hidrelétricas e fontes que utilizam queima de biomassa ou a força das marés (TORTELLI, 2009). A Figura 1 representa o SEP caracterizando em cores diferentes as partes componentes deste.

Figura 1: Sistema elétrico de potência.



Fonte: Adaptado de Electrical Engineering (2017).

A segunda parte do sistema representa o conjunto de linhas de transmissão e as subestações, sendo normalmente dividida entre a transmissão e a subtransmissão. A transmissão interliga dois sistemas ou une as unidades geradoras a um centro de cargas, ou seja, constituindo as linhas e subestações da malha principal, com tensão de serviço superior a 138 kV e inferior a 765 kV (GERAN, 2016). De acordo com a ABRADDEE (2017), as subestações de transmissão estão localizadas nos pontos de conexão com geradores, a fim de elevar o nível de tensão da energia elétrica gerada e tornar o transporte economicamente viável, sendo normalmente denominadas subestações elevadoras de tensão. A tensão nas linhas deve ser proporcional à quantidade de energia a ser transportada e a distância percorrida. Portanto, quanto maior a distância entre a geração e o consumidor final, maior também será o nível de tensão para a transmissão desta energia.

O sistema de distribuição é formado por linhas, alimentadores, ramais de serviços e subestações abaixadoras. É o responsável por atender o consumidor final, trabalhando com tensão de serviço entre 110/220 V a 69 kV.

### 3.1.1 Fluxo de potência

Segundo Kagan, Oliveira e Robba (2005) entende-se por fluxo de potência, ou fluxo de carga, um problema matemático identificado através de um conjunto de equações algébricas não lineares. Ao se tratar de sistemas elétricos de potência em regime permanente, a partir da solução deste problema é possível determinar os valores de tensão complexa nas barras, a

potência que circula através das linhas e as perdas existentes no sistema, identificando, portanto, se o sistema está operando adequadamente.

Os sistemas de distribuição em geral são radiais, ou seja, são caracterizados por ter apenas um caminho entre a saída do alimentador de distribuição e o consumidor. Dessa maneira, a potência flui por meio de um trajeto da subestação até o consumidor e, caso haja interrupção, há perda total de energia aos beneficiados que estão à jusante do local danificado (SEMENSATO, 2013).

A análise do fluxo de potência em redes de energia elétrica tem o objetivo de examinar a segurança através da simulação da violação dos limites de operação; planejar a expansão de área de cobertura e otimizar os sistemas de operação através da determinação de pontos em que as perdas são consideradas elevadas (SILVA, 2016).

Para Puger (2013), a representação algébrica do fluxo de potência é utilizada em casos que as variações com o tempo são lentas o suficiente a ponto de não considerar os efeitos transitórios existentes, situação conhecida como regime permanente. Ainda segundo o autor, este conjunto de equações é alcançado a partir da conservação das potências ativa e reativa em cada nó do sistema. A Potência Ativa ( $P$ ) é aquela que efetivamente produz o trabalho na carga, sendo expressada em Watts ( $W$ ). A Potência Reativa ( $Q$ ) é a potência que não é convertida em trabalho útil, sendo armazenada e devolvida ao gerador. A mesma é utilizada para criar e manter os campos eletromagnéticos das cargas indutivas, expressa em volt-ampère reativo ( $VAr$ ).

Sendo assim, a soma das potências que circulam pelos componentes internos de um nó deve ser igual à potência líquida injetada, cumprindo a lei de Kirchhoff para as correntes.

### **3.1.2 Sistema de distribuição de energia**

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (2015), entende-se por distribuição no setor elétrico, o segmento responsável pelo rebaixamento da tensão advinda do sistema de transmissão. Além disso, esse setor também é encarregado do fornecimento de energia elétrica aos grandes, médios e pequenos consumidores.

A energia distribuída é aquela que, efetivamente, alcança os consumidores conectados à rede elétrica de empresas destinadas a realizarem a distribuição. De acordo com ABRADÉE (2018), essas redes são classificadas como aéreas e subterrâneas. A rede aérea é suportada por postes e caracteriza-se por utilizar cabos de alumínio nus ou isolados e isoladores de porcelana

ou vidro. Quando esta categoria de rede utiliza cabos sem isolamento não é recomendada para ser construída em área urbana, sendo permitido o uso destes cabos somente para reparos. As redes subterrâneas utilizam cabos localizados sob o solo dentro de dutos subterrâneos e possuem diversos padrões construtivos e de diferentes configurações, sendo determinados através de análises de fatores regionais, densidade da carga, tipo de consumidor, pavimento, solo e condições climáticas (Companhia Paranaense de Energia, 2010). Este tipo de implantação de rede apresenta benefícios para as concessionárias de energia e para os consumidores, uma vez que apresentam custos reduzidos de manutenções corretivas e maior nível de segurança.

O cenário brasileiro apresenta 105 distribuidoras de energia elétrica, das quais 54 são concessionárias, 38 são permissionárias e 13 cooperativas de eletrificação rural. Este setor é guiado pela regulação técnica da Superintendência de Regulação dos Serviços de Distribuição (SRD) (ANEEL, 2015). De acordo com o Portal UTFPR (2017), do total de distribuidoras vinculadas a ela, o setor privado é o responsável por 60% da distribuição da energia no Brasil, enquanto 40% é realizada pelas empresas públicas.

O documento “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional” (PRODIST), elaborados pela ANEEL, é responsável por normatizar e padronizar as atividades relacionadas a operação, medição e planejamento da expansão da rede elétrica de distribuição, além de estabelecer condições e responsabilidades aos distribuidores de energia elétrica no Brasil (Governo do Brasil, 2017). Este documento dispõe de indicadores de qualidade da energia, a fim de quantificar o desempenho da distribuição de energia no país.

### **3.1.3 Fontes de energia elétrica**

As fontes de energia são recursos naturais ou artificiais utilizados para a produção de energia, podendo ser encontrada em diversas formas na natureza. A energia solar, cinética, potencial, das marés e a energia geotérmica, são as mais comuns entre as fontes consideradas primárias, aquelas que podem transformar-se em outras formas de energia (PAIVA, 2006). Para a geração de energia elétrica, as fontes primárias são classificadas em renováveis e não renováveis.

Devido à alta demanda de energia elétrica, notou-se que as fontes não renováveis possuem recursos limitados, além de proporcionarem alto impacto ambiental. Esse tipo de fonte de energia elétrica, também conhecida como fonte convencional, representa grande parte da produção de energia gerada mundialmente, devido seu alto rendimento, preços viáveis e o



suporte que possuem para geração e distribuição. Algumas fontes não renováveis de energia elétrica são o petróleo, carvão mineral, gás natural e nuclear.

Considerando o cenário limitante desse tipo de fonte de energia elétrica e a consequência gerada ao meio ambiente, diversos países começaram a pesquisar e explorar fontes alternativas para geração de energia, alterando significativamente o sistema elétrico (VIEIRA E SILVA, 2008). A utilização de fontes renováveis apresenta alto rendimento por meio da reutilização de insumos durante a geração, além de serem repostas de forma natural, apesar de não garantir que sejam inesgotáveis. Exemplos de energias alternativas são àquelas geradas através da ação dos raios solares, ventos, fontes hídricas, geotérmicas e de biomassa.

Devido à abundância de recursos hídricos existentes no Brasil, a matriz energética brasileira é abastecida em grande parte por hidrelétricas, porém, através de incentivos, outras fontes de energia estão sendo implantadas no país. Segundo o Ministério de Minas e Energia (2018), o Brasil está em primeiro lugar na utilização de fontes renováveis considerando o bloco BRICS, formado por países em desenvolvimento. A matriz de geração de energia apontou, em 2016, 25,3% de fontes renováveis, superior à média mundial, de 23,6%. A Tabela 1 indica a quantidade de cada tipo das fontes de energia exploradas no Brasil em 2016.

Tabela 1: Fontes de Energia Exploradas no Brasil.

Fonte de Energia	Quantidade de Empreendimentos	Situação	Potência Total Associada (kW)
Eólica	262	Construção não iniciada	6.220.850
	132	Em construção	3.113.754
	349	Operação	8.479.802
Solar	65	Construção não iniciada	1.851.645
	37	Operação	22.916
Hídrica	172	Construção não iniciada	2.437.987
	46	Em construção	13.942.711
	1212	Operação	92.159.142
Biomassa	40	Construção não iniciada	1.225.178
	9	Em construção	817.317
	521	Operação	13.336.512
Fóssil	105	Construção não iniciada	7.460.140
	4	Em construção	552.722
	2361	Operação	26.174.225
Maré	1	Construção não iniciada	50

Fonte: Tolmasquim (2016).

### **3.2 Geração distribuída**

Segundo Barbosa e Azevedo (2014), entende-se por Geração Distribuída (GD) a utilização de recursos modulares de porte pequeno através de consumidores e concessionárias para favorecer uma comunidade local ou o próprio sistema elétrico. Ainda segundo os autores, a GD é capaz de gerar e armazenar, em pequenas dimensões, energia elétrica, sendo inserida próxima ao centro de carga e possibilitando a interação com a rede.

De acordo com o Instituto Nacional de Eficiência Energética (2008), a GD é definida como geração elétrica desenvolvida de forma próxima ou conjunta com os consumidores, independentemente da tecnologia, potência e fonte utilizada. O Instituto considera que a GD viabiliza uma menor demanda de energia por parte dos consumidores e engloba os seguintes tipos de geração: co-geradores; geradores de emergência; geradores que utilizam resíduos de processo como fonte de energia; geradores destinados à operação em horários de pico; painéis fotovoltaicos e pequenas centrais hidrelétricas.

A geração distribuída é considerada um recurso eficiente energeticamente, uma vez que é instalada próxima ou no próprio ponto de consumo, eliminando as perdas por transmissão e distribuição advindas da geração centralizada, as quais são normalmente empregadas (JARDIM et al., 2004). A implantação de GD na rede elétrica é considerada rápida; permite o uso de diferentes tecnologias para a produção de energia elétrica e possui benefícios criados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que incentivam o uso da mesma, como a “geração compartilhada”, a qual utiliza energia gerada por uma micro ou minigeração distribuída a fim de reduzir as faturas de energia elétrica (ANEEL, 2015).

#### **3.2.1 Tecnologias disponíveis**

As tecnologias existentes nos produtos e processos são essenciais para elaborar situações estratégicas capazes de progredir o sistema elétrico, a fim de reduzir os impactos ocasionados e aumentar a eficiência na geração, transmissão e distribuição de energia. De acordo Pereira et al. (2015), estratégias e mecanismos tecnológicos para reduzir fatores econômicos e regulatórios estão sendo adotados em diversos países como políticas de incentivos para alocações de geração distribuída.

A classificação de GD foi alterada em 2015 na Resolução Normativa 483, a qual definiu-se que o termo abrangeria duas vertentes: microgeração e minigeração. A primeira,

microgeração, corresponde a potências de até 75 kW instaladas e a minigeração caracteriza-se por potências superiores a 75 kW e menores ou iguais a 5 MW (ANEEL, 2015). Considerando as tecnologias em estágios avançados de desenvolvimento, com possibilidades reais de implementação no Brasil, Wright, Carvalho e Spers (2007) citam: micro-centrais hidrelétricas; pequenas centrais eólicas; mini usina para cogeração; micro turbinas; geradores diesel; térmica/solar; fotovoltaica/solar e célula combustível.

As micro-centrais hidrelétricas (MCH) são pequenas turbinas movimentadas por energia potencial advinda da água, com potência máxima de 1000 kW. Essas turbinas são acopladas a um alternador para conseguirem gerar energia para locais previamente determinados e, as MCH são consideradas alternativas viáveis principalmente em comunidades rurais, uma vez que oferecem condições técnicas e econômicas acessíveis (ALTERIMA, 2011).

As pequenas centrais eólicas chegam até a 100 kW de potência, sendo instaladas em locais com altas correntes de ventos, que movimentam as pás. O Brasil possui destaque no mercado eólico mundial, sendo o nono país de maior capacidade instalada, quinto como maior gerador de empregos no setor e o quarto com o maior volume de investimentos, em 2015 (ABRIL, 2018). As mini usinas para cogeração utilizam equipamentos de pequeno porte, com potência máxima de 300 kW, os quais são acoplados a uma fonte primária de energia elétrica. Quando resulta-se em calor, pode gerar água quente ou vapor ao recuperar o calor de gases de escape, e, quando resulta em trabalho, aproveita-se de forma direta para geração de energia (REIS, 2003).

As micro-turbinas representam turbinas com potência máxima de 500 kW, com o objetivo de gerar energia ou operar em pequenos sistemas de cogeração, sendo o gás natural o principal combustível utilizado (ANEEL, 2002). Os geradores diesel são utilizados em casos emergenciais ou para suprir cargas de unidades consumidoras e representam um conjunto de motor ciclo diesel ligado a um alternador/gerador de energia (WRIGHT, CARVALHO, SPERS, 2007). A geração térmica ou solar é desenvolvida por meio da absorção ou penetração da radiação solar, realizando o aquecimento do fluido. Para isso, são utilizados coletores solares ou concentradores solares, de materiais semicondutores (ANEEL, 2008).

A tecnologia fotovoltaica gera energia por meio de painéis solares, constituídos por células solares, as quais são dispositivos de silício que, quando atingidos por luz solar, geram corrente elétrica (TOLMASQUIM, 2016). As células combustíveis foram inventadas no século XIX e geram eletricidade utilizando hidrogênio e oxigênio, por meio de processos químicos.

As células são normalmente alimentadas diretamente com hidrogênio ou este é extraído de gás natural, gasolina ou álcool (WRIGHT, CARVALHO E SPERS, 2007).

A Tabela 2 apresenta a quantidade de unidades consumidoras com geração distribuída no Brasil em 2016.

Tabela 2: Unidades consumidoras com GD no Brasil.

Tipo	Quantidade	Quantidade de UCs que recebem os créditos	Potência instalada (kW)
Hídrica	58	7417	52079,08
Eólica	57	100	10314,4
Fotovoltaica	40502	49247	406547,63
Térmica	119	496	34778,88
Total	40736	57261	503719,99

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2017).

### 3.2.2 Alocação ótima da Geração Distribuída

O estudo para inserção de geração distribuída na rede elétrica consiste em obter o ponto ótimo para instalação de centrais geradoras e a quantidade de potência que deve ser inserida por estas centrais, a fim de minimizar as perdas provenientes dos sistemas de distribuição (COELHO, 2013). Esta análise implica em impactos ambientais e econômicos, portanto é necessário averiguar se a redução das perdas com a alocação de GD é viável, comparado ao custeio de inserção da mesma e à eficiência energética adquirida.

Segundo Skorupa, Martins e Paz (2018) as perdas referentes ao sistema elétrico de potência relacionam-se com o tamanho e o nível de infiltração que a geração distribuída alcança; ao fluxo de potência nas linhas de distribuição e ao comportamento que este fluxo apresentará no sistema. Dessa maneira, alocando GD em um ponto considerado ótimo para o sistema, a mesma poderá acarretar suavização no carregamento das linhas e, este ponto a ser alocado, está intensamente relacionado à função objetivo a ser otimizada.

A alocação de geração distribuída e o correto dimensionamento da mesma determinam o comportamento que o sistema apresentará. Caso estes dois fatores sejam ajustados de maneira incorreta, a inserção de GD pode acarretar problemas ao sistema elétrico, como o aumento das perdas elétricas, degradação do perfil de tensão, por injeção de harmônicos e a violação de

parâmetros de qualidade da energia elétrica (ACHARYA, MAHAT E MITHULANANTHAN, 2006).

### 3.2.3 Vantagens e desvantagens da geração distribuída

A geração distribuída surgiu como alternativa renovável para auxiliar na produção de energia elétrica mundial após observarem altos níveis de emissões de gases poluentes na atmosfera advindos de grandes usinas geradoras e consumidores industriais (NARUTO, 2017).

Sendo assim, citam-se vantagens ambientais como a minimização de impactos causados por instalações de geração e de linhas extensas de transmissão; redução das emissões de gases de efeito estufa; redução no desmatamento através da implantação de geradoras de pequeno porte e uso adequado dos recursos renováveis (BARBOSA E AZEVEDO, 2014). Ainda segundo os autores, as vantagens estendem-se aos consumidores, os quais recebem mais qualidade e confiabilidade no abastecimento; passam a ter menores custos devido a alocação de fontes renováveis e possuem maior controle de geração e consumo. Para o setor elétrico, a GD é vantajosa por reduzir custos e investimentos em subestação de transformação e apresentam maior segurança energética através da geração menos centralizada (INTER ENERGIA, 2016).

Além disso, a fonte geradora de energia predominante no Brasil é a hidrelétrica, a qual gera altos impactos ambientais devido ao alagamento em elevadas escalas, apresentando também fragilidade causada pela sazonalidade do recurso. Dessa maneira, uma alternativa em potencial é a instalação de GD, uma vez que ela pode atuar isoladamente ou como *backup*, devido a capacidade que a mesma tem de levar a geração próxima à carga (SILVEIRA et al., 2017).

Em relação às desvantagens da alocação de geração distribuída, BORÉM e VASCONCELOS (2016) citam para a sociedade: variações da tarifa devido a taxa de utilização da interconexão utilizada; alterações na produção de energia do sistema e tempo de amortização alto devido aos custos de operação. Para o sistema elétrico, os autores citam como desvantagens a alta complexidade para planejar, realizar manutenções e operar sistemas de energia elétrica com GDs, além da diminuição do fator de utilização das instalações das concessionárias que realizam a distribuição.

Portanto, nota-se que um planejamento prévio deve ser elaborado, visando aspectos sociais, econômicos, ambientais, políticos e técnicos, a fim de adquirir maior qualidade no

produto final entregue aos consumidores, fazendo uso da sustentabilidade, reduzindo custos e garantindo maior segurança durante operação.

### **3.3 Otimização de Sistemas**

A otimização de sistemas almeja atingir o ponto ideal de problemas através da pesquisa operacional (PO) realizada previamente. De acordo com Cardoso (2011), a pesquisa operacional deseja obter a programação otimizada para cada operação, considerando os limites nos recursos disponíveis. Ainda segundo o autor, a PO procura interpretar estas variáveis por meio de modelos matemáticos, devendo respeitar as seguintes etapas após a definição do problema: formulação; modelagem; solução; avaliação; decisão e posterior implementação do mesmo.

O desenvolvimento do modelo matemático considera as seguintes condições relacionadas ao problema: variáveis de decisão do sistema; parâmetros do problema; restrições – variáveis que limitam o sistema; e a função objetivo, a qual tem a finalidade de maximizar ou minimizar o sistema, de acordo com o objetivo final do projeto (SILVA, 2013).

Os modelos matemáticos desenvolvidos para encontrar o ponto ótimo do problema classificam-se como determinísticos ou estocásticos. O primeiro é aplicado em sistemas nos quais todos os coeficientes da função objetivo (FO) e das restrições são conhecidos previamente, não permitindo alterações dos mesmos ao longo da resolução do problema. Esse modelo possui dois subgrupos: a programação linear e a programação não linear. O modelo estocástico permite variações dos coeficientes da FO e/ou de pelo menos uma das restrições analisadas. Para Borkowska (1974), tradicionalmente empregam-se métodos determinísticos para solucionar problemas de fluxo de potência, porém, é necessário analisar o sistema previamente devido à incerteza dos parâmetros que o compõe.

Citam-se os métodos de Newton-Rapson, Gauss, Gauss-Seidel, desacoplado, desacoplado rápido, e método linearizado para solucionar problemas de fluxo de potência em redes de transmissão (GRAINGER; STEVENSON, 1996, MONTICELLI; GARCIA, 2003). Para as redes de distribuição radiais, citam-se os métodos de varredura direta e inversa e métodos baseados na matriz de impedância nodal implícita.

### 3.3.1 Método de varredura direta e inversa

O método de varredura direta e inversa destaca-se neste cenário devido a robustez e simplicidade de implementação. Além disso, o mesmo considera a característica radial dos sistemas de distribuição, aumentando a eficiência computacional para determinar o estado da rede.

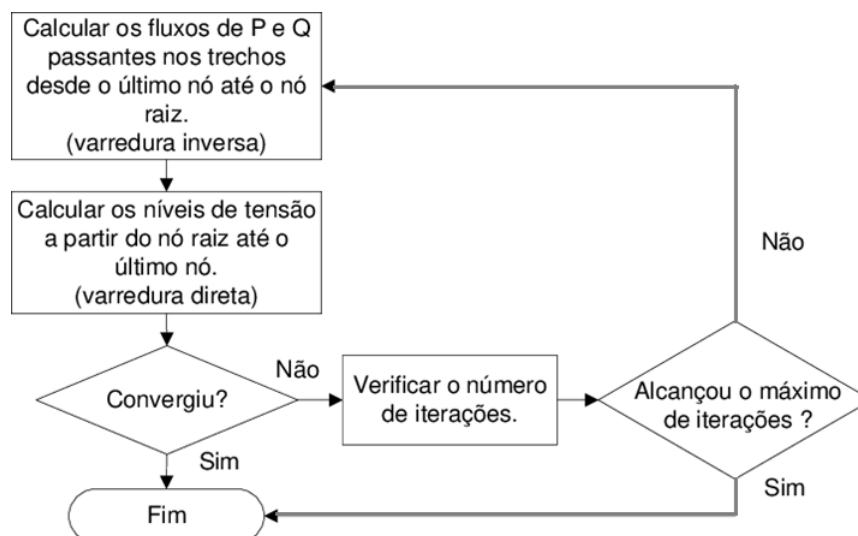
Segundo Falcão (2005), o processo inicia-se pela varredura inversa (*Backward*), a qual consiste em calcular correntes ou fluxos nas linhas, partindo-se das extremidades dos alimentadores até atingir a subestação, considerando uma estimativa inicial para as tensões nodais, normalmente utilizada 1 p.u. Ainda segundo o autor, a varredura direta (*Forward*), realizada em seguida, calcula as tensões nodais a partir do resultado da injeção de corrente ou potência realizada na etapa anterior e do valor conhecido da tensão na barra. Este processo repete-se até satisfazer um critério de convergência, onde o valor da tensão resultante de duas iterações consecutivas não apresente variação maior do que o valor de tolerância previamente estabelecido.

Este método de varredura direta/inversa abrange duas vertentes: baseada na Soma de Correntes ou na Soma de Potências. A formulação da Soma de Potências, abordada neste projeto segue o seguinte algoritmo (SIMONE, 2012):

1. Assume-se que as tensões iniciais nas barras são iguais à tensão da subestação;
2. Varredura Inversa: os fluxos de potência ativa e reativa são calculados para cada ramo, iniciando-se pelas barras extremas;
3. Varredura Direta: o ângulo das tensões nas barras e a magnitude são atualizados, a partir da subestação;
4. Teste de convergência: verificação da variação de magnitude e fase das tensões nodais realizadas na Etapa 3. Caso as diferenças forem menores do que a tolerância pré-estabelecida próxima a zero, o sistema é encerrado. Caso esta diferença for maior ou igual, o sistema é retornado para a Etapa 2; até que o critério de convergência seja satisfeito.

A Figura 2 apresenta o fluxograma com a descrição do Método de varredura direta e inversa utilizando a Soma de Potências.

Figura 2: Fluxograma do Método de varredura direta e inversa.

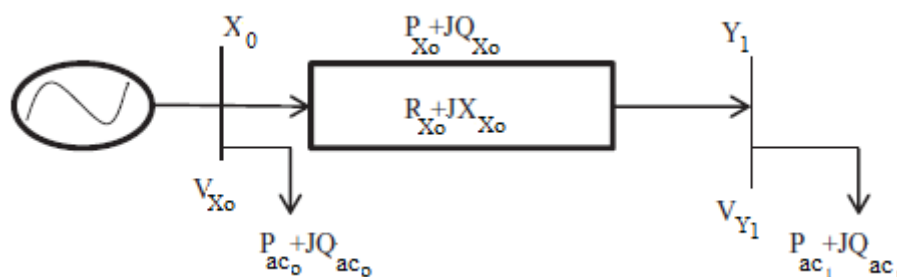


Fonte: NETO, F. O. N., et al. (2015).

### 3.3.2 Formulação para o método da Soma das Potências

A formulação para o método da Soma das Potências é desenvolvida da seguinte forma (PAIVA, 2006), considerando a configuração apresentada na Figura 3:

Figura 3: Sistema de distribuição simples.



Fonte: Adaptado de Devabalaji e Ravi (2015).

#### 3.3.2.1 Cálculo para potências acumuladas no sistema

Considerando que  $P_{ac1}$  significa a demanda ativa total acumulada no nó 1;  $P_i$  a demanda ativa do nó  $i$ ;  $L_{Pi}$  a perda de potência ativa no ramo  $i$  e  $N$  o número total de nós do sistema, o cálculo da potência ativa acumulada é representado pela Equação 1:



$$Pac_1 = \sum_{i=1}^N P_i + \sum_{i=2}^N LP_i \quad (1)$$

Podendo ser generalizada através da Equação 2:

$$Pac_i = Pac_{i+1} + LP_{i+1} \quad (2)$$

onde  $Pac_{i+1}$  é a potência ativa acumulado no nó  $i$ .

Quando há mais de um sucessor para um nó, a potência ativa acumulada no mesmo é dada por:

$$Pac_i = \sum_j Pac_j + \sum_j LP_j \quad (3)$$

onde  $j$  significa o próximo nó jusante ao nó  $i$ .

Considerando que  $Qac_1$  significa a demanda reativa total acumulada no nó 1;  $Q_i$  a demanda reativa do nó  $i$ ;  $QP_i$  a perda de potência reativa no ramo  $i$  e  $N$  o número total de nós do sistema, o cálculo da potência reativa acumulada é representado pela Equação 4:

$$Qac_1 = \sum_{i=1}^N Q_i + \sum_{i=2}^N LQ_i \quad (4)$$

Podendo ser generalizada através da Equação 5:

$$Qac_i = Qac_{i+1} + LQ_{i+1} \quad (5)$$

onde  $Qac_{i+1}$  é a potência reativa acumulado no nó  $i$ .

Quando há mais de um sucessor para um nó, a potência reativa acumulada no mesmo é dada por:

$$Qac_i = \sum_j Qac_j + \sum_j LQ_j \quad (6)$$

Considerando alocação de geração distribuída, as Equações 7 e 8 representam as potências ativa e reativa acumuladas, respectivamente:

$$Pac_i = P_i + Pac_{i+1} - LP_{i+1} - Pgi \quad se \quad Pac_{i+1} < 0 \quad (7)$$

$$Qac_i = Q_i + Qac_{i+1} - LQ_{i+1} - Qgi \quad se \quad Qac_{i+1} < 0 \quad (8)$$

onde  $Pgi$  e  $Qgi$  representam, respectivamente, uma geração de potência ativa e reativa alocada ao nó  $i$ .

### 3.3.2.2 Cálculo para perda de potências no sistema

Considerando  $R_i$  a resistência do ramo  $i$  e  $V_i$  o módulo de tensão no nó  $i$ , o cálculo da perda de potência ativa pode ser dado pela Equação 9:

$$LP_i = \frac{R_i * (Pac_i^2 + Qac_i^2)}{V_i^2} \quad (9)$$

Considerando  $X_i$  a reatância indutiva do ramo  $i$  e  $V_i$  o módulo de tensão no nó  $i$ , o cálculo da perda de potência reativa pode ser dado pela Equação 10:

$$LQ_i = \frac{X_i * (Pac_i^2 + Qac_i^2)}{V_i^2} \quad (10)$$

### 3.3.2.3 Cálculo para as tensões no sistema

O cálculo para a tensão no ramo é dado pela Equação 11:

$$V_i = \sqrt{-\frac{A_i}{2} + \sqrt{\left(\frac{A_i}{2}\right)^2 - B_i}} \quad (11)$$

Considerando que:

$$A_i = 2 * (Pac_i * R_i + Qac_i * X_i) - V_{i-1}^2 \quad (12)$$

$$B_i = (Pac_i^2 + Qac_i^2) * (R_i^2 + X_i^2) \quad (13)$$

### 3.3.3 Modelagem de sistemas

A modelagem de sistemas lineares visa melhorar o uso de recursos escassos a serem determinados a partir do conhecimento das necessidades e objetivos do problema. Este tipo de modelagem é inteiramente expressa em termos de equações lineares e devem seguir uma sequência.

A modelagem referente à Função Objetivo (FO) para sistemas não lineares é considerada côncava para problemas em que o propósito é maximizar a função e convexa caso seja desejado minimizá-la. Os sistemas de minimização da função objetivo estabelecem um

conjunto de restrições também convexas, sendo definidos como Métodos de Otimização Convexa.

Inicialmente, deve-se identificar as variáveis de decisão, representando-as por meio de símbolos algébricos; estabelecer as restrições do problema, expressando-as como equações ou inequações lineares em termos das variáveis de decisão previamente definidas e identificar o objetivo de otimização do problema, representando uma função linear das variáveis de decisão, podendo ser do tipo maximizar ou minimizar (FOGLIATTO, 2007).

Modelagens não lineares representam o sistema de maneira mais precisa, possuindo complexidade maior e possibilitando análises de características peculiares do sistema, como oscilações, bifurcações e estabilidade em função da entrada do mesmo. Para que o modelo seja estabelecido, deve-se considerar aquele capaz de atender requisitos operacionais, considerando uma aproximação razoável e simplicidade computacional.

### **3.3.4 Softwares para otimização de sistemas**

Os *softwares* de otimização de sistemas lineares e não lineares são ferramentas que garantem o suporte analítico à modelagem desenvolvida do sistema em questão. Segundo Ignácio e Filho (2004), estes *softwares* são, geralmente, ambientes iterativos que oferecem técnicas computacionais avançadas e compreensíveis ao usuário, gerando resultados com interfaces transparentes do problema desenvolvido.

De acordo com Cunha (2011), os *softwares* destinados à programação matemática estão divididos em: pacotes *stand-alone* e pacotes integrados a pilhas eletrônicas. Ainda segundo o autor, os pacotes *stand-alone* possuem suportes independentes, oferecem recursos para interface com banco de dados (SQL) e são citados como exemplo os programas: Lindo, GAMS, AMPL, Lingo e MATLAB, os quais possuem suporte para solucionar problemas de programação linear, não linear e quadrática.

Os pacotes integrados a pilhas eletrônicas possuem maior facilidade da análise de resultados e possuem grande disseminação no mercado recentemente. São citados como exemplo pelo autor os *softwares*: *Solver (Excel)* e *What's Best (WB)* que são capazes de solucionar problemas de programação linear e determinados tipos de problemas não lineares, desde que não seja um sistema de grande porte.

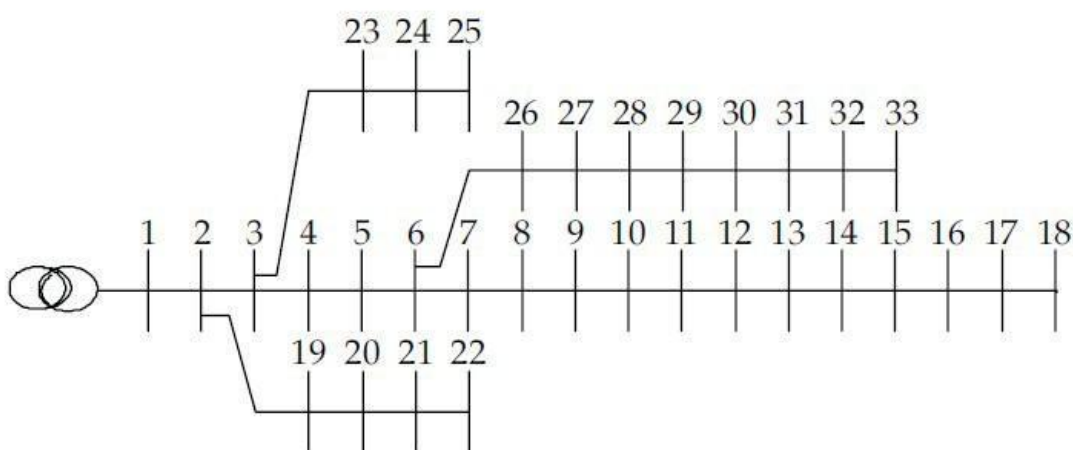
## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Com objetivo de avaliar o desempenho do método da Soma de Potências na redução de perda de potência ativa com alocação de geração distribuída, um caso teste foi implementado no sistema de 33 barras disponibilizado pelo IEEE. Além disso, o Instituto fornece os dados específicos para cada uma das barras da topologia para a realização de simulações, assim como a tensão nominal de linha na subestação. Sendo assim, o caso teste foi desenvolvido e, após os nós candidatos terem sido encontrados, a função *Solver*, do *software Excel*, foi utilizada a fim de que a quantidade de potência ativa injetada no sistema fosse obtida, resultando na menor perda possível de potência ativa na rede com alocação de geração distribuída.

### 4.1 Sistema teste IEEE de 33 barras

O sistema teste de 33 barras disponibilizado pelo IEEE, cujo diagrama é apresentado na Figura 4, foi utilizado para o desenvolvimento do projeto. O mesmo é composto por um alimentador de distribuição de energia elétrica com linhas e cargas equilibradas.

Figura 4: Topologia do sistema teste 33 barras.



Fonte: Adaptado de Devabalaji e Ravik (2015).

Os dados referentes ao sistema teste de 33 barras estão apresentados na Tabela 3. Os mesmos são fornecidos pelo IEEE e apresentam a resistência e a reatância, em ohms, a potências ativa, em Watt, e a potência reativa, em VAR, de cada barra da topologia, ressalta-se

que as potências da Tabela 3 estão alocadas nas barras caracterizadas pela coluna “Para”. Além disso, estabelece uma tensão nominal de linha na subestação igual a 12,66 kV.

Tabela 3: Valores definidos para o sistema de 33 barras.

Ramo	de	Para	Resistência [ $\Omega$ ]	Reatância [ $\Omega$ ]	Potência Ativa [W]	Potência Reativa [Var]
1	1	2	0,0922	0,047	100000	60000
2	2	3	0,493	0,2511	90000	40000
3	3	4	0,366	0,1864	120000	80000
4	4	5	0,3811	0,1941	60000	30000
5	5	6	0,819	0,707	60000	20000
6	6	7	0,1872	0,6188	200000	100000
7	7	8	0,7114	0,2351	200000	100000
8	8	9	1,03	0,74	60000	20000
9	9	10	1,044	0,74	60000	20000
10	10	11	0,1966	0,065	45000	30000
11	11	12	0,3744	0,1298	60000	35000
12	12	13	1,468	1,155	60000	35000
13	13	14	0,5416	0,7129	120000	80000
14	14	15	0,591	0,526	60000	10000
15	15	16	0,7463	0,545	60000	20000
16	16	17	1,289	1,721	60000	20000
17	17	18	0,732	0,574	90000	40000
18	2	19	0,164	0,1565	90000	40000
19	19	20	1,5042	1,3554	90000	40000
20	20	21	0,4095	0,4784	90000	40000
21	21	22	0,7089	0,9373	90000	40000
22	3	23	0,4512	0,3083	90000	40000
23	23	24	0,898	0,7091	420000	200000
24	24	25	0,896	0,7011	420000	200000
25	6	26	0,203	0,1034	60000	25000
26	26	27	0,2842	0,1447	60000	25000
27	27	28	1,059	0,9337	60000	20000
28	28	29	0,8042	0,7006	120000	70000
29	29	30	0,5075	0,2585	200000	600000
30	30	31	0,9744	0,963	150000	70000
31	31	32	0,3105	0,3619	210000	100000
32	32	33	0,341	0,5302	60000	40000

Fonte: Adaptado de Kashem (2000).

## 4.2 Metodologia de otimização proposta

O método da Soma de Potências foi utilizado para que as potências ativa e reativa acumuladas fossem obtidas. Além disso, a tensão em cada barra foi determinada através do método, considerando a robustez do sistema e a facilidade de convergência, foram realizadas três iterações até que o mesmo alcançasse estabilização razoável.

Portanto, por meio dos dados referentes ao sistema teste de 33 barras, as potências ativa e reativa acumuladas foram calculadas pelo Método da Soma de Potências. A Equação 7 foi utilizada para obtenção da potência ativa acumulada de cada nó e a Equação 8 para obtenção da potência reativa. Para este cálculo inicial, considerou-se a potência injetada por meio de alocação de geração distribuída igual a zero em ambos equacionamentos, ou seja, inexistência de GD na rede. Além disso, por meio da Equação 11, foram obtidos os valores de tensão em cada nó. Adotando a tolerância igual a 0,00001 como critério de parada, foram desenvolvidas três iterações para que os valores das tensões nos nós estabilizaram.

Em seguida, o Fator de Sensibilidade a Perda (LSF), foi aplicado a fim de obter os melhores nós para alocação de geração distribuída. Este fator é utilizado para determinar previamente a localização ideal para inserção de GD em sistemas de distribuição radial, visando à redução da perda de potência ativa e melhorias no perfil de tensão da rede.

Após identificação do nó que apresentou melhores resultados para redução de perda de potência ativa, a função *Solver* do *software Excel* foi utilizada para determinar qual deveria ser a potência ativa injetada na rede para que o sistema apresentasse desempenho máximo para alocação de uma GD. Em posse da localização ideal para inserção da GD, a função *Solver* do *software Excel* foi utilizada para que a quantidade de potência a ser injetada no ponto fosse obtida.

O método utilizado foi o GRG não linear, considerando que a célula objetivo, responsável por minimizar a perda de potência ativa, e a célula de restrição, responsável pela quantidade de potência a ser injetada, são obtidas por meio de operações matemáticas envolvendo potências e cálculos exponenciais sobre as variáveis de decisão. Em posse da localização ideal para inserção da GD, a função *Solver* do *software Excel* foi utilizada para que a quantidade de potência a ser injetada no ponto fosse obtida. Este método calcula o resultado final a partir de uma primeira solução viável e, a partir disso, obtém o Jacobiano, os multiplicadores de Lagrange e os gradientes do sistema para obter a melhor solução possível.

Além disso, o modelo determinístico foi adotado, uma vez que os dados do sistema foram definidos previamente e a derivada da função objetivo era igual a zero.

Em seguida o percentual da redução de perda foi calculado, sendo definida a localização ideal e a quantidade de potência ativa a ser injetada no sistema através da alocação de uma geração distribuída.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos em cada iteração para cada um dos nós “Para” da topologia após as três iterações serem realizadas para que o sistema alcançasse estabilidade. Nesta tabela contém as potências ativa e reativa acumuladas em cada iteração, além da tensão em cada uma das barras do sistema.

Tabela 4: Resultados para potências ativa e reativa acumuladas e tensões no ramo.

Ramo	de	Para	Potência Ativa Acumulada [W] 1ª Iteração	Potência Reativa Acumulada [Var] 1ª Iteração	Tensão [V] 1ª Iteração	Potência Ativa Acumulada [W] 2ª Iteração	Potência Reativa Acumulada [Var] 2ª Iteração	Tensão [V] 2ª Iteração	Potência Ativa Acumulada [W] 3ª Iteração	Potência Reativa Acumulada [Var] 3ª Iteração	Tensão [V] 3ª Iteração
1	1	2	3888173,36	2407054,44	12623,00	3912014,00	2423946,00	12622,40	3912149,00	2424045,00	12622,40
2	2	3	3377598,22	2160802,23	12445,00	3398811,00	2176252,00	12443,82	3398929,00	2176342,00	12443,81
3	3	4	2330796,37	1664411,35	12351,00	2347542,00	1677566,00	12348,91	2347640,00	1677644,00	12348,90
4	4	5	2193453,60	1575578,41	12258,00	2208771,00	1588006,00	12255,06	2208860,00	1588079,00	12255,05
5	5	6	2099192,06	1516002,21	12026,00	2110381,00	1524866,00	12021,59	2110441,00	1524914,00	12021,57
6	6	7	1090862,89	519955,15	11982,00	1093341,00	521566,00	11977,46	1093357,00	521575,70	11977,44
7	7	8	886596,35	418545,17	11921,00	888506,30	419968,10	11916,13	888517,70	419976,60	11916,10
8	8	9	682957,43	315930,79	11841,00	684328,40	316966,50	11836,76	684336,30	316972,50	11836,73
9	9	10	619892,31	293758,19	11768,00	620769,70	294444,10	11763,13	620774,70	294447,90	11763,10
10	10	11	559416,61	273600,92	11757,00	560216,30	274261,10	11752,24	560220,90	274264,80	11752,22
11	11	12	513661,94	243339,29	11738,00	514335,80	243955,80	11733,13	514339,50	243959,30	11733,10
12	12	13	451404,79	206563,39	11661,00	451671,30	206859,50	11655,73	451672,70	206861,10	11655,70
13	13	14	390790,21	170754,43	11632,00	390942,60	170900,30	11627,03	390943,40	170901,10	11627,00
14	14	15	270490,23	90487,44	11614,00	270585,80	90582,79	11609,15	270586,40	90583,31	11609,12
15	15	16	210254,35	80315,18	11597,00	210304,60	80377,38	11591,83	210304,80	80377,72	11591,80
16	16	17	150044,30	60034,739	11571,00	150053,10	60041,64	11566,16	150053,10	60041,68	11566,13
17	17	18	90000,00	40000,00	11564,00	90000,00	40000,00	11558,48	90000,00	40000,00	11558,45
18	2	19	360962,53	160911,88	11556,00	361165,80	161104,60	11551,17	361166,80	161105,50	11551,14
19	19	20	270142,10	120172,61	11507,00	270172,40	120209,40	11501,66	270172,60	120209,60	11501,63
20	20	21	180042,90	80056,73	11497,00	180052,10	80068,89	11491,91	180052,10	80068,95	11491,88
21	21	22	90000,00	40000,00	11488,00	90000,00	40000,00	11483,08	90000,00	40000,00	11483,05
22	3	23	935051,74	444788,59	11439,00	937578,80	445973,70	11434,06	937586,00	445979,30	11434,03
23	23	24	841209,76	400946,61	11348,00	841517,90	401187,80	11342,33	841519,40	401188,90	11342,30
24	24	25	420000,00	200000,00	11302,00	420000,00	200000,00	11296,60	420000,00	200000,00	11296,57
25	6	26	944304,29	969227,61	11276,00	952159,90	975463,70	11270,50	952199,70	975495,30	11270,47
26	26	27	881351,02	942723,95	11242,00	888361,80	948529,90	11235,81	888397,40	948559,30	11235,77
27	27	28	811539,01	909072,90	11088,00	815466,00	912159,90	11081,00	815485,70	912175,40	11080,96
28	28	29	744841,03	883237,77	10977,00	746525,90	884371,50	10969,78	746534,30	884377,10	10969,74
29	29	30	621532,37	811552,47	10929,00	622079,10	812106,50	10921,62	622081,80	812109,20	10921,59
30	30	31	420190,28	210226,09	10872,00	420258,60	210307,30	10865,28	420258,90	210307,70	10865,24
31	31	32	270011,06	140017,20	10860,00	270015,00	140023,40	10852,88	270015,10	140023,40	10852,85
32	32	33	60000,00	40000,00	10856,00	60000,00	40000,00	10849,04	60000,00	40000,00	10849,01

Fonte: Do autor (2019).

Ao comparar os valores obtidos nas iterações para tensões em um mesmo nó, nota-se que a diferença máxima da primeira para a segunda acontece no nó 33, sendo igual a 6,99V. Dessa maneira, a variação da primeira para a segunda iteração em relação à tensão nominal é



dada por 6,99V dividida pela tensão nominal de 12,66 kV, resultando em  $5,52 \times 10^{-4}$ . Como a tolerância estabelecida foi igual a 0,00001, foi necessário realizar a terceira iteração no sistema.

A maior diferença de tensão entre a segunda e a terceira iteração ocorre no último nó, sendo igual a 0,04V. Dessa maneira, a variação máxima em relação à tensão nominal resulta em  $3,16 \times 10^{-6}$ . Sendo assim, o sistema entra em estabilidade, sendo inferior à tolerância adotada de 0,00001.

Em seguida, as perdas de potência ativa e reativa em cada ramo foram calculadas, utilizando as Equações 9 e 10, respectivamente. Os resultados obtidos estão na Tabela 5.

Tabela 5: Resultado para perda de potências ativa e reativa no sistema.

Ramo	de	Para	Perda de Potência Ativa [W]	Perda de Potência Reativa [Var]
1	1	2	12257,21	6248,25
2	2	3	51860,84	26414,31
3	3	4	19982,78	10177,02
4	4	5	18780,30	9565,09
5	5	6	38419,15	33165,25
6	6	7	1914,91	6329,83
7	7	8	4838,96	1599,16
8	8	9	4181,42	3004,13
9	9	10	3561,68	2524,56
10	10	11	553,82	183,10
11	11	12	881,33	305,55
12	12	13	2666,82	2098,21
13	13	14	729,32	960,00
14	14	15	357,05	317,78
15	15	16	281,53	205,59
16	16	17	251,69	336,04
17	17	18	53,15	41,68
18	2	19	192,23	183,44
19	19	20	994,29	895,94
20	20	21	120,40	140,66
21	21	22	52,15	68,95
22	3	23	3720,28	2542,02
23	23	24	6066,63	4790,47
24	24	25	1519,40	1188,90
25	6	26	2969,77	1512,68
26	26	27	3802,34	1935,96
27	27	28	12911,78	11384,07
28	28	29	8951,45	7798,30
29	29	30	4452,53	2267,94
30	30	31	1822,85	1801,52
31	31	32	243,89	284,26
32	32	33	15,07	23,42

Fonte: Do autor (2019).

Os resultados obtidos para perda de potência ativa e reativa, em primeiro momento, não consideram injeção de potência por meio de alocação de geração distribuída, acarretando em grandes perdas no sistema. O somatório desta perda de potência ativa em todo o sistema é igual a 209,41 kW, representado 5,6% do total de potência ativa demandada no mesmo.

A partir destes valores encontrados, o Fator de Sensibilidade à Perda (LSF – *Loss Sensitivity Factor*) foi aplicado com a finalidade de obtenção dos nós que poderiam apresentar a localização ideal para inserção de GD. Este fator determina que quanto maior for o valor encontrado no nó, maior é a probabilidade do mesmo ter a localização ideal para inserção. A Equação 14 demonstra como o LSF é calculado (DEVABALAJI, RAVI, 2015).

$$LSF = \frac{2 * R_i * Pac_i}{V_i^2} \quad (14)$$

Os valores obtidos, juntamente com o mapa de calor, encontram-se na Tabela 6. Quanto mais escuro o tom de vermelho, maior foi o valor obtido para o fator, portanto, maiores são as possibilidades deste nó ser o escolhido.

Tabela 6: Resultados obtidos para o LSF no sistema.

Ramo	de	Para	LSF
1	1	2	0,004528
2	2	3	0,021643
3	3	4	0,011269
4	4	5	0,011210
5	5	6	0,023920
6	6	7	0,002853
7	7	8	0,008903
8	8	9	0,010062
9	9	10	0,009367
10	10	11	0,001595
11	11	12	0,002798
12	12	13	0,009761
13	13	14	0,003132
14	14	15	0,002373
15	15	16	0,002336
16	16	17	0,002892
17	17	18	0,000986
18	2	19	0,000888
19	19	20	0,006144
20	20	21	0,001117
21	21	22	0,000968
22	3	23	0,006472
23	23	24	0,011748
24	24	25	0,005898
25	6	26	0,003043
26	26	27	0,004000
27	27	28	0,014067
28	28	29	0,009978
29	29	30	0,005293
30	30	31	0,006938
31	31	32	0,001424
32	32	33	0,000348

Fonte: Do autor (2019).

Considerando os resultados obtidos, os nós candidatos para alocação de geração distribuída, são, em sequência, o 6 e o 3. Este método consegue, portanto, determinar os nós mais propensos à alocação de GD, porém, como será injetada potência ativa em apenas um nó, o ponto 6 foi escolhido por ter apresentado o maior resultado para o cálculo de LSF.

Em posse da localização ideal para inserção da GD, a função *Solver* do *software Excel* foi utilizada para que a quantidade de potência a ser injetada no ponto fosse obtida.

A fim de determinar a localização ideal, a ferramenta foi programada para minimizar o somatório da perda de potência ativa do sistema, de forma que cumprisse as restrições do mesmo. As Equações 15 e 16, representam, respectivamente, essas implementações.

$$F = \min(LP_i) = \sum_{i=1}^N \frac{R_i * (Pac_i^2 + Qac_i^2)}{V_i^2} \quad (15)$$

$$0 \leq P_i \leq \sum P_{max} \quad (16)$$

A célula variável no *Solver* foi selecionada como a responsável pela injeção de potência ativa apenas no nó 6, como determinado anteriormente. O valor para *Pmax* foi estabelecido como 5 MW, o qual representa o valor máximo de uma minigeração para que o programa pudesse retornar a quantidade de potência ativa exata a ser alocada, sem interferência de limitações para o valor pré-determinado para *Pmax*.

O valor encontrado para a quantidade a ser injetada no nó foi igual a 2,598 MW. Esta alocação de potência resulta em uma somatória de perda total de potência ativa igual a 108,73 kW, representando uma redução de 48,08% de perdas. Este valor obtido representaria 2,9% de perdas em relação ao total de potência ativa demandada no sistema, o qual, sem a inserção de GD, representa 5,6%. A Tabela 7 apresenta os valores de perda de potências ativa e reativa em cada nó após alocação da geração distribuída no sistema.

Tabela 7: Valores para perda de potências ativa e reativa após inserção de GD.

Ramo	de	Para	Perda de Potência Ativa [W]	Perda de Potência Reativa [Var]
1	1	2	4090,71	2085,29
2	2	3	15976,58	8137,36
3	3	4	6490,64	3305,62
4	4	5	6341,92	3230,04
5	5	6	13426,28	11590,21
6	6	7	1768,58	5846,15
7	7	8	4466,41	1476,04
8	8	9	3856,53	2770,71
9	9	10	3284,21	2327,89
10	10	11	510,59	168,81
11	11	12	812,41	281,65
12	12	13	2457,78	1933,74
13	13	14	672,08	884,65
14	14	15	328,96	292,78
15	15	16	259,35	189,39
16	16	17	231,83	309,53
17	17	18	48,95	38,39
18	2	19	176,93	168,84
19	19	20	914,98	824,46
20	20	21	110,79	129,43
21	21	22	47,98	63,44
22	3	23	3415,60	2333,84
23	23	24	5568,91	4397,46
24	24	25	1394,28	1091,00
25	6	26	2709,83	1380,28
26	26	27	3468,76	1766,11
27	27	28	11776,40	10383,03
28	28	29	8163,38	7111,74
29	29	30	4060,01	2068,01
30	30	31	1661,25	1641,81
31	31	32	222,25	259,04
32	32	33	13,73	21,34

Fonte: Do autor (2019).

Os resultados obtidos foram positivos, mostrando que a perda de potência ativa no sistema foi reduzida quase pela metade. As Figuras 5 e 6 representam, respectivamente, as perdas de potência ativa no sistema sem e com alocação de geração distribuída.

Figura 5: Perda de potência ativa no sistema sem alocação de geração distribuída.



Fonte: Do autor (2019).

Figura 6: Perda de potência ativa no sistema com alocação de geração distribuída.



Fonte: Do autor (2019).

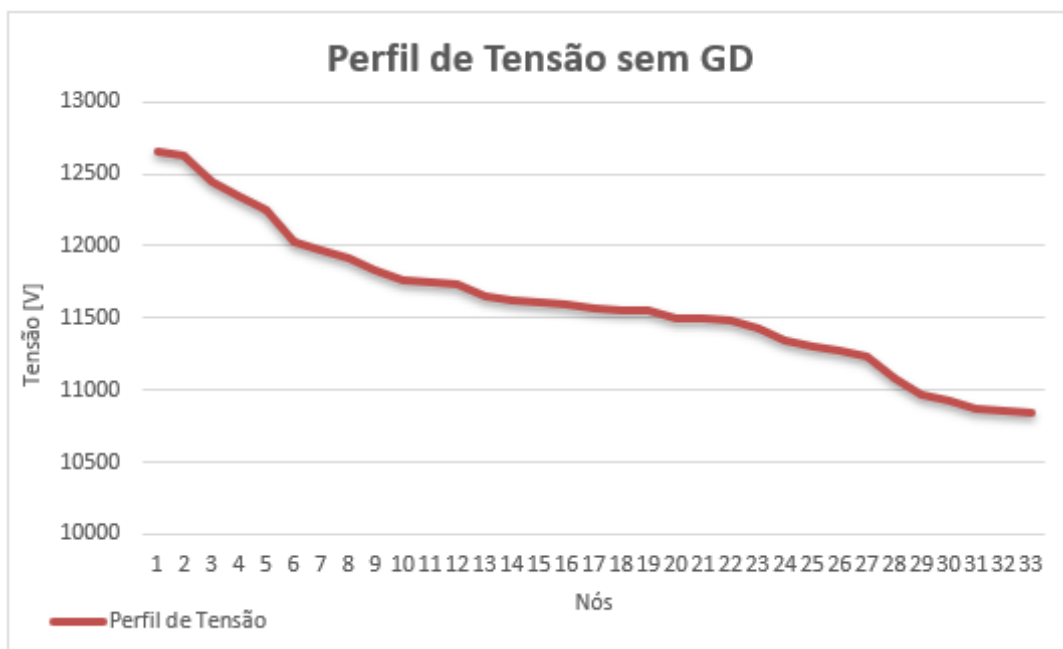
Através de análise gráfica, é notável que após a alocação da GD, a redução de perda de potência ativa nos ramos que estão a montante do nó 6 em que foi inserida a GD. Além disso, esta redução de perda deu-se em praticamente todos os nós do sistema, em menores proporções.

Prakash e Lakshminarayana (2016) realizaram um trabalho com objetivo de testar posicionamentos distintos para inserção de geração distribuída a fim de reduzir a perda de potência ativa no sistema teste de 33 barras por meio do algoritmo de enxame de partículas (PSO) e, apesar da adoção de métodos distintos, os resultados alcançados foram extremamente próximos aos obtidos neste trabalho. Os autores encontraram uma perda de potência ativa inicial igual a 210,99 kW e, após injeção de potência ativa por meio de GD, obtiveram perda de potência ativa de 110,99 kW, com redução de 47,39%.

Sendo assim, é possível notar que, independentemente do método adotado, a redução da perda de potência ativa no sistema teste de 33 barras através da alocação de geração distribuída é significativa, reduzindo impactos ambientais, econômicos e sociais.

O perfil de tensão do sistema, o qual representa a tensão disponível nos nós, também foi analisado. As Figuras 7 e 8 representam, respectivamente, o perfil de tensão na ausência e presença de geração distribuída no sistema.

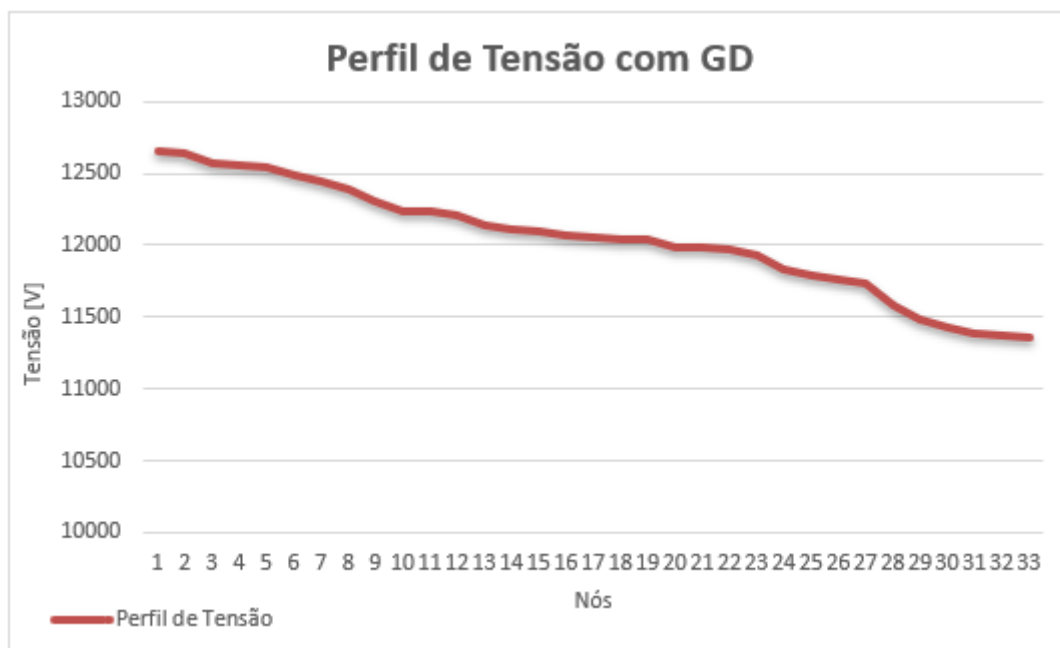
Figura 7: Perfil de tensão do sistema sem alocação de geração distribuída.



Fonte: Do autor (2019).



Figura 8: Perfil de tensão do sistema com alocação de geração distribuída.



Fonte: Do autor (2019).

A partir da análise gráfica, é possível notar melhoria no perfil de tensão da rede ao alocar uma geração distribuída. Percebe-se que após inserção o sistema apresentou um intervalo de variação da tensão reduzido, acarretando maior estabilidade ao mesmo. A alocação de GD proporciona redução do carregamento do sistema, melhorando o perfil de tensão e consequentemente a qualidade da energia entregue aos consumidores.

A Tabela 8 classifica a situação da tensão de atendimento como adequada, precária ou crítica segundo as normas estabelecidas pelo PRODIST. Os dados utilizados consideram pontos de conexão em tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV (ANEEL, 2017).

Tabela 8: Situação da Tensão de Atendimento para tensão nominal entre 1 kV e 69 kV.

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

Fonte: ANEEL (2017).

A partir da análise do sistema teste em relação à norma estabelecida pelo PRODIST, as barras seriam classificadas de acordo com a Tabela 9, considerando o sistema sem alocação de GD e em seguida os resultados após inserção.

Tabela 9: Classificação das barras do sistema teste antes a após alocação de GD.

Situação	Adequada	Precária	Crítica
Sem alocação de GD	Barras 1 à 9	Barras 10 à 23	Barras 24 à 33
Com alocação de GD	Barras 1 à 25	Barra 26	Barras 27 à 33

Fonte: Do autor (2019).

De acordo com os resultados obtidos percebe-se que o sistema alcançou maior estabilidade e após alocação de GD, as barras 10 à 25 enquadraram-se como adequada, enquanto a barra 26 passou a ser classificada como precária ao invés de crítica. Sendo assim, apenas das barras 27 à 33 continuaram sendo classificadas como críticas, melhorando significativamente os resultados obtidos para a classificação das barras do sistema.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo a redução de perda de potência ativa nas redes de distribuição de energia elétrica através da alocação de geração distribuída no sistema. Sendo assim, para que este objetivo fosse alcançado, o método da soma de potências foi implementado no sistema teste de 33 barras, o qual se mostrou robusto para aplicação em sistemas radiais, convergindo com apenas três iterações.

Além disso, também foi comprovada a eficiência da utilização do LSF com o intuito de determinar a localização ideal para inserção de geração distribuída. Este fator conseguiu estabelecer o nó exato para redução máxima da perda de potência ativa. Uma limitação encontrada na utilização do LSF foi quanto a obtenção de um número maior de geração distribuída a ser alocada simultaneamente em uma mesma topologia. Porém, o método consegue determinar o próximo ponto ótimo para realizar esta inserção, sendo possível desenvolver análises distintas. Considerando que normalmente o investimento para implantação de GD é alto e realizado de maneira única, o trabalho abordou apenas uma alocação.

Em relação à técnica de otimização proposta, através da ferramenta *Solver*, os resultados foram satisfatórios, determinando qual potência ativa ótima seria inserida no nó escolhido para que a redução alcançasse o maior percentual possível. Esta ferramenta é de simples abordagem e, a partir da definição específica para as restrições do sistema, consegue determinar valores exatos para variados tipos de problemas e áreas.

Dessa maneira, o objetivo do trabalho foi alcançado, comprovando o desempenho dos métodos utilizados e desenvolvendo análises sobre a rede de distribuição abordada. Além disso, foi possível demonstrar a melhoria no perfil de tensão da rede e comprovar uma redução de 48,08% na perda de potência ativa do sistema a partir da alocação de uma fonte renovável, acarretando vantagens ambientais, sociais e econômicas para o setor elétrico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRADEE. *Setor Elétrico: Redes de Energia Elétrica*, 2017. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/redes-de-energia-eletrica/>>. Acesso em: 5 de fev. de 2019.

ABRADEE. *Setor de Distribuição: A Distribuição de Energia*, 2018. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia/>>. Acesso em: 5 de nov. de 2018.

ABRIL. *Além de sustentáveis, energia eólica e pequenas centrais hidrelétricas são ótimos investimentos*, 2018. Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/negocios/dino/alem-de-sustentaveis-energia-eolica-e-pequenas-centrais-hidreletricas-sao-otimos-investimentos/>>. Acesso em: 20 de set. de 2018.

ACHARYA, N., MAHAT, P., MITHULANANTHAN, N. *An analytical approach for DG allocation in primary distribution network*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 28, n. 10, p. 669-678, 2006.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Regulação dos Serviços de Distribuição*, 2015. Disponível em <[http://www.aneel.gov.br/regulacao-da-distribuicao/-/asset\\_publisher/nHNpDfkNeRpN/content/regulacao-dos-servicos-de-distribuicao/656827?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Ffre](http://www.aneel.gov.br/regulacao-da-distribuicao/-/asset_publisher/nHNpDfkNeRpN/content/regulacao-dos-servicos-de-distribuicao/656827?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Ffre)> Acesso em: 8 de jan. 2019.

ALTERIMA. *Micro Usina*, 2011. Disponível em: <<http://www.alterima.com.br/index.asp?InCdSecao=26>>. Acesso em: 08 de out. de 2018.

ANEEL. *Geração Distribuída: Unidades Consumidoras com Geração Distribuída*, 2017. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD\\_Fonte.asp](http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp)>. Acesso em: 20 de out. de 2018.

ANEEL. *Geração Distribuída: Micro e Minigeração Distribuídas*, 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>>. Acesso em: 07 de fev. de 2018.

ANEEL. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. 3ª ed. – Brasília, 2002. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>>. Acesso em: 17 de ago. de 2018.

ANEEL, *Resolução Homologatória No 1.996, de 8 de Dezembro de 2015*. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2015/048/resultado/reh20151996ti.pdf>>. Acesso em: 06 de nov. de 2018.

ANEEL, *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST*, 2017. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Resolução Normativa número 794/2017. Acesso em: 13 de jun de 2019.

ARALDI, A. A. R. *Pesquisa Operacional: Programação Não Linear*. Revista Ensino e Educação, 2015. Disponível em: <<http://www.ensinoeinformacao.com/programacao-nao-linear>>. Acesso em: 20 de fev. de 2018.

ARAÚJO, I. M. et al. *Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas Paralelo para Minimização de Perdas de Potência Ativa em Sistemas Elétricos de Potência*, 2015. Disponível em: <<http://www.lbd.dcc.ufmg.br/colecoes/wperformance/2015/017.pdf>>. Acesso em: 25 de fev. de 2018.

BARBOSA, W. P.; AZEVEDO, A. C. S. *Geração Distribuída: Vantagens e Desvantagens*. In: II Simpósio de Estudos e Pesquisas em Ciências Ambientais na Amazônia, 2014, Salvador. Disponível em: <[http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mudnacaclimatica/2014/artigo\\_gd.pdf](http://www.feam.br/images/stories/arquivos/mudnacaclimatica/2014/artigo_gd.pdf)>. Acesso em: 12 de fev. de 2018.

BORÉM, L. E.; VASCONCELOS, V. *Análise do Impacto da Geração Distribuída na Estabilidade Transitória*, 2016. Monografia (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade de Brasília. Disponível em: <<https://fga.unb.br/articles/0001/6872/TCCultversaoLuizeRafael.pdf>>. Acesso em: 15 de abril de 2019.

BORKOWSKA, B. *Probabilistic load flow*. IEEE Trans. on Power Systems, New York, v. PAS-93, n. 3, p. 752-755, 1974.

CARDOSO, A. *Fundamentos da Pesquisa Operacional*. Alfenas: Universidade Federal de Alfenas, 2011. 6 f. Apostila de Pesquisa Operacional. Disponível em: <<http://www.unifal-mg.edu.br/matematica/files/file/po.pdf>>. Acesso em: 18 de fev. de 2018.

COELHO, F. C. R. *Alocação de Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica via Otimização Bioinspirada na Ecolocalização de Morcegos*, 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora. Disponível em: <<https://repositorio.ufjf.br/jspui/bitstream/ufjf/1203/1/franciscocarlosrodriguescoelho.pdf>>. Acesso em: 12 de fev. de 2018.

Companhia Paranaense de energia. *Utilização e Aplicação de Redes de Distribuição Subterrâneas*, 2010. Disponível em: <[https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/redes\\_de\\_distribuicao\\_subterraneas/\\$FILE/RedesDeDistribuicaoSubterraneas-5.pdf](https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/redes_de_distribuicao_subterraneas/$FILE/RedesDeDistribuicaoSubterraneas-5.pdf)>. Acesso em: 13 de março de 2019.

CUNHA, C. B. *Softwares de Programação Matemática*. São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011. 2-3 f. Apostila de Engenharia de Transportes. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2455504/mod\\_resource/content/1/Softwares\\_PO\\_mar-2011.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2455504/mod_resource/content/1/Softwares_PO_mar-2011.pdf)>. Acesso em: 20 de fev. de 2018.

DAVABALAJI, K. R.; RAVI, K. *Optimal Size Siting of Multiple DG and DSTATCOM in Radial Distribution System Using Bacterial Foraging Optimizatin Algorithm*, 2015. School of Electrical Engineering, VIT University - India. Acesso em: 20 de março de 2019.

Electrical Engineering. *The Structure of Electric Power Systems*, 2017. Disponível em: <<https://electrical-engineering-portal.com/electric-power-systems>>. Acessado em: 18 de abril de 2018.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. *Demanda de Energia 2050*. Série Estudos da Demanda de Energia. Nota Técnica DEA 13/15. Rio de Janeiro, 2016. Acesso em: 17 de jun. de 2019.

FALCÃO, D. M. *Fluxo de Potência em Redes de Distribuição Radiais*, 2005. Disponível em: <[http://www.nacad.ufrj.br/~falcao/coe751/FluxoDistrib\[1\]](http://www.nacad.ufrj.br/~falcao/coe751/FluxoDistrib[1])>. Acesso em: 10 de abril de 2019.

FOGLIATTO, F. *Pesquisa Operacional*. Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007. 5-6 f. Apostila para o curso de Engenharia de Produção. Disponível em: <[http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/disciplinas/382\\_po\\_apostila\\_completa\\_mais\\_livro.pdf](http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/disciplinas/382_po_apostila_completa_mais_livro.pdf)>. Acesso em: 18 de fev. de 2018.

GEVABALAJI, K. R.; RAVI, K. *Optimal Size and Siting of Multiple DG and DSTATCOM in Radial Distribution System Using Bacterial Foraging Optimization Algorithm*, 2015. Acesso em: 20 de março de 2019.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. *Otimização Combinatória e Programação Linear: Modelos e Algoritmos*. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2005.

GOMES, F. V. *Análise de Sistemas Elétricos de Potência*. Curso de Engenharia Elétrica, 2012. Universidade Federal de Juiz de Fora. Disponível em: <[http://www.ufjf.br/flavio\\_gomes/files/2011/01/Aula-02\\_ENE005.pdf](http://www.ufjf.br/flavio_gomes/files/2011/01/Aula-02_ENE005.pdf)> Acesso em: 11 de set. de 2018.

GOMIDE, F. *Programação Não Linear*. Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 2013. 26-27 f. Apostila de Planejamento e Análise de Sistemas de Produção. Disponível em: <[http://www.dca.fee.unicamp.br/~gomide/courses/IA810/transp/IA810ProgramacaoNaoLinear\\_3.pdf](http://www.dca.fee.unicamp.br/~gomide/courses/IA810/transp/IA810ProgramacaoNaoLinear_3.pdf)>. Acesso em: 21 de fev. de 2018.

GOVERNO DO BRASIL. *Entenda como a Energia Elétrica chega às casas*, 2017. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/noticias/infraestrutura/2014/08/entenda-como-a-energia-eletrica-chega-a-sua-casa>>. Acesso em: 03 de out. de 2018.

GRAINGER, J.; STEVENSON, W. *Análisis de sistemas eléctricos de potencia*. México: McGraw Hill. 1996. 740 p.

IEEE. *Advancing Technology for Humanity: Organização*, 2018. Disponível em: <<http://www.ieee.org.br/organizacao/>>. Acesso em: 15 de fev. de 2018.

IGNÁCIO, A. A. V.; FILHO, V. J. M. *Seleção de Software: O uso de software de modelagem AIMMS na solução de problemas de programação matemática*, 2004. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0101-74382004000100011](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-74382004000100011)>. Acesso em: 22 de fev. de 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. *O que é Geração Distribuída*, 2008. Disponível em: <[http://www.inee.org.br/forum\\_ger\\_distrib.asp](http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp)>. Acesso em: 16 de fev. de 2018.

INTER ENERGIA. *Vantagens da Geração Distribuída de Energia*, 2016. Disponível em: <<https://www.interenergia.com.br/single-post/2016/07/29/10-vantagens-da-Gera%C3%A7%C3%A3o-Distribu%C3%ADa-de-Energia>>. Acesso em: 03 de out. de 2018.

JARDIM, C. S. et al. *O potencial dos sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica em áreas urbanas: dois estudos de caso*, 2004. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022004000200029&script=sci\\_arttext](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022004000200029&script=sci_arttext)>. Acesso em: 20 de fev. de 2018.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J. *Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica*. 1. ed. São Paulo: EdigardBlucher, 2005.

KASHEM, M. A., et al. *A Novel Method for Loss Minimization in Distribution Networks*, 2000. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/855672>>. Acesso em: 02 de maio de 2019.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Brasil mantém a maior proporção de renováveis dentre os BRICS*, 2018. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset\\_publisher/32hLrOzMKwWb/content/brasil-mantem-a-maior-proporcao-de-renovaveis-dentre-os-brics](http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/brasil-mantem-a-maior-proporcao-de-renovaveis-dentre-os-brics)>. Acesso em: 20 de out. de 2018.

MONTICELLI, A.; GARCIA, A. *Introdução a sistema de energia elétrica*. 1. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2003.

NARUTO, D. T. *Vantagens e Desvantagens da Geração Distribuída e Estudo de caso de um Sistema Solar Fotovoltaico conectado à rede elétrica*, 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10020290.pdf>>. Acesso em: 10 de fev. de 2019.

NETO, F. S. O.; et al. *Representação Nó-Profundidade Aplicada aos Estudos Elétricos para Recomposição de uma Rede de Distribuição Universitária*. VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2015. Universidade Federal do Ceará – CE. Acesso em: 21 de jun. 2019.

OLADE. *Organización Latino Americana de Energia*. Curso de La Generación Distribuida. SABA System, 2011. Disponível em: <<http://www.olade.org/elearning>>. Acesso em 12 de fev de 2018.

PAIVA, R. R. C. *Fluxo de Potência Ótimo em Redes de Distribuição de Energia com a Presença de Geração Distribuída: Um Novo Algoritmo para Auxiliar a Análise do Perfil de Tensão*, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/88796/234093.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 05 de abril de 2019.

PEREIRA, M. *Otimização de Fluxo de Potência em Redes Elétricas com a UPFC*, 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

PEREIRA, A. L.; CHAVES, G. de L. D.; CELESTE, W. C.; COURA, D. J. C. Estudo dos instrumentos de política para promoção das redes inteligentes de energia. Anais do XXIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Foz do Iguaçu - PR, Brasil, 18-21/10/2015.

PORTAL UTFPR. *Entenda a Importância e as Vantagens da Automação na Transmissão e Distribuição da Energia Elétrica*, 2017. Disponível em: <<http://portal.utfpr.edu.br/noticias/curitiba/entenda-a-importancia-e-as-vantagens-da-automacao-na-transmissao-e-distribuicao-da-energia-eletrica>>. Acesso em: 18 de abril de 2019.

PRAKASH, D. B.; LAKSHMINARAYANA, C. *Multiple DG Placements in Distribution System for Power Loss Reduction Using PSO Algorithm Download*. Global Colloquium in Recent Advancement and Effectual Researches in Engineering, Science and Technology. Índia – Elsevier – 2-16.

PUGER, E. B. *Fluxo de Carga Não – Iterativo para a Análise de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Radiais e Malhados*, 2013. Dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. Disponível em: <[http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/lapsee/2013\\_diss\\_elson\\_puger.pdf](http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/lapsee/2013_diss_elson_puger.pdf)>. Acesso em: 02 de fev. de 2018.

REIS, L. B. *Geração de energia elétrica: Tecnologia, Inserção Ambiental, Planejamento, Operação e Análise de Viabilidade*. 3ª ed. - Barueri, SP: Manole, 2003.

RIBEIRO, J. M. S. Sistema de Distribuição: Aspectos Gerais. 2015. Disponível em: <[https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/apostila\\_sdee\\_01](https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/apostila_sdee_01)>. Acesso em: 18 de março de 2019.

SEMENSATO, M. *Fluxo de Potência em sistemas de distribuição*, 2013. Disponível em: <<http://ifgjatai.webcindario.com/fluxo.pdf>>. Acesso em: 02 de fev. de 2018.

SILVA, B. W. *Pesquisa Operacional: Visão Geral*, 2013. Disponível em: <<https://www.blogger.com/blogin.g?blogspotURL=http://www.bwsconsultoria.com/2011/04/pesquisa-operacional-visao-geral.html>>. Acesso em: 12 de fev. de 2018.

SILVA, D. M. K. *Fluxo de Potência para Sistemas de Distribuição considerando Redução de Barras*, 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina. Disponível em: <<http://www.uel.br/ctu/deel/TCC/TCC2015-DavidMaykonKrepeskySilva.pdf>>. Acesso em: 02 de fev. de 2018.



SILVEIRA V. D. F. et al. *Os Desafios da Geração Distribuída e sua Projeção para o Futuro*. Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 2017. Disponível em: <<https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos17/28625375.pdf>>. Acesso em: 03 de março de 2019.

SIMONE, L. F. C. *Reconfiguração de Redes para Restabelecimento de Energia em um Sistema de Distribuição Real*, 2012. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Carlos. Disponível em: <<http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-10042013-144305/?&lang=br>>. Acesso em: 14 de março de 2019.

SKIRUPA, T.; MARTINS, M. T. F.; PAZ, M. C. R. *Alocação Ótima de Geração Distribuída Fotovoltaica para Redução de Perdas de Energia em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica: Um Estudo de Caso*, 2018. Disponível em: <<http://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/viewFile/173/173>>. Acesso em: 03 de dez. de 2018.

TOLMASQUIM, M. T. *Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólico, Solar, Oceânica*. Empresa de Pesquisa Energética. 1ª ed. - Rio de Janeiro, 2016.

TORTELLI, O. L. *Sistemas Elétricos de Potência*, 2009. Disponível em: <<https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840834/59/SistemaEletrico1.pdf>>. Acesso em: 29 de agosto de 2018.

VIEIRA, T. L.; SILVA, V. V. R. *Modelagem a Vazio do Sistema Teste de Distribuição de 34 nós IEE pelo Software Simulink em Ambient MATLAB*, 2008. Disponível em: <<http://repositorio.furg.br/handle/1/7155>>. Acesso em: 02 de fev. de 2018.

WRIGHT, J. T.; CARVALHO, D. E.; SPERS R. G. *Previsão do Impacto Futuro de Tecnologias Disruptivas de Geração Distribuída sobre o Segmento de Distribuição de Energia Elétrica*, 2007. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/citenel2007/pdf/it108.pdf>>. Acesso em: 09 de ago. de 2018.